Department of Physics School of Science The University of Tokyo

# **Annual Report**

## 2007

## 平成19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

## 改版履歴:

version 1, 2008.07.03 発行

version 2, 2008.07.11 誤記修正 pdf 版のみ 上田研究室:一般物理実験から一般物理理論へ 平成19年度(2007年4月 2008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します。この小冊子が物理学教室で行われている多彩で活発な研 究・教育の現状を知っていただく一助となればまことに幸いです。

先ず、教員の移動について報告致します。物性理論での第一原理的計算などで注目されている常 行真司教授が8月16日づけで昇任されました。また、上田正仁教授が東京工業大学から3月1日 づけで着任されました。ボーズ・アインシュタイン凝縮の理論研究で世界をリードされています。

4月1日に浅井祥仁准教授が素粒子物理国際研究センターから移られました。同じ日に、講師として中澤知洋博士を教室におむかえしました。

東京大学の定年が延びていく関係で、この年度には定年退職された方がありませんでした。

財政状況は厳しさを増しており、運営交付金はさらに削り込まれております。また、理学系研究 科全体としての教員数削減計画が決まりました。このような中で、「21世紀 COE プログラム」に よる活動が順調に推進され、又、多くの教員の努力の賜物である外部からの競争的研究資金の導入 により、教室の健全な運営が保たれてきました。

「21世紀 COE プログラム」と並行して立ち上がったのが、数物連携宇宙研究機構です。理学系研究科外の組織ですが、実際の活動では物理学教室とも密接に協力していくことになります。今後の活動が期待されます。

本年度も教室内での活発な研究・教育活動の結果、多くの方々が受賞されております。上田正仁教 授がボーズ・アインシュタイン凝縮の安定性と崩壊に関する研究で平成19年度文部科学大臣表彰科 学技術賞を受賞されました。助教の方々では、宇宙理論研究室(当時)の向山信治助教が第1回日 本物理学会若手奨励賞を、上田研究室の川口由紀助教が第2回日本物理学会若手奨励賞を受賞され ました。さらに若い方々では、堀正樹博士(早野研)が第4回ヨーロッパ若手研究者賞を、日下暁 人博士(相原研)が第9回高エネルギー物理学奨励賞、第2回日本物理学会若手奨励賞、及び、第 24回井上研究奨励賞を受賞されました。さらに、沼田健司博士(坪野研)が第1回日本物理学会若 手奨励賞、所裕子博士(宮下研)が第2回日本物理学会若手奨励賞を受賞されています。大学院学 生では、碁盤晃久君(酒井広文研)がレーザー学会優秀論文発表賞を受賞しました。学内の賞では、 岡村圭祐君(松尾研)が平成19年度東京大学総長賞(博士)受賞の栄誉に浴しました。平成19年 度の理学系研究科研究奨励賞(博士)には岡村圭祐君(松尾研)に加えて、田中宗君(宮下研)も 受賞しました。さらに、山崎雅人君(江口研)、湯浅孝行君(牧島研)、高島憲一君(内田研)が同 賞(修士)を受賞しました。学部卒業生では、平成19年度理学部学修奨励賞が森貴司君、西尾亮一 君、中村祥子君に授与されました。

物理学教室をとりまく情勢はますます不安定度が増し、将来は不透明になっていく一方です。その中で数物連携宇宙研究機構やグローバル COE などの試みにより研究教育環境の向上に努めております。このような情勢の中、先輩の先生方、関係各位の皆様からのご支援、ご助言が何よりも貴重なものでございます。何卒よろしくご支援のほどお願い申し上げます。

この年次報告書は、中澤知洋講師のご尽力によって編集作成されました。この場を借りて感謝いたします。

2008年6月12日

物理学専攻長・教室主任

大塚 孝治

Ι

## 研究室別 2007年度 研究活動報告

目 次

Ι	研究	究室別 2007 年度 研究活動報告	1
1		原子核・素粒子理論	10
	1.1	原子核理論研究室(大塚 · 初田 · 平野)	10
	1.2	素粒子論研究室(江口・柳田・松尾・浜口)...............................	21
		1.2.1 弦理論とゲージ理論	21
		1.2.2 TeV スケールの標準模型、素粒子論的宇宙論	24
<b>2</b>		原子核・素粒子実験	28
	2.1	原子核実験研究室 (酒井 · 早野 · 小沢) ...................................	28
		2.1.1 ICHOR プロジェクト (酒井研究室)	28
		2.1.2 K 中間子原子の精密分光 (早野研究室)	32
		2.1.3 K 中間子原子核の研究 (早野研究室)	32
		2.1.4 反陽子原子分光 (早野研究室)	33
		$2.1.5$ $\pi$ 中間子原子の精密分光 (早野研究室) $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	33
		2.1.6 クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)の生成とその性質の研究 (小沢研究室)	33
		2.1.7 ハドロンが動的な質量を獲得する機構の研究 (小沢研究室)	34
		2.1.8 次世代の高統計実験に向けた新たな検出器の開発 (小沢研究室)	35
		$2.1.9$ $T_z=-2$ 陽子過剰核 $^{24}\mathrm{Si}$ のベータ崩壊に関する研究 (旧櫻井研究室)	35
	2.2	駒宮研究室	41
		2.2.1 電子・陽電子リニアコライダー ILC 計画	41
		2.2.2 BES 実験	43
		2.2.3 UCN 実験	44
		2.2.4 LHC での物理解析	44
	2.3	蓑輪 研究室	47
		2.3.1 アクシオンヘリオスコープ実験	47
		2.3.2 新たなアクシオン探索実験の検討	47
		2.3.3 暗黒物質検出器開発	48
		2.3.4 レーザー共鳴イオン化質量分析法による半導体ウエハ表面汚染評価技術の開発	48
		2.3.5 原子炉ニュートリノモニター	49
	2.4	相原研究室 ....................................	51
		2.4.1 B 中間子のフレーバー変換中性カレント崩壊の精密測定	51
		2.4.2 Super-KEKB 計画のためのビームラインシミュレーション	52
		2.4.3 J-PARC ニュートリノー次ビームライン用ビームモニターの開発	52
		2.4.4 ビームプロファイルモニター	52
		2.4.5 ビーム位置モニター	53
		2.4.6 次世代水チェレンコフ検出器のためのハイブリッド光検出器開発	53
		2.4.7 観測宇宙論によるダークエネルギーの研究	53
		2.4.8 国際リニアコライダー用検出器の開発	54
	2.5	浅井研究室	56
		2.5.1 LHC・ATLAS <b>実験での研究</b>	56
		2.5.2 小規模実験で探る標準理論を超えた新しい素粒子現象の探索	58

3		物性理論 6
	3.1	青木研究室
		3.1.1 超伝導
		3.1.2 強磁性
		3.1.3 炭素系の物性
		3.1.4
		3.1.5     強相関電子系における非平衡・非線形現象     6
		316 光格子中の冷却原子の超流動・ $Mott$ 絶縁体相転移ダイナミックス 6
		317 周期的十ノ構造の雷子状能 6
		318 子の他
	39	室下研究室
	0.2	3.9.1 新奇な景子状能 励起状能 景子ダイナミックスの研究 6
		3.2.1 新聞な里」状態、脳腔状態、里」ノイノミノノスの新児
		3.2.2 <b>ハビノノロヘオ</b> 「ハー頭座にのける協力境家の明九 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
		5.2.3 怕马F用间の成白がのる赤での液和洗家
	იი	0.2.4 _ 奴埕彻埕
	3.3	
		3.3.1 局温超伝導の理論
		3.3.2 コハルト酸化物における多軌道型超伝導 
		3.3.3 <b>有機導体に関する</b> 埋論
		3.3.4 超伝導体の埋論
		3.3.5 フラストレーションのある糸での電子状態、スピン状態7
		3.3.6         近藤効果や重い電子系に関する理論         7
		3.3.7 2次元 <sup>3</sup> He に関する理論
		3.3.8 磁壁駆動の微視的理論7
		3.3.9 ディラック電子系におけるバンド間磁場効果とホール効果
	3.4	常行研究室
		3.4.1 固体表面の構造と電子状態8
		3.4.2 固体の構造と電子状態 8
		3.4.3 タンパク質の電子状態
		3.4.4 シミュレーション手法の開発 8
4		物性実験 80
	4.1	藤森研究室
		4.1.1 高温超伝導
		4.1.2 強相関酸化物
		4.1.3 スピントロニクス
	4.2	内田研究室
		4.2.1         2007年度の研究その1
		4.2.2 梯子型 Cu 酸化物の電荷秩序と超伝導
		4.2.3 高温超伝導体の擬ギャップ相9
		4.2.4 T <sub>c</sub> は上がるか? 9
	4.3	長谷川研究室
		4.3.1 表面電子輸送
		4.3.2 表面ナノ構造
		4.3.3 新しい装置・手法の開発 10
	4.4	福山研究室
		4.4.1 2次元フェルミ粒子系の強相関効果 10
		4.4.2 グラファイト系物質の物性研究 10
		4.4.3 エキゾチック超伝導体の STM/STS 観測 10
	4.5	岡本研究室

		4.5.1 劈開表面に形成された2次元電子系11	1
		4.5.2 强相関 2 次元電子系	3
	4.6	島野研究室	5
		4.6.1 半導体高密度電子正孔系	5
		4.6.2 擬1次元有機導体 11	5
		4.6.3 超伝導磁束量子系	6
		4.6.4 マルチフェロイクス系	7
<b>5</b>		一般物理理論 11	9
	5.1	宇宙理論研究室 (佐藤・須藤)	9
		5.1.1 初期宇宙・相対論	0
		5.1.2 観測的宇宙論	0
		5.1.3 天体核・素粒子物理	2
		5.1.4 その他	4
	5.2	村尾研究室	0
		5.2.1 エンタングルメント理論	1
		5.2.2 マクロな系におけるエンタングルメント	3
		523 量子情報処理プロトコル 13	3
	53		5
	0.0	13 531 引力相互作田する―次元 BEC におけるソリトン形成 13	5
		5.3.1 引力指当に用する 次に $DDO$ にのけるフライフ $DM$ $C = 105.3.2 スピンテクスチャにおけるカイラル対称性の破わ 13$	5
		5.5.2 <b>双極子相万作田する</b> REC 13	6
		5.5.5 X控J伯王F用9るDEC	0
6		一般物理実験 13	8
	6.1	牧島研究室 + 中澤研究室	8
		6.1.1 「すざく」衛星の運用と稼働状況	8
		6.1.2 銀河系内のX線天体の観測的研究	8
		613 銀河系外のX線天体の観測的研究 14	0
		614 需重からのガンマ線の観測 14	2
		6111 田芸が 50000 (MOLLAN 11) 615 NeXT衛星計画 14	2
		61.6 小刑衛星計画への参加 14	2 1
	6 2		н П
	0.2	□/娘 // 九主 ·································	0
		0.2.1       1.51-2 坏状ドガマノ表直を用いたノノスマ実験       1.5         6.9.9       MUD 不安安性とエード物同安注の関係       15	บ จ
		0.2.2 MIID 小女だほここ 一下数内だ仏の開光	2 9
		$0.2.3$ ノノスマ山派によるアンスソール佣厚形成 $\dots$	ა ი
		0.2.4 J1-000 ドガマンにのける日光电流によるノブスマ电流駆動実験	ა ი
	6.9	0.2.5 ノフスマ吉禅を使うに起向ハーダ 51 ノフスマ主成・維持の研九 15 15	5
	0.5	「牛野切九至」・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	0
		0.3.1 レーリー十渉計を用いた単刀波の快山	0
		0.3.2       手田全間レーサー十添計       15         0.3.2       デ田全間レーサー十添計       15	7
		6.3.3 磁気浮上重刀波検出器の開発 	8
		6.3.4 精密計測の研究	8
		6.3.5 熱雑音の研究	9
	6.4	佐野研究室	2
		6.4.1 非線形非平衡系の物理 16	2
		6.4.2 非平衡ソフトマターの物理16	4
		6.4.3         生命現象の物理         16	6
	6.5	山本研究室	8
		6.5.1 テラヘルツ帯観測技術の開拓 16	9
		6.5.2 <b>星間分子雲、星形成領域の観測的研究</b>	0
	6.6	酒井広文 研究室	4

	6.6.1 静電場と整形されたレーザー電場の併用による分子配向の制御	174
	6.6.2 急峻に遮断される高強度非共鳴2波長レーザー電場を用いた完全にフィールドフリー	
		175
	6.6.3 H <sub>2</sub> / D <sub>2</sub> 中での高次高調波発生と核波束のダイナミクス	175
	6.6.4 長波長レーザー電場の併用による高次の和・差周波発生	176
	6.6.5 cross-defocusing 法を用いた非断熱的分子配列の検出(4年生特別実験)	176
	6.6.6 その他	177
6.7	能瀬研究室	178
	6.7.1 シナプス形成の生物物理	178
	6.7.2 シナプス特異性を決める分子の同定と機能解析	180
	6.7.3 神経回路の形成と可塑性の研究	181
	6.7.4 <b>その</b> 他	181
		101
7	技術部門	184
7.1	技術部門	184
	7.1.1 実験装置試作室(大塚、南城)	184
	719 安全衛生·萊昂管理(佐伯 山木)	184
		185
		195
		100
		180
	7.1.6	185
II S	ummary of group activities in 2007	187
1	Theoretical Nuclear Dryging Croup	190
1	Theoretical Nuclear Flysics Gloup	109
2		100
3	Sakai (Hideyuki) Group	192
4	Hayano Group	193
5	Ozawa Group	194
6	Komamiya group	195
7	Minowa-Group	196
8	Aihara Group	197
9	Asai group	198
10	Aoki Group	199
11	Miyashita Group	200
12	Ogata Group	201
13	Tsunevuki Group	202
14	Fujimori Group	203
15	Uchida Group	204
16	Hasagawa Group	201
10	Fukuyama Croup	200
10		201
18		209
19	Shimano Group	210
20	Theoretical Astrophysics Group	212
21	Murao Group	214
22	Ueda Group	215
	22.1 Soliton formation in a quasi-1D attractive BEC	216
	22.2 Spinor BEC: chiral symmetry breaking	216
	22.3 Dipolar BEC: Einstein–de Haas Effect and ground-state mass flow	217
23	Makishima Group & Nakazawa Group	217
24	Takase Group	219

25	Tsubono Group	220
26	Sano Group	221
27	Yamamoto Group	222
28	Sakai (Hirofumi) Group	223
29	Nose Group	224

226

### III 2007 年度 物理学教室全般に関する報告

1		学部講義概要	229
	1.1	2 年生 冬学期	229
		1.1.1 電磁気学I: 駒宮幸男	229
		1.1.2 解析力学・量子力学1: 須藤 靖	229
		1.1.3 物理数学 I : 常行 真司	231
		1.1.4 物理実験学 : 早野 龍五、岡本 徹	231
	1.2	3年生夏学期	232
		1.2.1 電磁気学 II: 酒井広文	232
		1.2.2 量子力学 II : 村尾 美緒	233
		1.2.3 現代実験物理学 I: 長谷川修司, 溝川貴司	233
		1.2.4 物理数学 II : 松尾 泰	234
		1.2.5 統計力学I: 佐野 雅己	234
	1.3	3年生 冬学期	234
		1.3.1 物理数学 III: 小形正男	234
		1.3.2 量子力学 III : 初田哲男	235
		1.3.3 流体力学: 高瀬 雄一	236
		1.3.4 現代実験物理学 II : 蓑輪 眞、小沢 恭一郎	237
		1.3.5 電磁気学 III : 内田 慎一	237
		1.3.6 生物物理学:能瀬聡直、佐野雅己	237
		1.3.7 統計力学 II: 宮下精二	237
	1.4	4年生夏学期	238
		1.4.1 場の量子論 : 柳田 勉	238
		1.4.2 固体物理学 I : 青木 秀夫	238
		1.4.3 一般相対論 : 柳田 勉	238
		1.4.4 プラズマ物理学 : 江尻 晶	238
		1.4.5 <b>原子核物理学:大塚 孝治、平野 哲文</b>	239
		1.4.6 統計物理学特論 : 常次 宏一	239
		1.4.7 量子光学 : 島野 亮	240
	1.5	4年生冬学期	240
		1.5.1 宇宙物理学: 牧島一夫	240
		1.5.2 場の量子論 II:濱口 幸一	241
		1.5.3 物性物理学特論 (大学院「表面物理学」共通): 小森文夫、長谷川修司	241
		1.5.4 固体物理 II : 長谷川修司	241
		1.5.5 固体物理学 II : 福山 寛	242
		1.5.6 素粒子物理学 : 浅井祥仁	242
		1.5.7 化学物理学 : 山本 智	243
			_
<b>2</b>			244
	2.1	上出 止仁 教授: 半成 19 年度又部科字大臣表彰科学技術員 研究部門	244
	2.2	回山 信冶 助教 (于由埋論研究室:現数物連携于面研究機構メンバー):第1回日本物理学会若 毛海島賞	944
	0.9		244
	2.3	川口 田旭 助殺 (上田町九主): 布 2 凹口平彻垤子云石于哭励具	244

	2.4	麻生 洋一 博士 (坪野研): GWIC Thesis Prize, GWIC (Gravitational Wave International Committee)	245
	2.5	日下 暁人 博士(相原研究室):第9回高エネルギー物理学奨励賞、第2回日本物理学会若手奨	240
		<b>励員、およひ弟</b> 24 回开上研究奨励員	245
	2.6	所 裕子 博士 (宮下研): 第 2 回日本物理学会若手奨励賞	245
	2.7	堀 正樹 博士 (早野研究室):第4回ヨー ロッパ若手研究者賞	245
	2.8	沼田 健司 博士 (坪野研):第1回日本物理学会若手奨励賞	246
	2.9	岡村 圭祐 君 (松尾研):平成 19 年度東京大学総長賞 (博士)	246
	2.10	田中 宗 君 (宮下研): 平成 19 年度理学系研究科研究奨励賞(博士)	246
	2.11	碁盤 晃久 君 (酒井広文研):レーザー学会優秀論文発表賞	246
	2.12	高島 憲一 君 (内田研):平成 19 年度理学系研究科研究奨励賞(修士)	247
	2.13	山崎 雅人 君 (江口研):平成 19 年度理学系研究科研究奨励賞(修士)	247
	2.14	湯浅 孝行 君 (牧島研):平成 19 年度理学系研究科研究奨励賞(修士)	247
	2.15	森貴司君、西尾亮一君、中村祥子君:平成 19 年度理学部学修奨励賞	247
3		人事異動	<b>2</b> 48
4		役務分担	249
5		教室談話会	250
6		物理学教室コロキウム	251

#### 改版履歴:

version 1, 2008.07.03 発行 version 2, 2008.07.11 誤記修正 pdf 版のみ 上田研究室:一般物理実験から一般物理理論へ

## 1 原子核・素粒子理論

## 1.1 原子核理論研究室(大塚·初田 ·平野)

#### 原子核理論研究室の概要

原子核研究室では、原子核とハドロンに関係した 非常に広範囲の理論的研究を行っている。その活動 は主に二つに分けられる。一つは多数の核子から成 る量子多体系としての原子核の構造とそれを支配す る動力学についての研究であり、ここでは「原子核 構造」と呼んでいる分野である。もう一つは、多数 のクォーク・グルオンから成る量子多体系としての ハドロンの構造や高温高密度核物質を、量子色力学 に基づいて研究する分野で、「ハドロン物理学」と呼 んでいる。

「核構造」は主に大塚孝治教授・清水助教及び博 士研究員と大学院学生らにより行なわれた。「ハドロ ン物理学」は主に初田哲男教授・平野講師・佐々木 助教(一時在外)及び博士研究員と大学院学生らに より行なわれた。以下に先ずそれぞれの分野での研 究内容の概要を述べ、後で各々のテーマについて個 別に説明する。

#### 原子核構造

原子核構造と言われる分野には色々な問題が含まれるが、我々の研究室では

- 1) 不安定核の構造と核力
- 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) 原子核での時間に陽に依存する現象(反応、融 合、分裂)
- 3)他の量子系の多体問題、量子カオス

の4つのテーマを主に追求している。研究室のメン バーによる研究は後で述べられているので、ここで は背景と概略を述べ、後で述べられていない研究に ついてはやや詳しく述べる。ここで参照される文献、 講演も後で出て来ないものに限定されている。

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、それらの数がアンバ

ランスになっているものを指す。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、不安定核の殻構造(一粒子軌道エネルギーの パターン)は陽子や中性子の数によって変わり(殻 進化と言う)、不安定核での魔法数は安定核のそれと は系統的に異なる。そのメカニズムは核力のスピン・ アイソスピン依存性、特にテンソル力のそれによる ものが大きい、という成果が最近我々の研究室で得 られた。[66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 79, 80] 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、世界各地でそれに関する実験が 多く行われている。[1,2,3,5,6,7,8,9] 特に、超 重元素における魔法数の変化が注目されている。[73] また、核子の間には2体力だけでなく、3体力も働 テンソルカに加えて、3体力が不安定核の殻構 く。 造、魔法数、ドリップライン(存在限界)に特徴的 な効果を及ぼすことを見つけた。これは、有効場の 理論などの核力の最近の研究とも関連して新しいパ ラダイムを提供するものとして注目されつつある。 [74, 75, 76, 77, 78, 119]

不安定核では、安定核とは異なり、過剰な中性子 が糊の役割を果たして、幾つかのアルファクラスター をつなげる事を示してきた。このようなクラスター 構造の「結晶的安定化」メカニズムについて、糊の 役目の中性子が1個の場合について研究してきた。

不安定核に関しては、束縛されてはいないが、低 い励起エネルギーを持ち、束縛状態と強く結合して いる核子の状態の理論的扱いの研究を進め、不安定 な中性子過剰酸素同位体などに応用している。特に、 上述の殻構造の変化が、正エネルギーの連続状態で 起こるとどのようになるか、放出される中性子のエ ネルギー分布などから議論を進め、新しいアプロー チとなっている。

我々が1994年頃からオリジナルな理論手法と して提唱・発展させてきたモンテカルロ殻模型を中 心にした研究も展開している。[71] 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、不安定核攻略の重要な武器である。 この手法により、多数の一粒子軌道からなるヒルベ ルト空間に多数の粒子を入れて相互作用させながら 運動させる事が可能になった。殻構造がどんどん変 わっていく不安定核では特に重要になっており、世 界の10箇所以上のグループと、それぞれの研究対 象である原子核に関して理論計算を受け持って共同 研究をしている。多くの新しい知見が得られており、 最近は中性子数が18や19の原子核でも、不安定 核であればN=20の魔法数構造が普遍的に壊れて いることを示した。[66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 79, 80] これは旧来の平均ポテンシャル描像や Warburton ら の「Island of Inversion」模型では理解できないもの で、重要なものである。また、モンテカルロ殻模型は 多数の核子がコヒーレントに運動する集団運動の微 視的な解明を、平均場理論の壁を越えて行うことも 可能にしている。さらに、殻模型による研究の進展 とも相まって、ニュートリノと原子核の反応がよく 記述できるようになり、天体核現象へ応用する。さ らに、ダブルベータ崩壊の核行列要素の計算を行い、 ニュートリノ質量の測定に備えている。

核子多体系どおしの反応や、時間とともに自発的に 変化する状態を扱うために時間依存ハートリーフォッ ク法を展開、発展させる研究を行なっている。今年 度の成果の例としては、エネルギーの高い反応での 荷電平衡化の抑制現象を理論的に見つけ、その意義 を議論した。また、ウランと鉛というような巨大な 原子核どおしの反応を計算してあらたな現象を探索 している。

特に、4番目のテーマについては、第一原理的ア プローチによる殻模型計算を提唱してきたが、それ による炭素 - 16原子核などの異常性を探究してい る。量子カオスに関しては、カオスがある規則性の 源になる、という新しい概念を導入して研究してい る。加えて、軌道が1本の場合には、別の幾何学的な メカニズムでも結果的には似た現象が起こることも 指摘した。これらと並行して、ボーズアインシュタ イン凝縮でスピンが有限な場合について、その代数 構造に注目した研究を進めている。これは原子核の 相互作用するボゾン模型の応用にもなっており、解 析的に見通しのいい方法論になっている。

#### 原子核殻模型におけるランダム相互作用により与え られた基底状態の性質

ランダム行列理論により与えられるランダムな2 体相互作用を原子核殻模型に適用すると、多体の基 底状態の角運動量は統計的にJ=0をとりやすいこ とが知られているが、この現象の原因はいまだ明確 には理解されていない。これは、原子核殻模型の八 ミルトニアンは3次元回転対称性をもつため複雑で、 解析的な研究が困難である事が一因である。そのた め、我々はこの3次元回転対称性をもたず、1次元 回転対称性のみをもつ模型を新たに導入し、その基 底状態の性質を詳細に調べた。これにより、時間反 転対称の対をなす一粒子状態の組による対称性が基 底状態の統計的性質に重要な役割をはたすことを示 した。[10]

準粒子真空基底を用いたモンテカルロ殻模型法の開発

原子核殻模型計算の適用領域を拡大するために、 我々はモンテカルロ殻模型という確率論的な量子多 体問題の解法の開発を進めている。従来のモンテカ ルロ殻模型法においては、複数のスレーター行列式 を基底として用いて多体系の量子状態を記述してき た。しかし、この方法は、対相関の取り扱いが重要 となるような中重核領域における多バレンス粒子系 の量子状態を記述するためには不十分である。この 欠点を克服するために、本年度、我々は準粒子真空 を基底として用いる新たなモンテカルロ殻模型法を 開発した。これにより、任意の2体相互作用を取り 扱う事が可能となり、また、多バレンス核子系であ る中重核への原子核殻模型計算の適用が可能となる ことを示した。[89,90,91,92]

また、モンテカルロ殻模型法を始めとする近年の 第一原理計算による原子核構造論の展開を [23] に紹 介した。

#### Conservation Properties in the Time-Dependent Hartree Fock Theory

We discuss the conservation of angular momentum in nuclear time-dependent Hartree-Fock calculations for a numerical representation of wave functions and potentials on a three-dimensional cartesian grid. Free rotation of a deformed nucleus performs extremely well even for relatively coarse spatial grids. Heavy ion collisions produce a highly excited compound system associated with substantial nucleon emission. These emitted nucleons reach the bounds of the numerical box which leads to a decrease of angular momentum. We discuss strategies to distinguish the physically justified loss from numerical artifacts. The result was published in [11].

#### TDHF を用いた低エネルギー核反応

本年度は、エキゾティックな原子核が関与する反応 に特有な性質を明らかにすることに主眼を置いて研 究を行った。原子核が衝突する際には、原子核内の スピン分布に偏りが生じることが指摘されていたが、 そういった偏りの度合いがエキゾティックな反応にお いて小さく抑制される効果があることを明らかにし た。とくにその機構として、2つの異なる励起機構 (具体的にはアイソスカラーなスピン励起とアイソベ クターな電気双極子励起)が競合すると考えること で理解できると提案した。 重い原子核の関与する 反応について研究を行った。とくに電荷平衡化過程 がどのようなもので、どういった場合に起こりうる のかということを調べた。結果として、重い原子核 同士の反応において、急速な反応機構として電荷平 衡化過程が重要で、それが起こるかどうかというこ とによって反応の最終生成物に大きな違いが出るこ とを示した。また TDHF 理論にこれまでに導入され ていなかった、テンソル力の効果を導入し、テンソ ルカに依存した反応を計算できる理論的枠組みを構 築した。 [24, 25, 35, 41, 42, 43, 44, 93, 94, 95, 96]

#### 不安定核におけるテンソル力の効果

本研究では、平均場近似を用いて原子核構造に与 えるテンソル力の効果を、核図表の広い範囲に渡っ て、特に不安定核領域において、系統的に研究する ことを目的としている。本年度においては、そのテ ンソルカの効果が顕著に現れるいくつかの現象の中 で、特に対相関との競合について考察した。

まず従来の平均場モデルにおいてテンソル力と対 相関を同時に扱える形に拡張した。テンソル力の効 果は強いために、従来のモデルに摂動論的な修正では 不十分なので、新たにパラメータを大幅に調整した。 そして、このパラメータ(以下、GT3)と従来広く利 用されているテンソル力を含まないパラメータ(以 下、D1S)の計算結果を比較した。これにより、テン ソルカの影響により原子核構造に変化が起こり、間接 的に原子核の対相関に影響を与えることが分かった。

例えば、テンソル力が Sn(スズ) アイソトープでの 対相関エネルギーに影響を与えるために、2中性子 分離エネルギーに影響が及ぶことを明らかにした。 安定核領域においては、テンソル力の有無に関わら ず、D1Sの計算結果とテンソル力を含んだGT3の計 算結果も、実験値とほとんど一致しており、両者に 大きな違いはない。この結果は我々の計算結果の信 頼性を保障している。しかし、中性子数 50-70 領域 に注目すると、実験結果とD1Sの計算結果は1MeV ほどずれているが、我々の GT3 ではこのずれは見 られない。また中性子過剰領域における振る舞いも 両者に大きな違いが見られ、テンソル力の効果によ る一粒子軌道エネルギーの変化の影響が原因である ことが分かった。同様にして Kr(クリプトン) アイソ トープについても D1S と GT3 の比較計算を行った が、中性子過剰領域において両者に大きな違いが現 れることが分かった。[26, 45, 46, 97, 98, 99]

#### $\alpha$ -cluster structure in light nuclei with pairing correlations

In this year, the  $\alpha$ -clustering phenomenon in light stable nuclei is studied within the shell- model-like approach in relativistic mean field theory [100]. The result reproduces  $\alpha$ -clustering phenomenon in light stable nuclei by calculating <sup>8</sup>Be, <sup>12</sup>C, <sup>16</sup>O, and <sup>20</sup>Ne. Comparison of our result with RMF calculation indicates that the pairing correlation could change the properties of clear ground state and lead to different  $\alpha$ -clustering structure. Those results have been reported in [100].

スピノールBECにおける力学的対称性

光学トラップによるボース・アインシュタイン凝 縮(BEC)の実現により、スピン自由度を持った BECであるスピノールBECの研究が可能となっ た。このようなBECを記述するには、複数個の秩 序変数が必要となるため、超流動へリウム3やQC Dのカラー超伝導などの物理と共通点があり、興味 深い研究対象である。我々は、スピノールBECに おいて力学的対称性が重要な役割を果たしているこ とに気づき、スピン1及び2のBECでは任意の結 合定数に対して、スピン3のBECでは特定の結合 定数に対して、力学的対称性によりエネルギー固有 値と固有状態が単モード近似の範囲内で厳密に求ま ることを示した。また、スピン1と2のBECの低 エネルギー状態や相構造を調べ、反強磁性相とサイ クリック相において擬縮退したエネルギースペクト ルが表れることも示した。[12, 37, 101]

#### 殻模型計算における連続状態の寄与

中性子ドリップ線近傍では、核子は強い相互作用 に対して不安定になり、低励起状態に束縛、非束縛状 態が縮退している。このような中性子過剰領域での 核構造における連続状態の効果を明らかにすること を目的とし研究を行った。核子から構成される量子 多体系である原子核を記述する有力な模型の1つと して原子核殻模型があり、特に安定核の構造の記述 に成功を収めてきた。しかし不安定核では核力の多 様性を反映して殻構造の変化が起こり、ドリップ線 も複雑に変化する。従来の殻模型では、これらの変 化を現象論的補正なしには十分に説明できない。こ の主な原因は、殻模型の枠組みに三体力が欠けてい ることと、個々の配位が調和振動子基底で表現され ていることの2点にあると考えられる。本研究では 後者の効果を調べるため、連続状態を取り入れた適 切な1粒子基底を導入し、現象論的に最適化した 体相互作用を用いて殻模型計算を行った。酸素同位 体についての結果を従来の殻模型計算と最近得られ た実験結果と比較することにより、連続状態の効果 の重要性を明らかにした。[47,48,49,102,103,104]

さらに、連続状態を含む基底を用いた多体摂動論に より、殻模型の有効相互作用を現実的核力から(二体 力の範囲で)第一原理的に導き、連続状態の効果を模 型空間と有効相互作用の両方に取り入れた殻模型の 構築を試みた。その第一歩としてBerggren 基底を導 入し、その必要性と応用性を議論した。[105, 106, 38]

平均場理論を用いた IBM の導出と不安定核の集団 運動

本年度は、中性子過剰な不安定核の4重極集団運 動状態を系統的に考察した。中重核の低励起状態を 記述する模型の一つである「相互作用するボソン模型 (IBM)」は実験事実を矛盾なく説明する。一方で、核 子系がら IBM を微視的に導出する研究も並行して進 められ、従来は原子核殻模型に依拠した方法が通例で 主に球形核に適用されてきた。本研究では、Skyrme Hartree-Fock 法を用いて変形核のポテンシャルエネ ルギー曲面を計算し、非常に良い近似の下でボソン 系に写像することで集団運動の情報を抜き出し、基 底状態近傍の IBM ハミルトニアンを導出した。励 起状態の波動関数とスペクトルは角運動量と粒子数 の厳密な取扱いの下で計算し、Sm 同位体における U(5)-SU(3) 遷移を再現して実験と無矛盾であること を示した。さらに、未知領域 A >200 の W-Os 同位 体における U(5)-O(6) 遷移と E(5) 群臨界点対称性 の存在を指摘した。また、ボソン数を変化させる効 果を考慮することで、A~190 領域の Pb-Hg-Pt 同位 体における intruder state と変形共存現象に関する 議論も展開した。[13, 50, 107, 108, 109]

#### 量子ハドロン物理学

#### 格子量子色力学による核力の研究

核力の起源の解明は、原子核物理学の基礎を与え ると同時に、QCDにおける大きなチャレンジでもあ る。我々は、格子上に2核子を配置し、その相対ベー テ・サルピーター振幅を数値シミュレーションで求め ることにより、核子間ポテンシャルを逆算した。そ の結果、核力に中心力について、近距離での強い斥 力芯・中間距離での引力を両方備えたポテンシャルが 得られた。これは、現象論的に知られていた核力の 定性的性質と合致している。また、スピン3重項の ポテンシャルが1重項に比べて強い傾向が見られた。 さらに、核力のテンソル力、ハイペロンー核子相互 作用に拡張する研究を行った。[14, 51, 52, 81, 82]

#### 核媒質中での π 中間子

核媒質中でのカイラル対称性の部分的回復をどの ように観測量と結び付けるかは長年の懸案事項であ る。我々は、媒質中での $\pi$ 中間子に関する波動関数 の有限繰り込みの効果がこの問題への鍵となること を指摘し、媒質中での新しい和則をカイラル対称性 を用いてハドロン模型によらない形で導いた。また、  $\pi - N$ 相互作用における友澤-ワインバーグ項が媒質 中で受ける変化についても、模型によらない関係式 を導いた。[83]

#### 高温・高密度物質の相構造

高温でのクォーク・グルオン・プラズマや、高密度で のクォークマターに関して、理論・実験・観測の3つの 観点から現状を総括する講義を行った。[81, 120, 121]

#### 現実的な 2+1 フレーバー格子 QCD 数値計算

理研 BNL 研究センター (RBRC)、コロンビア大 学、ブルックヘブン国立研究所 (BNL)の共同格子 QCD プロジェクトチーム (RBC)と英国6大学格子 QCD 研究共同体 (UKQCD)との国際的共同研究と して RBC および UKQCD が保有する専用並列スー パーコンピューター QCDOC を用い、ストレンジ クォークを含めた現実の世界により近い、3種類の 動的クォークの自由度(アップ、ダウン、ストレンジ) を厳密に取り扱ったドメインウォールフェルミオン (DWF)による格子 QCD 数値計算を行った。奇数個の 動的クォークを厳密に取り扱うために RHMC 法を採 用し、HMC 法一般にあらわれるハミルトニアン方程 式の積分の実装をより効率化するために Hasenbusch 法や Omelian 法などいった効率化を併用して、スト レンジクォーク質量を現実の値に固定した下で、アッ プ・ダウンクォークの質量が 中間子の質量 390 MeV, 520 MeV, 620 MeV に相当する 3 つの異なるのアッ プ・ダウンクォークの質量に対応する QCD ゲージ配 位を格子間隔 0.13 fm (格子間隔の逆数が 1.6 GeV 程度)、物理的格子サイズ 2 fm の規模で数値計算す ることに成功した。それぞれの 中間子の質量に対 応する格子 QCD ゲージ配位はそれぞれ約 4000-5000 程度蓄積され、この QCD ゲージ配位を用いて基本 的な物理量: クォーク凝縮や 中間子、K 中間子の 質量およびその崩壊定数などの数値解析を行った。 [15, 16]

格子 QCD 数値解析による K 中間子のセミレプト ニック崩壊の研究

素粒子標準模型の検証および標準模型を超える 実験的シグナルの発見に関連して、カビボ-小林-益川 行列要素(CKM行列要素)のユニタリティの検証は 現代素粒子論において重要な課題の一つである。現 在最も実験的に精度が高く測定されている CKM 行 列要素は行列の第一行目 ( $V_{ud}, V_{us}, V_{ub}$ ) である。 $V_{ub}$ はその他の要素に対して2桁小さいのでほとんど無 視することができることから、ユニタリティの要請 は $|V_{us}| = \sqrt{1 - |V_{ub}|^2}$ となる。本研究では、 $V_{us}$ の 決定に必要な K 中間子の弱い相互作用による崩壊の 形状因子  $f_+(q^2)$  の測定が主目的となった。実験的に 測定される崩壊率は  $V_{us}$  と前方極限  $q^2 
ightarrow 0$  での形 状因子  $f_+(0)$  の積に比例し、 $f_+(0)$  を理論的に精密 に知ること無しには高精度で Vus の値を決定するこ とはできない。フレーバー SU(3) が厳密に成り立つ 場合、 $f_+(0) = 1$ となるがストレンジネスクォークが アップ・ダウンクォークよりやや重い現実の世界で はこの関係は成り立たない。カイラル摂動論によっ てフレーバー SU(3) の破れの効果がどのくらいある か見積もることができるが、摂動の最低次を超える と模型の不定性なしに評価することができない。さ らに近年崩壊率の実験精度が格段に上がり、V<sub>us</sub>に 対する実験誤差は  $f_+(0)$  の不確定性によってもたら される理論誤差を遥かに凌いだため、格子 QCD 数 値解析を使って第一原理による f+(0)の評価が切望 されてきた。そこで、今回は3種類の動的クォーク の自由度(アップ、ダウン、ストレンジ)を全て厳 密に取り扱った 2+1 フレーバー格子 QCD 数値計算 により  $f_+(0)$  を高精度で評価する事に世界に先駆け て成功した。また、我々の結果と崩壊率に対する最 新の実験結果を合わせて、 $V_{us}$ をこれまでになく高 い精度で決定が可能となり、CKM 行列のユニタリ ティ条件からのズレが約0.1%以下であることを示し た。その結果、素粒子標準理論を超えるシナリオに 対する一定の制限を与えた。[17,28,110]

有限体積・格子場の理論における束縛状態形成の研究

近年、マルチクォーク状態(4クォーク状態)の 候補ではないかと思われる中間子がいくつも発見さ れた。BaBar によって発見された  $D_s(2317)$ 、CLEO の $D_s(2463)$ 、Belle X(3872) など。いずれもチャー ムクォークを含む共鳴状態で、ある崩壊閾値のすぐ 下に存在し、非常に幅が狭く、非相対論的クォーク 模型では存在が予測できなかった中間子状態である。 特に Belle の X(3872) は DD\* の閾値のほぼ直上に 存在し、DD\*が非常に弱く束縛した状態、ハドロン 分子共鳴状態ではないかと予想される。本研究の最 終目標は、格子 QCD 数値解析によってマルチクォー ク状態(=ハドロン分子共鳴状態)としての可能性 を探ることである。しかしながら、ハドロンの分子 共鳴状態のように非常に弱く束縛した状態(あるい は閾値のごく近傍の束縛状態)は、格子 QCD 数値解 析のように有限体積中で考えた場合、引力的な散乱 をする二体状態との区別が難しい。なぜならば、有 限体積中においてはすべてのエネルギー固有値は不 連続となり無限系での束縛・共鳴状態(不連続状態) と散乱状態(連続状態)はその点で区別が難しいか らである。無限系では、閾値以下の状態は束縛状態 しかあり得ないが、さらに問題を複雑にしている要 因として、有限系において引力的な二体散乱状態は 負のエネルギー(閾値を零点として)解になること が知られている。つまり本研究では有限体積中での 弱い束縛状態と二体散乱状態を区別する方法を模索 するために、まず、格子 QED による電子・陽電子 束縛状態の研究を行った。この場合、ハドロンの分 子共鳴状態のような「複合粒子同士による束縛状態」 ではなく、「素粒子による束縛状態」となり、より問 題設定が簡単化され、精密な数値解析も可能となる。 ただし、束縛状態から引力的な散乱状態への連続的 な変化を制御するためには、長距離的なクーロン相

互作用では不可能なので、光子に質量を持たせて電子・陽電子の相互作用を短距離型にした数値実験を行った。このような研究を通じて、「格子 QCD 数値 解析によるハドロン分子共鳴状態の探索」へ発展させることを目指している。[27]

クォーク・グルーオン・プラズマ中の重いクォーク 間ポテンシャルの研究

重いクォーク間ポテンシャルは、QGP 物質中での クォークの性質を理解するうえで重要な物理量であ る。本研究ではポリヤコフ・ループの空間的な相関 から、QGP 中の静的なクォーク (q)・反クォーク  $(\bar{q})$ 間ポテンシャル及び、qq間ポテンシャルを計算した。 また、これらのポテンシャルから有効結合定数とデ バイ遮蔽質量の温度依存性を見積もった。その結果 ポテンシャルの振舞いが、近距離では非摂動的であ るのに対し、遠距離ではカシミア係数に比例した遮 蔽されたクーロンポテンシャルでよく表されること が分かった。これは QGP 中のクォーク間の相関が、 遠距離では1つのグルーオンの交換によりよく描写 されることを意味する。さらに温度に依存した性質 として、相転移温度(T<sub>c</sub>)近傍では有効結合定数が大 きな値を持つのに対し、3Tc以上の高温領域ではデバ イ遮蔽質量が2次の摂動論と良い一致を示すことを 明らかにした。これは温度の増加にともない、QGP 物質が強相関状態から漸近的自由性を持つ状態へ変

化していることを示唆する。さらに、化学ポテンシャルに関するテーラー展開法により、ポテンシャルの密度依存性を調べた。その結果、展開係数の1次の項の有無によって、低密度領域において $q\bar{q}$ 間ポテンシャルは弱まりqq間ポテンシャルは強まる、という特徴的な違いを見出した。RHICにおける重イオン衝突実験で実現される状態は高温・低密度であることから、この性質は重いクォークが作るメソンやバリオンの生成率に影響を与える可能性があることを指摘した。[18, 19, 29, 36, 54, 55, 56, 57]

#### クォーク・グルーオン・プラズマ中の遮蔽質量の評価

磁気・電気遮蔽質量はプラズマの性質を特徴付け る重要な物理量である。また、QCD の持つ空間方 向の閉じ込めのため、磁気遮蔽質量の性質の解明に は非摂動的な手法が必要である。本研究ではポリヤ コフ・ループに不連続な対称性を課すことで、格子 QCD 計算から磁気・電気遮蔽質量を抜き出すことに 成功した。その結果、磁気遮蔽質量の大きさは広い 温度領域で電気遮蔽質量より小さく、遠距離の物理 を考えるとき重要であることを見出した。またそれ らの質量比を、最近研究が盛んな AdS/CFT 対応に よる結果と比較したところ非常に良い一致を示した。 このことは QGP と超対称ヤン・ミルズ理論が作る 媒質が良く対応していることを示唆している。対称 性を用いてポリヤコフ・ループから直接、磁気・電 気遮蔽質量を求めた計算は本研究が最初であり、今 後の格子 QCD 研究において重要な計算手法となる ことが期待される。[30, 36, 58, 111]

#### 高密度 QCD におけるスペクトル連続性

量子色力学(QCD)において、低温・低密度では ハドロン相、低温・高密度ではクォークの超伝導状態 であるカラー超伝導相が実現することが理論的に分 かっている。我々はこの2相の中間密度領域が連続 的に繋がっている可能性があることを示すと同時に、 中間密度領域における中間子の一般的な質量公式 (一般化 Gell-Mann-Oakes-Renner 関係式)を与え た[20, 31, 59, 60, 112]。更に我々は媒質中のQCD 和則と呼ばれる手法を用いて、中間密度領域におけ るベクトル中間子に対しても一般的な質量公式を与 えた [21, 61, 112]。この質量公式において、クォー クとクォークのペアリングであるダイクォーク凝縮 が8重項ベクトル中間子には質量を増大させる方向 に働くのに対し、1 重項ベクトル中間子には質量を 減少させる方向に働くため、低密度で縮退している 1重項・8重項ベクトル中間子の質量が中間密度領 域では分岐し、高密度では1重項ベクトル中間子が 存在し得ないことを明らかにした。一方、高密度で 8 重項ベクトル中間子はギャップ程度の質量をもち、 カラー超伝導相中でヒッグス機構によりギャップ程 度の質量をもった8重項グルーオンと密接に関係し ていることを示した。これは相構造だけでなく励起 状態についてもハドロン相からカラー超伝導相への 連続性があることを強く示唆している。

クォーク・グルーオン・プラズマ中での重いクォー クの拡散現象

チャームクォークやボトムクォークは、その質量 (数 GeV) が温度のエネルギースケールに比べて十 分に重いとき、媒質であるクォーク・グルーオン・ プラズマ(QGP)における不純物とみなすことが出 来る。本研究では、この不純物のブラウン運動を現 象論的に記述するランジュバン方程式を相対論的に 拡張し、さらに相対論的重イオン衝突実験の媒質の 時空発展を記述する流体力学模型と融合させること で、実験データとの比較を行った。上記のランジュ バン方程式に含まれる基本的な物理量は、QGP 中で 重いクォークに働く摩擦力であり、実験との比較か ら、それを見積もることができ、摂動論的 QCD の 予言する値よりも大きいことを示した。このことか ら、近年盛んに研究されている、"強く相互作用す る QGP (sQGP) "の一つの側面が明らかになった。 [32, 39, 62, 63, 113, 114, 115, 116]

#### クォーク閉じ込めの研究

我々の世界ではクォークやグルーオンは観測され ず、メソンやバリオンなどカラーシングレットの状態 しか観測されていない。カラーの閉じ込めと呼ばれ るこの現象は強い相互作用の顕著な特徴であり、格 子ゲージ理論の枠組ではウィルソン・ループの面積 則として一般に理解される。これは数値シミュレー ションで広くサポートされているものの現在も厳密 な証明は与えられていない。かつて Onsager はイジ ングモデルの研究において、逆向きの磁化をもつ2 つの領域を隔てる Bloch wall の持つ自由エネルギー を計算し、大きな Bloch wall の自由エネルギーが抑 制されないことと系が常磁性(無秩序)相にあるこ ととの密接な関係を明らかにしたが、非可換ゲージ 理論の閉じ込め相についても同様の説明が可能であ り、その場合センターボルテックスと呼ばれる自由 度(位相的欠陥)がパーコレーションを起こして系 を撹乱することによってウィルソンループの面積則 が出るとされる。これが面積則の十分条件であるこ とは Tomboulis-Yaffe の不等式によって厳密に証明 されている。

2007年 Tomboulis によって上記描像に基づく SU(2) 格子ゲージ理論における面積則の解析的証明が提出 された。本研究ではこの証明を詳しく解析し、その 結果、証明には2つの誤りがあることを明らかにし、 1つについては修正が可能なことを数学的に厳密に示 し、またもう1つについては本質的な困難があり修正 が困難であることを明らかにした。また、従来 SU(2) の場合にしか証明されていなかった Tomboulis-Yaffe の不等式を SU(N) の場合へと拡張した。金澤はこれ らの成果を修士論文にまとめた [40]。

#### 高エネルギーハドロン物理学

#### 相対論的重イオン衝突反応の統合的記述

高エネルギー重イオン衝突反応は、エネルギース ケール、タイムスケールに応じて、様々な様相を示 す。したがって、反応全体を記述するためには、個々 のスケールに有効なモデルを適切に組み合わせる必 要がある。我々は、衝突初期のカラーグラス凝縮、中 間状態としてのQGPの流体力学、終状態としての八 ドロンの運動学を組み合わせたモデルの構築を行っ ている[33, 64, 87, 122]。また、この立場から、現状 のRHICにおける実験結果の包括的な解釈を行う講 義及びレビュー講演を行った。[86, 123]

#### ハドロン物質の散逸的性質と φ 中間子

高エネルギー重イオン衝突反応の終状態の時空発 展をハドロン輸送理論により記述を行い、ハドロン 物質の散逸の影響が集団的な流れの一つである楕円 型フローに与える影響を調べた。完全流体 QGP 描 像によって得られる楕円型フローのハドロンの質量 依存性は、むしろ、ハドロンの散逸により生じるこ とが分かった。更に、ハドロン相内でほとんど相互 作用しない  $\phi$  中間子に注目し、質量毎に楕円型フ ローが小さくなるという傾向から外れることを示し た [34, 65, 84, 85]。

#### 重いクォークとクォーコニウムを用いた QGP の探索

相対論的重イオン衝突反応を通して QGP の性質 を調べるには、物質自身の振る舞いだけでなく、物 質にプローブを通して調べることもできる。QGP 流 体中を通過する重いクォークの確率過程を用いて、 QGP が重いクォークに与える摩擦力の定量的な評価 を行い、摂動論的 QCD と AdS/CFT 対応から予想 されている値の中間程度となることが分かった [32, 39, 62, 63, 113, 114, 115, 116]。また、 $J/\psi$ 粒子のよ うな重いクォークの束縛状態が、QGP 流体中のとあ る温度以上で解離するという模型を構築し、実験結 果との詳細な比較からその解離温度が相転移温度の 約 2 倍程度と見積もられた。[22]

#### 相対論的粘性流体力学

相対論的流体力学の枠組みで素朴に散逸の効果を 記述すると、因果律が破れることが指摘されている。 その問題を回避する一つの方法が、エントロピーカ レントに高次の補正を加え、散逸を表すカレントに 対する構成方程式に緩和項を得ることである。その 結果、散逸カレントは単なる熱力学的な力に対する 応答から、独立な物理量に格上げされる。この効果 を相対論的流体数値シミュレーションに取り入れる 検討を行った。また、相対論的粘性流体力学につい ての講義を行った。[88]

#### フェムトスコピー

高エネルギー重イオン衝突反応における一粒子分 布関数はハドロンのソース関数(ハドロンが最後に 相互作用した空間座標とその時の運動量の分布関数) を空間積分して求めることができる。一方、二粒子 相関関数は、二粒子の放出点の相対座標分布関数の フーリエ変換で表される。最近、PHENIX グループ がソースイメージ法を用いて、この相対座標分布関 数を得た。この相関関数からフェムトメータサイズ の分布を導出するトピックを総称してフェムトスコ ピーと呼んでいる。我々は、QGP 流体 - ハドロンカ スケード複合模型を用いて、相対座標分布関数の運 動量依存性を計算し、この分布関数の長距離テール 構造を再現することができた。特に、このテール構 造は共鳴粒子の崩壊とは関係なく、π中間子が弱く散 乱し続けていることに起因することが分かった。こ の方向性は、RHICにおける長年の問題である HBT puzzle の糸口を与える可能性を与える。[118]

#### <報文>

#### (原著論文)

- A. Gade, P. Adrich, D. Bazin, M. D. Bowen, B. A. Brown, C. M. Campbell, J. M. Cook, S. Ettenauer, T. Glasmacher, K. W. Kemper, S. Mc-Daniel, A. Obertelli, T. Otsuka, A. Ratkiewicz, K. Siwek, J. R. Terry, J. A. Tostevin, Y. Utsuno, and D. Weisshaar: "Spectroscopy of <sup>36</sup>Mg: Interplay of normal and intruder configurations at the neutronrich boundary of the Island of Inversion", Phys. Rev. Lett., **99**, 072502, (2007).
- [2] V. Tripathi, S. L. Tabor, P. F. Mantica, Y. Utsuno, P. Bender, J. Cook, C. R. Hoffman, S. Lee, T. Otsuka, J. Pereira, M. Perry, K. Pepper, J. S. Pinter, J. Stoker, A. Volya, and D. V. Weisshaar: "Competition between normal and intruder states inside the "island of inversion"", Phys. Rev. C, 76, 021301, (2007).
- [3] S. Zhu, R. V. F. Janssens, B. Fornal, S.J. Freeman, M. Honma M, R. Broda, R. M. P. Carpenter, A. N. Deacon, B. P. Kay, F. G. Kondev, W. Krolas, J. Kozemczak, A. Larabee, T. Lauritsen, S. N. Liddick, C. J. Lister, P. F. Mantica, T. Otsuka, T. Pawlat, A. Robinson, D. Seweryniak, J. F. Smith JF, D. Steppenbeck, B. E. Tomlin, J. Wrzesinski, and X. Wang: "One-particle excitations outside the <sup>54</sup>Ti semi-magic core: The <sup>55</sup>V and <sup>55</sup>Ti yrast structures", Phys. Lett. **B 65**, 135, (2007).
- [4] S. Fujii, T. Mizusaki, T. Otsuka, T. Sebe, and A. Arima: "Microscopic shell-model description of the exotic nucleus <sup>16</sup>C", Phys. Lett. B 650, 9 (2007).
- [5] P. Doornenbal, P. Reiter, H. Grawe, T. Otsuka, A. Al-Khatib, A. Banu, T. Beck, F. Becker, P. Bednarczyk, G. Benzoni, A. Bracco, A. Burger, L. Caceres, F. Camera, S. Chmel, M. Gorska, J. Grebosz, H. Hubel, M. Kavatsyuk, O. Kavatsyuk, M. Kmiecik, I. Kojouharov, N. Kurz, R. Lozeva,

A. Maj, S. Mandal, W. Meczynski, B. Million, Z. Podolyak, A. Richard, N. Saito, T. Saito, H. Schaffner, M. Seidlitz, T. Striepling, Y. Utsuno, J. Walker, N. Warr, H. Weick, O. Wieland, and M. Winkler: "The T=2 mirrors <sup>36</sup>Ca and <sup>36</sup>S: A test for isospin symmetry of shell gaps at the driplines", Phys. Lett. **B** 647, 237, (2007).

- [6] V. Tripathi, S. L. Tabor, P. Bender, C. R. Hoffman, Sangjin Lee, K. Pepper, M. Perry, P. F. Mantica, J. M. Cook, J. Pereira, J. S. Pinter, J. B. Stoker, and D. Weisshaar, Y. Utsuno, T. Otsuka: "Excited intruder states in <sup>32</sup>Mg", Phys. Rev. C 77, 034310, (2007).
- [7] J. R. Terry, B. A. Brown, C. M. Campbell, J. M. Cook, A. D. Davies, D.-C. Dinca, A. Gade, T. Glasmacher, P. G. Hansen, B. M. Sherrill, H. Zwahlen, D. Bazin and K. Yoneda, J. A. Tostevin, T. Otsuka, Y. Utsuno, B. Pritychenko: "Single-neutron knockout from intermediate energy beams of <sup>30</sup>Mg, <sup>32</sup>Mg: Mapping the transition into the "island of inversion", Phys. Rev. C 77, 014316, (2007).
- [8] B. Fornal, R. V. F. Janssens, R. Broda, N. Marginean, S. Beghini, L. Corradi, M. P. Carpenter, G. De Angelis, F. Della Vedova, E. Farnea, E. Fioretto, A. Gadea, B. Guiot, M. Honma, W. Krolas, T. Lauritsen, S. Lunardi, P. F. Mantica, P. Mason, G. Montagnoli, D. R. Napoli, T. Otsuka, T. Pawlat, G. Pollarolo, F. Scarlassara, A. M. Stefanini, D. Seweryniak, S. Szilner, C. A. Ur, M. Trotta, J. J. Valiente-Dobon, J. Wrzesinski, and S. Zhu: "Yrast structure of the neutron-rich N=31 isotones <sup>51</sup>Ca and <sup>52</sup>Sc", Phys. Rev. C 77, 014304, (2007).
- [9] P. Himpe, G. Neyens, D.L. Balabanski, G. Bélier, J.M. Daugas, F. de Oliveira Santos, M. De Rydt, K.T. Flanagan, I. Matea, P. Morel, Yu.E. Penionzhkevich, L. Perrot, N.A. Smirnova, C. Stodel, J.C. Thomas, N. Vermeulen, D.T. Yordanov, Y. Utsuno, T. Otsuka: "g factor of the exotic N=21 isotope <sup>34</sup>Al: probing the N=20 and N=28 shell gaps at the border of the "island of inversion"", Phys. Lett. B 658, 203 (2007).
- [10] N. Shimizu and T. Otsuka, Prog. Theor. Phys. 118 491 (2007).
- [11] Lu Guo, J. A. Maruhn, P.-G. Reinhard, Y. Hashimoto: Phys. Rev. C 77, 041301(R) (2008).
- [12] S. Uchino, and T. Otsuka, and M. Ueda: "Dynamical symmetry in spinor Bose-Einstein condensates", cond-mat/0710.5210 (submitted to Phys. Rev. A).
- [13] K. Nomura, N. Shimizu, and T. Otsuka: "Meanfield derivation of Interacting Boson Model and exotic nuclei", (submitted to Phys. Rev. Lett.)
- [14] N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, "The Nuclear Force from Lattice QCD", Phys. Rev. Lett. 99, 022001 (2007).

- [15] D. J. Antonio, T. Blum, K.C. Bowler, P.A. Boyle, N.H. Christ, S.D. Cohen, M.A Clark, C. Dawson, A. Hart, K. Hashimoto, T. Izubuchi, A. Jüttner, B. Joo, C. Jung, A.D. Kennedy, R.D. Kenway, M. Li, H.-W. Lin, M.-F. Lin, R.D. Mawhinney, C.M. Maynard, J. Noaki, S. Ohta, S. Sasaki, A. Soni, R.J. Tweedie and A. Yamaguchi, [RBC+UKQCD collaborations]
  First results from 2+1 Flavor Domain Wall QCD: Mass Spectrum, Topological Charge and Chiral Symmetry with L<sub>s</sub> = 8, Phys. Rev. D75 (2007) 114501.
- [16] C. Allton, D. J. Antonio, T. Blum, K.C. Bowler, P.A. Boyle, N.H. Christ, S.D. Cohen, M.A Clark, C. Dawson, A. Hart, K. Hashimoto, T. Izubuchi, A. Jüttner, C. Jung, A.D. Kennedy, R.D. Kenway, M. Li, S. Li, M.-F. Lin, R.D. Mawhinney, C.M. Maynard, J. Noaki, S. Ohta, B.J. Pendleton, S. Sasaki, E.E. Sholz, A. Soni, R.J. Tweedie, A. Yamaguchi and T. Yamazaki, [RBC+UKQCD collaborations] 2+1 Flavor Domain Wall QCD on a (2fm)<sup>3</sup> Lat-

tice: Light Meson Spectroscopy with  $L_s = 16$ , Phys. Rev. **D76** (2007) 014504.

- [17] P. Boyle, A. Jüttner, R. Kenway, C. Sachrajda, A. Soni, S. Sasaki, R. Tweedie and J. Zanotti K<sub>l3</sub> semileptonic form factor from 2+1 flavour lattice QCD, Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 141601.
- [18] Y. Maezawa, N. Ukita, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii and K. Kanaya [WHOT-QCD Collaboration] : "Heavy-Quark Free Energy, Debye Mass, and Spatial String Tension at Finite Temperature in Two Flavor Lattice QCD with Wilson Quark Action", Phys. Rev. D 75, 074501 (2007).
- [19] Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya and N. Ukita "Thermodynamics of twoflavor lattice QCD with an improved Wilson quark action at non-zero temperature and density", J. Phys. G 34, 651 (2007).
- [20] Naoki Yamamoto, Motoi Tachibana, Tetsuo Hatsuda and Gordon Baym : "Phase structure, collective modes, and the axial anomaly in dense QCD", Phys. Rev. D 76, 074001 (2007) [arXiv:0704.2654].
- [21] Tetsuo Hatsuda, Motoi Tachibana and Naoki Yamamoto: "Spectral Continuity in Dense QCD", [arXiv:0802.4143] (Phys. Rev. D, Rapid Communication に投稿中).
- [22] T. Gunji, H. Hamagaki, T. Hatsuda, T. Hirano : "Onset of  $J/\psi$  Melting in Quark-Gluon Fluid at RHIC", Phys. Rev. C **76**, 051901 (2007).

(国内雑誌)

[23] 清水 則孝: パリティ Vol.23 No.1 p.46, "第一原理計 算による原子核構造論"

#### (会議抄録)

- [24] Y. Iwata, N. Itagaki, J. A. Maruhn, and T. Otsuka: "The Competitive Reaction Mechanism in Exotic Nuclear Reactions", to appear in Int. J. Mod. Phys. E.
- [25] Y. Takei, Y. Iwata, and T. Ishitobi, "Taveling wave fronts of self-gravitating compressible viscous fluids", to appear in Proceedings of ICCS07, Springer-Verlag.
- [26] T. Otsuka, M. Honma, and D. Abe: "Effects of Spin-Isospin-Interactions on Nuclear Collective Motion", Nucl. Phys. A788 3c-11c, (2007).
- [27] S. Sasaki and T. Yamazaki Identification of shallow two-body bound states in finite volume, PoS LAT2007 (2007) 131.
- [28] P.A. Boyle, R.D. Kenway, R.J. Tweedie, J.M. Zanotii, A. Jüttner, J.M. Flynn, C.T. Sachraja, S. Sasaki and A. Soni K<sub>l3</sub> form factor with N<sub>f</sub>=2+1 dynamical domain wall fermions, PoS LAT2007 (2007) 380.
- [29] Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, N. Ukita and T. Umeda "Thermodynamics and heavy-quark free energies at finite temperature and density with two flavors of improved Wilson quarks", PoS LAT2007, 207 (2007), arXiv:0710.0945.
- [30] 前沢祐: "格子 QCD による QGP 物質の性質の解 明",素粒子論研究,116 巻 2 号,B1 項,2007 年.
- [31] Motoi Tachibana, Naoki Yamamoto, Tetsuo Hatsuda and Gordon Baym : "Chiral-super interplay in QCD", Prod. Theor. Phys. Suppl 168, 422 (2007).
- [32] 赤松幸尚、初田哲男、平野哲文:「ランジュバン方程 式を用いた重いクォークの QGP 流体中での拡散過 程」、原子核研究 Vol.52, Suppl.3 (Feb. 2008), 7-10
- [33] T. Hirano : "Relativistic Hydrodynamics at RHIC and LHC", proceedings of Yukawa International Symposium, Progress of Theoretical Physics Supplement 168, 347 (2007).
- [34] T. Hirano, U. Heinz, D. Kharzeev, R. Lacey and Y. Nara : "Elliptic flow from a hybrid CGC, full 3D hydro and hadronic cascade model", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys, 34, S879 (2007).

(学位論文)

- [35] Yoritaka Iwata: "Exotic Reaction Dynamics in Heavy-Ion Collisions, University of Tokyo",博士 論文
- [36] 前沢祐: "Polyakov loop correlations in quark-gluon plasma from lattice QCD simulations", 博士論文.

- [37] 内野瞬: "Dynamical symmetries in spinor Bose-Einstein condensates", 修士論文
- [38] 月山幸志郎: "Continuum effects for the low-lying states in drip-line oxygen isotopes", 修士論文
- [39] 赤松幸尚: "Heavy Quark Diffusion in Quark-Gluon Plasma", 修士論文
- [40] 金澤拓也: "SU(2) 格子ゲージ理論におけるクォーク 閉じ込め証明に関する研究",修士論文.

#### (国際会議)

一般講演

- [41] Y. Iwata and T. Otuska: "Competitive reaction mechanisms in exotic nuclear reactions"(ポス ター)、INPC2007(東京)、2007年6月。
- [42] Y. Iwata, and T. Otsuka, "Exotic reaction mechanism in heavy-ion collisions" (ポスター)、NS07 (京都)、2007年6月。
- [43] Y. Iwata, "Competitive Reaction Mechanisms in Exotic Nuclear Reactions" (□頭、International conference on heavy-ion collision (Beijing)、2007 年7月。
- [44] Y. Iwata Y. Takei, and T. Ishitobi, "Space-time structure of the self-gravitating compressible viscous fluids" (口頭)、ICCS07 (Boston)、2007 年 10月。
- [45] D. Abe and T. Otsuka: "Tensor-force effect on exotic nuclei by Hartree-Fock-Bogoliubov method", UNEDF annual meeting (アメリカ, 2007年8月23日).
- [46] D. Abe and T. Otsuka: "Tensor-force Effect on Exotic Nuclei", First FIDIPRO-JSPS Workshop on Energy Density Functionals in Nuclei (フィンラン ド, 2007年10月26日).
- [47] K. Tsukiyama, T. Otsuka, and R. Fujimoto: "Continuum effects for the shell-model calculation near the drip line oxygen isotopes", JUSTIPEN workshop, 理化学研究所, 2007年6月23日
- [48] K. Tsukiyama, T. Otsuka, and R. Fujimoto, "Continuum effects for the shell-model calculation near the drip line oxygen isotopes" The Sixth Summer School on Exotic Beam Physics, ミシガン州立大学 (アメリカ), 2007 年 8 月 7 日
- [49] K. Tsukiyama, T. Otsuka, and R. Fujimoto "Continuum effects for the shell-model calculation near the drip line oxygen isotopes" The 6th CNS International Summer School, , 東大 CNS, 2007 年 8 月 27 日
- [50] K. Nomura: "Shape Phase Transitions and Critical Point Symmetries in Neutron-rich Nuclei", 6-th CNS international summer school (CISS07), CNS, Wako, Japan, August 28 - September 1, 2007.
- [51] H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, "Hyperon-nucleon potentials from lattice QCD", 25th International Symposium on Lattice Field Theory, Regensburg, Germany, Jul. 30 - Aug. 4 (2007). PoS LAT2007:156, 2007.

- [52] N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, "Lattice QCD approach to nuclear force", 25th International Symposium on Lattice Field Theory, Regensburg, Germany, Jul. 30 - Aug. 4 (2007). PoS LAT-TICE2007:146, 2006.
- [53] S. Sasaki and T. Yamazaki, Identification of shallow two-body bound states in finite volume. The XXV international symposium on Lattice 2007, July 30-August 4, 2007, Regensburg, German.
- [54] Y. Maezawa : "Heavy-quark free energy and Debye screening effect at finite temperature and density in lattice QCD simulations" (Poster Session), INTERNATIONAL NUCLEAR PHYSICS CON-FERENCE, June 3-8, 2007, Tokyo, Japan.
- [55] Y. Maezawa : "Thermodynamics and heavy-quark free energies at finite temperature and density in lattice QCD simulations", Nagoya Mini-Workshop "Chiral Symmetry in hot and/or dense matter", June 25-27, 2007, Nagoya, Japan.
- [56] Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, N. Ukita and T. Umeda : "Thermodynamics and heavy-quark free energies at finite temperature and density with two flavors of improved Wilson quarks", The XXV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2007), July 30-August 4, 2007, Regensburg, Germany.
- [57] Y. Maezawa : "Thermodynamics of QCD in lattice simulation with improved Wilson quark action at finite temperature and density", QCD in extreme conditions, August 6-8, 2007, INFN Lab., Rome, Italy.
- [58] Y. Maezawa : "Magnetic and electric screening mass in two-flavors of lattice QCD simulations" (Poster Session), Fundamental Problems in Hot and/or Dense QCD (NFQCD2008), March 3-6, 2008, YITP, Kyoto, Japan.
- [59] Naoki Yamamoto, Tetsuo Hatsuda, Motoi Tachibana and Gordon Baym : "Hadron-quark continuity in the QCD phase diagram and excitations, driven by the axial anomaly", INTERNA-TIONAL NUCLEAR PHYSICS CONFERENCE, Tokyo, Japan, June 3-8, 2007.
- [60] Naoki Yamamoto, Tetsuo Hatsuda, Motoi Tachibana and Gordon Baym : "Hadron-quark Continuity in the QCD phase diagram and excitations", The Berkeley School of Collective Dynamics in High-Energy Collisions, Lawrence Berkeley National Laboratory, May 21-26, 2007.
- [61] Naoki Yamamoto, Tetsuo Hatsuda, Motoi Tachibana : "Spectral Continuity of vector mesons in dense QCD", New Frontiers in QCD 2008, Kyoto, Japan, Mar. 3-6, 2008.
- [62] Yukinao Akamatsu, Tetsuo Hatsuda and Tetsufumi Hirano : "Transport of Heavy Quarks in

Quark-Gluon Fluid at RHIC", Korean Physical Society Meeting (Jeju Island, Korea, October 17-19, 2007).

- [63] Yukinao Akamatsu, Tetsuo Hatsuda and Tetsufumi Hirano : "Heavy Quark Diffusion as a Probe of sQGP" (poster), "YITP International Symposium : Fundamental Problems in Hot and/or Dense QCD" (Yukawa Institute, Kyoto, Japan, March 3-6, 2008).
- [64] T. Hirano : "Dynamical Modeling of Relativistic Heavy Ion Collisions", Korean Physical Society Meeting, Jeju Island, Korea, Oct. 2007.
- [65] T. Hirano : "Hadronic dissipative effects on transverse dynamics at RHIC", the 20th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Quark Matter 2008 (QM2008), Jaipur, India, Feb. 2008.

#### 招待講演

- [66] T. Otsuka, "Shell Evolution due to Tensor Interaction", ect\* Workshop on Experiment – Theory Intersections in Modern Nuclear Structure, ect\*, Trento, Italy (2007)
- [67] T. Otsuka, "Shell Evolution in Exotic Nuclei", Les Houches school on Theoretical Nuclear Physics, Les Houches, France. (2007)
- [68] T. Otsuka, "Exotic Nuclei and Yukawa's Forces", International Nuclear Physics Conference, Tokyo, Japan (2007)
- [69] T. Otsuka, "Reshaping the Island of Inversion", Symposium "Excellence in Basic and Applied Nuclear Science", Monterey, USA (2007)
- [70] T. Otsuka, "Structure of exotic nuclei in the medium mass region", International Symposium on Physics of Unstable Nuclei, Hoi An, Vietnam (2007)
- [71] T. Otsuka, "Shell structure of exotic nuclei (3 lectures)", Enrico Fermi Summer School, Varenna, Italy (2007)
- [72] T. Otsuka, "Structure of Exotic Nuclei : Some challenges", Users Meetings, National Superconducting Cyclotron Laboratory, East Lansing, USA (2007)
- [73] T. Otsuka, "Superheavy Magic Numbers and the Tensor Force", 3rd INTERNATIONAL CONFER-ENCE ON THE CHEMISTRY AND PHYSICS OF THE TRANSACTINIDE ELEMENTS, Davos, Switzerland (2007)
- [74] T. Otsuka, "Effective NN force and 3N mechanism", 3rd Japanese-German EFES(JSPS)-DFG/GSI workshop on Nuclear Structure and Astrophysics, Frauenwoerth in Chiemsee, Germany (2007)
- [75] T. Otsuka, "Long-range repulsion in effective NN force and its 3N origin", First FIDIPRO-JSPS Workshop on Energy Density Functionals in Nuclei, Keurusselka, Finland (2007)

- [76] T. Otsuka, "Fujita-Miyazawa 3N mechanism and neutron-rich exotic nuclei", International Symposium on New Facet of Three nucleon Force -50 years of Fujita-Miyazawa Three Nucleon Force-, Tokyo, Japan (2007)
- [77] T. Otsuka, "Delta-hole effects on the shell evolution of neutron-rich nuclei", International workshop on "Chiral symmetry in hadrons and nuclei", Osaka, Japan (2007)
- [78] T. Otsuka, "3NF mechanism and shell structure of exotic neutron-rich nuclei", Workshop on Correlations in Nuclei, INT Program Nuclear Manybody Approaches for the 21st Century, INT, Seattle, USA (2007)
- [79] T. Otsuka, "Shell modeland exotic nuclei", Spring School, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan (2008)
- [80] T. Otsuka, "At the crossroad of spectroscopy and spectrometer", TORIJIN-EFES-NSCL joint workshop on future prospects of spectroscopy and direct reactions, MSU, East Lansing, USA (2008)
- [81] T. Hatsuda, "Lattice QCD: (i) Nuclear Force, (ii) In-medium Hadrons", Lectures given at Berkeley School of Collective Dynamics in Heavy-Ion Collisions, LBNL, Berkeley, USA, May 21-26 (2007).
- [82] T. Hatsuda : "The Nuclear Force from Lattice QCD", Chiral 07: Chiral Symmetry in Hadron and Nuclear Physics, Osaka, Japan, Nov.13-16 (2007).
- [83] D. Jido, T. Hatsuda, T. Kunihiro, "In-medium Pions and Partial Restoration of Chiral Symmetry: A Model-independent analysis", YKIS Seminar on New Frontiers in QCD: Exotic Hadrons and Hadronic Matter, Kyoto, Japan, 20 Nov - 8 Dec (2006). Prog.Theor.Phys.Suppl. 168, 478 (2007).
- [84] T. Hirano : "Flow and femtoscopy from QGP hydro + hadronic cascade", Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, Sonoma, Carifornia, USA, Aug. 2007.
- [85] T. Hirano : "Collective Flow from a hydro + cascade approach", The 37th meeting of the International Symposium on Multiparticle Dynamics (ISMD2007), Lawrence Berkeley National Laboratory, California, USA, Aug. 2007.
- [86] T. Hirano: "Toward understanding of quark-gluon plasma in relativistic heavy ion collisions", The 6th CNS International Summer School, Center for Nuclear Study, the Univ. of Tokyo, Wako, Japan, Aug. 2007.
- [87] T. Hirano : "Dynamical Modeling of Relativistic Heavy Ion Collisions", Heavy Ion Meeting 2007-10, Jeju Island, Korea, Oct. 2007.
- [88] T. Hirano: "Hydrodynamics and Flow", QGP Winter School 2008, Jaipur, India, Feb. 2008.

(国内会議)

#### 一般講演

- [89] 清水 則孝, 大塚 孝治, 水崎 高浩, 本間 道雄: "HFB 基底を用いたモンテカルロ殻模型の新しい方法I", 日 本物理学会 第 62 回年次大会, 北海道大学, 2007 年 9 月
- [90] 清水 則孝: "並列計算による原子核における量子多体 構造のシミュレーション",次世代スーパーコンピュー ティング・シンポジウム 2007,明治安田生命ビル,2007 年 10 月
- [91] 清水 則孝: "モンテカルロ殻模型による原子核構造計算の現状と展望",未来の素粒子・原子核数値シミュレーション,高エネルギー加速器研究機構,2007年12月
- [92] 清水 則孝, 大塚 孝治, 水崎 高浩, 本間 道雄: "殻模型 計算の進展とモンテカルロ殻模型", 日本物理学会 第 63 回年次大会, 近畿大学, 2008 年 3 月
- [93] 岩田順敬、板垣直之、J. A.Maruhn、大津秀暁、大塚 孝治、TDHF による重い原子核反応機構に関する研 究(口頭)、日本物理学会(大阪)、2008 年 3 月。
- [94] 岩田順敬、重い原子核反応の3次元TDHF計算(口 頭)、理研 RIBF ミニワークショップ「超重元素合成 への課題」(和光)、2007年7月。
- [95] Yoritaka Iwata, Heavy Nuclear Reactions, Informal seminar at GSI, 2007年11月。
- [96] 岩田順敬、応用数理特論、集中講義(中国・大連理工 大学)、2008 年 3 月。
- [97] 阿部大介, 大塚孝治: "Tensor-force Effect on Exotic Nuclei", International Nuclear Physics Conference (東京, 2007年6月6日).
- [98] 阿部大介,大塚孝治: "Investigation of tensorforce effect on exotic nuclei by Hartree-Fock-Bogoliubov method", International Workshop on Nuclear Structure: New Pictures on the Extended Isospin Space (京都, 2007年6月11日).
- [99] 阿部大介,大塚孝治:「テンソル力を含む Gogny 型 相互作用を用いた HFB 計算による不安定核構造の研 究」,日本物理学会第 62 回年次大会(北海道,2007 年 9月 23 日).
- [100] RIKEN mini workshop "The structure and reaction dynamics of highly excited molecularresonance-states of light neutron-rich nuclei" 19th, March 2008, Conference room (201), RIBF building, RIKEN
- [101] 内野瞬、大塚孝治、上田正仁: スピノールBECに おける力学的対称性",日本物理学会 2008 年春季大会 (近畿大学、2008 年 3 月 24 日).
- [102] K. Tsukiyama, T. Otsuka, and R. Fujimoto, "Continuum effects for the shell-model calculation near the drip line oxygen isotopes" (poster), Interational Nuclear Physics Conference, 東京国際フォー ラム, 2007年6月7日
- [103] K. Tsukiyama, T. Otsuka, and R. Fujimoto, "Continuum effects for the shell-model calculation near the drip line oxygen isotopes" (poster), Nuclear Structure: New Pictures in the Extended Isospin Space, 京都基研 2007 年 6 月 14 日

- [104] 月山幸志郎,大塚孝治,藤本林太郎「ドリップ線付 近核における非束縛な低励起状態の殻模型計算に対す る連続状態の寄与」日本物理学会2007年秋季大会, 北海道大学,2007年9月
- [105] 月山幸志郎,大塚孝治,藤本林太郎,「不安定核に おける連続状態の効果」(ポスター),「未来の素粒子・ 原子核数値シミュレーション」,KEK 2007 年 12 月 19 日
- [106] 月山幸志郎,大塚孝治,藤本林太郎,「不安定核の 低励起状態における連続状態の効果」,日本物理学会 2008 年春季大会,近畿大学,2008 年 3 月
- [107] 野村昂亮、清水則孝、大塚孝治: "中性子過剰核における形の相転移と臨界点対称性",日本物理学会第62回年次大会、北海道大学、札幌市、2007年9月21日-24日
- [108] 野村昂亮: "New derivation of the interacting boson model Hamiltonian and its applications to heavy unstable nuclei", シンポジウム「未来の素粒 子・原子核数値シミュレーション」、つくば国際会議 場「エポカルつくば」、つくば市、2007 年 12 月 19 日-20 日
- [109] 野村昂亮、清水則孝、大塚孝治: "重い不安定核の低 励起集団運動状態",日本物理学会第63回年次大会、 近畿大学、東大阪市、2008年3月23日-26日
- [110] S. Sasaki and T. Yamazaki,
   現実的な 2+1 フレーバー格子 QCD による核子形状
   因子の研究、
   日本物理学会 第63回年会、近畿大学、2008年3
   月 22-26日
- [111] 前沢祐: "格子 QCD による QGP 物質の性質の解 明",基研研究会「熱場の量子論とその応用」(京都大 学基礎物理学研究所,2006 年 9 月 5-7 日)
- [112] 山本直希、初田哲男、橘基、Gordon Baym: "New critical point and hadron-quark continuity in dense QCD"、第7回 Heavy Ion Cafe (東京大学、2008年 1月12日)
- [113] 赤松幸尚、初田哲男、平野哲文: "QGP transport phenomena probed by heavy quark",「熱場の量子 論とその応用」(京都大学基礎物理学研究所、 2007 年9月5日-7日).
- [114] 赤松幸尚、初田哲男、平野哲文: "Langevin Analysis of Heavy Quark Diffusion in Quark-Gluon Fluid", 「重イオン衝突反応でみる QGP の現象論的研究 SPS、RHIC から LHC へ」」(大阪大学 RCNP、 2007 年 10 月 29,30 日).
- [115] 赤松幸尚、初田哲男、平野哲文: "Heavy Quark Diffusion in Quark-Gluon Fluid" (poster),「未来の素 粒子・原子核数値シミュレーション」 (KEK、2007 年 12 月 19,20 日).
- [116] 赤松幸尚、初田哲男、平野哲文 : "Heavy Quark Diffusion in QGP Fluid", 日本物理学会 (近畿大学、2008 年 3 月 22 日-26 日).
- [117] 金澤拓也: "SU(2) 格子ゲージ理論における閉じ込 めの解析的証明の批判的考察",日本物理学会,近畿大 学,2008 年 3 月 24 日

[118] 平野哲文: "Hadronic source function in relativistic heavy ion collisions", 日本物理学会年会, 近畿大 学, 2008 年 3 月.

#### 招待講演

- [119] 大塚 孝治、"RIBF が開くフェムトフロンティア"、研究会「原子核物理学の将来像 ~ RIBF と J-PARC の稼動する今、新たな展開を目指して~」、京都大学、 京都 (2007)
- [120] 初田哲男: "超高温・高密度物質とその対称性",「極限量子系とその対称性シンポジューム」(東京大学、2007年11月13日-15日)
- [121] 初田哲男: "ビッグバン直後の宇宙を理解する: クォーク物質",「広島大学・高エネルギー加速器研究機構 連携学術講演会 2007: 粒子加速器を用いた素粒子・ 原子核・宇宙の物理学」(広島大学, 2007 年 12 月 8 日)
- [122] 平野哲文: "QGP hydro + hadronic cascade model: Status report", 重イオン衝突反応でみる QGPの現象論的研究, 大阪大学核物理研究センター, 2007 年 10 月.
- [123] 平野哲文: "What did we learn at RHIC?", 原子 核・ハドロン物理: 横断研究会, 高エネルギー加速器 研究機構, 2007 年 11 月.

## 1.2 素粒子論研究室(江口・柳田・ 松尾・浜口)

素粒子論研究室では、物質の基本構成要素とその 間に働く相互作用の解明を目指して研究を続けてい る。基礎的な弦理論や超対称性を持つ場の理論のさ まざま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。

#### 1.2.1 弦理論とゲージ理論

カラビヤウコンパクト化

超弦理論は10次元時空を運動する弦の理論であ り、4次元の理論として利用するためには余分な6次 元空間をコンパクト化することが必要である。こう して得られる4次元理論の性質は6次元の内部空間 の性質に大きく依存している。特に近年、ゲージ場 のフラックスがその上にあるようなカラビ・ヤウ空間 によるコンパクト化が素粒子模型として有望である と考えられ、詳しく研究されている。フラックスコン パクト化と呼ばれるこのような模型において、超対 称フラックス真空は、モジュライ空間上で特異カラ ビ・ヤウ空間の近傍に多く存在することが知られてい る。また世界面上の共形場理論の見地からは、多く の未解決問題を含むという意味においても、特異カ ラビ・ヤウ空間上の超弦理論は重要性を持つ。江口と 菅原は、昨年度に引き続き、Taormina 氏 ( Durham 大 ) との共同研究において、非コンパクト特異カラ ビ・ヤウ空間に対し、超弦理論における重要な物理 量である楕円種数の代数的構造を調べた。特に関係 の深い higher level のアッペル関数や N = 4 共形代 数の指標の $\Gamma(2)$  invariant completion を明らかにし た。[27]

また江口は、超弦理論において重力が decouple し 超対称ゲージ理論が得られる極限を調べるため、ALE ファイブレーションを持つカラビーヤウ多様体上の 弦理論を調べた。ALE 空間が退化する様子を表すパ ラメーターを  $\epsilon$  とすると、 $\epsilon$  が小さいときカラビー ヤウ多様体には  $\epsilon$  の巾乗と  $\epsilon$  の対数の 2 種類の 周期 が現れる。これらの周期をそれぞれゲージ理論と重 力理論の質量スケールと見なすとゲージ理論の質量 スケールが通常の繰り込み群の振る舞いと異なって weak gravity conjecture と呼ばれる質量依存性を持 つことを示した [4]。

菅原は河合氏(ヘルシンキ大)との共同研究にお いて、非幾何学的背景上の弦理論の共形場理論に基 づく一連の研究を行った。これは典型的には T-双対 変換を transition function に含むようなファイバー 構造を持つ弦理論の真空として定義され、「T-フォー ルド」と呼ばれる。菅原はまず境界共形場理論に基 づき S<sup>1</sup> ファイバーの T-フォールド上の D-ブレーン を調べ、更に SU(2)-WZW モデルをファイバーとす る拡張を論じた。、特に非幾何学的背景に特徴的な現 象として、T-フォールド上の fractional brane に端 を持つ開弦の質量スペクトルのモジュライ依存性に、 ある種の非線形性が現れることを示した。[19,62] 菅 原はまた、K3をファイバーとしミラー対称性変換を transition function に含むような「ミラー・フォール ド」の超弦真空を、ゲプナー模型等の可解な超共形 場理論を用いて厳密に構成した。これはT-フォール ドの曲がった時空への拡張として興味深い。モジュ ラー不変分配関数の構成に加えて、真空の超対称性 (の破れ) 安定性などの物理的性質を解析し、また ミラー・フォールド上の D-ブレーンについて研究を 行った。[20, 63, 76, 77].

川野は、Caltechの大栗氏と大河内氏とともに、タ イプ B超弦理論のALE-fibered geometry と呼ばれ る一種の local Calabi-Yau 多様体のコンパクト化を 用いると、超対称性の破れとそれを gauge mediation できるモデルを geometric engineering できることを 示した [13]。最近、Intriligator-Seiberg-Shih(ISS) に よって、準安定状態を用いた超対称性を破る非常に 簡単な模型が見つけられたが、実際に、このアイデ アを用いた様々な現象論的な模型が提案されている。 特に、村山-野村による gauge mediation model は、 このアイデアを使っているモデルの中でもとりわけ シンプルなモデルを提唱した。このようなモデルが、 弦理論のコンパクト化から実現できることを川野ら が実際に示した。

#### 非臨界弦、行列模型、位相的弦理論

低次元の弦理論は Liouville 理論と行列量子力学と いう全く異なる記述を持つ。松尾は Bourgine, 細道, Kostovらと共同で[15] このような弦模型における D ブレインに端点を持つ開弦の運動を行列量子力学と Liouville 模型の両面から考察し、散乱振幅の計算に おいて両方の理論から同じ結論が導かれることを示 した。また行列量子力学における記述が two matrix 模型の混合振幅と関連づけられることを指摘した。

位相的弦理論は様々な可解構造を持つ超弦理論の 模型の一つである。特に BPS 状態数え上げ問題や Gromov-Witten 不変量等への応用の観点から興味 を持たれてきた。toric Calabi-Yau 空間に関して、 非自己双対背景場中における BPS 状態を数え上げ る手法として refined vertex が提唱されている。瀧 は SU(N)-幾何という局所 Calabi-Yau 空間に対して refined vertex の方法を適用した。その結果、refined vertex に修正が必要となる事を見いだした。特に、 その修正の下で位相的弦理論の分配関数が K-理論版 の Nekrasov 公式と厳密に一致する事を示した [23]。

M-理論は IIA 型超弦理論の強結合領域を記述す ると考えられている 11 次元の理論である。この理 論は M5-ブレーンと M2-ブレーンと呼ばれる二種類 のブレーンを含み、これらのブレーンを用いること で4次元の超対称ゲージ理論を実現できることが知 られている。たとえば、 $\mathcal{N} = 1$  ゲージ理論はある 複素1次元の curve に巻きついた M5-brane によっ て実現することができる。この curve は deformed conifold の degenerating fiber の部分にあらわれる curve と一致している。戴は、 $\mathcal{N}=2$  SU(N) ゲージ 理論の prepotential の非摂動部分、即ち Nekrasov のインスタントン数え上げ公式を、上記の curve が 持つ情報から再現した。[21] 具体的には、deformed conifold の asymptotic 領域に複数の B-ブレインを 入れ、その B-ブレインの間の相関関数を一旦ある Kontsevich-like 行列模型にまとめ、さらにこの行列 模型のリーディング項からインスタントンの数え上 げを導出した。

#### 境界状態

弦理論のソリトンである D ブレーンを共形場理論 を用いて厳密に記述する方法として境界状態がある。 これまで研究されてきたのは、D ブレーンによる閉 弦の吸収・放出を記述する閉弦セクターでの境界状 態であるが、松尾、今村、礒野は以前に D ブレーン が交叉している状況において開弦を吸収・放出する 状態として、開弦セクターでの境界状態を提案した。 松尾、今村、礒野はこの開弦の境界状態について引 き続き研究を行い、これまでのボゾン的弦に対する 結果を拡張し、超弦理論における開弦の境界状態を 具体的に構成する手法を与えた。

#### 弦の場の理論

弦理論を第二量子化した理論は弦の場の理論と呼ばれる。これは無限個の場を含む理論であり、いくつかの定式化の方法が知られている。Wittenによって提案された開弦の場の理論においてD-ブレーンを

ソリトン的なオブジェクトとして与えるような解析 解が近年発見され、大きな進展があった。横山はこ の解析解ついての最近の発展を修士論文にまとめた [44]。

#### 弦理論とブラックホール

弦理論はブラックホールの物理を調べる上で有用 であることが知られている。例えばブラックホール エントロピーの微視的導出などは弦理論の大きな成 果の一つである。ブラックホールのエントロピーを 弦理論、あるいは超重力理論において議論する上で アトラクター機構と呼ばれるものが重要な役割を果 たす。これは、ブラックホール近傍ではある種のス カラー場が、遠方での値によらず、ブラックホール のチャージによって決まる値に漸近するというもの である。通常このアトラクター機構は閉弦の場につ いて議論されている。Raeymaekers は、開弦に起源 をもつモジュライに対するアトラクター機構につい て研究を行った。曲がった時空上のD-ブレーン上で 実際にアトラクター機構が働くような簡単な例を構 成し、その解析を行った [17]。

また Raeymaekers は D1-D5-P というブレーン系 によって実現される5次元ブラックホールについて、 その背景上のプローブ解を構成し、双対性を用いるこ とにより、これが D1-プレーンが Myers 効果によっ てブラックホール地平面にまきついたカルツァクラ インモノポールに変化している束縛状態であること を明らかにした。また、これらのブレーンがモジュ ライ空間上に存在する磁場の影響によりランダウ準 位を生成し、この縮退がブラックホールのエントロ ピーを与えることを示した [18]。

#### AdS/CFT 対応

弦理論にはDブレーンと呼ばれる広がりを持った オブジェクトが含まれ、その上ではさまざまな種類 のゲージ理論が実現される。このことによる弦理論 とゲージ理論の間の関係(双対性)は弦理論におけ る重要な研究課題の1つとなっている。特に、Dブ レーンの重力的表現である AdS 空間を背景とする弦 理論と、ブレーン上の共形場理論(CFT)の間の双対 性はAdS/CFT対応と呼ばれる。もともとこの双対 性は多数の超対称性および共形対称性を持つような 場合について提案されたものであるが、現在では超 対称性の数が少ない共形場理論や、共形対称性がな いゲージ理論へも拡張され、ゲージ/重力対応とも呼 ばれている。本研究室では、この双対性の解明に向 け、ゲージ理論側と弦理論側の両方からさまざまな アプローチでの研究がなされている。

最も簡単な AdS/CFT 対応の例は、 $\mathcal{N} = 4$  超対称 ゲージ理論と  $AdS_5 \times S^5$ 時空上の弦理論の間の対応 である。これらは SO(6)の大域的対称性を持つが、  $SU(2) \subset SO(6)$ の離散部分群によるオービフォール ドによって、ADE 型のクイバーゲージ理論が得られ ることが知られている。八木は立川氏(IAS)とと もに、そのような理論のバリオン的演算子について 調べ、その個数および共形次元が弦理論からの解析 と一致することを確かめた [24, 67, 72, 74]。この際、 SU(2)の離散部分群が S<sup>2</sup> に作用したときの固定点の 個数および位数が、パリオン的演算子のスペクトラ ムに反映されることを見出した。

一般に、AdS/CFT 対応を考える上で最初に問題 となるのは、与えられたゲージ理論に対してどのよ うな重力の古典解を対応させればよいかという点で ある。この対応を与える手続きとしてプレーンタイ リングと呼ばれる手法がある。ブレーンタイリング は平面上に描かれた図形であり、ゲージ理論の情報 とそのゲージ理論に双対なカラビヤウ空間の情報を 同時に含んでいる。また、ブレーンタイリングはD5-プレーンとNS5-プレーンからなるプレーン系の構造 を表現している図形ともみなすことができる。

今村、木村、山崎はオリエンティフォールドがある 場合にゲージアノマリーの相殺がどのようにブレー ン系の無矛盾条件から保障されるかを示した。また、 カラビヤウ空間上にフレーバーブレーンを導入した 場合にどのような物質場が得られるかを決める一般 的な手続きを与えた。[12, 60, 31]

山崎は、ブレーンタイリングの最近の発展を、自 身の研究成果を含めて [45] にまとめた。

#### AdS/CFT 対応における可積分性

10 次元の  $AdS_5 \times S5$  時空をターゲット空間とした弦のシグマ模型は、古典的に可積分であることが知られている。また、4 次元  $\mathcal{N} = 4$  ゲージ理論の局所演算子の共形次元も、可積分な 1+1 次元スピン鎖模型のエネルギーと同定可能であることが知られている。もし AdS/CFT 予想を真とするなら、このように各々の理論で違った現れ方をする 1+1 次元可積分構造は、実は同一のものを、結合定数に関して両極端の領域で見ているに過ぎない。

こうした観点から、両理論が結合定数の全領域で 備えると期待される可積分性を活用してそのスペク トラム(弦エネルギー/共形次元)を厳密に求めるこ とで、AdS/CFT予想の直接的検証における最大の 障害である"弱/強結合性"を克服しつつ、その証明 に迫ろうとする試みが、この数年来非常に活発にな されてきた。

林と岡村と鈴木は、Vicedo氏(ケンブリッジ大 DAMTP)との共同研究[11]において、弦理論の世 界面の空間座標と時間座標を入れ替える対称性に着 目し、large winding セクターと名付けられた領域 における弦の古典解を構成するとともに、その解の 代数曲線解釈を与えることで、 $\mathbf{R} \times S^3$ 上の弦シグマ 模型における楕円 2-cut 解を網羅することに成功し た。ここで得られた解は、非正則セクターにおける 弦理論の古典可積分性、及びそれを超えた量子可積 分性の理解にとって重要な意義を持つ。

加えて、同論文において著者らは、これまで注目 されてこなかった新しいクラスの弦の状態とゲージ 理論演算子との対応を提唱しており、これは今後の AdS/CFT 対応の研究にとって新しい検証舞台を切 り開く可能性がある [11, 39]。

AdS/CFT の可積分性は、特別な領域に限れば、 Bethe 仮説方程式により定義ないし記述できると考 えられている。岡村は Dorey 氏 (ケンブリッジ大 DAMTP)との共同研究 [16][84] において、これまで に様々な状況証拠・要請から推察されていた "AdS/CFT Bethe 仮説方程式"中の散乱行列に関し、その特異点 構造に着目することで、可積分性を仮定しない、純 粋に運動学的な見地から、その無矛盾性を確かめた。 この検証は、いわゆるラージ N 極限で AdS<sub>5</sub>/CFT<sub>4</sub> が可積分であることを強く示唆するとともに、それ に拠った量子 Bethe 仮説方程式の正当性に対して重 要な証拠を与えた。

無限に大きな角運動量を持った弦のエネルギーと ゲージ理論における無限に長い演算子の共形次元の スペクトラムは、上述のような可積分系の手法を用 いて深く理解されつつあるが、有限角運動量の弦/有 限長さの演算子のスペクトラムは Bethe 仮説方程式 では正確には記述できない場合があることが知られ ている。

初田と鈴木は  $\mathbf{R} \times S^3$ 上の弦シグマ模型におけるマ ルチスピンソリトン解である "dyonic giant magnon" と呼ばれる古典弦の有限サイズ効果 [48] を詳しく解析 し、dyonic giant magnon のエネルギーが指数型の有 限サイズ補正を受けることを示した [53, 81, 83, 85]。 さらに、分散関係式への有限サイズ補正を与える場の 理論の公式(Lüscher の公式)を、2次元世界面の理 論で入射粒子が束縛状態を成している場合に適用す ることで上の結果が再現できることを示した。これは dyonic giant magnon の有限サイズ補正が wrapping 効果と呼ばれる相互作用に起因していることを示唆 しており、ゲージ理論側の有限サイズ効果を理解す る上で重要な足がかりになると思われる。

鈴木は、 $AdS_5 \times S5$ 上の弦理論の古典解の構成と、 可積分性を用いた AdS/CFT 対応の検証に関する 考察を行った以上の結果を元に博士論文を作成した [40]。

岡村は博士論文 [39] において、可積分系の手法を用 いた AdS/CFT の研究の歴史を包括的にレビューす るとともに、その分野の発展に対する自身の寄与を、 これまでの研究成果の詳説を通して明らかにした。

林は、可積分性とS行列を用いることにより、AdS 側、CFT 側の両者のスペクトラムの一致が Bethe 仮 説方程式にまとめられるという AdS/CFT 対応の最 近の発展をレビューし、[11]の成果を含めて修士論 文 [47] とした。

#### 超対称ゲージ理論

川野と八木は、 $\mathcal{N} = 1$  超対称性をもつ Spin(10)ゲージ理論でスピン表現である物質場を 2 つと任意 個のベクトル表現の物質場をもつモデルについて研 究をした。特に、このモデルでベクトル表現の物質場 の数がある範囲にあるときには、赤外固定点を持つこ ととその点において双対なモデルが存在することが 予想されていた。今回の研究では、a-maximization という方法を用いて、この赤外固定点での物理を詳細に調べることに成功した [14,70]。また、双対なモ デルについてもより詳しいことが理解できた。

八木は、これらの結果を元に、*a*-maximizationを 用いた超対称ゲージ理論の赤外固定点の解析につい て博士論文にまとめた [43]。

### 1.2.2 TeV スケールの標準模型、素粒子 論的宇宙論

標準模型を超える物理として有力なものの一つに 超対称標準模型がある。標準模型を超対称性を持つ ように拡張することで、階層性問題が解決すること や、標準模型の三つのゲージ結合定数が高エネルギー で一致し、大統一理論への強い示唆を与えるなどの 理由でこの理論は支持されている。

超対称標準模型では標準模型の粒子にそれぞれス ピンが1/2だけ異なる超対称性パートナーと呼ばれ る粒子が存在する。たとえば、電子にはその超対称 性パートナーであるスカラー電子が存在すると考え られている。これらの超対称性パートナーの粒子は 超対称性の破れに伴って O(100) GeV – O(1) TeV の質量を持つと考えられている。このような粒子は 現在のところ未発見であるが、2008年中に稼働が始 まる大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) での発見が期 待されている。

さらに、超対称性理論では重力子の超対称性パートナーとしてグラビティーノの存在が予言される。このグラビティーノの質量は超対称性の破れのメカニズムによって大きく異なり、 $\mathcal{O}(1) \text{ eV} - \mathcal{O}(100)$  TeVまでの非常に幅広い範囲で予言されている。宇宙初期に生成されたグラビティーノはビッグバン元素合成や、現在の宇宙の暗黒物質の量に強い影響を与え、現在の観測に反する結果を導くことがある(グラビティーノ問題)。そのような中、 $\mathcal{O}(1) \text{ eV}$ のグラビティーノにはこのような問題がないことが知られている。このように軽いグラビティーノの存在はLHC 実験においても大きな役割を果たす。

浜口、柳田、白井、はスカラーレプトンが第二最軽 量超対称性粒子 (NLSP)の場合、その崩壊分岐を測 ることで LHC においても O(1) eV のグラビティー ノの質量が測れることを示した [9]。

白井は修士論文 [46] で軽いグラビティーノが存在 する場合での LHC での物理をレビューし、最軽量超 対称性粒子 (LSP)の識別について議論した。

柳田、渡利、瀧は中山(東大総合文化研究科/UC Berkeley)とともに、超対称性を破る模型で、主に Dterm で超対称性の破れを担うものを提唱した [22]。 この模型には、4次元時空上で定式化できるものと しては非常に軽いグラビティーノの質量を実現でき る、超対称スカラー粒子が超対称ゲージ粒子よりも 重くなる状況を実現できる、などの現象論的特徴を 持っている。

#### 素粒子論的宇宙論

グラビティーノが Lightest SUSY Particle (LSP) で安定な場合、その次に軽い Next-to-LSP (NLSP) が長寿命となり、その崩壊が宇宙論的に問題を引き 起こす場合がある。浜口、柳田は、初田氏(東大理・ 物理学科)上村氏(九州大)木野氏(東北大)と 共に、長寿命荷電粒子(スタウ)がある場合に初期 宇宙元素合成時に触媒反応を起こし、<sup>6</sup>Liが作られす ぎてしまう事を詳細な計算によって示し、制限を与 えた [5]。

*O*(1) eV のグラビティーノではグラビティーノ問 題は生じないが、冷たい暗黒物質の候補が超対称性 標準模型には存在しないという欠点があった。浜口、 柳田、白井は超対称性の破れがゲージ媒介型である場 合において、その媒介粒子の複合状態が*O*(100) TeV の冷たい暗黒物質になり得ることを指摘した [10]。

インフレーションがどのように実現されているか は重要な課題である。浜口、中島は井沢氏(基研)と 共に、強結合の超対称性ゲージ理論においてインフ レーションが自然に実現されている事を示した[8]。

#### ストリング現象論

浜口は、Buchmuller氏(DESY), Lebedev氏, Ratz 氏(Bonn)らと共に、ヘテロティック超弦理論の orbifold コンパクト化により超対称標準模型を導くよう な具体的な構成を与え、詳細な解析を行った[7]。ま た同様にヘテロティック超弦理論の orbifold コンパク ト化により、浜口は、Buchmuller氏(DESY), Lebedev氏(CERN), Ramos-Sanchez氏(Bonn), Ratz氏 (TUM)らと共に、ニュートリノの軽い質量を説明す るシーソー機構が(標準模型を導出し得るような)超 弦理論においても実現され得る事を示した[6]。

渡利はHall (UC Berkeley)、Salem (Caltech/Tufts) とともに湯川結合定数やそこから従う混合角にみら れる階層性、世代構造などといった特徴が、じつは ランダムな統計分布から生成されうる、という見方 を提唱した [25, 26]。

- <受賞>
- [1] 岡村 圭祐,平成19年度理学系研究科研究奨励賞(博 士),東京大学大学院理学系研究科,2008年3月
- [2] 岡村 圭祐,平成 19 年度 東京大学総長賞,東京大学, 2008 年 3 月
- [3] 山崎雅人, 平成 19 年度理学系研究科研究奨励賞(修 士), 東京大学大学院理学系研究科, 2008 年 3 月

#### <報文>

(原著論文)

- [4] T. Eguchi and Y. Tachikawa, "Rigid Limit in N=2 Supergravity and Weak-Gravity Conjecture," JHEP 0708 (2007) 068.
- [5] K. Hamaguchi, T. Hatsuda, M. Kamimura, Y. Kino, T. T. Yanagida, "Stau-catalyzed 6Li production in big-bang nucleosynthesis," Phys. Lett. B 650 (2007) 268-274.

- [6] W. Buchmuller, K. Hamaguchi, O. Lebedev, S. Ramos-Sanchez, M. Ratz, "Seesaw neutrinos from the heterotic string," Phys. Rev. Lett. 99 (2007) 021601.
- [7] W. Buchmuller, K. Hamaguchi, O. Lebedev, M. Ratz, "Supersymmetric Standard Model from the Heterotic String (II)," Nucl. Phys. B 785 (2007) 149-209.
- [8] K. Hamaguchi, K. -I. Izawa, H. Nakajima, "Supersymmetric inflation of dynamical origin," Phys. Lett. B 662 (2008) 208-212.
- [9] K. Hamaguchi, S. Shirai and T. T. Yanagida, "Determining the mass for a light gravitino," Phys. Lett. B 651 (2007) 44.
- [10] K. Hamaguchi, S. Shirai and T. T. Yanagida, "Composite Messenger Baryon as a Cold Dark Matter," Phys. Lett. B 654 (2007) 110.
- [11] H. Hayashi, K. Okamura, R. Suzuki and B. Vicedo, "Large Winding Sector of AdS/CFT," JHEP 0711 (2007) 033.
- [12] Y. Imamura, K. Kimura and M. Yamazaki, "Anomalies and O-plane charges in orientifolded brane tilings," JHEP 0803 (2008) 058.
- [13] T. Kawano, H. Ooguri, and Y. Ookouchi, "Gauge Mediation in String Theory," Phys. Lett. B652 (2007) 40.
- [14] T. Kawano and F. Yagi, "Supersymmetric  $\mathcal{N} = 1$ Spin(10) Gauge Theory with Two Spinors via a-Maximization," Nucl. Phys. **B786** (2007) 135.
- [15] J. E. Bourgine, K. Hosomichi, I. Kostov and Y. Matsuo, "Scattering of Long Folded Strings and Mixed Correlators in the Two-Matrix Model," Nucl. Phys. B **795** (2008) 243.
- [16] N. Dorey and K. Okamura, "Singularities of the Magnon Boundstate S-Matrix," JHEP 0803 (2008) 037.
- [17] J. Raeymaekers, "Open string attractors," JHEP 0704 (2007) 075.
- [18] J. Raeymaekers, "Near-horizon microstates of the D1-D5-P black hole," JHEP 0802 (2008) 006.
- [19] S. Kawai and Y. Sugawara, "D-branes in T-fold conformal field theory," JHEP 0802 (2008) 027.
- [20] S. Kawai and Y. Sugawara, "Mirrorfolds with K3 Fibrations," JHEP 0802 (2008) 065.
- [21] T.-S. Tai, "Instanton counting and matrix model," Prog.Theor.Phys.119 (2008) 165-177.
- [22] Y. Nakayama, M. Taki, T. Watari and T. T. Yanagida, "Gauge mediation with Dterm SUSY breaking," Phys. Lett. B 655 (2007) 58.
- [23] M. Taki, "Refined Topological Vertex and Instanton Counting," JHEP 0803 (2008) 048.
- [24] Y. Tachikawa and F. Yagi, "A-D-E Quivers and Baryonic Operators," JHEP 0801 (2008) 010.

- [25] L. J. Hall, M. P. Salem and T. Watari, "Quark and Lepton Masses from Gaussian Landscapes," Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 141801.
- [26] L. J. Hall, M. P. Salem and T. Watari, "Statistical Understanding of Quark and Lepton Masses in Gaussian Landscapes," Phys. Rev. D 76 (2007) 093001.

#### (会議抄録)

- [27] T. Eguchi, Y. Sugawara and A. Taormina, "Modular Forms and Elliptic Genera for ALE Spaces," arXiv:0803.0377 [hep-th], The workshop in honor of Professor Tsuchiya's retirement, Nagoya University, March 2007.
- [28] 初田泰之、"Emergent Classical Strings from Matrix Model," 「弦理論と場の理論 量子と時空の最前線」研究会報告、素粒子論研究 116 巻 3 号 (2008 年8月号).
- [29] 鈴木了, "Spin chain/string correspondence in Nonholomorphic sector,"「弦理論と場の理論 — 量子と 時空の最前線」, 研究会報告, 素粒子論研究, 116 巻 3 号 (2008 年 8 月号)
- [30] 初田泰之, "Finite-Size Corrections to 2-Spin Giant Magnons,"東京大学 21 世紀 COE プログラム拠点 「極限量子系とその対称性」シンポジウム 2007 概要集.
- [31] Y. Imamura, K. Kimura, and M. Yamazaki, "Comments on orbifold of brane tilings," A supplemental issue of International Journal of Modern Physics A (World Scientific).
- [32] Y. Matsuo, "Long open string and non-singlet sector in matrix quantum mechanics," A supplemental issue of International Journal of Modern Physics A (World Scientific).
- [33] H. Hayashi, "Large Winding Sector of AdS/CFT," A supplemental issue of International Journal of Modern Physics A (World Scientific).
- [34] Y. Hatsuda, "Finite-Size Corrections to Dyonic Giant Magnons," A supplemental issue of International Journal of Modern Physics A (World Scientific).
- [35] M. Yamazaki, "Moduli Stabilization in Stringy ISS Models," A supplemental issue of International Journal of Modern Physics A (World Scientific).

#### (国内雑誌)

- [36] 菅原祐二:「モジュライとフラックス真空のランドス ケープ」,数理科学2007年12月号,p38-p44.
- [37] 浜口幸一「グラビティーノが拓く物理」日本物理学会 誌 2007 年 62 号 822

#### (学位論文)

#### 博士論文

[38] H. Isono, "Boundary states in the open string sector."

- [39] K. Okamura, "Aspects of Integrability in AdS/CFT Duality,"
- [40] R. Suzuki, "The Spectrum of Classical String Theory and Integrability in the AdS/CFT Correspondence."
- [41] Y. Shinbara, "Inflation Models in Super Gravity Theory: Problems and Solutions."
- [42] T. -S. Tai, "D-brane Correlation Functions with D-branes in Gauge/String Correspondence."
- [43] F. Yagi, "Analysis of superconformal infrared fixed point via *a*-maximization."

#### 修士論文

- [44] 横山修一、「弦の場の理論における解析解とその周辺」
- [45] M. Yamazaki, "Brane Tilings and Their Applications."
- [46] 白井 智,「LHC 実験における軽いグラビティーノの 物理」
- [47] 林 博貴,「可積分性と S 行列を用いた AdS/CFT 対 応の解析」

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [48] R. Suzuki, "Perspective on classical strings on AdS<sub>5</sub>  $\times$  S5 from sine-Gordon system," The 12th Claude Itzykson Meeting, Saclay, France, June 2007.
- [49] K. Hamaguchi, "Leptogenesis and dark matter," Particle physics in the era of LHC KEK, Tsukuba, 2007 年 7 月
- [50] M. Yamazaki, "Moduli Stabilization in Stringy ISS Models," International Workshop "Progress of String Theory and Quantum Field Theory," Osaka City University, 2007年12月
- [51] F. Yagi, "A-D-E quivers and baryonic operators," Progress of String Theory and Quantum Field Theory, Osaka City University, December 2007
- [52] H. Hayashi, "Large Winding Sector of AdS/CFT," Progress of String Theory and Quantum Field Thoery, OCU, Japan, 2007年12月.
- [53] Y. Hatsuda, "Finite-Size Corrections to Dyonic Giant Magnons," Progress of String Theory and Quantum Field Theory, OCU, Japan, 2007 年 12 月.
- [54] K. Hamaguchi, "Determination of the Mass of Light Gravitino at the LHC," Symposium on Particle Cosmology DESY, Hamburg, Germany, 2007 年12月
- [55] K. Hamaguchi, "Determination of the Mass of an Ultralight Gravitino at LHC," IPMU Focus Week: facing LHC data, IPMU, Kashiwa, 2007年12月

#### 招待講演

- [56] T. Yanagida "Dark energy and dark matter" BCTP opening symposium, Oct.19-20, 2007, Berkeley, University of California
- [57] M. Yamazaki, "AdS/CFT correspondence for Sasaki-Einstein manifolds," The 13th International Symposium on Complex Geometry, 菅平, 2007 年 10 月
- [58] T. Eguchi, "Rigid Limit in N=2 Supergravity and Weak-gravity Conjecture," conference in honour of prof.C.N.Yang 's 85th birthday, Singapore 10/31-11/3,2007.
- [59] T. Eguchi, "Geometric Engineering Limit and Weak-Gravity Conjectre," 大阪市大研究会 "International Conference on Progress of String Theory and Quantum Field Theory", 12/7-12/9, 2007
- [60] Y. Imamura, "Comments on orbifold of brane tilings," International Conference on Progress of String Theory and Quantum Field Theory, Osaka City University, December, 2007.
- [61] Y. Matsuo, "Long open string and non-singlet sector in matrix quantum mechanics," International Conference on Progress of String Theory and Quantum Field Theory, Osaka City University, December, 2007,
- [62] Y. Sugawara, "D-branes in T-folds", APCTP Focus Program "Liouville, Integrability and Branes (4)", APCTP, Postech, Pohang, Korea, 2007 年 12 月.
- [63] Y. Sugawara, "String Theories on Mirrorfolds", APCTP Focus Program "Liouville, Integrability and Branes (4)", APCTP, Postech, Pohang, Korea, 2007 年 12 月.
- [64] K. Hamaguchi, "Beyond the Standard Model of Particle Physics." 日仏先端科学シンポジウム、フラ ンス、ロスコフ, 2008 年1月
- [65] T. Eguchi, "Remarks," 基研研究会, 30 years of Mathematical Methods in High Energy Physics, 2008年3月19日

#### (国内会議)

一般講演

- [66] T. Watari, "Yukawa couplings in Landscape." 研究会 "Particle physics in the era of LHC," 2007/07/21 at KEK,
- [67] 八木 太, "ADE quivers and baryonic operators," 原 子核三者若手夏の学校, 木島平, 2007 年 8 月
- [68] 戴 大盛、"Classical c=1 Tachyon Scattering and 1/2 BPS Correlators,"日本物理学会、北海道大学、 2007 年 9 月
- [69] 山崎雅人, "Proof of Homological Mirror Symmetry by Brane Tilings," 日本物理学会秋季大会, 北海道大 学, 2007 年 9 月

- [70] 八木 太, "*a*-maximization による *N* = 1 超対称ゲージ理論の赤外固定点の解析,"日本物理学会 第62回 年次大会,北海道大学,2007年9月
- [71] 山崎雅人, "Moduli Stabilization in Stringy ISS Models," 理化学研究所シンポジウム "Quantum field theories and their symmetries," 理化学研究所, 2007 年 12 月
- [72] 八木 太, "ADE 型クイバーゲージ理論とバリオン演算子,"量子場の理論と対称性,理化学研究所, 2007 年 12月
- [73] 山崎雅人, "Moduli Stabilization in Stringy ISS Models", 日本物理学会, 近畿大学, 2008 年 3 月
- [74] 八木 太, "ADE 型クイバーゲージ理論のバリオン演 算子,"日本物理学会,近畿大学,2008 年 3 月
- [75] 戴 大盛、"Instanton counting and matrix model," 日本物理学会、近畿大学、2008 年 3 月
- [76] 菅原 祐二, "Sting Theory on Mirror-folds," 日本物 理学会, 北海道大学, 2007 年 9 月.
- [77] 菅原 祐二, "D-branes on Mirror-folds," 日本物理学 会, 近畿大学, 2008 年 3 月.
- [78] 白井智、「LHC 実験における軽いグラビティーノの 質量の決定」、日本物理学会、近畿大学、2008 年 3 月
- [79] 鈴木 了, "Spin Chain/String correspondence in Non-holomorphic sector," 基研研究会「弦理論と場 の理論 — 量子と時空の最前線」,近畿大学,2007年8 月
- [80] 初田 泰之, "Emergent Classical Strings from Matrix Model," 基研研究会「弦理論と場の理論 量子と時 空の最前線」, 近畿大学, 2007 年 8 月
- [81] 初田 泰之、"Finite-Size Corrections to 2-Spin Giant Magnons,"東京大学 21 世紀 COE プログラム拠点 「極限量子系とその対称性」シンポジウム 2007、東京 大学、2007 年 11 月
- [82] 鈴木 了, "Large Winding Sector of AdS/CFT," 理 研シンポジウム「量子場の理論と対称性」,理化学研 究所, 2007 年 12 月
- [83] 初田 泰之, "Finite-Size Effects for Dyonic Giant Magnons," KEK 理論研究会 2007, 高エネルギー加 速器研究機構, 2008 年 3 月
- [84] 岡村 圭祐, "Singularities of the AdS/CFT Smatrix," 日本物理学会, 近畿大学, 2008 年 3 月
- [85] 鈴木 了, "Two-Spin Giant Magnon への有限サイズ 補正," 日本物理学会, 近畿大学, 2008 年 3 月
- [86] 林 博貴 "Large Winding Sector of AdS/CFT,"日本物理学会,近畿大学,2008年3月

#### 招待講演

- [87] 江口 徹,「超弦理論とアインシュタインの夢」東京大 学理学部公開講演会,2007 年 4 月 20 日
- [88] 濱口幸一、"レプトジェネシスとその周辺,"「第35 回 北陸信越地区素粒子論グループ合宿研究会」国立 能登青少年交流の家,石川県,2007年5月

- [89] 濱口幸一、「バリオン数生成とダークマター」「宇宙 初期における時空と物質の進化」東京大学,2007年5 月
- [90] 山崎雅人, "coamoeba and homological mirror symmetry for toric orbifolds of toric del Pezzo surfaces," 第 54 回幾何学シンボジウム, 鹿児島大学, 2007 年 8 月
- [91] 川野 輝彦, "MetaStable Supersymmetry Breaking," 基研研究会 弦理論と場の理論 量子と時空の 最前線, 近畿大学, 2007 年 8 月
- [92] 江口 徹,「超弦理論と宇宙の謎」,日本物理学会 2007 年 9 月 23 日
- [93] 川野 輝彦, "Meta-Stable Supersymmetry Breaking in String Theory," 日本物理学会 第 62 回年次大会, 北海道大学, 2007 年 9 月
- [94] T. Watari,「Landscape の確率分布の定式化方法の overview」,宇宙線研究所理論研究会「初期宇宙と素 粒子標準模型を超える物理」、2007/12/10 於東大宇 宙線研究所
- [95] 瀧 雅人, "Refined Topological Vertex and Instanton Counting," mini-workshop on mirror symmetry,北 海道大学,2008 年 1 月
- [96] 今村洋介, "Flavor branes in brane tilings," 「ブラッ クホール、佐々木-Einstein そして AdS/CFT 対応」, 湯原, 2008 年 2 月
- [97] 山崎雅人, "Intersecting Solitons, Amoeba and Tropical Geometry," 「ブラックホール、佐々木-Einstein そして AdS/CFT 対応」, 湯原, 2008 年 2 月
- [98] 山崎雅人, "Categorification of Knot Polynomials, Topological Strings and Refined Topological Vertex," 第 5 回城崎新人セミナー, 城崎, 2008 年 2 月
- [99] 濱口幸一、"LSP が Gravitino になるモデルとLHC での物理"LHC が切り拓く新しい素粒子物理東京大 学、2008 年 3 月

## 2 原子核・素粒子実験

## 2.1 原子核実験研究室 (酒井·早野 ·小沢)

原子核実験研究室は、酒井(英)研究室、早野研究 室、小沢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 粒子物理との境界領域の実験研究、量子力学の基本 的原理の検証などを行っている。

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おこなっている。 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。2005年度に開 始したプロジェクト「発熱型荷電交換反応による時間 領域でのスピン・アイソスピン応答(ICHOR: Isospinspin responses in CHarge-exchange exOthermic Reactions)」では、理化学研究所の不安定核(RI)ビー ムファクトリーで得られる大強度 RI ビームの特質 を生かして、未開拓領域の原子核励起状態を探索す る。今年度は、実験施設の建設・検出器の製作を進 める一方で、発熱型反応の有用性を確かめるための 実験、これと相補的な関係にある従来の荷電交換反 応によるスピン・アイソスピン励起の研究を行った。

早野研究室では、原子核のまわりに電子以外の負 電荷の粒子が回っている奇妙な原子(エキゾチック 原子)の分光実験を行っている。CERNの反陽子減 速器にて反陽子へリウム原子と反水素原子を、KEK と J-PARC 及びイタリアの DAΦNE 加速器にて K 中間子原子・原子核を、理研の RIBF において π中 間子原子を研究し、陽子の質量起源、粒子・反粒子 の対称性、物理定数の決定 など、物理学の基本的な 課題に取り組んでいる。

小沢研究室では、強い相互作用の非摂動論的側面 に関わる諸問題を実験的に解明するための研究を行っ ている。特に、クォーク・グルーオン・プラズマ(QG P)の生成とその性質を調べる実験や陽子や中間子 などのハドロンが動的な質量を獲得する機構を調べ る実験に力を入れている。2007年度は、米国ブルッ クヘブン国立研究所において QGP を探索する実験 のデータ収集と解析を進めつつ、新たに東海村に建 設中の加速器である J-PARC において原子核密度中 の中間子質量とカイラル対称性の回復に関わる実験 の立案・準備を行った。J-PARC においては、 $\phi$  中 間子の電子対崩壊による質量変化の直接測定実験と  $\omega$  中間子の質量変化と原子核束縛系の同時測定実験 の2種類の実験を提案している。

原子核実験研究室では、旧櫻井研究室のメンバー

を中心に不安定核ビームを用いた実験的研究を行なっ ており、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 法数の消失や新魔法数の出現など)や、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。また、より重い、より中性子過剰な原子核 を対象とした実験研究を開拓すべく、理化学研究所 の RI ビームファクトリー計画に深く関与し、実験 シミュレーションや検出器開発等にも着手している。

#### 2.1.1 ICHOR プロジェクト (酒井研究室)

原子核のスピン・アイソスピン型応答 (スピン移行 量  $\Delta S = 1$ 、アイソスピン移行量  $\Delta T = 1$ ) は基本的 な励起モードであり、従来、安定核ビームを用いた (p,n)、 $(d, {}^{2}\text{He})$ 、 $({}^{3}\text{He},t)$ 、 $({}^{12}\text{C}, {}^{12}\text{B})$  などの反応に よって研究されてきた。これらの手法では、標的粒子 の基底状態近傍では無反跳条件 (運動量移行  $q \sim 0$ ) を近似的に満たすことができるが、励起エネルギー が 20 MeV 以上の高励起状態では、大きな運動量移 行を伴い、標的核を効率よく励起できない。この点、 不安定重イオンビームを用いた発熱型荷電交換反応 は、高励起状態で  $q \sim 0$  の条件を満たすため、原子 核の高励起状態の強力なプローブとなる。(図 2.1.1 参照)。

理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) で得 られる RI ビームは、核子あたり 200–350 MeV のエ ネルギーを持つが、このエネルギー領域では歪曲効 果が最小になると同時にスピン・アイソスピン励起 が支配的となる最適のエネルギーである。本研究は、 RIBF で、( $^{12}$ N, $^{12}$ C)、( $^{12}$ B, $^{12}$ C)、( $^{20}$ Mg, $^{20}$ Ne) と いった反応を用い、無反跳条件下でスピン単極子共 鳴および二重ガモフ・テラー (GT) 共鳴状態を探索 する。また、同時に、従来の (p,n)、(n,p) 反応を用 い、二重 GT 遷移である二重ベータ崩壊核の中間状 態核の構造研究を進めていく [59, 68]。

#### 磁気スペクトロメータ SHARAQ の建設

RIBF の不安定核重イオンビームを用いた測定に特 化した高分解能磁気スペクトロメータ (SHARAQ ス ペクトロメーター: Spectroscopy with High-resolution Analyzer and RadioActive Quantum beams) を建設 中である。SHARAQ は2つの双極電磁石と3つの四 重極電磁石からなり、設計上のエネルギー分解能は 相対値で 1/7000 である。また、重イオン反応におい て移行運動量を必要な精度で決定するために、縦方 向・横方向とも、1 mrad 以内の角度分解能が出る予 定である。2006 年度までに作製した電磁石を RIBF



図 2.1.1: 発熱型反応の概念図。原子核の励起モード はスピン (S)、アイソスピン (T)、励起エネルギー  $(\omega)$ 、運動量移行 (q) で特徴づけられる。不安定核の 内部エネルギーを発熱型反応によって標的核に付与 することにより、ほぼ無衝撃  $(q \sim 0)$  で原子核を励 起できる。

に設置し、のちに荷電粒子の軌道解析に必要となる 磁場分布の測定を開始した。ビームライン用検出器 としては、低圧ガス動作型多芯線検出器を採用し、 8.8 MeV の α ビームを用いたテストをおこなった。 平成 20 年度にはビームを用いた全系のコミッショニ ングを行う予定である。[37, 55, 56]

#### 発熱型荷電交換反応の有用性の検証

磁気スペクトロメータ SHARAQ の完成に先立ち、 2008年1月に、ミシガン州立大学国立超伝導サイク ロトロン研究所 (NSCL) において、発熱型荷電交換 反応測定のテスト実験をおこなった。

この実験の目的は、発熱型荷電交換反応の原子核 のスピン・アイソスピン応答のプローブとしての有 用性を確かめることである。比較のため、発熱型荷 電交換反応<sup>13</sup>C(<sup>12</sup>N,<sup>12</sup>C)<sup>13</sup>N と吸熱型荷電交換反応 <sup>13</sup>C(<sup>12</sup>C,<sup>12</sup>B)<sup>13</sup>N の測定を行った。

この測定では、入射核破砕反応によって生成・分 離された  $\beta^+$  崩壊核 <sup>12</sup>N ビームと安定核 <sup>12</sup>C ビーム とを、それぞれ核子あたりエネルギー 100 MeV に て標的核 <sup>13</sup>C に照射した。荷電交換反応を起こして 散乱角 0° に出射された <sup>12</sup>C/<sup>12</sup>B 核のエネルギーを、 磁気スペクトロメータ S800 を用いて測定した。

<sup>13</sup>C 標的には、同位体置換ポリエチレン ( $^{13}$ CH<sub>2</sub>, 同位体純度 99.3%) 粉末を加熱融解したのち加圧冷 却し、大きさ 4.7 cm × 7.4 cm という大面積の薄膜 を作成した。標的厚とその非一様性を、理化学研究 所加速器研究施設で、26 MeV に加速された  $\alpha$  ビー ムが、標的中で損失するエネルギーを測定して求め、 厚さ 18 mg/cm<sup>2</sup>、非一様性 10% 以内を得た。

NSCL で得られたデータは現在解析中である。ここでは図 2.1.2 に <sup>13</sup>C(<sup>12</sup>C, <sup>12</sup>B)<sup>13</sup>N 反応の励起エネル

ギースペクトルのみを示す。残留核 <sup>12</sup>B の 0.0 MeV, 3.5 MeV 15.1 MeV のGT 状態ピークが観測されて いる。他方、<sup>12</sup>N ビームを用いた測定は、生成した ビームの強度が小さく、困難な測定であった。また、 入射粒子 <sup>12</sup>N は 11 ms の半減期で  $\beta^+$  崩壊して <sup>12</sup>C となるが、ビーム輸送中に崩壊して生じた <sup>12</sup>C が、 荷電交換反応によって生成した <sup>12</sup>C に混入してスペ クトロメータの焦点面に到達し、無視できないバッ クグラウンドとなることが判明した。

RIBF施設において、SHARAQ スペクトロメータ を用いて発熱型荷電交換実験を行う際には、ビーム ライン検出器を密に配置し、ビーム粒子の識別・標 的上入射位置/角度情報をより正確に押える必要があ ることが確かめられた [51, 54, 77]。



図 2.1.2: 核子あたりエネルギー 97.7 MeV における 散乱角 0 度での発熱型反応 <sup>13</sup>C(<sup>12</sup>C, <sup>12</sup>B)<sup>13</sup>N のスペ クトル。基底状態、3.5 MeV, 15.1 MeV の GT 状態 が矢印で示されている。

#### 二重ベータ崩壊過程の微視的理解

二重ベータ崩壊とは、原子核が2段階の $\beta$ 崩壊を 一度に行い、電子を2個放出する現象である。<sup>116</sup>Cd 核の二重ベータ崩壊を例にとると、<sup>116</sup>Cd 核の基底 状態から中間核<sup>116</sup>In へ、<sup>116</sup>In から娘核<sup>116</sup>Sn の基 底状態への2段階の仮想的なGT 遷移によって起こ ると考えられ、それぞれの遷移行列要素を理論的に 求めることによって、その半減期 $3.3 \times 10^{19}$ 年を説明 する試みがなされてきた。しかしながら、現時点で は理論計算の予言能力が十分であるとは言いがたい。

本研究では、二重ベータ崩壊過程の微視的理解のために最も基本的な量である親核および娘核から中間核へのGT 遷移強度  $B(GT^{-/+})$  実験的に求めることを目的に研究を行った。ここでGT 遷移強度  $B(GT^{-/+})$ は、上に述べた遷移行列要素の二乗で表される量である。測定には、反応機構の不定性が小さいプロー

ブとして、入射エネルギー 300 MeV の (p,n)、(n,p)反応を用いた。このプローブは、高励起連続状態中の B(GT)分布を絶対値も含めて精度よく決定できる唯一のものである。(p,n)反応測定では、代表的な二重ベータ崩壊の親核である  $^{116}Cd$  と  $^{48}Ca$  を標的核として、また、(n,p)反応測定では、対応する娘核である  $^{116}Sn$  と  $^{48}Ti$  を標的核として選んだ。

実験は大阪大学核物理研究センターでおこなった。 (p,n)反応測定は、中性子飛行時間測定施設と中性 子検出器 NPOL3を用いて行い、<sup>116</sup>Cd(p,n)<sup>116</sup>In 反 応および <sup>48</sup>Ca(p,n)<sup>48</sup>Sc 反応の二階微分散乱断面積 を、散乱角度 0°-14°の間で得た。NPOL3 は高時間 分解能 230 ps をもち、本測定でのエネルギー分解能 は、このエネルギーで世界最高水準の 450 keV に達 した。(n,p)反応の測定は、(n,p)施設にて<sup>7</sup>Li(p,n) 反応により生成した中性子ビームを用いて行い、 <sup>116</sup>Sn(n,p)<sup>116</sup>In 反応および <sup>48</sup>Ti(n,p)<sup>48</sup>Sc 反応デー 夕を 0°-12°の間で得た。

得られた断面積スペクトルに対して多重極展開法 を用いることによって、GT 遷移由来の断面積を抽 出し、さらに、GT 成分の断面積と B(GT) との間の 比例式

$$\sigma(q,\omega) = \hat{\sigma}_{\rm GT} F(q,\omega) B({\rm GT})$$

を用いて B(GT) 分布を導出した。ここで、 $F(q, \omega)$  は 運動学的補正項で歪曲波衝撃近似により導出された。 また、 $\hat{\sigma}_{GT}$  は GT 単位断面積とよばれる量で B(GT)の規格化定数であり、Sasano らによる近傍核種の実 験値 [58] を質量数に関し内挿し得た。

<sup>116</sup>Cd の二重ベータ崩壊

図 2.1.3(上)のヒストグラムは、導出された遷移強 度分布を示したものである。ただし、GT<sup>+</sup>の実験結 果にはアイソベクトル・スピン・単極子 (IVSM)状態 の寄与が混入しており、IVSM の遷移強度分布は中 心エネルギー 18 MeV、巾 10 MeV 程度と考えられ、 その寄与は GT 遷移強度にして 5.2 相当と見込まれ る。GT<sup>+</sup> 側での IVSM 寄与を除去した後の GT 総 遷移強度は、励起エネルギー 20 MeV までに、GT<sup>-</sup> 側で  $33 \pm 4$ 、GT<sup>+</sup> 側で  $4 \pm 1$ と求められた。

実線は、Álvarez-Rodrýuez らによる準粒子乱雑位 相近似の理論予測である。予測された GT 総遷移強 度は、それぞれ GT<sup>-</sup> 側で 36、GT<sup>+</sup> 側で 1.4 であり、 特に GT<sup>+</sup> 側で、実験結果と合致しないことが明ら かになった。とりわけ、GT<sup>-</sup> 巨大共鳴領域に対応す る 5-15 MeV の励起エネルギーにおいて、理論予測 は、実験的に発見された遷移強度を半分程度しか説 明しない。このことは、理論予測が巨大共鳴領域を 経由する遷移の寄与を核行列を過小評価している可 能性を示唆している [36, 47, 78]。

<sup>48</sup>Ca の二重ベータ崩壊

次に、<sup>48</sup>Caの二重ベータ崩壊に関して述べる。本研究で特筆すべき点の一つとして、<sup>48</sup>Ti(*n*,*p*)測定に際して厚い標的を作製した点が挙げられる。東大生



図 2.1.3: (上図) <sup>116</sup>In 中の励起エネルギーの関 数としての <sup>116</sup>Sn $\rightarrow$ <sup>116</sup>In の GT<sup>+</sup> 遷移 (上) 及び <sup>116</sup>Cd $\rightarrow$ <sup>116</sup>In の GT<sup>-</sup> 遷移 (下) の強度分布。黒線 はÁlvarez-Rodrýuez らによる QRPA 計算を示す。 (下図) <sup>48</sup>Sc 中の励起エネルギーの関数としての <sup>48</sup>Ti $\rightarrow$ <sup>48</sup>Sc の GT<sup>+</sup> 遷移 (上) 及び <sup>48</sup>Ca $\rightarrow$ <sup>116</sup>Sc の GT<sup>-</sup> 遷移 (下) の強度分布。黒線は Horoi らによ る殻模型計算を示す。

産研岡部研究室の協力で<sup>48</sup>TiO<sub>2</sub>粉末を<sup>48</sup>Ti粉末へ と還元し、それをプレスすることで酸素の混入のな い厚さ 300 mg/cm<sup>2</sup>の<sup>48</sup>Ti標的を計3枚用意するこ とができた。これらの標的により過去最高の統計精 度で測定が可能となり、陽子散乱角0-12度の間で散 乱断面積の角度分布を不純物の混入なく詳細に決定 することができた。

図 2.1.3 右に今回導出された GT 遷移強度分布を、 Horoi らによる殻模型計算の結果とともに示した。理 論計算は *pf* 殻を模型空間としている。IVSM の寄与 は主に励起エネルギー 20 MeV 以上の領域にあると 予想しており、実験の  $B(GT^+)$  スペクトルから減算 はしていない。励起エネルギー 8MeV 付近までの実 験 (理論)の総遷移強度は、GT<sup>-</sup> 側で 4.3±0.5 (4.0)、 GT<sup>+</sup> 側で 0.95±0.08 (0.91) であり実験と理論で良 い一致を示している。しかしながらより高励起エネ ルギー領域において理論では  $B(GT^+)$  がほぼゼロに なり実験結果と一致しない。励起エネルギー 20 MeV までの総遷移強度は GT<sup>-</sup> 側で 15±2 (13.2)、GT<sup>+</sup> 側で 2.3±0.4 (0.93) であった。

以上のことから、<sup>48</sup>Ca二重ベータ崩壊を殻模型から正しく理解するためには模型空間として *pf* 殻の みでなくさらに高励起の殻に起因する配位も考慮に いれる必要があることが示された [52, 76]。

上述のように、GT<sup>+</sup> 分布について、乱雑位相近似 計算、殻模型計算とも、実験結果を説明せず、二重 ベータ崩壊の核行列要素の理論的理解は不十分であ ると言わざるを得ない。高励起状態のGT 遷移強度 の研究はそれほど進んでおらず、信頼度の高いデー タの蓄積とその理論的解明が待たれる[61]。

#### (d, pn) 反応でのスピン相関測定

アインシュタイン、ポドルスキー、ローゼン (EPR) が「量子力学は不完全である」として 1935 年に提唱 したことは、EPR パラドックスとして知られている。 このパラドックスは観測における局所実在論と量子 力学の解釈の違いから生じ、その差異はスピン一重 項 (<sup>1</sup>S<sub>0</sub>) 状態にある 2 粒子のスピン相関に顕著に現 れる。 ${}^{1}S_{0}$ 状態の2粒子をそれぞれ遠く離して各粒 子のスピンの向きを測定したとき、EPR の主張の基 となる局所実在論では、各々の粒子のスピンの向き は任意の時間、場所で確率1で予言可能であり(実 在性)、一方のスピンの向きの測定結果はもう一方の 測定結果に影響を与えない (局所性)。これに対し量 子力学では、スピンの向きは観測するまで決まらず、 片方のスピンの向きを測定した瞬間にもう片方の結 果が決定されるという非局所性を持つ。この量子力 学の持つ非局所性を説明するため「隠れた変数」を 導入し、局所実在論の範囲で量子力学を再現するよ うな理論が多く提案された。しかし、1964年、ベル は ${}^{1}S_{0}$ 状態にある2粒子のスピン相関は、いかなる 局所実在論の予言よりも量子力学の予言の方が強く なる場合があることを示した。これがベルの不等式 である。

ベルの不等式の発見以来、光子対を用いて2粒子 の相関を研究する実験が多く行われ、殆どが量子力 学を支持する結果を得ている。しかし、ハドロンを 用いた検証実験は実験的困難さから非常に数少なく、 ベルの不等式を検証するまでに至ったものは2例し かない。どちらも2陽子対を用いた実験である。

我々はハドロンの異粒子系で初めてベルの不等式 を検証することを最終目的とし、理化学研究所加速器 施設において陽子-中性子スピン相関測定実験を行っ た。本測定は、2粒子のスピン偏極を同時測定すると いう困難なものである。270 MeV の重陽子ビームを 液体重水素標的に照射し、<sup>2</sup>H(*d*,*pn*)反応によってス ピンー重項状態の陽子-中性子対を生成した。陽子の スピン偏極(スピンの向き)は、磁気スペクトロメー タ SMART の第二焦点面に設置された陽子偏極度計 EPOL により、中性子のスピン偏極は標的より下流 18 m に設置された中性子偏極度計 SMART-NPOL により測定した。

得られた結果から、陽子と中性子のスピン相関の 強さを表すスピン相関関数  $C(\Phi) = \langle \sigma_p \cdot \vec{a} \ \sigma_n \cdot \vec{b} \rangle$  を 導出した。 $\sigma_p$ 、 $\sigma_n$ はそれぞれ陽子、中性子における スピン演算子、 $\vec{a}$ 、 $\vec{b}$ は陽子、中性子のスピン偏極測 定軸方向を表す単位ベクトル、 $\Phi$ は $\vec{a}$ 、 $\vec{b}$ 間の角度 である。この関数はスピンの符号の積の期待値に相 当し、量子力学では $C_{ ext{QM}} = -\cos(\Phi)$ となる。ベル の不等式 (CHSH 型) ど比較するため、 $S_{\mathrm{exp}}(\Phi) \equiv |$  $C_{\exp}(\Phi) - C_{\exp}(3\Phi) \mid + \mid C_{\exp}(-\Phi) + C_{\exp}(\Phi)$ という量を導入した。局所実在論では $S(\Phi)$ の値は 常にベルの不等式 S<2を満たさなければならない。図2.1.4に得られた $S_{
m exp}(\Phi)$ の結果を示す。ベ ルの不等式と量子力学の予言値の差が最も大きくな る Φ = 45° において、量子力学の予言値 2.82 に対 して、 $S_{exp}(45^\circ) = 3.47 \pm 1.80$ を得た。実験値と不 等式の最大値 = 2 との差は  $0.8\sigma$  に相当し、量子力学 と局所実在論を区別するには至らなかった。



図 2.1.4:  $S_{\exp}(\Phi)$  の結果。折線は実験データ、付随 するバンドは統計誤差を示す。鎖線は量子力学の予 言値  $S_{QM}(\Phi) = |-3\cos(\Phi) + \cos(3\Phi)|$ である。局 所実在論が許容する範囲は  $S(\Phi) \leq 2$  である。

本測定の精度は、偏極度計のスピン分析性能に強 く依存する。今回用いたエネルギーが現施設の重陽 子ビーム最高のエネルギーであるが、より高いエネル ギーではスピン分析性能が高くなり、同様の実験がよ り有力になると期待される [2,37,39,40,46,66,75]。

### 2.1.2 K 中間子原子の精密分光 (早野研究 室)

K 中間子と原子核の間の強い相互作用ポテンシャ ルは浅いのか深いのかという基本的な問題について、 すでに10年近く理論家の論争が続いている。我々 はこの問題を実験的に解決すべく、K 中間子原子の X 線測定を行っている。すなわち、我々の測定値と、 クーロン相互作用のみを考慮した場合のX 線エネル ギーの計算値との差(強い相互作用シフト)から、強 い相互作用ポテンシャルの深さを導くのである。

K 中間子ヘリウム・パズルの解決 [23]

K 中間子へリウム 4 の  $3d \rightarrow 2p$  X 線は過去に 3 回測定され、2p準位のシフトは $-43 \pm 8$  eV と決定 されていたが、理論予想値は~0 eV である。この  $5\sigma$  の差は "K 中間子へリウム・パズル" と呼ばれ、 長年の問題であったが、我々は KEK の陽子シンク ロトロンにおいて、新型のシリコンドリフト X 線検 出器 (SDD)を用いるなどして、過去のものとは一 線を画する高精度実験を行い、過去の実験はすべて 誤りで、理論と実験の間に矛盾は無いことを示した (図 2.1.5)。



図 2.1.5: K 中間子ヘリウム原子の 2p 準位の強い相互作 用シフト。我々の高精度測定により、過去の実験がすべて 誤りであることが明らかとなった。論文 [23]。

J-PARC における K 中間子ヘリウム 3 原子分光

K 中間子ヘリウム 4 に加えて K 中間子ヘリウム 3 の分光を行えば、K 中間子と原子核のポテンシャルに 関する知見がより完全なものになる。我々が J-PARC (東海)に提案した K 中間子ヘリウム 3 原子の X 線 測定実験(E17)は、2008 年度に J-PARC の主リン グが完成した後、最初に実施される実験に選ばれて おり、現在実験装置の建設を進めている。

#### DAΦNE における K 中間子水素原子分光

シリコンドリフト X 線検出器 (SDD)を用いて K 中間子と陽子 (および重陽子)の間の強い相互作用 ポテンシャルを精密に決定する実験を、イタリアの DAΦNE 電子・陽電子蓄積リングで準備している。 DAΦNE を用いて  $\phi$  中間子を大量に生成し、 $\phi \rightarrow K^+K^-$ 崩壊で生じる低エネルギーの  $K^-$  中間子を 低温・低圧の水素ガスに止めて X 線を測定する予定 である。

#### 2.1.3 K中間子原子核の研究(早野研究室)

K 中間子と原子核の間の強い相互作用の問題に関 連して、近年幅の狭い K 中間子原子核の存否が活発 に議論されている。もしもこのような状態が実在す るのならば今迄立証が成されていない全く新しい形 態のハドロン系としてのその存在自体が興味深いが、 さらには期待し得る高密度から起こるカイラル対称 性の部分回復等の得難い研究機会を与えることが期 待されるため、我々は K 中間子原子核の探索実験を 継続中である。

K 中間子原子核と K 中間子の多核子吸収過程の研 究 [22, 27]

KEK-PS E471 実験により報告された幅の狭いス トレンジトライバリオン  $(K^-pnn/K^-pnn)$  状態を 確認すべく、E471 実験装置を改善して E549 実験を 行った。(半) インクルーシブなスペクトルの研究に おいては  $K^-ppn/K^-pnn$  状態の生成シグナルは確 認されず、赤石/山崎らによる予言値よりも一桁小さ い生成率上限を状態の質量と幅の関数して得た。

エクスクルーシブな事象を用いてやや幅の広い状態を議論すべくハイパロン-核子及びハイパロン-重陽子の相関を研究し、不変質量分布上にK中間子の2核子吸収仮定及び3核子吸収仮定を同定し、そのアイソスピン依存性を観測した。これらの多核子吸収過程とは別に、バリオン数2あるいは3のK中間子原子核と解釈し得る幅の広い強度を深い束縛領域において観測した。現在この幅の広い強度を深く束縛されたK中間子原子核の非メソン崩壊シグナルと解釈し得るのか否かの検討を進めている。

#### J-PARC における $K^-pp/K^-pn$ 状態の探索

現在実験/理論の両面から精力的な研究が続けられている *K<sup>-</sup>pp* 状態の運動学的完全測定による同定を 目指し、J-PARC において E15 実験を行う予定である。実験においては先述の E17 と同様にヘリウム 3 標的を用い、入射運動量 1.0 GeV/c の  $(K^-, N)$  反応を用いて  $K^-pp/K^-pn$  状態を形成し、同時に終状態のハイパロンを CDS (Cylindrical Drift chamber System)を用いて再構成する。実験は E17 に引き続いて 2010 年度に行われる予定であり、現在準備を進めている。

#### 2.1.4 反陽子原子分光 (早野研究室)

CERN の反陽子減速器は、世界唯一の低速反陽子 源である。我々は科研費「特別推進研究」で、反陽 子へリウム原子のレーザー分光と、反水素原子(反 陽子のまわりを陽電子が回っている反物質原子)の 分光に取り組んでいる。

反陽子ヘリウム原子のレーザー分光による陽子・電 子質量比の精密測定 [9,24]

反陽子ヘリウム原子は、ヘリウム原子核のまわり を電子と反陽子が一個ずつ回っている奇妙な中性原 子である。通常のレーザー分光は電子状態を遷移さ せるが、我々が開拓した反陽子へリウム原子のレー ザー分光では、反陽子の軌道を変化させる。その遷 移周波数を量子電磁力学計算と比較することで、反 陽子・電子質量比を求めることが出来るのである。

CPT 定理によれば反陽子と陽子の質量は等しいの で、我々の実験で陽子・電子質量比という、理科年 表にも出ている重要な基礎物理定数を決定できるの である。



図 2.1.6: 陽子・電子質量比および反陽子・電子質量比の 精度向上の様子。

図 2.1.6 に示すように、反陽子ヘリウム原子分光 の精度は急速に向上しており、2007 年には相対精度  $10^{-9}$  に達した。これは、陽子・電子質量比の精度  $0.43 \times 10^{-9}$  に迫る高精度である。現在、更なる高 精度をめざした分光法の開拓を行っており、近日中 に陽子・電子質量比の精度を凌駕できると期待して いる。 反水素原子 [11, 17, 29]

反水素原子と水素原子の比較分光は、CPT 対称性 を高精度で検証する有力な手段である。反水素原子 は、反陽子と陽電子を Penning トラップ中で混合し て生成しているが、そのままでは数マイクロ秒のう ちに反水素原子が電極にぶつかって消滅してしまう ため、高精度分光できない。我々は Penning トラッ プと超伝導八重極磁石を組み合わせた装置を建設し、 生成された反水素原子の磁気閉じ込めを目指した実 験を行っている。

また、Paul トラップに反陽子と陽電子を同時に閉 じ込めて反水素原子を生成すべく、超伝導高周波空 洞の建設を行っている。

#### 2.1.5 π中間子原子の精密分光 (早野研究 室)

 $\pi$ 中間子原子の "深い" 束縛状態、すなわち、 $\pi^-$ 中間子軌道と原子核の核子分布が重なった状態の分 光は、陽子の質量起源を定量的に解明する有力な手 段である。陽子質量が、原料であるu,dクォークよ り遥かに重いのは、真空中にクォーク・反クォークよ が凝縮し(カイラル凝縮)u,dクォークが大きな有 効質量を得たためであると考えられるが、 $\pi$ 中間子 原子の分光によって、原子核中で中間子の状態(質 量や崩壊定数)を精密に測定すると、核内でのカイ ラル凝縮を定量的に知ることが出来る。

理研に完成した RIBF 加速器と BigRIPS 装置に おいて分散整合という手法を用いると、 $(d, {}^{3}He)$ 反応による  $\pi$  中間子原子の分光精度を飛躍的に高める ことが可能であるところから、2008 年度の実験開始 をめざして、光学軌道計算や焦点面検出器の建設を 行っている。

# 2.1.6 クォーク・グルーオン・プラズマ(Q G P)の生成とその性質の研究(小 沢研究室)

米国ブルックヘブン国立研究所において、Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC、相対論的重イオ ン衝突加速器)を用いる実験(PHENIX 実験)を遂 行している。この実験の目的は、QCDの非摂動論的 領域において長年の問題となっている QGP 状態の 存在について決着をつけ、クォークの閉じ込め機構 や高温・高密度状態でのカイラル対称性の回復に対 する実験的知見を与えることである。

日本を含む世界各国のグループの参加により検出器 の建設が進められ、2000年4月から現在までに、金-金衝突、陽子-陽子衝突、重陽子-金衝突、銅-銅衝突 を核子あたり200GeVの重心系エネルギーでのデー タを中心に収集した。測定のための検出器系は、透 過的なプローブであるレプトンやフォトンを捉える 事を主眼に置いたもので、広いアクセプタンス、高
い運動量分解能、高いパイオン除去率などの能力を 持つ。我々は、電子同定用検出器である Ring Image Čerenkov Counter (RICH)の運用、低質量ベクトル 中間子 ( $\rho$ , $\omega$ , $\phi$ ) や $J/\psi$  粒子の解析などで中心的な役 割を果たしてきた。この実験によって、今までに見 られていない様々な現象が観察され、我々はパート ンレベルの流体模型で記述される新しい物質層が存 在することを発見した。この結果は 2005 年に記者発 表したが、その後も精力的な解析が我々も含む共同 研究者らによって続けられ、2006 年度にも様々な重 要な結果が得られた。[4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 15, 16, 18, 20, 21, 25, 26, 28]

我々のグループでは、特に電子・陽電子崩壊を用 いた低質量ベクトル中間子  $(\rho, \omega, \phi)$  の解析に力を入 れている。これは、我々のもうひとつの研究テーマ であるハドロンの動的な質量獲得機構とも密接に関 連したもので、RHIC で実現されている高温・高密 度状態中で、カイラル対称性の回復によるベクトル 中間子の質量変化や収量変化を捉えようというもの である。

特に有望な測定量として、 $\phi$ 中間子の e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> 崩壊と K<sup>+</sup>K<sup>-</sup> 崩壊の崩壊比の変化が挙げられる。これは、 K<sup>+</sup>K<sup>-</sup> 崩壊の Q 値がとても小さいために  $\phi$  中間子の 質量減少により K<sup>+</sup>K<sup>-</sup> 崩壊が強く抑制されることが 考えられるからである。この測定の基礎データとし て、今年度は陽子-陽子衝突データの解析を行った。 陽子-陽子衝突においては、この違いを引き起こす物 理現象は存在しないと考えられ、どちらの崩壊モー ドの測定においても同様の結果を示すことが期待さ れる。解析の結果、図 2.1.7 に示されるように e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> 崩壊と K<sup>+</sup>K<sup>-</sup> 崩壊の測定において横運動量分布に違 いはないことが分かった。



図 2.1.7: 陽子-陽子衝突における  $\phi$  中間子の横運動 分布

# 2.1.7 ハドロンが動的な質量を獲得する機構の研究(小沢研究室)

KEK において、有限密度下でのベクトル中間子の 有効質量の変化を測定する実験を過去に行い、2007 年度にはその実験結果の一つが公表された。[3] こ の実験は、カイラル対称性の部分的回復による素粒 子質量の変化に対して実験的知見を与えることを目 的としたものである。具体的には、ベクトル中間子 の質量変化を直接観測するために、KEK-PS からの 1 次ビーム (12GeV 陽子) を原子核標的に当てて原 子核中にベクトル中間子を生成し、その e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> 崩壊 や K+K- 崩壊の不変質量分布の測定を行った。ここ で、ベクトル中間子を用いるのは、相互作用項が小 さく質量がほぼクォークの2倍であるため、カイラ ル対称性の回復とクォークの質量に関する実験的知 見を得るために非常に良いプローブとなるからであ る。また、電子崩壊を測定することで、Final State Interaction の影響を避けることが出来る。本年度に 得られた結果は、e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> 崩壊や K<sup>+</sup>K<sup>-</sup> 崩壊の同時解 なっているなどの重要な結果を得た。

この KEK の実験では、 $\omega$  中間子と $\phi$  中間子の両方 のピークの軽い質量領域側に、既存のハドロン質量 分布では説明できない分布の変化を示唆する結果が 得られた。実験的な効果は、Internal conversion や 検出器の物質による Radiative tail まで含めて詳細 に検討され、この分布の変化は実験的な効果を超え て有意であることが示された。モデル計算により $\rho$ 中間子と $\omega$  中間子は、原子核密度中で 9.2±0.2%の 質量減少を起している事が分った。これは、カイラ ル対称性の回復による理論的予想 (16±6%) と矛盾し ない。また、 $\phi$  中間子の場合にも同様の解析をして、 4.2±0.8%の質量減少と 2.6±1.9 倍の質量巾の広がり を起しているという結果を得た。これらの結果をカ イラル対称性の回復に結び付けていくためには、さ らに多くの情報が必要であるため、J-PARC におい て二つの実験を企画している。

まず、質量変化の運動運動学的なパラーメータに 対する依存性、よりクリアな質量変化を捉えるため のさらに大きな原子核標的と比較としての陽子標的 の情報などを得るためには、飛躍的にベクトル中間 子の収量の統計を上げることが必要となる。そのた め、KEK実験の100倍の収量を目標とする J-PARC での実験のプロポーザルを提出した。

計画中の実験は、J-PARC のハドロン実験ホール に新たに高運動量ビームライン (30GeV, 50GeV)を 建設し、そのビームにより原子核標的中にベクトル 中間子を生成しその電子対崩壊を測定する。10<sup>10</sup>Hz のビームを 0.1% interaction 標的に当てることで、 10<sup>7</sup>Hz の衝突レートの実験を行う。これは、KEK の 実験の10倍である。さらに、縦方向に2倍強の立体 角を持つ検出器系を建設し、電子対のアクセプタン スとして5倍を実現する。また、ビームエネルギー の増加により生成断面積が2倍になるため、合わせ て 100 倍の収量が得られる予定である。個々の検出 器要素は開発が進行中である。10<sup>7</sup>Hz の衝突レート に耐えられる軌跡検出器として、これまでの経験を 踏まえて、Gas Electron Multiplier(GEM)を考えて いる。これは、COMPASS 実験や RCNP での実験 も使用されており、25kHz/mm<sup>2</sup> までの動作が報告 されている。読み出しには、ストリップを用いるこ とで、5MeV/*c*<sup>2</sup> (KEK 実験の半分)程度の質量分 解能を達成する。また、大立体角をカバーする電子

同定用検出器としては、CsI 蒸着した GEM を光検 出器とする Gas Čerenkov Counter と lead glass EM calorimeter の組み合わせを考えている。前者は、鏡 や PMT を必要としないため、低物質量で容易に大 立体角をカバーすることができる。

さらに、同様の物理を追求する実験として、もう 一つの実験を計画中である。原子核中での中間子質 量の起源に関する研究に関しては、二つのアプロー チが存在する。一つ目は私がKEKで遂行した原子核 内で崩壊した中間子の質量分布を直接的に測定する というもの。二つ目は原子核内に中間子を束縛した 系を生成し、その束縛状態のエネルギー準位を詳細 に調べるというものである。現在までの研究では、そ れぞれのアプローチを独立した実験として遂行して いるが、両者を同時に測定する実験を企画中である。

実験は、J-PARC 加速器のハドロン実験ホール・ K1.8 ビームラインを用いて行う。具体的には π-中 間子ビームと原子核中に存在する陽子との、 $\pi^-$ +  $p \rightarrow \omega + n$ 反応を用いて $\omega$ 中間子を生成する。入射 $\pi$ 中間子の運動量を適切に選び、反応中性子が0度方 向で入射 π 中間子とほぼ同じ運動量を持っているこ とを要求する。その結果ω中間子を原子核内に静止 して生成する。ω中間子の質量が原子核内で 50MeV 程度軽くなると仮定して計算すると、入射する π中 間子の運動量が1.8 GeV/cであれば、 $\omega$ 中間子がほぼ 運動量ゼロで生成されることが分かった。このよう に生成した ω 中間子の質量を前方で反応中性子を捉 える Missing Mass 法と $\omega \rightarrow \pi^0 + \gamma$ 崩壊による不変 質量分布の二つの方法により同時に測定する。 $\omega$ 中 間子の崩壊からの  $\pi^0$  中間子はさらに二つの  $\gamma$  線に崩 壊するので、計3つの $\gamma$ 線を検出する。この $\gamma$ 線検 出に十分な分解能を持った大立体角の検出器を用い る。これには sI を用いた  $\gamma$  線検出器を使用する。前 方0度方向に出る中性子は、シンチレーション検出 器による飛行時間測定を用いて検出する。この実験 に必要な中性子検出器は、長さ 30cm で断面が 5cm 角のシンチレーションカウンターを横に6個並べた ものを1層とし、それを4層程度並べたものとなる。 束縛状態を測定するために最低限の Missing mass 分 解能 (30MeV/c<sup>2</sup>) を得るため、80ps の飛行時間分解 能が必要である。この時間分解能を達成するための 中性子検出器の開発を行っている。

この実験は、現在、Letter of Intent を出しており、 Proposal を準備中である。Proposal のための最大の 課題は、中性子検出器の開発、トリガー、バックグ ランドの評価である。同時測定を行うことでバック グランドは抑えられると考えられるが、定量的な評 価はこれからである。

# 2.1.8 次世代の高統計実験に向けた新たな 検出器の開発(小沢研究室)

我々のグループでは、J-PARC での実験を視野に 入れた検出器の開発を行ってきた。J-PARC での実 験では、大きなビーム量から来る高い計数率に対応 した軌跡検出器の開発が必須である。そのため、Gas Electron Multiplier(GEM)の開発を行い、その応用 研究を行ってきた。GEM は、CERN で開発された 電子増幅機構を持つフォイルと穴構造を持つ検出器 である。

今年度は、GEM 検出器のプロトタイプを製作した。読み出し基盤は、x、y方向にストリップがあり、 二次元読み出しが可能になっている。ストリップの間 隔は $800\mu m$ で、信号が一枚のストリップにしか来ない場合でも $800/2\sqrt{3} \simeq 230\mu m$ の分解能が得られる。

P10 をチャンバーガスとして用い、55F。を放射線 源として得られた信号を図 2.1.8 に示す。二つの波形 は、隣り合うストリップの信号を示し、相関がある ことが確かめられた。多くの場合、信号は二つのス トリップに分かれ、まれに三つのストリップに分か れることも確認した。今後はより定量的に分解能を 求めていく予定である。



図 2.1.8: オシロスコープ上でのストリップからの信 号の写真

# 2.1.9 $T_z = -2$ 陽子過剰核 <sup>24</sup>Si のベータ 崩壊に関する研究 (旧櫻井研究室)

我々は $T_z = -2$ 核 $^{24}$ Siのベータ核分光を行い、核構造における鏡映対称性の破れをプロープとして陽子過剰核に特有な核構造についての研究を行った。

核力のアイソスピン対称性から要求されるエネル ギー準位、遷移確率の鏡映対称性は、核構造におけ る基本的な性質であるが、クーロン力が競映対象性 を破る。その鏡映「非対称性」は陽子過剰核に特有な エキゾチックな核構造を探る上で有用な基準となる。 その一つの例として、sd 殻領域の  $T_z = \pm 1$  の奇々殻 の 1<sup>+</sup> 状態における非対称性が挙げられる。これら の鏡映核間でのエネルギー準位を比べると、 $1^+_1$  では ほぼ々エネルギーなのに対して、陽子過剰核側でエ ネルギーが下がっている。これは Thomas-Ehrman 偏移、つまりクーロン力の s 軌道波動関数に対する 影響から解釈可能である。Gamow-Teller 遷移強度 B(GT) は波動関数を良く反映するので、A = 20, 24における  $T_z = -2$  核からの B(GT) にも大きな非対 称性が現れる可能性がある。そこで核構造の非対称 性を系統的に議論し、陽子過剰核の核構造に関する 新たな知見を得るために、 $^{24}$ Siのベータ核分光実験 (遅延脱励起  $\gamma$  線、遅延陽子の測定)を行った。

本実験は理化学研究所の入射核破砕片分離装置 (RIPS)にて行った。陽子の測定では、 $\beta$ 線起源の バックグラウンドを除去したスペクトルを得るため に、ガス  $\Delta E$  検出器を用いた  $\Delta E$ -E 法を採用した。  $\gamma$ 線の測定では Ge 検出器と、信号-雑音比を向上さ せるための BGO 検出器を組み合わせたセットアッ プを用いた。以上二つの測定結果を組み合わせて、 <sup>24</sup>Al の束縛状態、非束縛状態への分岐比を決定し、 <sup>24</sup>Si の崩壊様式を確立した。本実験からは初観測と なる束縛状態( $1_1^1, 1_2^+$ )への二つの遷移の分岐比と、 非束縛状態への三つの遷移に対する分岐比を新たに 決定した。

観測した  $1_1^+$  状態への遷移は Gamow-Teller 遷移 である。 $1_1^+$ ,  $1_2^+$ への B(GT) を鏡映核の B(GT) と 比較すると両者共に 20%弱い強度になっていること がわかった。この抑制された B(GT) は陽子過剰核 における特異な核構造を示唆する。また陽子過剰核 の B(GT) は、殻模型の有効相互作用の適用性を議 論する際にも有用なデータとなる。本実験からは非 束縛状態を含めた全体的な B(GT)の分布を決定し た。その実験値は USD 相互作用によって良く再現さ れた。USD 殻模型計算の結果によると、 $1_2^+$  は  $1_1^+$  に 比べて s 軌道の割合が高いので、このことからも核 構造の(特にエネルギー準位における)非対称性が s 軌道陽子に起因する可能性が示唆される。

<受賞>

[1] 堀正樹、ヨーロッパ若手研究者賞 (EURYI)、ヨーロッ パ科学財団、2007 年 9 月 12 日。

<報文>

(原著論文)

- [2] S. Noji, K. Miki, K. Yako, T. Kawabata, H. Kuboki, H. Sakai, K. Sekiguchi, and K. Suda: "Performance of neutron polarimeter SMART-NPOL", Nucl. Instrum. and Methods A 578, 267– 278 (2007).
- [3] F. Sakuma, J. Chiba, H. En'yo, Y. Fukao, H. Funahashi, H. Hamagaki, M. Ieiri, M. Ishino, H. Kanda, M. Kitaguchi, S. Mihara, K. Miwa, T. Miyashita, T. Murakami, R. Muto, T. Nakura, M. Naruki, K. Ozawa, O. Sasaki, M. Sekimoto, T. Tabaru, T.H. Tanaka, M. Togawa, S. Yamada, S. Yokkaichi, Y. Yoshimura, "Nuclear-matter modification of decay widths in the φ → e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> and φ → K<sup>+</sup>K<sup>-</sup> channels", Phys. Rev. Lett. **98**, 152302 (2007).
- [4] A. Adare et al. (PHENIX Collaboration), "Scaling Properties of Azimuthal Anisotropy in Au+Au and Cu+Cu Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV", Phys. Rev. Let., **98**, 162301 (2007)
- [5] A. Adare et al. (PHENIX Collaboration), "Energy Loss and Flow of Heavy Quarks in Au+Au Collisions at √s<sub>NN</sub> = 200 GeV", Phys. Rev. Lett., 98, 172301 (2007)

- [6] S.S. Adler et al. (PHENIX Collaboration), "Centrality Dependence of  $\pi^0$  and  $\eta$  Production at Large Transverse Momentum in  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$  d+Au Collisions", Phys. Rev. Lett., **98**, 172302 (2007)
- [7] S.S. Adler et al. (PHENIX Collaboration), "Production of  $\omega$  mesons at large transverse momenta in p+p and d+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ ", Phys. Rev. C, **75**, 051902(R) (2007)
- [8] A. Adare et al. (PHENIX Collaboration), " $J/\Psi$ Production versus Centrality, Transverse Momentum, and Rapidity in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV", Phys. Rev. Lett., **98**, 232301 (2007)
- [9] R.S. Hayano, "Weighing the antiproton by partsper-billion-scale laser spectroscopy of antiprotonic helium", Canadian Journal of Physics, 85, 453-460 (2007)
- [10] A. Adare et al. (PHENIX Collaboration), "System Size and Energy Dependence of Jet-Induced Hadron Pair Correlation Shapes in Cu+Cu and Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  and 62.4 GeV", Phys. Rev. Lett., **98**, 232302 (2007)
- [11] R. Funakoshi, M. Amoretti, G. Bonomi, P. D. Bowe, C. Canali, C. Carraro, C. L. Cesar, M. Charlton, M. Doser, A. Fontana, M. C. Fujiwara, P. Genova, J. S. Hangst, R. S. Hayano, L. V. Jorgensen, A. Kellerbauer, V. Lagomarsino, R. Landua, E. Lodi Rizzini, M. Macri, N. Madsen, G. Manuzio, D. Mitchard, P. Montagna, L. G. C. Posada, A. Rotondi, G. Testera, A. Variola, L. Venturelli, D. P. van der Werf, Y. Yamazaki, N. Zurlo, "Positron plasma control techniques for the production of cold antihydrogen", Phys. Rev. A, 76, 012713 (2007)
- [12] A. Afanasiev et al. (PHENIX Collaboration), "Elliptic Flow for  $\phi$  Mesons and (Anti)deuterons in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV", Phys. Rev. Lett., **99**, 052301 (2007)
- [13] Y. Maeda, H. Sakai, H. Kuboki, M. Sasano, K. Yako et al.: "Differential cross section and analyzing power measurements for n-d elastic scattering at 248 MeV", Phys. Rev. C, 76, 014004 (2007).
- [14] H. Sagawa, S. Yoshida, X.R. Zhou, K. Yako, and H. Sakai: "Charge exchange spin-dipole excitations in <sup>90</sup>Zr and <sup>208</sup>Pb and the neutron matter equation of state", Phys. Rev. C, **76**, 024301 (2007).
- [15] S.S. Adler et al. (PHENIX Collaboration), "Measurement of density correlations in pseudorapidity via charged particle multiplicity fluctuations in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV", Phys. Rev. C, **76**, 034903 (2007)
- [16] S.S. Adler et al. (PHENIX Collaboration), "Detailed study of high-pT neutral pion suppression and azimuthal anisotropy in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV", Phys. Rev. C, **76**, 034904 (2007)

- [17] G B Andresen, W Bertsche, A Boston, P D Bowe, C L Cesar, S Chapman, M Charlton, M Chartier, A Deutsch, J Fajans, M C Fujiwara, R Funakoshi, D R Gill, K Gomberoff, J S Hangst, R S Hayano, R Hydomako, M J Jenkins, L V Jorgensen, L Kurchaninov, N Madsen, P Nolan, K Olchanski, A Olin, R D Page, A Povilus, F Robicheaux, E Sarid, D M Silveira, J W Storey, R I Thompson, D P van der Werf, J S Wurtele, Y Yamazaki, "Production of antihydrogen at reduced magnetic field for antiatom trapping", Journal of Physics B, **41**, 011001 (2007)
- [18] A. Adare et al. (PHENIX Collaboration), "Inclusive cross section and double helicity asymmetry for  $\pi^0$  production in p+p collisions at  $\sqrt{(s)} = 200$ GeV: Implications for the polarized gluon distribution in the proton", Phys. Rev. D, **76**, 051106(R) (2007)
- [19] R. S. Hayano, "Precision Spectroscopy of Antiprotonic Helium Atoms and Ions – Weighing the Antiproton", Lecture Notes in Physics, 745, 187-201 (2007)
- [20] A. Adare et al. (PHENIX Collaboration), " $J/\Psi$ Production versus Transverse Momentum and Rapidity in p+p Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV", Phys. Rev. Lett., **98**, 232002 (2007)
- [21] S.S. Adler et al. (PHENIX Collaboration), "Measurement of single muons at forward rapidity in p+p collisions at sqrt(s)=200 GeV and implications for charm production", Phys. Rev. D, 76, 092002 (2007)
- [22] T. Suzuki, H. Bhang, J. Chiba, S. Choi, Y. Fukuda, T. Hanaki, R. S. Hayano, M. Iio, T. Ishikawa, S. Ishimoto, T. Ishiwatari, K. Itahashi, M. Iwai, M. Iwasaki, P. Kienle, J. H. Kim, Y. Matsuda, H. Ohnishi, S. Okada, H. Outa, M. Sato, S. Suzuki, D. Tomono, E. Widmann, T. Yamazaki, H. Yim, "Ad correlations from the <sup>4</sup>He(stopped-K<sup>-</sup>,d) reaction", Phys. Rev. C, **76**, 068202 (2007)
- [23] S. Okada, G. Beer, H. Bhang, M. Cargnelli, J. Chiba, S. Choi, C. Curceanu, Y. Fukuda, T. Hanaki, R.S. Hayano, M. Iio, T. Ishikawa, S. Ishimoto, T. Ishiwatari, K. Itahashi, M. Iwasaki, B. Juhasz, P. Kienle, J. Marton, Y. Matsuda, H. Ohnishi, H. Outa, M. Sato, P. Schmid, S. Suzuki, T. Suzuki, H. Tatsuno, D. Tomono, E. Widmann, T. Yamazaki, H. Yim, J. Zmeskal, "Precision measurement of the 3d → 2p x-ray energy in kaonic <sup>4</sup>He", Phys. Lett. B, **653**, 387-391 (2007)
- [24] Ryugo S Hayano, Masaki Hori, Dezso Horvath, Eberhard Widmann, "Antiprotonic helium and CPT invariance", Reports on Progress in Physics, 70 1995-2065 (2007)
- [25] A. Adare et al. (PHENIX Collaboration), "Transverse momentum and centrality dependence of dihadron correlations in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV: Jet quenching and the response

of partonic matter", Phys. Rev. C, **77**, 011901(R) (2008)

- [26] S.S. Adler et al. (PHENIX Collaboration), "Centrality dependence of charged hadron production in deuteron+gold and nucleon+gold collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV", Phys. Rev. C, **77**, 014905 (2008)
- [27] M. Sato, H. Bhang, J. Chiba, Seonho Choi, Y. Fukuda, T. Hanaki, R.S. Hayano, M. Iio, T. Ishikawa, S. Ishimoto, T. Ishiwatari, K. Itahashi, M. Iwai, M. Iwasaki, P. Kienle, J.H. Kimb, Y. Matsuda, H. Ohnishi, S. Okada, H. Outa, S. Suzuki, T. Suzuki, D. Tomono, E. Widmann, T. Yamazaki, H. Yim, "Search for strange tribaryon states in the inclusive <sup>4</sup>He( $K_{stopped}^{-}, p$ ) reaction", Phys. Lett. B, **659**, 107-112 (2008)
- [28] A. Adare et al. (PHENIX Collaboration), "Cold nuclear matter effects on  $J/\Psi$  production as constrained by deuteron-gold measurements at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV", Phys. Rev C, **77**, 024912 (2008)
- [29] G. B. Andresen, W. Bertsche, P. D. Bowe, C. C. Bray, E. Butler, C. L. Cesar, S. Chapman, M. Charlton, J. Fajans, M. C. Fujiwara, R. Funakoshi, D. R. Gill, J. S. Hangst, W. N. Hardy, R. S. Hayano, M. E. Hayden, A. J. Humphries, R. Hydomako, M. J. Jenkins, L. V. Jorgensen, L. Kurchaninov, R. Lambo, N. Madsen, P. Nolan, K. Olchanski, A. Olin, R. D. Page, A. Povilus, P. Pusa, F. Robicheaux, E. Sarid, S. Seif El Nasr, D. M. Silveira, J. W. Storey, R. I. Thompson, D. P. van der Werf, J. S. Wurtele, Y. Yamazaki, "A novel antiproton radial diagnostic based on octupole induced ballistic loss", Phys. Plasmas, **15**, 032107 (2008)

### (会議抄録)

- [30] M. Janek, T. Saito, H. Sakai, K. Yako et al.: "Analyzing powers  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$ ,  $A_{xz}$  and  $A_y$  in the  $dd \rightarrow {}^{3}\text{He}n$  reaction at 270 MeV", Eur. Phys. J. A **33**, 39–46 (2007).
- [31] H. Sakai: "Three-nucleon forces studied by nucleon-deuteron scattering", Few-Body Systems, 41, 5–12 (2007).
- [32] H. Mardanpour, H. Kuboki, K. Miki, S. Noji, H. Sakai, M. Sasano, K. Yako et al.: "Study of three-nucleon force effects in p+d break-up with BINA", Nucl. Phys. A **790**, 426c–429c (2007).
- [33] Y. Maeda, H. Sakai, M. Sasano, K. Yako et al.: "Measurements of the n-d scattering at 250 MeV and three-nucleon forces", Nucl. Phys. A 790, 430c-433c (2007).
- [34] K. Yako, H. Sakai, S. Yoshida, and H. Sagawa, "Charge exchange spin-dipole excitations of <sup>90</sup>Zr and the neutron skin thickness", Nucl. Phys. A 788, 273c–278c (2007).

- [35] K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Kuboki, M. Sasano, K. Yako et al.: "Study of spin parts of three nucleon forces via d-p breakup reactions at intermediate energies", Nucl. Phys. A **790**, 450c–453c (2007).
- [36] M. Sasano, H. Sakai, K. Yako, H. Kuboki, K. Miki, S. Noji et al.: "Determination of the Gamow-Teller transition strength to <sup>116</sup>In(g.s.) by the <sup>116</sup>Cd(p, n) reaction at 300 MeV for the study of the nuclear matrix element of the two-neutrino double beta decay", Nucl. Phys. A **788**, 76c–81c (2007).
- [37] K. Miki, H. Sakai, H. Kuboki, S. Noji, K. Yako et al.: "Measurement of the <sup>2</sup>H(d, pn) reaction at 0 degrees at 270 MeV", Nucl. Phys. A 790, 442c– 445c (2007).
- [38] A. Saito, S. Shimoura, T. Uesaka, H. Sakai et al.: "SHARAQ project", Proc. Tours Symp. on Nuclear Physics. VI (TOURS2006), AIP Conf. Proc. 891, 131-137 (2007).
- [39] K. Yako, T. Saito, H. Sakai, H. Kuboki, M. Sasano et al.: "Polarimeters for a test of EPR paradox", Proc. of the 11th Int. Workshop on " Polarized sources and targets "(World Scientific, Singapore), 113–116 (2007).
- [40] S. Noji, K. Miki, K. Yako, H. Sakai, H. Kuboki et al.: "Performance Evaluation of NPOL at RIKEN", ibid, 219–220 (2007).
- [41] L. Venturelli, M. Amoretti, C. Amsler, G. Bonomi, C. Carraro, C.L. Cesar, M. Charlton, M. Doser, A. Fontana, R. Funakoshi, P. Genova, R.S. Hayano, L.V. Jorgensen, A. Kellerbauer, V. Lagomarsino, R. Landua, E. Lodi Rizzini, M. Macri, N. Madsen, G. Manuzio, D. Mitchard, P. Montagna, L.G. Posada, H. Pruys, C. Regenfus, A. Rotondi, G. Testera, D.P. Van der Werf, A. Variola, Y. Yamazaki, N. Zurlo, "Protonium production in ATHENA", Nuclear Instruments and Methods B, 261, 40-43 (2007)
- [42] S. Okada, G. Beer, H. Bhang, M. Cargnelli, J. Chiba, S. Choi, C. Curceanu, Y. Fukuda, T. Hanaki, R.S. Hayano, M. Iio, T. Ishikawa, S. Ishimoto, T. Ishiwatari, K. Itahashi, M. Iwasaki, B. Juhasz, P. Kienle, J. Marton, Y. Matsuda, H. Ohnishi, H. Outa, M. Sato, P. Schmid, S. Suzuki, T. Suzuki, H. Tatsuno, D. Tomono, E. Widmann, T. Yamazaki, H. Yim, J. Zmeskal, "Precision spectroscopy of Kaonic Helium 3d → 2p X-rays", Nucl. Phys. A, **790**, 663-666 (2007)
- [43] L.V. Jorgensen, G. Andresen, W. Bertsche, A. Boston, P.D. Bowe, C.L. Cesare, S. Chapman, M. Charlton, J. Fajans, M.C. Fujiwara, R. Funakoshi, D.R. Gill, J.S. Hangst, R.S. Hayano, R. Hydomako, M.J. Jenkins, L. Kurchaninov, N. Madsen, P. Nolan, K. Olchanski, A. Olin, R.D. Page, A. Povilus, F. Robicheaux, E. Sarid, D.M. Silveira, J.W. Storey, R.I. Thompson, D.P. van der Werf,

J.S. Wurtele, Y. Yamazaki, "Towards trapped antihydrogen", Nuclear Instruments and Methods B, **266**, 357-362 (2007)

- [44] 小沢 恭一郎, "Dilepton measurement in H.I.C.", 原
   子核研究 52 Suppl.3, 23-26 (2008)
- [45] 小沢 恭一郎, "クォーク・グルーオン・プラズマ探索 実験の現在と未来", 原子核研究 52 Suppl.4, 29-36 (2008)

(学位論文)

- [46] 久保木 浩功: 「<sup>2</sup>H(*d*, *pn*)反応での陽子–中性子スピン相関測定 ~ ベルの不等式の検証に向けて ~」(博士 論文).
- [47] 笹野 匡紀: "Study of intermediate states of the two neutrino double beta decay via the (p, n) and (n, p) reactions at 300 MeV", (博士論文).
- [48] 鈴木宏: "Study of Excited States of Neutron-rich Ti Isotopes using TOF Spectrometer", (博士論文).
- [49] 市川雄一: "Beta-decay study of  $T_z = -2$  protonrich nucleus <sup>24</sup>Si", (博士論文).
- [50] 鈴木賢: "中性子過剰核 <sup>32</sup>Mg の第一 2<sup>+</sup> 励起状態の 寿命測定", (博士論文).
- [51] 野地 俊平: "Study of the exothermic heavy-ion charge-exchange reaction <sup>13</sup>C(<sup>12</sup>N, <sup>12</sup>C)<sup>13</sup>N at 100 MeV/nucleon", (修士論文).
- [52] 三木 謙二郎: "Study of the double beta decay process of <sup>48</sup>Ca via the <sup>48</sup>Ti $(n, p)^{48}$ Sc reaction", (修士 論文).
- [53] 伊藤聖: " $\eta$  Production Cross Section Measurement in the  $(d, {}^{3}\text{He})$  reactions", (修士論文).

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [54] S. Noji: "Exothermic charge-exchange reactions at the S800", Future Prospects for Spectroscopy and Direct Reactions 2008, February 26–28, 2008, Michigan, U.S.
- [55] H. Sakai: "The SHARAQ project", ibid.
- [56] H. Sakai, "The ICHOR project, the SHARAQ spectrometer and  $2\nu\beta\beta$ -studies", ibid.
- [57] K. Yako et al.: "Neutron skin thickness of <sup>90</sup>Zr determined by charge exchange reactions", International Nuclear Physics Conference (INPC2007), June 3–8, 2007, Tokyo, Japan.
- [58] M. Sasano et al.: "Precise determination of the Gamow-Teller unit cross section of the (p,n) reaction at 137, 198, and 297 MeV", ibid.
- [59] H. Sakai: "Spin-isospin physics and ICHOR project", International Symposium on Exotic States of Nuclear Matter (EXOCT2007), June 11– 15, 2007, Catania, Italy.

- [60] K. Yako et al.: "Neutron skin thickness of  ${}^{90}$ Zr determined by (p, n) and (n, p) reactions", ibid.
- [61] K. Yako et al., "Intermediate states of doublbeta decay nuclei studied by (p, n) and (n, p) reactions", The 3rd Japanese-German EFES(JSPS)-DFG/GSI workshop on Nuclear Structure and Astrophysics, September 29 – October 2, 2007, Cheemsee, Germany.
- [62] T. Suzuki, "An experimental search for strange multi-baryonic systems in <sup>4</sup>He(stopped  $K^-$ , N) reaction", International Conference on Nuclear Physics (INPC2007), Tokyo, Japan (2007)
- [63] T. Suzuki, "YN correlations from stopped K- reaction on <sup>4</sup>He", Chiral Symmetry in Hadron and Nuclear Physics Chiral07, Convention Center, Suita campus, Osaka University, Japan (2007).
- [64] T. Suzuki, "An experimental search for strange multi-baryonic systems in <sup>4</sup>He(stopped K-, YN) reaction", 11th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (MENU2007), Juelich, Germany (2007)
- [65] T. Suzuki, "An experimental search for strange multibaryonic states via the 4He(stopped K-,YN) reactions", The 4th International Workshop on Nuclear and Particle Physics at J-PARC (NP08), Mito, Japan (2007)

### 招待講演

- [66] H. Sakai, T. Saito, C. Rangacharyulu, K. Yako and EPR collaboration, "Application of  ${}^{1}\text{H}(d, {}^{2}\text{He})n$ reaction to EPR paradox", The 20th European Conferenceon Few-Body Problems in Physics (EFB20), September 10–14, 2007, Pisa, Italy.
- [67] H. Sakai, "Three-Nucleon Forces Studied by Nucleon-Deuteron Scattering", The 7th Particle Physics Phenomenology Workshop (PPP7), June 7–10, 2007, Taipei, Taiwan.
- [68] H. Sakai for ICHOR collaboration, "The ICHOR project and spin-isospin physics with unstable beams", The International Symposium on Physics of Unstable Nuclei (ISPUN07), July 3–7, 2007, Hoi An, Vietnam.
- [69] R.S. Hayano, "Experimental study of hadron properties in the nuclear medium", International Conference on Nuclear Physics (INPC2007), Tokyo, Japan (2007)
- [70] R.S. Hayano, "Precision spectroscopy of the antiprotonic helium atoms", International Conference on Muon Catalyzed Fusion and Related Topics (µCF-07), Dubna, Russia (2007)
- [71] R.S. Hayano, "Studies of CPT Symmetry with ASACUSA", Fourth Meeting on CPT and Lorentz Symmetry, Indiana University, Bloomington (2007)

- [72] R. S. Hayano, "Past, Present and Future of Trapped Antiprotons", Symposium on the Physics at FAIR, Experimental Storage Ring of GSI, Darmstadt (2007)
- [73] Ryugo S. Hayano, "The kaonic-helium puzzle", Chiral Symmetry in Hadron and Nuclear Physics Chiral07, Convention Center, Suita campus, Osaka University, Japan (2007)
- [74] N. Ono, M. Hori, R.S. Hayano, "Determination of the antiproton-to-electron mass ratio by high precision spectroscopy of  $\bar{p}\mathrm{He}^+$  atoms", Workshop on Cold Antimatter Plasmas and Application to Fundamental Physics (pbar08), Okinawa Harborview Hotel, Naha, Okinawa, Japan (2007)

(国内会議)

一般講演

- [75] 久保木 浩功、酒井 英行、矢向 謙太郎、笹野 匡 紀、野地 俊平、 三木 謙二郎、他:「ベル不等式 検証に向けての陽子-中性子スピン相関測定」、日本物 理学会第63回年会,2008年3月、近畿大学.
- [76] 三木 謙二郎、酒井 英行、笹野 匡紀、野地 俊平、 矢向 謙太郎、他: 「<sup>48</sup>Ti(n, p)<sup>48</sup>Sc 反応による <sup>48</sup>Ca 二重 崩壊過程の研究」、同上.
- [77] 野地 俊平、 酒井 英行、 矢向 謙太郎、 笹野 匡紀、 三木 謙二郎、他:「発熱型荷電交換反応 <sup>13</sup>C(<sup>12</sup>N, <sup>12</sup>C)<sup>13</sup>N 測定」、同上.
- [78] 笹野 匡紀、酒井 英行、 矢向 謙太郎、 久保木 浩 功、 三木 謙二郎、野地 俊平、他:「入射エネルギー 300MeV における (p,n),(n,p) 反応を用いた<sup>116</sup>Cd 二重ベータ崩壊核行列の研究」、同上.
- [79] 佐久間 史典, 飯尾 雅実,板橋 健太,岩崎 雅彦,應田 治彦,大西 宏明,岡田 信二,佐藤 将春,鈴木 隆敏, 友野 大,松田 恭幸,山崎 敏光,石元 茂,鈴木 祥仁, 関本 美知子,豊田 晃久,永江 知文,石川 隆,竜野 秀行,早野 龍五,藤岡 宏之,味村 周平,阪口 篤志, 福田 芳之,千葉 順成,花木 俊生,福田 共和,溝井 浩,G. Beer,H. Bhang,S. Choi,H. Yim,石渡 智 ー,P. Buehler,M. Cargnelli,A. Hirtl,P. Kienle, J.Marton,E.Widmann,J. Zmeskal,C. Curceanu, C. Guaraldo,M.Iliescu,D. Pietreanu,D. Sirghi, F. Sirghi,F. Diego,M.Ombretta,B. Luigi,"J-PARC におけるK中間子原子核探索実験のための円 筒形ドリフト・チェンバーの開発(J-PARC E15 実 験)",日本物理第 62 回年次大会,北海道大学(2007)
- [80] 岡田 信二, 飯尾 雅実, 板橋 健太, 岩崎 雅彦, 應 田 治彦, 大西 宏明, 鈴木 隆敏, 友野 大, 松田 恭 幸, 石川 隆, 竜野 秀行, 早野 龍五, 山崎 敏光, 石元 茂, 岩井 正明, 鈴木 祥仁, 佐藤 将春, 福田 芳之, 千葉 順成, 花木 俊生, Hyoungchan Bhang, Seonho Choi, Heejoong Yim, 石渡 智一, Michael Cargnelli, Bertalan Juhasz, Paul Kienle, I, Johann Marton, Philipp Schmid, Eberhard Widmann, Johann Zmeskal, George Beer, Catalina Curceanu, "K 中間子へリウム 4 原子 X 線の精密測定 (V)", 日本物理第 62 回年次大会, 北海道大学 (2007)

- [81] 竜野 秀行,石川隆,早野 龍五,山崎 敏光,飯尾 雅実, 板橋 健太,岩崎 雅彦,應田 治彦,大西 宏明,岡田 信二,鈴木 隆敏,友野大,松田 恭幸,石元茂,岩井 正明,鈴木 祥仁,佐藤 将春,福田 芳之,千葉 順成, 花木 俊生,H. Bhang,S.Choi,H. Yim,石渡 智一, M.Cargnelli,B. Juhasz,P. Kienle,I,J.Marton, P. Schmid,E. Widmann,J.Zmeskal,G. Beer,C. Curceanu, "K 中間子へリウム 4 原子 X 線の精密測 定(IV)",日本物理第 62 回年次大会,北海道大学 (2007)
- [82] 大能 直哉, 早野 龍五,堀 正樹,鳥居 寛之, D.
   Barna, A. Dax, J. Eades, E.W. Pirkl, B. Juhasz,
   T. Pask, Widmann, D. Horvath, "反陽子へリウム 原子のオージェ崩壊率の研究", 日本物理第 62 回年次 大会, 北海道大学 (2007)
- [83] 伊藤聖,竜野秀行,早野龍五,板橋健太,岩崎雅 彦,大西宏明,岡田信二,應田治彦,佐藤将春, 鈴木隆敏,若杉昌徳,山崎敏光,矢野安重,H. Geissel,H. Weick,比連崎悟,木村梨恵,山縣淳 子,P. Kienle,鈴木謙,K. Lindberg, P.-E. Tegner, I. Zartova, "p(d,3He)反応を用いた π中間子原子の 精密分光(1)",日本物理第62回年次大会,北海道 大学(2007)
- [84] 飯尾 雅実,板橋 健太,岩崎 雅彦,應田 治彦,大西 宏明,岡田 信二,佐久間 史典,鈴木 隆敏,友野 大,松田 恭幸,山崎 敏光,石元 茂 A,鈴木 祥 仁,関本 美知子,豊田 晃久,永江 知文,石川 隆, 竜野 秀行,早野 龍五,藤岡 宏之,味村 周平,阪口 篤志,佐藤 将春,福田 芳之,千葉 順成,花木 俊生, 福田 共和,溝井 浩,G.Beer,H.Bhang,S.Choi, H.Yim,石渡 智一,P.Buehler,M.Cargnelli,A. Hirtl,P.Kienle,J,J.Marton,E.Widmann,J. Zmeskal,C.Curceanu,C.Guaraldo,M.Iliescu, D.Pietreanu,D.Sirghi,F.Sirghi,D.Faso,O. Morra,L.Busso,"K中間子原子核探査実験のため の液体ヘリウム 3 標的の開発 II",日本物理第 62 回 年次大会,北海道大学 (2007)
- [85] 鈴木 隆敏, 飯尾 雅実, 板橋 健太, 岩崎 雅彦, 應 田 治彦,大西 宏明, 岡田 信二,佐藤 将春,友野 大,松田 恭幸,山崎 敏光,福田 芳之,石川 隆,早 野 龍五,石元 茂,岩井 正明,鈴木 祥仁,千葉 順 成,花木 俊生, Hyoungchan Bhang, Seonho Choi, Jongho Kim, Heejoong Yim,石渡 智一, Ebarhard Widmann, Paul Kienle,"<sup>4</sup>He上の静止 K<sup>-</sup>反応に 於けるハイパロン - 核子相関によるストレンジマル チバリオン状態の探索(1)",日本物理第 62 回年次大 会,北海道大学(2007)
- [86] 竜野 秀行,石川 隆,早野 龍五,山崎 敏光,飯尾 雅 実,板橋 健太,岩崎 雅彦,應田 治彦,大西 宏明,岡 田 信二,鈴木 隆敏,友野 大,松田 恭幸,石元 茂, 岩井 正明,鈴木 祥仁,佐藤 将春,福田 芳之,千葉 順成,花木 俊生,H. Bhang,S.Choi,H. Yim,石 渡 智一,M.Cargnelli,B. Juhasz,P. Kienle,I,J. Marton,P. Schmid,E. Widmann,J. Zmeskal,G. Beer,C. Curceanu, "K 中間子へリウム 4 原子 X 線 の精密測定 (VI)",日本物理学会第 63 回年次大会,近 畿大学 (2007)

- [87] 伊藤聖、大能直哉、竜野秀行、早野龍五、板橋健太、 岩崎雅彦、大西宏明、岡田信二、應田治彦、佐藤将 春、鈴木隆敏、若杉昌徳、山崎敏光、矢野安重、H. Geissel、C. Nociforo、H. Weick、木村梨恵、比連崎 悟、山縣淳子、P. Kienle、鈴木謙、K. Lindberg、P.-E. Tegner、I. Zartova, "(d,3He) 反応を用いた  $\pi$  中 間子原子の精密分光(2)",日本物理学会第 63 回年 次大会,近畿大学(2007)
- [88] 應田 治彦, 飯尾 雅実, 板橋 健太, 岩崎 雅彦, 大西 宏明, 岡田 信二, 佐藤 将春, 鈴木 隆敏, 友野大, 松田 恭幸, 山崎 敏光, 福田 芳之, 石川 隆, 早野 龍五, 石元 茂, 岩井 正明, 鈴木 祥仁, 千葉 順成, 花木 俊生, Hyoung chan Bhang, Seonho Choi, Jongho Kim, Heejoong Yim, 石渡 智一, Ebarhard Widmann, Paul Kienle, "<sup>4</sup>/<sub>A</sub>He 八イパー核の d+d 稀弱崩壊の分岐比測定", 日本物理学会第 63 回年次大会, 近畿大学 (2007)
- [89] 大能 直哉,早野 龍五,堀正樹,鳥居寛之,D. Barna, A. Dax, J. Eades, W. Pirkl, B. Juhasz, T. Pask,
  E. Widmann, D. Horvath, "反陽子へリウム原子の オージェ崩壊率の研究",日本物理学会第 63 回年次大 会,近畿大学(2007)
- [90] 鈴木 隆敏, 飯尾 雅実, 板橋 健太, 岩崎 雅彦, 應 田 治彦,大西 宏明,岡田 信二,佐藤 将春,友野 大,松田 恭幸,山崎 敏光,福田 芳之,石川 隆,早 野 龍五,石元 茂,岩井 正明,鈴木 祥仁,千葉 順 成,花木 俊生, Hyoungchan Bhang, Seonho Choi, Jongho Kim, Heejoong Yim,石渡 智一, Ebarhard Widmann, Paul Kienle,"<sup>4</sup>He 上の静止 K<sup>-</sup> 反応に 於ける重陽子測定によるストレンジマルチバリオン 状態の探索(1)",日本物理学会第 63 回年次大会,近 畿大学(2007)
- [91] 南日 卓,中村 隆司,佐藤 義輝,近藤 洋介,篠原 摩 有子,島村 智之,中山 佳晃,米田 健一郎,青井考, 馬場 秀忠,市川 雄一,家城 和夫,木村 仁美,小林 俊雄,町田 智大,本林 透,大津 秀暁,櫻井 博儀,下 浦 享,白木 章雄,杉本 崇,武内 聡,栂野 泰宏,山 田 一成,山口 充孝,谷内 勇仁,石原 正泰,"8Heの 分解反応 II",日本物理学会第 63 回年次大会,近畿大 学(2007)
- [92] 王 惠仁,今井 伸明,鈴木 大介,岩崎 弘典,櫻井 博 儀,大西 健夫,鈴木 賢,大田 晋輔,武内 聡,中尾 太郎,栂野 泰宏,近藤 洋介,青井 考,馬場 秀忠, Shawn Bishop,市川 雄一,石原 正泰,久保 敏幸, 栗田 和好,本林 透,中村 隆司,奥村 俊文,柳澤 善 行,"16,18C の第一2+励起状態の寿命測定",日本物 理学会第 63 回年次大会,近畿大学 (2007)
- [93] 道正 新一郎,柳澤 善行,稲福 清彦,青井 考, Z.Elekes,Zs.Fulop,市川雄一,岩佐 直仁,栗田 和 好,黒川明子,町田 智大,本林透,中村 隆司,中 林彩,野谷将広,王恵仁,大西健夫,大津 秀暁, 櫻井博儀,篠原摩有子,炭竈 聡之,武内 聡,田中 鐘信,栂野 泰宏,山田一成,山口 充孝,米田健一 郎,"陽子非弾性散乱による中性子過剰 Mg 同位体の ガンマ核分光",日本物理学会第 63 回年次大会,近畿 大学(2007)
- [94] 橋爪 祐平,田中 鐘信,小沢 顕,山口 貴之,鈴木 健, 相場 健,青井考,泉川 卓司,稲福 清彦,岩佐 直仁,

大坪 隆, 黒川 明子, 小林 圭, 小室 麻里, 近藤 洋介, 篠田 遼子, 篠原 摩有子, 鈴木 宏, 武内 聡, 竹下 英 里, 武智 麻耶, 栂野 泰宏, 中島 真平, 中林 彩, 馬場 秀忠, 福田 光順, 松山 貴史, 道正 真一郎, 安野 琢 磨, 山田 一成, 吉竹 利織, 久保 敏幸, 中村 隆, 櫻 井 博儀, 本林 透, "20C 分解反応による破砕片 18C の運動量分布測定", 日本物理学会第 63 回年次大会, 近畿大学 (2007)

- [95] 武内 聡,青井考,馬場 秀忠,福井 利晃,橋本 佳子, 家城 和夫,今井 伸明,岩崎 弘典,菅野 祥子,近藤 洋介,久保 敏幸,栗田 和好,峯村 俊行,本林 透,中 林彩,中村 隆司,奥村 俊文,大西 健夫,大田 晋輔, 櫻井 博儀,下浦享,須合 亮平,鈴木 大介,鈴木 宏, 鈴木 賢,竹下 英里,玉城 充,田中 鐘信,栂野 泰宏, 山田 一成,"32Mgのインビームガンマ線核分光",日 本物理学会第 63 回年次大会,近畿大学 (2007)
- [96] 松下 昌史, 家城 和夫, 久保 敏幸, 日下 健祐, 吉田 光一, 吉田 敦, 大西 哲哉, 大竹 政雄, 柳澤 善行, 福田 直樹, 長谷山 智仁, 竹田 浩之, 山口 由高, 青 井考, 米田 健一郎, 大津 秀暁, 武内 聡, 亀田 大輔, 杉本 崇, 近藤 洋介, Heiko Scheit, 郷農 靖之, 櫻 井 博儀, 本林 透, 矢野 安重, 溝井 浩, 鈴木 宏, 中 尾 太郎, 木村 仁美, 久保木 隆正, 山口 貴之, 鈴木 健, 小澤 顕, 森口 哲郎, 安田 裕介, 中村 隆司, 南日 卓, 島村 智之, 中山 佳晃, H. Geissel, H. Weick, J. Nolen, O.Tarasov, T. Nettleton, D. Bazin, B. Sherrill, D. Morrissey, W. Mitti, "理研 RIBF にお ける超伝導 RI ビームセパレーター BigRIPS の性能 評価 I: イオン光学", 日本物理学会第 63 回年次大会, 近畿大学 (2007)
- [97] 小沢 恭一郎、「Dilepton measurement in H.I.C.」、 「重イオン衝突反応でみる QGP の現象論的研究」、大 阪大学 RCNP、2007 年 10 月 29-30 日
- [98] 小沢 恭一郎、「 $\pi^- p \rightarrow \omega n$ 反応を用いた  $\omega$  束縛系 と質量の同時測定実験の提案」、「J-PARC ハドロン 実験施設のビームライン拡充に向けて」、大阪大学 RCNP、2007 年 11 月 11-12 日
- [99] 小沢 恭一郎、「J-PARC での高輝度ビームに向けた GEM TRACKER の開発」、「第4回 Micro Pattern Gas Dtector 研究会」、大阪市立大学、12月 14-15日

(セミナー)

- [100] R.S. Hayano, "precision spectroscopy of antiprotonic helium - weighing the antiproton -", GSI Kolloquium, GSI, Darmstadt (2007)
- [101] 早野 龍五, "反陽子と電子の質量比 Weighing the antiproton", RIKEN Nuclear Physics Monthly Colloquium, RIKEN, Wako, Japan (2007)
- [102] 小沢 恭一郎、「クォーク・グルーオン・プラズマ探 索実験の現在と未来」、「原子核三者若手夏の学校」、 パノラマランド木島平、8月 20-25 日

## 2.2 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.これにはエネルギー

フロンティア(最高エネルギー)における加速器実験 がもっとも有効な手段である.2000年にデータ取得 が終了した CERN の電子陽電子コライダー LEP-II での OPAL 実験のデータ解析は 2004 年度でほぼ終 了し素粒子の世代数を3と決定し、電弱相互作用と強 い相互作用がゲージ原理を発現していることを決定 的にするなどの成果を挙げた. これらの成果を踏ま えて、LEP-IIの次世代加速器である国際電子陽電子 リニアコライダー ILC 計画の推進をその中心となっ て行なっている.特に加速器のナノスケールの精度 を持つビームサイスモニターやビーム位置モニター の研究開発に参加し、かつ ILC での実験の検討を行 なっている.また,2008年から世界最高エネルギー 14 TeV の陽子陽子衝突実験が始まる CERN の LHC における ATLAS 実験のデータ解析にも大学院学生 が参加している.エネルギーフロンティアにおける 加速器実験に加えて、中小規模の実験で本質的な素 粒子物理研究を行なう為に、粒子検出器の開発研究 をおこなっている. 粒子検出器開発においては超冷 中性子の重力での束縛状態の測定と新たな近接力の 探索、中国北京の高能研において新たに建設が進む 電子陽電子コライダー BEPC-II における BES-III 実 験の TOF 測定器の開発を行なった. また,BES-II 実 験のデータ解析を行なっている.

# 2.2.1 電子・陽電子リニアコライダー ILC 計画



図 2.2.9: ILC 計画

電子と陽電子( $e^+ \ge e^-$ )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、 $e^+ \ge e^-$ 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.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. しかし, LEP のような円形  $e^+e^-$  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.従って、電子・陽電 子を向かい合わせて直線的に加速して正面衝突させ るシンクロトロン放射の出ないリニアコライダーの 方が経済的である. 日本はいち早く e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> 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、技術開発を進めてきた.7年前から ICFA (International Committee for Future Accelerators) ではリニアコライダーを国際的に推進する体制を整 えた. 2004 年 8 月には国際的に主線形加速器の加速 技術を超電導加速空洞を用いることを決定し,2007 年3月には ICFA に基礎設計書が提出されプロジェ クトは国際的に大きく進展した.わが国に国際リニ アコライダー ILC を誘致するべく、全国の研究者と 共に努力を重ねている.

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超対称性の 正しさを示唆している. この理論では 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 TeV 以下の質量領域で 存在する可能性が高く、LHC での実験と相補い合う 形でのリニアコライダーでの実験が極めて急務であ る. 特に LHC でこれらの新粒子や新物理の兆候が 見えれば ILC 計画には拍車がかかる. 本研究室はリ ニアコライダーでの物理・測定器の研究を行なって きた. ILC での実験の測定器では荷電粒子と中性粒 子をバランス良く測定し、ハドロンジェットのエネル ギーを正確に測定するためには、半径が大きい測定器 が極めて有利である.このような測定器のコンセプ トを詰めることを国際的に行なっている.本研究室 は更に、ILC の加速器自体の研究開発にも参加して きた. 具体的には KEK の ATF において, 新竹ビー ムサイズモニターや,超高精度ビームポジションモニ ターの開発を行なっている. 本研究室の駒宮は ICFA 及び ILCSC (International Linear Collider Steering) Committee) において KEK の鈴木機構長とともにわ が国の代表である.

### ATF2

ILC の最終収束系には、(i) 主線形加速器で高いエ ネルギーに加速された電子・陽電子ビームを極めて 細く絞り込むために、四極磁石等を組み合わせて構 築する最終収束系システムの開発と、(ii) 電子ビーム と陽電子ビームを確実に衝突させるためのビーム軌 道制御技術の確立が必要である.

最終収束系システムを実証するための研究施設 (ATF2)の建設へ向けた準備している。ATF2 は, 現在 KEK で稼働中の先進加速器試験装置 (ATF)を 拡張し,実機と全く同じ原理の最終収束系を実証す る施設である。10<sup>10</sup> 個の電子を縦 37nmの非常に狭 い空間に閉じこめ,極微のビームサイズを実現する ことが初期の目標である. さらに, このビームの軌道 を 2nm の精度で制御できることを実証する. 小さな ビームサイズと, 精密なビーム軌道制御が可能になれ ば, 電子と陽電子を高い頻度で衝突させることを保 証できる. 現在は, このような非常に小さい電子ビー ムの大きさや軌道を正確に求めるためのモニタの開 発や, 軌道を一定に保つためのフィードバックシステ ムの研究を進めている.

ATF2 は日本が主導する計画だが、アメリカやア ジア、ヨーロッパの多数の国々が参加した国際共同研 究として進めている.現在は、2008 年秋に計画されて いるビームコミッショニング開始に向け、建設と各加 速器コンポーネントのインストール作業やモニター の最終調整をおこなっている.

ILC 衝突点ビームサイズモニタ (新竹モニタ) の開 発研究

ILC の衝突点で必要とされるような極小のビーム を測定するビームサイズモニタとして有望視されて いるものに、レーザの干渉縞を用いた新竹モニタが ある. これは、衝突点にレーザ光の干渉縞を作り、そ の干渉縞の位置(位相)を動かすことで、電子ビーム と逆コンプトン散乱して生じる γ線の量が変化する ことを利用して測定するモニタである.



図 2.2.10: 新竹モニタ全体図

この新竹モニタは、米 SLACのFFTB(Final Focus Test Beam) 実験にて 70nm のビームサイズを測る ことに成功している.本研究室では、今回 ATF2 で達 成される予定の 37nm のビームサイズを測定するた め、光学系を新規に設計し、数々の改良を行っている. ATF2 の新竹モニタでは、ILC 本実験のビームサ イズモニタとしての実証も兼ねて、37nm のビームサ イズを誤差 ±2nm 以内という高い精度で測定するこ とを目標としている.この新竹モニタの測定精度向 上のために、IP での干渉縞位相安定化、IP でのレー

ザー光位置安定化の機構を追加している.

新竹モニタに用いる γ線検出器の開発および性能評価

加速器のビームライン上には、加速された電子と 加速管の壁との散乱による γ線が大量に発生してい る. これらのバックグラウンドと、新竹モニタからの 信号 線を分離する能力が新竹モニタ用の γ 線検出 器には要求されることになる. 今回,CsI シンチレー タを多層構造にして用いることでその要求を満たす 検出器が新しくデザインされた. バックグラウンド 分離のアイディアは次の様なものである. 新竹モニタ による信号  $\gamma$  線は、コンプトン散乱の力学的条件から 29MeV に鋭いエンドピークを持つ. それに対して 加速器からのバックグラウンドでは制動放射による ものが支配的になり、ATF2電子ビームのエネルギー 1.3GeV まで広がった分布を持つ. このようにエネル ギー分布が違うことにより、信号 γ線とバックグラウ ンド $\gamma$ 線の CsI シンチレータ内でのシャワー発展は 異なったものになる。多層構造にしたのはシャワー 発展を測定する為である.得られたシャワー発展の グラフを、バックグラウンドと信号 γ線の重ね合わせ として連立方程式を解く事によって、それぞれの量を 求める事が可能となる.

2007 年秋に ATF で行われたビームテストでは,新 竹モニタの代わりに Laser Wire からのコンプトン散 乱 $\gamma$ 線を測定し,加速器からのバックグラウンドと比 較することで検出器の性能評価を行った.その結果, シミュレーションと合致するシャワー発展が得られ, 予想通りに検出器が動作しバックグラウンドを分離 する能力がある事が確認出来た.

### 2.2.2 BES 実験

Beijing Spectrometer(BES) 実験は中国・北京の 高能研究所 (IHEP) にある Beijing Electron-Positron Collider(BEPC) で行われている, 高エネルギー電子・ 陽電子衝突実験である. 1989 年よりおよそ 12 年間 続いた BES-I 実験の終了後, 1996 年から upgrade さ れ, BES-II 実験 (図 2.2.11) が行われた. BEPC の ビームエネルギーは 1.5 GeV から 2.8 GeV である.

BEPC は *c*-クオークと  $\tau$  レプトンの物理に特化 した加速器である. 特に  $J/\psi$  粒子は BES-I 実験に て 7.8 × 10<sup>6</sup>, BES-II 実験にて 5.77×10<sup>7</sup> 事象得られ ており世界最大である. 現在, 加速器は BEPC-II に upgrade しつつあり,2008 年中には稼働し実験が始 まる. ビームエネルギー 1.89 GeV でピークルミノシ ティを 10<sup>33</sup> cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> に増強する. 加速器の upgrade に伴い, 実験装置の性能を更に向上させた BES-III 実 験が計画されている. BES-III 実験では 1 年間に 10<sup>9</sup> の  $J/\psi$  粒子を得ることが計画され, これまでの実験 結果よりさらに精度の高い結果が得られると期待さ れる.

本研究室では、BES-III 実験に向け新たな TOF シ ステムの構築を IHEP, USTC とともに担当している. BES-III では、 $\tau \rightarrow \mu \gamma$ 稀崩壊の探索などを行う予定 である. 当面は、BES-III 測定器の建設と BES-II で の  $J/\psi$  からのバリオン対の生成を研究している.



ℤ 2.2.11: BES II detector

### 解析

BES-II Detector は中国の IHEP で稼働している  $e^+e^-$  コライダー (BEPC) における汎用 detector で ある. BEPC のビームエネルギーの範囲は 1(GeV) から 2.8(GeV) に及ぶ. この Detector の物理的な目 的は, charm クオークと  $\tau$  レプトンの物理の解析で あり, J/ψ 粒子 (質量 3.097GeV) が大量に生成され る.  $e^+e^-$ の反応により生成される全ての粒子を reconstruct するために, Detector は大きな立体角を カバーし,また位置,運動量,エネルギー分解能も 良くなっている. 中央の Detector は Vertex chamber(VC) と Main Drift Chamber(MDC) で構成され ている. MDC は 20 層のドリフトチェンバーからなっ ており , 粒子の tracking , および運動量 , dE/dx の測 定を行う. MDC の外側には, TOF が配置され, これ によって粒子の time of flight が測定されて particle ID をおこなっている.

我々は, $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ および,  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$ イベント を用いて, MDC と TOF の基本的な性能評価を行う とともに,monte carlo とデータ間の不一致に対する 系統的な調査を行った. 1999 年から 2001 年の間に 測定された全ての  $J/\psi$ イベントを用いて解析を行っ た. さらに,前半の run と後半の run を比較すること で,detector の経時変化が測定に与える影響を調査し た. 我々は, これまで行ってきた monte carlo と data 間の相違についての解析結果をまとめ IHEP に赴き, 現地の研究者と議論を交わしながら monte carlo の 理解を深めた. monte carlo の問題については,IHEP の研究者から不備が改善されている最新の解析環境 の提供を受けることで対処できた.

### 2.2.3 UCN 実験

堅い床の上に超冷中性子を置いた系を考える. 超 冷中性子は物質の表面で全反射し、また、運動エネル ギーが小さいので重力場に束縛される. 量子力学に よれば、このようにポテンシャル中に閉じこめられた 物体のエネルギーは離散化する. ここでは重力場を 考えているので、エネルギーが離散化すると、超冷中 性子が存在できる高さが局在することになる. 地表 の重力では、局在する高さのスケールは10µm 程度 と計算できる. また、量子力学の予言と、実際の高さ 分布が食い違った場合、到達距離が10µm 程度の未 知相互作用の存在を示唆している可能性がある.

この,高さ方向に局在した超冷中性子の分布を精 度良く測定する実験を進めている.10µm 程度の分 布を測定する必要があるので,この分布を拡大する 中性子光学系と,位置分解能に優れる CCD 検出器 を組み合わせた装置を考案した.現在は,CCD 検出 器の空間分解能の評価を終え,検出効率を向上させ る研究を進めている.



図 2.2.12: 実験セットアップ概念図

UCN 実験-装置開発-

超冷中性子の重力による量子化を検出するための 測定器を開発している.

まず、上部に吸収体を付けたスリットに超冷中性子 を通す.高さ方向に大きなエネルギーを持つ中性子 はスリット上部の吸収体で吸収され、スリットを通り 抜けるのは十分に小さなエネルギーを持つ中性子の みである.この中性子は高さ方向に束縛状態を形成す る.その典型的な高さは10µm 程である.この分布を 精確に測定するため以下のような装置の研究を進め ている.

高さ方向の分布を拡大する中性子光学系として円 筒を凸面鏡として利用した拡大装置を考案した。超冷 中性子の固体表面上で全反射するという特性を利用 して円筒の曲率を利用し、中性子の分布を拡大する。

超冷中性子の観測装置としては位置分解能に優れる CCD を用いる.中性子は電荷を持たないのでこのままでは CCD で検出できない.そこで CCD 上に<sup>10</sup>Bの中性子コンバータ膜を CCD 表面に蒸着し,中 性子とコンバータとの核反応によって生成される荷 電粒子を CCD で検出することにより中性子の位置 を知ることができる. これまでの研究により, このコ ンバータ膜つき CCD の開発に成功した. 開発した中 性子検出器の位置分解能は約 5µm であることが確か められた.

この拡大機構と CCD 検出器を組合わせることに より、スリット端部での中性子の高さ方向の分布を 1µm 以下の精度で測定できるような装置を開発して いる.

### 2.2.4 LHC での物理解析

我々が長年探索し続けてきたヒッグス粒子や超対 称性粒子を発見出来る時代が迫っている. LHC は CERN の世界最高エネルギーの陽子陽子衝突の加速 器である。2008 年に重心系エネルギー 14 TeV での 実験が開始される。わが国は汎用測定器の ATLAS 実験に参加している. 本来, e+e- コライダーでの実 験の方が LHC のようなハドロンコライダーでの実 験よりも事象や実験環境がクリーンであり、バックグ ラウンドも非常に低いが、 先にも述べた通り円形加 速器ではシンクロトロン放射によるエネルギー欠損 が大きく e+e- 衝突ではリニアコライダー以外の解 はない.シンクロトロン放射によって円形加速器を 粒子が一周する毎に失うエネルギーは $, (E/m)^4$  (Eと m はビーム粒子のエネルギーと質量) に比例する ので、質量の重い陽子を用いればエネルギーを失う 事無く高い衝突エネルギーが得られる. これが LHC の有効性であるが、実験はバックグラウンドが高く且 つ放射線レベルも高いので難しい. ATLAS 実験はこ のような困難を克服して TeV スケールの重要な物理 を発見できるように設計され建設が進んでいる。本 学の素粒子物理国際研究センターを中心として物理 解析の準備を進めてきた. LHC での最も重要な物理 は、素粒子の質量の起源とされるヒッグス粒子の発見 と、重力も含めた相互作用の超統一にとって不可欠な 超対称性の発見である、ヒッグス粒子は LEP での直 接探索から 114 GeV よりも重く, LEP などでの電弱 相互作用の精密測定から約200GeVよりも軽い事が 分かっており, 質量領域は絞られている. LHC では バックグラウンドが低いヒッグスの生成・崩壊モー ドを見極めて探索が行なわれる。特にクォークから 振りほどかれた Wボゾン同士が衝突してヒッグス粒 子を生成し, ヒッグス粒子が  $\gamma\gamma$  か au au の対に崩壊す るモードが有望である. 超対称性粒子に関しては,強 い相互作用で生成されるグルーオンやクォークの超 対称性パートナーが大量に生成されると期待されて いるが、これらは何段階かのカスケード崩壊を行な い最も軽い超対称性を生成するが、これらの事象の 特徴を捉えて探索する. LHC の実験開始から早い時 期にこれらの発見を目指す、エネルギーフロンティ アの実験では、従来の理論では全く予期されない発 見がある可能性もあり期待できる.

ATLAS 検出器におけるカロリメータのコミッショ ニング及び Missing E<sub>T</sub> の研究

2008 年の本格的な実験稼働に向けて、宇宙線データを用いたコミッショニングが現在活発に行われている. カロリメータのコミッショニングに参加し、特にジェットや Missing  $E_T$  (消失横方向エネルギー)の再構成の際に重要な役割を果たすクラスタリングについて重点的に研究を行った.又、実験初期における Missing  $E_T$  の性能評価の方法についても、研究を進めている.

ペデスタルランや宇宙線データの解析によって、カ ロリメータのノイズを理解し、クラスタリングの性 能に対する理解が深まった.又、これによって物理事 象のバックグラウンド(ビームガス、ビームハロー、 宇宙線など)を除去を行うための手法についての示 唆が得られた.現在、クラスターの時間情報を用いた バックグラウンドの除去の可能性について研究を進 めている.又、実データにおけるジェットの再構成及 び性能評価について、着々と準備が進んでいる.

実験初期における  $Missing E_T$  の性能評価の方法 としては、Minimum Bias事象のエネルギーバランス や、W事象における W の横質量分布を用いた方法に ついて、現在研究を進めている.

<報文>

(原著論文)

- OPAL Collaboration, G.Abbiendi et al. : Search for Invisibly Decaying Higgs Bosons with Large Decay Width Using the OPAL Detector at LEP, Eur.Phys.J. C49 (2007) 457-472
- [2] OPAL Collaboration, G.Abbiendi et al. : Inclusive Production of Charged Hadrons in Photon-Photon Collisions Phys.Lett. B651 (2007) 92-101
- [3] OPAL Collaboration, G.Abbiendi et al. : Inclusive Jet Production in Photon-Photon Collisions at  $\sqrt{s}_{ee}$  from 189 to 209 GeV, Phys.Lett. B658 (2007) 185-192
- [4] OPAL Collaboration, G.Abbiendi et al. : Measurement of  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  Cross Section and W Decay Branching Fractions at LEP, Eur.Phys.J. C52 (2007) 767-785
- [5] OPAL Collaboration, G.Abbiendi et al. : Bose-Einstein Study of Position-Momentum Correlations of Charged Pions in Hadronic Z<sup>0</sup> Decays, Eur.Phys.J. C52 (2007) 787-803
- [6] OPAL Collaboration, G.Abbiendi et al. : Measurement of  $\alpha_s$  with Radiative Hadronic Events, Eur.Phys.J. C53 (2008) 21-39

### (会議抄録)

[7] Y. Kamiya et al. : Development of an S-band Cs2Te-Cathode RF Gun with New RF Tuners, Proc. of 22nd Particle Accelerator Conference (PAC 2007).

- [8] H. Ohgaki, ..., Y. Kamiya et al. : Numerical Evaluation of Oscillator FEL with Multibunch Photocathode RF-Gun in Kyoto University, Proc. of 29th International Free Electron Laser Conference (FEL 2007).
- [9] M. Washio, ..., Y. Kamiya et al. : Soft X-ray Generation via Inverse Compton Scattering between High Quality Electron Beam and High Power Laser, Proc. of RadTech Asia 2007, pp318-324 (2007).
- [10] M. Washio, ..., Y. Kamiya et al. : Recent Progress of Picosecond RF-Gun System at Waseda University, Proc. of International Symposium on Charged Particle and Photon Interactions with Matter (ASR 2007), p18, (2007).
- [11] M. Washio, ..., Y. Kamiya et al. : Progress of Photo-cathode RF-gun at Waseda University, Proc. of Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry (TSRP 2008), Pp28-29, (2008).
- T.Suehara, H.Yoda, M.Oroku, T.Yamanaka et al.,
   "R&D Status of ATF2 IP Beam Size Monitor (Shintake Monitor)", Proc. LCWS/ILC2007, BDS03, arXiv:0709.1333v2

(国内雑誌)

- [13] 大川英希,金谷奈央子,浅井祥仁,小林富雄,駒宮幸男: 「ATLAS 検出器における Missing E<sub>T</sub>のオフライン モニターの開発とコミッショニング」、『日本物理学 会講演概要集』,社団法人日本物理学会,第62巻・第 2号・第1分冊, pp 28-28, 2007
- [14] 大川英希,金谷奈央子,Richard Teuscher,浅井祥仁, 駒宮幸男:「ATLAS 検出器における宇宙線データを用 いたカロリメータのコミッショニング」、『日本物理 学会講演概要集』,社団法人日本物理学会,第63巻・ 第1号・第1分冊,pp 30-30,2008
- [15] 山中隆志:「ATF2 におけるナノビームサイズモニタ (新竹モニタ)の開発 レーザー光学系の設計 」、日本物理学会講演概要集、社団法人物理学会、第63巻・ 第1号・第1分冊、pp121-121、2008
- [16] 大録誠広:「ATF2 におけるナノビームサイズモニ タ(新竹モニタ)の開発 Beam Test による 線検出 器の性能評価」,日本物理学会講演概要集,社団法 人物理学会,第63巻・第1号・第1分冊,pp122-122, 2008

(学位論文)

- [17] 山村大樹「Study of J/ψ Meson Decaying into Baryon-Antibaryon Final States with with the BES-II Detector」,博士論文(東京大学大学院理学 系研究科),2007年12月
- [18] 末原大幹「Development of a Nanometer Beam Size Monitor for ILC/ATF2」博士論文(東京大学大学院 理学系研究科), 2008 年 3 月
- [19] 中村友哉「Development of Beam-position Monitors with High Position Resolution」修士論文(東京大 学大学院理学系研究科), 2008 年 3 月

[20] 依田博太郎「新竹ビームサイズモニターのためのガンマ線検出器の開発」修士論文(東京大学大学院理学系研究科),2008 年 3 月

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [21] Y. Kamiya et al. : "Development of an S-band Cs2Te-Cathode RF Gun with New RF Tuners", 22nd Particle Accelerator Conference (June 2007), New Mexico, USA.
- [22] Y. Kamiya : "Quick Summary of Preparation Schedule for the Shintake-Monitor", 5th ATF2 Project Meeting (Dec. 2007), KEK, Japan.
- [23] T.Suehara et al., : "R&D Status of ATF2 IP Beam Size Monitor (Shintake Monitor)", 2007 International Linear Collider Workshop (LCWS/ILC2007), DESY, Hamburg, Germany, May 2007
- [24] T.Suehara, : "Configuration, Installation, and Schedule issues of Shintake-monitor", Fourth ATF2 Project Meeting, DESY, Hamburg, Germany, May 2007
- [25] H.Okawa et al.,: "Missing E<sub>T</sub> Commissioning using W Events (Template Method)", ATLAS JetEt-Miss Working Group Phone Conference, July 25, 2007 CERN, Geneva, Switzerland
- [26] H.Okawa et al.,: "Etmiss CSC note meeting", AT-LAS JetEtMiss Working Group Etmiss CSC Note Meeting, August 29, 2007 CERN, Geneva, Switzerland
- [27] H.Okawa et al.,: "Missing  $E_T$  Commissioning using the Minimum Bias", ATLAS Minimum Bias Working Group Meeting, September 10, 2007 CERN, Geneva, Switzerland
- [28] H.Okawa et al.,: "Missing E<sub>T</sub> Performance Studies using W Template Method", ATLAS Trigger and Physics Week - JetEtMiss Working Group Meeting, November 7, 2007 CERN, Geneva, Switzerland
- [29] H.Okawa et al.,: "Missing E<sub>T</sub> Performance Studies using W (Template Method)", ATLAS JetEtMiss Working Group Phone Conference, December 12, 2007 CERN, Geneva, Switzerland
- [30] H.Okawa: "Topocluster Performance Studies in M5 Run", ATLAS Tilecal Performance Meeting, January 21, 2008 CERN, Geneva, Switzerland
- [31] H.Okawa: "Topocluster Performance Studies in the Barrel with M5 Runs", ATLAS LAr Detector + Cosmic Analysis Meeting, January 24, 2008 CERN, Geneva, Switzerland
- [32] H.Okawa: "Topocluster Performance Studies in M5 Runs", ATLAS Tile Week - Data Preparation, February 6, 2008 CERN, Geneva, Switzerland

- [33] H.Okawa: "PMT, Cell Energy Distributions and Topocluster Performance in M5 Runs", ATLAS Tilecal Performance Meeting, March 10, 2008 CERN, Geneva, Switzerland
- [34] H.Okawa: "Topocluster Performance Studies in M5 Runs", ATLAS Hadronic Calibration Workshop, March 15, 2008 Double Tree Hotel, Tucson, USA
- [35] H.Okawa et al.: "Missing  $E_T$  in Early Data", AT-LAS Hadronic Calibration Workshop, March 15, 2008 Double Tree Hotel, Tucson, USA
- [36] T.Nakamura : "High resolution cavity BPM for ILC final focal point (IP-BPM)" International Linear Collider Workshop - LCWS 2007/ILC 2007 (Jun. 2007), DESY, Hamburg, Germany
- [37] T.Nakamura : "IP-BPM Progress & Planning" 5th ATF2 Project Meeting (Dec. 2007), KEK, Tsukuba, Japan
- [38] H.Yoda : "Update of beam test plan for Shintake monitor" IN2P3-KEK collaboration meeting on ATF2, Oct 16 2007, LAPP, Annecy, France
- [39] M.Oroku et al.,: "Beam Test Results-HD1 Response with old and new cut Quartz-Plates-" CMS Week, September 18, 2007 CERN, Geneva, Switzerland
- [40] M.Oroku : "Discussion of testing and planning for Shintake monitor in ATF2; including discussion of gamma detectors", Fifth ATF2 Project Meeting (Dec. 2007), KEK, Tsukuba, Japan
- [41] T.Yamanaka : "Discussion of testing and planning for Shintake monitor in ATF2" Fifth ATF2 Project Meeting (Dec. 2007), KEK, Tsukuba, Japan
- [42] T.Yamanaka : "Design for a New Optical Table of the Shintake Monitor", IN2P3-KEK collaboration meeting on ATF2 (Oct. 2007), LAPP, Annecy, France

### 招待講演

[43] S. Komamiya : "The Summary of the Conference", SUSY in 2010's (June 2007), Sapporo, Japan

### (国内会議)

一般講演

- [44] 末原大幹ほか、"ATF2/ILC のためのレーザ干渉法を 用いた極小電子ビームサイズモニタの開発研究"日 本物理学会第 62 回年次大会、24aZB-7、北海道大学、 2007 年 9 月
- [45] 大川英希,金谷奈央子,浅井祥仁,小林富雄,駒宮幸男: 「ATLAS 検出器における Missing E<sub>T</sub>の実データを 用いた性能評価法」,日本物理学会(2007年9月),北 海道大学,北海道
- [46] 大川英希,金谷奈央子,Richard Teuscher,浅井祥仁, 駒宮幸男:「ATLAS 検出器における宇宙線データを 用いたカロリメータのコミッショニング」,日本物理 学会 (2008 年 3 月),近畿大学,大阪

- [47] 川崎真介:「超冷中性子を用いた短距離における重 力相互作用の精密検証」,第一回 NOP ワークショップ (2007 年 9 月), KEK, 筑波
- [48] 川崎真介:「中性子用ピクセル検出器の開発-重力による量子力学効果の検証実験に向けて-」、中性子制御デバイスとその応用ワークショップ(2008年1月)、京都大学原子炉実験所、大阪
- [49] 川崎真介:「超冷中性子用ピクセル検出器の開発, 日本物理学会 (2008 年 3 月), 近畿大学, 大阪
- [50] 園田真也:「CCD 型中性子検出器の性能評価」,日 本物理学会 (2008 年 3 月), 近畿大学, 大阪
- [51] 中村友哉:「ATF2 最終収束系空洞型ビーム位置モニター」,第4回日本加速器学会年会,第32回リニアック技術研究会(2007年8月)和光市民文化センター,埼玉
- [52] 中村友哉: ILC 最終収束系のための空洞型ビーム位 置モニターの開発研究原子核三者若手夏の学校 (2007 年8月) パノラマランド木島平, 長野
- [53] 中村友哉: ATF2 のための空洞型ビーム位置モニター 日本物理学会 (2007 年 9 月), 北海道大学, 北海道
- [54] 大録誠広:「ATF2 におけるナノビームサイズモニ タ(新竹モニタ)の開発-Beam Test による 線検出 器の性能評価-」,日本物理学会 (2008 年 3 月),近畿 大学、大阪
- [55] 山中隆志:「ATF2 におけるナノビームサイズモニ タ(新竹モニタ)の開発 レーザー光学系の設計 」, 日本物理学会 (2008 年 3 月), 近畿大学, 東京
- [56] 山中隆志:「ILC のためのビームサイズモニタの研究・開発」,原子核三者若手夏の学校 (2007 年 8 月), パノラマランド木島平,長野

### 招待講演

- [57] 駒宮幸男:「基礎科学の世界(素粒子と宇宙の謎)」, 先端基礎科学次世代加速器研究会(2008年2月)
- [58] 駒宮幸男 : 「International Linear Collider Project」, 日本物理学会 (2008 年 3 月) 近畿大学
- (セミナー)
- [59] 駒宮幸男:「ILC で解明する宇宙と素粒子の謎」, (2008 年 1 月) 名古屋大学
- [60] 駒宮幸男:「宇宙と素粒子の不思議な関係」, (2008 年2月) 静岡県立三島北高等学校
- [61] 駒宮幸男:「素粒子物理学@ J-PARC」, J-PARC 利用者協議会 (2007 年 3 月) 東京大学宇宙線研究所

## 2.3 蓑輪 研究室

蓑輪研究室では、「宇宙」・「非加速器」・「低エネル ギー」という切り口で、大型加速器を使わずに新し い工夫により素粒子物理学を実験的に研究している。

### 2.3.1 アクシオンヘリオスコープ実験

強い相互作用の理論である量子色力学(QCD)に は実験事実に反して CP 対称性を破ってしまう問題、 強い CP 問題があることが知られている。アクシオン (axion)模型はこの問題を解決するものとして期待さ れているが、それには模型が予言する擬南部ゴール ドストンボソンであるアクシオンの発見が不可欠で ある。アクシオンは小さい質量を持った中性擬スカ ラーボソンであり、物質や電磁場とはほとんど相互 作用しないと考えられている。予想される質量範囲 はまだ広いが、もし 1 eV オーダーであれば太陽がよ いアクシオン源となることが知られている。

我々は太陽由来の太陽アクシオンを捉えるために、 高エネルギー加速器研究機構の山本明教授と共同で 中心磁場4T、長さ2.3mの超伝導コイルとPINフォ トダイオードX線検出器を備え、仰角±28°、方位角 はほぼ全域において天体を追尾することのできるア クシオンへリオスコープ (Tokyo Axion Helioscope) を開発した。この装置は、太陽起源のアクシオンを 磁場領域で光子へと変換 (逆プリマコフ変換)し、そ の光子を PIN フォトダイオードで捉えるものであ る。これまでの観測ではアクシオン由来と考えられ る有意な事象は捉えられていないが、質量 0.27 eV 以下のアクシオンと光子の結合定数に対して  $g_{a\gamma\gamma} < 6.8 - 10.9 \times 10^{-10}$  GeV<sup>-1</sup> という上限値を得るこ とに成功している。

昨年はより大きい質量のアクシオン探索の為に低 温高密度へリウムガスを利用した装置のアップグレードを行った。このアップグレードは超伝導磁石がクエ ンチした時の安全対策とガスの圧力を様々な値に設定 するための自動制御を可能にしたものである。これに よりアクシオンの質量 1 eV 強までの実験が可能にな り、現在 1 eV 付近及びそれ以下での探索実験を行っ ている。今のところアクシオン由来と考えられる事 象は捉えられていないが、質量範囲 0.96 eV <  $m_a$  < 1.00 eV において  $g_{a\gamma\gamma}$  < (5.0-10.4)×10<sup>-10</sup> GeV<sup>-1</sup> という上限値を得ている (図 2.3.13)。これは現在こ の質量領域において直接検出実験で得られる上限値 としては最も小さく、また大統一理論 (GUT) などの さまざまな仮定の下に予想されているアクシオン模 型の一部に対して世界で初めて制限をつけたものと なっている。

なお、欧州原子核研究機構 (CERN) において同じ 仕組みで大規模な装置を用いた CAST グループも 2002 年より探索実験を始めており、アクシオン模型 が予想する領域にせまろうとしている。

### 2.3.2 新たなアクシオン探索実験の検討

我々はアクシオンの探索を研究テーマの一つとし ており、前節で述べたように、アクシオンヘリオス コープ (Tokyo Axion Helioscope)を用いた太陽アク シオン探索実験を行ってきた。一方、現在用いてい る測定装置において感度をもたないアクシオン探索 領域に感度をもつような検出器を開発して、新たな アクシオン探索実験を行うことも検討している。



図 2.3.13: 太陽アクシオンに対する制限

アクシオン模型が Peccei と Quinn によって提案 されてから 30 年ほど経つが、これまで世界中で様々 な手法によりアクシオン探索が行われてきた。アク シオンは相互作用が極めて小さく、検出するのは困 難である。そのため、アクシオンを探索するために は工夫が必要であり、アクシオンと光子の結合を利 用し強磁場中でアクシオンを光子へと変換する手法 (逆プリマコフ変換)が広く用いられている。探索す るアクシオン源としては、宇宙初期に大量に生成さ れ現在宇宙に大量に存在するアクシオン、太陽をは じめとする天体の内部で生成されるアクシオン、 オ らに実験室で光子をアクシオンに変換するというも のがあり、これらのアクシオンを探索する数多くの 実験が行われてきた。その結果、現在のところアク シオンは発見されていないが、測定結果からアクシ オンの諸性質に対して種々の制限がつけられてきた。 最近は、高感度なアクシオン探索実験を行うために 実験装置が大規模化してきている。

現在までに、新たなアクシオン探索実験を行うた めに先行研究の調査を行ってきた。今後は実験の大 枠を決め、計画、検出器の開発、及び測定を行って いく予定である。

### 2.3.3 暗黑物質検出器開発

以前我々は、CaF<sub>2</sub>シンチレータを用いたニュー トラリーノ探索実験を行っていた。このシンチレー タは、ニュートラリーノと相互作用する核子として、 原子核中最大のスピンを持つ<sup>19</sup>Fを含んでおり、ス ピンに依存した (SD、spin dependent) 相互作用に大 きな感度を持つ。我々が 2005 年に出した散乱断面積 に対する制限は、当時において世界最高水準にあっ た。今後の性能向上の結果次第で、さらに高感度の 探索を行える可能性を持っている。

現在研究しているのは、検出器の識別によるバッ クグラウンド除去である。ニュートラリーノ由来の シグナルの見えない現状では、バックグラウンドを 一桁下げることは、制限を一桁きつくすることを意味している。我々は、2005年の実験のバックグラウンドは、検出器内外からのγ線であると推測し、γ線による電子反跳現象と、ニュートラリーノなどによる原子核反跳現象を識別する方法を、模索している。 識別方法として考えているのは、波形識別と波長識別の二つである。波形識別は、シンチレーション光の減衰時間を用いて識別する方法であり、他のグ

ループでも、さかんに行われている手法である。こ れまでは、CaF2では波形識別は難しいと考えられて いた。しかし、我々は、波形から減衰時間を求める アルゴリズムを改良し、数百 keV の高エネルギー領 域に関しては、識別が可能であることを示すことが できた。実際のニュートラリーノ探索実験では、数 + keV の領域が重要になるため、この識別を低エネ ルギー領域でも実現することが今後の課題である。

もう一つ別の方法として、波長識別という方法も 考えている。これは、文字通り、シンチレーション 光の波長によって識別する方法である。他のグルー プでは、まだほとんど研究されておらず、この手法 の有効性は未知数である。我々は、30~70keVの領 域で、電子反跳と原子核反跳とでは違いがあること を確認した。今後は、この違いでどれだけパックグ ラウンドの除去が可能かを、見積もる予定である。

# 2.3.4 レーザー共鳴イオン化質量分析法に よる半導体ウエハ表面汚染評価技術 の開発

近年の産業技術の発展と並行して、生体・材料分析 や環境科学など幅広い分野で微量物質の評価技術の 重要性が注目されてきている。この中で、半導体デバ イスの高密度化・微細化とともに必要性が増してきて いる半導体ウエハ表面の極微量な不純物に対する汚 染評価に着目し、レーザー共鳴イオン化質量分析法 (RIMS: Resonance Ionization Mass Spectrometry) を用いた新しい汚染評価手法の開発を試みている。 RIMS はレーザー共鳴イオン化による元素の選択性 と質量分析による同位体識別をセットにした微量元 素分析手法であり、原子番号 Z と質量数 A を決定す ることで特定の原子のみを検出するものである。

ウエハ表面の既存の汚染評価手法には主に全反射蛍 光X線分析と誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS) があり、微量物質の検出限界という点ではICP-MS が優れている。しかし、ICP-MSでは質量分析しか 行わないため、同量体や等質量の分子による干渉が 検出限界に大きな影響を与えていると考えられる。

RIMS による汚染評価はウエハ表面から汚染物質 を回収する前処理、得られた試料の真空中への導入、 RIMS による検出という流れで行う。前処理及び質 量分析を行う点で ICP-MS と共通点も多いが、試料 のイオン化にレーザーを用いて元素の選択を行うと ともに測定系の真空度を低く抑えることでバックグ ラウンドを大幅に減らし、検出限界改善につながる と考えている。 本年度は、共鳴イオン化を行いやすく、また ICP-MS での検出限界が他元素に比べて相対的に劣ってい るカリウム元素について、(図 2.3.14)のセットアップ で RIMS による微量分析を行った。用いたレーザー は波長 404nm 共鳴励起用の波長可変 CW 外部共振 器型半導体レーザーとイオン化用の 808nm 高出力 (3W 程度)半導体レーザーの2本で、試料の炭酸カ リウム粉末をるつぼで 900 度程度まで加熱して解離 した気体のカリウム原子を RIMS により検出した。 検出効率は熱電子によるイオン化と比較することで、  $\sim 10^{-7}$ と得られた。また、共鳴励起用の 404nm レー ザーは線幅が狭く  $^{39}$ K/ $^{41}$ K 同位体間の僅かな共鳴励 起波長の違いも観測した。

今後は、808nm レーザーとして産業用の 100W 程 度のハイパワーレーザーを用いることで測定セット アップを殆ど変えずに効率を 1-2 桁改善させ、前処 理からの一連の流れにより RIMS による汚染評価の 有効性を検証していく予定である。



図 2.3.14: 2本のレーザーを用いた微量カリウム原子 検出

この開発研究は、将来的には元素・質量分析によるニュートリノ検出器としての使用を目指したものである。

### 2.3.5 原子炉ニュートリノモニター

原子炉格納容器の外側に置いて、原子炉の熱出力あ るいは核燃料の燃焼状況などの運転状況をモニター する装置を開発している。核分裂反応に伴って放出さ れる反電子ニュートリノをプラスチックシンチレー タにより検出し、その検出率とエネルギースペクト ルにより原子炉の運転状況をモニターする。ニュー トリノは炉心から格納容器の外側までほとんど素通 りするので、通常の放射線のほとんどない人間の作 業する場所でモニター可能である。

一般に原子炉ニュートリノを検出するには、ガドリ ニウムをとかし込んだ有機液体シンチレータを使う。 図 2.3.15 に示すように、入射してきた反電子ニュー トリノ ( $\bar{\nu}$ ) は、シンチレータ中に含まれる陽子 (p) と 逆ベータ反応を起こし、陽電子 ( $e^+$ ) と中性子 (n) が 生成される。陽電子は短距離を走った後にシンチレー タ中の電子と対消滅して 2 本の  $\gamma$  線となり、中性子 はシンチレータ中を徘徊しながら減速してガドリニ ウム (Gd) に吸収されて複数の  $\gamma$  線を放出する。最 終的にこれらの  $\gamma$  線は、コンプトン散乱等によりシ ンチレータで遅延同時計数法により検出される。ま た、ニュートリノは反応断面積が小さいため、統計 を貯めるためには大型の検出器を必要とする。統計 の少なさを補うためには、検出器を原子炉近傍に設 置すればよい。そこで、われわれは1トン程度の、小 型のニュートリノ検出器の開発に取り組んでいる。



図 2.3.15: 反電子ニュートリノ検出の仕組み

原子炉近傍に検出器を持ち込むに当たっての問題 点の一つは、有機液体が可燃性液体であることであ る。このことは、とくに商業用原子炉(原子力発電 所)に設置するときに問題となりうる。

これに対して、われわれは有機液体シンチレータ のかわりにプラスチックシンチレータを使用して回 避しようとしている。プラスチックシンチレータは 確立した技術により、性能か均質で寸法の大きなも のが市販されている。ガドリニウムは中性子を吸収 して、環境放射能と区別可能な γ線を放出するため、 ニュートリノ検出には重要な役割を果たす。このガ ドリニウムの組み込み方が問題となるが、図 2.3.16 に示すようなセグメント化したプラスチックシンチ レータの間にガドリニウム層をはさむ構造でも、液 体シンチレータにガドリニウムをとかし込んだもの と同様な性能が得られることが、コンピュータシミュ レーションから判明している。検出効率は、大雑把 な計算ではあるが1.5~3割程度と見積もっている。 また検出率は、熱出力 3GW の原子炉から 30 メート ル程度に配置した場合で、一日あたり 200~400 個を 検出することができる。

プラスチックシンチレータを用いる場合、セグメ ント化は必至ではあるが、いくつかの従来の大型検 出器にはない利点がある。本年度は1セグメントに あたる10cm×10cm×100cmのプラスチックシンチ レータの性能調査もおこない、長手方向には5cm程 度の位置分解能が得られることがわかった。この位 置分解能は一般的な検出器に比べてかなりよく、SN



図 2.3.16: セグメント化したプラスチックシンチレー タによる原子炉ニュートリノモニター

比を上げられると考えている。

また、プラスチックシンチレータを用いることに より、可搬性が向上し、前述の様に設置出来る場所 がひろがる。期待される応用の一つは、IAEA(国際 原子力機関)による NPT(核兵器不拡散条約)締約 国の原子力活動の監視に用いることである。たとえ ば原子炉の運転によりプルトニウムができるが、プ ルトニウムは核兵器の原料となる。ウラン 235 の燃 焼とプルトニウム 239 の燃焼によるニュートリノの スペクトルは異なるため、プルトニウムの生成量を ニュートリノスペクトルから見積もることが出来る。 原子炉以外の代用のニュートリノ源を用意すること は困難であり、また原子炉からのニュートリノを遮 蔽することも出来ないので、小型反電子ニュートリ ノ検出器は、新しい原子力活動の監視の方法となり うると考えている。

<報文>

(原著論文)

 Y. Iwata, Y. Inoue, M. Minowa: A new method of alpha ray measurement using a Quadrupole Mass Spectrometer, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 577 (2007) 619–622.

(会議抄録)

[2] 岩田圭弘: レーザー共鳴イオン化質量分析法を用いた 半導体ウエハ表面汚染評価技術の開発、東京大学 21 世紀 COE プログラム拠点「極限量子系とその対称 性」シンポジウム 2007 概要集 p.27. [3] 太田良介: 第三期太陽アクシオン探索、東京大学 21 世紀 COE プログラム拠点 「極限量子系とその対称 性」 シンポジウム 2007 概要集 p.52.

### (国内雑誌)

 [4] 義輪 眞:暗黒物質の直接探索、パリティ Vol.22 No.11 (2007) 33-37.

### (学位論文)

- [5] 秋本祐希: Search for solar axions with mass around leV using coherent conversion of axions into photons、平成 20 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.
- [6] 中田量子:小型反電子ニュートリノ検出器の開発、平 成20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.
- [7] 水本哲矢:アクシオン探索実験について、平成20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.

<学術講演>

(国際会議)

### 一般講演

[8] Y. Inoue, M. Minowa, Y. Akimoto, R. Ota, T. Mizumoto, A. Yamamoto: Status report of the Tokyo axion helioscope, International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP) 2007, 11 September 2007, Sendai, Japan.

### (国内会議)

### 一般講演

- [9] 井上慶純: みのわ研報告、RESCEU-DENET 共催
   「第7回 宇宙における時空・物質・構造の進化」研究
   会・'Dark Energy in the Universe' サマースクール、
   箱根、2007年9月1日.
- [10] 水本哲矢:第三期太陽アクシオン探索実験1、日本 物理学会第62回年次大会、北海道大学2007年9月 23日.
- [11] 太田良介: 第三期太陽アクシオン実験 2、日本物理学 会第 62 回年次大会、北海道大学 2007 年 9 月 23 日.
- [12] 秋本祐希: 第三期太陽アクシオン探索実験 3、日本 物理学会第 62 回年次大会、北海道大学 2007 年 9 月 23 日.
- [13] 岩田圭弘: レーザー共鳴イオン化質量分析法を用いた 半導体ウエハ表面汚染評価技術の開発、日本物理学 会第 62 回年次大会、北海道大学 2007 年 9 月 22 日.
- [14] 中田量子:小型反電子ニュートリノ検出器のための棒 状プラスチックシンチレータの性能評価、日本物理学 会第 62 回年次大会、北海道大学 2007 年 9 月 21 日.
- [15] 小栗秀悟: 無機結晶シンチレータによる暗黒物質と バックグラウンドの識別、日本物理学会第62回年次 大会、北海道大学2007年9月23日.

- [16] 岩田圭弘: レーザー共鳴イオン化質量分析法を用いた半導体ウエハ表面汚染評価技術の開発、東京大学21世紀 COE プログラム拠点「極限量子系とその対称性」シンポジウム2007、東京大学小柴ホール2007年11月15日.
- [17] 太田良介:第三期太陽アクシオン探索、東京大学 21
   世紀 COE プログラム拠点 「極限量子系とその対称
   性」 シンポジウム 2007、東京大学小柴ホール 2007
   年 11 月 13-15 日.
- [18] 小栗秀悟: CaF<sub>2</sub> や NaI などの PSD やその他の識別 方法について、第 14 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 2008 年 2 月 19 日.
- [19] 岩田圭弘: レーザー共鳴イオン化質量分析法を用いた半導体ウエハ表面の金属汚染評価手法の開発、日本物理学会第63回年次大会、近畿大学2008年3月26日.
- [20] 太田良介: 第三期太陽アクシオン探索におけるヘリウ ム密度について、日本物理学会第 63 回年次大会、近 畿大学 2008 年 3 月 23 日.
- [21] 秋本祐希: 第三期太陽アクシオン探索実験、日本物理 学会第 63 回年次大会、近畿大学 2008 年 3 月 23 日.
- [22] 水本哲矢: アクシオン探索実験について、日本物理学 会第 63 回年次大会、近畿大学 2008 年 3 月 26 日.
- [23] 中田量子:小型反電子ニュートリノ検出器のためのシ ミュレーションおよび棒状プラスチックシンチレータ の性能評価、日本物理学会第63回年次大会、近畿大 学2008年3月24日.
- [24] 小栗秀悟: CaF<sub>2</sub> と NaI による暗黒物質とバックグラ ウンドの識別、日本物理学会第 63 回年次大会プログ ラム、近畿大学 2008 年 3 月 23 日.
- (セミナー)
- [25] 蓑輪 眞:暗黒物質探索実験、2007 年度 原子核三者 若手夏の学校、パノラマランド木島平、2007 年 8 月 20 日.

# 2.4 相原研究室

当研究室では、高エネルギー加速器研究機構(KEK) のBファクトリー加速器を使った実験(Belle実験) 茨城県東海村で建設中の J-PARC 加速器を使った長 基線ニュートリノ振動実験(T2K実験)新型光検出 器(HPD)の開発、さらに、国立天文台すばる望遠鏡 に搭載する超広視野 CCD カメラ (Hyper Suprime-Cam) によるダークエネルギーの研究、などを行って いる。本年度は、当研究室で博士の学位を取得した日 下暁人氏(現シカゴ大学 KICP フェロー)が博士論 文「Measurement of CP-Violating Asymmetries in the Neutral B Meson Decaying to the rho-pi State Using a Time-Dependent Dalitz Plot Analysis J L より、第9回(2007年度)高エネルギー物理学奨励 賞、第2回(2008年)日本物理学会若手奨励賞、お よび第24回(平成19年度)井上研究奨励賞を受賞 した。

# 2.4.1 B中間子のフレーバー変換中性カレント崩壊の精密測定

小林・益川理論がクォークに働く弱い相互作用の CP 非対称の起源であることが明らかになった今、B ファクトリーにおける研究の主題は、CP 非対称現 象をプローブとする新しい物理、すなわち小林・益川 理論を含む素粒子の標準理論の枠組みに収まらない、 より根源的な物理の探索に移りつつある。当研究室 は、この新しい物理の探索を、B中間子崩壊のうち、 Flavor Changing Neutral Currents (FCNCs) によっ て引き起こされる崩壊の精密測定によって行ってい る。ここで、FCNCs とは、 $b \rightarrow s\gamma$ 、 $b \rightarrow sl^+l^-(l \mid t \mid s)$ e または  $\mu$ )  $b \rightarrow sg(g \, \mathsf{d} \not \mathsf{d} \mathcal{H} - \mathcal{H} \not \mathsf{d} \mathcal{H}), \ b \rightarrow dg \, \mathsf{d} \mathcal{H} \not \mathsf{d} \mathcal{H}$ 素過程で表される、クォークの種類 (flavor, フレー バー)がbからsあるいはdに変換する中性カレント 反応(反応の始状態の電荷と、終状態の粒子の電荷の 総和が等しく、電荷のネットな流れがない反応)、す なわち、フレーバー変換中性カレントの総称である。

### $b \to dg/b \to sg$

第3世代のbクォークが第1世代のdクォークを 含む終状態へ崩壊する過程である b 
ightarrow dq 過程(図 2.4.17)は、bクォークが第2世代のsクォークを含む 終状態へ崩壊する過程である  $b \rightarrow sq$  過程とは異なる CP 位相を持ち、新しい角度から標準理論を超える物 理の探索を行うことができる。b → sg 過程に関して は、これまでに Belle グループ、および、米国スタン フォード加速器センター(SLAC)の BaBar グループ により、様々な測定が行われてきた。それに対して、  $b \rightarrow dg$  過程は分岐比の大きさが $b \rightarrow sg$  過程の分岐 比に比べて約4%と非常に小さく、解析のために大量 のデータ量を必要とするため、測定が困難であった。 今回 Belle グループは、6億5千7百万の B·B 中間 子対を用いて、B中間子が二つのK。中間子に崩壊す る反応の解析を行った。選別された58±11事象を用 いて、この崩壊過程における CP 非対称性を測定し、 崩壊と混合による CP 非対称度  $\mathcal{S}=-0.38^{+0.69}_{-0.77}$ ?(統 計誤差) ±0.09(系統誤差)、および直接的 CP 非対称 度  $A = -0.38 \pm 0.38$ (統計誤差) $\pm 0.05$ (系統誤差) と 決定した (図 2.4.18)。この結果は標準理論と矛盾し ない結果であり、また測定精度は世界最高精度であ る。さらに、 $b \rightarrow dg$  FCNC プロセスによって引き起 こされる他の崩壊モードとして、 $B^+ o ar{K}^{*0} K^+$  過 程、 $b \rightarrow sg$  FCNC プロセスによって引き起こされ る崩壊モードとして  $B \rightarrow K^+ K^- K^0_S$ の解析を進め ている。

 $b \rightarrow s l^+ l^-$ 

B中間子がストレンジネスを含むハドロンとレプトン対(電子・陽電子対、またはミューオン・反ミューオン対)へ崩壊する電弱崩壊の精密測定を進めている。Belle グループでは、これまでに1億5千2百万のB·B中間子対を解析することによって、その分



図 2.4.17:  $b \rightarrow dg$  過程を含むプロセスである B 中間子が二つの  $K_s$  中間子に崩壊する過程。

岐比を  $(4.11 \pm 0.83^{+0.85}_{-0.81}) \times 10^{-6}$ と決定した。この 値を使って、いくつかの超対称性モデルに制限を与 えることができた。現在、統計量を4倍以上に増や して、解析を進めている。

# 2.4.2 Super-KEKB計画のためのビーム ラインシミュレーション

現在、Belle実験のアップグレード計画として、Super-KEKB実験計画が推進されている。Super-KEKBでは、これまでのルミノシティーをさらに一桁以上増加させて、大量統計による超高精密実験を目指している。このアップグレード計画のような大電流ビームの実験において、安定した測定器動作を保証するためには、加速器からのバックグランドを理解し、抑制することが、これまで以上に重要になる。われわれの研究室では、GEANT4によるビームラインシミュレーションを構築し、Super-KEKB実験における加速器からのバックグランド研究を進めている。

# 2.4.3 J-PARC ニュートリノー次ビーム ライン用ビームモニターの開発

2009 年度に開始を予定している T2K 実験では、 茨城県東海村の J-PARC 実験施設で生成した大強 度の陽子ビームを用いて大強度のミューニュートリ ノビームを岐阜県神岡町の大型水チェレンコフ検出 器スーパーカミオカンデに向けて打ち込み、ミュー ニュートリノ消滅現象の精密測定及び電子ニュート リノの発現現象の発見を狙う。J-PARC 実験施設で は、実験開始に向けて2007年度より本格的にニュー トリノビームライン機器の製作及び設置を行ってい る。その中で本研究室では特にその一次陽子ビーム ラインの陽子ビームモニターに関連した部分を担当 している。ニュートリノー次ビームラインは、取り 出されたビームを調整するための前段部、神岡方向 にビームを曲げるためのアーク部、ターゲットに当 てるために最終的にビームを調整するための最終集 束部の3つの部分に大きく分けられるが、2007年度 は特に前段部及びアーク部のビームモニターの製作 及び設置を行った。



図 2.4.18:  $B \rightarrow K_S^0 K_S^0$  崩壊過程の解析で測定され た a) 崩壊時間差  $\Delta t$ 、および b) 時間に依存した CP非対称度

### 2.4.4 ビームプロファイルモニター

ビームプロファイルモニターはセグメント化した 厚さ 5µm のチタン箔を配置し、ビームの通過によ って放出される二次電子量のセグメント間の違いを 測定することによってビームの拡がりを再構成する Segmented Secondary Emission Monitor (SSEM) を 用いる。このモニターはビームと直接接触するため、 大きなビームロスおよびモニター自身の劣化をを引 き起こすため、必要時にのみビーム中心へと移動さ せるさせるための駆動機構を持たせる必要がある。 今年度は前段部およびアーク部に用いる全13台の ビームプロファイルモニター用真空容器及び駆動機 構の設計・製作を行った。駆動装置を用いたモニター 中心位置およびその再現性について製作した駆動機 構全数について測定及び調整し、約  $10 \mu {
m m}$  の精度で 位置が再現することを確認した。製作した真空容器 および駆動機構は他の機器と共にビームラインヘイ ンストールし、実験開始に向けて準備を進めている。 ビームプロファイルモニターの読み出しには、KEK の開発した COPPER ("COmmon Pipelined Platform for Electronics Readout") システムを用いる。 を COPPER 上に取り付けるフロントエンドのドー ターカードとして 65MHz フラッシュADC を用い、 ビームプロファイルモニターから得られる信号の波 形を解析して1ビームスピル中のマイクロバンチ毎 にビームプロファイルを測定する。ビームプロファ イルモニターの読み出し総計約 900 チャンネルに対 応するフラッシュADC が納入され、読み出しシステ ムの組み上げおよびその試験を現在行っている。

## 2.4.5 ビーム位置モニター

ー次ビームラインのビーム中心位置の測定のため のビーム位置モニターとして、4極静電型モニター (ESM)を用いる。このビームモニターはビームダク トの内側に4枚の電極板を配置し、ビーム通過時に 4つそれぞれの電極に誘起される電荷量を違いから ビーム中心位置を見積もる。本年度は前段部および アーク部に用いる12台のビーム位置モニターを製作 した。

電極に誘起される電荷量とビーム中心位置の間の 関係をつけるために、ワイヤーに電流を流すことで ビームに見立て、ワイヤーの位置と得られる信号の 関係からモニターを校正する装置の開発を行った。製 作したビーム位置モニター全数について校正を行い、 その結果ビーム位置モニターの電極に誘起される信 号のゲインで 0.6%、約 0.3mm の位置分解能に対応 する精度で校正を行うことができた。校正後製作し たビーム位置モニターをビームラインにインストー ルし、特にビームライン前段部において真空試験及 び電気ノイズの測定試験を行っている。

# 2.4.6 次世代水チェレンコフ検出器のため のハイブリッド光検出器開発

当研究室は、新型光検出器である大口径 Hybrid Photo Detector (HPD)を開発している。大口径 HPD は、従来の光電子増倍管 (PMT)より、優れた時間 分解能を持ち、かつ安価に製作できる可能性を持つ。 このため、大口径 HPD は、日本、アメリカ、ヨー ロッパなどでさかんに検討されている次世代メガト ン級水チェレンコフ検出器用において、現在使用さ れている PMT に代わるデバイスとして期待されて いる。当研究室は、浜松ホトニクス、東大宇宙線研、 KEK 素核研システムエレクトロニクスグループと共 同で13 インチ HPD の試作に成功し、基本性能を確 認した。

HPD は光電面とアバランチェダイオード (AD) か ら成り、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) に打ち込み増幅する。光 電面と AD の間に、10~20keV の高印加電圧をかけ ることにより、AD 内に光電子あたり数千の二次電 子が生成される。さらに、個々の二次電子は、AD の アバランシェ増幅により数十倍の電子に増幅される。 この二段の増幅機構により、最終的に約 O(10<sup>5</sup>)の増幅が得られ、一光電子が検出可能となる。その結果、 HPD には、

1)第一段の電子増倍過程における増幅率が大き く、かつ増幅率のばらつきが小さいため、波高分解 能がPMTに比べてよくなる。2)電子増幅過程に PMTのようなダイノードを含んでいないため、電 子走行時間のばらつきが存在せず、優れた時間分解 能が達成できる。3)部品数がPMTの1/10ですみ 安価である。などの特長がある。われわれは、13イ ンチHPDの試作器を20kVの印加電圧で動作させ ることにより、1光電子で24%のエネルギー分解 能、全照射で190psの時間分解能を測定し、HPDの PMTに対する優位性を確認した。表2.4.1に、HPD とPMTの性能評価の結果をまとめる。

HPD は PMT に比べて優れた性能を持っている が、実用化にあたっては、解決しなくてはならない 問題が残っている。そのひとつに、PMT に比べて約 1/100 という低い電子増幅がある。この問題を解決 するためには、HPD 用低ノイズ読み出し回路の開発 が必要である。われわれは、最新のデジタル信号処 理技術をもちいた、低ノイズプリアンプ、低消費電 力高速サンプリング、デジタル信号処理、からなる読 み出し回路の開発を行っている。今年度、試作機を 完成し、HPD との接続試験を行った。結果、5 光電 子までの波高分離(図 2.4.19)、及び、200ps 以下の 時間分解能(図 2.4.20)、という性能が得られ、我々 の要求を、十分に満たしていることを確認した。今 後は、HPD 実装のための、読み出し回路の小型化、 及び、8 インチ HPD の開発を行う。

表 2.4.1: HPD と PMT の性能比較表

Parameters	13 インチ	13 インチ
	HPD	通常 PMT
電子増幅	$O(10^{5})$	$O(10^{7})$
時間分解能@1p.e.	$190 \mathrm{ps}$	$1400 \mathrm{ps}$
<b>波高分解能</b> @1p.e.	24%	70%
立ち上がり時間	1 ns	6 ns
パルス幅	2.2 ns	10ns
ダイナミックレンジ	3000 p.e.	2000 p.e.
(p.e.=光電子)		

# 2.4.7 観測宇宙論によるダークエネルギー の研究

WMAP による宇宙背景輻射の観測などによって、 物質階層であるバリオンは宇宙の全エネルギーのわ ずか4%を占めるに過ぎず、実に73%のエネルギー が現在の理論では説明のつかないダークエネルギー と呼ばれる真空のエネルギーで占めらることが明ら かになった。このダークエネルギーの正体は全く不



図 2.4.19: 波高分布図(実線:HPD+読み出し回路、 ヒストグラム:HPD+オシロスコープ)



図 2.4.20: 時間分解能 vs. 光電子数 (HPD+読み 出し回路)

明であり、21世紀の物理学に突きつけられた超難問 である。本研究室では、このダークエネルギーの正 体の解明をめざして、超広視野深宇宙撮像探査実験 計画を推進している。

この計画で、当研究室は、国立天文台と共同で、す ばる望遠鏡の主焦点に、広視野 1.77 平方度 1.2 ギガ ピクセルの CCD カメラ (Hyper Suprime-Cam)を製 作している。この新装置を用いて、最低 1000 平方度 の広域探査を行い、探査天域に含まれる 1.5 億個程度 の銀河の形状解析から、弱い重力レンズ効果による 系統的形状歪みを検出し、遠方銀河と我々の間に介 在する(ダークマターを含めた)全質量の分布を求 め、宇宙の3D 質量分布図を作成する。さらに、宇 宙大規模構造の形成と進化、銀河の個数分布と形状 進化などの観測的宇宙論の研究を進めることによっ て、ダークエネルギーの正体に迫る。

本年度は主に CCD カメラからの読み出しエレク トロニクス、特にデジタルデータの処理システムを 開発した。2007 年度は読み出しモジュールの試作機 を開発し基本機能が動作する事を確認した。試作機 は HSC 読み出しシステムへの要求を満たす、小型軽 量、Field Programmable Gate Arrays(FPGA)の採 用、高速データ転送、大容量メモリ搭載、などの特徴 を持つ。FPGA の採用により制御回路変更はプログ ラムをダウンロードする事で行うことが出来る。高 速でデータ転送を行う為にギガビット・イーサネッ トを採用した。製作したネットワーク処理回路によ る、安定したギガビット速度データ転送を確認した。 大容量メモリは PC 用 DDR2-SDRAM モジュールを 採用した。制御回路は開発中であるが基本動作確認 が終了している。

# 2.4.8 国際リニアコライダー用検出器の開 発

現在、世界では超高エネルギー(500GeV以上)の 電子・陽電子リニアコライダー(International Linear Collider)を用いた実験将来計画のための研究開発が 行われている。当研究室では、シリコン技術を駆使し た検出器 Silicon Detector (SiD)を SLAC, Fermilab, ANL などと共同で開発している。さらに、この検出 器に必要な超高磁場(5テスラ)ソレノイドの開発 を KEK の低温グループとともに進めている。

### <報文>

### (原著論文)

- H. Aihara *et al.*, "Status and Upgrade Plans of The Belle Silicon Vertex Detector," Nucl. Instrum. Meth. A 582, 709 (2007).
- [2] Y. Nakahama *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of Time-Dependent CP-Violating Parameters in  $B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$  decays," Phys. Rev. Lett. **100**, 121601 (2008) [arXiv:0712.4234 [hep-ex]].
- [3] T. Tsuboyama *et al.*, "Silicon vertex detector for the KEK Super B factory," Nucl. Instrum. Meth. A 572, 321 (2007).
- [4] J. Wicht *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of B<sub>s</sub> to phi gamma and Search for B<sub>s</sub> to gamma gamma Decays at Belle," Phys. Rev. Lett. **100**, 121801 (2008) [arXiv:0712.2659 [hep-ex]].
- [5] Y. Kawai *et al.*, "Large-aperture hybrid photodetector," Nucl. Instrum. Meth. A 579, 42 (2007).
- [6] S. Stanic *et al.*, "Recent progress in the development of a monolithic active pixel detector for a B factory," Nucl. Instrum. Meth. A 579, 680 (2007).
- [7] V. Balagura *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of  $Ds1(2536)^+ \rightarrow D^+\pi K^+$  and angular decomposition of  $Ds1(2536)^+ \rightarrow D *^+ K_S^0$ ," Phys. Rev. D **77**, 032001 (2008) [arXiv:0709.4184 [hep-ex]].
- [8] C. Z. Yuan *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of e+e- to K+K-J/psi via Initial State Radiation at Belle," Phys. Rev. D 77, 011105 (2008) [arXiv:0709.2565 [hep-ex]].

- [9] G. Pakhlova *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of  $\psi(4415) \rightarrow D\bar{D}_2^*(2460)$  decay using initialstate radiation," Phys. Rev. Lett. **100**, 062001 (2008) [arXiv:0708.3313 [hep-ex]].
- [10] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Search for Lepton Flavor Violating tau Decays into Three Leptons," Phys. Lett. B **660**, 154 (2008) [arXiv:0708.3272 [hep-ex]].
- [11] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Search for  $\bar{B}^0 \to \Lambda_c^+ \Lambda_c^-$  decay at Belle," Phys. Rev. D 77, 051101 (2008) [arXiv:0708.1105 [hep-ex]].
- [12] G. Pakhlova *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the near-threshold  $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}$  cross section using initial-state radiation," Phys. Rev. D 77, 011103 (2008) [arXiv:0708.0082 [hep-ex]].
- [13] O. Tajima *et al.*, "Search for the CP-violating decays  $\Upsilon(4S)B^0\bar{B}^0J/K_S^0 + J/\psi(\eta_c)K_S^0$ ," Phys. Rev. Lett. **99**, 211601 (2007) [arXiv:0707.4336 [hep-ex]].
- [14] X. L. Wang *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of Two Resonant Structures in e+e- to pi+ pipsi(2S) via Initial State Radiation at Belle," Phys. Rev. Lett. **99**, 142002 (2007) [arXiv:0707.3699 [hep-ex]].
- [15] J. Brodzicka *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of a new  $D_s J$  meson in  $B^+ \to D^0 \bar{D}^0 K^+$  decays," Phys. Rev. Lett. **100**, 092001 (2008) [arXiv:0707.3491 [hep-ex]].
- [16] A. Drutskoy *et al.*, "Measurements of exclusive Bs0 decays at the Upsilon(5S) resonance," Phys. Rev. D 76, 012002 (2007).
- [17] C. Z. Yuan *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$  Cross Section via Initial State Radiation at Belle," Phys. Rev. Lett. **99**, 182004 (2007) [arXiv:0707.2541 [hep-ex]].
- [18] K. F. Chen *et al.* [BELLE Collaboration], "Search for  $B \rightarrow h(*)\nu\bar{\nu}$  Decays at Belle," Phys. Rev. Lett. **99**, 221802 (2007) [arXiv:0707.0138 [hep-ex]].
- [19] A. Matyja *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of  $B^0 \rightarrow D^{*-} \tau^+ \nu_{\tau}$  decay at Belle," Phys. Rev. Lett. **99**, 191807 (2007) [arXiv:0706.4429 [hep-ex]].
- [20] J. T. Wei *et al.* [BELLE Collaboration], "Study of the decay mechanism for B+ to p pbar K+ and B+ to p pbar pi+," Phys. Lett. B **659**, 80 (2008) [arXiv:0706.4167 [hep-ex]].
- [21] S. Uehara *et al.* [Belle Collaboration], "Study of charmonia in four-meson final states produced in two-photon collisions," Eur. Phys. J. C 53, 1 (2008) [arXiv:0706.3955 [hep-ex]].
- [22] D. Epifanov *et al.* [Belle Collaboration], "Study of  $\tau \to \pi^- \nu_\tau$  decay at Belle," Phys. Lett. B **654**, 65 (2007) [arXiv:0706.2231 [hep-ex]].
- [23] J. Dalseno et al. [Belle Collaboration], "Measurement of Branching Fraction and Time-Dependent CP Asymmetry Parameters in B0 to D\*+ D\*-Ks Decays," Phys. Rev. D 76, 072004 (2007) [arXiv:0706.2045 [hep-ex]].

- [24] T. Mori *et al.* [Belle Collaboration], "High statistics measurement of the cross sections of gamma gamma to pi+ pi- production," J. Phys. Soc. Jap. **76**, 074102 (2007) [arXiv:0704.3538 [hep-ex]].
- [25] M. Z. Wang *et al.* [Belle Collaboration], "Study of  $B^+ \rightarrow p\bar{\Lambda}\gamma$ ,  $p\bar{\Lambda}\pi^0$  and  $B^0 \rightarrow p\bar{\Lambda}\pi^-$ ," Phys. Rev. D **76**, 052004 (2007) [arXiv:0704.2672 [hep-ex]].
- [26] T. Medvedeva *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of the decay  $\overline{B}^0 \longrightarrow D_s^+ \Lambda \overline{p}$ ," Phys. Rev. D **76**, 051102 (2007) [arXiv:0704.2652 [hep-ex]].
- [27] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], "Measurement of D0-D0bar mixing in D0 to Ks pi+ pi- decays," Phys. Rev. Lett. **99**, 131803 (2007) [arXiv:0704.1000 [hep-ex]].
- [28] Y. T. Tsai *et al.* [BELLE Collaboration], "Search for  $B^0$  to p p-bar, Lambda Lambda-bar and  $B^+$  to p Lambda-bar at Belle," Phys. Rev. D **75**, 111101 (2007) [arXiv:hep-ex/0703048].
- [29] A. Zupanc *et al.*, "Improved measurement of  $\bar{B} \rightarrow D_s^- D^+$  and search for  $B \rightarrow D_s D_s$  at Belle," Phys. Rev. D **75**, 091102 (2007) [arXiv:hep-ex/0703040].
- [30] M. Staric *et al.* [Belle Collaboration], "Evidence for  $D^0 - \overline{D}^0$  Mixing," Phys. Rev. Lett. **98**, 211803 (2007) [arXiv:hep-ex/0703036].
- [31] Y. Miyazaki et al. [BELLE Collaboration], "Search for lepton flavor violating tau- decays into l- eta, l- eta' and l- pi0," Phys. Lett. B 648, 341 (2007) [arXiv:hep-ex/0703009].
- [32] A. Go et al. [Belle Collaboration], "Measurement Of Epr-Type Flavour Entanglement in Upsilon(4s)
  → B0 Anti-B0 Decays," Phys. Rev. Lett. 99, 131802 (2007) [arXiv:quant-ph/0702267].
- [33] S. Fratina *et al.*, "Evidence for CP violation in B0 to D+ D- decays," Phys. Rev. Lett. **98**, 221802 (2007) [arXiv:hep-ex/0702031].
- [34] K. Abe et al. [Belle Collaboration], "Improved measurement of CP-violating parameters in rho+rho- decays," Phys. Rev. D 76, 011104 (2007) [arXiv:hep-ex/0702009].
- [35] C. H. Wang *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of charmless *B* Decays to ηK<sup>\*</sup> and ηρ," Phys. Rev. D **75**, 092005 (2007) [arXiv:hep-ex/0701057].
- [36] J. Schumann *et al.*, "Search for *B* decays into  $\eta' \rho$ ,  $\eta' K^*$ ,  $\eta' \phi$ ,  $\eta' \omega$  and  $\eta' \eta^{(\prime)}$ ," Phys. Rev. D **75**, 092002 (2007) [arXiv:hep-ex/0701046].
- [37] A. Kusaka *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of CP Asymmetry in a Time-Dependent Dalitz Analysis of  $B^0 \rightarrow (\rho \pi)^0$  and a Constraint on the Quark Mixing Matrix Angle  $\phi_2$ ," Phys. Rev. Lett. **98**, 221602 (2007) [arXiv:hep-ex/0701015].

(その他)

[38] 相原博昭:「素粒子物理と融合」学術の動向、2007年 7月号

### <学術講演>

(国際会議)

### 招待講演

- [39] H.Kakuno, "Status and Physics of the T2K experiment," International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics 2007, Sendai, Japan, Sep. 14, 2007.
- [40] N.Hastings, "T2K", Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors 2007, Hamamatsu, Japan, Oct. 3, 2007.
- [41] M. Tanaka: "HPD R&D" Workshop on Next generation Nucleon decay and Neutrino detectors 2007 (NNN07), Oct 2-5,2007, Hamamatsu, Japan
- [42] T. Abe: "R&D status of Readout System for a Large Photocathode HAPD "2007 IEEE Nuclear Science Symposium And Medical Imaging Conference (NSS MIC 2007) Oct 28 - Nov 3 2007, Honolulu, Hawaii USA
- [43] T. Abe: "Challenge to Realize Huge Underground Detector -Water Cherenkov Detector Case-" The 4th International Workshop on Nuclear and Particle Physics at J-PARC (NP08), Mar 5 - Mar 7, Mito, Ibaraki, Japan

### (国内会議)

### 招待講演

 [44] 相原博昭: "Silicon Detector Concept (SiD), "ILC
 シンポジウム、ILC 測定器日本物理学会 第 63 回年 次大会, 近畿大学, 2008 年 3 月 22 日-26 日

### 一般講演

- [45] 中浜優: "Belle 実験での B→KsKs 崩壊における CP の破れの測定,"日本物理学会第 62 回年次大会,(北海 道大学、2007 年 9 月 21 日-24 日)
- [46] 角野秀一: "T2K 実験陽子ビームプロファイルモニ ターの開発,"日本物理学会第62回年次大会,(北海道 大学、2007年9月21日-24日)
- [47] 阿部利徳: "大口径 HAPD の開発,"日本物理学会 第 62 回年次大会,北海道大学,2007 年 9 月 21 日-24 日
- [48] 宮武広直:"デジタル信号処理を用いた大口径 HAPD 用読み出しシステムの開発,"日本物理学会 第62回 年次大会,北海道大学,2007年9月21日-24日
- [49] 阿部利徳: "大口径 HAPD の開発,"日本物理学会第 63 回年次大会,近畿大学,2008 年 3 月 22 日-26 日

### その他

- [50] 相原博昭, "Belle 実験の物理と最新の結果" 第 21 回 仁科加速器センター月例コロキウム、理化学研究所、 平成 19 年 4 月 17 日.
- [51] H. Aihara, "Dark Energy Projects," ICRR/CRC Future Plan Symposium, Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, August 29, 2007

- [52] H. Aihara, "A Critical Look at SiD," 第2回「ILC 測定器研究会」、KEK、平成19年12月4日
- [53] H. Aihara, "Dark Energy Survey," Subaru Advisory Committee HSC Workshop, NAOJ, Jan 29, 2008.
- [54] 相原博昭: "反物質の謎を解く実験" 小林・益川シン ポジウム、日本未来科学館、平成 20 年 3 月 15 日

### 受賞

- [55] 日下暁人:第9回(2007年度)高エネルギー物理学奨 励賞
- [56] 日下暁人:第2回(2008年)日本物理学会若手奨励賞、
- [57] 日下暁人: 第24回(平成19年度)井上研究奨励賞

## 2.5 浅井研究室

本研究室は、素粒子物理国際研究センターと共同 でLHC・ATLAS 実験でのヒッグス粒子や超対称性 の研究並びに、小規模な (tabletop 型) 実験で標準理 論を超えた新しい素粒子現象の探索を行っている。

### 2.5.1 LHC・ATLAS 実験での研究

2008 年の実験開始にあたって、ATLAS グループ は、「Readiness Report」をまとめた。これは、

- 検出器キャリブレーション方法やデータクォリ ティーの確認方法の考案
- 実験データを用いてバックグランド・系統誤差
   を評価する方法を開発

で構成され、「速やかで確実な発見」に向けての重要 な礎となるものである。素粒子物理国際センターと 共同で、この論文作成で中心的な役割を果たしてき た。特に実験初期で重要となる3つの課題、ヒッグ ス粒子、超対称性粒子、余剰次元(ブラックホール) の3つの発見に向けての研究にテーマを絞り、バッ クグラウンド研究と関係する検出器のパフォーマン ス評価(具体的には、mET(横方向消失運動量)の 研究と高いPt(横方向運動量)のキャリプレーション 方法)を中心に件を行った。

### ヒッグス粒子発見へ向けての研究

ヒッグス粒子が140 GeV 軽い場合、 $H \rightarrow \gamma \gamma$  と  $\tau \tau$ の二つのモードが重要な発見モードであると同時 に、前者はヒッグスがスピン0の粒子であることを 示唆し、後者はフェルミオン(特にレプトン)の質量 起源もヒッグス機構であることの重要な証明となる。 この二つのモードに絞って研究を行った。ヒッグス が  $\tau \tau$ に崩壊した場合、 $\tau$ の崩壊でニュートリノ( $\nu$ ) を放出する為、観測した粒子だけを再構成しても情 報が失われている。一般に  $\tau$ の運動量(~50GeV) に比べてその質量(1.77GeV)が小さいので、 $\nu$ も観 測可能な粒子と同じ方向に出ていると近似してよい。 mETを正確に測定することで、 $\nu$ の決定でき、ヒッ グスを再構成することが可能となる。この評価の改 良を行うと同時に、ドレル・ヤン過程からのバック グラウンド事象を除く方法の研究を行い、右図に示 す様に高い発見能力があることを示した。



図 2.5.21: VBF 過程で生成したヒッグス粒子が *ττ* に崩壊した場合の再構成された質量分布

超対称性粒子発見へ向けてのバックグラウンド研究

超対称性粒子事象の特徴は mET であり、信号、 バッググラウンド共に、ピークを作らず比較的似た 形の連続分布である。従ってバックグランドの正し い理解なくしては、超対称性粒子の発見は不可能で ある。実験データを用いて、バックグラウンドを評 価する方法の開発を行い、超対称性粒子発見の3つ の主要なモード(レプトンを含まないモード、一つ 含むモード、二つ含むモード)の全てで、実験デー タから10-20%程度の精度でバックグラウンド を評価する方法を開発した。この研究は、提案から 方法の考案にいたるまで、我々が主体となって行っ た。この方法は、mET の小さな領域(コントロール サンプル)で、主要なバックグラウンド過程(トッ プクォーク生成過程、 $W \rightarrow \ell \nu, Z \rightarrow \nu \nu, \text{QCD}$  過 程)をそれぞれ選択的に選び、mETと無相関な物理 量で外挿して信号領域での mET 分布を評価するも のである。右図は、レプトンを一個含む探索モード でm ET 分布を示す。赤点が我々の考案した方法で 評価したバックバックグラウンド分布であり、斜線 で示す真のバックグラウンド分布を正しく再現して いる。この方法は MC の情報を用いずに、実験初期 (L=0.1-1fb<sup>-1</sup>)のデータからバックグラウンドを評 価することが可能となった。



図 2.5.22: レプトンを1つ含む超対称性探索モード で期待されるバックグラウンドと評価した分布

超対称性探索の鍵となるものは、バックグラウン ドの理解と横方向消失運動量 (mET)の正確な測定で ある。また mET は、上に述べたヒッグス ( $H \rightarrow \tau \tau$ 再構成)にも重要である。一方、横方向消失運動量 (mET)は、全カロリメーターの情報を必要とする為、 実験的に一番難しい測定量であり、実験データをも ちいて、正しく測定されているかの検証が不可欠で ある。実験開始直後に十分な統計が期待できる、ミ ニマムバイアス事象と  $W \rightarrow \ell \nu$  を用いて、mET の スケールと分解能を確認する方法を開発した。右の 図はカロリメータで計測されたエネルギーの総量と 分解の関係を示す。赤が開発した方法で実験的に評 価したものである。トップペアー生成事象の leptonic decay のバックグランドの効果で多少過大評価するこ とが判明した。現在これを評価する方法の研究、並 びにカロリメータの時間情報を用いて、宇宙線など のバックグラウンドを除く研究を行っている。



図 2.5.23:  $W \rightarrow \ell \nu$  を用いて評価したm ET 分解能 と実際の分解能をカロリメータのエネルギー和の関 数で示した分布 Anomaly-Mediated SUSY breaking model での質量再構成

超対称性モデルの中で有力なモデルの一つに Anomaly-Medaited SUSY breaking モデルがある。このモデ ルの特徴は、一番軽いゲージ粒子の超対称性パート ナーが wino である。このモデルのミニマルな場合 と、そうでない場合を LHC で区別できるか否かの 研究を本教室の柳田教授と東北大学・諸井准教授と 共同で行った。本研究室はバックグラウンドと、事 象再構成を行った。スカラー質量がが大きくなり、 gluino pair が主な生成過程になった場合の発見能力 が 1.3TeV までであることを示すと同時に、wino と bino の質量差を再構成出来ることが分かった。

# 2.5.2 小規模実験で探る標準理論を超えた 新しい素粒子現象の探索

LHC の様なエネルギーフロンティア加速器実験 は、標準理論を超えた新しい素粒子現象を直接生成 し、これを観測する謂わば王道の手法である。これ とは対照的に、加速器実験では、到達出来ない超高 精度測定や超高感度な探索によって、標準理論を超 えた新しい素粒子現象を間接的に探る研究も行って いる。テーブルトップの小規模実験装置であるが、 ppmの高精度の測定でQEDの精密検証や10<sup>-8</sup> 程 度の希崩壊現象の探索を行っている。以下のあげる 2つの実験以外に現在、ポジトロニウムを用いたレ プトン系のCPの破れを10<sup>-3</sup>の感度まで探る実験の 準備も行っている。

### オルソポジトロニウムの invisible 崩壊の探索

余剰次元が1TeV 程度の大きさにコンパクト化されている場合、LHC 実験でブラックホールなどが期待されいるが、同時にオルソポジトロニウムが余剰次元に崩壊し、見えなくなる現象が崩壊分岐比10<sup>-7</sup>程度で期待される。ポジトロニウムは、電子とその反物質である陽電子が束縛した準安定的な系であり、スピン1の三重項状態はオルソポジトロニウムと呼ばれ、通常ゆっくりと3体の線に崩壊する。3体への線への崩壊幅が狭いため、希崩壊現象の探索に適している。また電子・陽電子消滅系であるため、綺麗な実験が行うことが出来る。

 $^{22}Na$ 陽電子線源からの陽電子と密度 0.1g/cc のシ リカエアロジェルの電子でポジトロニウムを生成す る。陽電子が放出した際に薄い(100 ミクロン)のプラ スチックシンチレーターを通過する。この光と $^{22}Na$ 核が変化した Ne 核から同時に放出される 1275keV の  $\gamma$ 線でコインシデンスをとりポジトロニウムが生 成(又は生成せずにそのまま電子・陽電子対消滅)し たことをタッグする。崩壊(対消滅)から出てきた  $\gamma$ を CsI, NaI で検出する。ポジトロニウム崩壊と対消 滅あわせて、 $3.6 \times 10^7$ 電子・陽電子事象を測定した時 の  $\gamma$ 線のエネルギー和の分布を下図にしめす。コン プトン散乱して逃げた現象や、一部のエネルギーを 検出器内の不感物質に奪われた為、1022KeVからは ずれた分布になっているが、50KeV以下の invisible な崩壊を示す領域には事象は観測されなかった。オ ルソポジトロニウム分岐比で 6×10<sup>-7</sup>(90%C.L.)の 上限値が得られた。これを余剰次元に焼き直すと、 0.42TeV 相当である。



図 2.5.24: CsI,NaI 検出器で捉えた  $\gamma$  のエネルギー 和の分布

### ポジトロニウム超微細構造の精密測定

ポジトロニウムのうち、スピン1の状態はオルソ ポジトロニウム、スピン0の状態はパラポジトロニ ウムと呼ばれている。スピンースピン相互作用によ リエネルギー準位に差(Hyper Fine Splitting)が生 じる。電子・陽電子は磁気モーメントが大きいので HFSは、水素と較べ約2桁大きく、束縛系QEDを 検証する上で重要な測定量である。また、オルソポ ジトロニウムは光子と同じ量子数である為、仮想光 子と量子的な振動を繰り返している。未知の素粒子 はこの仮想光子を通してHFSの値に効果を及ぼすた め、HFSの精密測定は標準理論を超えた新しい素粒 子現象を探る上でも重要である。

このふたつの効果でポジトロニウム HFS は 203GHz と大きい。近年理論計算の精度が向上し、実験値と理 論値に 10ppm(3.5 $\sigma$ )のズレがあることが判明した。 過去の実験で考慮されていない系統誤差があるか、 新しい素粒子現象が寄与している可能性がある。こ のズレの理解を行うために、過去の実験と全くこと なる 2 つの方法で、HFS の精密測定を行う準備をし ている。

ポジトロニウムが生成されてからの時間を測定する為、陽電子放出からガンマ線検出までの時間情報を記録する。これにより、ポジトロニウム事象を選択的に選び、バックグラウンドである対消滅事象を抑制することが可能になる。同時に、γ線をエネルギー分解能の高いGe半導体検出器で測定し、2γと3γに崩壊する比率を求めることで、物質の効果とポジトロニウムに熱化過程を直接測定することが可能となる。

この方法は、10年前に我々が寿命測定実験の 為に開発し、当時問題だった「オルソポジトロ ニウム寿命問題」を解決するに至った方法であ る。図に示すように、Ge半導体検出器と、高い エネルギー分解能・時間分解能を有する LaBr<sub>3</sub> シンチレーターを用いて、単色511 keV で あると言う条件だけで、2γをタッグすること で統計量を大きく増やすことが可能になる。

この方法と同時に、強力な 203GHz のミリ波源 を開発している。これにより、Zeeman 効果を 用いた間接測定(1)と異なり、直接 HFSを測 定することが可能となる。写真に示すジャイロ トロンをベースにした、高出力(>100W)、 高精度(ppm)のミリ波源の開発を現在行って いる。ミリ波は電波と光の中間的な性質である ため、これまで理学応用はじめあまり開拓され てこなかった領域である。新しいミリ波源の開 発は、オルソーパラの直接遷移を初めての観測 のみならず、他の理学応用も期待されている。



図 2.5.25:  $LaBr_3$  シンチレーターと Ge 半導体検出 器で構成され  $\gamma$  線検出器

### <報文>

(原著論文)

 The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. "Inclusive production of charged hadrons in photonphoton collisions", Phys. Lett. B, 651 92-101,(2007).

- [2] S.Asai, T.Moroi, K,Nishihara, and T.T. Yanagida, "Testing the Anomaly Mediation at the LHC", Phys. Lett. B, 653 81-87,(2007).
- [3] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. "Inclusive jet production in photon-photon collisions at  $\sqrt{s_{ee}}$  from 189 to 209 GeV", Phys. Lett. B, 658 185-192,(2007).
- [4] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. "Bose-Einstein study of positionmomentum correlations of charged pions in hadronic  $Z^0$  decays", Euro. Phys. J. C 52 787-803,(2007).
- [5] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. "Measurement of the  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  cross section and W decay branching fractions at LEP", Euro. Phys. J. C 52 767-785,(2007).
- [6] S.Asai, "Physics at LHC", J. Phys. Soc. Jpn., 76, p.111013 (2007)
- [7] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. "Measurement of  $\alpha_S$  with radiative hadronic events", Euro. Phys. J. C 53 21-39,(2008).

(国内雑誌)

 [8] 浅井祥仁、"LHC 実験始まる: ヒッグス粒子と新粒 子を捕らえる"、日本物理学会誌 62 巻 922-929

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

[9] S.Asai, "New Physics with mET at LHC ", The LHC Early Phase for the ILC, USA, April (2007)

[10] S.Asai, "Precise measurements of positronium decay rate and energy level ", Pbar08, Japan, Feb. (2008)

(国内会議)

日本物理学会:秋季大会:北海道大学

- [11] 山崎高幸, "ATLAS 実験における BG の実験的評価とその系統誤差 1"
- [12] 鈴木拓也, "ATLAS 実験における BG の実験的評 価とその系統誤差 2"
- [13] 秋元銀河, "mSUGRA での探索ストラテジーと発 見能力"
- [14] 岸本圭司, "non-minimal SUGRA model の発 見能力"
- [15] 冨島佑允, "ATLAS 実験におけるタウを用いた超 対称性粒子探索"
- [16] 野本裕史, "ATLAS 検出器を用いた長寿命超対称 性粒子の研究"

一般講演

- [17] 大川英希, "ATLAS 検出器における Missing ET のオフラインモニターの開発とコミッショニング"
- [18] 兼田充, "オルソポジトロニウムの稀崩壊を用いた余 剰次元探索実験"
- [19] 西原一幸, "o-Ps を用いた CP の破れの探索 実験 概要および装置の製作 - "
- [20] 東裕也, "o-Psを用いた CP の破れの探索 データの取得系の製作 "

日本物理学会:春季大会:近畿大学

- [21] 兼田充, "オルソポジトロニウムの稀崩壊を用いた余 剰次元探索実験"
- [22] 西原一幸, "o-Ps を用いた CP の破れの探索 プロ トタイプ装置での実験結果 - "
- [23] 山崎高幸, "o-Ps を用いた CP の破れの探索 実機 製作 - "
- [24] 秋元銀河, "ポジトロニウム 超微細構造の精密測定 I (熱化問題と磁場)"
- [25] 石田明, "ポジトロニウム 超微細構造の精密測定 II (ガンマ線検出器の設計)"
- [26] 鈴木拓也, "ATLAS 実験における VBF rapidity gap の実験的評価"
- [27] 寺師弘二, "ATLAS 実験におけるジェット及び消失 横運動量測定のパフォーマンス"
- [28] 大川英希, "ATLAS 検出器における宇宙線データ を用いたカロリメータのコミッショニング"
- [29] 東裕也, "ATLAS 検出器を用いた長寿命荷電粒子 やキンクトラックの研究"

### 招待講演

- [30] 浅井祥仁, "LHC と宇宙物理",研究会「宇宙初期 における時空と物質の進化」,東京大学,5月(2007)
- (セミナー)
- [31] 浅井祥仁, "LHC が拓く TeV 領域の物理",東京大 学・駒場,7月 (2007)

# 3 物性理論

## 3.1 青木研究室

青木研では一貫して、「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 主眼に研究を行っている。これらの現象では、電子 相関(電子間斥力相互作用のために生じる量子効果) により、ゲージ対称性が自発的に破れる。一方、面 白い物質構造から面白い物性物理を探ったり物質設 計を行うことを、もう一本の柱としている。

### 3.1.1 超伝導

非連結フェルミ面における電子間斥力からの超伝導

高温超伝導銅酸化物の模型と考えられる斥力 Hubbard 模型は、スピン揺らぎ媒介によりO(0.01t)の転 移温度 $T_C$  ( $t \sim I$ ンド幅  $\sim 10000$  K)を持つ超伝導 をもつと考えられ、銅酸化物の $T_C \sim 100$ Kと整合す るが、 $T_C$  がtから二桁落ちるという意味では「低温 超伝導」である。この主因は、斥力からの超伝導で は Cooper 対は異方的になり、ギャップ関数が node をもつためである。これを、フェルミ面形状やバン ド分散を上手くとることにより克服する可能性につ いて様々な検討を行っている[14, 27]。また、フェル ミ面形状やバンド分散を取り入れられる強力な方法 として、高島、有田(理研、現在東大工)、黒木(電 通大)は汎関数繰り込み群法を整備し、適用し始め た[21, 31]。

### 鉄化合物における超伝導

2008 年になって、細野(東工大)により、鉄の砒 化物 (F-doped LaOFeAs) において 30K 級の  $T_C$  を もつ超伝導が発見され、その後圧力下等での  $T_C$  の上 昇も報告されている。銅酸化物に対比されるべき新 しいカテゴリーの超伝導体であり、特に鉄という意 外な元素の化合物における高温超伝導という点が興 味深い。黒木、大成(名大)、有田、臼井(電通大) 田仲(名大)、紺谷(名大)と青木は、この理論の 最初となるものの一つを提出した。第一原理電子状 態計算から出発し、downfolding と呼ばれる方法に より、多体の tight-binding 模型に落とし、RPA に より Eliashberg 方程式を解析することにより、超伝 導のペアリング対称性を決定した。結果は、(a) フェ ルミ面は二組のポケット  $\alpha, \beta$  からなる非連結フェル ミ面である、(b)downfold された模型は鉄の 5 個の d 軌道全てを含む 5-band model となる、(c) 複数組ポ ケットの間に、複数の nesting があり、これに伴いペ アリング対称性は、 $\alpha, \beta$  ポケット間は非連結性を利 用した拡張 s であるが、 $\beta$  ポケット内にも節をもつ、 という特徴的なものである。



 $\boxtimes$  3.1.1: A new class of iron-oxypnictide superconductors (LaO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>FeAs) recently discovered by Hosono's group. Edge shared tetrahedra represent the FeAs layer, which alternates with LaO layer.

## 電子・電子斥力と電子・フォノン相互作用が共存す る系での超伝導

強い電子・フォノン相互作用が強い電子・電子相互 作用と共存する系は、様々な相の競合が期待され興味 深いだけでなく、アルカリ金属をドープしたフラレ ン超伝導体などで実現しており、Hubbard-Holstein 模型が調べられてきた。電子間斥力とフォノン媒介 引力とが拮抗する場合に興味がもたれるが、電子間 相互作用 (U)、フォノン・エネルギー( $\hbar\omega$ )、電子フォ ノン相互作用( $\lambda$ )の三者が同程度の場合を扱うのは、 adiabatic近似などの極限操作が許されず、困難であっ た。そこで手塚(東工大、現在東大理)、有田、青木 は、Hubbard-Holstein 模型を、密度行列繰り込み群 (DMRG)を用いて解析した [1]。手塚による DMRG における新しい方法 [3]を活用して、( $U, \hbar\omega, \lambda$ )の パラメータ空間における相図を実際求めた(図??。 SDW 相(電子・電子由来)と CDW 相(電子・フォ ノン由来)の中間に、電子密度を変えたり結晶構造 を変えると超伝導ペアリングが支配的になる領域が 生じることが示された。



 $\boxtimes$  3.1.2: Phase diagram for the half-filled Hubbard-Holstein model in the parameter space of U (electron-electron repulsion),  $\omega_0$  (phonon frequency) and  $\lambda$  (electron-phonon coupling) [1].

### 3.1.2 強磁性

### 多軌道系における金属強磁性

遷移金属酸化物のような強相関電子系を考えると き、スピンや電荷とともに重要になり得るのが軌道 の自由度である。興味は多軌道に特有な交換相互作 用(Hund 結合)が磁性、超伝導に与える効果であ る。特に、Fe、Co、Ni に代表される遷移金属の遍歴 強磁性の発現機構の研究は、長い歴史をもつが、軌 道自由度を考慮した電子相関の取り扱いの難しさか ら、Hund 結合と結晶構造 (Ni では fcc) のどちらが 遍歴強磁性に本質的かという点が不明であった。酒 井(現在本学工)、有田(理研、現在本学工)は、動 的平均場近似 (DMFT) に基づいて格子構造と軌道自 由度を同時に取り入れることで、金属強磁性を調べた[2]。我々の開発した、スピン SU(2) 対称性を保った多軌道 Hubbard 模型の扱いを可能にするアルゴリ ズム ( DMFT の Monte Calro 法 + 摂動展開 QMC 解 法)を用いた。結果として、Niに対応する電子密度に おいても多軌道効果により、現実的な大きさの Hund 結合で金属強磁性が有利化されることがわかった。帯 磁率の電子密度依存性は、この強磁性が Stoner 描像 とは異なる電子相関効果であることを示唆する。

### 非磁性元素系における遍歴強磁性の物質設計

非磁性元素からなる物質で強磁性体が作れるかと いう問題は、電子相関の基本的なチャレンジといえ る。平坦なバンドをもつ格子の上の斥力 Hubbard 模 型においては、或る条件が満たされた場合強磁性が 実現することが Mielke や田崎によって厳密に証明さ れている。有田、諏訪(日立基礎研)、黒木、青木は、 この条件を満たさせ易いのは奇数員環からなる有機 高分子であろうという観点から、局所スピン密度第 一原理計算と、Hubbard 模型計算の両面建てで、新 有機物(五員環高分子 polyaminotriazole) および関 連物質が合成できれば平坦バンドが実現し、適当な 電子密度において強磁性が実現する可能性を指摘し ていた。この物質は本学化学教室の西原研究室にお いて、現在オリゴマーまでの合成に成功し、物性を 測定中である [32]。

### 3.1.3 炭素系の物性

### グラフェン (単原子層グラファイト)の物理

最近、原子一層のグラファイト (グラフェン) にお ける特異な整数量子ホール効果が実験的に観測され、 興味を集めている。蜂の巣格子においては、質量ゼ ロの Dirac 粒子と同じバンド分散をもつために、様々 な興味深い物理現象が期待される [17,18]。初貝(本 学工、現在筑波大)、福井(茨城大)、青木は、グラ フェン量子ホール効果のトポロジカルな面に注目し、 以下を示した [6, 7]: (a) massless Dirac 粒子は、蜂 の巣格子に特有ではなく、diagonal transfer t'を導 入しても特異量子ホール効果は robust に存在し続け る。(b) 蜂の巣格子では、Dirac 的な分散は Brillouin 帯 corner 近傍のみに有るが、特異量子ホール効果  $(\sigma_{xy} = (2N+1)(e^2/h), N:$ 整数) は有限のエネル ギー領域 (van Hove 特異点) まで続く。(c) 通常の量 子ホール効果では、バルク・トポロジカル量子数が エッジ・トポロジカル量子数と一致するためにバル ク、エッジどちらでも等しい量子ホール伝導度となる ことが示されているが、蜂の巣格子の特異量子ホー ル効果においても、この「バルク-エッジ対応」が成 立している。

このエッジ状態に対して、有川(筑波大物理)初 貝、青木は、数値計算により求め、トポロジカルな 観点やSTM 観察の観点から議論した。[37]

グラフェンは、通常 tight-binding 模型で記述さ れ、磁場は Peierls 位相として入れる。この方法で は、ベクトル・ポテンシャル A に線形な効果以上の A<sup>2</sup>の効果(反磁性シフトと波動関数収縮)は無視さ れるので、特にグラフェン系のようなゼロギャップ系 でこのアプローチが妥当か否かは自明ではない。中 島(東北大理)と青木は,原子ポテンシャルを蜂の巣 状に置いた厳密に解けるモデルを用いて,有効質量 や Peierls 位相に依らない電子状態を求めた[10,33]。 これにより、tight-binding 模型に依らなくとも質量 ゼロの Dirac 的な分散が生じること、強磁場中での ランダウ準位は tight-binding 模型では縮退するが、 これが分裂することを示した。

グラフェンにおけるランダウ準位レーザー

グラフェンにおけるディラック的分散を反映して、 通常は等間隔なランダウ準位が非等間隔 ( $\propto \sqrt{N}$ ) と なり、特異な量子ホール効果の舞台となるが、最近

分光測定も行われて非等間隔なランダウ準位が直接 観測された。一方、通常の量子ホール系では、非平衡 状態下での発光が観測されており、青木により1980 年代に非平衡における「ランダウ準位レーザー」の 可能性が提案されたが、等間隔ランダウ準位のため に実現が困難であった。このため、森本、初貝、青木 は、グラフェンの非等間隔ランダウ準位が反転分布 を作るのに有利であるというアイディアの元に、磁 場中の massless Dirac 粒子の光学的性質を理論的に 調べた [23, 24, 35]。不純物存在下でのグリーン関数 を求め、線形応答理論により光学伝導度を計算した。 適当な不純物濃度では、 $N = 0, \pm 1$ 間のランダウ ギャップ間で反転分布が実現し発光が観測され易く なることが期待される。発光を議論する際に重要な 緩和過程を考慮しても、グラフェンでは自然放出が 効率的に起こり発光に有利となる。

THz 領域における ac ホール効果

量子ホール系では静的ホール伝導度が量子化され るが、森本、初貝、青木は、光学ホール伝導度(ac Hall conductivity、数Tの磁場下ではTHz域)がど うなるかに着目し、通常の量子ホール系およびグラ フェンに対して光学ホール伝導度を計算し、ホール・ プラトーが意外にもac領域でも残ることを見出した [36]。近年のTHz分光の実験的技術の進展により、 ホール角等によって測定されることが期待される。

カーボン ナノチューブにおける共鳴伝導と軌道磁性

グラフェンを筒状にした単層カーボンナノチューブ(CNT)の非平衡状態への興味から、辻、高城(現 在物性研)、青木は、CNTに電極を接続して有限の バイアス電圧を課したときの、非平衡状態での電流 を非平衡グリーン関数を用いて計算した[4,8,22]。 その結果、CNTの円周方向に巨大なループ電流が流 れ、それに伴い大きな軌道磁性が生じることを見出 した。CNTのバンド構造において(円周の時計周り) と反時計周りの伝播に対応した)2重縮退があり、こ の準位と共鳴した場合に(一種のFano効果により) 大きなループ電流および軌道磁性が発生する。本年 度は、この系に外部磁場を加えると準位交差が系統 的に起き、交差する度にゼロ磁場の場合と同様な巨 大ループ電流が発生することを示した[38]。

### **3.1.4** 強磁場中の電子相関

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次元に閉じこめ強磁場を加えた場合に発 現し、2次元空間に特有な Chern-Simons ゲージ場 理論も展開されている。通常の電子相関においては、 相互作用と運動エネルギーの競争になるのとは対照 的に、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凍結しており、特異な「強相関 極限」にあるため多彩な量子相転移が起きる。 初貝、福井、青木は本年度、上記のグラフェンの 整数量子ホール系の研究の発展として、この系で電 子相関を考慮した場合の量子相を調べた [9, 34]。そ の結果、ゼロ番目のランダウ準位が多体効果のため に bond ordering をもった状態となるために分裂し、 この状態はカイラル対称性は破らないが3重縮退し ているためにドメイン構造とそれに伴うトポロジカ ルな状態が発生し、この絡みにより量子液体状態に なることが期待されることを示した。



 $\boxtimes$  3.1.3: A bond-ordering pattern with a domain structure for graphene in a strong magnetic field. The bond ordering is represented by the thickness of the bonds, while the charges around the boundary is depicted by circles [9].

### 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が最近可能になっている が、ここで電子は磁気長 (10 T の磁場で~80 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)、青木等は提案してきた。 最近、樽茶グループ(本学工)の実験において励起 スペクトルの詳細が観測され始めた。Maksym、青 木は、西、羽田野、樽茶、Austing (カナダ National Research Council)、Kouwenhoven (Delft 大)とい う実験家との共同研究として、電子分子理論の予言 する魔法数構造が、スピン自由度まで含めて実験結 果と一致することを示した。[11] 電子相関効果は量 子ドット模型の詳細に敏感であるため、本年度は、こ の基礎となる量子ドットの精密な理論的モデルを構 成し、実験との非常に良い一致を得た。

# 3.1.5 強相関電子系における非平衡・非線 形現象

モット絶縁体のような強相関電子系における非平 衡・非線形の現象は、開拓の余地の大きい興味深い問 題である。強電場中ではモット絶縁体は絶縁破壊を起 こすが、岡、有田、青木は、そこでの多体状態の間の 非断熱的量子遷移に対する描像を与えた [5, 20, 30]。



 $\boxtimes$  3.1.4: Schematic experimental configuration for a strongly correlated electron system in intense fields with some carriers created [5].

### 強レーザー光下での強相関電子系の振る舞い

一次元モット絶縁体に対して強力なレーザー光を 照射すると金属状態が生じることが、ポンプ・プロー プ実験によって知られている。岡、青木はこの金属 状態の特性をより深く調べるために、密度行列繰り 込み群を用いて非平衡定常状態における光学相関関 数を計算した。その結果、金属状態は電子相関によっ て繰り込まれた線形分散を持つ集団励起を示し、朝 永-Luttinger 液体に似ることが分かった [25, 40]。

さらに、マンガン系などにおける光誘起絶縁体・金 属転移を理解することを目的として、辻、岡、青木は 非平衡動的平均場理論をFloquetの方法と組み合わ せる新方法を提案した[41]。この方法では、レーザー 光やdc電場などのもつ時間的な周期性を利用し、非 常に効率よく高い精度で非平衡系の電子状態を計算 することが出来る。この手法をFalicov-Kimball モデ ルに適用することにより、電子状態がモット絶縁体 とWarnier-Stark 格子の間を転移する様子を調べた。 そして、実験的にも見られているギャップ内の非平衡 電子状態の出現についての解析を行った。辻は、こ の成果を修士論文にまとめた[45]。

### 強電場下の電荷秩序系での非平衡過程

強相関電子系の励起状態の時間発展を理解するために、岡、今村(生産研)は、熱浴と接触した sine-Gordon 模型の電場下での振舞いを調べた。その結

果、I-V 特性が冪的になり、電流揺らぎの時間依存性 から、非平衡統計力学系において知られている KPZ ユニバーサリティに属することが確認された。この 現象が、強磁性体におけるドメイン壁の電流による 駆動現象においても実現していることも予言した。

### 実時間量子モンテカルロ法の構築

岡、Werner、Millis (Columbia 大) は強相関系の 非平衡相転移現象を調べる方法として有力視される 非平衡動的平均場理論の構築に必要な実時間量子モ ンテカルロ法を調べ、特に Hirsch-Fye 法、および連 続時間モンテカルロ法が非平衡下でも扱えるように Keldysh グリーン関数を用いて拡張した。負符号問 題をある程度緩和することに成功し、バイアス下の 非平衡量子ドットの非線形伝導について解析した。

# 3.1.6 光格子中の冷却原子の超流動・Mott 絶縁体相転移ダイナミックス

光格子にトラップされた冷却原子系は、超流動・ Mott 絶縁体 (SF-MI) 転移が観測されて以来、興味 をひいている。この系は、~100 ms という遅い時間 スケールで発展するために、相転移ダイナミックス などの非平衡現象を観測するのに適している。堀口 (現在 NEC)、岡、青木は、2次元正方格子 Bose-Hubbard 模型に対し、Gutzwiller アプローチの下で 時間依存 Schrödinger 方程式を数値的に解くことに よって、SF-MI 相転移ダイナミックスを調べた [42]。 相互作用  $U/t_{
m hop}$  を急変 (クエンチ) させると、 $({
m i})$  量 子ゆらぎにより秩序変数の初期位相が選択され、(ii) 振幅が指数関数的に成長しながら位相は空間的なド メイン構造を作り、(iii) Josephson 電流によりドメ イン構造が壊れ、この過程で Kibble-Zurek 機構 [2] により位相欠陥 (2次元系では渦) が発生する。(4) 最 終的には、密度ゆらぎ・超流動密度ゆらぎの緩和と 渦の対消滅により安定状態へ遷移する。このような 「強相関系の量子相転移における Kibble-Zurek 機構」 を、相転移点付近での位相の winding 数も含め議論 した。堀口は、この成果を修士論文にまとめた [44]。

### 3.1.7 周期的ナノ構造の電子状態

### アルカリ金属吸蔵ゼオライト— supercrystal

ゼオライトは、(ケージと呼ばれる)隙間の多い 結晶構造をもつが、アルカリ金属等のクラスターを ケージ中に吸蔵でき、新奇な物性が期待される。実 際、野末(阪大)により、単純金属(K)を吸蔵したゼ オライトでの強磁性が約10年前に実験的に発見され たが、その機構の詳細は明らかでなかった。興味は、 (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・ケージに閉じ込められた状態 (\*superatom")の並びの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ほ ど強相関電子系か、である。青木、有田は、野末等と ともに、この系の第一原理計算を初めて行い、フェル ミ準位近傍の電子構造は単純な tight-binding 模型で 驚くほど良くフィットでき、系全体を superatom の 集合 ("supercrystal") と見なす描像 (図??) を支持す ること、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強磁性を含む強相関領域にあ り多彩な多体効果や物質設計を期待できることを示 した [15]。

### 周期的極小曲面上の電子

青木等は、C<sub>60</sub> ゼオライトのような系を、周期的 極小曲面上の電子の量子力学として考えてきた。本 年度、森本、岡、青木は、この理論的枠組みにベク トル・ポテンシャルを加え定式化し、螺旋面に外部 磁場を加えた場合に、量子ホール効果類似の特徴的 な効果が起きることを示した [39]。

### 3.1.8 その他

総合報告として、青木は、強相関電子系に対する 大規模数値計算 [43]、強相関電子系と物質設計 [26]、 量子ホール効果 [19]、異常ホール効果 [29]、量子臨界 現象 [28]、超伝導 100 周年における新しい物質科学 の創成 [13]、物理学における位相 [16]、素粒子物理 学と物性物理学の対話 [12]、等のテーマで講演、解 説を行った。

<報文>

### (原著論文)

- Masaki Tezuka, Ryotaro Arita and Hideo Aoki: Phase diagram for the half-filled one-dimensional Hubbard-Holstein model, *Phys. Rev. B* 76, 155114 (2007).
- [2] Shiro Sakai, Ryotaro Arita and Hideo Aoki: Itinerant ferromagnetism in the multiorbital Hubbard model — a dynamical mean-field study, *Phys. Rev. Lett.* 99, 216402 (2007).
- [3] M. Tezuka: An improved initialization procedure for the density-matrix renormalization group, J. Phys. Soc. Jpn, 76, 053001 (2007).
- [4] Naoto Tsuji, Shigehiro Takajo and Hideo Aoki: Large orbital magnetic moments in carbon nanotubes generated by resonant transport, *Phys. Rev. B* **75**, 153406 (2007).

(Reviews)

[5] Takashi Oka and Hideo Aoki: Nonequilibrium quantum breakdown in a strongly correlated electron system, *Quantum Percolation and Breakdown* (*Lecture Notes in Physics*) (Springer Verlag), to be published (arXiv:0803.0422).

### (国際会議録(招待講演))

- [6] Y. Hatsugai, T. Fukui and H. Aoki: Topological aspects of graphene Dirac fermions and the bulkedge correspondence in magnetic fields, *Proc. Int. Conf. on Graphene*, Dresden, 2006 [*Eur. Phys. J. Special Topics* 148, 133-141 (2007)].
- [7] Hideo Aoki, Takahiro Fukui and Yasuhiro Hatsugai: Topological aspects of quantum Hall effect in graphene, *Int. J. Modern Phys. B* **21**, 1133 (2007).
- [8] Naoto Tsuji, Shigehiro Takajo and Hideo Aoki: Large magnetic moments generated from loop currents in carbon nanotube attached to electrodes a theoretical picture, *Int. J. Modern Phys. B* 21, 1198 (2007).

### (国際会議録(一般発表))

- [9] Yasuhiro Hatsugai, Takahiro Fukui and Hideo Aoki: Topological low-energy modes in N = 0Landau levels of graphene — a possibility of a quantum-liquid ground state, *Proc. 17th Int. Conf.* on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, Genova, 15-20 July 2007 [*Physica E* 40, 1530 (2008)].
- [10] Tatsuya Nakajima and Hideo Aoki: Landau quantization of graphene including diamagnetic shift and shrinkage of wave function, Proc. 17th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, Genova, 15-20 July 2007 [Physica E 40, 1354 (2008)].
- [11] Peter A. Maksym, Ryotaro Arita and Hideo Aoki: Spin configuration in the electron molecule in fewelectron quantum dots in strong magnetic fields — superposition of multiple configurations, *Int. J. Modern Phys. B* **21**, 1643 (2007).

### (国内雑誌)

- [12] 青木秀夫、大栗博司:物性と素粒子 多様性と統一の物理的世界像の対話、固体物理 42,505 (2007)。
- [13] 青木秀夫、上田正仁、福山寛:新しい物質科学の創 成-プレイクスルーに向けて、科学 78, 220 (2008)。
- [14] 青木秀夫: 銅酸化物は超えられるか 理論の立場 から、パリティ、2008 年 5 月号、p.30。
- [15] 有田亮太郎、青木秀夫、野末泰夫:アルカリ金属を吸 蔵したゼオライトの電子状態 — 「超原子」結晶、日 本物理学会誌 62, 694 (2007)。
- [16] 青木秀夫:物理学における位相、数理科学 2007 年 6 月号、p.5。

< 学術発表 >

(国際会議)

### 招待講演 (会議録掲載以外)

[17] Hideo Aoki: Graphene — one-body and manybody physics, *Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials*, Gifu, 30 Oct 2007.

- [18] Hideo Aoki: Physics of graphene, Yukawa Int. Seminar "Interaction and Nanostructural Effects in Low-Dimensional Systems", Kyoto, 5-30 Nov. 2007.
- [19] Hideo Aoki: Linear-response theory for the quantum Hall effect — past, present and future, Int. Symposium on Linear Response Theory in Commemoration of its 50th Anniversary, Tokyo, 6 Nov 2007.
- [20] Takashi Oka: Nonequilibrium phenomena in strongly correlated electron systems Int. Symposium on Linear Response Theory in Commemoration of its 50th Anniversary, Tokyo, 6 Nov 2007.

### 一般講演(会議録掲載以外)

- [21] Hirokazu Takashima, Ryotaro Arita, Kazuhiko Kuroki, Hideo Aoki: An improved algorithm for the functional renormalization group and its application to two-dimensional Hubbard model, *Ameri*can Physical Society March Meeting, New Orleans, Mar. 2008.
- [22] Naoto Tsuji, Shigehiro Takajo, and Hideo Aoki: Giant loop current in carbon nanotubes and its response against magnetic fields, Int. Symposium on Linear Response Theory in Commemoration of its 50th Anniversary, Tokyo, Nov. 2007.
- [23] Takahiro Morimoto, Yasuhiro Hatsugai, Hideo Aoki: Cyclotron emission and radiation in graphen, Int. Symposium on Linear Response Theory in Commemoration of its 50th Anniversary, Tokyo, Nov. 2007.
- [24] Takahiro Morimoto, Yasuhiro Hatsugai, Hideo Aoki: Cyclotron radiation and emission in graphene, American Physical Society March Meeting, New Orleans, Mar. 2008.
- [25] Takashi Oka: Photo-induced Metallic States in a Mott Insulator, American Physical Society March Meeting, New Orleans, Mar. 2008.

### (国内会議)

### 招待講演

- [26] 青木秀夫: 強相関電子系と物質設計 (21COE シンポ ジウム「極限量子系とその対称性」、東大、14 Nov, 2007)。
- [27] 青木秀夫:「エキゾチック超伝導」領域レビュー(「超 伝導が拓く物性科学の最前線」研究会、東京,7 Dec 2007)。
- [28] 青木秀夫:量子臨界現象 1体系から多体系まで (「複雑系の構造とそのダイナミクス」シンポジウム、 札幌、3 Dec 2007)。
- [29] 青木秀夫:異常ホール効果と nontrivial な磁気構造 -はじめに(日本物理学会、大阪、22-26 Mar 2008)。
- [30] 岡隆史: 強相関電子系における非平衡現象 (熱場の量子論とその応用、京都、5-7, Sept 2007)。

一般発表

- [31] 高島宏和,有田亮太郎,黒木和彦,青木秀夫:汎関数 繰り込み群の高速化アルゴリズムの開発:2次元斥力 Hubbard 模型への適用(日本物理学会、大阪、22-26 Mar 2008)。
- [32] 大嶋紀一、浜田剛志、長谷川雄大、山野井慶徳、西原 寛、有田亮太郎、諏訪雄二、黒木和彦、青木秀夫:平坦 バンド強磁性体として分子設計されたオリゴ[1-(N,N-ジメチルアミノ)ピロール]の電気化学的・磁気的性 質(日本化学会、春の学会、2007)。
- [33] 中島龍也、青木秀夫:有効質量近似によらないグラ フェンのランダウ量子化(日本物理学会、札幌、21-24 Sept 2007)。
- [34] 初貝安弘、福井隆裕、青木秀夫: グラフェンの N = 0 ランダウ準位におけるボンド秩序形成とトポロジカ ル励起(日本物理学会、札幌、21-24 Sept 2007)。
- [35] 森本高裕、初貝安弘、青木秀夫:磁場中グラフェンに おけるサイクロトロン発光の理論(日本物理学会、札 幌、21-24 Sept 2007)。
- [36] 森本高裕,初貝安弘,青木秀夫:量子ホール系の THz 領域における ac ホール伝導度の理論的提案(日本物 理学会、大阪、22-26 Mar 2008)。
- [37] 有川晃弘、初貝安弘、青木秀夫:磁場中グラフェンの端 状態の理論(日本物理学会、大阪、22-26 Mar 2008)。
- [38] 辻直人、高城重宏、青木秀夫:カーボンナノチューブ におけるループ電流と外部磁場に対する応答(日本 物理学会、札幌、21-24 Sept 2007)。
- [39] 森本高裕、岡隆史、青木秀夫:螺旋面上の量子ホール 効果(日本物理学会、札幌、21-24 Sept 2007)。
- [40] 岡隆史: 強力な AC 電場中のモット絶縁体の光学応 答(日本物理学会、大阪、22-26 Mar 2008)。
- [41] 辻直人、岡隆史、青木秀夫:光誘起絶縁体金属転移 の動的平均場理論による解析(日本物理学会、大阪、 22-26 Mar 2008)。
- [42] 堀口直也, 岡隆史, 青木秀夫: 光格子中の BEC の相転 移ダイナミックス(日本物理学会、大阪、22-26 Mar 2008)。
- [43] 青木秀夫: 強相関電子系に対する大規模数値計算 Hund 結合系、Holstein-Hubbard 系(物性研短期研 究会「計算物性物理学の進展」、2 Nov 2007)。

(学位論文)

- [44] 堀口直也: 光格子中の冷却ボース原子系の相転移ダイ ナミックスの理論 (修士論文, 2008 年1月)。
- [45] Naoto Tsuji: Theory of photoinduced metalinsulator transition in correlated electron systems (修士論文, 2008 年 1 月)。

## 3.2 宮下研究室

統計力学・物性基礎論を理論的に研究している。特 に、相転移・臨界現象や秩序形成に伴う非平衡現象 や、強く相互作用している量子系の基底状態の特徴 や時間的に変動する外場のもとでの量子ダイナミッ クスなどについて研究を進めている。

昨年度は、量子状態の外部からの制御方法に関す る問題として、ポテンシャルに捕捉された量子粒子 の移送問題や、遍歴性のある量子粒子系での磁性や そのダイナミックス、量子固体など新奇な量子状態、 量子アニーリング、さらには伝導、輸送現象に関す る一般的理論構築、変動する外場のもとでのダイナ ミックスなどに関して研究を進めた。また、協力現象 の統計力学に関しては、構成要素が体積変化をする 場合の新しいタイプの相転移・臨界現象として、スピ ンクロスオーバー系の秩序形成、相変化ダイナミッ クスや、相互作用が競合するフラストート系での遅 い緩和現象などを研究した。

# 3.2.1 新奇な量子状態、励起状態、量子ダ イナミックスの研究

強く相互作用する量子系では、系のパラメターに よって異なる巨視的状態を示し、その変化は量子相 転移と呼ばれている。そこでは、古典系では見られな い新奇な状態が見られる。それらの発見とその機構 の解明を進めている。量子系でのコヒーレントな運 動は、古典的にはないいろいろな特徴を備えており、 その積極的制御は新しい情報操作(量子情報)にお いて重要な役割をする。われわれはこれまで、動的な 外場に対する量子力学的応答をミクロな立場から研 究し、離散準位系の状態変化におけるLandau-Zener 理論の役割、またそこでの散逸効果などを調べてき た。[48] 量子ダイナミックスの機構、制御に関する 統一的な理論的基礎付けを進めるため、JSTのクレ ストプロジェクトとして「量子多体協力現象の解明 と制御」を進めている。

### 超固体

量子シミュレーションの対象としても興味深い、対 角秩序(固体成分)と非対角秩序(超流動成分)の共 存に関する超固体について研究を進めている。山本 は、超固体の存在条件に関して、相互作用の競合の効 果、一つのサイトに複数個の粒子が入ることのでき るソフトコア効果の役割について詳しく調べた。ま た、これまで研究が進んでいなかった有限温度での 固体化と超流動化の逐次相転移を確率的級数展開の 方法を用いた数値シミュレーションと有限温度で超 固体状態を取り扱うことのできる分子場近似によっ て明らかにし、そこで重要になる両秩序間の競合の 機構について明らかにした。[45]

## 量子スピン系:励起、ギャップ

量子スピン系における新しいタイプの量子現象に ついても研究を進めている。スピンの大きさが交替 的に変化する量子スピン系では、基底状態からの励 起構造がサイズによって変化する現象を見いだし、 その変化の様子を明らかにするとともに、有限温度 での特徴を明らかにした。[14] この研究は、インド (バンガロール、ネール研究所)のパチ教授のグルー プとの共同研究である。 グラファイトに吸着したヘリウム3の物性が、本 学科の福山研究室で進めれている。そこで、吸着密度 による構造や磁性の相構造が調べられているが、平 野は、吸着面上の余剰粒子の運動において、吸着面 を構成している粒子と余剰粒子が量子力学的に区別 できない同種粒子からなっていることに注目し、運 動形態を表すハミルトニアン、また吸着面との相互 作用によって生じる余剰粒子間の相互作用などにつ いて研究を進めた。[31]

外場によるエネルギーギャップ操作も重要な課題 である。昨年に引き続き、肘井は、ミクロな磁性クラ スターでは横磁場によって生じる擬交差エネルギー ギャップの機構を研究し、振動的な磁場をかけた場 合のフロケ準位の構造を調べ、掃引がステップ状に 行われる場合の特徴を明らかにした。[58]

横磁場イジング模型での横磁場大きさに伴う秩序・ 無秩序相転移や、磁場の掃引によって磁化が示すダ イナミックスなどについても研究を進めている。こ れまで、比較的遅い磁場掃引のもとでの非断熱遷移 (ランダウ・ゼナー遷移)の効果を調べてきたが、協 力現象によって量子相転移を引き起こす1次元横磁 場イジング模型で速い掃引の場合に系が見せる量子 ヒステリシス現象や、スピンの大きさに転移点がど のように依存するかについて調べている。この研究 は、オランダのグローニンゲン大学のドラーツ博士 のグループ、グルノーブルのルイ・ネール研究所の バーバラ博士、および物理工学科と藤堂グループと の共同研究である。[48]

量子系の集団運動であるスピン波の伝搬に関する 直接量子ダイナミックス法による研究を行い、磁壁 での散乱の様子やドメイン構造自身のダイナミック スの研究を行った。[5] イジング異方的な一次元量子 スピン系では境界条件を反平行にとると有限の幅を もつドメイン壁が現れることが知られている。この ようなドメイン壁が動的に安定なこと、また、そこ にスピン波を入射した場合の様子を巨大行列で表さ れるシュレディンガー方程式を直接解くことで調 た。また、量子相関を持つ系での観測問題に関する 考察を行い、古典系においても見かけ上量子相関と 同様な観測結果が得られうることを具体的な例で示 した。[11] これらの研究はオランダ(グローニンゲ ン大学)のグループとの共同研究である。

### ポテンシャルによる粒子捕捉、運搬の機構

量子操作の具体的な対象として、量子状態の制御 に関してポテンシャルによる量子粒子の移送に関す る研究を行った。レーザー冷却した原子系の光格子 や、超音波などで周期的なポテンシャルを課した半 導体などにトラップした粒子を、トラップポテンシャ ルの運動によって生じる量子効果は興味深い問題で ある。特に、ポテンシャルエネルギーが異なる領域 の間得の粒子移送は、移動による非断熱遷移とトン ネル効果による逃散現象の競合のため最適な移動速 度があることを具体的に示した。[10] また、そこで 移動の際の加速の仕方の最適化法は、共鳴状態や操 作初期での非断熱現象と深い関連があることがわか り、台湾の中央研究院の寺西慶哲氏と、統一的な理 論解析を進めている。また、ポテンシャル内の粒子 数制御に関する研究に関しても研究中である。



図 3.2.5: 量子粒子運搬の際にポテンシャル壁によっ て粒子がはね返される様子。

遍歴電子系での磁性とそのダイナミックス

遍歴電子系での長岡強磁性と非磁性のモット絶縁 体状態の間の断熱的に変化させる方法を考案した。 さらに、これまで議論されていなかった大きなスピ ンを持つ粒子系、フェルミ粒子系のみならずボーズ 粒子系での遍歴磁性の性質を明らかにし、光格子系 における新しい現象として提案した。[48] これらは 光格子にトラップされた粒子系での実現可能な興味 深い現象である。

### 量子系の非平衡ダイナミックス

散逸がある系での量子マスター方程式の定式化を 行い、さらに ESR や NMR の線形に関する理論を展 開した。[46,72] 佐伯は、応答関数を熱場理論を用 いて一般的に定式化した。[19] また、昨年は、久保 亮五先生の線形応答理論が発表されたから50周年 にあたり、量子ダイナミックス・量子応答に関する、 国内会議を開催した。また、応答理論の一般論やマ スター方程式の定式化について研究中である。森は 卒業研究として、射影演算子を用いた粗視化密度行 列とマスター方程式の関係を議論した。[3]

### 量子アニーリング

相互作用間の競合がある系での量子アニーリング についても研究を進めている。相互作用間の競合が あり遅い緩和を示す系で真の基底状態を見つけるこ とは、高温の状態から温度を徐々に下げていく従来 の温度アニーリングでは困難である。そこで、田中 は量子力学的な効果によって基底状態を探索する量 子アニーリングの方法を適用することで、エントロ ピー起源の遅い緩和がある場合にも有効に基底状態 を見いだすことができることを明らかにした。[63]

### キュービット操作

キュービット操作に重要になる交流外場での動的 量子現象も研究した。齊藤は、重要な現象として、コ ヒーレントトンネル消失現象 (coherent destruction of tunneling) と、動的局在現象 (Dynamic localization) を考察した。この2つの現象はこれまで別々に 議論されてきた現象であるが、この2つが実は同じ ものであることを示した。これにより、これらの奇 妙な量子動的現象の深い理解がなされた。[7,16]

### 量子輸送現象

量子輸送現象の一般論についても研究を進めた。 [13, 47, 73] 齊藤は、量子熱輸送や電子輸送現象にお ける揺らぎに注目しその解析をした。完全計数統計 の枠組みを用い、流れに関する任意の次数のキュミュ ラントを生成する生成汎関数を考察し、「揺らぎの定 理」を含んだより一般的な対称性を導出した。それを 用いると、輸送係数間に普遍的な関係式を導くこと ができる。一般に揺らぎが大きいと期待されるメゾ スコピックスケールの量子輸送現象においては、特 に重要になる普遍式であり、現在の実験技術を考え ると、必ず観測も可能であると期待される。これら の普遍的な関係式は、電子の流れやスピン流を操作 する時でも、定常的な状態では、常に成り立たなけ ればならない関係であり、効率などを考察する上で 重要である。

# 3.2.2 スピンクロスオーバー錯体における 協力現象の研究

従来、相転移の研究は局在磁性の相転移の問題として、格子点の上に大きさの決まったスピンがある 場合を中心に研究が進められてきた。しかし、近年 注目を集めている光による状態スイッチ現象で中心 的な役割をするスピンクロスオーバーと呼ばれる現 象では、スピンの大きさ自身がハイスピン(HS)と呼 ばれる大きなスピンを持つ状態からロースピン(LS) と呼ばれる小さなスピンを持つ状態へ圧力、磁場、 温度などいろいろな外部パラメターによって変化す る。この系での相転移は通常の磁性体にない新しい 協力現象を示し、たいへん興味深いものである。ま た、電子の移動によって構成要素の電子状態が変化 する電荷移動相転移も、理論的には同等の熱力学的 性質を示す。これらの非常に広い範囲の物質系にお いて有効な理論構築をめざしている。

### 構成要素が体積変化する場合の相転移

これまでの磁性相転移では、ほとんどの場合、ス ピンは格子点の上で考えられ、スピン状態の変化に よる体積変化の効果を臨界現象で考慮することはさ れてこなかった。最近光誘起相転移の舞台として注 目されているスピンクロスオーバー物質での相転移 の場合にもスピン様モデルでの解析が主体であった。 しかし、スピンクロスオーバー物質では、構成要素 (分子)の大きさ自身が HS と LS では異なり、状態 の変化は格子変形を伴う。そのため、格子の弾性エ ネルギーが重要な役割をすることが期待される。我々 は、短距離相互作用を全く無くしても、格子変形に 由来する弾性エネルギーに起因する相転移機構を発 見した。[6] この研究テーマは、小西、所がそして物 質材料機構の西野正理氏と共同で進めている。その 系の臨界現象を調べることで、このモデルがいわゆ る"分子場普遍性"に属することを明らかにした。[15] これまで分子場普遍性は、4次元以上の高次元系や、 長距離力モデルで調べられてきており人工的なモデ ルとの印象が強かったが、今回の発見で分子場普遍 性が実際の物質でも身近に起こる現象であることが 明らかになり、その実験的検証を提案している。ま た、小西は、体積変化を直接取り扱えることからこ の系の圧力依存性についても詳しく調べ、我々が提 案している"標準的"パラメター依存性が圧力に関 しても存在することを明らかにした。[17,49,50]ま た、関連する実験も、所が、JST さきがけプロジェ クトとして、化学教室の大越研究室で行われ緊密な 連絡を取りながら研究を進めている。[26]



図 3.2.6: クエンチ直後の秩序状態への緩和の様子。ク ラスター化が見られない。(この図は Physical Review B 誌の"Kaleidoscope"(January 2008) に選ばれた。)

### 相転移のダイナミックスと光誘起相転移

スピンクロスオーバー物質では光照射によって、 状態が変化し、光誘起相転移としてたいへん注目を 集めている。低温では HS 状態は熱力学的には不安 定であるが、低温で光によって励起された HS 状態 (LIESST)は、分子自身がもつミクロな準安定性に 加えて、熱力学的にも HS 状態が準安定になること があることを見いだている。そのような状況の下で、 構成要素間の協力現象が光照射のもとでどのように 秩序形成に影響するかについても研究を進めている。 特に、協力現象が光励起に対してある種の閾値現象 を生み出すことが知られている。特に、従来の短距 離相互作用モデルと、最近進めている弾性力起因モ デルでのダイナミックスの違いなどについて研究を 進めている。[49]

# 3.2.3 相互作用間の競合がある系での緩和 現象

平衡状態への緩和現象は、非平衡統計力学におけ る重要な研究対象である。特に、相互作用間に競合 がある場合には、状態密度が特殊な縮退を持つこと があり、特異な緩和現象が現れることがある。温度 に関して非単調な秩序過程を示すいわゆるリエンラ ント相転移は、フラストレーションをもつ飾りボン ドをもつことで実現できるが、その場合の秩序化の ダイナミックスに非常に遅い緩和が現れる。田中は この機構を解明するとともに緩和の速さを定量的に 解析した。

巨視的な基底状態の縮退をもつ系の典型例として、 かごめ格子反強磁性体がある。この系は通常有限温 度では相転移を示さないが、スピンが一軸的な異方 性をもつイジング的ハイゼンベルグかごめ格子反強 磁性体ではイジング的な対称性を持つ磁気構造が現 れ、その対称性の破れによって有限温度で相転移が 起こり、その場合秩序相でも巨視的な縮退が残る。田 中は、その中でのエントロピー効果による遅い緩和 を定量的に調べ、その特徴を明らかにした。[4,9]

また、相互作用の競合のため異なる秩序形態が存 在する場合、温度を急激に変化させた場合に状態は 新しい温度の平衡状態へ直接緩和せず、しばしば非 単調な変化を示す。田中と平野は、このような現象を 系の時間発展演算子の固有値問題として捕らえ、そ の機構を明らかにした。[8]

### 3.2.4 数理物理

数理物理学に関する研究も活発に行われた。可積 分 Vertex モデルと組み合わせ数え上げ法に関して、 茂地は、XXZ Heisenberg 模型の基底状態の波動関 数が、交代符号行列と呼ばれる組み合わせ論的対象 の数え上げを行っているという Razumov-Stroganov 予想の背後にある数理構造を解明するために円柱上 の O(n) ループ模型の高ランク類似物の構成、詳細な 解析を行った。[29, 20] また、坂本は、超離散ソリト ン系と組み合わせ表現理論に関して Kerov-Kirillov-Reshetikhin の写像の研究を行い、超離散可積分系 の代表例である箱玉系に対する一般解を初めて導出 した。また、KSS の巧妙なアルゴリズムとはアフィ ンクリスタルのエネルギー関数の 2 階差分に他なら ないことを明らかした。[30, 21, 22, 23, 24] さらに、 井上はトロピカルスペクトル曲線と可積分セルラー オートマタなどに関する研究を行った。[18]

#### <受賞>

- [1] 所裕子表彰名称:第2回日本物理学会若手奨励賞年月日:2008年3月25日研究題目:シアノ架橋型金属錯体における電荷移動に基づいた光誘起相転移現象の研究
- [2] 田中 宗平成 19 年度 理学系研究科研究奨励賞 (博 土),東京大学理学系研究科,(2008 年 3 月)
- [3] 森 貴司平成 19 年度 理学系研究科研究奨励賞 (学部),東京大学理学系研究科,(2008 年 3 月)

<報文>

### (原著論文)

- [4] S. Tanaka and S. Miyashita: Slow relaxation processes in Ising-like Heisenberg kagome antiferromagnets due to Macroscopic degeneracy in the ordered state, J. Phys. Cond. Matt. 19, 145256 (2007).
- [5] S. Yuan, H. De Raedts and S. Miyahsita: Domainwall dynamics near a quantum critical point, Phys. Rev. B75, 184305 (2007).
- [6] M. Nishino, K. Boukheddaden, Y. Konishi, and S. Miyashita: Simple Two-Dimensional Model for the Elastic Origin of Cooperativity among Spin States of Spin-Crossover Complexes, Phys. Rev. Lett. 98, 247203-(1-4) (2007).
- [7] K. Saito, M. Wubs, S. Kholer, Y. Kayanuma, P. Hanggi: Dissipative Landa-Zener transitions of qubits: bath-specific and universal behavior, Phys. Rev. B 75, 214308 (2007).
- [8] S. Miyashita, S. Tanaka and M. Hirano: Nonmonoyonic Relaxation in Systems with Reentrant Type Interaction, J. Phys. Soc. Jpn. 76, 083001 (2007).
- [9] S. Tanaka and S. Miyahsita: Slow Relaxation of Spin Structure in Exotic Ferromagnetic Phase of Ising-like Heisenberg Kagome Antiferromagnets, J. Phys. Soc. Jpn. 76, 103001 (2007).
- [10] S. Miyahsita: Conveyance of quantum particles by a moving potential-well, J. Phys. Soc. Jpn. 76, 104003 (2007).
- [11] H. De Raedts, K. De Raedts, K. Michielsen, K. Keimpema and S. Miyashita: Event-based computer simulation model of Aspect-type experimentsstrictly satisfying Einstein's locatity conditions, J. Phys. Soc. Jpn. 76, 104005 (2007).
- [12] T. Nagao and K. Saito: Semiclassical Approach to Parametric Spectral Correlation with Spin 1/2, J. Phys. A: Math. Theor. 40, 12055 (2007).
- [13] K. Saito and A. Dhar: Fluctuation Theorem in Quantum Heat Conduction, Phys. Rev. Lett. 99, 180601 (2007).
- [14] S. Mohakud, S. K. Pati and S. Miyashita: Sizedependent low-energy excitations in an alternating spin-1/spin- 1/2 antiferromagnetic chain: Spinwave theory and density-matrix renormalizationgroup studies, Phys. Rev. B 76, 014435 (2007).
- [15] S. Miyashita, Y. Konishi, M. Nishino, H. Tokoro, and P. A. Rikvold: Realization of the mean-field universality class in spin-crossover materials, Phys. Rev. B 77, 0144105 (2008).
- [16] Y. Kayanuma and K. Saito: Dynamical Localization, Coherent destruction, and Landau-Zener transition, Phys. Rev. A 77, 010101(R) (2008).
- [17] Y. Konishi, H. Tokoro, M. Nishino, and S. Miyashita: Monte carlo simulation of pressureinduced phase transitions in spin-crossover Materials, Phys. Rev. Lett. 100, 067206 (2008).
- [18] R. Inoue and T. Takenawa: Tropical spectral curves and integrable cellular automata, International Mathematics Research Notice, 2008, 1-27(rnn019) (2008).
- [19] M. Saeki: Relaxation method and TCLE method of linear response in terms of thermo-field dynamics, Physica A 387, 1827 (2008).

- [20] Keiichi Shigechi and Masaru Uchiyama: The  $A_k$ Generalization of the O(1) Loop Model on a Cylinder: Affine Hecke algebra, q-KZ equation and the sum rule J. Phys. A: Math. Theor. 40, 8923-8957 (2007).
- [21] Sakamoto: Finding rigged configurations from paths, RIMS Kokyuroku Bessatsu (in press).
- [22] Atsuo Kuniba and Reiho Sakamoto: Combinatorial Bethe ansatz and generalized box-ball system, Rev. Math. Phys. (in press).
- [23] Atsuo Kuniba and Reiho Sakamoto: Combinatorial Bethe ansatz and ultradiscrete Riemann theta function with rational characteristics, Lett. Math. Phys. 80, 199–209 (2007).
- [24] Atsuo Kuniba, Reiho Sakamoto, and Yasuhiko Yamada: Tau functions in combinatorial Bethe ansatz, Nucl. Phys. B786, 207–266 (2007).
- [25] Reiho Sakamoto: Crystal interpretation of Kerov– Kirillov–Reshetikhin bijection II. Proof for  $sl_n$ case, J. Algebraic Combinatorics 27, 55–98 (2008).
- (H. Tokoro in experiments) H. Tokoro, T. Mat-[26]suda, T. Nuida, Y. Moritomo, K. Ohoyama, E.D. Loutete-Dangui, K. Boukheddaden, and S. Ohkoshi Visible light-induced reversible photomagnetism in rubidium manganese hexacyanoferrate. Chem. Mater., 20, 423 (2008). T. Matsuda, H. Tokoro, M. Shiro, K. Hashimoto, S. Ohkoshi, 'Poly-[hexacyanomanganese(II)Iron(III) pentahydrate]' Acta Cryst. E, 310, 1422 (2007). T. Nuida, T. Hozumi, H. Tokoro, K. Hashimoto, S. Ohkoshi, 'Nonlinear magneto-optical effects and photomagnetism of electrochemically synthesized molecule-based magnets' J. Solid State Electrochem., 11, 763 (2007). S. Sakurai, S. Kuroki, H. Tokoro, K. Hashimoto, S. Ohkoshi, 'Synthesis, crystal structure, and magnetic properties of -InxFe2?xO3 nanorod-shaped magnet' Adv. Funct. Mater., 17, 2278 (2007). T. Matsuda, H. Tokoro, K. Hashimoto, S. Ohkoshi, 'Photo-induced charge transfer phase transition in cesium manganese hexacyanoferrate' J. Appl. Phys., 101, 09E101 (2007). K. Kato, Y. Moritomo, H. Tanaka, H. Tokoro, S. Ohkoshi, M. Takata, 'Extended charge-transfer state of RbMn[Fe(CN)6]' J. Phys. Soc. Jpn., 76, 123602 (2008). E.D. Loutete-Dangui, F. Varret, E. Codjovi, P.R. Dahoo, H. Tokoro, S. Ohkoshi, C. Eypert , J.F. L?tard, J.M. Coanga, K. Boukheddaden, 'Thermal spin transition investigated by spectroscopic ellipsometry in [Fe(NH2-trz)3]Br2<sup>3</sup> Phys. Rev. B, 75, 184425 (2007). K. Ishiji, T. Iwazumi, T. Matsuda, H. Tokoro, K. Hashimoto, S. Ohkoshi, Observation of a phase transition of cesium manganese hexacyanoferrates by x-ray absorption spectroscopy J. Phys. Chem. Solids, 68, 2158 (2007). M. Castro, J.A. Rodr'iguez-Velamaz'an, K. Boukheddaden, F. Varret, H. Tokoro, S. Ohkoshi, 'Calorimetric investigation of equilibrium and thermal relaxation properties of the switchable Prussian Blue analog Na0.32Co[Fe(CN)6]0.74?3.4H2O' Europhys. Lett., 79, 27007 (2007). S. Ohkoshi, Y. Hamada, T. Matsuda, Y.

Tsunobuchi, H. Tokoro, 'Charge transfer-induced spin transition and photo-reversible magnetism in a cyanobridged cobalt-tungstate bimetallic assembly' Chem. Mater., in press (2008).

## (学位論文)

- [27] Yusuke Konishi: Phase Transitions of Spin States in Transition Metal Complexes (博士論文、2008年3 月)
- [28] Shu Tanaka: Slow Relaxation in Frustrated Magnetic Systems (博士論文、2008 年 3 月)
- [29] Keiichi Shigechi: Intergrable Vertex Models and Combinatorial Countings (博士論文、2007年9月)
- [30] Reihou Sakamoto: Ultradiscrete soliton systems and combinatorial representation theory (博士論文、 2008 年 3 月)
- [31] Masaki Hirano: Dynamics and effective interparticle interaction of particles mediated by identical particles forming a lattice (修士論文、2007年12月)

### <学術講演>

## (国際会議)

#### 一般講演

- [32] Shu Tanaka, Hosho Katsura, and Naoto Nagaosa: "Electron Localization or Delocalization in Incommensurate Helical Magnets", 2007 CERC International Symposium, Akihabara Convention Hall, 2007 May.
- [33] Shu Tanaka and Seiji Miyashita: "Entropy driven slow relaxation of easy axis anisotropic kagome antiferromagnets in exotic ferromagnetic ordered state", XXIII IUPAP International Conference on Statistical Physics, Conference Center Genoa, 7/8-13 (以後, Statphys23).
- [34] Yusue Konishi and Seiji Miyashita: "Condition of existence of the supersolid state", (Statphys23).
- [35] Keisuke Yamamoto and Seiji Miyashita: "Condition of existence of the supersolid state", (Statphys23).
- [36] Seiji Miyahshita: "Study on elastic-interactionmediated order-disorder phase transition as a new universality class", (Statphys23).
- [37] Keiji Saito: "Universal Properties in Fluctuation of charge and heat transfer Stat-phys conference", (Statphys23).
- [38] Keigo Hijii and Seiji Miyashita: "Quantum dynamics under a periodic field – Floquet's theorem, symmetry and energy levels –" 21st Century COE International Symposium Linear Response Theory in Commemoration of its 50th Anniversary – Recent Development in Equilibrium and Non-Equilibrium Response, – Koshiba Hall, The University of Tokyo, 2007 11/5-7, (以後、21COE-LRT).

- [39] Shu Tanaka, Masaki Hirano, and Seiji Miyashita: "Slow Relaxation and Quantum Annealing Effect in Regularly Frustrated Systems", (21COE-LRT).
- [40] Masaki Hirano, Shu Tanaka, and Seiji Miyashita: "Non-monotonic Relaxation in Frustrated Systems", (21COE-LRT).
- [41] Keiichi Shigechi:  $A_k$  generalization of the O(1) loop model on a cylinder, (Statphys23).
- [42] Keiichi Shigechi: Generalized O(n) loop model Recent Advances in Quantum Integrable Systems, International Workshop LAPTH, Annecy-le-Vieux, France, 11-14 September 2007.
- [43] Keiichi Shigechi: Graphical representation of Hecke algebras Annual workshop on Mathematical Physics (10-11 Dec ANU, 12-14 Dec Kioloa, NSW South Coast, Australia), incorporating the Annual Statistical Mechanics meeting.
- [44] Reiho Sakamoto: Combinatorial Bethe ansatz and ultradiscrete soliton systems, "Algebraic Analysis and Around", Kyoto University, 27 June 2007.

#### 招待講演

- [45] S. Miyashita and K. Yamamoto: Various realizations of the supersolid state, PSM International Workshop "Physics of Supersolids and Related Topics, 慶應義塾大学日吉キャンパス 4/2-4.
- [46] Seiji Miyashita: Quantum Response in Dissipative Environments, (以後、21COE-LRT).
- [47] K. Saito: Symmetry in Full-Counting Statistics, Fluctuation Theorem and Measurable Relations in Nonlinear Electron Tansport under a Magnetic Field, (以後、21COE-LRT).
- [48] 宮下 精二: Quantum dynamics in low demensional spin systems, The Yukawa International Seminars (YKIS2007), 京都大学基礎物理学研究所 12/11-14.
- [49] Seiji Miyashita: Critical properties of the spincrossover phase transition induced by an elastic interactions, PDSTM2008 International Workshop, Phase transition and Dynamical properties of Spin Transition Materials, University of Bordeaux, 1/15-17.
- [50] H. Tokoro, S. Miyashita, and S. Ohkoshi: Photoinduced phase transition in rubidium manganese hexacyanoferrate, (PDSTM2008、同上).

## (国内会議)

- [51] S. Miyashita: Direct Numerical Estimation of the Line Shape of ESR, ISSP Workshop COE21 "Quests" 7th Internaitonal Workshop New Developments in ESR of Strongly Correlated Systems, ] 東京大学 物性研究所 5/21-23.
- [52] 西野正理、齊藤圭司、藤堂眞治、宮下精二:分子磁性 体での局所磁気構造,文部科学省次世代スーパーコン ピュータプロジェクト次世代ナノ情報機能・材料 成 果報告会,2007/07/13-2007/07/14,東大小柴ホール.

- [53] 西野正理,Kamel Boukheddaden, 宮下精二,Francois Varret, 大野隆央: 光誘起相転移現象を示すスピンク ロスオーバー系の弾性的相互作用による協力現象の 解析,日本物理学会 第 62 回年次大会,北海道大学 札幌キャンパス 2007/09/21-24.
- [54] 小西優祐: 弾性相互作用に誘起されるスピンクロス オーバー転移における福講師構造の自発発生,(日本 物理学会 第62回年次大会).
- [55] 田中 宗: 不均一な横磁場を利用した基底状態探索法 の開発,(日本物理学会 第62回年次大会).
- [56] 宮下精二: スピンクロスオーバー相転移における分子 場ユニバーサリティクラス実現、(日本物理学会)第 62回年次大会).
- [57] 山本啓介: 超固定状態の熱揺らぎに対する不安定性, (日本物理学会 第62回年次大会).
- [58] 肘井敬吾、宮下精二:「単分子磁性体における横磁場 の効果と対称性」(日本物理学会 第62回年次大会).
- [59] 田中宗、平野真樹、宮下精二: 不均一な横磁場を利用 した基底状態探索法の開発,(日本物理学会 第62 回年次大会).
- [60] 所裕子,宮下精二,大越慎一: RbMnFe シアノ錯体 における隠れた安定相への光誘起相転移,(日本物理 学会 第62回年次大会).
- [61] 小西優祐,所裕子,西野正理,宮下精二,K. Boukheddaden, F. Varret: 弾性相互作用に誘起されるスピン クロスオーバー転移における副格子構造の自発発生, (日本物理学会 第62回年次大会).
- [62] 所裕子,松田智行,宮下精二,橋本和仁,大越慎一: RbMnFe シアノ錯体における新規な光誘起相転移,第 57回錯体化学討論会,名古屋工業大学,2007年9月 25日
- [63] 田中宗、平野真樹、宮下精二: Quantum Annealing Effect in Frustrated Systems, JST/CREST 量子情 報ワークショップ (熱海, 2007 年 12 月).
- [64] 田中宗、宮下精二:フラストレートした磁性体における特異な緩和現象,次世代スーパーコンピュータプロジェクト、ナノ分野グランドチャレンジ研究開発 第二回公開シンポジウム(岡崎,2008年3月).
- [65] 田中宗、平野真樹、宮下精二:フラストレート系にお ける非単調緩和現象,日本物理学会年次大会,近畿大 学大学本部キャンパス 2008 3/22-26,(以下、日本 物理学会 第 62 回年次大会).
- [66] 小西優祐,所裕子,西野正理,宮下精二:スピンクロ スオーバー物質の光誘起相転移における弾性相互作 用の効果,(日本物理学会 第62回年次大会).
- [67] 肘井敬吾、宮下精二:離散的周期外場における Floquet 固有値の振舞い,(日本物理学会 第62回年次大会).
- [68] 井上 玲, 山崎 隆雄, Pol Vanhaecke: マンフォード 系の退化ファイバーと有理関数解, 日本数学会 2008 年度年会, 近畿大学, 2008 年 3 月 23 日.
- 招待講演
- [69] 所裕子,宮下精二,大越慎一: RbMnFe シアノ錯体 における可逆な光磁性現象,第45回茅コンファレン ス,信州松代ロイヤルホテル,2007年8月21日

- [70] 井上 玲, 竹縄 知之: Tropical spectral curves and integrable cellular automata 国際研究集会 "Tropical geometry and related topics" 北海道大学, 2007 年9月11日.
- [71] 井上 玲, 竹縄 知之: Tropical spectral curves and integrable cellular automata 日本数学会 2007 年度 総合分科会 (特別講演) 東北大学, 2007 年 9 月 21 日.
- [72] 宮下精二: ESR 線形における散逸の効果, 量子応答・ 量子ダイナミックスの新展開, ホテル談露館 2/16-18.
- [73] 齊藤 圭司: 完全計数統計による量子非平衡統計力学 へのアプローチ, 量子応答・量子ダイナミックスの進 展開, ホテル談露館 2/16-18.
- [74] 宮下精二:弾性力起因スピンクロスオーバー相転移 の分子場普遍性 Workshop "Phase Transitions in Long-range Interacting Models and Related Systems" 7/3/2008 (東京大学.
- [75] Reiho Sakamoto: Kirillov–Schilling–Shimozono bijection and ultradiscrete integrable systems, "Representation Theory of Algebraic Groups and Quantum groups", Graduate School of Mathematical Sciences, University of Tokyo, 13 Dec. 2007.
- [76] Reiho Sakamoto: A crystal theoretic method for finding rigged configurations from paths, Expansion of Combinatorial Representation Theory, Kyoto University, 23 Oct. 2007.

(セミナー)

- [77] 齊藤圭司:Landau-Zener transition: How important and How nontrivial、インドラマン研究所 2007/6/21
- [78] 齊藤圭司:完全計数統計における対称性と、普遍的な非 線形輸送関係、京都大学基礎物理学研究所 2007/08/08
- [79] 齊藤圭司:古典および量子輸送系での対称性と非線形 輸送関係式、慶応大学 2007/11/20
- [80] 齊藤圭司:完全計数統計による非平衡統計力学へのア プローチ:量子輸送現象、揺動散逸定理 etc、東京大 学駒場 2008/1/25
- [81] 齊藤圭司: Landau-Zener transitions: Pure Dynamics, Dissipative Dynamics, and Application to Quantum Devices、理化学研究所,2008/3/25

# 3.3 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。

# 3.3.1 高温超伝導の理論

## 強相関電子系としての高温超伝導

典型的な高温超伝導体のモデルである t-J モデル について、その詳しい導出と正当化、様々な数値的 手法による高温超伝導発現のメカニズムの研究、お よび RVB 平均場などによる研究についてレビュー としてまとめた。[7] 超伝導発現のメカニズムを解明 するために、数値的手法として変分モンテカルロ法、 少数系での厳密対角化、高温展開の手法などがある。 これらの結果は、すべて高温超伝導体の実験と一致 するパラメータ領域において、 $d_{x^2-y^2}$ :波超伝導が実 現するということを示している。しかし残された課 題も多い。最近の実験における異常の報告とともに、 今後の課題や展望についても現時点での総括を行っ た。[7, 50, 84, 86, 87]

#### モット金属絶縁体転移と超伝導

高温超伝導は、モット絶縁体に動けるキャリアを 導入することによって発現するので、超伝導と絶縁 体との関係は強相関電子系における最も興味ある研 究の1つである。これを理解するために、ハバード モデルを用いて金属絶縁体転移と超伝導の関係を明 らかにした。とくに電子相関を十分考慮した波動関 数を仮定して変分モンテカルロ法によって基底状態 を調べた。この方法は、強相関領域で有効な手段で あると考えられている。

その結果、1次相転移としての金属絶縁体転移が 実現することを示した。電子相関が強い領域で得ら れた絶縁体状態では、スピンを持つ2つの電子 が同時に占有するサイトと、ホールのサイトとは束 縛状態を作っており、t-Jモデルでよく記述される状 況となることがわかった。また波動関数中には超伝 導秩序変数があるが、強相関のために絶縁体となっ ている状態であることも明らかになった。したがっ て、この状態にキャリアが導入されれば、直ちに高 温超伝導になると考えられる。一方、電子相関が弱 い領域では、通常のBCS型のd波超伝導状態が実現 すると考えられる。[22, 32, 41, 52, 80]

# 3.3.2 コバルト酸化物における多軌道型超 伝導

2次元三角格子上の超伝導体であるコバルト酸化物 Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub>·yH<sub>2</sub>O において、電子相関による超伝 導の可能性を探るためにいくつかの理論的解析を行っている。これに関してレビューをまとめた。[1]

コバルト酸化物超伝導体において、Coのt<sub>2g</sub>軌道 の自由度が重要な役割を果たしている可能性を指摘 し、多軌道型超伝導体に特有の物性や現象および超 伝導発現のメカニズムについて調べた。この物質で は、c軸長によって超伝導と磁性状態など物性が大き く変ることが実験で明らかになっているが、このこ とを理解するためのモデルを構築した。具体的には、 酸素原子も考慮した多バンドの強束縛モデルを作り、 c軸長の変化による影響をホッピングパラメータの変 化と結晶場ポテンシャルの変化として取り入れると いうモデルを構築した。このモデルを基に、超伝導 発現機構を詳しく調べたところ、スピン三重項超伝 導が出現するパラメータ領域と、新たに拡張 s 波超 伝導が出現するパラメータ領域が非常に接近して存 在することが明らかになった。この結果から、実験 で見られている磁気的性質、比熱の温度依存性、臨 界磁場の大きさなどを矛盾なく説明できることがわ かった。[2, 48]

また実験グループと共同で、新しいバンドが見られる可能性について議論した。[6]

# 3.3.3 有機導体に関する理論

有機導体(分子性導体)は相関の強い電子系のモ デル物質であると考えて、そこで起こる特異な現象 や超伝導に関する研究を行なっている。[85]

## 擬一次元電子系の特異なふるまい

有機導体の中には、1次元鎖が弱く結びつきあって 擬一次元電子系を形成している物質群がある。この ような系は1次元と3次元(2次元)の中間的な次元 性を持つので、1次元特有の朝永・ラッティンジャー 液体と3次元でのフェルミ液体との間のクロスオー バーが期待される。そのような次元性やクロスオー バーの影響が実験でどのように現れるのかを理解す るため、N本鎖くりこみ群という手法を開発し、擬 一次元系の詳細な計算が行えるようにした。[14] こ の手法を用いて擬1次元系における超伝導機構、特に スピンゆらぎと次元性の効果について調べた。--船 に超伝導相が何らかの秩序相近傍に現れたとき、そ の超伝導は秩序相のゆらぎを媒介して実現している と考えられる。この場合、ゆらぎの振幅は秩序相か ら離れるにつれ小さくなるため、超伝導転移温度 T<sub>c</sub> も秩序相から離れるにつれ下がることが期待される。 しかし (TMTTF)<sub>2</sub>SbF<sub>6</sub> という有機導体においては、 秩序相から離れてもT。が上昇し続けるという奇妙な ふるまいが観測された。我々はこの問題に対し、上 記 N 本鎖くりこみ群を用いて調べた。その結果、擬 -次元系においては次元性の効果によって超伝導相 関が増大することがわかり、これが (TMTTF)<sub>2</sub>SbF<sub>6</sub> の実験を説明することを指摘した。[3, 36, 99]

擬一次元超伝導のモンテカルロシミュレーション

上の擬一次元電子系のくりこみ群による研究は基本的に摂動論的な議論であり、また一部の揺らぎを とくに強調して考慮している可能性がある。この可 能性を排除し、さまざまな揺らぎをすべて同時に取 り扱える手法として、補助場量子モンテカルロ法と いう数値計算を用いて擬一次元電子系の超伝導を調 べた。その結果、次元性の増加とともに超伝導相関 が増大することが明らかとなり、これまでの解析的 な手法(くりこみ群)と矛盾なく相補的な結果が得 られた。さらにこれまで考慮されていなかった長距 離斥力の効果も取り入れ、有機導体に特有の電荷秩 序と超伝導の関係を調べた。その結果、長距離斥力 のために電荷ゆらぎが強くなる場合には $d_{x^2-y^2}$ 波超 伝導状態よりも $d_{xy}$ -波超伝導状態の方が安定である ことを見出した。[24, 57, 64, 83]

## 磁場中擬一次元電子系の理論

上記の N 本鎖くりこみ群法を、磁場中においても 適用できるように拡張し、幅広い変数領域での基底状 態を探索した。磁場による効果としては、フェルミ面 が分裂し散乱過程に変化を与えることが考えられる。 その結果、異方的 SDW 相という、これまで考えら れてこなかった新しい密度波相が現れることを明ら かにした。さらに古くから知られる Kohn-Luttinger の定理を拡張し、「引力領域でも絶対零度まで安定な 金属は存在せず、異方的 SDW が基底状態となる」と いう結論を導いた。[60]

#### 有機導体における新奇なスピン液体状態

擬二次元三角格子を有する  $\kappa$ -(ET)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub> は、 絶縁体相の NMR や磁化率測定から、極低温まで磁 気秩序を持たず、さらにスピンギャップも生じないと いう「ギャップレススピン液体」という新しい状態 であると考えられ、非常に注目を集めている。この 物質は三角格子に近いため強いフラストレーション を持つ。この系が完全な三角格子スピン系だとする と、基底状態は 120。構造と呼ばれる長距離秩序状 態を持つはずである。一方、仮に磁気秩序が無いと しても「d+id」状態と呼ばれるスピンギャップを持 つ状態が安定となるため、この物質の「ギャップレ ススピン液体」は説明できない。

我々はこの系がもつ一次元的異方性に着目し、一 次元スピン鎖がフラストレートしたジグザグボンド で結合したものと見なすモデルを用いてこの問題を 研究した。もしフラストレーションの効果で鎖間相互 作用が実効的に非常に小さくなり、ほぼ独立な一次元 スピン鎖のように振舞うならば、系の低エネルギー 励起は一次元由来のギャップレススピノン励起で支配 され、比熱や磁化率に特徴的な振る舞いが予想され る。実際、我々の RVB 平均場近似によると、比較的 広いパラメータ領域で一次元的な一粒子励起スペク トルが現れることがわかった。[4, 20, 30, 35, 37, 69]

さらに動的スピン相関関数の計算からも一次元ス ピン系の厳密解と同様の磁気励起が見出された。こ の結果を Cs<sub>2</sub>CuCl<sub>4</sub> の中性子散乱実験結果とも比較 して考察した。[45,81] また、有限温度への拡張を行 い、鎖間の相関が低温で消失し広い温度領域で一次的 RVB 状態が実現されることを示した。この一次元的 RVB 状態においては、磁化率が絶対零度まで有限値 を取り、比熱が低温で温度に比例することがわかった。 [62] 我々はこの状態が有機導体  $\kappa$ -(ET) $_2$ Cu $_2$ (CN) $_3$  で見られる特異な非磁性状態「ギャップレススピン液体」に対応していると考えている。

#### 非平衡状態での電荷秩序状態

θ-型有機導体という物質群は、伝導面が2次元異方 的三角格子を組んだ系であり、多くの系において電 荷秩序が見出されている。その1つである θ-(BEDT-TTF)<sub>2</sub>X という物質群では、格子が三角格子的であ るために最近接相互作用 V にフラストレーションが 生じている。これまでの研究から、電荷秩序状態と してストライプ型のものと3倍周期を持つものが見 出されており、両者はエネルギー的に拮抗している と考えられる。この状況下で系に電流を流した場合、 電荷秩序の融解と思われる現象が実験的に見出され ており、サイリスタ現象とともに非常に興味が持た れている。この現象を理解するために、非平衡グリー ン関数理論を基礎に、定常非平衡 Hartree 近似法と いうものを定式化して、θ-型有機導体に適用した。そ の結果、金属状態である3倍周期の電荷秩序は電場 によって安定化され、絶縁体状態であるストライプ型 の電荷秩序は影響を受けないということが示された。 一方3倍周期の強度は電場によって減少する。これ らの結果は実験をうまく説明すると考えられる。た だしこの手法は線形応答領域で有効なので、非線形 領域を調べるためには、さらに手法の拡張が必要で ある。[25, 31, 38, 65, 67]

## 3.3.4 超伝導体の理論

#### 空間反転対称性が破れた系の磁性と超伝導

CePt<sub>3</sub>Si という空間反転対称性の破れた系で超伝 導が発見され、注目を集めている。このような系では 偶パリティと奇パリティのペアリングが混じることが 知られている。この系を調べるためにまず、CePt<sub>3</sub>Si の電子構造を記述する周期アンダーソンモデルおよび ハバードモデルを構成し、乱雑位相近似による解析を 行なった。その結果、s+p-波という状態と、p+d+f-波という2つの超伝導状態が安定であることがわかっ た。また、CePt<sub>3</sub>Si では超伝導と反強磁性が共存す るが、この物質が示す多くの異常物性の原因は、こ の反強磁性との共存にあることを示した。s+p-波を 仮定し状態密度、比熱、 $1/T_1T$ 、 $H_{c2}$ 、非線型磁化率 を計算した結果は実験結果を矛盾なく説明できるこ とがわかった。[8, 9, 19, 39, 76]

#### 反強磁性量子臨界点近傍の FFLO 超伝導

FFLO 超伝導とは、並進対称性が自発的に破れた 超伝導状態である。この状態は理論的に昔から予言 されていたが、現実の物質でその可能性が見出され てきたのはごく最近のことである。その候補となる 重い電子系超伝導体や有機超伝導超伝導体に共通す る特徴は反強磁性量子臨界点近傍にあることである。 そこで、FLEX 近似を磁場中かつ並進対称性が破れ た系に拡張することによって、量子臨界点近傍での FFLO 超伝導の相図を調べた。その結果、それまで の予想に反して FFLO 超伝導が安定化されることが 分かった。また、平均場近似では得られないような 相図の特徴が、量子臨界揺らぎの寄与を取り入れる ことで説明できることも示された。[10, 66]

乱れた強相関電子系における磁性と超伝導

磁性と超伝導の臨界領域において乱れが引き起こ す微視的不均一性とその影響を調べた。高温超伝導 体のようにコヒ - レンス長が短い非 s-波超伝導では、 電子の波動関数の局在を伴わなくとも、乱れによって 容易に微視的な不均一性が生じると考えられる。この 場合、乱れに対して通常用いられる摂動理論(CPA、 ボルン近似、T行列近似など)は破綻すると考えら れるので、非摂動的計算を実行し競合する秩序の空 間的共存と熱揺らぎの増強を示した。[13, 18]

不純物バンド超伝導におけるアンダーソン局在と超 伝導揺らぎ

ボロンを添加したダイヤモンドにおける超伝導が 発見され、不純物バンドでの超伝導が注目を集めて いる。一方、アンダーソン局在と超伝導の競合によ る超伝導絶縁体転移は長年の理論的課題である。こ れまでに長距離クーロン相互作用の効果を調べた研 究が成功を収めてきたが、不純物バンドにおける超 伝導を記述するためにはそれだけでは不十分である と考えられる。そこでランダムネスを厳密に取り扱 うことができる微視的モデルを用いてこの問題を調 べた。その結果、超伝導のメゾスコピック揺らぎと 熱揺らぎが増強されることによって、擬ギャップを 伴った超伝導絶縁体転移が起こるメカニズムを提唱 した。[21, 33, 75]

# 3.3.5 フラストレーションのある系での電 子状態、スピン状態

カゴメ格子におけるキャリアドープの効果

フラストレーションのある系に伝導を担うキャリ アを導入すると、RVB 状態などの興味深い現象が起 こりうることが分かってきている。そこで、二次元 系の中でも、最もフラストレーションが強いと考え られているカゴメ格子について、キャリアドープの 効果を調べた。その結果、強いフラストレーション のために、三角格子や他のフラストレーションを持 つ格子と比較して、カゴメ格子ではより顕著に RVB 状態や強磁性などの特異な現象が現れることが明ら かになった。[15] フラストレーションのある古典スピン系の数値シミュ レーション

磁気的フラストレーションのある古典 XY スピン系 については、よく知られている Kosterlitz-Thouless (KT) 転移とともに、フラストレーションから生じる カイラリティ相転移という可能性がある。KT 転移は 連続転移であるが、カイラリティ転移はイジング型 の相転移である。三角格子においては、この2つの 相転移がほとんど同じ温度で起こると考えられてい るが、格子が正三角から歪んだ場合には、接近した 温度で相転移するという必然性はない。もし大きく 異なる温度での相転移が見られると、2つの相転移 温度の中間温度領域では、新奇な状態が実現する可 能性がある。このことを明らかにするために、フラス トレーションのある系にも応用可能な Wang-Landau アルゴリズムによるモンテカルロ法を、連続エネル ギーの場合に拡張して調べた。このモンテカルロシ ミュレーションは、ALPS 上に実装して解析を行っ ている。[16]

フラストレーションを持つハバードモデルの基底状態

フラストレーションを持つハバードモデルの基底 状態では、強い量子効果によって新奇な量子状態が実 現し得ることが様々な研究によって明らかになってき ている。このような系では短距離相関が重要である と思われるが、それを厳密に取り扱うことができる量 子クラスターの方法 (variational cluster approach) を用い、正方格子上の t-t' ハバードモデルを調べた。 その結果、t'/t が小さな領域では反強磁性相が、t'/t が大きな領域ではコリニアーと呼ばれる磁気的秩序 相が現れ、その中間のパラメータ領域で磁気秩序を 持たない絶縁体相が現れることがわかった。さらに、 3 次元性を導入していくと磁気的秩序を持たない絶縁 体相は消滅し、反強磁性相からコリニアーな磁気的 秩序相への直接的な一次転移が起こることがわかっ た。[29, 34, 44, 55]

## ラットリング転移の古典 Potts 模型による解析

KOs<sub>2</sub>O<sub>4</sub> という物質は、超伝導転移のほかに「ラッ トリング転移」と呼ばれる相転移を起こすことが実 験的に知られている。この物質では Os<sub>2</sub>O<sub>4</sub> から成る 一種のカゴの中に K イオンが 1 つずつ存在している が、K イオンの半径がカゴの有効半径に比べて小さ いために K イオンの位置の自由度がある。ラットリ ング転移は、この自由度が関与した相転移だと考え られている。しかしこの相転移の本質については実 験的にまだわかっていない。そこで、K イオンの位 置の自由度をモデル化した 4 状態 Potts モデルとい うものを考え、古典モンテカルロシミュレーション を用いて調べた。K イオンの位置はダイヤモンド格 子を組み、その自由度はダイヤモンド格子上での強 磁性 4 状態古典 Potts モデルに焼き直すことができ る。さらに、ある種のフラストレーションを持つ相 互作用があると考えられる。計算の結果、フラスト レーションのために相転移温度が下がり、基底状態 も単なる強磁性状態とは異なる新奇な状態となるこ とを見出した。この基底状態は、グローバルな格子 変形がみられないという実験結果と矛盾しないもの である。[53, 68, 100]

# 3.3.6 近藤効果や重い電子系に関する理論

#### 量子ドットでの近藤効果

量子ドットに導線(リード)をつないだ系は、新 しい近藤効果の系として非常に興味が持たれている。 例えば、スピン分極したリード(強磁性リード)を量 子ドットに結合するとスピン依存性をもつ電荷揺ら ぎによってドットのエネルギー準位が分裂し、近藤 効果が弱まることが理論的に予測されている。この ことは、実験において微分コンダクタンスのゼロバ イアス異常の分裂として観察されている。ドットの 左右に結合した強磁性リードの分極方向が、お互い に平行か反平行の場合は既に調べられているが、こ れを任意の角度の場合に拡張しスピン分裂の大きさ  $\delta$  および近藤温度  $T_K$  の表式をスケーリング法によっ て解析的に導出した。この結果、δは左右のリードの 分極方向の中間方向を量子化軸として生じ、リード の分極率を pとすると  $p\cos(\theta/2)$  に比例することを 示した。また $\delta \ll T_K$ の場合には、 $p\cos(\theta/2)$ の増 加とともにドット中のスピンゆらぎが抑制されるの で、 $T_K$ も低下することがわかった。さらに、スレ-ブ・ボソン平均場近似を用いて $\delta$ に対する $T_K$ の依 存性を調べ、近藤共鳴が $\delta$ によって分裂し $T_K$ が低 下することを明らかにした。これは近藤効果が弱ま ることを意味している。[11]

# 重い電子系の量子臨界点における反強磁性転移とフェ ルミ面のトポロジカル転移

近年、重い電子系のフェルミ面に関する実験が詳 細に行われるようになり、大きな注目を集めている。 特に反強磁性転移点を境にフェルミ面に急激な変化 が起きていることがいくつかの実験から明らかになってきた。例えば重い電子系物質である YbRh<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> や  $CeCu_{6-x}Au_x$  では、従来の量子臨界点に関する Moriya-Hertz-Millis 理論では説明できない現象が数 多く見られており、新たな描像の必要性が議論され ている。我々は特に量子臨界点でホール係数が不連 続に変化するという実験事実に着目し、近藤格子模 型と周期的アンダーソン模型に変分モンテカルロ法 を適用して、基底状態における反強磁性転移とフェ ルミ面の変化を解析した。その結果、広いパラメー タ領域において従来の反強磁性転移と共にフェルミ 面の再構成を伴うという新しいタイプの相転移が存 在することを明らかにした。相図中では反強磁性転 移とフェルミ面再構成が同時に起こるパラメータ領 域も存在し、実験結果を説明し得ると考えられる。 [5, 12, 28, 47, 51, 54, 61]

# 3.3.7 2次元<sup>3</sup>Heに関する理論

グラファイト上に吸着された<sup>3</sup>Heの系は、非常に よくコントロールされた純粋2次元のフェルミオン 系として実験的に精力的に調べられてきている。こ の系は下地のグラファイトの蜂の巣格子を反映して、 2次元三角格子をなしていると考えられている。さ らに、He間の強い斥力相互作用により、低次元強相 関フェルミオン系の典型的な例となっていると思わ れる。これに関していくつかの研究を行っている。

# 二次元<sup>3</sup>He における新量子液体の発見: 多スピン交 換相互作用の効果

グラファイト上の He の密度をコントロールして、 ちょうど2次元面上に稠密に He が並ぶ状況を作る ことができる(4/7相と呼ばれている)。この4/7相 (モット絶縁体)からわずかに粒子数を減らした領域 では、比熱における二重ピーク構造など通常のフェ ルミ液体としては理解しがたい特異な振舞いが報告 されている。この異常液体の理論的解明のために、 2次元<sup>3</sup>Heのモデル化を行い基底状態の解析を行っ た。まず有効模型として、<sup>3</sup>He 特有のハード・コア を考慮してHe粒子の二重占有を禁止し、さらに従来 のハイゼンベルグ型の交換相互作用以外に、高密度 <sup>3</sup>He で顕著になるリング状の多スピン交換相互作用 (リング交換) K を取り入れた三角格子 t-J-K モデ ルを考案した。これは今までの t-J モデルを拡張し たものになっている。このモデルの基底状態を数値 的厳密対角化によって調べ、相図を決定した。いく つかの大きさの系での結果を総合すると、強磁性相 とフェルミ液体相の間に、リング交換によってフェ ルミ液体とは異なる未知の「新しい量子液体相」が 存在することを発見した。さらに、この新しい量子 液体相ではスピン・質量(電荷)分離的振舞いが見ら れることをつき止めた。これは測定されている二次 元<sup>3</sup>Heの新奇な状態に対応していると考えられる。 [40, 43, 79, 82, 98]

#### **3.3.8** 磁壁駆動の微視的理論

近年、不揮発性記憶媒体のデバイス原理として、 強磁性体中に形成させた磁壁の電流駆動が注目され ている。実際、様々な実験において磁壁駆動が観測 されている。その主な駆動メカニズムについては、 場の理論や数値的手法等を用いた研究によって、伝 導電子が磁壁に角運動量を与える「スピン移行」の メカニズムとして理解されてきている。しかし、こ れまでの手法では平衡状態から大きく逸脱した場合 の伝導電子のダイナミクスを扱えないため、断熱領 域での議論に留まっていた。そこで我々は、伝導電 子と磁壁のダイナミクスを対等に扱うことによって 微視的な磁壁の駆動メカニズムを解析した。具体的 には、伝導電子系と局在古典スピン系とが結合した 系に電場を印加し、時間依存 Schrödinger 方程式と Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を数値的に連立して 解くことを行った。この手法では、伝導電子とスピンのダイナミクスを非摂動的に扱うことができるので、断熱領域を越えた広汎なパラメータ空間を議論することができる。計算の結果、伝導電子からの運動量移行により磁壁が駆動されるパラメータ領域を見出した。さらに、伝導電子のエネルギー準位および分布関数の時間発展を追うことにより、その起源が電子の非断熱性と関わっていることを明らかにした。[46, 56, 63]

# 3.3.9 ディラック電子系におけるバンド間 磁場効果とホール効果

最近見出されたある種の有機物質や、グラファイト の2次元系、さらに古くから調べられている Bi(ビ スマス)において、電子の分散関係が相対論的量子 力学におけるディラック電子と全く同じになる場合 が見出されている。このような電子系は、通常の3次 元金属状態と全く異なる振舞いを示すと予想されて おり、新たな電子状態として非常に興味が持たれて いる。我々はこのディラック電子系を取り上げ、ホー ル効果に現れるバンド間磁場効果を調べた。とくに ディラック電子では、バンド間磁場効果が顕著にな ると考えられる。解析の結果、磁場によるバンド間 の効果が、これまで知られていなかった新たな寄与 をホール伝導度に与えることがわかった。また、ホー ル係数がバンド端で鋭いピークを持ち、バンドギャッ プ中央で急激にその符号を反転させるという結果を 得た。これは従来の直感的な予測からはまったく想 像し得ない結果である。さらに、これまで混乱して いたビスマスにおけるホール効果の測定に指針を与 えるべく実験状況を整理し、理論的予測を提言した。 [23, 78, 88, 89]

#### <報文>

(原著論文)

- M. Ogata: J. Phys.: Condens. Matter 19, 145282 (2007). "A new triangular system: Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub>"
- [2] M. Mochizuki, H. Q. Yuan and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 023702 (2007). "Specific Heat and Superfluid Density for Possible Two Different Superconducting States in  $Na_x CoO_2 \cdot y H_2O$ "
- [3] Y. Fuseya and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. 76, 093701 (2007). "Increase of Superconducting Correlation due to Dimensional Change in Quasi-One-Dimensional Conductors"
- Y. Hayashi and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. 76, 053705 (2007). "Possibility of Gapless Spin Liquid State by One-dimensionalization"
- [5] H. Watanabe and M. Ogata: Phys. Rev. Lett. 99, 136401 (2007). "Fermi-Surface Reconstruction without Breakdown of Kondo Screening at the Quantum Critical Point"

- [6] D. Yoshizumi, Y. Muraoka, Y. Okamoto, Y. Kiuchi, J. Yamaura, M. Mochizuki, M. Ogata, and Z. Hiroi: J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 063705 (2007). "Precise Control of Band Filling in Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub>"
- [7] M. Ogata and H. Fukuyama: Rep. Prog. Phys. 71, 036501 (2008). "The t-J model for the oxide high- $T_{\rm c}$  superconductors"
- [8] Y. Yanase and M. Sigrist: J. Phys. Soc. Jpn.76, 043712 (2007). "Non-centrosymmetric Superconductivity and Antiferromagnetic Order: Microscopic Discussion of CePt3Si"
- [9] Y. Yanase and M. Sigrist: J. Phys. Soc. Jpn.76, 124709 (2007). "Magnetic Properties in Noncentrosymmetric Superconductors with and without Antiferromagnetic Order"
- [10] Y. Yanase: J. Phys. Soc. Jpn.77, No.6 (2008). "FFLO Superconductivity near the Antiferromagnetic Quantum Critical Point"
- [11] D. Matsubayashi and M. Eto: Phys. Rev. B 75, 165319 (2007). "Spin splitting and Kondo effect in quantum dots coupled to noncollinear ferromagnetic leads"

# (会議抄録)

- [12] H. Watanabe and M. Ogata: Proceeding of The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (Houston, USA, May 13-18, 2007) Physica B 403, 1390 (2008). "Anomalous changes of Fermi surface and Hall coefficient at quantum critical point"
- [13] Y. Yanase and M. Ogata: Proceeding of the 17th International Conference on Magnetism (ICM2006) (Kyoto, Japan, August 2006) J. Mag. Mag. Mater. **310**, 480 (2007). "Role of Disorder in the Multi-Critical Region of d-wave Superconductivity and Anti-ferromagnetism"
- [14] Y. Fuseya, M. Tsuchiizu and Y. Suzumura: Proceeding of ICM2006. J. Mag. Mag. Mater. **310**, 1128 (2007). "Role of Fluctuations in Density Wave and Superconductivity of Quasi-One-Dimensional Conductors"
- T. Koretsune and M. Ogata: Proceeding of ICM2006. J. Mag. Mag. Mater. **310**, e286 (2007).
   "Magnetic properties of doped Kagome antiferromagnet"
- [16] F. Albuquerque et al. (ALPS collaboration): Proceeding of ICM2006. J. Mag. Mag. Mater. **310**, 1187 (2007). "The ALPS project release 1.3: open source software for strongly correlated systems"
- [17] M. Sigrist, D. F. Agterberg, P. A. Frigeri, N. Hayashi, R. P. Kaur, A. Koga, I. Milat, K. Wakabayashi and Y. Yanase: Proceeding of ICM2006. J. Mag. Mag. Mater. **310**, 536 (2007). "Superconductivity in non-centrosymmetric materials"

- [18] Y. Yanase and M. Ogata: Proceeding of the 8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M2S-HTSC-VIII) (Dresden, Germany, July 2006) Physica C 460 399 (2007). "Disorder-induced microscopic inhomogeneity in the multi-critical region of d-wave superconductivity and antiferromagnetism"
- [19] Y. Yanase and M. Sigrist: Proceeding of the International Conference on "New Quantum Phenomena in Skutterudite and Related Systems" (Kobe, Japan, September 2007) To appear in J. Phys. Soc. Jpn.Suppl. "Helical Superconductivity in Non-centrosymmetric Superconductors with dominantly Spin Triplet Pairing"
- [20] Y. Hayashi and M. Ogata: Proceeding of The 8th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (Sendai, August 20-24, 2007). to appear in J. Phys. Chem. Solids. "RVB Mean-field Analysis of the Heisenberg Model on the Quasi-one-dimensional Triangular Lattice"
- [21] Y. Yanase: Proceedings of SNS2007. to appear in J. Phys. Chem. Solids. "Superconductor-Insulator Transition in Impurity Band Systems"
- [22] H. Yokoyama and M. Ogata: Proceedings of SNS2007. to appear in J. Phys. Chem. Solids. "Doublon-Holon Binding Effects on Mott Transitions in Two-Dimensional Bose Hubbard Model"

#### (国内雑誌)

[23] 伏屋雄紀:物性研究、2008 年 7 月号 p537 掲載決 定。「ビスマス研究 温故知新 固体中ディラック電 子とバンド間磁場効果 」

(学位論文)

- [24] 青沼 徹: "Dimensionality Effects on Superconductivity and Magnetism in Quasi-One-Dimensional Electron Systems" (東京大学大学院理学系研究科・ 修士論文)
- [25] 湯川英美: "Mean-Field Analysis of Electric Field Effect on Charge Order in Organic Conductors" (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)

- [26] 小形正男: 『量子力学』 (裳華房 2007 年)
- [27] 生井澤寛、波田野彰、小形正男:『物理の世界』(放送 大学教育振興会 2007 年)

(国際会議)

一般講演

[28] H. Watanabe and M. Ogata: The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (Houston, USA, May 13-18, 2007) "Anomalous changes of Fermi surface and Hall coefficient at quantum critical point"

- [29] T. Yoshikawa and M. Ogata: 2007 CERC International Symposium (Akihabara, Japan, May 22-25, 2007) "Magnetic Property of Strongly Correlated Electron System at Ground State on Twodimensional t-t' Hubbard Lattice "
- [30] Y. Hayashi and M. Ogata: 2007 CERC International Symposium (Akihabara, Japan, May 22-25, 2007) "RVB Mean-field Analysis of Triangular Lattice Heisenberg Model with Quasi-one-dimensional Anisotropy"
- [31] E. Yukawa and M. Ogata: 2007 CERC International Symposium (Akihabara, Japan, May 22-25, 2007) "Effect of Current on Two Kinds of Charge Orders in  $\theta$  and  $\theta_d$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>MM'(SCN)<sub>4</sub> Salts"
- [32] H. Yokoyama and M. Ogata: The 8th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2007) (Sendai, Japan, August 2007) "Crossover in Superconducting Properties in Two-Dimensional Hubbard Model"
- [33] Y. Yanase: The 8th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2007) (Sendai, Japan, August 2007) "Anomalous Metal near Superconductor-Insulator Transition"
- [34] T. Yoshikawa and M. Ogata: The 8th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2007) (Sendai, Japan, August 2007)
   "Role of Frustration in Square Lattice Hubbard Model with Diagonal Transfer"
- [35] Y. Hayashi and M. Ogata: The 8th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2007) (Sendai, August 20-24, 2007)
   "RVB Mean-field Analysis of the Heisenberg Model on the Quasi-one-dimensional Triangular Lattice"
- [36] Y. Fuseya: 7th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Ferromagnets (ISCOM2007) (Peñíscola, Spain, September 24-29, 2007) "Increase of  $T_{\rm c}$  due to Dimensionality Change in Quasi-One-Dimensional Conductors"
- [37] Y. Hayashi and M. Ogata: 7th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Ferromagnets (ISCOM2007) (Peñíscola, Spain, September 24-29, 2007) "Possibility of the Gapless Spin Liquid State on the Anisotropic Triangular Lattice"
- [38] E. Yukawa and M. Ogata: 7th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Ferromagnets (ISCOM2007) (Peñíscola, Spain, September 24-29, 2007) "Effect of Current on Two Kinds of Charge Orders in  $\theta$ and  $\theta_d$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>MM'(SCN)<sub>4</sub> Salts"
- [39] Y. Yanase: International Conference on "New Quantum Phenomena in Skutterudite and Related

<sup>(</sup>著書)

<sup>&</sup>lt;学術講演>

Systems" (Kobe, Japan, September 2007) "Magnetism and Superconductivity in Heavy Fermion Systems without Inversion Center"

- [40] M. Ogata: International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2007) (Gifu, October 29-November 1, 2007) "Properties of t-J-type Models on a Triangular Lattice as a Model for <sup>3</sup>He Film"
- [41] H. Yokoyama, K. Kobayashi and M. Ogata: International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2007) (Gifu, October 29-November 1, 2007) "Doublon-Holon Binding Effects on Mott Transitions in Two-Dimensional Bose Hubbard Models"
- [42] Y. Yanase: International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2007) (Gifu, Oct.29-Nov.1, 2007) "Novel Magnetism and Superconductivity in Noncentrosymmetric Systems"
- [43] Y. Fuseya and M. Ogata: International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2007) (Gifu, October 29-November 1, 2007) "Ground States of a Triangular t-J Model with Multiple-Spin Exchange"
- [44] T. Yoshikawa and M. Ogata: International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2007) (Gifu, October 29-November 1, 2007) "Analysis of Intermediate Phase between Band and Mott Insulating Phases in the Two-dimensional Ionic Hubbard Model"
- [45] Y. Hayashi and M. Ogata: International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2007) (Gifu, October 29-November 1, 2007) "Low-energy Spin Excitations on the Triangular Lattice with Quasi-onedimensional Anisotropy"
- [46] D. Matsubayashi, M. Udagawa and M. Ogata: 21st Century COE International Symposium Liniear Response Theory in Commemoration of its 50th Anniversary — Recent Development in Equilibrium and Non-Equilibrium Response — (Tokyo, November 5-7, 2007). "Numerical study on magnetic domain wall dynamics by time-dependent Schrödinger equation"

# 招待講演

- [47] M. Ogata and H. Watanabe: Workshop on "Quantum Phases of Matter" Kavli Institute for Theoretical Physics at the Chinese Academy of Sciences (Beijing, China, June 24-27, 2007) "Fermi-Surface Reconstruction without Breakdown of Kondo Screening at the Quantum Critical Point"
- [48] M. Ogata and M. Mochizuki: Yamada Conference LXI and The 8th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2007) (Sendai, August 20-24, 2007) "Theoretical Study on the phase diagram of the bilayer sodium cobalt oxides"

- [49] M. Ogata: 20th International Symposium on Superconductivity (ISS2007) (Tsukuba, November 5-7, 2007) "Quantum Critical Point in Organic Conductors"
- [50] M. Ogata: Interaction and Nanostructural Effects in Low-Dimensional Systems: (YKIS2007) Symposium (Kyoto, November 21-23, 2007) "Ground states of the t-t'-J model for high- $T_c$  superconductivity"
- [51] M. Ogata and H. Watanabe: 2nd International Workshop on Materials Science and Nano-Engineering (Awaji Yumebutai International Conference Center, December 1-5, 2007) "Fermi-Surface Reconstruction without Breakdown of Kondo Screening at the Quantum Critical Point"

#### (国内会議)

- [52] 横山 寿敏、小形正男:日本物理学会、北海道大学 2007, 9.21-9.24 (年次大会) "フェルミ系とボース系のモット転移機構"
- [53] 五十嵐亮、小形正男:日本物理学会、北海道大学 2007,
   9.21-9.24 (年次大会) 22pWH-6 "ラットリング転移の古典 Potts 模型による解析"
- [54] 渡部洋、小形正男:日本物理学会、北海道大学 2007, 9.21-9.24 (年次大会) 23pWE-14 "重い電子系の量子 臨界点におけるホール係数とフェルミ面の変化 II"
- [55] 吉川俊彦、小形正男:日本物理学会、北海道大学 2007, 9.21-9.24 (年次大会) 21aWA-4 "二次元 t-t' ハバード 模型におけるフラストレーションと次元性の役割"
- [56] 松林大介、宇田川将文、小形正男:日本物理学会、北 海道大学 2007, 9.21-9.24 (年次大会) 22aWB-10 "時 間依存 Schrödinger 方程式による磁壁ダイナミクス の解析"
- [57] 青沼徹、伏屋雄紀、小形正男:日本物理学会、北海道 大学 2007, 9.21-9.24 (年次大会) 26pRB-16 "擬一次 元有機導体における磁気相関と超伝導相関:量子モン テカルロ法による解析"
- [58] 柳瀬陽一、M. Sigrist: 日本物理学会、北海道大学 2007, 9.21-9.24 (年次大会) "空間反転対称性が破れ た超伝導体の磁気的性質:スピン・軌道相互作用、ヘ リカル超伝導、異方的フェルミ面、反強磁性の効果"
- [59] 横山 寿敏、小形正男:日本物理学会、近畿大学 2008, 3.23-3.26(年次大会)"2次元ボースハバード模型の 性質"
- [60] 伏屋雄紀、小形正男、C. Bourbonnais:日本物理学 会、近畿大学 2008, 3.23-3.26 (年次大会) 25pTF-9 "磁場中擬一次元電子系の理論"
- [61] 渡部洋、小形正男:日本物理学会、近畿大学 2008, 3.23-3.26(年次大会)25pWR-7 "重い電子系の量子 臨界点における反強磁性転移とフェルミ面再構成"
- [62] 林勇太、小形正男:日本物理学会、近畿大学 2008, 3.23-3.26(年次大会)26pWB-8 "三角格子の異方性 とスピン液体"

- [63] 松林大介、宇田川将文、小形正男:日本物理学会、近 畿大学 2008, 3.23-3.26 (年次大会) 24aWL-7 "時間 依存 Schrödinger 方程式による磁壁ダイナミクスの 解析 II"
- [64] 青沼徹,伏屋雄紀,小形正男:日本物理学会、近畿大 学 2008, 3.23-3.26 (年次大会)25pTF-13 "擬一次 元有機導体のスピン相関および超伝導相関に対する 次元性の効果"
- [65] 湯川英美、小形正男:日本物理学会、近畿大学 2008, 3.23-3.26 (年次大会)24pTF-8 "*θ* 型,及び *θ*<sub>d</sub> 型 (BEDT-TTF)<sub>2</sub>X の電荷秩序に対する電場の効果の 平均場計算"
- [66] 柳瀬陽一:日本物理学会、近畿大学 2008, 3.23-3.26
   (年次大会)"反強磁性量子臨界点近傍の FFLO 超伝 導"
- [67] 湯川英美、小形正男:「分子性導体の機能・構造相関の研究と放射光利用」研究会(SPring-8 放射光普及棟、2007年6月2-4日)
   "(ET)<sub>2</sub>CsM'(SCN)<sub>4</sub>(M'=Zn, Co)の定電流下での2種類の電荷秩序の安定性"
- [68] 五十嵐亮、小形正男:「次世代ナノ情報機能・材料」成 果報告会(東京大学、2007, 7.13)"ラットリング転 移の古典 Potts 模型による解析"
- [69] 林勇太、小形正男:特定領域研究「新しい環境下における分子性導体の特異な機能の探索」第7回シンポジウム(東京大学20077.19-20)"一次元的三角格子スピン系の低エネルギー励起"
- [70] 柳瀬陽一: 公開研究会「理論から探る磁性科学の展 望」(東京大学、2007年7月)"空間反転対称性が破 れた系の磁性と超伝導"
- [71] 吉川俊彦、小形正男:21世紀COEプログラム「極限量子系とその対称系」シンポジウム2007、(小柴ホール、東京大学、2007,11.13-11.15)"量子クラスター理論による強相関電子系の研究"
- [72] 小形正男:第4回新超電導材料探索調査委員会(超 電導工学研究所、2007年11月)"高温超伝導体の理 論"
- [73] 柳瀬陽一:第4回新超電導材料探索調査委員会(超電 導工学研究所、2007年11月)"空間反転対称性が破 れた系の磁性と超伝導"
- [74] 横山 寿敏、小形正男:4 特定領域合同研究会「超伝 導が拓く物性科学の最前線」(首都大学東京、2007年 12月)"ボース粒子系のモット転移に対するダブロン-ホロン束縛効果"
- [75] 柳瀬陽一、萬 直行:4 特定領域合同研究会「超伝導 が拓く物性科学の最前線」(首都大学東京、2007年 12月)"不純物ドープされたバンド絶縁体近傍の局在 と超伝導:B-doped Diamond への適用可能性につい て"
- [76] 柳瀬陽一:新しい物理を生む新物質若手の会 第三回 会議(熱海後楽園ホテル、2007年12月)"空間反転 対称性が破れた系の磁性と超伝導"
- [77] 小形正男:科研費特定領域「異常量子物質の創製」2
   007年度成果報告会(名古屋大学、野依記念学術交流館2008年1月5-7)"t-t'-Jモデルの基底状態"

- [78] 伏屋雄紀、小形正男、福山秀敏:特定領域研究「新しい環境下における分子性導体の特異な機能の探索」 第8回シンポジウム。(東京工業大学、デジタル多目 的ホール2008, 1.7-1.9) "ディラック電子系における ホール効果の理論"
- [79] 伏屋雄紀:特定領域研究「新しい環境下における分子 性導体の特異な機能の探索」強相関電子物性 理論研 究会(湯河原荘 2008 2.11-13)"三角格子 t-J-K 模 型の基底状態:二次元<sup>3</sup>Heの有効模型として"
- [80] 横山 寿敏、小形正男:特定領域研究「新しい環境下 における分子性導体の特異な機能の探索」強相関電 子物性 理論研究会(湯河原荘 2008 2.11-13) "Mott 転移におけるダブロン-ホロン束縛の効果"
- [81] 林勇太、小形正男:特定領域研究「新しい環境下にお ける分子性導体の特異な機能の探索」強相関電子物性 理論研究会(湯河原荘 2008 2.11-13)"一次元的異方 性を持つ三角格子スピン系の RVB 平均場解析"
- [82] 伏屋雄紀、小形正男:「次世代ナノ情報機能・材料」成 果報告会 2008, 2.25-2.26 "二次元<sup>3</sup>He における新し い量子液体相の可能性"
- [83] 青沼徹:「次世代ナノ情報機能・材料」成果報告会 2008,
   2.25-2.26 "擬1次元系の超伝導に対する次元性の効果"
- [84] 小形正男:「新超電導物質探索に関する調査」成果報告会(女性と仕事の未来館ホール、2008年2月29日)"パネルディスカッション:まとめと提言"

- [85] 小形正男:「分子性導体の機能・構造相関の研究と放射光利用」研究会(SPring-8 放射光普及棟、 2007年6月2-4日)"分子性導体の電荷秩序研究の現状と問題点"
- [86] 小形正男:日本物理学会、北海道大学 2007, 9.21-9.24 (年次大会) 22aWJ-8 領域 8 シンポジウム「多層型銅 酸化物が拓く高温超伝導研究の新展開 反強磁性と 超伝導の協奏 Recent Progress in High-T<sub>c</sub> Superconductivity Through Multi-Layered Cuprates — Interplay of Antiferromagnetism and Superconductivity —」"Summary - understanding of the phase diagram in underdoped regime"
- [87] 小形正男:第2回科研費特別推進研究研究会「量子 ビームによる高温超伝導機構の解明」(五浦観光ホテ ル、2007, 12.14-15)"理論からみた高温超伝導— t-J Model —"
- [88] 伏屋雄紀、小形正男、福山秀敏:公開研究会「理論から探る磁性科学の展望」(東京大学、2007年8月1-3)
   "軌道磁化率とホール伝導度におけるバンド間磁場効果 Biの場合"
- [89] 伏屋雄紀、小形正男、福山秀敏:分子性ゼロギャップ 物質の新物性(基礎物理学研究所 2007, 12.3-12.4)" ビスマス中ディラック電子の理論"
- (セミナー)
- [90] M. Ogata: Lecture course in Cargese Summer School 50th Anniversary of BCS "From BCS to Exotic Superconductivity" (Cargese France, July 16-28, 2007)

- [91] 小形正男:青山学院大学、2007年6月29日 "Fermi surface reconstruction with Kondo screening at quantum critical point"
- [92] 小形正男:名古屋大学、2007年10月11日 "Fermi surface reconstruction with Kondo screening at quantum critical point"
- [93] 柳瀬陽一:大阪大学、2007年4月 "空間反転対称性 が破れた系の反強磁性と超伝導"
- [94] 柳瀬陽一: 原子力機構計算機科学センター、2007年 7月 "乱れた電子系の超伝導"
- [95] 柳瀬陽一:青山学院大学、2007 年 8 月 "空間反転対 称性が破れた系の磁性と超伝導"
- [96] 柳瀬陽一:九州工業大学、2007年10月"空間反転対 称性が破れた系の磁性と超伝導"
- [97] 柳瀬陽一:東京工業大学、2008年1月 "空間反転対 称性が破れた系の超伝導"
- [98] 伏屋雄紀:第2回 Super Clean コロキウム、東京大 学 2007, 4.24 "三角格子 *t-J-K* 模型の性質"
- [99] Y. Fuseya: Universite de Sherbrook, May 31, 2007 "Anomalous properties due to dimensionality effect in Q-1D electron systems"
- [100] Ryo Igarashi and Masao Ogata: ETH Zürich, 2007, 6.26 "Understanding frustration effect of rattling motion of K ion in  $\rm KOs_2O_4$ "

# 3.4 常行研究室

第一原理分子動力学法など基本原理に基づく計算 機シミュレーションは、観測や実験からは得られな い物性情報を得たり、あるいは実験に先んじた予言 を行うことを可能にする。当研究室では主にそのよ うな計算物理学的手法を開発しながら、物性物理学 の基礎研究を行っている。電子相関の強い系や2成 分量子系を取り扱うための新しい第一原理電子状態 計算手法の開発,超高圧下など極限条件下の結晶構 造探索と物性予測,固体表面の構造・電子状態・化 学反応機構,水素を含む固体の量子効果,強誘電体 の電子物性などが主要な研究テーマである。

## 3.4.1 固体表面の構造と電子状態

シリコン表面での有機分子の化学吸着と電場への応答

シリコン電極上に化学吸着した有機分子の単分子 レベルでの電気伝導特性を理解するための重要な要 素として、シリコン表面における各種有機分子の吸 着構造の原子レベルでの規定、およびその吸着状態 への電場の影響に関する知見は不可欠である。我々 は密度汎関数法に基づく第一原理計算の手法を用い て、有機分子、特に不飽和炭化水素類のシリコン表 面への化学吸着メカニズムと吸着構造の関係を明ら かにするとともに、その吸着系に電場をかけた際の 電子状態の変化を調べることで電気伝導特性を解析 することを目的とした研究を行っている。

平成 19 年度は  $C_{12}H_{25} \sim C_{16}H_{31}$  の長鎖アルキル 基や、アセチレンおよびその誘導体などのアルキン 分子、1,4-シクロヘキサジエン分子などの環式アルケ ン分子のシリコン表面吸着系の電場下での電子状態 や吸着プロセスを、吉信研究室(物性研究所)での 実験と突き合わせて議論した。

n-Si(111) 縮退半導体表面を長鎖アルキル基でモノ レイヤー修飾した系の I-V 特性に見られる非対称性 の由来を調べるために、C<sub>12</sub>H<sub>25</sub> および C<sub>16</sub>H<sub>31</sub> の系 に電場を印加して電子状態の変化を調べたところ、 分子軌道の重みがアルキル鎖先端(真空側)に近い ほど軌道エネルギーが基板由来の状態密度に対して 大きくシフトし、負のサンプルバイアスをかけると LUMO 軌道として系のフェルミ準位に近づいてくる 様子が明らかになった (図 3.4.7)。また、表面法線方 向に沿った局所状態密度の変化を追跡することで、電 圧をかけた際の電子のトンネリングに関与できる状 態数の立ち上がりが C<sub>16</sub>H<sub>31</sub> 系では C<sub>12</sub>H<sub>25</sub> 系よりも 遅いことが確認され、電場の影響で分子軌道の軌道 エネルギーがシフトする効果を考慮した共鳴トンネ リング機構によってこの系の I-V 特性が説明できる ことを明らかにした。

また、Si(001) 表面でのアルケン分子の化学吸着ブ ロセスについては、これまでに 90K 程度の低温にお ける反応の選択則についての理解を前駆状態の構造 と電子状態に注目した議論を通して深めてきたが、 実際の反応は室温条件で行われることも多く、今年 度は吸着する際の温度が低温か室温かに依存して異 なる終状態を示す 1.4-シクロヘキサジエン分子を対 象として研究を進めた。その結果、低温ではSi(001) 表面の c(4 × 2) 構造の向かい合った Sd サイトを結 ぶ形で分子内の2つの二重結合が $\pi$ -complex 状態を 形成した後に di- $\sigma$ 型の終状態に移行できるが、分子 の形状に由来した立体障害が原因でこの経路は室温 では不安定になることが示唆された。そこで、室温 で有効な経路として基板表面の Si ダイマーの運動を 考慮したものを計算の立場から提案し、実験による 検証でフィードバックをかけながら候補を絞り込む 作業を進めた。



図 3.4.7: Si 表面に吸着した C<sub>12</sub>H<sub>25</sub> のエネルギー準位と その電場依存性。

SiC 酸窒化膜の構造安定性と電子状態

炭化ケイ素 (SiC) は新しい半導体として期待され ながら、シリコンに比べて良質の絶縁膜形成が困難 であることから実用化が難しい物質である。ところ が最近になって、SiC(111) 面にきわめて薄く絶縁性 の高い酸窒化膜 (SiON) が容易に形成できることが、 九州大学の栃原グループによって報告された。この 膜は完全な結晶でありながら表面にダングリングボ ンドが無く、数原子層の厚さしかないにもかかわら ず STS で観測されたエネルギーギャップは SiO<sub>2</sub> と ほぼ等しい。また自然界ではほとんどみられない直 線状 Si-O-Si 結合を含んでいるというのが LEED に よる構造解析結果である。

これらの特異な性質とその性質を調べるため、我々 は第一原理計算に基づく構造最適化と電子状態の詳 細な解析を行った。その結果、直線状 Si-O-Si を含 め、実験的に決められた構造は理論的にも最安定で あること、深さ方向のエネルギーギャッププロファイ ルから、大きなギャップが非常に薄い SiON 膜によっ て実現されていることなどを確認した。表面状態の 2次元バンド構造についても、実験結果とほぼ一致 する結果が得られた。

## Ni表面に吸着したSO<sub>2</sub>分子の電子状態

金属表面への分子吸着機構の解明は触媒反応を理 解するための重要なステップである。物性研/SPring-8の辛グループでは、軟X線発光分光法により、Ni 表面へのSO2吸着系のエネルギースペクトルを波動 関数の対称性ごとに分離して観測することに成功し た。このスペクトルには孤立SO2分子のスペクトル にくらべて、HOMO近傍に分子と金属表面との相互 作用をあらわすと思われる幅広い余分なピークが観 測される。

我々はモデルクラスターを用いて軟X線発光スペクトルのシミュレーションを行い、実験と定量的に非常によく一致するスペクトルを得ることに成功した(図3.4.8)。その結果から、孤立分子と比べた各ピークのシフトを説明し、HOMO近傍の幅広いピークが分子軌道とNi表面の3d軌道との相互作用によって生じることを明らかにした。

# N/Cu(001) 面の自己組織化構造

Cu(001)清浄表面に N 原子を吸着させると,理想 的には fourfold hollow と呼ばれるサイトに吸着し,  $c(2 \times 2)$ 再構成表面ができる。ところがこの被覆率 を 0.25-0.3ML 程度にすると,銅の表面に窒素原子 が一辺 5nm の正方形を形作るように吸着し,それが 規則正しく整列するという自己組織化が起きること が知られている。このようなスケールの大きな自己 組織化には,吸着した窒素原子間の有効引力の存在 に加え,原子吸着によって下地に生じる格子歪を通 して,吸着子間が長距離相互作用することが重要で あると考えられる。我々はその微視的機構を明らか



図 3.4.8: Ni 表面に吸着した SO<sub>2</sub> 分子の軟 X 線発光スペ クトルの実測データと理論計算結果。

にするために,吸着子間相互作用と格子歪を考慮した最も単純なモデルを考え、モデルパラメータを第 一原理計算を用いて決定して、モンテカルロ法により自己組織化のシミュレーションを行った。その結果、第2層の原子を固定した薄膜モデルでは実験のような規則構造は得られなかったが、表面弾性格子 グリーン関数を用いて下地の歪の効果を正しく取り入れることによって、実験と同様の非常にきれいな 規則構造を再現することができた(図3.4.9)。この ことから、N/Cu(001)面の自己組織化には、格子歪 による遠距離相互作用が重要であることがわかった。

# 3.4.2 固体の構造と電子状態

ペロフスカイト型強誘電体 Ba<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>TiO<sub>3</sub>

ATiO<sub>3</sub> (A=Sr, Ba, Pb 及びその混合体) で示され るペロブスカイト型酸化物は、コンデンサ等の電子 部品セラミックス材料の原料として産業上重要な役 割を担っているほか, ピエゾ効果をつかったピエゾ素 子などにも利用されている。ごく最近、東工大の伊 藤・腰原グループの共同研究によりにより、BaTiO<sub>3</sub> の Ba を 30%まで Ca に置換した単結晶の育成法が



図 3.4.9: Cu(001) 表面に窒素原子を吸着させて得られる 自己組織化構造。左はシミュレーション結果,右は小森グ ループ(東大物性研)が走査プロープ顕微鏡で観測した画 像(シミュレーションと下地 Cu の結晶方位が一致するよ うに回転したもの)。

見出された。この系は Ca の量を変えると強誘電相 転移の相図が大きく変化すること、また鉛フリーで ありながら巨大なピエゾ効果をしめすことから、応 用への期待がかかる一方、Ca 置換がどのような役割 を果たしているかは実験だけからは理解できない。

我々は伊藤・腰原グループとの共同研究により、 Ca置換効果を明らかにする目的で、 $Ba_{1-x}Ca_xTiO_3$ (x = 0, 1/4, 1/8)の安定構造に関する第一原理計算 を行った。その結果、通常のATiO<sub>3</sub>でみられるよう なTi原子の変位だけでなく、この系ではCa原子の 大きな変位が生じて物性を左右することが明らかに なった。

超高圧合成された3次元C60ポリマー

C60 フラレン分子がつくる分子性結晶をある条件 で超高圧圧縮すると、シグマ結合によって C60 が 3 次元的につながった結晶ができることが、広島大学 の山中グループによって最近報告されている。フラ レンの分子性結晶は絶縁体であるが、この3次元ポ リマー相は実験的には金属であり、それにもかかわ らずダイヤモンドなみに硬度が高い物質であるとい われている。我々はこの系の構造と電子状態を理解 すべく、第一原理計算を行っている。自由度が大き く非常に計算の難しい系であるが、これまでの計算 では実験的に得られた構造とは若干違ったポリマー 構造が安定であること、エネルギーの近い状態が複 数あること、またいずれの場合にも系は金属となる ことなどが示されている。エネルギー密度解析によ り、複数の構造による安定性の差異は sp<sup>3</sup>的ボンド と sp<sup>2</sup> 的ボンドの数で特徴づけられることも明らか になった。

# 3.4.3 タンパク質の電子状態

近年,密度汎関数法やフラグメント MO 法などの 量子化学的な手法を用いた,タンパク質の大規模電 子状態計算の試みが報告されるようになり,将来的に は生体反応や生体物質機能の電子論に基づく理解に つながるものと期待されている。そこで我々は,複雑 なタンパク質の電子状態を理解する手段として,タ ンパク質の構成ユニットであるアミノ酸の分子軌道 を用いた電子状態解析手法を開発している。これま でに、ペプチド結合部位を残すようにタンパク質を 寸断した擬アミノ酸ユニットの HOMO-LUMO 近傍 の軌道を用いて、ポリペプチドの波動関数を精度良 く展開できること、さらには主鎖と側鎖の軌道にも 分割できることを示してきた。現在、大規模系への 適用を目指し、プログラム開発を進めている。

# 3.4.4 シミュレーション手法の開発

トランスコリレイティッド法に基づく第一原理電子 状態計算手法の開発

当研究室では電子相関効果を考慮した電子状態計算 手法であるトランスコリレイティッド (TC) 法を固体 系に適用してきた。TC法は1969年にBoysとHandy によって初めて提案され,従来は原子・分子系に多く適 用されてきた方法である。TC法において波動関数は、 相関波動関数  $F\Phi$  で表される。  $\Phi$  はスレーター行列式 であり , F はジャストロウ関数  $F = \exp[-\sum_{i < j} u_{ij}]$ である。ここで $u_{ij}$ はジャストロウ因子と呼ばれる 2体関数である。<br />
多体ハミルトニアン H を相似変換 することにより有効ハミルトニアン  $H_{TC} = F^{-1}HF$ が得られ,これを用いることにより,多体積分を行 うことなく3体積分までで必要な積分を全て計算す ることができる。この有効ハミルトニアンのエネル ギー分散を最小化することで, TC法における1電 子軌道および軌道エネルギーが求められる。この軌 道エネルギーに関しては, ハートリーフォック (HF) 法と同様にクープマンスの定理が成り立つため,全 エネルギー計算と同時に固体のバンド構造を求める ことが可能である。

今年度は TC 法を様々な半導体、絶縁体に適用し、 特にイオン性が強くバンドギャップの大きな絶縁体 において、TC 法が局所密度近似に基づく密度汎関 数法 (DFT) に比べて実測に近いパンドギャップを与 えることを示した (図 3.4.10)。またいくつかの系 で全エネルギーの計算も行い、結晶格子定数が正し く得られることを確認した。TC 法の最大の欠点は DFT よりも格段に計算コストが大きいことである。 そこで、SCF(自己無憧着計算)を行わない、いわゆ る'one shot' 計算や、3 体積分の近似法などの開発を 進めている。

## 直接法によるフォノン計算

フォノン分散をブリリュアンゾーン全域にわたっ て第一原理から計算する手法としては、密度汎関数 摂動論 (DFPT) がよく知られている。ところがこの 手法は単位胞の大きい複雑な結晶構造では計算が難



図 3.4.10: HF 法、TC 法、DFT(LDA) で求めた半導体、 絶縁体のバンドギャップとその実測値。

しく、また各 k 点において SCF 相当の計算を必要 とするため、フォノンの状態密度のように多くの k 点サンプリングを必要とする計算には不向きである。 そこで第一原理計算からいったん原子間相互作用を 抽出し、dynamicalo matrix を経由してフォノン分 散を計算する手法が提案されているが、イオン結晶 に適用する場合にはイオンの電荷や誘電率に実測値 が必要であるため、完全に非経験的な計算とは言え なかった。

我々は最局在ワニエ関数を用いたボルン電荷の計 算に加え、誘電率についても第一原理的に計算する コードを開発し、イオン結晶フォノンを完全に第一 原理から計算することに成功した。BaTiO3のテス ト計算では、DFPTと遜色のない精度の計算結果が 得られている。このコードは結晶対称性を使うこと で、単位胞の大きい系のフォノンも高速に計算する ことができる。

#### <報文>

(原著論文)

- K. Yagyu, K. Nakatsuji, Y. Yoshimoto, S. Tsuneyuki and K. Komori: 'Nanopattern formation on Cu(001) surface coadsorbed with nitrogen and oxygen' Surf. Sci., 601 (2007) 4837.
- [2] K. Nakamura, Y. Yoshimoto, R. Arita, S. Tsuneyuki, and M. Imada: 'Optical absorption study by ab initio downfolding approach: Application to GaAs', Phys. Rev. B (to appear); arXiv:0710.4371.
- [3] D. Fu, M. Itoh, S. Koshihara, T. Kosugi and S. Tsuneyuki: 'Anomalous phase diagram of ferroelectric (Ba,Ca)TiO<sub>3</sub> single crystals with giant



図 3.4.11: 3次元 C60 ポリマーの結晶構造と直接法で計 算されたフォノン状態密度。

electromechanical response', Phys. Rev. Lett. (to appear).

## (国内雑誌)

 [4] 赤木和人:「第一原理計算パッケージを使ってみる」, 表面科学 vol.29 (3), 160 (2007).

#### (学位論文)

- [5] (修士論文)安藤良記:「ガスハイドレートの構造と ゲスト分子依存性の理論研究」,東京大学 (2008).
- [6] (修士論文) Gangseop Jung (チョン・カンソプ) 'Extended ensemble molecular dynamics for predicting material structure', 東京大学 (2008).

#### <学術講演>

(国際会議)

- [7] Kazuto Akagi and Shinji Tsuneyuki: 'Cycloaddition of Alkene Molecules on Si(100) Clean Surface', 13th International Conference on Surface Science, Stockholm, Sweden, Jul. 5, 2007.
- [8] Kazuto Akagi: 'Cycloaddition of Alkene Molecules on Si(100) Clean Surface', ISSP International Workshop and Sympoium: Foundations and Applications of the Density Functional Theory, Kashiwa, Japan, Aug. 1, 2007.
- [9] Kazuto Akagi and Shinji Tsuneyuki: 'Unsaturated Hydrocarbon Molecules on Si(100) Clean Surface', The First Yonsei-Todai Joint Workshop on Physics, Tokyo, Japan, Aug. 31, 2007.

- [10] Kazuto Akagi and Shinji Tsuneyuki: 'Temperature Controlled Cycloaddition of Alkene on Si(100) Surface', 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-9), Tokyo, Japan, Nov. 13, 2007.
- [11] Kazuto Akagi: 'Unsaturated Hydrocarbon Molecules on Si(100) Clean Surface', WPI & IFCAM Joint Workshop, Sendai, Japan, Feb. 18, 2008.
- [12] Keitaro Sodeyama, Rei Sakuma and Shinji Tsuneyuki: 'Transcorrelated method applied to solids: total energy and band structure calculation', ISSP International Workshop and Symposium on "Foundations and Applications of the Density Functional Theory", Kashiwa, Chiba, Japan, Aug. 1-3, 2007.
- [13] Keitaro Sodeyama, Takashi Tokushima, Shinji Tsuneyuki and Shik Shin: 'Ab initio study of the soft x-ray emission spectroscopy of SO2/Ni(100)', The International workshop on "Electron transport through a linked molecule in nano-scale", Hongo, Tokyo, Japan, Aug. 18-20, 2007.
- [14] Keitaro Sodeyama, Shinji Tsuneyuki and Rei Sakuma: 'Transcorrelated method applied to covalent and ionic solids: total energy and band structure calculation', March Meeting of The American Physical Society, Louisiana, New Orleans, USA, Mar. 10-14, 2008.
- [15] S. Furuya and S. Watanabe: 'Electric Properties of Atomic Chains under Finite Bias Voltages: A First-Principles Study', The International Workshop on "Electron transport through a linked molecule in nano-scale", Tokyo, Japan, Aug. 18-20, 2007.
- [16] Taichi Kosugi and Shinji Tsuneyuki: 'Firstprinciples calculation of phonon dispersion of  $Ba_{1-x}Ca_xTiO_3$ ', March Meeting of The American Physical Society, Louisiana, New Orleans, USA, Mar. 10-14, 2008.
- [17] Yasunobu Ando, Hiroyasu Fujiwara, Kazuto Akagi, Shinji Tsuneyuki, Tetsuroh Shirasawa and Hiroshi Tochihara: 'First-Principles Study of an Epitaxial Silicon Oxynitride Layer on a SiC Surface', 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures(ACSIN-9), Tokyo, JAPAN, November 11-15, 2007
- [18] Y. Iwazaki, T.Suzuki, H.Kishi and S.Tsuneyuki: 'First Principles Calculation for Valence States of Mn in SrTiO<sub>3</sub>, The 16th International Symposium on the Application of Ferroelectrics (2007), Nara, Japan, May 27-30, 2007
- [19] K. Nakamura, T. Kosugi, Y. Yoshimoto, R. Arita, and M. Imada: 'GW-based ab initio downfolding aiming at strongly correlated electron system', March Meeting of The American Physical Society, Louisiana, New Orleans, USA, Mar. 10-14, 2008.

- [20] S. Tsuneyuki: 'A wave-function approach to solids', ISSP International Workshop and Symposium on "Foundations and Applications of the Density Functional Theory", Symposium (invited), Kashiwa, Japan, Aug. 1-3, 2007.
- [21] S. Tsuneyuki: 'Transcorrelated method: another possible way towards electronic structure calculation of solids', ISSP International Workshop and Symposium on "Foundations and Applications of the Density Functional Theory", Workshop (invited), Kashiwa, Japan, Aug. 6, 2007.
- [22] S. Tsuneyuki: 'A New Variational Approach to Strongly Correlated Electrons: from 1D Hubbard Model to the First-Principles Hamiltonian', YKIS2007"Interaction and Nanostructural Effects in Low-Dimensional Systems", Symposium (invited), Kyoto, Nov. 23, 2007.
- [23] Kazuto Akagi: 'Unsaturated Hydrocarbon Molecules on Si(100) Clean Surface', The International workshop on "Electron transport through a linked molecule in nano-scale", Tokyo, Japan, Aug. 5, 2007.

#### (国内会議)

- [24] 常行真司、赤木和人、小堀知輝:「アミノ酸の分子軌 道を用いたタンパク質の電子状態解析」,研究会「分 子系の構造と電子状態 『生物物質科学』を目指し て」(理研),和光,2007.4.4-6.
- [25] 常行真司:「『第一原理からの物性予測』からの進展」, シンポジウム「計算物性物理の進展と今後の展望」(東 京大学),2007.5.12.
- [26] S. Tsuneyuki, T. Kobori, K. Akagi, H. Fukuyama and K. Terakura: 'Electronic Structure of a Protein as a Molecular Assembly of Amino Acids', d-研究会(北陸先端大), 2007.9.13-14.
- [27] 常行真司:「表面自己組織化と第一原理ナノ構造探査」,「次世代ナノ情報機能・材料」成果報告会(東京大学),2007.7.13-14.
- [28] 常行真司:「アミノ酸集合体として見たタンパク質の 電子状態」,理研理事長ワークショップ「生物物質科学 金属を含む分子系を中心に一」(箱根),2007.12.3.
- [29] 常行真司:「アミノ酸集合体として見たタンパク質の電子状態」,首都大学東京理工学研究科セミナー, 2007.12.5.
- [30] 赤木和人、常行真司:「Si(001) 表面におけるエチレン・アセチレンの反応経路の詳細」,日本物理学会年次大会,札幌(北海道),2007年9月22日.
- [31] 赤木和人:「有機分子のシリコン表面への化学吸着プロセスの第一原理計算による解明」,物性研究所短期研究会:計算物性物理学の進展,柏(千葉),2007年11月1日.

- [32] 赤木和人、常行真司:「Si(100) 表面に凝集した水分子の振る舞い:孤立ダングリングボンドの消失とH/D 交換効果」,水素量子アトミクス第6回研究会「低温 凝縮系における水素の化学と物性」,札幌(北海道), 2007年12月15日.
- [33] 赤木和人、常行真司:「Si(100) 表面における 1,4-シク ロヘキサジエンの吸着状態と温度依存性」,日本物理 学会 年次大会,東大阪(大阪),2008 年 3 月 25 日.
- [34] 袖山慶太郎,佐久間怜,常行真司:「平面波基底を用いたトランスコリレイティッド法の固体系への応用」,第1回分子科学討論会2007,仙台,宮城,2007年9月17-20日.
- [35] 袖山慶太郎,佐久間怜,常行真司:「トランスコリレ イティッド法の固体への応用:バンドギャップと全エ ネルギー」、日本物理学会第62回年次大会,札幌, 北海道、2007年9月21-24日.
- [36] 袖山慶太郎,佐久間怜,常行真司:「トランスコリレ イティッド法の共有結合性およびイオン性固体への応 用」、物性研短期研究会「計算物性物理学の進展」、 柏,千葉,2007年11月1-2日.
- [37] 袖山慶太郎,佐久間怜,常行真司:「相関波動関数を 用いた電子状態計算:トランスコリレイティッド法の 固体への応用」,第3回「電子状態計算における電子 相関の諸問題」研究会,金沢,石川, 2007年12月 10-11日.
- [38] 袖山慶太郎, 佐久間怜,常行真司:「平面波基底を用 いたトランスコリレイティッド法による固体の第一原 理計算」,若手研究会「理論分子科学のフロンティア を探る」, 岡崎,愛知,2008年1月15-17日.
- [39] 袖山慶太郎,徳島高,常行真司,辛埴:「SO2/Ni(100) における軟X線発光スペクトルの第一原理計算」、日本物理学会第63回年次大会、大阪、2008年3月 22-26日.
- [40] 古家真之介,常行真司:「表面構造シミュレーションのための弾性格子グリーン関数法プログラムの作成」, 「次世代ナノ情報機能・材料」成果報告会,東京大学 (文京区),2007 年7月13-14日.
- [41] 古家真之介, 遠藤良, 常行真司:「基板の歪みを考慮した表面吸着構造の理論解析」, 日本物理学会第62回年次大会, 北海道大学(札幌市), 2007年9月21-24日.
- [42] 古家真之介,常行真司:「弾性格子グリーン関数法を 用いた表面自己組織化構造のシミュレーション」,次 世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開 発第2回公開シンポジウム,自然科学研究機構(岡崎 市),2008年3月4-5日.
- [43] 古家真之介,常行真司:「基板の歪みを考慮した表面 自己組織化構造の理論解析」,日本物理学会第63回年 次大会,近畿大学(東大阪市),2008年3月22-26日.
- [44] 古家真之介,常行真司:「弾性格子グリーン関数法を用 いた表面自己組織化構造のシミュレーション」,ナノ 磁性研究会,ホテル北野プラザ六甲荘(神戸市),2008 年3月26-27日.
- [45] チョン カンソプ,吉本芳英,常行真司:「拡張アンサ ンプル法でみる一次相転移」,日本物理学会第62回 年次大会,札幌(北海道),2007年9月24日.

- [46] 常行真司, 古家真之介, 吉本芳英:「窒素吸着 Cu(001) 表面の自己組織化機構」, 文部科学省次世代スーパー コンピュータプロジェクト ナノ分野グランドチャレ ンジ研究次世代ナノ統合シミュレーションソフトウエ アの研究開発 次世代ナノ情報機能・材料」研究会, お 茶の水(東京), 2008 年 2 月 25 日.
- [47] 小杉太一、常行真司、符徳勝、伊藤満、腰原伸也:
   「Ba<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>TiO<sub>3</sub> 単結晶の第一原理計算」,日本物 理学会年次大会,札幌,2007年9月21日.
- [48] 小杉太一、中村和磨、常行真司:「フォノン分散の第 一原理計算」物性研短期研究会「計算物性物理学の進 展」2007 年 11 月 1 日.
- [49] 小杉太一、常行真司:「Ba<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>TiO<sub>3</sub> におけるフォ ノン分散の第一原理計算」,日本物理学会 年次大会, 大阪,2008 年 3 月 22 日.
- [50] 小堀知輝、常行真司、赤木和人、福山秀敏、寺倉清之: 「アミノ酸集合体として見たタンパク質電子状態モデ ル化」日本物理学会, 札幌(北海道),2007/9/21
- [51] 小堀知輝、常行真司、赤木和人、福山秀敏、寺倉清之: 「アミノ酸集合体として見たタンパク質電子状態モデ ル化」分子研、岡崎(愛知),2008/3/4
- [52] 安藤康伸,藤原弘康,赤木和人,常行真司,白澤徹郎, 栃原浩:「SiC(0001) 表面上 SiON 超薄膜の電子状 態計算」,物性研究所短期研究会,「計算物性物理学 の進展」,物性研究所,2007年11月1日、2日
- [53] 安藤康伸,藤原弘康,赤木和人,常行真司,白澤徹郎,栃 原浩:「SiON/SiC (0001) 表面系の電子状態に関す る理論的解析」,次世代ナノ統合シミュレーションソ フトウェアの研究開発,「第二回公開シンポジウム」, 分子科学研究所,2008 年 3 月 4 日、5 日.
- [54] 安藤康伸,藤原弘康,赤木和人,常行真司,白澤徹郎, 栃原浩:「SiON/SiC (0001) 表面系における電子状 態の理論的解析」,日本物理学会,「第 63 回年次大 会」,近畿大学,2008 年 3 月 22-26 日.
- [55] 中村和磨、小杉太一「ウルトラソフト擬ポテンシャルの下での constrained DFT 計算」日本物理学会 2007年秋季大会,北海道大学(北海道),2007年9月24日.
- [56] 中村和磨、小杉太一、吉本芳英、有田亮太郎、今田正 俊「強相関電子系に対する第一原理計算:GW-based ab initio downfolding 法の開発と実装」日本物理学 会 年次大会,近畿大学(大阪), 2008 年 3 月 23 日.
- [57] 岩崎 誉志紀, 鈴木 利昌, 常行 真司:「SrTiO<sub>3</sub> におけ る Mn 微量添加元素の第一原理電子状態計算」, 日 本物理学会 年次大会, 札幌(北海道), 2007 年 9 月 23 日.
- [58] 岩崎 誉志紀,常行 真司:「DFT プログラムへの Pseudo SIC の実装とその効果」,「次世代ナノ情報機能・材 料」成果報告会,東京,2008 年 2 月 25 日.
- [59] 岩崎 誉志紀, 鈴木 利昌, 常行 真司:「誘電体点欠陥 の電子状態計算における Pseudo SIC の効果」, 日本 物理学会 年次大会, 東大阪市(大阪), 2008 年 3 月 23 日.

- [60] 常行真司 「極限条件下の物質科学と第一原理計算」, 早稲田大学理工学部物質開発工学科(武田研)セミ ナー(早稲田大学),2007.6.22.
- [61] 常行真司: 'Transcorrelated method: another possible way towards electronic structure calculation of solids', CMD ワークショップ(高等研), 2007.9.15.
- [62] 岩崎誉志紀,常行真司:「ペロブスカイト型酸化物に おける欠陥・不純物の第一原理計算」,第92回応 用セラミックス研究所講演会,東京工業大学,2007年 7月11日

# 4 物性実験

# 4.1 藤森研究室

藤森研究室では,光電子分光,軟X線磁気円二色 性などの分光手法により強相関電子系の研究を行っ ている.高温超伝導体,強相関酸化物,磁性半導体 を研究対象として,それらの物質が示す金属-絶縁体 転移(モット転移,アンダーソン転移,電荷・軌道整 列),超伝導,擬ギャップ現象,巨大磁気抵抗,巨大熱 電能の機構解明をめざしている.実験室における極 紫外・軟X線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,SPring-8, 広島大放射光,スタンフォード放射光研究所,バー クレー放射光施設,台湾放射光施設で紫外光から硬 X線にわたる光源を用いた共同利用実験,共同研究 を行っている.

# 4.1.1 高温超伝導

銅酸化物における高温超伝導現象は,その発見以 来20年間多くの研究が積み重ねられてきたが,機構 解明に至っていない.この世紀の難問の解決に向け て,光電子分光,とくに角度分解光電子分光(angleresolved photoemission spectroscpy: ARPES)は非 常に重要な役割を果たしている.

## 1層型高温超伝導体の電子構造の発展

結晶構造が最も単純な1層型高温超伝導体の電子状態のホールドーピングによる発展を,光電子分光により調べ検討した.今回測定した $\operatorname{Bi}_2\operatorname{Sr}_{2-x}\operatorname{La}_x\operatorname{CuO}_{6+\delta}$ は,以前に測定した $\operatorname{La}_{2-x}\operatorname{Sr}_x\operatorname{CuO}_4$ と異なり,化学ポテンシャルはピン止めされず,バンド分散の形状は変化しなかった.これらの差異を,Cu原子と頂点酸素原子との距離の違いにより説明した[31].

# 4.1.2 強相関酸化物

遷移金属酸化物は,高温超伝導の他にも金属-絶縁 体転移,巨大磁気抵抗,スピン・電荷・軌道・格子 の自由度の絡んだ現象など非常に多彩な物性を示す. さらに,遷移金属酸化物がつくる界面は,それぞれ のバルクにはない新しい物性・機能を発現し,それ らを理解することが将来の「酸化物エレクトロニク ス」の実現にとって必須である.光電子分光により, これらの物質のバンド構造・フェルミ面,電荷・軌 道・格子の揺らぎなど,多くの重要な知見を得るこ とができる.

## 乱れた金属

乱れた金属の状態密度がフェルミ準位で $\sqrt{E}$ 的な 特異点を示すことが、Altshuler-Aronovにより理論 的に示されている.本研究では、二重ペロブスカイ ト型結晶構造を持つ $Sr_2FeMoO_6$ のFe/Moサイト における原子配列の乱れを試料作製時に制御し、高 分解能の光電子分光測定・解析を行うことによって Altshuler-Aronovの検証に成功した[10].

## 強誘電体薄膜における強誘電性の消失限界

電子デバイスの高度集積化に伴い,強誘電性がど のくらい小さなサイズまで維持されるかが重要となっ ている.強誘電体 Ba<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>TiO<sub>3</sub> 薄膜の光電子分光 スペクトルの温度変化が膜厚約 2.5 nm 以下で消失 することを見出し,Ba<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>TiO<sub>3</sub> の強誘電性臨界 膜厚が約 2.5 nm であると結論した [11].

#### 絶縁体間の界面に出現する金属状態の起源

バンド絶縁体-モット絶縁体界面 SrTiO<sub>3</sub>/LaTiO<sub>3</sub> の金属的伝導の起源を探るために,同じ電子配置を 持つバンド絶縁体-モット絶縁体界面 TiO<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub>(低 温相)を光電子分光で調べ,金属状態が出現しないこ とを見出した.前者は界面で極性が不連続,後者は 連続であることから,界面における極性の不連続性 が金属的伝導引き起こしていると結論した[16].

#### 極性多層膜構造における電荷再構成

ともに極性をもつ LaAlO<sub>3</sub> 層と LaVO<sub>3</sub> 層の界面で V の価数が増加することを LaAlO<sub>3</sub>/LaVO<sub>3</sub> 多層膜 の内殻光電子分光の測定により見出した.この増加 は ... /AlO<sub>2</sub>/LaO/VO<sub>2</sub>/LaO/ ... では起こるが, .... /LaO/VO<sub>2</sub>/LaO/AlO<sub>2</sub>/ .... では起こらず, 静電ポ テンシャルの発散を抑える"電荷再構成モデル"で自 然に解釈できる [24].

# 二重交換相互作用による化学ポテンシャルの巨大変化

巨大磁気抵抗を示すことで知られるペロブスカイ ト型マンガン酸化物  $Nd_{1-x}Sr_xMnO_3$ の化学ポテン シャルを光電子分光により測定した.化学ポテンシャ ルの巨大な温度依存性が観測され,強磁性の起源と して提唱されている二重交換相互作用モデルの理論 的予想と一致した [19, 29]. 電荷秩序の基板圧力による抑制

格子定数が異なる単結晶基板にエピタキシャル成長 した薄膜は,基板からの巨大な圧力を感じる.このた め,電荷・軌道秩序を示すペロプスカイト型 $Pr_{1-x}Ca_xMnO_3$ は,LaAlO<sub>3</sub>基板に薄膜成長することにより電荷・ 軌道秩序が消失する.本研究では,基板圧力による  $Pr_{1-x}Ca_xMnO_3$ の電子状態の変化を光電子分光で詳 しく調べた [23].

# 4.1.3 スピントロニクス

従来の半導体エレクトロニクスにスピンの自由度 を導入する「半導体スピントロニクス」の実現には, 室温で強磁性を示す半導体の開発が必要不可欠である.軟X線磁気円二色性(x-ray magnetic circular dichroism: XMCD)を用いた元素・磁気応答選択的 な電子状態の研究は,強磁性半導体の開発に重要な 役割を果たす.

デジタル・ドーピングによる強磁性超格子

GaN に Mn をランダムにドープした磁性半導体 Ga<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>N は,キューリー点が室温を超えるとい う理論的予測があるにもかかわらず,強磁性の明確な 実験的証拠は得られていない.本研究では,GaN 中 に Mn 原子を層状にドープした超格子を XMCD を用 いて調べ,Mn が高濃度にドープされた Ga<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>N 層の Mn 原子がモーメントの小さな強磁性を担って いることを見出した [17].

#### 室温強磁性を示す希薄磁性半導体

室温で強磁性を示す磁性半導体  $Zn_{1-x}Cr_x$  Te の電 子状態を,光電子分光および XMCD で調べた. $Cr^{2+}$ イオンが Jahn-Teller 変形し,変形の軸はx,y,z軸 方向にランダム分布していることがわかった.フェルミ準位上の状態密度は検出限界以下で, $Ga_{1-x}Mn_x$ As などで考えられているキャリアー誘起強磁性では説 明できないことがわかった [27, 32].

<受賞>

- [1] 池田正樹:第3回放射光表面科学部会シンポジウム, ポスター賞(東大,2007年12月)
- [2] 池田正樹:第21回日本放射光学界年会・放射光科学 合同シンポジウム,学生会員発表賞(立命館大,2008 年1月)
- [3] 江端一晃:大学院新領域創成科学研究科長賞(2008 年3月)

<新聞·雑誌紹介記事>

[4] 「超電導を引き起こす電子,低温で動き高温は動か ず」日経産業新聞,2007年7月30日9ページ.

- [5] 「超伝導起こす"重い電子"の挙動解明」化学工業日報,2007年8月6日6ページ.
- [6] 「希土類金属・アクチノイド化合物の超電導や磁性の 現象解明」日刊工業新聞,2007年8月8日22ページ.
- [7]「発電の仕組み,熱電材料で解明」日経産業新聞,2007 年11月2日10ページ.
- [8] 高山一: JSPS の最近の注目論文から 高効率熱電材料の新たな設計指針を発見,日本物理学会誌 62 (2007) 857-859.

<報文>

#### (原著論文)

- [9] W. Meevasana, X.J. Zhou, S. Sahrakorpi, W.S. Lee, W.L. Yang, N. Mannella, T. Yoshida, Y.L. Chen, K. Tanaka, R.H. He, H. Lin, S. Komiya, Y. Ando, F. Zhou, W.X. Ti, J.W. Xiong, Z. X. Zhao, T. Sasagawa, T. Kakeshita, K. Fujita, S. Uchida, H. Eisaki, A. Fujimori, Z. Hussain, R. S. Markiewicz, A. Bansil, N. Nagaosa, J. Zaanen, T.P. Devereaux and Z.-X. Shen: Hierarchy of Multiple Many-Body Interaction Scales in High-Temperature Superconductors, Phys. Rev. B **75** (2007) 174506–1-7; cond-mat/0612541.
- [10] M. Kobayashi, K. Tanaka, A. Fujimori, S. Ray and D.D. Sarma: Critical Test for Altshuler-Aronov Theory: Evolution of the Density of States Singularity in Double Perovskite Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6</sub> with Controlled Disorder, Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 246401–1-4; arXiv:0704.1688.
- [11] Y.-H. Lin, K. Terai, H. Wadati, M. Kobayashi, M. Takizawa, J. I. Hwang, A. Fujimori, C.-W Nan, G. Liu, S.-I. Fujimori, T. Okane, Y. Saitoh and K. Kobayashi: Phase Change Observed in Ultrathin Ba<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>TiO<sub>3</sub> Films by *in-situ* Resonant Photoe-mission Spectroscopy, Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 222909–1-3; arXiv:0705.3675.
- [12] J.I. Hwang, Y. Osafune, M. Kobayashi, K. Ebata, Y. Ooki, Y. Ishida, A. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, K. Kobayashi and A. Tanaka: Depth Profile High-Energy Spectroscopic Study of Mn-Doped GaN Prepared by Thermal Diffusion, J. Appl. Phys. **101** (2007) 103709–1-6; condmat/0703429.
- [13] S. Yunoki, A. Moreo, E. Dagotto, S. Okamoto, S.S. Kancharla, R. Fishman and A. Fujimori: Electron Doping of Cuprates via Interfaces with Manganites, submitted to Phys. Rev. B 76 (2007) 064532– 1-11; arXiv:0705.0498.
- [14] H. Wadati, Y. Hotta, M. Takizawa, A. Fujimori, T. Susaki and H.Y. Hwang: Characterization of  $LaVO_x$  Thin Films by Photoemission Spectroscopy, J. Appl. Phys. **102** (2007) 053707–1-3.
- [15] S.-i. Fujimori, Y. Saitoh, T. Okane, A. Fujimori, H. Yamagami, S. Ikeda, Y. Haga, E. Yamamoto and Y. Onuki: Itinerant to Localized Transition

of f-Electrons in Antiferromagnetic Superconductor UPd<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, Nature Physics **3** (2007) 618-622; arXiv:0705.1734.

- [16] K. Maekawa, M. Takizawa, H. Wadati, T. Yoshida, A. Fujimori, H. Kumigashira, M. Oshima, Y. Muraoka, Y. Nagao and Z. Hiroi: Photoemission Study of TiO<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub> Interfaces, Phys. Rev. B **76** (2007) 115121–1-5; cond-mat/0611453.
- [17] J.I. Hwang, M. Kobayashi, G.S. Song, A. Fujimori, A. Tanaka, Z.S. Yang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, H.C. Jeon and T.W. Kang: X-Ray Magnetic Circular Dichroism Characterization of GaN/Ga<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>N Digital Ferromagnetic Heterostructure, Appl. Phys. Lett. **91** (2007) 072507–1-3; cond-mat/0703477.
- [18] Y. Ishida, H. Ohta, A. Fujimori and H. Hosono: Temperature Dependence of the Chemical Potential in Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub>: Implications for the Large Thermoelectric Power, J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 103709–1-4; cond-mat/0511149; selected for an Editor's Choice.
- [19] K. Ebata, M. Hashimoto, K. Tanaka, A. Fujimori, Y. Tomioka and Y. Tokura: Temperature-Dependent Photoemission Spectra, Spectral-Weight Transfer and Chemical-Potential Shift in Pr<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub>: Implications for Charge-Density Modulation, Phys. Rev. B **76** (2007) 174418–1-5; arXiv:0707.0160.
- [20] J. Okamoto, T. Okane, Y. Saitoh, K. Terai, S.I. Fujimori, Y. Muramatsu, K. Yoshii, K. Mamiya, T. Koide, A. Fujimori, Z. Fang, Y. Takeda and M. Takano: Soft X-Ray Magnetic Circular X-Ray Dichroism Study of Ca<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>RuO<sub>3</sub> across the Ferromangetic Quastum Phase Transition, Phys. Rev. B **76** (2007) 184441–1-5; arXiv:0711.1000.
- [21] H. Wadati, K. Tanaka, and A. Fujimori, T. Mizokawa, H. Kumigashira, M. Oshima, S. Ishiwata, M. Azuma and M. Takano: Photoemission and X-Ray Absorption Studies of the Temperature-Dependent Metal-Insulator Transition in  $\operatorname{Bi}_{1-x}\operatorname{La}_x\operatorname{NiO}_3$ , Phys. Rev. B **76** (2007) 205123–1-4.
- [22] A. Chikamatsu, H. Wadati, H. Kumigashira, M. Oshima, A. Fujimori, M. Lippmaa, K. Ono, M. Kawasaki and H. Koinuma: Gradual Disappearance of the Fermi Surface near the Metal-Insulator Transition in La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub>, Phys. Rev. B **76** (2007) 201103(R)–1-4; arXiv:0705.0621.
- [23] H. Wadati, A. Maniwa, A. Chikamatsu, I. Ohkubo, H. Kumigashira, M. Oshima, A. Fujimori, M. Lippmaa, M. Kawasaki and H. Koinuma: *In-situ* Photoemission Study of Pr<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub> Epitaxial Thin Films with Suppressed Charge Fluctuations, Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 026402–1-4; arXiv:0708.1387.
- [24] H. Wadati, Y. Hotta, A. Fujimori, T. Susaki, H. Y. Hwang, Y. Takata, K. Horiba, M. Matsunami,

S. Shin, M. Yabashi, K. Tamasaku, Y. Nishino, T. Ishikawa: Hard X-Ray Photoemission Study of LaAlO<sub>3</sub>/LaVO<sub>3</sub> Multilayers, Phys. Rev. B 77 (2008) 045122–1-6; arXiv:0704.1837.

- [25] T. Okane, Y. Takeda, J. Okamoto, K. Mamiya, S.i. Fujimori, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori and A. Ochiai: Soft X-Ray Absorption Magnetic Circular Dichroism Study of Uranium Monochalcogenides at U N<sub>4,5</sub> Absorption Edges, J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 024706–1-6.
- [26] M. Kobayashi, Y. Ooki, M. Takizawa, G. S. Song, A. Fujimori, Y. Takeda, K. Terai, T. Okane, S.-I. Fujimori, Y. Saitoh, and H. Yamagami: Photoemission and X-Ray Absorption Studies of Valence States in (Ni,Zn,Fe,Ti)<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Thin Films Exhibiting Photo-Induced Magnetization, Appl. Phys. Lett. **92** (2008) 082502–1-3; arXive:0711.2377.
- [27] Y. Ishida, M. Kobayashi, J.I. Hwang, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, T. Okane, K. Terai, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Fujimori, A. Tanaka, H. Saito and K. Ando: X-Ray Magnetic Circular Dichroism and Photoemission Study of the Diluted Ferromagnetic Semiconductor  $Zn_{1-x}Cr_xTe$ , Appl. Phys. Exp. **1** (2008) 041301–1-3; arXiv:0710.2170.
- [28] K. Terai, K. Yoshii, Y. Takeda, S.I. Fujimori, Y. Saitoh, K. Ohwada, T. Inami, and T. Okane, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Kobayashi, M. Kobayashi and A. Fujimori: X-Ray Magnetic Circular Dichroism and Photoemission Studies of Ferromagnetism in CaMn<sub>1-x</sub>Ru<sub>x</sub>O<sub>3</sub> Thin Films, Phys. Rev. B77 (2008) 115128–1-6.
- [29] K. Ebata, M. Takizawa, K. Maekawa, A. Fujimori, H. Kuwahara, Y. Tomioka, Y. Tokura: Chemical Potential Shift Induced by Double-Exchange and Polaronic Effects in Nd<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub>, Phys. Rev. B **77** (2008) 094422–1-5; arXiv:0710.4462.
- [30] H. Kumigashira, M. Minohara, M.Takizawa, A. Fujimori, D. Toyota, I. Ohkubo, M. Oshima, M. Lippmaa and M. Kawasaki: Interfacial Electronic Structure of SrTiO<sub>3</sub>/SrRuO<sub>3</sub> Heterojuctions Studied by *in situ* Photoemission Spectroscopy, Appl. Phys. Lett. **92** (2008) 122105–1-3.
- [31] M. Hashimoto, T. Yoshida, H. Yagi, M. Takizawa, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Tanaka, D.H. Lu, Z.-X. Shen, S. Ono and Y. Ando: Doping Evolution of the Electronic Structure in the Single-Layer Cuprates Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2-x</sub>La<sub>x</sub>CuO<sub>6+δ</sub>: Comparison with Other Single-Layer Cuprates, Phys. Rev. B 77 (2008) 094516-1-8; arxiv:0801.0782.
- [32] M. Kobayashi, Y. Ishida, J. I. Hwang, G. S. Song, A. Fujimori, C.-S. Yang, L. Lee, H.-J. Lin, D. J. Huang, C. T. Chen, Y. Takeda, K. Terai, S.-I. Fujimori, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, K. Kobayashi, A. Tanaka, H. Saito and K. Ando: Local Electronic Structure of Cr in the II-VI Diluted Ferromagnetic Semiconductor Zn<sub>1-x</sub>Cr<sub>x</sub>Te, New J. Phys., in press; arXiv:0804.3272.

[33] Y. Osafune, G. S. Song, J. I. Hwang, Y. Ishida, M. Kobayashi, K. Ebata, Y. Ooki, A. Fujimori, J. Okabayashi, K. Kanai, K. Kubo and M. Oshima: Depth Profile Photoemission Study of Thermally Diffused Mn/GaAs (001) Interfaces, J. Appl. Phys., in press; arXiv:0711.3257.

## (会議抄録)

- [34] M. Kobayashi, Y. Ishida, J.I. Hwang, G.S. Song, and A. Fujimori, C.-S. Yang, L. Lee, H.-J. Lin, D.J. Huang, and C. T. Chen, Y. Takeda, K. Terai, S-I. Fujimori, T. Okane, and Y. Saitoh, K. Kobayashi, A. Tanaka, H. Saito and K. Ando: Soft X-ray Magnetic Circular Dichroism and Photoemission Studies of II-VI Diluted Ferromagnetic Semiconductor Zn<sub>1-x</sub>Cr<sub>x</sub>Te, Proceedings of 4-th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (Spintech IV); J. Supercond. Nov. Magn. 20 (2007) 467-471.
- [35] T. Yoshida, X.J. Zhou, Z. Hussain, Z.-X. Shen, A. Fujimori, S. Komiya, Y. Ando, H. Eisaki and S. Uchida: Effect of Zn-Impurity Scattering in La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> Studied by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, Proceedings of 8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity High Temperature Superconductors VIII (M<sup>2</sup>S-VIII); Physica C 460 (2007) 872-873.
- [36] M. Hashimoto, K. Tanaka, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Okusawa, S.Wakimoto, K. Yamada, T. Kakeshita, H. Eisaki and S. Uchida: Relationship between the Superconducting Gap and the Pseudogap: Temperature-Dependent Photoemission Study of La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> and La<sub>2</sub>CuO<sub>4.10</sub>, *ibid*; Physica C 460 (2007) 884-885.
- [37] M. Lindroos, V. Arpiainen, S. Sahrakorpi, R.S. Markiewicz, X.J. Zhou, T. Yoshida, W. L. Yang, T. Kakeshita, H. Eisaki, S. Uchida, A. Fujimori, Z. Hussain, Z.-X. Shen and A. Bansil: Existence of a Quasiparticle Remnant in Angle-Resolved Photoe-mission Spectrum of La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>, *ibid*; Physica C 460 (2007) 941-942.
- [38] S.I. Fujimori, Y. Saitoh, T. Okane, H. Yamagami, A. Fujimori, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, H. Shishido, D. Aoki, S. Ikeda, Y. Haga, E. Yamamoto and Y. Onuki: Photoemission Study on Heavy Fermion Superconductors, Physical C 460 (2007) 657-658.
- [39] K. Ebata, H. Wadati, M. Takizawa, K. Maekawa, A. Fujimori, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, Y. Tomioka, H. Kuwahara, Y. Tokura: Photoemission Study of Perovskite-Type Manganites with Stripe Ordering, *Proceedings of International Conference on Macroscopic Quantum Phenomena in Complex Striped Matter - Stripes 2006*; J. Supercond. Nov. Magn. **20** (2007) 543-546.

- [40] M. Ikeda, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Unozawa, T. Sasagawa and H. Takagi: Angle-Resolved Photoemission Study of Lanthanide Substitution Effects in Electron-Doped High-T<sub>c</sub> Superconductors, *ibid*; J. Supercond. Nov. Magn. **20** (2007) 563-565; cond-mat/0612660.
- [41] S. Ideta, K. Takashima, M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Kojima and S. Uchida: Anisotropy of Gap and Kink Energies in the Trilayer High-T<sub>c</sub> Cuprate Superconductor Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10+δ</sub>, Proceedings of International Symposium on Lattice Effects in Cuprate High Temperature Superconductors; J. Phys.: Conf. Ser., in press.
- [42] W. Malaeb, T. Yoshida, M. Hashimoto, M. Takizawa, K. Ebata, A. Fujimori, H. Eisaki, T. Kakeshita, T. Sasagawa and S. Uchida: Temperature Dependence of the Chemical Potential in La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>, *ibid*; J. Phys. Conf. Ser., in press.
- [43] M. Ikeda, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, Y. Kaga, T. Sasagawa and H. Takagi: Effects of Annealing Process on the Electronic Structure of the Electron-Doped High-T<sub>c</sub> Superconductor Nd<sub>1.85</sub>Ce<sub>0.15</sub>CuO<sub>4</sub>, *ibid*; J. Phys. Conf. Ser., in press.

#### (綜説,解説,その他)

- [44] A. Fujimori: Comment on "Temper-Dependent Polarity Reversal ature in Au/Nb:SrTiO<sub>3</sub> Schottky Junctions", Journal Club for Condensed Matter Physics, http://www.condmatjournalclub.org/?p=518.
- [45] 藤森淳,吉田鉄平:フェルミ・アーク 高温超伝導 体の異常なフェルミ面,日本物理学会誌 62 (2007) 815-821.
- [46] 藤森淳,吉田鉄平:山田耕作氏のコメントに対する返 答,日本物理学会誌 63 (2008) 150.

#### (学位論文)

- [47] 小林正起: Soft X-Ray Spectroscopic Study of Oxide and Telluride-Based Diluted Magnetic Semiconductors (博士論文)
- [48] 滝沢優: Photoemission Study of Perovskite-Type Transition-Metal Oxide Thin Films and Multilayers (博士論文)
- [49] 橋本信: Photoemission Study of Single-Layer Cuprate High-Temperature Superconductors(博士 論文)
- [50] 江端一晃: Photoemission Study of Mixed-Valence Mn Oxides (博士論文,新領域創成科学研究科)
- [51] 宋敬錫: Characterization of the Electronic Structure of Transition Metals Doped in Semiconductors Using Photoemission and X-ray Absorption Spectroscopy (修士論文)

[52] 工藤諭: Temperature-Dependent Angle-Resolved Photoemission Study of High-T<sub>c</sub> Superconductors (修士論文,新領域創成科学研究科)

<学術講演>

(国際会議)

- [53] G.W.J. Hassink, N. Nakagawa, M. Takizawa, H. Wadati, L. Fitting, S.S.A. Seo, Y. Takata, K. Horiba, M. Matsunami, S. Shin, M. Yabashi, K. Tamasaku, Y. Nishino, D. Miwa, T. Ishikawa, T. Susaki, G. Rijnders, T.W. Noh, D.A. Muller, A. Fujimori, H.Y. Hwang, D.H.A. Blank: Electronic Effects in LaTiO<sub>3</sub>/LaAlO<sub>3</sub> Superlattices, *Materials Research Society 2007 Spring Meeting* (San Fransisco, April 2007).
- [54] M. Ikeda, T. Yoshida, M. Hashimoto, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Unozawa, T. Sasagawa, H. Takagi: Chemical Pressure Effects on the Fermi Surface and Band Dispersion in Electron-Doped Cuprates, 6-th Aisa-Pacific Workshop on Frontiers of Condensed-Matter Science (Taipei, April 2007).
- [55] S-i. Fujimori, T. Okochi, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagam, S. Ikeda, T.D. Matsuda, Y. Haga, E. Yamamoto and Y. Onuki: Band Structure and Fermi Surface of Heavy Fermion Superconductors, *International Conference on Strongly Correlated Electron Systems* (Houston, May, 2007).
- [56] H. Wadati, A. Maniwa, I. Ohkubo, H. Kumigashira, A. Fujimori, M. Oshima, M. Lippmaa, M. Kawasaki and H. Koinuma: *In-situ* Photoemission Study of Pr<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub> Epitaxial Thin Films, 2007 CERC International Symposium - Highlights and Perspectives of Correlated Electron Systems (Akihabara, May 2007).
- [57] H. Wadati, A. Maniwa, I. Ohkubo, H. Kumigashira, A. Fujimori, M. Oshima, M. Lippmaa, M. Kawasaki and H. Koinuma: *In-situ* Photoemission Study of Pr<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub> Epitaxial Thin Films, *CIAR Quantum Materials Summer School* (University of British Columbia, May 2007).
- [58] M. Kobayashi, Y. Ishida, J.I. Hwang, G.S. Song, A. Fujimori, Z.-S. Yang, L. Lee, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, A. Tanaka, H. Saito and K. Ando: X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of Diluted Magnetic Semiconductor Zn<sub>1-x</sub>Cr<sub>x</sub>Te: 4-th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (Spintech IV) (Maui, Hawaii, June 2007).
- [59] G.S. Song, Y. Osafune, J.I. Hwang, M. Kobayashi, Y. Ooki, Y. Ishida, K. Ebata, A. Fujimori, H. Takahashi, K. Kanai, K. Kubo, M. Oshima, J. Okabayashi: Photoemission Study of Thermally Diffused Mn/GaAs (001) Interfaces, *ibid*.

- [60] A. Chikamatsu, H. Wadati, H. Kumigashira, M. Oshima, A. Fujimori, M. Lippmaa, M. Kawasaki and H. Koinuma: Temperature-Dependent Spectral Weight Transfer in Ferromagnetic La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub> Thin Films Studied by *in*situ Photoemission Spectroscopy, 15th International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics (Berlin, July 2007).
- [61] H. Wadati, A. Maniwa, I. Ohkubo, H. Kumigashira, A. Fujimori, M. Oshima, M. Lippmaa, M. Kawasaki and H. Koinuma: *In-situ* Photoemission Study of Pr<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub> Epitaxial Thin Films, *ibid.*
- [62] H. Kumigashira, A. Maniwa, A. Chikamatsu, H. Wadati, K. Horiba, M. Oshima, A. Fujimori, M. Lippmaa, M. Kawasaki and H. Koinuma: *In-situ* Photoemission Study on La<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>MnO<sub>3</sub> Films under Physical Pressure Induced by Epitaxial Strain, *ibid*.
- [63] S-i. Fujimori, T. Ohkochi, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagami, S. Ikeda, T.D. Matsuda, Y. Haga, E. Yamamoto and Y. Onuki: Soft X-ray Angle Resolved Photoemission Study of Superconducting and Magnetic Uranium Compounds, *ibid.*
- [64] A. Fujimori: Photoemission Spectroscopy of Oxide Interfaces and Mutilayers, *The First Yonsei-Todai Joint Workshop on Physics* (Univ. of Tokyo, August 2007)
- [65] A. Fujimori: Spectroscopic Characterization of Ferromagnetic Semiconductors for Spintronics, Doyama Symposium on Advanced Materials "Materials to Save Humankind: The Dream, Creativity, and Working Toward its Realization" (Univ. of Tokyo, September 2007).
- [66] T. Yoshida, M. Hashimoto, K. Tanaka, A. Fujimori, Z.-X. Shen, Z. Hussain, M. Kubota, K. Ono, S. Komiya, Y. Ando, H. Eisaki, S. Uchida: Two-Gap Behavior in La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> Observed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy *Gordon Research Conference: Superconductivity* (Les Diablerets, Switzerland, September 2007).
- [67] W. Malaeb, M. Hashimoto, M. Takizawa, K. Ebata, T. Yoshida, A. Fujimori, H. Eisaki, T. Kakeshita, T. Sasagawa and S. Uchida: Temperature Dependence of the Chemical Potential Shift in La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>, International Symposium on Lattice Effects in Cuprate High Temperature Superconductors (Tsukuba, November 2007).
- [68] S. Ideta, K. Takashima, M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Kojima and S. Uchida: Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy Study of the Trilayer High-T<sub>c</sub> Superconductor Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10+δ</sub>, *ibid*.
- [69] M. Ikeda, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, Y. kaga, T. Sasagawa and H. Takagi: Effects of Annealing on the Electronic Structure of the Electron-Doped Cuprate Nd<sub>1.85</sub>Ce<sub>0.15</sub>CuO<sub>4</sub>, *ibid*.

- [70] T. Yoshida, M. Hashimoto, K. Tanaka, A. Fujimori, Z.-X. Shen, Z. Hussain, M. Kubota, K. Ono, S. Komiya, Y. Ando, H. Eisaki and S. Uchida: Two-Gap Feature in La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> Observed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, *ibid*
- [71] M. Minohara, D. Toyota, I. Ohkubo, H. Kumigashira, M. Oshima, M. Takizawa, A. Fujimori and M. Lippmaa: Thickness Dependence of Transport Properties of SrRuO<sub>3</sub> Layers in SrTiO<sub>3</sub>/SrRuO<sub>3</sub> Bilayer Structures: Surface and Interface Dead Layer Formation, 52nd Magnetism and Magnetic Materials Conference (MMM 2007) (Florida, November 2007)
- [72] K. Ebata, M. Takizawa, H. Wadati, A. Fujimori, Y. Tomioka, H. Kuwahara and Y. Tokura: Effects of Stripe Fluctuations and Band-Width Control on the Chemical Potential Shift in Manganites, 8th Korea-Japan-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (Incheon, Korea, November 2007).
- [73] M. Takizawa, M. Minohara, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, A. Fujimori, and M. Oshima: Soft X-Ray Angle-Resolved Photoemission Study of SrRuO<sub>3</sub> Thin Films, *ibid.*
- [74] T. Yoshida, M. Hashimoto, K. Tanaka, A. Fujimori, Z.-X. Shen, N. Mannella, Z. Hussain, M. Kubota, K. Ono, S. Komiya, Y. Ando, H. Eisaki and S. Uchida: Two-Gap Behavior in La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> - Universal versus Material-Dependent Properties, *ibid*.
- [75] E. Dagotto, S. Okamoto, S. Yunoki, A. Moreo, S. Kancharla, A. Fujimori: Electron Doping of Cuprates via Interfaces with Manganites, *American Physical Society March Meeting* (March 2008, New Orleans)
- [76] H. Lin, S. Sahrakorpi, R.S. Markiewicz, M. Lindroos, X.J. Zhou, T. Yoshida, W.L. Yang, T. Kakeshita, H. Eisaki, S. Uchida, S. Komiya, Y. Ando, F. Zhou, Z.X. Zhao, T. Sasagawa, A. Fujimori, Z. Hussain, Z.-X. Shen and A. Bansil: Appearance of Universal Metallic Dispersion in a Doped Mott Insulator, *ibid.*

- [77] A. Fujimori: Photoemission Spectroscopy of Oxide Interfaces, *Materials Research Society 2007 Spring Meeting* (San Fransisco, April 2007).
- [78] A. Fujimori: Transport and Superconductivity on Fermi Arc from ARPES, 6-th Aisa-Pacific Workshop on Frontiers of Condensed-Matter Science (Taipei, Taiwan, April 2007).
- [79] A. Fujimori: Photoemission Spectroscopy of Interfaces in Oxide Mutilayers, 2007 CERC International Symposium - Highlights and Perspectives of Correlated Electron Systems (Akihabara, May 2007).

- [80] A. Fujimori: Chemical Potential Shifts in Strongly Correlated Systems: Titanates to Cuprates, Fall 2007 Workshop "Moments and Multiplets in Mott Materials" (Kavli Institute for Theoretical Physics, Santa Barbara, USA, August 2007)
- [81] A. Fujimori: Superconductivity on Fermi Arc from ARPES Data, 8th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2007) (Sendai, August 2007).
- [82] A. Fujimori: XMCD Characterization of Complex Ferromagnetism in Magnetic Semiconductors and their Heterostructures, *Polish-Japanese Joint Seminar on Ferromagnetism and Magnetic Nanostructures in Semiconductors* (Warsaw, Poland, September 2007).
- [83] A. Fujimori: Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy of Perovskite-Type Transition-Metal Oxides, International Workshop on Electronic Structure in Correlated Materials (Chengdu, China, October 2007)
- [84] A. Fujimori: Superconductivity on Fermi Arc in Cuprates, International Symposium on Lattice Effects in Cuprate High Temperature Superconductors (Tsukuba, November 2007).
- [85] A. Fujimori: Chemical Potential Shifts in Transition-Metal Oxides: Insight from Doping, Pressure and Temperature Dependences, 8th Korea-Japan-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (Incheon, Korea, November 2007).
- [86] A. Fujimori: Spectroscopic Characterization of Ferromagnetic Semiconductors for Spintronics, International Conference on Condensed Matter Physics (Jaipur, India, November 2007).
- [87] A. Fujimori: Photoemission Spectroscopy of Complex Oxide Interfaces, 35th Conference on the Physics and Chemistry of Semiconductor Interfaces, (Santa Fe, USA, January 2008).
- [88] A. Fujimori: Photoemission Spectroscopy of Ferroelectric and Ferro-orbital Oxide Thin Films, 3rd Indo-Japan Conference on Ferroics and Multiferroics (Kolkata, India, February 2008).

#### (国内会議)

- [89] 藤森淳:酸化物界面の光電子分光,特定領域研究「異常量子物質」2007年度キックオフミーティング(京大会館,2007年7月)
- [90] 江端一晃,滝沢優,藤森淳,富岡泰秀,十倉好紀: Pr<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub>の化学ポテンシャルのドーピングおよび温度依存性,日本物理学会第62回年次大会(北大,2007年9月).
- [91] W. Malaeb, M. Hashimoto, M. Takizawa, K. Ebata, T. Yoshida, A. Fujimori, H. Eisaki, T. Kakeshita, T. Sasagawa and S. Uchida : Temperature Dependence of the Chemical Potential in La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>, 同上.

- [92] 橋本信,吉田鉄平,池田正樹,工藤諭,藤森淳,D.H. Lu,Z.-X.Shen,鎌倉望,久保田正人,小野寛太,藤 田和博,内田慎一:Bi<sub>2</sub>Sr<sub>1.6</sub>Ln<sub>0.4</sub>CuO<sub>6+δ</sub>のの角度分 解光電子スペクトルにおける面外の乱れの効果,同上.
- [93] 吉田鉄平,橋本信,田中清尚,藤森淳,N. Mannella, Z.-X. Shen, Z. Hussain,鎌倉望,久保田正人,小野 寛太,小宮世紀,安藤陽一,永崎洋,藤巻洋介,内田 慎一:La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>における擬ギャップ・超伝導 ギャップの温度依存性,同上.
- [94] 池田正樹,吉田鉄平,橋本信,工藤諭,藤森淳,久保 田正人,小野寛太,宇野沢圭一,笹川崇男,高木英 典:電子ドープ系高温超伝導体のアニールによる電子 構造変化,同上.
- [95] 小林正起,石田行章,黄鐘日,宋敬錫,藤森淳,竹田 幸治,寺井恒太,藤森伸一,岡根哲夫,斎藤祐児,山 上浩志,小林啓介,C.-S. Yang,L. Lee,H.-J. Lin, D.J. Huang,C.T. Chen,田中新,齋藤秀和,安藤 功兒:II-VI 族希薄磁性半導体 Zn<sub>1-x</sub>Cr<sub>x</sub>Teの局所的 電子構造,同上.
- [96] 滝沢優,簑原誠人,近松彰,組頭広志,藤森淳,尾 嶋正治:SrRuO3 薄膜の軟X線角度分解光電子分光, 同上.
- [97] 工藤諭,吉田鉄平,橋本信,池田正樹,藤森淳,鎌倉 望,久保田正人,小野寛太,石角元志,内田慎一,小 宮世紀,安藤陽一,永崎洋,田中清尚,N. Mannela, Z.-X. Shen, Z. Hussain:高温超伝導体における準粒 子強度の温度依存性,同上.
- [98] 宋敬錫,小林正起,黄鐘日,藤森淳,大河内拓雄,竹 田幸治,寺井恒太,藤森伸一,岡根哲夫,斎藤祐児, 山上浩志,高野史好,秋永広幸:強磁性 SiC:Mn の光 電子分光および X 線吸収分光,同上.
- [99] 高島憲一,出田真一郎,橋本信,小嶋健児,吉田鉄 平,藤森淳,内田慎一:Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10+δ</sub>の輸送 現象と角度分解型光電子分光,同上.
- [100] 和達大樹, 近松彰, 組頭広志, 滝沢優, 吉田鉄平, 溝 川貴司, 藤森淳, 尾嶋正治, 浜田典昭, I. Elfimov, G.A. Sawatzky: タイトバインディング計算による3 次元ペロブスカイト型酸化物の ARPES の系統的解 析, 同上
- [101] 近松彰,滝沢優,簑原誠人,組頭広志,尾 嶋正治,藤森淳,小野寛太,Mikk Lippmaa,川崎雅司:SrTiO<sub>3</sub>/La<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>MnO<sub>3</sub> と LaAlO<sub>3</sub>/La<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>MnO<sub>3</sub> ヘテロ界面の *in situ*角度 分解光電子分光,同上.
- [102] 竹田幸治,岡根哲夫,大河内拓雄,小林正起,藤森 伸一,斎藤祐児,山上浩志,藤森淳,池田修吾,芳賀 芳範:ウランカルコゲナイド化合物の電子状態の研 究,同上.
- [103] 岡根哲夫,竹田幸治,岡本淳,間宮一敏,藤森伸一, 斎藤祐児,山上浩志,藤森淳,落合明:軟X線吸収磁 気円二色性測定によるウランモノカルコゲナイドの 強磁性状態の研究,同上.
- [104] 利光孝文,大河内拓雄,保井晃,小林正起,竹田幸治,岡根哲夫,斉藤祐児,藤森淳,山上浩志,摂待力生,大貫惇睦:共鳴角度分解光電子分光による CeIrSi3 の電子構造の研究,同上.

- [105] 安斎太陽,加茂剛,藤田泰輔,井野明洋,有田将司, 生天目博文,谷口雅樹,藤森淳,Z.-X. Shen,石角元 志,内田慎一:低エネルギー放射光角度分解光電子分 光による Bi2212 の超伝導ギャップ波数依存性,同上.
- [106] 藤田泰輔,加茂剛,安斎太陽,井野明洋,有田将司, 生天目博文,谷口雅樹,藤森淳,Z.-X. Shen,藤田 和博,内田慎一: Bi<sub>2</sub>Sr<sub>1.6</sub>Ln<sub>0.4</sub>CuO<sub>6+δ</sub>(Ln = La, Gd)の低エネルギー励起角度分解光電子分光,同上.
- [107] 池田正樹,吉田鉄平,橋本信,工藤諭,藤森淳,久保田正人,小野寛太,加賀義弘,笹川崇男,高木英典:電子ドープ系高温超伝導体のアニールによる電子構造変化,第3回放射光表面科学部会シンポジウム (東大,2007年12月)
- [108] 出田真一郎,高島憲一,橋本信,吉田鉄平,藤森淳 久保田正人,小野寛太,小嶋健児,内田慎一:三層型 高温超伝導体 Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10+δ</sub>の角度分解光電 子分光,同上.
- [109] 片岡隆史,小林正起,宋敬錫,坂本勇太,藤森淳,F.-H. Chang, L. Lee, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen,大河内拓雄,竹田幸治,岡根哲夫,斎藤祐児,山上浩志,D. Karmakar,S.K. Mandal, I. Dasgupta: 軟X線磁気円二色性を用いたZn<sub>1-x</sub>FexOナノ粒子の電子状態の研究,同上.
- [110] 坂本勇太,小林正起,片岡隆,宋敬錫,藤森淳,F. H. Chang, L. Lee, H. J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen,豊崎秀海,福村知昭,川崎雅司:磁性半導体 Ti<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>2-δ</sub>のX線磁気円二色性,同上.
- [111] 近松彰,組頭広志,藤森淳,尾嶋正治:*In situ*角度 分解光電子分光による La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub> 薄膜の電子状 態,同上.
- [112] G.S. Song, M. Kobayashi, J.I. Hwang, T. Kataoka, Y. Sakamoto, K. Ebata, A. Fujimori, T. Ohkochi, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, F.-H. Chang, L. Lee, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, S. Kimura, M. Funakoshi, S. Hasegawa and H. Asahi: Photoemission and X-Ray Absorption Study of Si-Doped Ga<sub>1-x</sub>Cr<sub>x</sub>N, 第12回「半導体スピン工学の基礎と応用」研究会(PASPS12)(阪大産業科学研, 2007年12月)
- [113] Y. Sakamoto, M. Kobayashi, T. Kataoka, G. S. Song, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin D.J. Huang, C.T. Chen, H. Toyosaki, T. Fukumura, M. Kawasaki: X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of Diluted Magnetic Semiconductor  $Ti_{1-x}Co_xO_{2-\delta}$  Thin Films, *ibid*.
- [114] T. Kataoka, M. Kobayashi, G.S. Song, Y. Sakamoto, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, T. Ohkochi, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, D. Karmakar, I. Dasgupta: X-Ray Magnetic Circular Dichroism in Fe 2p Core Adsorption of the II-VI Diluted Magnetic Semiconductor  $\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}$  Nanoparticles, *ibid*.
- [115] 藤森淳:化学ポテンシャルから見たストライプ,熱 起電力,二重交換,Jahn-Teller分裂,科研費特定領 域研究「異常量子物質の創製-新しい物理を生む新 物質」成果報告会(名大,2008年1月)

- [116] 池田正樹,吉田鉄平,藤森淳,久保田正人,小野寛 太,加賀義弘,笹川崇男,高木英典:電子ドープ系高 温超伝導体 Nd<sub>1.85</sub>Ce<sub>0.15</sub>CuO<sub>4</sub>のアニールによる電 子構造変化,第 21回日本放射光学会年会・放射光科 学合同シンポジウム(立命館大,2008年1月).
- [117] 大河内拓雄,藤森伸一,利光孝文,岡根哲夫,斎藤 祐児,藤森淳,山上浩志,芳賀芳範,山本悦嗣,大貫 惇睦:軟X線角度分解光電子分光によるUIr,UGe2 のバンド構造,同上.
- [118] 近松彰,摩庭篤,和達大樹,組頭広志,尾嶋正治,藤 森淳,浜田典昭,小野寛太,Mikk Lippmaa,川崎雅 司: *In situ* 角度分解光電子分光によるエピタキシャ ル応力を制御した La<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>MnO<sub>3</sub> 薄膜の電子構造, 同上.
- [119] 藤森淳: Characterization of Highly Spin Polarized Materials using XMCD and Resonant Soft X-Ray Scattering, 特定領域研究「スピン流の創出と制御」 A01 班研究会(北海道大学, 2008年1月)
- [120] 藤森淳,小出常晴,竹田幸治:強磁性半導体のXMCD, 光電子分光,軟X線散乱を用いたキャラクタリゼー ション,特定領域研究「スピン流の創出と制御」2007 年度成果報告会(東京大学,2008年2月)
- [121] 小林正起,石田行章,黄鐘日,長船義敬,藤森淳,竹 田幸治,寺井恒太,藤森伸一,岡根哲夫,斎藤祐児, 小林啓介,佐伯洋昌,川合知二,田畑仁:酸化物希薄 磁性半導体 Zn<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>OのXMCD:反強磁性相互作 用と強磁性,同上.
- [122] 出田真一郎,高島憲一,橋本信,吉田鉄平,小嶋健児, 藤森淳,内田慎一,久保田正人,小野寛太,安斎太陽, 藤田泰輔,中島陽祐,井野明洋,有田将司,生天目博文, 谷口雅樹:三層型高温超伝導体 Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10+δ</sub> の角度分解光電子分光,日本物理学会第63回年次大 会(近畿大,2008年3月).
- [123] 石上啓介,吉松公平,滝沢優,組頭広志,尾嶋正治, 吉田鉄平,藤森淳:La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>TiO<sub>3</sub> 薄膜の軟 X 線光 電子分光,同上.
- [124] 坂本勇太,小林正起,片岡隆史,宋敬錫,藤森淳,F.-H. Chang,L. Lee,H.-J. Lin,D.J. Huang,C.T. Chen,豊崎秀海,福村知昭,川崎雅司:磁性半導体Ti<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>2-δ</sub>のX線磁気円二色性の磁場・温度依存性,同上.
- [125] 池田正樹,吉田鉄平,橋本信,工藤諭,藤森淳,久 保田正人,小野寛太,加賀義弘,笹川崇男,高木英 典:電子ドープ系高温超伝導体の高エネルギー・キン ク,同上.
- [126] 片岡隆史,小林正起,宋敬錫,坂本勇太,藤森淳,F.-H. Chang, L. Lee, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen,大河内拓雄,竹田幸治,岡根哲夫,斎藤祐児,山上浩志, D. Karmakar, S.K. Mandal, I. Dasgupta: 軟X線磁気円二色性を用いた Zn<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>O ナノ粒子の電子状態の研究,同上.
- [127] 小林正起, 宋敬錫, 片岡隆史, 坂本勇太, 藤森淳, 大河内拓雄, 竹田幸治, 岡根哲夫, 斎藤祐児, 山上浩志, 山原弘靖, 佐伯洋昌, 川合知二, 田畑仁: 酸化物 半導体 ZnOの軟X線角度分解光電子分光, 同上.

- [128] 滝沢優 , 簑原誠人 , 組頭広志 , 吉田鉄平 , 藤森淳 , 尾 嶋正治:SrVO<sub>3</sub> 薄膜の軟 X 線光電子分光 , 同上 .
- [129] 利光孝文,大河内拓雄,保井晃,小林正起,竹田幸治,岡根哲夫,斎藤祐児,藤森淳,山上浩志,宮内裕一朗,奥田悠介,摂待力生,大貫惇睦:角度分解光 電子分光による CeIrSi<sub>3</sub>,LaIrSi<sub>3</sub>の電子構造の研究, 同上.
- [130] 藤田泰輔,加茂剛,安斎太陽,中島陽祐,井野明洋,有 田将司,生天目博文,谷口雅樹,藤森淳,Z.-X.Shen, 藤田和博,内田慎一:低エネルギー励起角度分解光電 子分光による Bi<sub>2</sub>Sr<sub>1.6</sub>Ln<sub>0.4</sub>CuO<sub>6+δ</sub>の面外の乱れの 効果,同上.

- [131] 藤森淳: 遷移金属化合物の電子分光研究,講演会「基礎研究が拓く次世代材料」(学士会館,2007年7月).
- [132] 吉田鉄平,藤森淳:フェルミアーク,擬ギャップ,超 伝導ギャップ,銅酸化物高温超伝導体の最近の実験結 果に関する討論会(東京理科大,2007年9月).
- [133] 藤森淳: Summary,シンポジウム「極低エネルギー 光電子分光(ELEPES)と硬X線光電子分光(HAX-PES)はどこまでバルク敏感か-強相関電子系の場合-装置開発の現状を含めて」,日本物理学会第62回年 次大会(北大,2007年9月).
- [134] 藤森淳:高温強磁性半導体の光電子分光、XMCD、軟 X 線散乱,東北大学電気通信研究所共同プロジェク ト研究会「スピンエレクトロニクスの新展開」(東北 大通研,2007年10月).
- [135] 藤森淳:コメント d 電子状態に関する考察,理研研究会「生物物質科学-金属を含む分子系を中心に-」(箱根,2007年12月)
- [136] 藤森淳,吉田鉄平:高温超伝導体における擬ギャッ プと超伝導ギャップ,4特定領域合同研究会「超伝導 が拓く物性科学の最前線」(首都大学東京,2007年 12月)
- [137] 藤森淳:光電子分光による高温超伝導体の研究,第 2回科研費特別推進研究・研究会「量子ビームによる 高温超伝導機構の解明」(五浦海岸,2007年12月).
- [138] 藤森淳:放射光が明かす超伝導・磁性のメカニズム, 最先端サイエンス:進化するスペクトル科学(東大理 スペクトル科学研究センター,2007年12月)
- [139] 藤森 淳: 広エネルギーレーザー光を用いた高分解 能光電子分光,第1回極限コヒーレント光科学ワー クショップ(東京大学,2008年3月)
- [140] 藤森淳: Introduction,シンポジウム「Spectroscopies in novel oxide interfaces and heterostructures」,日本物理学会第63回年次大会(近畿大,2008 年3月).

セミナー

[141] A. Fujimori: Spectroscopy of Transition-Metal Oxides for Spintronics and Oxide Electronics (Department of Materials Sciences, Tsinghua University, October 2007).

- [142] 藤森淳:酸化物界面と超格子の光電子分光(京大物 理,2007年12月)
- [143] 藤森淳: Pseudogap and Fermi Arc in High-T<sub>c</sub> Cuprates (東大物工今田研, 2008年1月)

# 4.2 内田研究室

研究室およびその活動の概要。

## 4.2.1 2007年度の研究その1

## 研究1-1

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、電子のもつ電荷と スピンそしてフォノン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・ フォノン自由度のダイナミックスやそれらがつくり 出す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。これまでの、代表的な研究テーマと成果は、

1) 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)(2003)(2006). Science (2002))。

2) 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)(2001)(2002) )。

 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)(2005)(2007), Phys. Rev. Lett. (2000)(2005))。
 4) T<sub>c</sub>より高温の「正常状態」においても超伝導状態 と同様に磁束が存在することの発見 (Nature (2000), Science (2003), Phys. Rev. Lett.(2002)(2005)).

5) 高温超伝導体におけるフォノンの寄与の再発見 (Nature(2001)(2003)(2006))。

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 20 年経った現在でもメカニズムが未解明なのは、 高温超伝導発現におけるスピン・電荷・フォノン自 由殿役割、複数の競合する秩序が自己組織的に作る どのような「構造」が高温超伝導をもたらしている のか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。



図 4.2.1: 超伝導体 T<sub>c</sub>の上昇の歴史(1973年以降)

# 4.2.2 梯子型 Cu 酸化物の電荷秩序と超伝 導

高温超伝導は 2 次元 Cu 酸化物の CuO<sub>2</sub> 面で起こ る超伝導現象である。CuO<sub>2</sub> 面内では、Cu 原子が四 方を酸素で囲まれ(CuO<sub>2</sub>ユニット)、その酸素を隣 同士共有する形で(端共有) 2 次元のネットワークを 形成している。CuO<sub>2</sub> ユニットを基本とする構造を もつ物質は高温超伝導体だけではない。CuO<sub>2</sub> ユニッ トが酸素を端共有して、一方向のみに連なっている 1 次元 Cu 酸化物、Sr<sub>2</sub>CuO<sub>3</sub>、が存在する。Sr<sub>2</sub>CuO<sub>3</sub> は化学的操作によるキャリアードーピングが難しい が、光励起によって電子 - 正孔対をつくることがで きる。その正孔のダイナミックスを角度分解光電子 分光(ARPES)で調べ、正孔のスピンと電荷が独立 に運動している事を示した。これは、理論的に予想 されていた 1 次元電子のスピン・電荷分離の最初の 実験的検証となった。

上記の実験からは、1 次元 Cu 酸化物でどのよう な電子相が実現するかはわからない。しかし、正孔 ドープされた 1 次元 Cu 酸化物は、偶然、高温超伝 導体 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> あるいは非超伝導体 PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 中に存在している。Pr123 が超伝導体にならないこ とから、間接的ながら、ドープされた CuO 鎖の基底 状態は超伝導ではないことがわかる。

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。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て いる。

#### 電荷秩序

この系の超伝導は 3GPa 以上の高圧下で実現する (T<sub>c</sub> は最高 12K)。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。

超伝導は高ドープ (x > 10)、高圧下 (>3GPa) で絶 縁体 - 超伝導 (SI) 転移を経て実現する。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伝導そして X 線共鳴散 乱の実験で明らかにした。超伝導秩序は明らかに電 荷秩序と競合しており、高圧下で前者が後者に勝つ と考えられる。

# 4.2.3 高温超伝導体の擬ギャップ相

#### 超伝導ゆらぎ

高温超伝導体と低温超伝導体との際立った違いの 1つは、 $T_c$ 以上の温度の正常状態でも観測される 「擬ギャップ」である。この擬ギャップの起源は未だ 明らかではないが、「擬ギャップ状態は電子対が形成 されているがその位相の揃っていない状態である」と いうのが有力な考え方の1つである。低温超伝導体 においても、 $T_c$ の近傍で「超伝導ゆらぎ」が観測さ れるが、 $T_c$ の直上の狭い温度領域に限られている。 「ゆらぎ」領域では超伝導は短距離秩序として存在し ていると考えられる。このような場所に磁場をかけ ると、磁場は磁束(磁気ボルテックス)として存在 するはずである。

我々は、Princeton 大学の Prof. Ong と共同の Nernst 効果の実験で磁束の存在を確認した。更に、 ミクロな超伝導領域が応答していると考えられる反磁 性をトルクを利用した高感度の磁化測定で観測した。 Nernst 効果は試料の温度勾配によって生ずるホール 効果であるが、高温超伝導体で観測されたのは電荷 キャリアーの拡散に伴う Nernst 効果に比べ桁違いに 大きなものである。正常状態での磁束は T<sub>c</sub>よりかな り高い温度(T<sub>f</sub>)まで観測できる。しかし、擬ギャッ プ温度 T\* に比べると、T<sub>f</sub> は低い。この結果から結 論できるのは、高温超伝導状態は非常にゆらぎの強 い状態であるということである。その原因は、CuO<sub>2</sub> 面の 2 次元性や T<sub>c</sub> が高いことによる熱力学的ゆら ぎだけではなく、量子力学的ゆらぎが大きいことに もある。量子力学ゆらぎは、高温超伝導体中のクー パー対密度が低温超伝導体に比べ1桁以上小さいこ とに起因している。一方、T<sub>f</sub>とT\* が異なることは、 擬ギャップの起源が超伝導ゆらぎとは別のところに あることを意味している。擬ギャップは超伝導秩序 と競合する秩序に関連していると考えるのが自然で ある。



図 4.2.2: 高温超伝導体の電子相図

#### 秩序競合・共存

最近、「強相関電子系」と分類される Mn,Ni や Cu の酸化物内で電子が「ストライプ秩序」と呼ばれる 全く新しい秩序を形成していることが明らかになっ た。ここでいう強相関とはクーロン相互作用が極限 的に強く、電子がモット (Mott) 転移で局在するよ うな状況を意味している。高温超伝導は、そのよう な2次元 Cu酸化物に電荷キャリアーを注入(ドー ピング)することによって起こっている。注入され た電荷キャリアーは、それ自体で空間的に一様な電 子気体/液体を形成しているのであるが、それらが偏 析して1次元的に配列してしまうという現象が発見 されたのである。これがストライプ秩序と呼ばれる ものである。一種の電荷秩序と考えてよいであろう。 このストライプに挟まれた領域は元の(ドープされ ていない) モット絶縁体状態であり、電子のもつス ピンが表に現れて、反強磁性秩序が形成されている。 このようなストライプ秩序が形成されると超伝導秩 序の方は抑制されてしまう。

これまでのところ、ストライプ秩序は La 系高温 超伝導体、La<sub>2-x</sub>Ba<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>、La<sub>2-x-y</sub>Nd<sub>y</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>、 でのみ観測されている。しかし、Bi 系高温超伝導体に 対する STM 観察(コーネル大学 J. C. Seamus Davis グループとの共同研究)で、類似の秩序が超伝導秩 序と競合・共存している様子が見えてきた。

STM/STS では、T<sub>c</sub>の上の正常状態だけではな く、T<sub>c</sub>以下の超伝導状態でも、CuO<sub>2</sub>面の一部(ナ ノメートルスケールの領域)に擬ギャップが観測さ れた。超伝導秩序が局所的に壊れた磁束の芯近くで も擬ギャップが出現する。これらの擬ギャップ領域で は、チェッカーボード状のトンネルコンダクタンス の空間変調パターンが観測される。同様な「パター ン」は超伝導を外れた稀薄ドーピング域(スピング ラス相と呼ばれる)でも観測されるので、STM 観測 結果からは、超伝導とは別の秩序を表わしてるよう にみえる。 特殊な手法(トンネル非対称性)で詳細な構造を みると、ランダムに配向した一軸性のドメイン構造 が見えてくる。各ドメインはナノメートルスケール の「ストライプ」のミニチュアのようなもので、これ が電荷秩序(電子結晶)の破片だとすると「電子ガラ ス状態」が実現していることになる。これが「チェッ カーボード」のパターンをつくり出す擬ギャップ相の 空間構造といえる。このような「電子ガラス」組織が CuO<sub>2</sub>を覆っていると同時に、その上を超伝導の準 粒子が自由に飛びまわっていることもSTM/STS で 明らかになった。驚くべきことに超伝導秩序も CuO<sub>2</sub> を覆っているのである。

STM や ARPES は試料表面の電子状態を調べる プローブであり、実験は殆んどの場合 Bi 系超伝導体 (Bi2212)に対して行われているので、結晶表面だけ に現われる特殊な状態を見たもので、擬ギャップ状態 の真の姿を捉えているのかという疑問があった。し かし、現在では、この疑問はほぼ解消している。擬 ギャップは、ドープされた CuO2 面で実現する複数 の状態のうちの1つであり、「擬ギャップ相」と呼ぶ べきものとなる。その正体として、空間的にゆらい だストライプ秩序(電子液晶とも呼ばれている)電 子対が整列して結晶化したもの(電子結晶)、など 様々な候補があげられているが決め手となる証拠が 未だにない。

「擬ギャップ相」は超伝導秩序が形成される前、あるいは超伝導秩序が弱められた場所に出現していることがわかった。この意味では、La系物質のストライプ秩序と同様、超伝導秩序と敵対する電子秩序であり、またその電荷秩序のパターンからストライプ秩序と「擬ギャップ相」とは密接な関係にあると想像できる。一方、ストライプ秩序に比べると「擬ギャップ」は超伝導秩序との相性がはるかに良い。超伝導ギャップと同じd波ギャップである。また、磁束芯の近くやドーピング量の少ない(アンダードーピング)領域の超伝導状態で、 $CuO_2$ 面に「擬ギャップ相」が顔を出すが、超伝導にとっては必ずしも破壊的な存在ではなく、両者は共存して高い $T_c$ を保持しているようにみえる。どのような共存状態にあるかを明らかにすることが次の課題である。

# 4.2.4 $T_c$ は上がるか?

高温超伝導の舞台は CuO<sub>2</sub> 面であり、CuO<sub>2</sub> 面は、 La 系であろうと Y 系であろうと殆ど同じなので、T<sub>c</sub> は各ドーピング量に対して唯一つに決まっているは ずである。しかし、現実の銅酸化物の T<sub>c</sub> は、物質 により大きく異なり、各物質の T<sub>c</sub> の最大値は 30K から 135K の間に分布している。明らかに、CuO<sub>2</sub> 面 の外の環境が T<sub>c</sub> に大きな影響を与えているのであ る。幸いにも、メカニズムに比べ、T<sub>c</sub> がどのような 因子で決定されているのか、かなりわかってきてい る。従って、T<sub>c</sub> を決める因子が CuO<sub>2</sub> 面の電子状 態にどのような影響を与えているのかを探ることは、 メカニズムの解明にも関係しており、T<sub>c</sub> を向上させ るための方策にもつながると考えられる。



図 4.2.3: 擬ギャップ状態の空間構造

#### $T_c$ の決定因子

高温超伝導においては、これまで知られている T<sub>c</sub> の決定因子は極めて多数にのぼる。(a) ドーピング 量(b) 超流動密度( $\rho_s$ )(c) CuO<sub>2</sub> 面の枚数 (d) 面内の乱れ(Zn 置換)(e) 相競合(ストラ イプ秩序) がある。しかし、実は(d) の面内乱れを 除くと、これらの因子は面外の状況変化によりもた らされている。面外の状況を決めるのは、(f) CuO<sub>2</sub> 面外の乱れ(g) 頂点酸素の位置(h) La や Sr 等の金属のイオン半径など、結晶化学に関連した因 子であることがわかっている。

フォノン BCS 超伝導体の場合との大きな違いは、 超伝導ギャップよりも超流動密度が T<sub>c</sub>を支配するパ ラメーターになっていることである。実際、アンダー ドープ領域では、T<sub>c</sub>はギャップの大きさとは無関係 に、 $\rho_S$ に比例して増大する(Uemura プロット)。 $\rho_S$ はクーパー対の密度なのでドーピング量とは密接な 関係にある。ドーピングは $CuO_2$ 面外の原子への化 学操作により行われるが、特に CuO<sub>2</sub> 面に隣接する 頂点酸素を含む原子層(頂点酸素ブロック)へのドー ピング等による乱れの導入が $\rho_S$ そして $\hat{C}uO_2$ 面の 電子状態に大きな影響を与えることがわかってきた。 この乱れは不純物として  $CuO_2$  面の電子(正孔)の 運動を乱す。しかし、不純物散乱としての効果はT。 に影響を与える程強くはない。STM の観測から、超 伝導と他の相(擬ギャップ相)との競合状況がこの 乱れによって変化していることがわかってきた。La 系において、Laの一部を同じ希土類元素のNdに置 き換えると、ストライプ相が誘起されることが知ら れている。La 系以外でも、頂点酸素ブロックの乱れ が競合相の勢を強めているのである。

頂点酸素の  $CuO_2$  面からの距離も重要な因子である。この距離が長くなる程  $T_c$  が高くなるという傾向が見出されている。現在、最高の  $T_c$ をもつ Hg系物質は、頂点酸素距離の最も長い物質である。

## $T_c$ を向上させるには?

上に述べたことに、T<sub>c</sub>を向上させるためのヒント が2つ含まれている。1つは、結晶乱れを少なくする ことである。典型例としてBi系物質、Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+ $\delta$ </sub> (Bi2212)を挙げると、CuO<sub>2</sub>面の電子状態とT<sub>c</sub>と に目に見える影響を与えるのは、頂点酸素プロック (SrO プロック)の乱れである。乱れの主因はSr<sup>2+</sup>の イオン半径が小さいために、Sr サイトにBi<sup>3+</sup> イオン が侵入し易いことにある。実際、物性実験の試料とし て用いられているBi2212のT<sub>c</sub>(通常90K)を、Sr サ イトからBiを追い出すことにより、98.5Kまで上昇さ せることができた。また、同様な操作をすれば、超伝 導線材として用いられる3層(Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10+ $\delta$ </sub>)のT<sub>c</sub>を125Kまで向上させることができると予測さ れる。



# 図 4.2.4: Bi 系高温超伝導体の結晶乱れを減らすこと により上昇する超伝導臨界温度 T<sub>c</sub>

## <報文>

(原著論文)

- P. L. Russo, C. R. Wiebe, Y. J. Uemura, A. T. Savici, G. J. MacDougall, J. Rodriguez, G. M. Luke, N. Kaneko, H. Eisaki, M. Greven, O. P. Vajk, S. Ono, Yoichi Ando, K. Fujita, K. M. Kojima, and S. Uchida: Muon spin relaxation study of super-conducting Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2-x</sub>La<sub>x</sub>CuO<sub>6+δ</sub>, Phys. Rev. B<u>75</u>, 054511 (2007).
- [2] J. Graf, G.-H. Gweon, K. McElroy, S. Y. Zhau, C. Jozwiak, E. Rotenberg, A. Bill, T. Sasagawa, H. Eisaki, S. Uchida, H. Takagi, D.-H. Lee, and A. Lanzara: Universal High Energy Anomaly in the Angle-Resolved Photoemission Spectra of High Temperature Superconductors: Possible Evidence of Spinon and Holon Branches, Phys. Rev. Lett. <u>98</u>, 067004 (2007).
- [3] Y. Kohsaka, C. Taylor, K. Fujita, A. Schmidt, C. Lupien, T. Hanaguri, M. Azuma, M. Takano, H. Eisaki, H. Takagi, S. Uchida, and J. C. Davis:

An Intrinsic Bond-Centered Electronic Glass with Unidirectional Domains in Underdoped Cuprates, Science <u>315</u>, 1380-1385 (2007).

- [4] J. F. Douglas, H. Iwasawa, Z. Sun, A. V. Fedorov, M. Ishikado, T. Saitoh, H. Eisaki, H. Bando, T. Iwase, A. Ino, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, T. Masui, S. Tajima, K. Fujita, S. Uchida, Y. Aiura, and D. S. Dessau: Unusual oxygen isotope effects in cuprates?, Nature <u>446</u>, E5 (2007).
- [5] A. Rusydi, M. Berciu, P. Abbamonte, S. Smadici, H. Eisaki, Y. Fujimaki, S. Uchida, M. Rubhausen, and G. A. Sawatzky: Relationship between hole density and charge-ordering wave vector in Sr<sub>14-x</sub>Ca<sub>x</sub>Cu<sub>24</sub>O<sub>41</sub>, Phys. Rev. B <u>75</u>, 104510(R) (2007).
- [6] T. Yamasaki, K. Yamazaki, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, A. Fujimori, Z.-X. Shen, M. Ishikado, and S. Uchida: Unmasking the nodal quasiparticle dynamics in cuprate superconductors using low-energy photoemission, Phys. Rev. B <u>75</u>, 140513(R) (2007).
- [7] M. Hashimoto, T. Yoshida, K. Tanaka, A. Fujimori, M. Okusawa, S. Wakimoto, K. Yamada, T. Kakeshita, H. Eisaki, and S. Uchida: Distinct doping dependences of the pseudogap and superconducting gap of La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> cuprate superconductors, Phys. Rev. B <u>75</u>, 140503(R) (2007).
- [8] W. Meevasana, X. J. Zhou, S. Sahrakorpi, W. S. Lee, W. L. Yang, K. Tanaka, N. Mannella, T. Yoshida, D. H. Lu, Y. L. Chen, R. H. He, H. Lin, S. Komiya, Y. Ando, F. Zhou, W. X. Ti, J. W. Xiong, Z. X. Zhao, T. Sasagawa, T. Kakeshita, K. Fujita, S. Uchida, H. Eisaki, A. Fujimori, Z. Hussain, R. S. Markiewicz, A. Bansil, N. Nagaosa, J. Zaanen, T. P. Devereaux, and Z.-X. Shen: Hierarchy of multiple many-body interaction scales in high-temperature superconductors, Phys. Rev. B 75, 174506 (2007).
- [9] H. Kambara, Y. Niimi, M. Ishikado, S. Uchida, and H. Fukuyama: Temperature dependence of the impurity-induced resonant state in Zn-doped  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$  by scanning tunneling spectroscopy, Phys. Rev. B <u>76</u>, 052506 (2007).
- [10] T. Yoshida, X. J Zhou, D. H. Lu, Seiki Komiya, Yoichi Ando, H. Eisaki, T. Kakeshita, S. Uchida, Z. Hussain, Z.-X. Shen, and A. Fujimori: Lowenergy electronic structure of the high- $T_c$  cuprates  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  studied by angle-resolved photoemission spectroscopy, J. Phys.: Condens. Matter <u>19</u>, 125209 (2007).
- [11] Q. Q. Liu, H. Yang, X. M. Qin, L. X. Yang F. Y. Li, Y. Yu, R. C. Yu, C. Q. Jin, and S. Uchida: Correlation of superconductivity with the ordering state at the apical oxygen layer in the  $Sr_2CuO_{3+\delta}$  superconductor, Physica C <u>460-462</u>, 56-57 (2007).

- [12] T. Yoshida, X. J. Zhou, Z. Hussain, Z.-X. Shen, A. Fujimori, Seiki Komiya, Yoichi Ando, H. Eisaki and S. Uchida: Effects of Zn impurity scattering in  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  studied by angle-resolved photoemission spectroscopy, Physica C <u>460-462</u>, 872-873 (2007).
- [13] M. Hashimoto, K. Tanaka, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Okusawa, S. Wakimoto, K. Yamada, T. Kakeshita, H. Eisaki, and S. Uchida: Relationship between the superconducting gap and the pseudogap: Temperature-dependent photoemission study of  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  and  $La_2CuO_{4.10}$ , Physica C <u>460-462</u>, 884-885 (2007).
- [14] M. Lindroos, V. Arpiainen, S. Sahrakorpi, R. S. Markiewicz, X. J. Zhou, T. Yoshida, d, W. L. Yang, T. Kakeshita, H. Eisaki, S. Uchida, A. Fujimori, Z. Hussain, Z.-X. Shen, and A. Bansil: Existence of a quasiparticle remnant in angle-resolved photoemission spectrum of La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>, Physica C <u>460-462</u>, 941-942 (2007).
- [15] H. Iwasawa, Y. Aiura, T. Saitoh, H. Eisaki, H. Bando, A. Ino, M. Arita, K. Shimada, H. Na-matame, M. Taniguchi, T. Masui, S. Tajima, M. Ishikado, K. Fujita, S. Uchida, J. F. Douglas, Z. Sun and D. S. Dessau: A re-examination of the oxygen isotope effect in ARPES spectra of Bi2212, Physica C <u>463-465</u>, 52-55 (2007).
- [16] Q.Q. Liu, H. Yang, Y. Yu, L.X. Yang, R.C. Yu, F.Y. Li, C.Q. Jin, and S. Uchida: The superconductivity up to 95 K by tuning order state in  $Sr_2CuO_{3+\delta}$ , Physica C <u>463-465</u>, 100-102 (2007).
- [17] J. A. Slezak, Jinho Lee, M. Wang, K. McElroy, K. Fujita, B. M. Andersen, P. J. Hirschfeld, H. Eisaki, S. Uchida, and J. C. Davis: Imaging the impact on cuprate superconductivity of varying the interatomic distances within individual crystal unit cells, Proc. Nat. Acad. Science <u>105</u>, 3203-3208 (2008).
- (学位論文)
- [18] 倉橋隆文:希薄ドーピング高温超伝導体の光学応答 (修士論文)
- [19] 高島憲一:三層高温超伝導体の単結晶育成と光電子分 光(修士論文)
- [20] 石角元志: 銅酸化物高温超伝導体の不均一性と光学応 答(博士論文)
- [21] 藤巻洋介:梯子型銅酸化物の電荷秩序と光学応答(博 士論文)
- (著書)
- [22] 『21世紀の物理学』
- <学術講演>
- (国際会議)

- [23] S. Uchida: How to increase T<sub>c</sub> in cuprates? (The 6th Asia-Pacific Workshop on Frontiers of Condenced-Matter Science and Symposium on 20years Anniversary of Discovery of YBCO, Taipei, Taiwan, April 14, 2007).
- [24] S. Uchida: How to Enhance  $T_c$  of cuprate Superconductors? (Workshop on the Road to Room Temperature Superconductivity, Loen, Norway, June 20, 2007).
- [25] S. Uchida: Uniqueness and Mysteries of Cuprate Superconductors and Road to to Higher  $T_c$  (Summer School, 50th Anniversary of BCS: From BCS to Exotic Superconductivity, Cargese, France, July 23 and July 24, 2007).
- [26] S. Uchida: Intra-Multilayer Josephson Plasma Mode in HgBa<sub>2</sub>Ca<sub>n-1</sub>Cu<sub>n</sub>O<sub>2n+2+ $\delta$ </sub> (International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors, Sendai, Japan, August 23, 2007).
- [27] S. Uchida: How to increase superconducting  $T_c$ ? (The 5th 21st Century COE Symposium on Physics of Self-Organization System, Waseda, Japan, September 13, 2007).
- [28] S. Uchida: 21 Years of HTSC Research: What is done and what is left (International Symposium on Lattice Effects in Cuprate High Temperature Superconductors, Tsukuba, Japan, October 31, 2007).
- [29] S. Uchida: Road to Higher T<sub>c</sub> (The 20th International Symposium on Superconductivity, Tsukuba, Japan, November 05, 2007).

# (国内会議)

- [30] 安斎太陽,加茂剛,藤田泰輔,井野明洋,有田将司, 生天目博文,谷口雅樹,藤森淳,Z.-X. Shen,石角 元志,内田慎一:低エネルギー放射光角度分解光電子 分光による Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+δ</sub>の準粒子波数依存性、 日本物理学会 2007 年秋季大会、(北海道大学、2007 年9月21日).
- [31] 工藤諭,吉田鉄平,橋本信,池田正樹,藤森淳,鎌倉 望,久保田正人,小野寛太,田中清尚、N. Mannella、 Z.-X. Shen、Z. Hussain、石角元志,内田慎一、小宮 世紀、安藤陽一、永崎洋:高温超電導体における準粒 子強度の温度依存性、日本物理学会 2007 年秋季大会、 (北海道大学、2007 年 9 月 21 日).
- [32] W.Malaeb, M.Hashimoto, M.Takizawa, K.Ebata, T.Yoshida, A.Fujimori, H.Eisaki, T.Kakeshita, T.Sasagawa, S.Uchida: Temperature-dependence of the chemical potential in La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>、日本 物理学会 2007 年秋季大会、(北海道大学、2007 年 9 月 21 日).
- [33] 吉田鉄平,橋本信,田中清尚,藤森淳,N. Mannella, Z.-X. Shen,Z. Hussain,鎌倉望、久保田正人,小野 寛太,小宮世紀,安藤陽一,永崎洋,藤巻洋介,内 田慎一: La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>における擬ギャップ・超伝導 ギャップの温度依存性、日本物理学会 2007 年秋季大 会、(北海道大学、2007 年 9 月 21 日).

- [34] 藤巻洋介,小嶋健児,内田慎一:梯子型銅酸化物の光 学応答 III、日本物理学会 2007 年秋季大会、(北海道 大学、2007年9月22日).
- [35] 倉橋隆文,平田靖透,小嶋健児,伊豫彰,永崎洋,内 田慎一: Hg 多層系銅酸化物高温超伝導体の C 軸光学 応答とその磁場依存性、日本物理学会 2007 年秋季大 会、(北海道大学、2007年9月22日).
- [36] 高島憲一,出田真一郎,橋本信,小嶋健児,吉田鉄 平,藤森淳,内田慎一: Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10+δ</sub>の輸送 現象と角度分解型光電子分光、日本物理学会2007年 秋季大会、(北海道大学、2007年9月24日).
- [37] 橋本信,吉田鉄平,池田正樹,工藤諭,藤森淳,D.H. LuA, Z.-X. Shen, 鎌倉望, 久保田正人, 小野寛太, 藤田和博,内田慎一:Bi<sub>2</sub>Sr<sub>1.6</sub>Ln<sub>0.4</sub>CuO<sub>6+δ</sub>の角度 分解光電子スペクトルにおける面外の乱れの効果、日 本物理学会 2007 年秋季大会、(北海道大学、2007 年 9月24日).
- [38] 藤田泰輔,加茂剛,安斎太陽,井野明洋,有田将司, 生天目博文,谷口雅樹,藤森淳,Z.-X.Shen,藤田 和博,内田慎一: $\mathrm{Bi}_{2}\mathrm{Sr}_{1.6}\mathrm{Ln}_{0.4}\mathrm{CuO}_{6+\delta}$  (  $\mathrm{Ln}=\mathrm{La},$ Gd)の低エネルギー励起角度分解光電子分光、日本 物理学会 2007 年秋季大会、(北海道大学、2007 年 9 月24日).
- [39] 幸坂祐生, P. Wahl, C. Taylor, A. Schmidt, 藤田和 博,永崎洋,内田慎一,J.C. Davis:超アンダードー プ Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>(Ca,Dy)Cu<sub>2</sub>O<sub>y</sub> の低温 STM/STS 測定日 本物理学会 2007 年秋季大会、(北海道大学、2007 年 9月24日).
- [40] 藤原直樹,藤巻洋介,内田慎一,久田旭彦,上床美 也:梯子格子銅酸化物 Sr<sub>2</sub>Ca<sub>12</sub>Cu<sub>24</sub>O<sub>41</sub>の圧力下核 四重極共鳴、日本物理学会 2008 年春季大会、(近畿 大学、2008年3月23日).
- [41] W. Malaeb, M. Ikeda, M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, T. Kurahashi, S. Uchida: Angle-resolved Photoemission Spectroscopy study of La<sub>1.6-x</sub>Nd<sub>0.4</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>、日本物 理学会 2008 年春季大会、(近畿大学、2008 年 3 月 23日).
- [42] 佐藤耕二,岩澤英明, J. F. Douglas, 相浦義弘, 西 原美一,齋藤智彦,吉田良行,永崎洋,阪東寛,井 野明洋,有田将司,島田賢也,生天目博文,谷口雅 樹, 増井孝彦, 田島節子, 内田慎一, D.S. Dessau: Bi2212 の角度分解光電子スペクトルにおける酸素同 位体効果 II、日本物理学会 2008 年春季大会、(近畿 大学、2008 年 3 月 24 日 ).
- [43] 藤田泰輔,加茂剛,安斎太陽,中島陽祐,井野明洋,有 田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 藤森淳, Z.-X. Shen, 藤田和博 , 内田慎一 : 低エネルギー励起角度分解光電 子分光による  $Bi_2Sr_{1.6}Ln_{0.4}CuO_{6+\delta}$  の面外の乱れの 効果(近畿大学、2008年3月26日).
- [44] 出田真一郎, 高島憲一, 橋本信, 吉田鉄平, 小嶋健児, 藤森淳 , 内田慎一 , 久保田正人 , 小野寛太 , 安斎太陽 , 藤田泰輔 , 中島陽祐 , 井野明洋 , 有田将司 , 生天目博文 , 谷口雅樹:三層型高温超伝導体 Bi2Sr2Ca2Cu3O10+ の角度分解光電子分光、(近畿大学、2008年3月 26日).

4.3

- [45] 内田慎一: 銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップと超伝 導ゆらぎ、NEDO 新超電導物質調査委員会、(国際超 電導産業技術研究センター、2007年7月28日).
- [46] 内田慎一: 高温超伝導の謎に迫る、21 世紀 COE -極限量子系とその対称性 - シンポジウム、(東京大学、 2007年11月13日).
- [47] 内田慎一: トンネル電子顕微鏡による高温超伝導の研 究、第2回科研費特別推進研究・研究会「量子ビー ムによる高温超伝導機構の解明」(五浦観光ホテル、 2007年12月14-15日).
- [48] 内田慎一: より高いT<sub>c</sub>をめざして 銅酸化物、NEDO 新超電導物質調査委員会、成果報告会(女性と仕事の 未来館ホール、2008年2月29日).
- [49] 内田慎一: 「超伝導を見る」「超伝導で見る」: イント ロダクトリートーク、 (日本大学船橋キャンパス、2008年3月28日).

# 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として北岡佑介と新沼優 人が新しくメンバーに加わった。3月には,吉本真 也が博士課程を修了して物性研究所助教として就職 し、芝崎剛豪は修士課程修了後、企業に就職した。

当研究室では、表面物性、特に「表面輸送」をキー ワードにして実験的研究を行っている。おもにシリ コン単結晶表面上に形成される種々の表面超構造や 超薄膜を利用し、それらナノスケール低次元系に固 有の電子状態や電子輸送特性を明らかにし、3次元 結晶の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、表面構造や原子層成長の制御・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。

#### 4.3.1表面電子輸送

## Si表面上のモット絶縁体相での表面状態伝導

錫 (Sn) を Si(111) 表面上に 1/3 原子層蒸着してで きる  $\sqrt{3} imes\sqrt{3}$  表面超構造は、第一原理計算によると モット絶縁体であり、実験的にもその兆候が報告さ れている。他方、低温でも金属のままであるという 報告もあり、その相転移の有無が盛んに議論されて いる。そこで本研究では、マイクロ4端子プローブ 法によって、この表面の表面状態電気伝導を測定し た。その結果、室温から15Kまで一貫して半導体的 な温度依存性を示した。走査トンネル分光法の結果 によると室温から 70 K まではフェルミ準位での状 態密度が徐々に減少していき、70 K で完全にギャッ プが開くので、電気伝導の結果は確かにモット絶縁 相の描像に矛盾しない。電気伝導から得られたエネ ルギーギャップの大きさは 5 meV と非常に小さかっ た。今後この表面にキャリアドーピングをしてバン ド構造や電気伝導特性がどう変化するか調べる。

## Si(557)-Pb 表面の電気伝導

微傾斜面の Si(557) 表面上に Pb 原子を 2 原子層 程度蒸着して 640 K で加熱すると、原子鎖の列が形 成される。この表面は78Kで相転移を起こし、原 子鎖平行方向の電気伝導が半導体的から金属的な振 る舞いに変化し、かつ異方性が大幅に増加するとい う興味深い報告がなされているが、それを否定する 意見もあり、議論が分かれている。この系について 表面敏感な手法であるマイクロ4端子プローブ法を 用いて室温から 10 K まで測定を行ったところ、120 K付近で金属絶縁体転移が見られるとともに、70K 付近でも電気伝導の変化が見られた。70 K 付近の電 気伝導の変化が前述の相転移だと考えられるが詳細 は現在検討中である。今後は温度可変型4探針STM 装置を用いて、Pb 原子鎖に沿う方向の伝導度と鎖間 伝導度を別々に測定するとともに、STM や光電子分 光などの結果と合わせて相転移の機構を解明してい く。(韓国延世大学との共同研究)

カーボンナノチューブ探針による電気伝導測定

 $Si(111)-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面に対して金属被覆カーボ ンナノチューブ探針を用いて、探針間隔を 200 nm か ら 100 μm の範囲で変化させた直線4 探針法によっ て電気抵抗を測定した。その結果、探針間隔を縮小 すると基板結晶の抵抗値が増大する3次元的な電気 伝導から、抵抗値が探針間隔に依存しない2次元伝 導に遷移する領域が現れることが分かった。この領 域では表面状態と空間電荷層の電気伝導度のみ測定 することが可能である。また、10 µm 以下程度の探 針間隔では走査電子顕微鏡の電子線照射による損傷 のため抵抗値が変化することもわかった。一方、擬 1次元金属的な Si(111)-4×1-In 表面の電子線照射 による損傷の影響を調べた結果、電気伝導度は In 鎖 方向のみが減少し、鎖に垂直方向の電気伝導度は全 く変化しなかった。これは、電子線損傷によって減 少するのは表面状態の電気伝導度のみであり、空間 電荷層は変化しないためである。電子線照射によっ て残留水素の解離吸着が起こることが原因と考えら れる。

# 4.3.2 表面ナノ構造

Bi 超薄膜のスピン角度分解光電子分光測定

昨年度に引き続いて Si(111) 表面上の Bi 超薄膜に 関して、広島大学放射光科学研究センターにおいて スピン角度分解光電子分光測定を行った。その結果、 従来から Rashba 効果によりスピン分裂していると 言われていた表面状態バンドのスピン偏極に関して 明確な波数依存性が存在することが明らかになった。 これは第一原理計算との比較の結果、バルクバンド ギャップ中では確かに Rashba 効果が効いているが、 バルク射影と表面状態バンドが交わる領域において はパリティの影響によって新たな分裂(偶奇分裂)が 起きていると解釈できた。このように二つの性質の 違う分裂が滑らかに接合しているという新たな物理 現象を実験的に捉えることに成功した。(広島大学、 物材機構、ドイツユーリヒ研、スペイン DIPC との 共同研究)

#### Ag 超薄膜の表面合金化

Si(111) 表面上に原子レベルで平坦な表面をもつ Ag超薄膜が成長することは従来から知られていた が、本年度はこのように作成した超薄膜の表面にさ らにBi、Pb、Sbなどの元素を吸着させて表面を合金 化させることにより、表面電子バンドにどのような 変化が生じるか調べた。その結果、膜厚方向への閉じ 込め効果によって生じる量子井戸状態のエネルギー 準位がフェルミ準位に近づく方向に系統的に変化す ることが分かった。さらにこれらの量子井戸状態が膜 全体ではなく表面にのみ存在する周期性( $\sqrt{3} imes\sqrt{3}$ ) に従うことが明らかになった。またこの合金化によ り表面状態バンドが Rashba 効果で大きくスピン分 裂することが分かっていたが、表面状態と量子井戸 状態との相互作用の結果、量子井戸状態もスピン偏 極を示す可能性が示された。今後、スピン角度分解光 電子分光法で、この予想を確かめる予定である。(東 大物性研、ドイツユーリヒ研との共同研究)

#### Bi 超薄膜上の単原子層ペンタセン膜の電子状態

Si(111) 表面上に作成した Bi 超薄膜の上に、結晶 性の良いペンタセン(Pn)が単原子層から層状に成 長することが報告されたが、今回、角度分解光電子 分光法により、この電子状態を調べた。その結果、従 来から言われていたように基板 Bi と Pn 分子層の相 互作用が非常に小さいこと、また有機薄膜としては 非常に大きな 300 meV 程度のバンド分散を HOMO バンドが示すことが分かった。これは理論計算から 期待されるよりも隣接する Pn 分子同士の バンド の重なりが大きいことを示しており、Pn 薄膜におい てバンドに由来する移動度の高い電子輸送が起きて いることが明らかになった。今後は基板の構造を変 えて Pn と基板の相互作用がバンド分散にどう影響 するか調べる予定である。(千葉大学、物材機構との 共同研究)

#### 擬1次元金属表面での相転移と欠陥の影響

Si(111) 表面上に In 原子を1原子層吸着させて形 成される擬一次元金属構造の4×1-In 表面は120 K 程度で金属絶縁体転移(パイエルス転位)を起こす ことが知られている。今回、この表面に意図的に欠 陥を導入したとき、この相転移がどのような影響を 受けるのか調べた。水素と酸素の吸着によってでき る点欠陥を作成し、その量も系統的に変えて実験を 行った。その結果、欠陥導入とともに相転移温度が 上昇することが観測された。また欠陥の量が多すぎ るとそもそも相転移自体が起きず、室温から絶縁体 的な温度依存性を示すことが分かった。これは欠陥 によって電荷密度波のゆらぎがピン止めされる結果、 転移温度が上昇したものと解釈できる。今後、電気 伝導でみた転移温度と電子回折でみた相転移温度の 関係を明らかにする予定である。(韓国 Inha 大学と の共同研究)

#### 表面自由電子系における磁性不純物の影響

Si(111)-7×7 表面に1原子層のAgを加熱蒸着し て得られる Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面は、自由電子 的な放物線バンドをもつ金属的で理想的な二次元自 由電子系として知られている。前年度、磁性不純物 Mn を導入した場合、この表面上に Mn が単原子と して点在し、放物線的な表面バンドが分裂し、 フェ ルミ波数が大きくなることが観測された。今年度は、 この表面の磁性について知見を得るため、高エネル ギー加速器研究機構物質構造科学研究所放射光科学 研究施設において、150 K, 0.2 T で磁気円二色性の 測定が可能な装置を立ち上げた。現在は予備測定の 段階である。また、Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面と同様 に理想的な金属的二次元自由電子系として知られる  $Si(111)-\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面に Co を 0.05 原子層ほど導 入し、電気抵抗の温度依存性を測定した。その結果、 15 K 付近で電気抵抗の急激な増大を観測した。これ は近藤効果と関連する現象であると考えられ、今後 Coの導入量依存性など系統的な測定を行い、物理機 構について明らかにする予定である。

#### In / Si(111) 金属表面超構造への Gd 吸着

半導体表面上には金属的な表面超構造が形成され、 バルクとは独立した電子状態を持つことが知られて いる。しかし、それら表面状態と磁性不純物との相互 作用についての研究はほとんどない。そこで、In を Si(111) 表面に蒸着して得られる擬一次元金属である  $4 \times 1$ 、自由電子的二次元金属である  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ 構造に Gd を蒸着して RHEED・STM 観察、マクロ4端子 電気伝導測定を行った。その結果、4×1-In 表面の場 合は Gd 蒸着とともに電気伝導度が下がり、RHEED において新しい超構造スポットが観測された。それ に対して、 $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面の場合は、 $\sqrt{7} \times \sqrt{7}$  に 相転移し、これに対応して電気伝導度の増大が観測 された。これは Gd が自由電子的なバンドに電子を 供給したことを示していると思われる。今後は現在 立ち上げ中である超高真空極低温表面磁気光学カー 効果測定装置を用い、磁性的な性質及び、スピン角 度分解光電子分光法を用いて Gd 蒸着前後のバンド の変化について調べる予定である。

# 4.3.3 新しい装置・手法の開発

#### 超高真空極低温表面磁気光学カー効果測定装置の開発

二次元自由電子的な表面状態に磁性不純物をドー ピングしたときの磁気的性質を調べるために上記装 置の開発を行った。この装置は超高真空中で表面の 清浄化と金属蒸着によるサンプル作成が可能で、さ らにその場で20Kまで冷却、0.2Tの磁場をサンプ ル面内、面直両方に印加した状態で、HeNeレーザー 光を照射してカー効果を測定できる装置である。本 年度は冷却テスト、到達真空度テストを行い、その 後、真空中で鉄膜を蒸着し、実際にカー効果を測定 することに成功し、所期性能を達成した。引き続き 表面二次元自由電子系の磁性不純物効果を調べ、「希 薄磁性表面状態」の実現を目指す。

#### グリーン関数 STM 装置の改良

約6Kまでの極低温で動作可能な独立駆動型4探 針 STM 装置を数年かけて開発している。この装置 では、STM/STS や温度可変マイクロ4端子電気伝 導測定に加え、「多探針 STM」の利を活かして、輸 送現象の本質的な特性を表す遅延グリーン関数を実 空間でマッピングすることが可能である。本年度は 主に、Si(111)-4×1-In 表面上に成長させた Ag 薄膜 の電気伝導測定に特化してセットアップを進めてき た。基板表面も Ag 薄膜も擬 1 次元金属的な電子状 態を持つことが知られており、電気伝導の温度依存 性や探針間隔依存性、異方性、膜厚依存性を測るこ とで、フェルミ面のトポロジカル相転移、表面パイ エルス転移、局在現象等の解明に役立つことが期待 される。まず、RHEED でその場観察しながら幅広 い温度領域 (45 K-1500 K) で試料が作成できるよう に試料準備室の改良を行った。RHEED の強度振動 を測れる仕様にして、Si(111)-4×1-In 上に酸素と水 素を曝露した際の超構造相転移温度の変化を観測し た。最近予備実験として、界面超構造として利用す る Si(111)-4×1-In の室温測定で異方性を確認するこ とができた。来年度は、カーボンナノチューブを用 いた機能性探針を導入して、様々な表面超構造、そ の上に作成した量子薄膜、ナノワイヤー等の電気伝 導度を µm から nm オーダーの 4 端子法で測定し、 遅延グリーン関数の実空間マッピングも試みる予定 である。

#### 磁気抵抗測定装置の開発

超高真空、極低温(液体 He 温度)、強磁場(~7T) 環境下で動作するマルチプローブシステムの開発を 行っている。プローブユニットにはSTM 探針やマ イクロ4端子プローブなど様々なプローブを自由に 着脱することができ、ピエゾ駆動により試料表面に アプローチし、STM 測定や表面敏感な電気伝導測定 を可能にする。これにより、これまでほとんど研究 されてこなかった固体表面の金属低次元系の電子輸 送特性の磁場依存性を調べることが可能となる。現 在、8 K で超伝導マグネットに磁場を印加した状態 で、プローブをピエゾ駆動させて試料にアプローチ できることを確認できた。

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われ た。記して感謝いたします。

・科研費 基盤研究A「半導体結晶上の希薄磁性表面 状態の形成とスピントロニクスへの応用」(代表 長 谷川修司)

・日本学術振興会 二国間交流事業(共同研究)(韓 国)「半導体表面上の金属ナノ構造と電気伝導」(日 本側代表 長谷川修司)

・日本学術振興会 日中韓フォーサイト事業「サブ 10 nm ワイヤ;その新しい物理と化学」(日本側代表 長 谷川修司)

### <報文>

(原著論文)

- I. Matsuda, C. Liu, T. Hirahara, M. Ueno, T. Tanikawa, T. Kanagawa, R. Hobara, S. Yamazaki, S. Hasegawa, and K. Kobayashi: *Electron-phonon interaction and localization of surface-state carriers in a metallic monolayer*, Physical Review Letters **99**, 146805 (Oct 2007).
- [2] H. Kakuta, T. Hirahara, I. Matsuda, T. Nagao, S. Hasegawa, N. Ueno, and K. Sakamoto: *Electronic structures of the highest occupied molecular orbital bands of a pentacene ultrathin film*, Physical Review Letters **98**, 247601 (Jun 2007).
- [3] Y. Nakayama, S. Yamazaki, H. Okino, T. Hirahara, I. Matsuda, S. Hasegawa, and M. Ichikawa: *Electrical conduction of Ge nanodot arrays formed* on an oxidized Si surface, Applied Physics Letters **91**, 123104 (Sep 2007).
- [4] T. Hirahara, I. Matsuda, S. Yamazaki, N. Miyata, T. Nagao, and S. Hasegawa: Large surface-state conductivity in ultrathin Bi films, Applied Physics Letters 91, 202106 (Nov 2007).
- [5] H. Okino, I. Matsuda, S. Yamazaki, R. Hobara, and S. Hasegawa: Transport in Defective Quasi-One-Dimensional Arrays of Chains of Gold Atoms on a Vicinal Silicon Surfaces, Physical Review B 76, 035424 (Jul 2007).
- [6] T. Hirahara, K. Miyamoto, I. Matsuda, T. Kadono, A. Kimura, T. Nagao, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, S. Qiao, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, and S. Hasegawa: *Direct Observation of Spin Splitting in Bismuth Surface States*, Physical Review B **76**,153305 (Oct 2007).
- [7] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobara, S. Hasegawa, Y. H. Kim and G. S. Lee: Influence of Defects on Transport in Quasi-One-Dimensional Metallic Atomic-Chain Arrays on Silicon Surfaces, Physical Review B 76, 195418 (Nov 2007).

- [8] H. Morikawa, I. Matsuda, and S. Hasegawa: Absence of Charge-Density Waves on the Dense Pb/Ge(111)-√3 × √3 Surface, Physical Review B, in press (2008).
- [9] Y. Nakayama, K. Takase, T. Hirahara, S. Hasegawa, T. Okuda, A. Harasawa, I. Matsuda, Y. Nakamura, and M. Ichikawa: *Quantum-Size Effect in Uniform Ge-Sn Alloy Nanodots Observed by Photoemission Spectroscopy*, Japanese Journal of Applied Physics 46, L1176 (Nov 2007).

(総説)

- [10] I. Matsuda and S. Hasegawa: Fermiology and transport in metallic monatomic layers on semiconductor surfaces, Journal of Physics: Condensed Matter 19, 355007 (Aug 2007).
- [11] S. Hasegawa: Surface One-Dimensional Structures, Chinese Journal of Physics 45, 385 (Aug 2007).

#### (国内雑誌)

- [12] 劉燦華、松田巌、長谷川修司: Si(111)- √3×√3-Ag
   表面上における原子レベルでの金クラスターの自己
   組織化, PF News 25 (No. 3), 17 (Nov 2007).
- [13] 長谷川修司、吉本真也、保原麗:4 探針STMで何が できるのか、固体物理 42 (No. 11), 757 (Nov 2007).

#### (その他)

- [14] S. Hasegawa, M. Namiki, and K. Kitahara: Japan Has Joined the IPhO, Bulletin of The Association of Asia Pacific Physical Societies 17 (No. 3), 23 (Jun 2007).
- [15] 長谷川修司:「高校生よ、世界に挑もう」-国際物理 オリンピックを例にして-, 下野教育、特集「大志に 生きる」、No. 726, p. 17 (Nov 2007).
- [16] 長谷川修司: e-Journal の現状と将来 -表面科学講演 大会特別講演より-,表面科学,印刷中 (Jul 2008).
- [17] 長谷川修司: 全国物理コンテスト「物理チャレンジ」 ~出でよ、物理のハンカチ王子~,教育フォーラム中 学校数学理科保健体育、2008 春号 p. 22 (大日本図 書, Apr 2008).

#### (学位論文)

- [18] 平原徹: Role of Spin-Orbit Interaction and Surface States in Quantum Bismuth Films (博士論文).
- [19] 吉本真也:金属被覆カーボンナノチューブ探針の開発 およびそれによるナノメートルスケール電気伝導計 測(博士論文).
- [20] 芝崎剛豪:表面擬一次元金属系の相転移と欠陥(修士 論文).

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [21] S. Hasegawa: Transport at Atomic Wires on Silicon Surfaces, German Physical Society Spring Meeting, 2008 年 2 月 26 日 (Tech. Univ. Berlin, Germany).
- [22] S. Hasegawa: Making non-magnetic surfaces ferromagnetic, Korean Vacuum Society, 2008年2月 15日 (Dankook University, Korea).
- [23] S. Hasegawa: Four-tip scanning tunneling microscope for measuring transport in nanostructures, SPIE Conference on Device and Process Technologies for Microelectronics, MEMS, Photonics, and Nanotechnology IV, (Conference 6800), 2007年12月6日 (Canberra, ACT Australia).
- [24] S. Hasegawa: Four-Tip Scanning Tunneling Microscope for Measuring Transport in Nanostructures, The 54th International AVS Symposium, 2007年 10月16日 (Seattle, USA).
- [25] S. Hasegawa: Electronic Transport at Monolayers and Atomic Chains on Silicon Surfaces, The 17th International Vacuum Congress (IVC-17), 13th International Conference on Surface Science (ICSS-13), International Conference on Nanoscience and Technology 2007 (ICN+T 2007), 6th Nordic Conference on Surface Science (NCSS-6), 22nd Nordic Semiconductor Meeting (NSM-22) and 4th Swedish Vacuum and Materials Science Meeting (SVM-4), 2007 年 7 月 4 日 (Stockholm, Sweden).

#### 一般講演

- [26] N. Nagamura, N. Nagamura and S. Hasegawa Quasi-One-dimensional Metal Film Prepared on One-dimensional Surface Superstructure ~ARPES and 4-tip STM measurement~, JSPS 1st HOPE Meeting on Nanoscience and Nanotechnology, 2008 年 2 月 26 日 (筑波)
- [27] S. Hasegawa: Making non-magnetic surfaces ferromagnetic, Symposium on Surface and Nano Science 2008, 2008 年1月 25 日 (安比).
- [28] N. Nagamura, I. Matsuda, T. Uchihashi, N. Miyata, T. Hirahara, K. Takase, Y. Kitaoka, Y. Niinuma and S. Hasegawa: *Electric and Transport Properties of Quasi-one-dimensional Quantized States of Ultra-thin Ag Films on Si(111)4×1-In*, JSPS-NSFC-KOSEF A3 Foresight Program Sub-10nm Wires; New Physics and Chemistry, 2007年11月16日(草津).
- [29] T. Hirahara, K. Miyamoto, I. Matsuda, T. Kadono, A. Kimura, T. Nagao, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, S. Qiao, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, S. Hasegawa, *Direct observation of spin splitting in surface states of non-magnetic Bi*, The 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-9), 2007 年 11 月 15 日 (東京大).
- [30] K. Takase, I. Matsuda. T. Hirahara, and S. Hasegawa: STM observation and photoemission

spectroscopy of Mn adsorbed Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface, The 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-9), 2007 年 11 月 13 日 (東京大).

- [31] K. He, T. Hirahara, I. Matsuda, and S. Hasegawa, Spin-splitting States of Bi-Ag Ordered Surface Alloy on Ag Quantum Well Films, The 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-9), 2007年11月13日(東京大).
- [32] Y. Niinuma, T. Hirahara, S. Hasegawa: Gd adsorption on In-induced metallic surface superstructures on Si(111), The 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-9), 2007年11月12日(東 京大).
- [33] T. Shibasaki, H. Okino, Y. H. Kim, G. S. Lee, T. Hirahara, and S. Hasegawa: Influence of impurities on electrical properties of atomic wire selfassembled on silicon surface, The 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-9), 2007年11 月 12日(東京大).
- [34] S. Yamazaki, Y. Hosomura, I. Matsuda. R. Hobara, and S. Hasegawa, *Metallic Transport on In/Si(111) Atomic Layer*, The 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-9), 2007年11 月 12日(東京大).
- [35] T. Hirahara and S. Hasegawa, Spin-split surface bands of Bi quantum films, The First Yonsei-Todai Joint Workshop on Physics, 2007年8月31日(東 京大).
- [36] T. Hirahara, K. Miyamoto, I. Matsuda, T. Kadono, A. Kimura, T. Nagao, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, S. Qiao, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, S. Hasegawa, *Direct observation of spin splitting in surface states of non-magnetic Bi*, JSPS-NSFC-KOSEF A3 Foresight Program on Sub-10nm Wires; New Physics and Chemistry, 2007年7月22日(北京).
- [37] T. Hirahara, K. Miyamoto, I. Matsuda, T. Kadono, A. Kimura, T. Nagao, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, S. Qiao, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, S. Hasegawa, Momentum-dependent spin-polarized surface states in ultrathin Bi films, The 17th International Vacuum Congress (IVC-17), 13th International Conference on Surface Science (ICSS-13), International Conference on Nanoscience and Technology 2007 (ICN+T 2007), 6th Nordic Conference on Surface Science (NCSS-6), 22nd Nordic Semiconductor Meeting (NSM-22) and 4th Swedish Vacuum and Materials Science Meeting (SVM-4), 2007年7月4日(Stockholm, Sweden).
[38] T. Hirahara, Spin-orbit coupling effects in quantum Bi films, 3rd Japan-Korea Symposium on Surface Nanostructures, 2007年6月20日(松島).

#### (国内会議)

#### 招待講演

- [39] 平原徹: Bi 超薄膜における Rashba 効果と量子サイズ効果,日本物理学会第63回年次大会領域9領域3 合同シンポジウム「反対称性の破れた表面における スピンと軌道」,2008年3月24日(近畿大学).
- [40] 長谷川修司:得意技で世界へはばたけ-物理オリン ピックを例にして-、つくば市立竹園東中学校教育講 演会、2007年11月8日(つくば).
- [41] 長谷川修司: e-Journal の現状と将来,日本表面科学 会第 27 回講演大会,2007 年 11 月 2 日 (東大生産研, 駒場).
- [42] 長谷川修司:得意技で世界へはばたけ-物理オリン ピックを例にして-,宇都宮市立瑞穂野中学校創立60 周年記念講演会、2007年9月15日(宇都宮).
- [43] 長谷川修司: 4 探針 S T Mの制御系および多機能ナノ チュープ探針の開発, 2007 分析展 科学技術振興機 構シンポジウム, 2007 年 8 月 30 日 (幕張メッセ).

#### 一般講演

- [44] 新沼優人,平原徹,長谷川修司: In / Si(111) 金属表 面超構造への Gd 吸着,日本物理学会第 63 回年次大 会,2008 年 3 月 24 日 (近畿大学).
- [45] 何珂,平原徹,奥田太一,長谷川修司,柿崎明人,松田 巌: Dependence of the hybridization gaps of Bi/Ag-√3×√3 grown on Ag (111) quantum-well films on the film thickness and quantum number, 日本物理 学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 24 日 (近畿大学).
- [46] 芝崎剛豪,沖野泰之,山崎詩郎,Y.K.Kim,永村直佳, 平原徹,松田巌,G.S.Lee,長谷川修司:Si(111)4
   × 1-In 表面の相転移と欠陥の効果,日本物理学会第 63回年次大会,2008年3月24日(近畿大学).
- [47] 宮田伸弘、成田尚司、平原徹、長谷川修司、松田巌: 超高真空・極低温・強磁場印加型独立駆動マルチプ ローブシステムの開発、物性研究所短期研究会、2007 年11月21日(物性研究所、柏).
- [48] 長谷川修司:真のナノメートル・スケールでの電気伝 導計測,平成19年度東北大学電気通信研究所共同プ ロジェクト研究会「ナノスケール半導体の物理とその ナノテクノロジーへの展開」,2007年10月26日(松 島).
- [49] 原田勲,長谷川修司,杉山忠男,田中忠芳,鈴木亨, 北原和夫:第38回国際物理オリンピック(IPhO)報
   告,日本物理学会第62回年次大会,2007年9月21日(北海道大).
- [50] 高瀬恵子,中山泰生,奥田太一,原沢あゆみ,松田巌, 平原徹,長谷川修司: Mn 吸着した Si(111) √3×√3-Ag 表面の STM および光電子分光測定 II,日本物理 学会第 62 回年次大会,2007年9月22日(北海道大).

- [51] 宮田伸弘,成田尚司,平原徹,長谷川修司,松田巌:極低温・強磁場印加型独立駆動マルチプロープシステムの開発、日本物理学会第62回年次大会、2007年9月22日(北海道大学).
- [52] 平原徹,小森田拓,佐藤礼奈,長谷川修司:Pb 吸着 Ag 超薄膜の量子井戸状態の研究,日本物理学会第6 2回年次大会,2007年9月24日(北海道大学).
- [53] Ke He, 平原徹, 松田巌, 長谷川修司: Spin-spliting state of Bi/Ag ordered surface alloy on Ag quantum-well films 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月 22 日 (北海道大学).
- [54] 山崎詩郎,松田巌,沖野泰之,守川春雲,長谷川修 司:低温における金蒸着シリコン表面の電気伝導度の 比較,日本物理学会第62回年次大会,2007年9月22 日(北海道大学).
- [55] 吉本真也,北岡佑介,保原麗,平原徹,長谷川修司:
  PtIr 被覆カーボンナノチューブ探針を用いた Si(111)-√3×√3-Ag 表面の電気伝導測定,日本物理学会第62
   回年次大会,2007年9月24日(北海道大学).

(セミナー)

- [56] 平原徹, Role of Spin-Orbit Interaction and Surface States in Quantum Bismuth Films, 東大物性研ナノ スケール部門セミナー, 2007 年 12 月 20 日 (東大物 性研,).
- [57] 長谷川修司:表面ナノ構造の電子状態、電子輸送、ス ピン状態奈良先端大学院大学物質創成科学研究科講 演会,2007年11月19日(奈良先端大).
- [58] T. Hirahara: Spin-orbit coupling effects in quantum Bi films, Yonsei University, 2007 年 6 月 8 日 (Seoul, Korea).
- [59] 長谷川修司: Making non-magnetic surfaces magnetic, 東京大学物理教室物性セミナー 2007 年 4 月 16 日 (東京大).

(講義等)

- [60] 長谷川修司: 奈良先端大学院大学集中講義「物質科 学特論 I」 2007 年 11 月 19-21 日.
- [61] 長谷川修司: 兵庫県立大学理学部集中講義「表面科 学」2007 年 9 月 18-20 日.
- [62] 長谷川修司:横浜市立大学基盤科学序説「ナノサイエンス・ナノテクノロジー 半導体表面ナノ構造とデバイス」,2007年10月22日.
- [63] 長谷川修司、平原徹、北岡佑介 (TA):物理学実験 I (3年生)電子回折、2007年度冬学期(本郷).
- [64] 長谷川修司:現代物理実験学I(学部3年生講義)2007 年度夏学期(本郷).
- [65] 長谷川修司:固体物理学 II(学部4年生講義) 2007 年度冬学期(本郷).
- [66] 長谷川修司:物理学ゼミナール(学部3年生)2007年 度冬学期(本郷).
- [67] 長谷川修司:現代物理学入門「表面・ナノスケールの 物理」,2007年4月16日(本郷).

## 4.4 福山研究室

我々は低温極限で現れる超流動、超伝導、強相関 効果、磁気フラストレーション、量子ホール効果な ど、様々な量子多体現象や相転移現象を実験的に研 究している。特に、これらの現象に対する空間次元 の効果に注目し、新しい物理概念の発見とその機構 解明を目指している。対象となる実験系は、主に液 体および固体ヘリウム、低次元導体、異方的超伝導 体などである。

我々の用いる実験手法は多岐に渡るが、ユニーク かつ高性能な実験装置を自主開発して独自の実験を 展開する、という方針で研究を進めている。そのな かでも次の二つの装置を主力としている。ひとつは 50 µK に至る超低温での測定のための核断熱消磁冷 凍機であり、比熱測定や核磁気共鳴(NMR)測定によ る2次元ヘリウム3の研究を進めている。もうひと つは30 mK に至る超低温、6 T までの高磁場、10<sup>-8</sup> Pa以下の超高真空という多重極限環境下で0.1 meV 以下のエネルギー分解能、0.1 nm 以下の空間分解能 を有する超低温走査トンネル顕微鏡(ULT-STM)で、 2次元電子・正孔系やエキゾチック超伝導体の走査ト ンネル顕微/分光(STM/STS)実験を行っている。

#### 4.4.1 2次元フェルミ粒子系の強相関効果

グラファイト表面に物理吸着した単原子層ヘリウム  $3({}^{3}\text{He})$ は、強く相互作用する 2 次元フェルミ粒子系のモデル物質である。この系の特徴は、乱れを導入することなく粒子面密度 ( $\rho$ )を広い範囲で変えて相関効果を自在にコントロールできる点である。我々は、これまでの熱容量や NMR による磁化測定から、吸着第 2 層目の 2 次元  ${}^{3}\text{He}$  には 4/7 局在相の他に計 4 つの特徴的な量子相が存在することを明らかにした。ここで 4/7 相とは、第 1 層目に整合な 4/7の粒子密度をもつ三角格子構造の局在相のことである。本研究では、核スピンをもたない  ${}^{4}\text{He}$ を吸着第 1 層としており、この場合の 2 層目の 4/7 相の密度は  $\rho_{4/7} = 6.80$  nm<sup>-2</sup> である。

モット局在相にドープされた零点空格子点

有限温度で熱励起によって形成され熱拡散で結晶 中を移動する通常の原子空孔に対して、結晶中を量 子力学的にホッピングし、絶対零度でも安定して存在 する原子空孔のことを零点空格子点(ZPV)と呼ぶ。 その性質は通常の原子空孔とは大きく異なり、ZPV を含む固体は結晶の対称性を保ちながら量子流体と しての性質(絶対零度でも有限の流動性をもつ)も併 せもった特異な量子状態となる。ZPV は固体 He の ような零点振動の大きな量子結晶中で発見される可 能性が最も高いが、今日まで3次元固体 He では実 験的に見出されていない。

しかし我々は、低密度フェルミ流体相と 4/7 相の 中間密度域  $(0.8 \le n \le 1 : n \equiv \rho/\rho_{4/7})$ の 2 次元 <sup>3</sup>He において、ZPV 相の実現を示唆する実験結果を得た。 従来この中間密度域は、フェルミ流体相と4/7相の 2相共存領域と考えられてきた。しかし、我々が精密 な熱容量測定を行ったところ、4/7層から密度を減少 させると共に成長する熱容量ピークが20<T<80 mKに観測され、その温度および密度依存性が2次 元ホールバンドの比熱計算とよく一致することから、 この密度域でZPV相が実現している可能性が高いこ とが分かった。



図 4.4.5: 2次元<sup>3</sup>He のスピンエコー信号の時間減衰。 試料密度は ZPV 相と考えられる 0.8 < n < 1.0 の範 囲で、測定温度は T = 100 mK。

ZPV 相存在の可否を確定するために、スピンエ コー測定を行ってミクロかつ動的性質を調べている が、今年度はエコー信号の減衰をより広い時間領域 まで拡げて測定した。図 4.4.5 は、中間密度域 (0.8 < n < 1.0)において T = 100 mK で測定したエコー 信号強度の 90°-180° パルス間隔 ( $\tau$ )依存性である。 緩和過程は単純な指数関数では表されず、一見長短 ふたつのスピン-スピン緩和時間 ( $T_2^l \& T_2^s$ )で特徴付 けられるように見える。しかし、実際には  $T_2^l$ 成分の 寄与は全磁化の 5%しかなく、その大きさは T = 20mK と 100 mK で温度変化せず、密度が増加すると  $T_2^s$ 成分と同期して大きくなる。

もし、この中間密度域が従来の考えのように2相共 存状態であるとすると、 $T_2^l$ 、 $T_2^s$ 成分はそれぞれフェ ルミ流体相、4/7相からの寄与と考えられ、その強 度比は大きく温度変化し、密度の増加とともに $T_2^l$ 成 分は減少するはずである。さらに、このような長い 緩和時間をもつ現象は、この密度域以外にもフェル ミ流体相や高密度の強磁性相などの2次元試料では 観測されるのに対し、バルクの液体<sup>3</sup>He試料では観 測されない。以上の実験事実と、2次元系のT<sub>2</sub>は2 次元面と外部磁場のなす角度で大きく異なるという 特質を考え合わせると、この現象はグラフォイル吸 着基板の配向性に分布 (± 15°) があることによる非 本質的なものであると考えられる。一方、全磁化の 95%を担う短い緩和時間  $T_2^s$  は、4/7 相から密度を減 少させるとほぼ線型に増加する。 すなわち、2 次元 <sup>3</sup>He の 4/7 相直下の密度域は一様相であって、ドメ イン壁構造などミクロ、マクロいずれの2相共存状 態でもなく、ZPV 相が実現している可能性がさらに

高まったと言える。

## 4.4.2 グラファイト系物質の物性研究

グラフィン試料の作成と評価

炭素の単層シートであるグラフィンの電子状態は、 ハニカム格子構造に由来してフェルミエネルギーで 線型に交わる特異な分散関係をもち、その準粒子は 質量ゼロのディラック・フェルミオンとして振る舞 うことが知られている。その結果グラフィンは、こ れまでにない特異な半整数の量子ホール効果を示す だけでなく、大きな電界効果をもつ興味深い2次元 電子/正孔系である。またその構造は安定で化学的に 不活性であるため、原子レベルで清浄な表面を比較 的容易に得ることができ、表面走査プローブ実験と の親和性も高い。今年度から我々は、ULT-STM を 使ったナノメートルスケールでの局所トンネル分光 計測によって、グラフィンの示す新奇な量子ホール 効果とその端状態、それらとグラファイト端状態と の関係、さらには分数量子ホール効果など解明する 研究に本格的に着手した。

その第一段階として今年度はグラフィン試料の作成と評価方法を確立した。グラフィンは280 nm 厚のSiO<sub>2</sub> 表面膜をもつSi基板上に単結晶グラファイトを劈開することで作成する。この方法で、図4.4.6に示すように、一辺が50 µm におよぶ世界的に見ても大きなサイズのグラフィン試料を作成できるようになった。作成した試料は、以下のように、原子間力顕微鏡(AFM)による厚さ測定、伝導度測定による量子ホール効果の測定(図4.4.7)、基板と試料の光学コントラストの測定(図4.4.8)によって単層膜であることを確認した。

まず、AFM 測定から得られるグラフィン試料の厚 さは 0.6 nm で、理論的な厚さ (0.35 nm) よりも少し 大きいが、他グループも同様の報告をしている。こ れは、グラフィンと基板との間に残存する不純物の ためだと考えられる。次に、図 4.4.7 は B = 10 T、 T = 1.4 K におけるグラフィン試料の 2 端子伝導度



図 4.4.6: SiO<sub>2</sub> 基板上に劈開したグラフィン試料の 光学顕微鏡像。上部にあるのは多層のグラファイト 片。中央にはグラフィンがめくれ上がっている様子 もみえる。



図 4.4.7: B = 10 T、T = 1.4 K で得られたグラフィ ンの2端子伝導度のゲート電圧依存性。縦軸は $4e^2/h$ を単位としたホール伝導度、横軸は関係式  $n_e = \epsilon_0 \epsilon \frac{V_g}{te}$ を用いて、ゲート電圧を電荷密度  $n_e$  に変換したもの である。

のゲート電圧依存性である。量子ホール状態におけ る2端子伝導度はホール伝導度と同等と考えて差し 支えない。縦軸のホール伝導度は4e<sup>2</sup>/hを単位とし てプロットし、横軸は関係式  $n_e = \epsilon_0 \epsilon \frac{V_a}{te}$ を用いて、 ゲート電圧  $V_q$  を電荷密度  $n_e$  に変換してある。ここ で、t、 $\epsilon$ は基板 SiO<sub>2</sub>の厚さと誘電率、 $\epsilon_0$ は真空の誘 電率、eは素電荷である。これを見ると、 $n_e < 0$ の 領域では、縦軸、横軸共にグラフィン特有の量子化 値において階段状の振る舞いを示していることが分 かる。 $n_e > 0$ の領域でホール伝導度が不規則な振舞 いを示しているのは、電極端子の微細加工時におけ る残留不純物のためであろう。図4.4.8は、多数の試 料について基板に対する緑色成分の光学コントラス ト (C) を測定してヒストグラムにしたものである。 グラフィンシートの層数に応じて C が離散的な値を とり、 $C \approx 0.1$ が単層グラフィンに対応することが 分かる。今後は、こうして作成したグラフィン試料 をSTM/STS 測定用に加工し、その磁場中状態密度 の測定を行う予定である。以上の研究は、本学工学 系研究科樽茶研究室との共同研究である。

#### グラファイト表面の2次元準粒子

3次元バルクのグラファイト表面の準粒子には、自 由2次元電子的な性質をもつものと、グラフィンの ディラック・フェルミオン的な特徴をもつものの2種 類存在することを、ランダウ準位の走査トンネル分 光測定を通じて示した。

図 4.4.9 (a) は、B = 6 T の外部磁場を基底面に垂 直に印加したとき人工多結晶グラファイト (高配向性 熱分解グラファイト: HOPG) 表面で観測された微 分トンネルコンダクタンスである。トンネルコンダ クタンスのピーク、すなわち電子状態密度のピーク はランダウ準位に対応している。図 4.4.9(b) はラン



図 4.4.8: 数原子層グラフィン試料と SiO<sub>2</sub> 基板との 光学コントラスト比のヒストグラム。

ダウ準位エネルギーを磁場に対して、図 4.4.9(c) は 磁場の平方根に対してプロットしたものである。ラ ンダウ準位は低エネルギー領域では磁場に線形に変 化し、高エネルギー領域では磁場の平方根に依存し ている。さらに興味深いことに、全てのランダウ準 位は $B \rightarrow 0$ の極限で最低ランダウ準位(図中×印) に収束している。まったく同様のランダウ準位構造 が単結晶グラファイト (キッシュ・グラファイト) に ついても観測されている(4.4.9(d)(e)(f))。しかし、 ランダウ指数 n に対する依存性を調べると、低エネ ルギーの磁場に線形なランダウ準位は HOPG とキッ シュ・グラファイトで異なっている。一方、磁場の 平方根に比例するものは、どちらのグラファイトに 対しても、 $E_n \propto \sqrt{nB}$ と表され、グラフィンの質量 ゼロディラック・フェルミオンと同じ磁場および n 依存性をもつことが分かった。このとき最低ランダ ウ準位は、グラフィンのディラック点 (線型分散関係 の交差点)に対応すると考えられる。以上のような グラファイト表面で観測される準粒子の性質は、バ ンド構造のK点、H点に対応した特徴と考えられる が、それらがバルク試料表面で観測される起源やグ ラファイトの種類に依存するメカニズムの解明は今 後の課題である。

#### グラファイト層間化合物の超伝導

グラファイトの層間に原子や分子を挿入すること で形成されるグラファイト層間化合物(GIC)では、 層間物質の種類やその配置を変えることで物性を様々 に変化させることができる。こうして得られる興味 深い物性のひとつに超伝導が挙げられる。これまで アルカリ金属を層間物質とすることで、転移温度が1 K以下の超伝導GICが得られている。一方、アルカ リ金属は低温でグラファイト表面を濡らすことが知 られており、単原子層から数原子層の超薄膜を表面 形成することができる。単原子層グラファイトであ るグラフィン上にアルカリ金属を1~数原子層表面蒸 着することで、2次元超伝導の発現と電界効果による その制御の可能性が理論的に示唆されている。我々 はこの新しい超伝導状態の探索を目標として、まず はグラファイト上にアルカリ金属を低温蒸着し、そ



図 4.4.9: B = 6 T、T = 70 mK で観測した HOPG 表面の微分トンネルコンダクタンス (a)、ランダウ 準位の B 依存性 (b)、 $\sqrt{B}$  依存性 (c)。(d)(e)(f) は キッシュグラファイトに対する同様のデータ(ただ し、T = 55 mK)。全てのランダウ準位は $B \rightarrow 0$  で フェルミエネルギー近傍の最低ランダウ準位(×印) に収束する。

の吸着構造を STM により実空間で観察した。

T = 30 K、115 K で K 原子をグラファイト上に蒸着し、その吸着構造をT = 1.8 K で観察した結果、K 原子はグラファイト上で基板のハニカム格子の対称 性を反映した単層のクラスターを形成することがわ かった。このクラスターの大きさは蒸着温度が低い ほど小さくなることも分かった。しかし、そのクラ スターの分布は基板全面に渡って不均一であり、超 伝導を示唆する結果も今のところ得られていない。

## 4.4.3 エキゾチック超伝導体のSTM/STS 観測

#### CeCoIn<sub>5</sub>のトンネル分光測定

超伝導状態に対する BCS 理論では、一様な外部磁 場が電子の磁気モーメントと強く競合し、電子のフェ ルミ面がゼーマン分裂するとき、クーパー対が有限 の重心運動をもつような FFLO 状態をとると期待さ れている。FFLO 状態では、超伝導の秩序変数が自 発的に空間変調していると考えられる。近年、重い 電子系のd 波超伝導体である  $CeCoIn_5$  の高磁場低温 相がこの FFLO 相の有力な候補として注目を浴びて いる。我々は空間変調した FFLO 状態の直接観測を 目標として、 $CeCoIn_5$  の STM/STS 観測に取り組ん でいる。

今年度はその第一段階として、CeCoIn<sub>5</sub>の超伝導 ギャップの温度依存性、磁場依存性をトンネル分光に より測定した。図 4.4.10 に極低温で測定された状態



図 4.4.10: CeCoIn<sub>5</sub> 試料に対するトンネル分光の測 定結果。T = 70 mK、B = 0 Tではフェルミ・エネ ルギー近傍に  $2\Delta \sim 1.5 \text{ mV}$ の超伝導ギャップが明瞭 に観測された。この超伝導ギャップは (a)T = 3.8 Kへの昇温、あるいは (b)B = 6 Tの磁場印加で消失 する。( $I_t = 1 \text{ nA}$ 、 $U_g = 5 \text{ mV}$ 、 $V_{mod} = 25 \mu \text{V}$ )

密度を示す。T = 70 mK、B = 0 Tでは  $\text{CeCoIn}_5$ の 転移温度 ( $T_C = 2.3 \text{ K}$ ) に対応したエネルギーギャッ プがフェルミ・エネルギー周りにみられるが (図中 丸印)、このギャップが温度 (a)、磁場 (b) によって消 失している様子が明瞭に観測された。なお本研究は、 京都大学大学院理学研究科松田研究室、大阪大学大 学院理学研究科大貫研究室との共同研究である。

<報文>

(原著論文)

- Hiroshi Kambara, Tomohiro Matsui, Yasuhiro Niimi, Hiroshi Fukuyama: Construction of a versatile ultralow temperature scanning tunneling microscope, Review of Scientific Instruments 78, 073703 (2007).
- [2] Hiroshi Kambara, Yasuhiro Niimi, M. Ishikado, Shiichi Uchida, Hiroshi Fukuyama: Temperature dependence of the impurity-induced resonant state in Zn-doped Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+ $\delta$ </sub> by scanning tunneling spectroscopy, Physical Review B **76**, 052506 (2007).
- [3] Yasuhiro Niimi, Hiroshi Kambara, Hiroshi Fukuyama: STM/STS measurements of quasi two-dimensional electronic states near artificially created defects in magnetic fields, Physica E 40, 1298 (2007).
- [4] Tomohiro Matsui, Christian Meyer, Lilli Sacharow, Jens Wiebe, Roland Wiesendanger: Electronic states of Fe atoms and chains on InAs(110) from scanning tunneling spectroscopy, Physical Review B 75, 165405 (2007).
- [5] Massimo Rontani, Elisa Molinari, Giuseppe Maruccio, Martin Janson, Andreas Schramm, Christian Meyer, Tomohiro Matsui, Christian Heyn, Wolfgang Hansen, Roland Wiesendanger: Imaging correlated wave functions of few-electron quantum dots: Theory and scanning tunneling spectroscopy experiments, Journal of Applied Physics **101**, 081714 (2007).

[6] Giuseppe Maruccio, Martin Janson, Andreas Schramm, Christian Meyer, Tomohiro Matsui, Christian Heyn, Wolfgang Hansen, Roland Wiesendanger, Massimo Rontani, Elisa Molinari: Correlation Effects in Wave Function Mapping of Molecular Beam Epitaxy Grown Quantum Dots, Nano Letters 7, 2701 (2007).

#### (国内雑誌)

- [7] 高吉 慎太郎、穀山 渉:液体窒素の沸騰停止 意外な メカニズム - 、固体物理 42,91 (2007).
- [8] 青木秀夫、上田正仁、福山 寛:新しい物質科学の創 成 - 超伝導 100 年 [座談会] ブレイクスルーへ向けて、 科学 78,220 (2008).

(学位論文)

- [9] 小島 治樹: Graphene 試料の作成とその物性評価 (修 士論文).
- [10] 河合 直樹: グラファイト系超伝導物質の研究 (修士論 文).
- <学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [11] D. Sato, K. Mukai, D. Tsuji, H. Kambara, and H. Fukuyama: Pulsed-NMR Studies of the Possible Zero-Point Vacancy Phase in 2D <sup>3</sup>He, International Workshop on Physics of Supersolids and Related Topics (Keio University, Yokohama, April 2, 2007).
- [12] Y. Shibayama, H. Fukuyama, and K. Shirahama: A Plan for Investigation of Supersolidity in Two-Dimensional <sup>4</sup>He films, International Workshop on Physics of Supersolids and Related Topics (Keio University, Yokohama, April 2, 2007).
- [13] D. Sato, K. Mukai, K. Obata, H. Kambara, and H. Fukuyama: Pulsed-NMR studies of the possible zero-point vacancy phase in 2D <sup>3</sup>He near localization, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (Kazan, Russia, August 1-6, 2007).
- [14] T. Matsui, H. Kojima, R. Deacon, M. Yamamoto, S. Tarucha, and H. Fukuyama: STM/STS Observations of Graphite and Graphene, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (Nagaragawa Convention Center, Gifu, October 30, 2007).
- [15] Y. Shibayama, H. Fukuyama, and K. Shirahama: Supersolidity in Two-Dimensional 4He Films on Graphite Basal Plane, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (Nagaragawa Convention Center, Gifu, October 29, 2007).

#### 招待講演

- [16] H. Fukuyama: Zero-Point Vacancies in 2D Crystalline Helium, International Workshop on Physics of Supersolids and Related Topics (Keio University, Yokohama, Japan, April 4, 2007).
- [17] H. Fukuyama: A Possible New Quantum Fluid of Atomic Vacancies, IOP Condensed Matter and Materials Physics Conference (University of Leicester, Leicester, UK, April 13, 2007).
- [18] H. Fukuyama: Novel Quantum Phases in 2D <sup>3</sup>He, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (Nagaragawa Convention Center, Gifu, Japan, October 31, 2007).
- [19] H. Fukuyama: Novel strong correlation effects in 2D <sup>3</sup>He, 2nd International Workshop on Materials Science and Nano-Engineering (Awaji Yumebutai International Conference Center, Awaji, Japan, December 3, 2007).

#### (国内会議)

#### 一般講演

- [20] 小島 治樹、松井 朋裕、Russel Deacon、山本 倫久、 樽茶 清悟、福山 寛: Graphene の磁場中 STS 観測, 日本物理学会 第 62 回年次大会 (北海道大学札幌キャ ンパス、2007 年 9 月).
- [21] 佐藤 大輔、小畑 和幸、神原 浩、福山 寛:2 次元固 体へリウム3における零点空格子点相の研究,日本物 理学会 第62回年次大会(北海道大学札幌キャンパ ス、2007年9月).
- [22] 高吉 慎太郎、福山 寛:液体窒素の沸騰停止,日本物 理学会 第62回年次大会(北海道大学札幌キャンパ ス、2007年9月).
- [23] 神原 浩、新見 康洋、石角 元志、内田 慎一、福山 寛: Zn ドープ Bi2212 における不純物共鳴状態の温度依 存性,低温走査トンネル顕微鏡の現状と展望(東京大 学物性研究所、2007 年 10 月).
- [24] 河合 直樹、松井 朋裕、小島 治樹、Russel Deacon、 山本 倫久、樽茶 清悟、福山 寛: Graphene の磁場 中 STM/STS 観測, 日本物理学会 第63回年次大会 (近畿大学本部キャンパス、2008 年3月).
- [25] 小畑 和幸、高吉 慎太郎、松井 朋裕、福山 寛:2次 元ヘリウム3のフラストレート磁性とその密度変化, 日本物理学会 第63回年次大会(近畿大学本部キャンパス、2008年3月).
- [26] 高吉 慎太郎、小畑 和幸、佐藤 大輔、松井 朋裕、福山 寛:2次元ヘリウム3の新奇量子相におけるスピンエコー測定,日本物理学会第63回年次大会(近畿大学本部キャンパス、2008年3月).
- [27] 柴山義行、福山 寛、白浜圭也:ねじれ振り子法による2次元<sup>4</sup>He 固体の超流動成分の測定,日本物理学会第63回年次大会(近畿大学本部キャンパス、2008年3月).

招待講演

- [28] 福山 寛: 超低温 STM による表面電子状態の高分解 能計測,日本物理学会 第62回年次大会(北海道大 学札幌キャンパス、2007年9月).
- [29] 松井 朋裕:磁場中 2 次元電子系の STS 観測 グラ ファイトからグラフィンへ - ,日本物理学会 第 62 回年次大会(北海道大学札幌キャンパス、2007 年 9 月).
- [30] 松井 朋裕: グラフィンおよびグラファイト表面の STM/STS 観測, 低温走査トンネル顕微鏡の現状と 展望 (東京大学物性研究所、2007 年 10 月).
- [31] 福山 寛:「新量子相の物理(スーパークリーン)」領 域レビュー,4 特定領域合同研究会「超伝導が拓く物 性科学の最前線」(首都大学東京、2007 年 12 月).

(セミナー)

- [32] H. Fukuyama: Zero-Point Vacancies in 2D Crystalline Helium, Condensed Matter Seminars (Royal Holloway, University of London, Egham, UK, April 9, 2007).
- [33] H. Fukuyama: STS Studies of Landau Quantization in Quasi 2DES at Graphite Surface, Condensed Matter Seminars (The University of Manchester, Manchester, UK, April 11, 2007).
- [34] 福山 寛:集中講義「低温物性物理学」(鹿児島大学理 学部物理科学科,鹿児島,2007年6月20-22日).
- [35] 福山 寛:セミナー「グラフィンの物理とグラファイト表面のランダウ量子化計測」(鹿児島大学理学部物理科学科,鹿児島,2007年6月22日).
- [36] 福山 寛:現代物理学入門「グラフィン (炭素の単原 子シート)の物理」(東京大学理学部物理学科,東京, 2007 年 6 月 25 日).

## 4.5 岡本 研究室

本研究室では、半導体2次元系における新奇な物 理現象の探索と解明を行っている。若いメンバーの 自由で柔軟な発想と行動力を最大の武器として研究 を推進している。

### 4.5.1 劈開表面に形成された2次元電子系

量子ホール効果などの2次元系における重要な輸送現象は、これまですべてデバイス中に閉じ込められた界面2次元系に対して行われてきた。一方、InAsやInSbの清浄表面に金属原子などを堆積させることにより表面にキャリアが誘起されることが光電子分光やSTSなどの測定からわかっていたが、面内伝導の測定は電極技術の困難などから行われていなかった。表面に形成された2次元電子系は、表面に堆積させる物質の自由度や走査型プローブ顕微鏡との相性の良さなどから非常に大きな可能性を持つ。近年、我々のグループにおいて、p型InAsおよびInSbを超高真空中で劈開して得られた清浄表面に金属を付



図 4.5.11: Feを堆積させた InAs 劈開表面において観 測された磁気抵抗曲線のヒステリシスの大きさ。ゼ ロ磁場、1.7 K における抵抗値を磁場印加の前後で 測定し、その差を最大印加磁場の関数としてプロッ トしている。黒丸は、温度を 1.7 K に保ったまま励 磁・消磁を行った場合の結果あり、三角は最大磁場 まで励磁後、温度を 12 K まで一旦上げ、磁場を保っ たまま再冷却した後に消磁した場合の結果である。

着させて誘起した2次元電子系に対する面内電気伝 導の測定手法が確立され、Agなどを蒸着して得られ た劈開表面では整数量子ホール効果が観測されてい る。本年度は、吸着物質が異なる系に研究を拡張す ることにより新現象の探索を行った。

#### Fe を吸着させた InAs 劈開表面 2 次元電子系

InAs 劈開表面に磁性体を吸着させて2次元電子を 誘起することにより、吸着原子の局在スピンと2次 元電子との磁気的相互作用によりもたらされる新現 象の探索を行っている。本年度、望月らにより、鉄を 吸着させた系において2次元電子の磁気抵抗曲線に おける明瞭なヒステリシスが観測された。1原子層 以下の吸着薄膜の磁気的状態を2次元電子系の電気 伝導を通じて観測した初めての研究成果である。ヒ ステリシスは、0.3~0.4 原子層でのみ観測され、1 0 K程度の温度で消失する。

図は、磁場の上げ下げによるメモリー効果を最大 印加磁場に対して調べたものであるが、磁場を印加 したまま冷却した場合に、より強い効果が現れてい る。こうしたヒステリシスや長時間緩和現象の系統 的な測定から、我々は、Fe 薄膜が 10 K 程度の凍結 温度をもつスピングラスを形成していると考えてい る。また、2次元電子系の電気抵抗変化の機構につ いては、表面局在スピン系の磁化に伴うスピン交換 散乱の減少が有力な候補ではあるが、未だ明らかで はない。



図 4.5.12: 表面反転層の電子密度を吸着原子密度に 対してプロットした。低蒸着領域において各吸着原 子は1個の電子を半導体側に供出するが、2次元電 子系のフェルミエネルギーが表面ドナー準位に達す ると電子密度の増加は止まる。これより表面準位を ドナー物質ごとに求めることができる。

アルカリ金属を吸着させた InAs 劈開表面 2 次元電 子系

InAs 劈開表面にアルカリ金属を蒸着した場合につ いて、表面原子密度と2次元電子密度との関係が箕 輪、枡富らにより調べられた。表面原子密度はイオン ソースの積算電流から求め、2次元電子密度はホー ル係数から求めた。Cs および Na の場合、低原子密 度領域においては2次元電子密度は表面原子密度と 比例して増加し、銀の場合の実験結果に対してこれ まで我々が提唱したモデルとコンシステントな結果 を得た。この増加は2次元電子のフェルミエネルギー が表面ドナー準位に達すると飽和する。飽和電子濃 度から表面ドナー準位を導出するため、自己無撞着 な計算を行った。表面ドナー準位と原子のイオン化 エネルギーとの関係は、これまで光電子分光から示 唆されていた傾向と矛盾しないが、絶対値を比較す ると今回の実験結果の方が表面ドナー準位は高い。 光電子分光の先行研究においては、金属蒸着は室温 において行われたためクラスター形成等の問題が生 じたためだと思われる。孤立したアルカリ原子によ る表面ドナー準位の決定は、金属半導体界面研究の 第一歩となりうるだろう。我々の手法の方が、高精 度に表面ドナー準位を求めることができるので、今 後、様々な物質に対して研究を拡張する必要がある。

一方、Liを蒸着した場合においては、全くことな る振る舞いが見られた。電子密度は、被覆率に対し て、10原子層程度まで緩やかに単調増加した。上記 のモデルは全く適用できない。電子移動度は、200K 程度の熱処理により、50倍程度まで増加した。表面 再構成の可能性を検討中である。

## 4.5.2 強相関 2 次元電子系

シリコンの電子系や GaAs の正孔系の低電子密度 領域においては、粒子間の平均クーロンエネルギー がフェルミエネルギーよりも一桁程度大きくなる強 相関 2 次元系が実現される。これらの系では、電子 (正孔)密度をパラメーターとして金属・絶縁体転移 が観測されるが、その機構は未解明であり、2次元 電子分野の重要なテーマとなっている。また電子間 相互作用パラメーター r<sub>s</sub> に対する有効質量、g因 子、スピン帯磁率などの依存性を調べるための理想 的な系としても盛んに研究が行われている。我々の グループでは磁気抵抗効果の角度依存性からスピン 自由度の重要性を明らかにする研究を先駆的に行っ てきた。最近では、電子スピン共鳴やサイクロトロ ン共鳴の測定にも研究の拡張が行われている。

一方、強磁場下においては、軌道運動がランダウ 準位に束ねられるため、自動的に電子相関が重要に なる。我々は、量子ホール強磁性、スピン偏極・非 偏極転移、分数量子ホール効果、ウィグナー結晶な どに関連した研究を推進している。本年度は、武蔵 工大白木先生と澤野博士より提供いただいた非常に 高い移動度をもつ Si/SiGe 量子井戸試料に対して研 究を行った。特に、當山が行ったランダウ準位交差 に関する実験において重要な成果が得られた。

#### イジング量子ホール強磁性

磁場中で試料の角度を傾けることにより、サイク ロトロンエネルギーとゼーマンエネルギーの比を変 えて、軌道量子数nとスピンの向きが異なる2つの ランダウ準位を交差させることができる。それぞれ のランダウ準位に擬スピンのアップとダウンを割り 当てることにより、磁性の問題として取り扱うこと ができる。電子間相互作用が軌道量子数に依存する ために擬スピン間の相互作用は異方的あり、通常の 2次元電子系ではイジングライクな強磁性となると 考えられている。高移動度Si/SiGe ヘテロ構造中の 2次元電子系に対して、ランダウ準位充填率 $\nu = 4$ において  $(n = 1, \uparrow)$  と  $(n = 0, \downarrow)$ の準位交差を行っ たところ、非常に大きな抵抗ピークが観測された。

準位交差に伴う抵抗スパイクはこれまで他の系で も観測されていたが、今回の抵抗ピークは桁違いの 大きさをもつ。また、抵抗ピークの大きさは面内磁 場の向きに強く依存し、極低温では強いヒステリシ スを示す。これらの実験結果から、我々は、準位交 差の過程で擬スピンの強磁性ドメイン構造が形成さ れていると考えている。異方性の起源については明 らかではないが、実験結果は、面内磁場に直交する 方向に伸びたストライプ状のドメイン構造を示唆し ている。

#### 擬スピン偏極・非偏極転移

ー体の電子エネルギーが縮退している場合、多体 電子波動関数は電子間のクーロンエネルギーを得す



図 4.5.13: 2次元面からの磁場角度 $\theta$ が $(n = 1, \uparrow)$ と  $(n = 0, \downarrow)$ のランダウ準位交差条件にあるとき、抵抗 の巨大ピークが観測された。また、ピークの大きさ は、面内磁場の方向に対して強い異方性を示した。

るように作られる。スピン(あるいは擬スピン)を 揃えた場合には、波動関数の軌道部分は反対称化さ れ、電子同士が自然と避けあうことができる。これ が量子ホール強磁性の起源である。しかし、uが整数 からずれた遷移領域においては、スカーミオンの生 成、スピン非偏極分数量子ホール状態などが知られ ているように、スピン状態は自明ではない。上記の ランダウ準位交差の研究において、 $\nu = 4$ にて Ising 強磁性ドメイン形成による縦抵抗の鋭いピークが観 測されたが、レが整数からずれた遷移領域に測定を 拡張したところ、ランダウ準位交差時に縦抵抗の鋭 いディップが観測された。同時に観測されたホール抵 抗の異常と合わせると、準位交差点近傍において擬 スピンの非偏極状態、すなわち異なるランダウ準位 の混合状態が形成されて、局在化が起こったと理解 できる。局在状態の有力な候補として、以前から予 想されていた、軌道半径(ランダウ準位指数 n)が 異なる2つの電子がリングにボールが入るような配 置を取ることによるペアリング状態の形成を考えて いる。

#### 二次元金属相におけるサイクロトロン共鳴

ゼロ磁場下の強相関2次元系において、電気抵抗 が温度の低下とともに急速に減少することが知られ ており、2次元系に金属状態はないとするスケーリ ング理論からの結論と矛盾することなどから注目さ れているが、未だに解明されていない。我々は、金 属的温度依存性の機構を明らかにするために、サイ クロトロン共鳴の測定を行っている。線幅から求ま る緩和時間  $\tau_e$  を電気抵抗から求まる緩和時間  $\tau_t$  と 比較し、これまで提唱されてきたモデルの妥当性を 検証することを目的としている。本年度は、西岡を



図 4.5.14: 準位交差に伴う抵抗ピークには、極低温で 強いヒステリシスが観測される。その大きさは温度 上昇とともに小さくなり、400 mK 程度で消失する。

中心として、抵抗検出型のサイクロトロン共鳴の測定を行った。2次元系の電気抵抗が温度変化するためにそれ自身をボロメーターとして利用した。1 К付近で、 $\tau_t$ が温度の低下とともに増加しつづけるのに対して、 $\tau_c$ には飽和する傾向が見られた。

<報文>

#### (原著論文)

- R. Masutomi, M. Hio, T. Mochizuki, and T. Okamoto: Quantum Hall effect at cleaved InSb surfaces and low-temperature annealing effect, Applied Physics Letters, 90, 202104 (2007).
- [2] K. Sawano, Y. Kunishia, K. Toyama, T. Okamoto, N. Usami, K. Nakagawa, and Y. Shiraki: Fabrication of Ge channels with extremely high compressive strain and their magnetotransport properties, Journal of Crystal Growth **301/302**, 339-342 (2007).
- [3] Y. Komori, S. Sakuma, and T. Okamoto: Ettingshausen effect around Landau level filling factor ν = 3 studied by dynamic nuclear polarization, Physical Review Letters 99, 146807 (2007).
- [4] K. Sawano, Y. Kunishi, Y. Satoh, K. Toyama, K. Arimoto, T. Okamoto, N. Usami, K. Nakagawa, and Y. Shiraki: On Effects of Gate Bias on Hole

Effective Mass and Mobility in Strained-Ge Channel Structures, Applied Physics Express 1, 011401 (2008).

- [5] R. Masutomi, T. Mochizuki, M. Hio, Y. Tsuji, and T. Okamoto: Quantum Hall effect at cleaved surfaces of InAs and InSb, Physica E 40, 1030-1033 (2008).
- [6] Y. Komori, S. Sakuma, and T. Okamoto: Spin current in the quantum Hall regime detected by dynamic nuclear polarization, Physica E 40, 1325-1327 (2008).
- [7] M. Minowa, R. Masutomi, T. Mochizuki, and T. Okamoto: Alkali-metal-induced Fermi-level and two-dimensional electrons at cleaved InAs(110) surfaces, Physical Review B (2008), in press.

#### (会議抄録)

- [8] J. Matsunami, M. Ooya and T. Okamoto: Electron spin manipulation, detection, and relaxation in a high mobility silicon quantum well, Proceedings of the 28th International Conference on the Physics of Semiconductors, (July 24-28, 2006, Vienna, Austria), AIP Conference Proceedings 893, 1353-1354 (2007).
- [9] T. Mochizuki, Y. Tsuji, M. Hio and T. Okamoto: Magnetotransport of two-dimensional electrons at *in situ* cleaved InAs surfaces, Proceedings of the 28th International Conference on the Physics of Semiconductors, (July 24-28, 2006, Vienna, Austria), AIP Conference Proceedings 893, 1475-1476 (2007).

(学位論文)

- [10] 當山清彦:「シリコン2次元電子系におけるランダウ 準位交差と電子相関」(博士論文)
- [11] 松並絢也:「半導体二次元電子系における抵抗検出型 電子スピン共鳴」(博士論文)
- [12] 西岡貴央:「強相関シリコン二次元電子系におけるサ イクロトロン共鳴」(修士論文)
- [13] 箕輪雅章:「アルカリ金属を吸着させた InAs 劈開表 面の電気伝導測定」(修士論文)

#### < 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [14] R. Masutomi, T. Mochizuki, M. Hio, Y. Tsuji, and T. Okamoto: Quantum Hall effect at cleaved surfaces of InAs and InSb, The 17th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Genova, Italy), July 15-20, 2007.
- [15] Y. Komori, S. Sakuma, and T. Okamoto: Spin current in the quantum Hall regime detected by dynamic nuclear polarization, The 17th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Genova, Italy), July 15-20, 2007.

- [16] R. Masutomi, T. Mochizuki, M. Hio, Y. Tsuji, and T. Okamoto: Quantum Hall Effect at Cleaved surfaces of InAs and InSb, The First Yonsei-Todai Joint Workshop on Physics (Tokyo), August 31, 2007.
- [17] Y. Komori, S. Sakuma, T. Okamoto: Spin Current and Dynamic Nuclear Polarization in Quantum Hall Systems, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (Gifu, Japan), October 29-November 1, 2007.
- [18] T. Mochizuki, R. Masutomi, Y. Tsuji, T. Okamoto: Two Dimensional Electrons at Cleaved Surfaces of InAs and InSb, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (Gifu, Japan), October 29-November 1, 2007.
- [19] K. Toyama, T. Nishioka, A. Sekine, K. Sawano, Y. Shiraki, T. Okamoto: Quantum Hall Ferromagnetism and Possible Bound Electron Pairs at Landau Level Crossing in a Silicon Two Dimensional System, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (Gifu, Japan), October 29-November 1, 2007.

#### 招待講演

[20] T. Okamoto, Y. Komori, S. Sakuma, J. Matsunami, K. Toyama: Spin-related nonequilibrium phenomena in quantum Hall systems, The 21st COE International Symposium on the Linear Response Theory in Commemoration of its 50th Anniversary – Recent Development of Equilibrium and Non-Equilibrium Response – (Tokyo, Japan), November 5-7, 2007.

#### (国内会議)

一般講演

- [21] 有元 圭介,国司侑吾,澤野 憲太郎,佐藤 優,當山 清彦,岡本 徹,宇佐美 徳隆,中川 清和,白木 靖寛: 圧縮歪み Ge における正孔有効質量の正孔密度依存性 に関する計算、第 68 回応用物理学会学術講演会(北 海道工業大学)2007年9月4日-8日.
- [22] 當山 清彦,西岡 貴央,岡本徹,澤野 憲太郎,白木 靖 寛:高移動度シリコン2次元電子におけるランダウ準 位交差と電気伝導の巨大異方性、日本物理学会第62 回年次大会(北海道大学)2007年9月21日-24日.
- [23] 枡富 龍一,日尾 真之,望月 敏光,岡本 御:InSb 劈 開表面における量子ホール効果と熱処理効果、日本 物理学会第62回年次大会(北海道大学)2007年9 月21日-24日.
- [24] 箕輪 雅章,望月 敏光,枡富 龍一,岡本 徹:アルカ リ金属蒸着により誘起された InAs 劈開表面 2 次元電 子系の磁気抵抗、日本物理学会 第 63 回年次大会(近 畿大学)2008 年 3 月 22 日-26 日.
- [25] 望月 敏光,松並 絢也,佐久間 覚,枡富 龍一,岡本 徹:鉄原子吸着で誘起された InAs 表面二次元電子系 における磁気抵抗の履歴現象、日本物理学会 第63回 年次大会(近畿大学)2008年3月22日-26日.

## **4.6** 島野研究室

島野研究室では、レーザー分光の手法を用いて、 凝縮系における光と物質の相互作用の解明、光励起 によって発現する多体の量子現象の探索に取り組ん でいる。特に、基底状態、光励起状態における電子 相関、多電子系の相転移ダイナミクスを調べるため に、可視光領域の光学応答に加えて、低エネルギー、 テラヘルツ(THz)周波数帯での電磁応答に着目して いる。本年度は、光励起された半導体高密度電子正 孔系、分子性導体、超伝導体、強相関マルチフェロ イクス系を対象として以下の研究を進めた。

#### 4.6.1 半導体高密度電子正孔系

半導体中に高密度に光励起された電子正孔系は、 電子正孔対の密度、温度によって励起子ガス、電子 正孔プラズマ、電子正孔液体といった多彩な相を示 す。この電子正孔系の相転移ダイナミクスを調べる 新たな手法としてテラヘルツ電磁波パルスを用いた 分光手法の開拓を進めてきた。今年度は、多段増幅 されたパルス幅 30 フェムト秒の超短パルスレーザー を用いて従来 10meV までに限られていた観測エネ ルギー範囲を拡張し、2-24meV の 広い エネルギー 領域での時間分解分光システムを開発した。このシ ステムを用いて、間接遷移型半導体 Si において高密 度電子正孔系のダイナミクスの観測実験を開始した。 Si の光励起キャリアの寿命は µs 程度と比較的長く. 相転移ダイナミクスにキャリア寿命の効果がさほど 影響しないと考えられる。つまり、高密度下での相 転移ダイナミクスとクーロン相関の効果を準熱平衡 状態下で調べることが可能になると期待される。 こでまず、低密度領域で、光生成された自由な電子 正孔気体から、励起子が形成される様子を観測した。 図 4.6.15 に示すように、励起子 1s-2p 準位間遷移が ちょうどテラヘルツ周波数帯 (10meV) にあることに 着目し、この準位間遷移をプローブとすることで間 接遷移型の"見えない "励起子を観測することに成功 した。励起直後に見られるドルーデ応答のスペクト ルは自由な電子正孔気体の存在を示している。一方、 励起子は約200ピコ秒後に形成されることがわかっ た。励起子モット転移濃度以上の実験からは、金属 相である電子正孔プラズマから実空間で凝縮した電 子正孔液体(液滴)と励起子気体に相分離していく 様子も観測された。現在、様々な密度、温度領域で の系統的な測定により、高温高密度下で遮蔽されて いたクーロン相関が時間の経過(密度、温度の変化) とともに形成されていく様子や、励起子モット転移 濃度近傍でのバンドギャップ収縮効果の振る舞いに ついて調べている。

#### 4.6.2 擬1次元有機導体

擬一次元有機導体  $(TMTSF)_2PF_6$  は転移温度  $T_c=12$  K 以下においてスピン密度波 (SDW) を形成すること が知られている。この SDW 形成に伴う一粒子ギャッ



図 4.6.15: Si におけるテラヘルツ帯透過率の差分ス ペクトル。光照射直後の電子正孔気体から励起子が 形成されていく様子。

プエネルギーは THz 領域に存在する。そこで、THz 時間領域分光法により、ピコ秒の時間スケールでギャ ップ周波数領域の複素伝導度スペクトルが決定できれ ば、SDW 相のスピン及び電荷の光励起ダイナミクス を実時間で追うことが可能になると考えられる。こう した時間分解測定に先立ち、我々は (TMTSF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> の SDW 相の複素伝導度スペクトルを THz 時間領域 反射分光法を用いて決定した。特に、高いNA の集光 光学系を構築し試料上での光のスポットサイズを回 折限界程度まで小さくすることが可能となった。こ のため、典型的な試料サイズが 1mm 以下であり観 測するテラヘルツ波の波長と同程度である有機導体 単結晶に対しても、反射分光による定量的な複素誘 電率決定が可能になった。



図 4.6.16: 擬一次元有機導体  $(TMTSF)_2 PF_6 \mathcal{O}(a)T_c$ 前後における振幅反射率、および (b)T = 4K (SDW 相) の複素伝導度。

図 4.6.16(a) に T = 4 K における試料 b'-軸偏光の 振幅反射スペクトルを示す。なお反射率の値はT = 15K の値で規格化してある。T = 12 K 以下において 8meV より低エネルギー数域で明瞭な反射率の低下 が見られる。これはスペクトルが SDW ギャップの形 成を反映していることを強く示唆する。図 4.6.16(b) に複素誘電率解析から決定した T = 4 K における試 料の光学伝導度スペクトルを示す。T = 4 K では 8meV より低エネルギー領域で確かに光学伝導度の スペクトルウェイトに減少が生じており、これはい わゆる SDW ギャップであると考えられる。このよう に THz 時間領域反射分光法を用いて金属-絶縁体転 移を伴う SDW の形成、一粒子励起スペクトルを観 測することに成功した。本研究は東京大学鹿児島研 究室との共同研究である。

#### 4.6.3 超伝導磁束量子系

超伝導体中の磁束量子 (vortex) は電流の下で運動 し、超伝導体の伝導特性に寄与を与える。この vortex の運動機構を明らかにするために金属超伝導体 NbN(転移温度 15K、ギャップ周波数 1.1THz) を対 象として磁場下テラヘルツ時間領域分光測定を行い、 ギャップ周波数近傍の光学伝導度スペクトルから vortex ダイナミクスの影響を調べた。

図4.6.17に得られたNbNの光学伝導度を示す。ゼロ磁場下では超伝導状態の光学伝導度に超伝導ギャップ周波数に相当する立ち上がりが明瞭に観測された。これに対し磁場下では常伝導状態における光学伝導度に漸近する結果が得られた。これは磁場の印加によりvortexが生じ、超伝導体中の準粒子密度が増加したことによるものと解釈された。さらに、散逸の起源としてvortex自身の運動の寄与も取り入れ有効媒質理論による解析を行ったところ、実験結果をよく説明することがわかった。このモデルに基づき、vortexの占有する面積を求めたところ、その磁場依存性が磁場に対し比例しないことを見出した。この結果はコヒーレンス長が磁場に依存していることを示唆していると考えられる。本研究は東北大学川崎研究室との共同研究である。



図 4.6.17: NbN のテラヘルツ帯光学伝導度

## 4.6.4 マルチフェロイクス系

#### 希土類マンガン酸化物のスピン波励起の観測

近年、希土類マンガン酸化物において、低温下で強 誘電反強磁性相が見出され、さらに外部磁場により 自発分極を制御できることができることが明らかと なってきた。(反) 強磁性と強誘電性を兼ね備えたマル チフェロイックス物質は電場による磁化の制御、ある いは磁場による分極の制御を可能にするため、新し い電子-スピン素子の候補として関心を集めている。 このマルチフェロイックス物質における、スピンと誘 電性の強い結合の起源を明らかにするとともに、電 場成分で励起されるスピン波(エレクトロマグノン) の探索を目的として、 $RMnO_3$ ,( $R=Eu_{1-x}Y_x$ ,Tb,Dy) の強誘電反強磁性相における電磁応答をテラヘルツ 時間領域分光法により調べた。その結果、いずれの 物質においても、磁気秩序と相関のある巨大な吸収 をテラヘルツ帯に見出し、これが電場応答に由来し ているものであることを明らかにした。結晶方位及 び偏光依存性から、この大きな吸収が常に特定の結 晶軸方向にのみ観測されること、外部磁場によって 強誘電自発分極がフリップしてもこの大きな吸収は 影響を受けないことを見出した。これらの結果から、 観測された大きな吸収が Mn スピンのスパイラル面 の揺らぎに対応するゴールドストーンモードではな く、2-マグノン吸収に対応するものと結論された。本 研究は科学技術振興機構 ERATO 十倉マルチフェロ イックスプロジェクトとの共同研究である。

#### <報文>

#### (原著論文)

- H. Nishimura, N. Minami, and R. Shimano: Dielectric properties of single-walled carbon nanotubes in the terahertz frequency range, Appl. Phys. Lett. 91, 011108 (2007)
- [2] S. Watanabe and R. Shimano: Compact terahertz time domain spectroscopy system with diffractionlimitted spatial resolution, Review of Scientific Instruments 78, 103906 (2007)
- [3] Y. Ikebe and R. Shimano: Characterization of doped silicon in low carrier density region by terahertz Faraday effect, Appl. Phys. Lett.92, 012111 (2008)

#### (著書)

- [4] 島野 亮:「テラヘルツ技術総覧」中「磁気光学」(執 筆分担)(エヌジーティー、2007年)
- (学位論文)
- [5] 岩宮賢: 「THz 電磁波による半導体 Si の励起子モット転移に関する研究」(修士論文)
- [6] 池辺洋平:「テラヘルツ周波数帯におけるホール効果 測定と超伝導体への応用」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

#### 一般講演

- [7] H. Nishimura, N. Minami, and R. Shimano: Broadband THz time-domain spectroscopy of single-wall carbon nanotubes, Quantum Electronics and Laser Science Conference 2007, May 2007, Baltimore, USA
- [8] Yohei Ikebe and Ryo Shimano: High sensitive terahertz Faraday rotation measurements of doped semiconductors, Quantum Electronics and Laser Science Conference 2007, May 2007, Baltimore, USA
- [9] S. Watanabe and R. Shimano: Very compact THz-TDS imaging system with diffraction limited spatial resolution, Joint 33rd International Conference on Infrared and Millimeter Waves, and 16th International Conference on Terahertz Electronics (IRMMW-THz2007), September 2007, Cardiff, UK

#### 招待講演

- [10] R. Shimano: Terahertz spectroscopy of multiferroics and superconductors 2007CERC International Symposium, Akihabara, Tokyo, May23, 2007
- [11] R. Shimano: Low energy electromagnetic responses of Condensed matter, Univ. of Yonsei-Univ. of Tokyo 1st Joint Workshop, Univ. of Tokyo, August 31, 2007
- [12] R. Shimano: Terahertz Electromagnetic Responses of Photo-excited High Density Electron-Hole System in Semiconductors, The 21st century COE Internatinal Symposium - Linear Response Theory in Commemoration of its 50th Anniversary-Recent Developments in Equilibrium and Non-Equilibrium Response, Univ. of Tokyo, November 7, 2007

#### (国内会議)

一般講演

- [13] 島野 売: 高感度テラヘルツ光学活性計測技術の開 発,科学技術振興機構さきがけ研究「構造機能と計測 分析」領域 成果報告会議 2007 年 12 月 13 日
- [14] 渡邊紳一,島野亮,近藤隆祐,鹿児島誠一: 有機導体 (TMTSF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> のテラヘルツ領域反射分光測定,日 本物理学会 2007 年秋季大会(於 北海道大学)
- [15] 岩宮賢, 島野亮: THz 分光法による間接遷移型半導
  体 Si の励起子及び電子正孔プラズマの観測,日本物
  理学会 2007 年秋季大会 (於 北海道大学)
- [16] 池辺洋平,島野亮,池田将洋,福村知昭,川崎雅司: THz 時間領域分光法による超伝導 NbN 薄膜の磁場下伝導 度測定,日本物理学会 2007 年秋季大会(於 北海道 大学)
- [17] 渡邉紳一, 島野亮, 近藤隆祐, 鹿児島誠一: テラヘルツ 時間領域分光法による (TMTSF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> のスピン密度 波ギャップの観測, 日本物理学会 2008 年春季大会 (於 近畿大学)

- [18] 貴田徳明,池辺洋平,高橋陽太郎,何金萍,金子良夫, 山崎裕一,島野亮,有馬孝尚,永長直人,十倉好紀: テ ラヘルツ電磁波時間領域分光法を用いた磁性強誘電 体 DyMnO<sub>3</sub>における光で誘起される磁気励起の全 貌,日本物理学会 2008 年春季大会(於 近畿大学)
- [19] 高橋陽太郎、貴田徳明、山崎裕一、藤岡淳、賀川史 敬、村川寛、金子良夫、何金萍、有馬孝尚、島野亮、 十倉好紀: THz・遠赤外分光によるマルチフェロイク ス物質 RMnO3 におけるエレクトロマグノンの観測, 日本物理学会 2008 年春季大会(於 近畿大学)
- [20] 岩宮賢, 芝沼隆太, 島野亮:広帯域 THz 分光法による Si の高密度光励起電子正孔系のダイナミクスの観測, 日本物理学会 2008 年春季大会(於 近畿大学)

(集中講義)

[21] R. Shimano: University of Joensuu, Summer School, Introduction to terahertz time domain spectroscopy August6 -9, Joensuu, Finland

## 5 一般物理理論

## 5.1 宇宙理論研究室 (佐藤・須藤)

宇宙物理学は取り扱う対象が極めて多岐に渡って いるのみならず、その方法論も多様であり非常に学 際的な体系をなしている。実際、素粒子物理学、原 子核物理学、プラズマ物理学、流体力学、一般相対 性理論、などの基礎物理学を駆使して宇宙の諸階層 の現象の本質的な理解にせまろうという点では、応 用物理学的な色彩の濃い学問分野である。当教室の 宇宙理論研究室では、佐藤教授、須藤教授、樽家助 教、向山助教、および十数名の大学院学生、研究員 が様々な宇宙物理の問題に取り組んでいる。研究室 の活動は、「初期宇宙・相対論」、「観測的宇宙論」、 「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137億年の昔、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は、 日米独国際共同観測プロジェクトであるスローンデ ジタルスカイサーベイを用いた宇宙論パラメータの 決定、銀河・銀河団の空間分布の定量化、赤方偏移空 間での銀河・クェーサー分布2体相関関数の探求であ る。また宇宙のバリオンの半分以上を占める"ダーク バリオン"を酸素輝線によってサーベイする軟X線 精密分光観測ミッション DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) を首都大学東京、名古屋大学、宇 宙科学研究所、のグループとともに共同で推進しつ つある。特に、数値シミュレーションを用いてその検 出可能性とそれらの科学的意義を理論的に探求する ことが我々の担当である。このミッションが成功す れば、可視光での銀河の赤方偏移サーベイ、および X 線による銀河団観測とは相補的な新しい宇宙の窓 が開かれることが期待できる。これらと同時に、国 立天文台、プリンストン大学の共同研究者とともに、 すばる望遠鏡を用いた太陽系外惑星の観測的・理論的 研究を行っている。 現時点で、系外惑星の分光観測 を行っている国内では唯一のグループであり、食を 起こしているトランジット惑星の大気と反射光の検 出、さらには系外惑星のリングと衛星の検出を目指 している。(http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/ ~suto/を参照)

質量の大きい星は進化の最終段階で超新星爆発を 起こし、中心にブラックホールもしくは中性子星を 形成する。超新星爆発の物理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物質へ移行するのか、と いう基礎過程の研究とともに、それらの効果を取り 込んだ一般相対論的な流体力学計算によって爆発の シミュレーションを行なわなければならない。従来 中性子星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 な寄与をしていると考えられ、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。爆発のシミュレーションだけで なく、超新星コアにおける原子核から核物質への相 転移が爆発に与える影響にも注目し、分子動力学シ ミュレーションを用いた核物質の微視的研究も行なっ ている。また近年、重力崩壊型超新星爆発とガンマ 線バーストが相関していることが観測的に確立した が、これは、全ての超新星に相対論的ジェットが存 在するのかという疑問を投げかけている。光では見 えない隠されたジェットのプローブとして、高エネ ルギーニュートリノを中心とした研究も行っている。 さらに、ガンマ線バーストが一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

#### 超弦理論における宇宙論

最近、超弦理論における加速膨張宇宙の理解が目覚 しく進展し、その枠内でインフレーションを議論する 事が可能になりつつある。本研究では、超弦理論にお けるワープしたコンパクト化(KKLTシナリオ)で、 インフレーションのモデルを考察した。具体的には、 DBIインフレーションと呼ばれる超弦理論に基づくイ ンフレーション模型に対して、観測からの制限を求め た [6,49,91,99,100,109,117,153,155,175,190]。 また、今までインフレーションを起こさないと考え られていた conformal coupling を持つスカラー場が、 実際にはインフレーションを起こし得ることを示し た [7,99,100,105,128,153,154,155,166,167,169, 170,174,175]。

# 6次元ブレーン宇宙モデルにおける de Sitter ブレーンの安定性

6次元 Warped Flux Compactification ブレーン モデルは、フラックスによるワープしたコンパクト 2次元余剰空間の安定化の機構を含んだモデルであ る。このモデルではブレーン上の4次元宇宙を正の 宇宙定数をもった de Sitter 時空にすることが可能で あり、そのような場合についての時空の安定性を動 的および熱力学的な面から調べた。動的安定性につ いては、背景時空の線形摂動を考えスカラー・ベク トル・テンソル型に分離して解析した。この結果、4 次元上の Hubble パラメータが大きくなり過ぎると スカラーモードに不安定性が生じ、この不安定性が 生じる領域では4次元の重力法則が再現されないこ とがわかった。また他方、時空の熱力学的な性質を cosmological horizon に付随するエントロピーを用い て調べた。この結果、先の動的に不安定なパラメー タ領域では時空は熱力学的にも不安定であることを 示し、今の6次元ブレーンモデルにおいて時空の動 的安定性と熱力学的安定性の間に対応があることを 解析的に示した [10, 45, 179]。

重力のヒッグス機構

ダークエネルギーは、現代宇宙論における最も興 味深い謎の1つである。現在の宇宙の大分部を占め ていると考えられているにも関わらず、我々はその 正体を知らない。この状況は、宇宙規模の長距離に おける重力に、新しい物理を紐解くヒントが隠され ているかもしれないと予感させる。そこで、一般相 対性理論を宇宙規模の長距離において変更する可能 性を探るため、重力にヒッグス機構を応用すること を提唱し、その性質についての研究を行なった。素 粒子論においてヒッグス機構が果たしている役割を 思い起こせば、これが重力法則を長距離で変更する 恐らく唯一の方法であると予想される。実際、この シナリオでは、他の理論(massive gravity や Dvali-Gabadadze-Porrati ブレーンモデル等)が抱える問 題(巨視的スケールでの強結合によって生じる、制御 不能な量子補正)を回避できることが分かっている。

具体的には、重力のヒッグス機構の最も簡単な例 である「ゴースト場凝縮」について、非線形ダイナミ クス膨張宇宙での線形摂動を詳細に調べた [26, 43, 151, 168] また、また、この理論の持つシフト対称性 をゲージ化することで理論を拡張した。その性質を 調べ、超弦理論の枠内で実現するシナリオを考察し た [5, 26, 98]

Freund-Rubin コンパクト化における新しい解の 系列

Freund–Rubin コンパクト化は、フラックスにより 内部空間を球面状にコンパクト化するモデルである。 特に外部空間が de Sitter 時空となる場合、このモデ ルには二つの動的不安定性を引き起こすモードが存 在する。一つは内部空間の半径の一様な変化に対応 するモード、もう一つは非一様な変化に対応する多 重極モーメントをもつモードである。本研究では、こ の多重極モーメントをもつモードの不安定性が示唆 する、内部空間の形が変形した非自明な新しい系列 の解を構成し、この解の系列と自明な Freund-Rubin 解の二つの系列がパラメータ空間上で交わる点に対 応する解が、動的不安定性が生じ始める解であるこ とを示した [11,45,107,111,179]。また新しい解の 系列の動的安定性を解析し、Freund–Rubin 解が不 安定化するパラメータにおいて、変形した解の系列 の方は安定であることを示した [125]。

### 5.1.2 観測的宇宙論

レーザー干渉計を用いた宇宙初期のパリティ非対称 性の検出方法

超弦理論にもとづく低エネルギー有効理論のもと では、重力理論自体がパリティ対称性の破れを自然 に含みうることが予想されており、宇宙初期のイン フレーションで生成される背景重力波は、対称性の 破れに伴う特有の偏極(円偏極)を持つことが期待 されている。本研究では、複数台あるレーザー干渉 計のネットワークを用いて、位相がランダムな背景 重力波の偏極成分を分離・検出する一般的手法を考案 した。その手法に基づき、Advanced LIGO, LCGT などの地上の次世代干渉計を用いて円偏極した背景 重力波の検出可能性について定量的な議論を行った。 [8] バリオン音響振動の非線形重力進化に対する非摂動 論的取り扱い

銀河分布のパワースペクトルに現れるバリオン音 響振動は、「宇宙標準ものさし」として銀河分布の赤 方偏移・距離関係の決定に有効で、次世代分光サー ベイにもとづくダークエネルギー探査のきわめて重 要な手段と考えられている。近年、N 体シミュレ-ションなどによる系統的な研究から、非線形重力進化 によってバリオン音響振動スケールが時間変化する ことが明らかになり、精密観測にもとづき赤方偏移・ 距離関係を精度よく決定する上で、バリオン音響振 動の時間進化を定量的に記述する理論テンプレート が不可欠と考えられている。本研究では、乱流など の分野で知られる完結近似と呼ばれる手法を応用し、 従来の摂動論を改良する定式化を行った。質量分布 のパワースペクトルを解析的に評価し、弱非線形領 域においてN体シミュレーションと比較したところ、 完結近似は従来の摂動論の適用範囲を越えて、N体 シミュレーションの結果を再現しうることがわかっ た。[9, 73, 74, 106, 118, 123, 124, 134, 176, 177, 178]

トランジット惑星系での Rossiter-McLaughlin 効 果の観測

トランジットを起こす太陽系外惑星系では、惑星 が公転周期ごとに主星の前面を通過する。この時、 惑星が主星の自転による吸収線の広がりを隠してし まうため、トランジット中の主星の視線速度は見か け上ケプラー運動によるものからずれて観測される。 この効果は古くから食連星の観測によって知られて おり、発見者の名前にちなんで Rossiter-McLaughlin 効果(以下、RM 効果: Rossiter 1924, McLaughlin 1924)と呼ばれている。この RM 効果による視線速 度のずれは、主星の自転軸と惑星の公転軸のなす角  $\lambda$  などのパラメータを用いて記述することができる (Ohta, Taruya, & Suto 2005)。この  $\lambda$  という量は惑 星の形成と進化の過程を反映しており、hot Jupiter がどのように形成されたのかについて手がかりを与 えてくれる貴重な観測量である。

我々のグループでは、多くのトランジット惑星系で のRM効果の測定を目指し、ハワイ島・マウナケアに あるすばる望遠鏡/HDSまたはケック望遠鏡/HIRES と、マウイ島・ハレアカラにあるマグナム望遠鏡/MIP を用いて2007年夏に5つのトランジット惑星系の観 測を実施した。また、岡山天体物理観測所188cm望遠 鏡/HIDESを用いて、2007年秋に1つのトランジッ ト惑星系の観測を実施した。このうちTrES-1, HAT-P-2, HD17156の3つのトランジット惑星系でのRM 効果の測定に成功し、その結果が2007年度に出版さ れている。[12, 13, 14, 47, 63, 75, 129, 181, 182]。

宇宙論スケールでの重力法則のずれに対する制限

重力法則が変更された場合の質量密度ゆらぎの摂 動論を議論し、線形成長、さらにはその上のオーダー である非線形成長に対する表式を与えた。さらに、非 線形成長を含めたゆらぎの統計量を議論するため、N 体シミュレーションのコードを重力法則が変更した場 合に拡張し、シミュレーションを行った。また SDSS の観測と比較するために、モックデータをシミュレー ションから作成した。

準解析的方法によって得られるパワースペクトル、 また摂動論を用いたバイスペクトルが、シミュレー ションの結果とよく一致していることを確認し、理 論的手法が有効であることを示した。更に、モック データと SDSS の観測結果とを比較し、銀河バイア スに対し線形を仮定した場合は、バイスペクトルを 用いたほうが重力法則の変更に対してよく制限でき ることを示した。また銀河バイアスに非線形項を含 めて考えた場合は、バイアスパラメータに対する制 限を与えることができた。重力法則が変更された場 合におけるバイアスに対する制限はこれが初めてで あり、今後の様々な宇宙論的観測で得られるであろ うバイアスの情報と組み合わせることで、重力法則 の変更に対し更に厳しく制限できる可能性があるこ とを示した。[15, 76, 183]

銀河団ガス温度、密度揺らぎの宇宙論的応用

銀河団の総質量はビリアル平衡により温度と結び ついている。観測的にはこの温度は銀河団内部に閉 じ込められた高温プラズマ(銀河団ガス)が発する X 線スペクトルから得られる。一方、理論、シミュ レーションサイドでは放射重み付け温度が代用とし て長い間用いられてきた。ところが、近年、前者の 方が後者に比べ1-3割程度低いことが分かった。銀 河団の温度は、様々な宇宙論パラメタの推定に用い られるので、この違いは重要である。宇宙流体シミュ レーションと解析モデルを用いて、この大きな原因 が銀河団内部の局所的な温度揺らぎと動径分布であ ることを発見した。同時に、温度密度揺らぎの確率 密度関数が良く対数正規分布で近似されることを発 見した [18]。さらに上記の温度推定バイアスと揺ら ぎの対数正規分布モデルを用い、SZ 効果+X 線から のハッブル定数推定の系統誤差に取り組んだ。 この 推定法は単純な方法であるのに、観測においては、他 の推定法に比べ1,2割低い値を与える報告がなさ れ、解明が課題であった。この推定法の系統誤差が 大きく三つの要素で表される解析モデルを立てるこ とに成功し、観測からの示唆と同程度の過小評価を 与えることを示した [19, 119]。

CMB の非等方性による初期宇宙モデルの制限

超弦理論などの高エネルギー物理学の枠内では、パ リティを破るような相互作用項が許される。宇宙初期 のインフレーション期に、このようなパリティを破る ような項が支配的であるとすると、量子揺らぎのテン ソル成分である背景重力波が円偏極成分をもつ。実は インフレーション起源の背景重力波の円偏極成分に より、宇宙マイクロ波背景輻射 (Cosmic Microwave Background, CMB)の温度ゆらぎとと偏光の間に特 徴的な相関を生む。そこで、TB/EBモードと呼ばれ る CMB 角度相関パワースペクトルを計算した。特に 宇宙の再イオン化により、シグナルが大角度スケー ルで数桁大きくなることを示した。さらに、WMAP の 3 年目のデータを用いた現在での円偏極成分の観 測的制限と、将来の観測で予想される検出可能性に ついて議論した。WMAPでは有用な制限は得られな かったが、将来の CMB 観測では、背景重力波のもつ 円偏極成分を表すパラメータが  $\epsilon > 0.35(r/0.05)^{-0.6}$ 程度で制限できることを示した [22, 120, 138]。

有質量ニュートリノの重力非線形進化への影響

ニュートリノが質量をもつことは素粒子標準模型の限界を示す最初の証拠であり、ニュートリノがどの程度の質量を持つかは重要な問題である。非常に興味深いのは、ニュートリノ質量の総和の上限である、 $\sum m_{\nu} < 0.2 - 0.6 \text{eV}$ という制限が宇宙論的観測から得られていることである。

宇宙論的な観測からニュートリノの質量を制限で きる一つの理由として、有質量ニュートリノは宇宙 の構造形成の成長を均すという効果がある。ニュー トリノは大きな速度分散をもつので、ある特徴的な スケール以下ではニュートリノの密度ゆらぎは存在 できず、重力を弱めるからである。

将来の大規模構造観測を念頭に置くと、重力による非線形進化の影響が無視できないが、ニュートリノの影響を考慮した取扱いはなされていなかった。そこで我々は、摂動論に基づき、有質量ニュートリノの効果を非線形パワースペクトルの計算に組み込むことに成功した。さらに、ニュートリノが成長を均す効果は重力の非線形進化により増幅され、この効果によりニュートリノ質量の制限が非常に強くなりうることを示した[83,84,85,86,87,102,108,115,131,139,140,186]。

摂動論、N体シミュレーションを用いたバリオン音 響振動の研究

脱結合前の宇宙におけるバリオン-光子混合流体は、 音響振動(バリオン音響振動, BAO)を起こし、こ の音波が脱結合までの間に進む距離はバリオン、光 子双方の密度(温度)ゆらぎに特徴的距離(BAOス ケール)として痕跡を残す。その後、バリオンの密 度ゆらぎは CDM と共に重力的に成長していき、結 果的にできる大規模構造は BAO スケールを引き継 いでいる。

遠方の宇宙マイクロ波背景輻射の温度非等方性、 及び近傍の銀河分布の観測により、BAOスケールを 精密に測定し、これを標準ものさしとして用いるこ とで、宇宙膨張の履歴を調べることができる。これ を利用して暗黒エネルギーの性質を制限するという 方法論が確立しつつあるが、このためには銀河分布 に見られる BAO スケールを非常に精密に予言する ことが求められる。近傍では密度揺らぎは線形理論 では正しく記述できないため、より高次の影響を取 り入れた摂動論やN体シミュレーションが力を発揮 する。

我々は、まず摂動論に基づいた予言を行い、高次の 補正の影響で BAO スケールがどの程度変更を受け るかを調べた。[25, 89, 90, 144, 188, 189] さらに、摂 動論の破綻するスケール、及びN体シミュレーション 自身の持つ系統誤差の可能性を調査した。[103, 122, 132, 145]

## 5.1.3 天体核·素粒子物理

マグネターとガンマ線バースト

昨年度発見されたGRB060218 SN20 06AJは観測結果と理論予測をつき合わせると、 中心天体は中性子星になると考えられている。通常 の超新星よりも激しい爆発を起こすためには直感的 には強磁場中性子星であるマグネターがこの爆発現 象のセントラルエンジンと考えるのが自然である。 我々のシミュレーションによりこの現象の解明に挑 んだ。我々が新たに開発した特殊相対論的計算コー ドにより計算の適用範囲が広がり、今まで行われて いたものより自然な磁場の強さを仮定して研究を進 めることができた。その結果、磁場による超新星爆 発の一般的な条件を抽出でき、この機構に対する理 解が一歩進んだ。[46, 65, 112, 180]

#### 暗黒物質対消滅による放射

宇宙を満たす暗黒物質の有力な候補として、超対称 性理論から予言されるニュートラリーノ粒子が挙げら れる。この粒子は対消滅することが予言されており、 対消滅生成物の観測による検出が可能である。とく にニュートラリーノの絶対的なシグナルとして、ライ ンが注目されている。我々は、暗黒物質の密度分布の 細部構造を考慮し、暗黒物質が宇宙ガンマ線背景放射 にどの程度の寄与を与え得るかを定量的に評価した。 その結果、暗黒物質のラインが 2008 年に打ち上げ が予定されている GLAST 衛星によって検出可能で あることを明らかにした [77,136]。また、ごく最近、 ニュートラリーノ起源の背景ニュートリノを用いて、 ニュートラリーノの対消滅断面積に普遍的な上限値を 与える"neutrino bound"が提唱された。我々はこの 上限値の改善を目的に、銀河内の暗黒物質を系統的に 解析し、以前より2桁厳しい2×10<sup>-23</sup> cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> 以下 という断面積の上限値を発表した[16,78,113,136]。

重力崩壊型超新星と高エネルギーニュートリノ放射

近年、ガンマ線バーストと重力崩壊型超新星爆発 に相関があることが観測的に確立した。しかし、こ れは新たな疑問を投げかけることとなった。つまり、 「どの程度の超新星に GRB にみられるような相対論 的ジェットが伴っているのか?」ということである。相

#### 超新星コア内部のパスタ相の相図の不定性

超新星コアの内部においては、原子核が融解して ー様核物質へと相転移する。その過程においては、 原子核が球状から棒状、板状、それらのバブルへと 形状を変化させることが示唆されており、これらの 変形した原子核をパスタ相と呼ぶ。パスタ相が存在 することによる影響はこれまでの研究で議論してき たものの、では核力の不定性を考慮した時に、パス タ相自体がどれほど存在するのかという問題は未解 決であった。我々は量子分子動力学法を用いて超新 星内部のような高温高密度での核物質のシミュレー ションを行ない、核力の不定性を考慮した場合相図 がどのように変化し、パスタ相がどの程度存在して いるかを調べ、結果として対称エネルギーの密度依 存性が重要であること、そして標準的な超新星爆発 のモデルを考えると、コアの質量の20%、もしくは それ以上がパスタ相に変化している可能性があるこ とを指摘した [20, 64, 79, 67, 126, 184]。

最高エネルギー宇宙線ソース数密度とそのエラーの 見積り

近年の観測の進展にもかかわらず、最高エネルギー 宇宙線のソースは未だによくわかっていない。これは 宇宙線が荷電粒子であり、宇宙空間の磁場によりそ の軌跡を曲げられて地球に到達することに起因する。 我々は銀河系近傍 100Mpc の実際観測されている大 規模構造を再現するような銀河間磁場および宇宙線 ソースモデルを作成し、地球で見えるであろう宇宙 線到来方向分布をシミュレートした。この結果から、 AGASA 観測により観測されている到来方向分布の非 等方性を再現するためにはソースは $10^{-5 \sim -6}$  Mpc<sup>-3</sup> 程度の個数密度を持つという制限をつけた。また、 この制限は現在の観測イベント数が少ないことに 起因する大きな不定性を持っており、この不定性は  $10^{-5}$  Mpc<sup>-3</sup> が正しければ Auger 観測所の 5 年程度 の観測で排除されることを示した [21, 80]。

#### 荷電粒子天文学の可能性の探究

AGASA 観測が最高エネルギー宇宙線の到来方向 分布に小スケールの非等方性を発見して以来、最高 エネルギー宇宙線の到来方向からそのソースが決定 する「荷電粒子天文学」が可能かという疑問は多くの 研究者の興味を引きつけてきた。我々はこの可能性を 探るため、銀河系近傍構造を反映する銀河間磁場モ デルを用いて、将来観測イベントが増えた場合に最高 エネルギー宇宙線到来方向分布から近傍ソースの空 間分布が見えてくるかを議論し、ソースの個数密度が 10<sup>-5</sup> *Mpc*<sup>-3</sup> 程度であった場合、Auger 観測所の5年 程度の観測で2-4°スケールで近傍ソースが見えてく ることを示した[29,81,82,101,137,158,159,185]。 宇宙線で近傍ソースの分布が見えるという予言は論文 投稿後の Auger 観測所の観測結果により実証された。

### 最高エネルギー宇宙線到来方向に対する銀河内磁場 の影響

最高エネルギー宇宙線は銀河間磁場だけではなく、 銀河内の磁場によってもその軌跡を曲げられる。我々 はこの磁場による曲がりは宇宙線到来方向とソース の方向のズレにどの程度効いてくるかを見積もった。 銀河磁場の構造を反映して、宇宙線の曲がり角はその 到来方向に依存する。この結果、銀河反中心方向が最 も曲がりが小さいことを見つけ、位置相関を観測する のであれば、銀河反中心を含む北半球での観測が重要 であることを示した[29,81,101,127,158,159,185]。

超高エネルギー宇宙線起源のニュートリノによる宇 宙線起源の探査

Ankle と呼ばれる 10<sup>19</sup>eV 付近の宇宙線スペクトル の折れ曲がりは、銀河系内宇宙線と系外宇宙線の転 移点であるという解釈と系外宇宙線が宇宙背景放射 と反応することで形成されるという2つの解釈があ り、直接的な証拠は得られていない。どちらの解釈が 正しいかを理解することは、超高エネルギー宇宙線 の生成機構を理解する上で重要である。我々は超高 エネルギーの系外宇宙線が放射する超高エネルギー ニュートリノに着目し、このスペクトルを測定する ことによってこの2つのシナリオの区別をつけられ るということを示した。同時に観測可能性の議論を 行い、Auger 観測所や ANITA 観測で宇宙線ソース の宇宙論的進化シナリオによってはこのニュートリ ノが観測可能であることを示した [114, 158, 185]。

#### 第一世代星の自転磁場重力崩壊

宇宙で最初にできた星のことを第一世代と呼ぶ。 このような天体は現在の星と異なり非常に重かった ことが示唆されている。これまで第一世代星の形成 についてはよく調べられてきたが、その進化の最終 段階である崩壊についてはほとんど調べられてこな かった。そこで我々は、どのような星が最終的にど のような現象を引き起こすのかを詳細なシミュレー ションを行って明らかにした。その結果、初期に十 分強い磁場(10<sup>12</sup>G)を持つような天体は、重力崩壊 の際にジェット状の爆発を起こすことを示した。ま た、最終的に残るブラックホールの大きさや放出さ れるニュートリノの量と、初期の回転則・強さの相 関関係も明らかにした [23, 187]。

#### 第一世代星の背景放射への寄与

第一世代星の重力崩壊のシミュレーション結果を用 いて、重力波やニュートリノの背景放射の成分にどの ような影響を及ぼすのかを調べた。その結果、重力波 については、次世代の重力波検出器である DECIGO や BBO といったもので観測可能性が高いことを示 した [24, 30, 68, 88, 121, 141, 142, 187]。ニュート リノに関してはこれまで観測可能性は低いとされて いたが、今まで考慮されていなかった回転の効果を 入れた計算を行うと、観測の窓となる周波数帯が存 在する可能性を示唆した [68, 116, 121, 143, 187]。

#### 5.1.4 その他

向山信治助教はこれまでの研究成果を受け、日本 物理学会より第一回若手奨励賞を受賞し[1]、また、 今年度発足した世界トップ拠点、東京大学数物連携 機構准教授として転出した。

<受賞>

<報文>

(原著論文)

- [2] Kazuhiro Yamamoto, David Parkinson, Takashi Hamana, Robert C. Nichol, and Yasushi Suto: "Optimizing future imaging surveys of galaxies to confront dark energy and modified gravity models," Phys. Rev. D 76, 023504-1-10 (2007) (astroph/0704.2949)
- [3] Jennifer K. Adelman-McCarthy et al.: "The Fifth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey," The Astrophysical Journal Supplement 172, 634–644 (2007) (astro-ph/0708.3380)
- [4] Jennifer K. Adelman-McCarthy et al.: "The Sixth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey," The Astrophysical Journal Supplement 175, 297-313 (2007) (astro-ph/0707.3413)
- [5] S. Mukohyama: "Towards a Higgs phase of gravity in string theory," JHEP 0705, 048 (2007).
- [6] T. Kobayashi, S. Mukohyama and S. Kinoshita: "Constraints on Wrapped DBI Inflation in a Warped Throat," JCAP 0801, 028 (2008).
- [7] L. Kofman and S. Mukohyama: "Rapid roll Inflation with Conformal Coupling," Phys. Rev. D 77, 043519 (2008).
- [8] Naoki Seto, Atsushi Taruya: "Measuring a Parity-Violation Signature in the Early Universe via Ground-Based Laser Interferometers," Phys. Rev. Lett. 99, 121101 (2007)

- [9] Atsushi Taruya, Takashi Hiramatsu: "A Closure Theory for Nonlinear Evolution of Cosmological Power Spectra," The Astrophysical Journal 674, 617–635 (2008)
- [10] Shunichiro Kinoshita, Yuuiti Sendouda and Shinji Mukohyama: "Instability of de Sitter brane and horizon entropy in a 6D braneworld," JCAP 0705, 018 (2007)
- [11] Shunichiro Kinoshita: "New branch of Kaluza-Klein compactification," Phys. Rev. D 76, 124003 (2007)
- [12] Norio Narita, Keigo Enya, Bun'ei Sato, Yasuhiro Ohta, Joshua N. Winn, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Edwin L. Turner, Wako Aoki, Motohide Tamura, Toru Yamada, and Yuzuru Yoshii: "Measurement of the Rossiter–McLaughlin Effect in the Transiting Exoplanetary System TrES-1," Publications of the Astronomical Society of Japan 59, 763-770 (2007)
- [13] Joshua N. Winn, John Asher Johnson, Kathryn M. G. Peek, Geoffrey W. Marcy, Gaspar A. Bakos, Keigo Enya, Norio Narita, Yasushi Suto, Edwin L. Turner, and Steven S. Vogt: "Spin-Orbit Alignment for the Eccentric Exoplanet HD 147506b," The Astrophysical Journal **665**, L167-L170 (2007)
- [14] Norio Narita, Bun'ei Sato, Osamu Ohshima, and Joshua N. Winn: "A Possible Spin-Orbit Misalignment in the Transiting Eccentric Planet HD 17156b," Publications of the Astronomical Society of Japan Letters 60, L1-L5 (2007)
- [15] Akihito Shirata, Yasushi Suto, Chiaki Hikage, Tetsuya Shiromizu, Naoki Yoshida: "Galaxy clustering constraints on deviations from Newtonian gravity at cosmological scales II: Perturbative and numerical analyses of power spectrum and bispectrum," Phys. Rev. D 76, 044026 (2007)
- [16] Hasan Yuksel, Shunsaku Horiuchi, John Beacom, and Shin'ichiro Ando: "Neutrino Constraints on the Dark Matter Total Annihilation Cross Section," Phys. Rev. D 76, 123506 (2007)
- [17] Shunsaku Horiuchi and Shin'ichiro Ando: "Highenergy neutrinos from reverse shocks in choked and successful relativistic jets," Phys. Rev. D 77, 063007 (2008)
- [18] Hajime Kawahara, Yasushi Suto, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, Mamoru Shimizu, Elena Rasia, and Klaus, Dolag, "Radial Profile and Lognormal Fluctuations of the Intracluster Medium as the Origin of Systematic Bias in Spectroscopic Temperature", Astrophysical Journal, Vol. 659, pp.257-266 (2007)
- [19] Hajime Kawahara, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, and Yasushi Suto, "Systematic Errors in the Hubble Constant Measurement from the Sunyaev-Zel'dovich Effect" Astrophysical Journal, Chicago Journals, Vol. 674, pp.11-21 (2008)

 <sup>[1]</sup> 向山信治:第1回若手奨励賞、「ブレーン宇宙の厳密解 と摂動論の研究」;日本物理学会、2007年9月21日

- [20] Hidetaka Sonoda, Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka, and Toshikazu Ebisuzaki: 'Phase diagram of nuclear "pasta" and its uncertainties in supernova cores', Phys. Rev. C 77, 035806 (2008)
- [21] Hajime Takami and Katsuhiko Sato: "Estimation Prospects of the Source Number Density of Ultrahigh-energy Cosmic Rays," Astroparticle Physics 28, 529 (2007)
- [22] Shun Saito, Kiyotomo Ichiki, and Atsushi Taruya: "Probing polarization states of primordial gravitational waves with CMB anisotropies," JCAP 09, 002 (2007)
- [23] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, and Katsuhiko Sato: "Magnetorotational Collapse of Population III Stars," Publ. Astron. Soc. Japan 59, 771-785 (2007)
- [24] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, and Katsuhiko Sato: "Gravitational Wave Background from Population III Stars," Astrophys. J. 665, L43-L46 (2007)
- [25] T. Nishimichi, H. Ohmuro, M. Nakamichi, A. Taruya, K. Yahata, A. Shirata, S. Saito, H. Nomura, K. Yamamoto and Y. Suto: "Characteristic Scales of the Baryon Acoustic Oscillations from Perturbation Theory: Non-linearity and Redshift-Space Distortion Effects," Publications of the Astronomical Society of Japan 59, 1049-1060 (2007)

#### (会議抄録)

- [26] S. Mukohyama: "Ghost condensation and gravity in Higgs phase," in Proceedings of the 17th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan.
- [27] Hajime Takami and Katsuhiko Sato: "Propagation of Ultra-high-energy Cosmic Rays above 10<sup>19</sup>eV in a Structured Extragalactic Magnetic Field ang Galactic Magnetic Field," in *Proceedings of International Workshop on Energy Budget in the High Energy Universe*, World Scientific, pp.307-310
- [28] Hajime Takami and Katsuhiko Sato: "Propagation of Ultra-high-energy Protons in Cosmic Magnetic Field," in Proceedings of International Workshop on Cosmic-rays and High Energy Universe, Universal Academy Press, Inc., pp.207-210
- [29] 高見一、佐藤勝彦:「荷電粒子天文学—UHECR Astronomy—」,地文台によるサイエンス, Universal Academy Press, Inc., pp. 75-80
- [30] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, and Katsuhiko Sato: "Gravitational Wave Background from Population III Stars," in *Proceedings of International Conference of "First Stars III*", 142-144 (2007)

(国内雑誌)

- [31] 佐藤勝彦:「宇宙誕生の謎解きに挑む」、日経サイエン ス 9月号 35-38 頁、2007.
- [32] 佐藤勝彦、安藤真一郎、高橋慶太郎:「超新星からの ニュートリノバーストとニュートリノの物理」、日本 物理学会誌 9月号 668-676 頁、2007.
- [33] 須藤 靖: 「東大教師が新入生にすすめる本」、東京大 学出版会 UP 414(2007)4 月号, pp.3-4
- [34] 須藤 靖: 「ドトールとローソンの先」、岩波 科学 77
  (2007) 5 月号, pp.512–513
- [35] 須藤靖:「海底人の世界観・反論・言い分」、東京大 学出版会 UP 416 (2007) 6月号, pp.16-22
- [36] 須藤 靖: 「宇宙のダークエネルギー」、イリューム 19 (2007) No.1 第 37 号, pp.4-21
- [37] 須藤 靖:「宇宙物理学」、学術の動向 12 (2007) 7 月 号, pp.62-63
- [38] 須藤靖:「闇社会撲滅を目指す宇宙論にかかる二つ の暗雲」、岩波科学77 (2007)9月号, pp.945-950
- [39] 須藤 靖: 「書評: 宇宙のランドスケープ」、日本物理 学会誌 62 (2007) 12 月号 pp.957-958
- [40] 須藤 靖:「注文の多い雑文 その二:外耳炎が誘う宇 宙観の変遷、東京大学出版会 UP 42 (2008) 1 月号, pp.45-49
- [41] 須藤 靖: 「科学者からの手紙 第一回」、真夜中 1 (2008) pp.106-107
- [42] 須藤靖:「宇宙の大構造における日本の先駆的研究」、
  日本天文学会百年史編纂委員会編「日本の天文学の
  百年」恒星社厚生閣 (2008 年 3 月刊行) pp.61–62.
- [43] 向山信治:「宇宙の暗黒成分は本当に必要か?--長距 離・長時間での重力の変更-」、物理学会誌 2007 年 7月号

(学位論文)

- [44] 太田泰弘:「太陽系外トランジット惑星系のロシター 効果 – 摂動論的アプローチと惑星リング検出への 応用」(The Rossiter effect of extrasolar transiting planetrary systems – perturbative approach and application to the detection of planetary rings)(博 士論文)
- [45] Shunichiro Kinoshita: "Stability of flux compactifications and de Sitter thermodynamics" (フラック スコンパクト化の安定性とドジッター時空の熱力学) (博士論文)
- [46] Tomoya Takiwaki: "Study of core-collapse supernovae in special relativistic magnetohydrodynamics" (博士論文)
- [47] Norio Narita: "Spectroscopic Studies of Transiting Planetary Systems" (分光観測に基づいたトランジッ ト惑星系の研究)(博士論文)
- [48] Kazuhiro Yahata: "The relation of the Galactic extinction map to the surface number density of galaxies" (銀河系ダスト減光地図と銀河個数密度) (博士論文)
- [49] 小林洸: "Brane Inflation in String Theory" (修士 論文)

(著書)

- [50] 佐藤勝彦:「宇宙論の飽くなき野望」、 技術評論社 (2007 年 12 月)
- [51] 佐藤勝彦: 「宇宙に知的生命体は存在するのか(編 著)、ウエッジ選書(株)ウエッジ(2008年1月)
- [52] 佐藤勝彦:「宇宙論入門」(分担執筆)、 シリーズ 現代の天文学 II 「宇宙論 I」 - 宇宙の始 まり - 佐藤勝彦、二間瀬敏史編,日本評論社 (2008 年1月)
- [53] 佐藤勝彦:「超ひも理論と宇宙の次元、量子宇宙論と 多世界宇宙」 (分担執筆)「未解決の天文学」、 ニュートンプレス (2008 年 4 月) 海部宣男編
- [54] 佐藤 勝彦:「宇宙はいかに始まったか?」(分担執 筆)学問の扉-東京大学は挑戦する-、286 頁、講談社 (2007 年 7 月)
- [55] 佐藤 勝彦: 「すべての学説は仮説であるか?」(分 担執筆)ACADEMIC GROOVE、東京大学出版 会、82頁(2008年3月)
- [56] 須藤 靖・北山哲: 『宇宙論 II 宇宙の進化』、日本 天文学会 100 周年記念出版委員会 編シリーズ 現代の 天文学 第3巻日本評論社 (2007 年 9 月刊行、第一章 pp.1-60)
- [57] 井田茂・田村元秀・佐藤文衛・須藤靖: 『宇宙は「地球」であふれている-見えてきた系外惑星の素顔-』、 技術評論社 知りたい!サイエンス シリーズ (2008 年2月刊行)
- [58] リサ・ランドール:「異次元は存在する (NHK 未来 への提言)」 解説部分担当、NHK 出版 (2007 年 5 月)
- [59] リサ・ランドール著、 向山信治 監訳、塩原通緒 訳: 「ワープする宇宙~5次元時空の謎を解く」、 NHK 出版 (2007年6月)
- [60] C. J. コンセリス (監訳: 樽家 篤史): 「神がつくっ た見えざる手~暗黒エネルギー~」、日経サイエンス 5 月号 2007 年
- [61] 成田 憲保: 「太陽系外惑星の大気に初めて「水」が 見つかった!?」、アストロアーツ 月刊星ナビ 2007 年 7月号 p.50
- [62] 成田 憲保: 「次々と発見されるトランジット惑星たち」、アストロアーツ 月刊星ナビ 2007 年 8 月号 p.70
- [63] 成田 憲保:「すばる望遠鏡、太陽系外惑星の公転軸 の向きの測定に成功」、東京大学理学系研究科・理学 部ニュース 2007 年 11 月号 p.7
- [64] 渡邉元太郎、園田英貴:「分子動力学が予言する原子 核のパスタ相」、日本物理学会誌 vol. 62 No.5 (2007), p.350

<学術講演>

#### (国際会議)

#### 一般講演

 14th Workshop on Nuclear Astrophysics (Ringberg Castle at Lake Tegernsee, March 10 - March 15, 2008)

- [65] Tomoya Takiwaki: "Magnetic explosion mechanism of supernovae"
- [66] Shunsaku Horiuchi: "High-energy neutrinos from reverse shocks in choked and successful relativistic jets"
- [67] Hidetaka Sonoda: 'Nuclear "pasta" in supernova cores'
- [68] Yudai Suwa: "Gravitational Collapse of Population III Stars"

・その他

- [69] K.Sato, H.Sonoda, G.Watanabe: 'Nuclear " pasta " phases by Quantum Molecular Dynamics,' Institute for Nuclear Theory Workshop on The Neutron Star Crust and Surface (Seatle, June 25 - 29, 2007)
- [70] Yasushi Suto: "Unveiling the nature of transiting extrasolar planets with the Rossiter effect," Max-Planck Institute for Astrophysics cosmology seminar (Garching, Germany, July 3, 2007)
- [71] Yasushi Suto: "Galaxy clustering and Galactic extinction map, Cosmology seminar at Physics and Astronomy Department," University of Nottingham (UK, October 29, 2007)
- [72] S. Mukohyama: "Reheating a multi-throat universe by brane motion," KIAS-YITP joint workshop on String Phenomenology and Cosmology, (Kyoto University, September 24, 2007).
- [73] Atsushi Taruya: "A Closure Theory for Nonlinear Evolution of Power Spectrum," Workshop on Large-scale Structure of the Universe and Its Recent Progress (Univ.Tokyo, March 21, 2008)
- [74] Atsushi Taruya: "A Closure Theory for Non-linear Evolution of Power Spectrum," ROE - JSPS Workshop on Decrypting the Universe –Large Surveys for Cosmology– (Royal Astronomical Observatory, Edinburgh, UK, Oct.26, 2007)
- [75] Norio Narita: "Measuring the Spin-Orbit Alignments of Transiting Exoplanetary Systems: The Case for TrES-1," Extreme Solar Systems, Greece, June 25 2007
- [76] Akihito Shirata, Yasushi Suto, Chiaki Hikage, Tetsuya Shiromizu, Naoki Yoshida: "Galaxy clustering constraints on deviations from Newtonian gravity at cosmological scales," ROE-JSPS workshop Decrypting the Universe (Royal Observatory Edinburgh, Edinburgh, Scotland, Octobar 24-26, 2007)
- [77] Shunsaku Horiuchi: "Dark matter annihilation from intermediate-mass black holes: Contribution to the extragalactic gamma-ray background," TeV Particle Astrophysics 2007 (Venice, Italy, 28-31st August, 2007)
- [78] Shunsaku Horiuchi: "Neutrino Constraints on the Dark Matter Total Annihilation Cross Section," Topics in Astroparticle and Underground Physics (Sendai, Japan, 10-15th September, 2007)

- [79] Hidetaka Sonoda: 'Nuclear "pasta" in collapsing stellar cores investigated by quantum molecular dynamics,' Clusters'07 (9/3-7, 2007, Stratford upon Avon, UK)
- [80] Hajime Takami and Katsuhiko Sato: "Propagation of Ultra-high-energy Cosmic Rays in Cosmic Magnetic Fields," The 30th International Cosmic Ray Conference (Merida, Mexico, Jul. 2007)
- [81] Hajime Takami, Susumu Inoue, Tokonatsu Yamamoto, and Katsuhiko Sato: "Towards Unravelling the Structual Distribution of Ultra-highenergy Cosmic Ray Sources," International Workshop on Accelerators in the Universe (KEK, Japan, Mar. 2008)
- [82] Hajime Takami and Katsuhiko Sato: "Towards Unravelling the Structual Distribution of Ultrahigh-energy Cosmic Ray Sources," International Workshop on Advances in Cosmic Ray Science (Waseda university, Japan, Mar. 2008)
- [83] Shun Saito, Masahiro Takada, and Atsushi Taruya: "The impact of non-linear evolution of cosmological matter power spectrum on the measurement of neutrino masses," International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP) 2007 (Sendai Civic Auditorium, Japan, September 11-15, 2007)
- [84] Shun Saito, Masahiro Takada, and Atsushi Taruya: "The impact of non-linear evolution of cosmological matter power spectrum on the measurement of neutrino masses," ROE-JSPS workshop Decrypting the Universe (Royal Observatory Edinburgh, Edinburgh, Scotland, Octobar 24-26, 2007)
- [85] Shun Saito, Masahiro Takada, and Atsushi Taruya: "The impact of non-linear evolution of cosmological matter power spectrum on the measurement of neutrino masses," Cosmic Cartography (Chicago Greecher Center, Chicago, USA, December 3-6, 2007)
- [86] Shun Saito, Masahiro Takada, and Atsushi Taruya: "Impact of massive neutrinos on nonlinear matter power spectrum," Accerelators in the Universe 2008 (KEK, Tsukuba, Japan, March 12-14, 2008)
- [87] Shun Saito, Masahiro Takada, and Atsushi Taruya: "Impact of massive neutrinos on nonlinear matter power spectrum," Focus Week: Neutrino Mass (IPMU, Kashiwa, Japan, March 17-20, 2008)
- [88] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, and Katsuhiko Sato: "Gravitational Wave Background from Population III Stars," First Stars III (Santa Fe, US, July 2007)
- [89] Takahiro Nishimichi: "Systematic Effects on BAO: Perturbation Theory and N-body Simulations," ROE-JSPS Joint Workshop 2007 "Decrypting the Universe," (Royal Observatory Edinburgh, UK, October 24-26, 2007)

- [90] Takahiro Nishimichi: "Systematic Effects on BAO: Perturbation Theory and N-body Simulations," Cosmic Cartography 07 Chicago (Gleacher Center, University of Chicago, USA, December 3-6, 2007)
- [91] Takeshi Kobayashi: "Constraints on Wrapped DBI Inflation in a Warped Throat," KIAS-YITP joint workshop on 'String Phenomenology and Cosmology, (Kyoto University, September 25, 2007).

#### 招待講演

- [92] K. Sato: "Inflation before Inflation: From Supernovae to Multiproduction of Universes," The Very Early Universe 25 Years (Cambridge, 17-20 December 2007)
- [93] K. Sato: "How did the Universe begin? -the scenario described by modern physics-," The public lecture on ICGA8 (Nara, Aug.29-Sept.1, 2007)
- [94] Yasushi Suto: "Systematic errors of the Hubble constant measurement from the Sunyaev-Zel'dovich effect," International conference on Galaxy clustering and Galactic Tracing cosmic evolution with clusters of galaxies (Sesto, Italy, June 25-29, 2007)
- [95] Yasushi Suto: "Summary talk: theory," ROE and DENET joint workshop on Decrypting the Universe: Large Surveys for Cosmology (Edinburgh, UK, October 24-26, 2007)
- [96] Yasushi Suto: "Dark energy in the universe," APCTP-YITP workshop on Accretion and outflow in astrophysics 2008, (Kyoto, January 8-11, 2008)
- [97] S. Mukohyama: "Cosmology with warped flux compactification," APCTP Black Hole Focus Program, (APCTP, Korea, June 6, 2007).
- [98] S. Mukohyama: "Black brane and Higgs phase of gravity," APCTP Black Hole workshop, (APCTP, Korea, June 9, 2007).
- [99] S. Mukohyama: "Cosmology with Warped Flux Compactification," Workshop on String theory, Gravity and Cosmology (KITPC, China, Nov 6, 2007).
- [100] S. Mukohyama: "Ghost condensation and gravity in Higgs phase," The 17th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (Nagoya, December 3-7, 2007)
- [101] Hajime Takami, and Katsuhiko Sato: "Towards Unravelling the Structual Distribution of Ultrahigh-energy Cosmic Ray Sources," The 2nd international JEM-EUSO meeting (RIKEN, Japan, Nov. 2007)
- [102] Shun Saito, Masahiro Takada, and Atsushi Taruya: "Modeling of nonlinear matter power spectrum with massive neutrinos," Focused Workshop: The Theoretical Modeling of Cosmic Structure Formation and its Recent Progress (The University of Tokyo, Tokyo, Japan, March 21, 2008)

[103] Takahiro Nishimichi: "Reliability of N-body simulations at the Sub-percent Level," The Theoretical Modeling of Cosmic Structure Formation and its Recent Progress (University of Tokyo, Japan, March 21-22, 2008)

#### (国内会議)

一般講演

- ・RESCEU研究会(箱根、2007年9月)
- [104] 須藤靖: 「SDSS の現状と今後」
- [105] S. Mukohyama: Conformal Inflation
- [106] 樽家篤史, 平松尚志: "Closure Theory for Nonlinear Gravitational Evolution of Power Spectrum"
- [107] 木下俊一郎,向山信治:"de Sitter compactifications with warped geometry"
- [108] 斎藤 俊、高田 昌広、樽家 篤史: "The impact of non-linear evolution of cosmological matter power spectrum on the measurement of neutrino masses"
- [109] 小林洸:"Constraints on Wrapped DBI Inflation in a Warped Throat"

・日本物理学会 2007 年秋季大会(北大、2007 年 9 月)

- [110] 須藤靖:「ダークエネルギー研究の現状と展望」、宇宙線・宇宙物理領域シンポジウム宇宙のダークエネル ギー (2007 年 9 月 22 日)
- [111] 木下俊一郎,向山信治:"de Sitter compactifications with warped geometry"
- [112] 滝脇知也:「磁気駆動超新星の力学的考察」
- [113] 堀内俊作、安藤真一郎、Hasan Yuksel, John Beacom:「暗黒物質対消滅ニュートリノを用いた暗黒物 質の制限」
- [114] 高見一、村瀬孔大、長滝重博、 佐藤勝彦: "Cosmogenic Neutrinos as a Probe of the Transition from Galactic to Extragalactic Cosmic Rays"
- [115] 斎藤 俊、高田 昌広、樽家 篤史: "The impact of non-linear evolution of cosmological matter power spectrum on the measurement of neutrino masses"
- [116] 諏訪雄大、滝脇知也、固武慶、佐藤勝彦:「第一世代 星のニュートリノ放射における回転の効果」
- [117] 小林洸、向山信治、木下俊一郎:"Inflation in a Warped Throat"
- ・日本天文学会 2007 年秋季大会(岐阜大学、2007 年 9 月)
- [118] 樽家篤史:「完結近似にもとづく質量密度ゆらぎの非 線形重力進化の取り扱い」
- [119] 河原創:「スニャーエフ・ゼルドビッチ効果によるハッ プル定数測定の系統誤差」
- [120] 斎藤 俊、市來 淨與、樽家 篤史:「CMB 非等方性を 用いた背景重力波の円偏極成分の検出法」
- [121] 諏訪雄大、滝脇知也、固武慶、佐藤勝彦:「第一世代 星の重力崩壊と重力波、ニュートリノ放射」

- [122] 西道 啓博、白田 晶人、大室 裕史、斎藤 俊、矢幡 和浩、平松 尚志、樽家 篤史、須藤 靖:「サブパーセ ントレベルでの宇宙論的N体計算の信頼性」
- ・日本物理学会 2008 年春季大会(近畿大学、2008 年 3 月)
- [123] 樽家篤史, 平松尚志:「バリオン音響振動の非線形進 化・その1」
- [124] 平松尚志, 樽家篤史:「バリオン音響振動の非線形進 化・その2」
- [125] 木下俊一郎,向山信治: "Stability of deformed Freund-Rubin compactifications"
- [126] 園田英貴、渡邉元太郎、佐藤勝彦、泰岡顕治、戎崎 俊一:「超新星コアにおける原子核パスタの相図の不 定性」
- [127] 高見一、 佐藤勝彦:「最高エネルギー宇宙線到来方 向分布における銀河内磁場の影響」
- [128] 小林洸、向山信治、木下俊一郎:"D-Brane Cosmology in a Warped Throat"
- ・日本天文学会 2008 年春季大会(国立オリンピック記念 青少年総合センター、2008 年 3 月)
- [129] 成田 憲保、他:「大離心率トランジット惑星 HD17156bのロシター効果の観測結果」
- [130] 堀内俊作、安藤真一郎: "High-energy neutrinos from reverse shocks in choked and successful relativistic jets"
- [131] 斎藤 俊、高田 昌広、樽家 篤史:「物質ゆらぎの非 線形パワースペクトルに対する有質量ニュートリノ の効果」
- [132] 西道 啓博、白田 晶人、樽家 篤史、矢幡 和浩、斎藤 俊、須藤 靖、高橋 龍一、吉田 直紀:「サブパーセン トレベルでの宇宙論的N体計算の信頼性 II」
- ・その他
- [133] Yasushi Suto: "Introducing DENET, HSC & WFMOS," RESCEU & DENET Summer School on Dark energy in the universe (Goura, Japan, September 2-4, 2007)
- [134] 樽家篤史:「ダークマター分布の非線形進化の新しい 様相」、「宇宙初期における時空と物質の進化」研究 会(東京大学、2007年5月28日)
- [135] 樽家篤史:「東大グループ研究成果報告」、Hyper Suprime-Cam をめぐるサイエンス検討会(志摩市, ホテル近鉄アクアヴィラ伊勢志摩、2008年3月7日)
- [136] 堀内俊作:「暗黒物質対消滅ガンマ線・ニュートリノ を用いた暗黒物質の制限」、 平成19年COEシンポ ジウム(東京大学、2007年11月15日)
- [137] 高見一、佐藤勝彦:"Towards Unravelling the Structual Distribution of Ultra-high-energy Cosmic Ray Sources," 第 20 回理論懇シンポジウム(京都大学、 2007 年 12 月 26 日)

- [138] 斎藤 俊、市來 淨與、樽家 篤史:「CMB 非等方性を 用いた背景重力波の円偏極成分の検出法」、宇宙初期 における時空と物質の進化(東京大学、2007 年 5 月 29 日)
- [139] 斎藤 俊:「ニュートリノ質量の宇宙論的な制限」、21
  世紀 COE シンポジウム 2007(東京大学、2007 年 11
  月 13 日)
- [140] 斎藤 俊、高田 昌広、樽家 篤史: "Impact of massive neutrinos on nonlinear matter power spectrum," HSC をめぐるサイエンス検討会(アクアヴィラ伊勢 志摩、2008 年 3 月 6 日)
- [141] 諏訪雄大:「第一世代星の重力崩壊と背景重力波への 寄与」、第5回 DECIGO ワークショップ(国立天文 台、2007年4月18日)
- [142] 諏訪雄大:「背景重力波で探る第一世代星」、研究会「宇宙初期における時空と物質の進化」(東京大学、2007 年 5 月 28 日)
- [143] 諏訪雄大:「第一世代星の重力崩壊とニュートリノ 放射」、理論懇シンポジウム「宇宙物理学の未解決 問題」(京都大学、2007年12月25日)
- [144] 西道 啓博:「バリオン音響振動で探るダークエネル ギー:非線形成長と赤方偏移歪みの影響」、宇宙初期 における時空と物質の進化(東京大学、2007年5月 28-30日)
- [145] 西道 啓博、白田 晶人、矢幡 和浩、斎藤 俊、樽家 篤史、須藤 靖、高橋 龍一、吉田 直紀、松原隆彦、杉 山直、加用一者、Yipeng Jing、吉川耕司:「サブパー セントレベルでの宇宙論的N体シミュレーションの信 頼性」、HSCをめぐるサイエンス検討会(ホテル近 鉄アクアヴィラ伊勢志摩、2008 年 3 月 5-7 日)

招待講演

- [146] 佐藤 勝彦:「宇宙論の新展開」、21世紀COE プログラム「極限量子系とその対称性」シンポジウム(東京大学理学部小柴ホール、2008年11月13~ 15日)
- [147] 佐藤 勝彦:「宇宙論の現状と展望」、日本天文学 会公開講演会 学会創立百周年を記念して (有楽町 朝日ホール、2008 年 3 月 29 日)
- [148] 須藤靖: "Dark energy in the universe, Extrasolar planets," KEK 理論グループ 夏の学校 (白馬、2007 年7月 30日、31日)
- [149] 須藤靖:「宇宙のダークエネルギー」、基研研究会 於近畿大学 弦理論と場の理論-量子と時空の最前線 (2007 年 8 月 8 日)
- [150] 須藤靖:「宇宙・銀河団・惑星に関する3つの小ネ タ」、 階層の科学研究会(2008年3月28日)
- [151] 向山信治:「ゴースト場凝縮と宇宙論」、研究会「宇 宙初期における時空と物質の進化」(東京大学、2007 年5月29日)
- [152] 向山信治:「宇宙論で探る高次元時空」、日本物理 学会若手賞受賞記念講演、日本物理学会 2007 年秋季 大会(北大、2007 年 9 月 21 日)

- [153] 向山信治: "Brane inflation in string cosmology,"
  宇宙線研究所理論研究会(宇宙線研究所、2007年12月1日)
- [154] 向山信治:「超弦理論とインフレーション」、第1回 「超弦理論と宇宙」研究会(尾道、2008年2月12日)
- [155] 向山信治: "Inflationary models in string cosmology," 日本物理学会 2008 年春季大会(近畿大学、2008 年 3 月 23 日)
- [156] 樽家篤史:「バリオン音響振動とダークエネルギー」、 物理学会 宇宙線・宇宙物理領域シンポジウム(北海 道大学、2007 年 9 月 22 日)
- [157] 樽家篤史:「観測的宇宙論:宇宙のダークエネルギー」、 「高エネルギー天体現象と重力波」研究会 (東京大 学、2007 年 11 月 17 日)
- [158] 高見一、村瀬孔大、長滝重博、井上進、山本常夏、佐藤勝彦:「荷電粒子天文学―UHECR Astronomy―」、第2回「地文台によるサイエンス」シンポジウム(甲南大学、2007年12月9日)
- [159] 高見一、村瀬孔大、長滝重博、井上進、山本常夏、 佐藤勝彦:「最高エネルギー宇宙線の起源の解明に 向けて」、「高エネルギーガンマ線天体研究会:将来へ の展望」(東京大学宇宙線研究所、2008年3月18日)

(セミナー)

- [160] 須藤靖:「星空の向こう側」、日本大学春季公開講 座「新しい宇宙像を求めて」第4回(2007年6月2 日)
- [161] 須藤靖:「宇宙のダークエネルギーとは何か」、東 邦大学理学部物理学科公開講座 ミクロの物質とマク ロの宇宙(2007年7月7日)
- [162] 須藤靖: 「太陽系外惑星: そのさきにあるもの」, 東京大学理学部物理学教室コロキウム (2007 年 10 月 12 日)
- [163] 須藤靖:「太陽系外惑星の光と影:今日までそして 明日から」、第6回国立天文台公開講演会みんなで 探そう第二の地球、サイエンスアゴラ2007 (2007 年11月24日)
- [164] 須藤靖: 「夜空の向こう」、 相馬高校 SSH 講演会 於 代々木オリンピックセンター (2007 年 12 月 19 日)
- [165] 須藤靖:「天文学者・宇宙物理学者のお仕事」、JAXA: 科学技術に関する座談会 (2008 年 2 月 3 日)
- [166] S. Mukohyama: "Cosmology with warped flux compactification," University of Victoria, Canada, July 31, 2007.
- [167] 向山信治: "Fast-roll Inflation with Conformal Coupling," 名古屋大学 (2007 年 10 月 9 日 )
- [168] 向山信治: 「ゴースト場凝縮と宇宙論」、 新潟大学 (2007 年 11 月 1 日)
- [169] S. Mukohyama: "Brane Inflation in a Warped Throat," University of California at Davis, November 26, 2007.
- [170] 向山信治: "Rapid roll Inflation with Conformal Coupling," 東北大学 (2008 年 1 月 17 日)

- [171] 向山信治:「4次元を超える世界と宇宙論」、信州大 学理学部 サイエンス・ラウンジ招待講演 (2008 年2月1日)
- [172] 向山信治:「4次元を超える世界と宇宙論」、中央 大学(2008 年 12 月 5 日)
- [173] 向山信治:浜松市空手道連盟 OB 講演「宇宙への夢」、 浜松科学館大ホール (2008 年 2 月 10 日
- [174] 向山信治: "Rapid roll Inflation with Conformal Coupling," 九州大学 (2008 年 2 月 22 日 )
- [175] 向山信治: "Gravity and Cosmology with Warped Flux Compactification,"京都大学(2008年3月3 日)
- [176] Atsushi Taruya: "On Non-linear Evolution of Power Spectrum," University of College London, UK (2007年10月30日)
- [177] 樽家篤史: "A New Approach to the Gravitational Clustering of Large-scale Structure and Baryon Acoustic Oscillations," 基礎物理学研究所(2007年 7月24日)
- [178] 樽家篤史: "A Closure Theory for Non-linear Evolution of Power Spectrum,"東工大宇宙理論コロキ ウム (2007 年 11 月 6 日)
- [179] 木下俊一郎: "Instability of de Sitter brane and horizon entropy in a 6D braneworld,"早稲田大学理 論宇宙物理学研究室セミナー(2007年6月1日)
- [180] 滝脇知也:「特殊相対論的磁気流体計算に基づく重力 崩壊型超新星からの磁気優勢ジェット」、千葉大(2 008年2月13日)
- [181] 成田 憲保: 「トランジット惑星系 TrES-1 での Rossiter-McLaughlin 効果の観測結果」、国立天文 台 HDS ゼミ(2007 年 4 月 19 日)
- [182] Norio Narita: "Testing Planet Migration Theories by Observations of Transiting Exoplanetary Systems," Subaru Telescope, Subaru seminar (July 11 2007)
- [183] 白田 晶人:「宇宙論スケールでの Newton 重力の 破れに対する SDSS からの観測的制限」、立教大学原 子核・放射線物理学研究室(村田研)セミナー(2007 年11月8日)
- [184] 園田英貴:「高密度天体の原子核パスタ」、早稲田大 学山田研究室 (June 6, 2007)
- [185] 高見一、村瀬孔大、長滝重博、井上進、山本常夏、佐藤勝彦: "Towards Unravelling the Origin of Ultrahigh-energy Cosmic Ray Sources,"東京工業大学 (2008年1月9日)
- [186] Shun Saito, Masahiro Takada, and Atsushi Taruya: "The impact of non-linear evolution of cosmological matter power spectrum on the measurement of neutrino masses," University College of London (2007年10月30日)
- [187] 諏訪雄大:「第一世代星の重力崩壊と重力波、ニュー トリノ放出 、 筑波大学(2007 年 10 月 3 日)
- [188] 西道啓博: バリオン音響振動を用いた暗黒エネルギー の制限、国立天文台(2007年6月14日)

- [189] Takahiro Nishimichi : "Systematic Effects on BAO: Perturbation Theory and N-body Simulations," ICG, University of Portsmouth (October 30, 2007)
- [190] 小林洸: "Constraints on Wrapped DBI Inflation in a Warped Throat," 東京大学(2007年9月12日)

#### 出張講演

- [191] 成田 憲保: 「すばる望遠鏡で太陽系外惑星を観測し よう!」、科学技術館 ユニバースゲスト(2007 年 10 月 13 日)
- [192] 成田 憲保:「ハビタブル:太陽系の中の地球」、埼玉 県草加市八幡小学校 アストロバイオロジー教室第5 回(2008年1月25日)
- [193] 成田 憲保:「アナザーアース:太陽系外惑星の研究」、 埼玉県草加市八幡小学校 アストロバイオロジー教室 第6回(2008年2月15日)

## 5.2 村尾研究室

本研究室では、物理学の中でも最も新しい研究分 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プレークスルーの候補 として注目を集めている。

量子情報を活用したシステムとしては、多量子ビットの重ね合わせ状態を利用した量子計算(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 ンなどが提案されている。そして、量子情報を用い ることで古典情報処理を超えて何が可能になるのか、 そしてそのような量子情報処理をどのように実現す るのか、という問いに対して、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 たる学際的なアプローチで研究が進められている。

量子情報に関する研究は1990年代から大きく発展 してきたが、この背景には、ナノテクノロジーに代 表されるような科学技術の発展によって,量子力学 で記述されるようなミクロスコピックな世界を実際 に制御・操作することが可能となってきた、という事 実がある。つまり、我々の「器用さ」が全く新しい段 階に進歩し,受動的のみならず能動的に「アクセス」 できる自然界の範囲が,古典力学で記述される世界 から,量子力学で記述される世界へと広がってきた ことを示している。従来のテクノロジーでは,量子力 学で記述されるような世界とのやりとりは,マクロ スコピックな制御変数の操作や,統計的に平均化さ れた物理量の観測を通じて行うことしかできなかっ たため,古典力学で記述される世界にはないような 量子的な世界の持つ全ポテンシャルを自由に「利用 する」ことはできなかった.量子の世界を同じ量子 スケールで直接扱うことが可能となってきて初めて, 我々は,量子の世界の持つ全ポテンシャルを,利用 可能な「資源」として手にいれたことになる.

そこで本研究室では、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、量子力学特有の「資源」を活用した新たな情 報処理システムの提案を行うことを目的として、「資 源」として多体系や多準位系におけるエンタングル メント(量子もつれ)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「分離不可能 (inseparable) 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  $\operatorname{singlet}$  状態  $(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)/\sqrt{2}$  に現れる, 距離を越 えて瞬時に働く相関(非局所的相関)である.エン タングルメントを持つ状態(エンタングル状態)で は,非局所的相関の作用により,一方の部分系の状態 を観測などにより変化させると,もう一方の部分系 の状態が自動的に他方の観測結果に応じた状態に瞬 時に変化する.この非局所的相関は,ある時点で部 分系間に相互作用が存在していたことによって生じ るが,一度相関ができてしまえば,エンタングル状 態を保持する限り部分系間の距離には関係なく「作 用」する.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。現在では、エンタングルメントの存在は実験で 確認されており、古典力学には存在しない量子力学 の本質的な資源として考えられているが、特に多体 系や多準位系におけるエンタングルメントの性質に 関しては依然未解明な点が多い。

今年度は、村尾美緒准教授、Damian Markham 助 教(2007年9月にフランスのパリ第7大学へ移籍) Peter Turner 助教(2008年2月にカナダのカルガ リー大学より着任)修士課程の大学院生である添田 彬仁氏、中田芳史氏、坂下理沙氏、大学院外国人研 究生の Martin Aulbach 氏のメンバーで、エンタン グルメントの本質を理解するためのエンタングルメ ント理論、物性系におけるエンタングルメントの役 割を探るためのマクロの系におけるエンタングルメ ントに関する研究、エンタングルメントを量子暗号 へと応用する応用研究を行った。

#### 5.2.1 エンタングルメント理論

### 遠隔量子情報抽出と遠隔量子情報破壊による量子情 報の非対称共有

エンタングルメントは非局所的量子相関であり、 エンタングルメントの本質を明らかにするためには、 量子状態の持つ古典的な相関と量子相関を明確に区 別する必要がある。その一つの方法として、古典相 関を増やすことはあっても量子相関を平均としては 増やさないような操作のもとで、量子状態がどのよ うに変化し、量子状態や量子情報を用いたタスクを 行うことができるか、ということを解析する方法が ある。この操作は、Local Operation and Classical Communications (LOCC) と呼ばれる操作であり、 POVM(正作用素値測度) で記述されるような一般化 された測定を含む局所的操作とその測定結果を伝え る古典情報の通信、そして測定結果に基づく更なる 条件付測定が含まれる。多体系や多準位系における 量子状態のエンタングルメントの解析には、LOCC の下での量子状態の変換を分析する手法がよく使わ れる。しかし一方、量子情報処理のさまざまなプロ トコルにおいて、個々の量子状態のエンタングルメ ントだけではとらえることのできない、量子状態集 合に現れる非局所性の存在も注目されてきている。 この量子状態集合に現れる非局所性は、これらの状 態集合を基底として用いた量子情報に現れる非局所 性と考えることもでき、量子暗号や量子情報処理の 優位性を考察する際に重要な手掛かりとなる。

我々は、2者間で共有した1量子ビット量子情報 について、どちらか一方の部分系への測定しか行う ことができないようなLOCCの条件下において、量 子情報が遠隔的に他方の系に抽出されたり、量子情 報を遠隔的かつ不可逆に破壊するための必要十分条 件を求めた。その結果、遠隔量子情報抽出(または 遠隔量子情報破壊)ができる側とできない側が存在 するような、非局所性という観点から非対称な量子 情報の共有方法があることを見出した。このような 非対称性は、2者間で共有した純粋状態のエンタン グルメントでは生じないため、量子状態集合および 量子情報に特有の非局所的性質である。この研究は、 東京大学大学院数理科学研究科(現九州大学数理学 研究院数理科学部門助教)の緒方芳子博士との共同 研究の成果である。[担当:村尾]

高い対称性を保持する状態の距離的エンタングルメ ント量の群論的考察

3体以上の多体系の量子状態は、LOCCの下での 変換性に関して全順序集合ではないため、2体の場 合のように絶対的な最大エンタングル状態というも のは存在しないが、様々なエンタングルメント測度 に対する最大エンタングル状態をそれぞれ定義する ことは可能である。これまでの我々の研究によって、 距離的エンタングルメント測度に関して最大エンタ ングル状態を求めるということは、エンタングル状 態に符号化された古典情報を局所操作のみで抽出す ることが最も困難であるような状態を求めることで あることがわかっており、そのような状態は、情報 の秘密共有などの量子暗号への応用が期待される量 子資源となる。

距離的エンタングルメント測度としては、エンタ ングルメント頑強性、相対エントロピーによるエン タングルメントおよび幾何学的測度の3つの異なる 量がある。本研究では、群論的な解析を用いて、こ れらの3つの量の値が一致するための十分条件を求 めた。更にこの性質を用いて、今まで求められてい なかった反対称状態や対称状態の距離的なエンタン グルメント量の値を求めることに成功した。その結 果、反対称状態の方が対称状態よりも距離的なエン タングルメント量の値が大きいことがわかった。こ れは、反対称状態への古典情報の符号化が、量子ネッ トワーク上で情報を分散秘匿するのに適しているこ とを示すものである。また、与えられた状態がエン タングルしているかどうかを知ることができる観測 量である、エンタングルメント証拠 (witness) の最適 演算子を求める方法と幾何学的測度との関連づけに も成功した。この研究は、東京大学ナノ量子情報エ レクトロニクス研究機構 (現英国 Imperial College) の尾張正樹博士、JSTのERATO-SORST量子情報 システムアーキテクチャ(現東北大学大学院情報科学 研究科准教授)の林正人博士、英国 Hertforeshire 大 学の Shashank Virmani 博士との共同研究の成果で ある。[担当:村尾、Markham]

## Graph 状態におけるエンタングルメントと LOCC による復号化通信容量

2001 年に Raussendorf と Briegel は, クラスター 状態と呼ばれる特殊なエンタングルメントを持つ多 量子ビット状態を用いて,構成する量子ビットを一つ づつ測定することとで,どのような量子計算も行う ことができることを見出した。これによって,エンタ ングルメントが普遍的なな量子計算の資源として使 えることが示された。ゲート演算の列によって量子演 算を定義するような回路モデルの量子計算に対して、 このような量子計算のモデルは測定ベース量子計算 (Measurement based quantum computation) または -方向量子計算 (one-way quantum computation) と 呼ばれる。クラスター状態は格子点においた量子ビッ トに対して、再近接の量子ビットとの間で制御 *σ*<sub>z</sub> 演 算を行うことによって作ることができる。さらに一 般的なグラフで定義されるような graph 状態と呼ば れるエンタングルメントを量子計算の資源として用 いることも可能である。

我々は、graph 状態のうちのあるクラスに属する 状態に関して、エンタングルメント頑強性・相対エ ントロピーによるエンタングルメント・幾何学的エ ンタングルメント測度などの、多体間距離的エンタ ングルメント量を導出することに成功した。このク ラスには、任意のd次元クラスター状態やGHZ状 態、そして関連する混合状態が含まれる。これらの 距離的エンタングルメント量は、LOCC 状態識別可 能数の最大値と関連し、量子状態に符号化された古 典情報の LOCC による復号化通信容量の限界値を導 くものである。この研究は、英国 Hertforeshire 大学 の Shashank Virmani 博士、オーストリア Innsbruck 大学の三宅章雅博士との共同研究の成果である。[担 当: Markham]

#### 3体系における最大エンタングル状態の探索

これまでは、3 量子ビット・4 量子ビットなどの小 数自由度系の純粋状態についてさえ、大域的最適化 問題の困難性のために距離的エンタングルメント最 大の状態が何であるか知られていなかった。本研究で は、最大エンタングル状態が満たすべき十分条件を 解析的に求めた。更に、対称性条件を付加した場合に ついて、Majorana 表現を用いて幾何学的測度に関す る最大エンタングル状態の探索を行った。その結果、 対称的な3 量子ビット状態においてはW状態が、対 称的な4 量子ビット状態においてはW状態が、対 称的な4 量子ビット状態においては、これまでほと んど扱われてこなかったタイプの、正四面体状態と 呼ばれる状態が最大にエンタングルしている状態で あることが判明した。[担当:Aulbach、Markham、 村尾]

#### 測定を用いたユニタリ変換の実装

量子状態において、ある測定操作により起きた状 態変化が、あるユニタリ変換を施すことにより起き る状態変化と同等になる条件を考察した。ここで言 う測定操作は射影演算しで表されるものに限定し、そ れによる状態変化は射影仮説(特に Luder の)に従 うとした。本研究の動機は、いくつかの有力な量子情 報処理プロトコルがこの状態変化の同等性を用いて いることである。そして、本研究では上に述べた二 の状態変化の同等性が量子誤り訂正理論の観点から 分析できることに着目した。その結果、これらの状態 変化が同等であるための必要十分条件を、測定操作 を表す射影演算子と状態ベクトルの属する部分ヒル ベルト空間との関係として求めることができた。ま た、量子情報処理プロトコルの開発を意識したこの 条件の利用法も提案した。 「担当:添田、Markham、 村尾

古典的な座標系を共有しない二者間通信における量 子資源のトレードオフ

二者間における量子力学的な状態を用いた古典情 報通信において、送信者と受信者の用いる座標系が いつも完全に一致しているとは限らない。1ビット情 報を1量子ビットの量子系に符号化して送信し、受 信者が1量子ビットづつ測定して復号化を試みる場 合、座標系の情報がまったく不明であれば、情報を 正しく通信することができない。しかし、量子ビット 資源を付け加えてエンタングルさせた量子状態を用 いた古典情報の符号化と、エンタングルした状態へ の射影測定などの大局的な測定を用いた復号化を行

えば、情報を正しく通信することができることが知 られている。我々は、これらの符号化・復号化におけ るエンタングルメントの役割を解析するために、符 号化過程でエンタングルメントを用いずに quantum reference frame と呼ばれる独立した量子資源を使う 場合において、必要な量子資源量と通信のクオリティ とのトレードオフの関係を研究している。[担当者: 坂下、Turner、村尾]

#### 連続変数系における SIC-POVMs

対称で情報的に完全な(SIC)正作用素値測度(POVM) 1次元 XY モデルにおける多体エンタングルメント は数学的にも良い性質を持つ一方で、量子情報に関連 する実験の解析などでの量子状態トモグラフィーと 関連して、これまでは有限次元のヒルベルト空間に関 して研究が行われてきた。我々は、この SIC-POVM を無限次元のヒルベルト空間(連続変数)へと拡張 する研究を開始した。このような、連続変数系への 拡張は、量子光学系を用いた量子情報処理の実験解 析に有効である。この研究は、カナダ Perimeter Institute の Robin Blume-Kohout 博士との共同研究で ある。[担当: Turner]

#### 5.2.2マクロな系におけるエンタングルメ ント

熱平衡状態における多体間エンタングルメント

マクロな系における多体エンタングルメントの性 質をよりよく理解するために、有限温度の熱平衡状 態における多体エンタングルメント保持性を、エン タングルメントの距離的測度を用いて解析した。そ の結果、エンタングルメントの距離的測度であるエ ンタングルメント頑強性の大きな基底状態を持つ熱 平衡状態において、エンタングルメントの存在を保 証する限界温度を導出することに成功した。また、実 際に測定ベース量子計算で用いられるエンタングル 状態である Stabilizer 状態の限界温度を求めた。こ れらの成果は、量子情報におけるエンタングルメン トと統計力学における分配関数を関連づけるもので あり、マクロな系におけるエンタングルメントと物 性として現れる性質との関連を探るための最初の一 歩であり、今後の発展が期待される。この研究は、英 国 Leeds 大学の Vlatko Vedral 教授、シンガポール 国立大学 (現英国 UCL) の Janet Anders 博士、オー ストリア Innsbruck 大学の三宅章雅博士との共同研 究である。[担当: Markham、村尾]

測定ベース量子計算におけるエンタングルメントと 相転移

量子計算における解を秩序変数として捕えること によって、測定ベース量子計算を情報についてのあ る種の相転移過程として考察した。その結果、エネ ルギーや温度、仕事などの標準的な熱力学的量とエ ンタングルメント量、時間、普遍的量子計算可能性 などの量との間の類似性を見いだした。この描像は、 計算終了までにかかる必要臨界時間の見積りや1次 元における測定ベース量子計算での適切なアーキテ クチャーなどの指針を与えることを可能とする。こ の研究は、英国 Leeds 大学の V. Vedral 教授、M. Hajdusek 氏、シンガポール国立大学 (現英国 UCL) の Janet Anders 博士との共同研究である。 担当: Markham]

# の熱耐性

マクロ系での絶対零度における量子相転移では、 エンタングルメントが重要な役割を担っていると考 えられている。しかし、実際の物理系においては絶 対零度は達成不可能であるため、マクロ系における エンタングルメントの特性を調べるためには有限温 度での熱平衡状態の解析が不可欠である。熱平衡状 態は混合状態であるため、そのエンタングルメント の特性は2体エンタングルメントの特性のみでは記 述されず、多体エンタングルメントに注目して研究 を行う必要がある。

我々は有限温度での量子相転移と多体エンタング ルメントとの関連を理解するために、基底状態の多 体エンタングルメントの幾何学的測度を用いて限界 温度を定義し、これを用いた解析を行った。限界温 度とは熱平衡状態が何らかのエンタングルメントを 持つことが保証されている温度であり、基底状態の 熱に対する耐性の指標にもなっている。我々は、横 磁場中の1次元XYモデルの限界温度を数値計算に よって求め、限界温度が二点相関関数で特徴付けら れた絶対零度での相図の特徴を上手く反映すること を示した。また、強磁場中の1次元 XY モデルにお いては、直感に反して熱平衡状態のエンタングルメ ントが高温まで生き残ることを示した。[担当: 中 田、Markham、村尾]

#### 5.2.3量子情報処理プロトコル

#### Authorized Quantum Computation

コピー不可能な量子鍵を与えられた権限を有する ユーザーのみが、暗号化・難読化をほどこされて公開 された量子ゲート列情報を実行することで、認証され たプログラマによって作られたユニタリ変換を実行 できる、という Authorized Quantum Computation の概念を提案した。この Authorized Quantum Computation では、公開された量子ゲート列の情報から 量子鍵を偽造することが、量子計算機を用いても多項 式時間では不可能であることが要求される。我々は、 Authorized Quantum Computation の安全性は公開 された量子ゲート列の分解問題に基づいており、十分 にランダムな量子ゲートシャッフリングアルゴリズム の存在という仮定の下で、量子鍵の偽造プロセスを

非恒等演算子チェック問題 (non-identity check problem) という QMA (Quantum Merlin-Arthur) 問題 に帰着させることで、その計算量的複雑性が複雑性 クラス QMA 困難にあることを示した。この研究は、 ソニー情報技術研究所の田中雄氏との共同研究であ る。[担当: 村尾]

<報文>

#### (原著論文)

- D. Markham, A. Miyake and S. Virmani, *Entanglement and local information access for graph states*, N. J. Phys. 9, 194 (2007)
- [2] Y. Tanaka, D. Markham and M. Murao, Local encoding of classical information onto quantum states, J. Mod. Opt. 54, 2259-2273 (2007)
- [3] D. Markham, J. Anders, V. Vedral, M. Murao and Akimasa Miyake, *Survival of entanglement in ther*mal states, Europhys. Lett. 8, 40006 (2008)
- [4] J. Anders, D. Markham, V. Vedral and M. Hajdusek, *How much of one-way computation is just thermodynamics?*, Found. Mod. Phys. DOI 10.1007/s10701-008-9218-0 (2008)
- [5] M. Owari, S. L. Braunstein, K. Nemoto, Mio Murao, ε-convertibility of entangled states and extension of Schmidt rank in infinite-dimensional systems, Quantum Information and Computation 8, 0030-0052 (2008)
- [6] M. Hayashi, D. Markham, M. Murao, M. Owari and S. Virmani, *Entanglement and group symme*tries: stabilizer states, symmetric and antisymmetric States, Phys. Rev. A 77, 012104 (2008).
- [7] D. Markham, J. Miszczak, Z. Puchala and K. Zyczkowski, Quantum state discrimination: a geometric approach, Phys. Rev. A. 77, 042111 (2008)
- [8] Y. Ogata and M. Murao, Remote extraction and destruction of spread qubit information, arXiv:0711.1699 (quant-ph), to appear in Phys. Rev. A.
- [9] Y. Nakata, D. Markham, M. Murao, Thermal enhancement of entanglement sensitivity to the phase diagram in XY model, The special issue of Int. J. Quantum Information "Noise, Information and Complexity at Quantum Scale 2007" (in press)

#### (学位論文)

- [10] 添田彬仁, Conditions for generalizations of one-way quantum computation with multi-qubit measurements and non-cluster states, 修士論文
- [11] 中田芳史, Analysis of multi-partite entanglement at finite temperature in the 1D XY model, 修士論文

<学術講演>

```
(国際会議)
```

一般講演

- [12] Damian Markham, Symmetric State Entanglement in the Majorana Representation, Third Asia Pacific Conference on Quantum Information Science, August 2007
- [13] Mio Murao, Yu Tanaka, Damain Markham, Local encoding of classical information onto quantum states, The Photons, Atoms and Qubits conference 2007 (PAQ07), London (UK), September 2007
- [14] Yu Tanaka and Mio Murao, Computational Blind Quantum Computation, AQIS (Asian Conference on Quantum Information Science) 2007, 京都, September 2007
- [15] Martin Aulbach, Damian Markham, Seiji Miyashita, Mio Murao, The maximally entangled state of three and more qubits in terms of the Geometric Measure, AQIS (Asian Conference on Quantum Information Science) 2007, 京都, September 2007
- [16] Yoshifumi Nakata, Damian Markham, Mio Murao, Thermal enhancement of entanglement sensitivity to the phase diagram in XY model, AQIS (Asian Conference on Quantum Information Science) 2007, 京都, September 2007
- [17] Yoshifumi Nakata, Damian Markham, Mio Murao, Entanglement and group symmetries: stabilizer, symmetric and anti-symmetric states, AQIS (Asian Conference on Quantum Information Science) 2007, 京都, September 2007
- [18] Masaki Owari, Masahito Hayashi, Damian Markham, Mio Murao, Shashank Virmani, Entanglement and group symmetries: stabilizer, symmetric and anti-symmetric states, AQIS (Asian Conference on Quantum Information Science) 2007, 京都, September 2007
- [19] Mio Murao and Yu Tanaka, Computational Blind Quantum Computation, The QIPC 2007 International Conference on Quantum Information Processing and Communication, Barcelona (Spain), Barcelona (Spain), October 2007
- [20] Yoshifumi Nakata, Damian Markham, Mio Murao, Thermal enhancement of entanglement sensitivity to the phase diagram in XY model, Noise Information & Complexity at Quantum Scale 2007, November, 2007

#### 招待講演

[21] Damian Markham, Masahito Hayashi, Mio Murao, Masaki Owari, Shashank Virmani, Entanglement and group symmetries: Stabilizers, symmetric and antisymmetric states, International Iran Conference on Quantum Information, Kish (Iran), September 2007

```
(国内会議)
```

-般講演

- [22] Damian Markham, Entanglement of multipartite symmetric states in the Majorana representation: a geometric approach, 第 16 回量子情報技術研究会 (QIT16), 厚木, May 2007
- [23] 中田芳史, Damian Markham, 村尾美緒, XYモデルの相図におけるエンタングルメント感受性の向上, ナノ量子情報エレクトロニクスシンポジウム 公開シンポジウム, 東京, November 2007
- [24] 添田彬仁, Damian Markham, 村尾美緒, 単一量子 ビット測定とクラスター状態を用いない測定ベースの 量子計算の可能性, ナノ量子情報エレクトロニクスシ ンポジウム 公開シンポジウム, 東京, November 2007

#### 招待講演

[25] 村尾美緒,田中雄, Blind Quantum Computation,ナ ノ量子情報エレクトロニクスシンポジウム 公開シン ポジウム,東京, November 2007

## 5.3 上田研究室

上田研究室ではレーザー冷却等により、マイクロ ケルビン以下に冷却された原子気体のボース・アイ ンシュタイン凝縮やフェルミ超流動の理論的研究を 行っている。この系は原子間相互作用の強さを含む ほとんどすべての物質パラメーターを自在に変化さ せることができる人工量子物質である。この自由度 を用いて、様々な物理現象に共通する普遍的な法則 の探求が可能である。特に原子気体のボース・アイ ンシュタイン凝縮 (BEC) は自発的対称性の破れを研 究する格好の舞台であると考えられる。その主な理 由は次の3点である。(1)相互作用の時間スケールが 数ミリ秒と極めて長く、相転移も同程度の時間が必 要であると考えられる。(2)相互作用の強さを含む外 部パラメーターを自由に変化させることができ、相 転移をコントロールすることができる。(3)系がメゾ スコピック領域にあるために、熱力学的極限への漸 近的振る舞いが研究でき、通常は理論的な補助道具 として導入される対称性を破る" 無限小 "の摂動項 さえもがコントロール可能である。ここでは、最近 の我々の研究グループの成果から3つのトピックス を紹介する。

## 5.3.1 引力相互作用する一次元 BEC にお けるソリトン形成

1次元系の引力ボース気体の基底状態は、並進対称 性を破ったソリトン状態である。しかし、系の長さ が有限系である場合は、閉じ込めによる零点エネル ギーが引力相互作用と競合する。したがって、引力 が弱い場合は基底状態は並進対称性をもち、引力が ある臨界値 (図 5.3.1 では、gN = 1)を超えると、並 進対称性が自発的に破れソリトンが形成される。図 5.3.1(a) は、対称性が破れる前後における厳密対角化 により得られた多体スペクトルである。対称性が自 発的に破れる gN > 1 の領域では、励起エネルギー が 1/N のオーダー (図 5.3.1(c))の励起が現れるが、 これはボゴリウボフスペクトル (図 5.3.1(b))には現 れない多体的な励起であり、これらが自然界に存在 する"無限小"の摂動により重ね合わされて、並進対 称性を自発的に破るものと考えられる。熱力学的極 限では、これら 1/N のオーダーの励起エネルギーは ゼロになり、無限に縮退したゴールドストーンモー ドへと転化する。同様の機構は、量子渦の生成にお いても見ることができる。この場合は、渦が侵入す る過程で連続的な軸対称性が自発的に破れる。



図 5.3.1: 一次元引力系における (a) 厳密対角化スペ クトル、(b) ボゴリュゴフスペクトル、(c) 励起エネ ルギーの粒子数依存性。

## 5.3.2 スピンテクスチャにおけるカイラル 対称性の破れ

アルカリ原子は、超微細スピン F という内部自由 度を持っており、パラメーターによりさまざまな量 子相を発現する。例えば、スピン1のBECは、強磁 性相、ポーラー相のほかに、磁化の方向が磁場に対 して傾いている軸対称性が破れた相が存在する。最 近、バークレーのグループは、ポーラー相に用意さ れたBECをこの軸対称性が破れた相へと外部パラ メーター(磁場)を突然変化させ、ポーラーコア量 子渦が自発的に生成されるダイナミックスを観測し た。このトポロジカルな励起はカイラル対称性が自 発的に破れており、また、外部パラメーターを挿引 する時間を変化させることで、発生する渦の数が変 化する。この系は、絶対零度における Kibble-Zurek 機構を研究する格好の舞台を提供している。

## 5.3.3 双極子相互作用する BEC

BEC 研究の最近の大きな成果は<sup>52</sup>Cr BEC の実 現である。この原子は電子スピンが3であり、磁気 的ダイポール相互作用がアルカリ原子に比べて 144 倍も大きく、テンソル力であるダイポール相互作用 がハートリー相互作用に比べてさえ無視できなくな る。実験は強い磁場をかけてスピン偏極した状態で なされているが、外部磁場を減少させることでダイ ポール相互作用によるスピン 軌道間の結合が有効 になり、アインシュタイン・ドハース効果を生じる ものと期待される。アルカリ原子では、ダイポール 相互作用はハートリー相互作用に比べると無視でき るが、スピン交換相互作用に比べると無視できない。 閉じ込めが緩やかなトラップ中では、ダイポー 特に、 ル相互作用は閉じ込めの零点エネルギーと同程度か それよりも大きくなる。したがって、100 mG 程度 の磁場でもスピンテクスチャーがダイポール相互作 用を介して発生することが予想される。

更に、外部磁場をmG以下に抑えることができれ ば、ダイポール相互作用はアルカリ原子において新 たな基底状態を生み出す。例えば、F = 1の $^{87}$ Rb BEC の場合は、ダイポール相互作用を介してスピン テクスチャーが自発的に形成され、それがスピン ゲージ対称性により超流動を生む。図 5.3.2 はこの系 の基底状態を横軸にスピン交換相互作用の強さ、縦 軸にダイポール相互作用の強さをとって示したもの である。ここで、chiral spin vortex 相は、スピンカ イラリティが自発的に破れた相であり、<sup>87</sup>Rb原子の 場合、循環値が最大で 0.4ħ 程度の値をとる。スピン をベクトルとみなせば、この現象は Mermin-Ho テ クスチャーが循環を生んだものと解釈することもで きる。<sup>3</sup>He 超流動との違いは、スピンテクスチャー がハードウォールのような外的要因ではなく、ダイ ポール相互作用という内的要因により自発的に発生 したという点である。



図 5.3.2: 強磁性相互作用するスピノールダイポール BEC の基底状態

<受賞>

[1] 上田正仁: 平成 19 年度文部科学大臣表彰科学技術賞 研究部門 (文部科学省、2007 年 4 月 17 日)  [2] 川口由紀:第2回日本物理学会若手奨励賞(日本物理 学会、2008年3月23日)

#### <報文>

#### (原著論文)

- [3] Y. Kurotani, T. Sagawa, M. Ueda: Upper bound on our knowledge about noncommuting observables for a qubit system, Phys. Rev. A 76, 022325-1–022325-5 (2007).
- [4] H. Saito, Y. Kawaguchi, M. Ueda: Kibble-Zurek mechanism in a quenched ferromagnetic Bose-Einstein condensate, Phys. Rev. A 76, 043613-1– 043613-10 (2007).
- [5] H. Saito, R. G. Hulet, M. Ueda: Stabilization of a Bose-Einstein droplet by hyperfine Rabi oscillations, Phys. Rev. A 76, 053619-1–053619-6 (2007).
- [6] T. Sagawa, M. Ueda: Accuracy matrix in generalized simultaneous measurement of a qubit system Phys. Rev. A 77, 012313-1–012313-14 (2007).
- [7] R. Kanamoto, L. D. Carr, M. Ueda: Topological Winding and Unwinding in Metastable Bose-Einstein Condensates Phys. Rev. Lett. 100, 060401-1–060401-4 (2008).
- [8] T. Sagawa, M. Ueda: Second Law of Thermodynamics with Discrete Quantum Feedback Control Phys. Rev. Lett. 100, 080403-1–080403-4 (2008).
- [9] M. Tezuka, M. Ueda: Density-Matrix Renormalization Group Study of Trapped Imbalanced Fermi Condensates Phys. Rev. Lett. **100**, 110403-1–110403-4 (2008).

(修士論文)

- [10] 沙川貴大: The Uncertainty Relations between Measurement Errors in Simultaneous Measurement of a Qubit System (東京工業大学、修士論文)
- [11] 中島秀太: 強く相互作用する冷却 6Li 原子気体の実験 的研究(東京工業大学、修士論文)

#### (学位論文)

- [12] 戸塚健一郎: 光格子量子コンピュータにおける keygate の理論的考察(東京工業大学、学位論文)
- [13] 藤澤慎介: 量子フィードバックを用いた光子数制御の 理論的研究(東京工業大学、学位論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

[14] M. Tezuka, M. Ueda: Density-matrix renormalization group study of trapped imbalanced Fermi superfluid, Summer School on Novel Quantum Phasesand Non-equilibrium Phenomena in Cold Atomic Gases (Trieste, Italy, September 2007)

- [15] M. Tezuka, M. Ueda: Imbalanced Fermi superfluidity: A density-matrix renormalization groupstudy, 国際シンポジウム「スーパークリーン物質で 実現する新しい量子相の物理」(PSM2007)(長良川 国際会議場、岐阜、2007年10月)
- [16] Y. Kawaguchi, H. Saito, M. Ueda: Novel Phenomena in Spinor Dipolar Bose-Einstein Condensates, 国際シンポジウム「スーパークリーン物質で実現す る新しい量子相の物理」(PSM2007)(長良川国際会 議場、岐阜、2007年10月)

#### 招待講演

- [17] Hiroki Saito, Yuki Kawaguchi, Masahito Ueda: Kibble-Zurek mechanism in a spinor Bose-Einstein condensates, 16th International Laser Physics Workshop (Leon, Mexico, August 2007)
- [18] Masahito Ueda: Fundamentals of Spinor Bose-Einstein Condensates, Summer School on Novel Quantum Phasesand Non-equilibrium Phenomena in Cold Atomic Gases (Trieste, Italy, September 2007)
- [19] Yuki Kawaguchi, Hiroki Saito, Masahito Ueda: Dipolar BEC with spin digrees of freedom, Summer School on Novel Quantum Phasesand Nonequilibrium Phenomena in Cold Atomic Gases (Trieste, Italy, September 2007)
- [20] Masahito Ueda: Some New Directions in Spinor-Dipolar BEC, Bose-Einstein Condensation 2007 Frontiers in Quantum Gases (Sant Feliu, Spain, September 2007)
- [21] Masahito Ueda: Symmetry Breaking in Bose-Einstein Condensates, 国際シンポジウム「スー パークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」 (PSM2007)(長良川国際会議場、岐阜、2007年10 月))
- [22] Masahito Ueda: Symmetry Breaking in Spinor-Diopolar Bose-Einstein Condensates, Bose-Einstein Condensation: modeling, analysis, computation and applications (Singapore, November 2007)

#### (国内会議)

一般講演

- [23] 斎藤弘樹、川口由紀、上田正仁: スピノール BEC の 自発磁化過程、日本物理学会 第 62 回年次大会 (北海 道大学、2007 年 9 月)
- [24] 川口由紀、斎藤弘樹、上田正仁:磁場中のスピノル BECにおけるダイポール相互作用、日本物理学会第 62回年次大会(北海道大学、2007年9月)
- [25] 手塚真樹、上田正仁: 粒子数不均衡なフェルミオン系の超流動:密度行列繰り込み群によるアプローチ、日本物理学会第62回年次大会(北海道大学、2007年9月)

- [26] 沙川貴大、黒谷雄司、上田正仁: Upper bound on our knowledge about noncommuting observables for a Qubit System、粒子数不均衡なフェルミオン系の超 流動:密度行列繰り込み群によるアプローチ、日本物 理学会 第 62 回年次大会(北海道大学、2007 年 9 月)
- [27] 渡辺 優、沙川貴大、上田正仁:測定によって得られる 情報量という観点からの新しい No-cloning 不等式、 日本物理学会 第 62 回年次大会(北海道大学、2007 年 9 月)
- [28] 斎藤弘樹、川口由紀、上田正仁: スピノール BEC に おけるキッブル・ズレック機構、日本物理学会 第 63 回年次大会(近畿大学、大阪、2008 年 3 月)
- [29] 川口由紀、斎藤弘樹、上田正仁: スピン1ポーラー BECにおける結び目構造、日本物理学会第63回年 次大会(近畿大学、大阪、2008年3月)
- [30] 手塚真樹、上田正仁:時間依存 DMRG による BEC 核形成のダイナミクス、日本物理学会第63回年次 大会(近畿大学、大阪、2008年3月)
- [31] 沙川貴大、上田正仁:ケインズ乗数理論と熱力学の アナロジー、日本物理学会第63回年次大会(近畿大 学、大阪、2008年3月)
- [32] 渡辺 優、沙川貴大、上田正仁:量子情報の Qubit 間 伝達の可視化、日本物理学会 第 63 回年次大会(近畿 大学、大阪、2008 年 3 月)

招待講演

- [33] 上田正仁: Spinor-Dipolar Bose-Einstein Condensates、京都大学 21 世紀 COE「物理学の多様性と普 遍性の探求拠点」(京都大学、2007 年 10 月)
- [34] 川口由紀: スピノール・ダイポール BEC の理論的研究、日本物理学会第63回年次大会第2回若手奨励賞受賞記念講演(近畿大学、大阪、2008年3月)

(研究会、セミナー)

- [35] 川口由紀、斎藤弘樹、上田正仁: スピノル BEC にお けるダイポール相互作用、特定領域研究「スーパーク リーン物質で実現する新しい量子相の物理」A03-A04 合同研究会(高野山大学、和歌山、2007年7月)
- [36] 上田正仁: 冷却原子気体の世界、第3回量子情報未来 テーマ開拓研究会(サマースクール)(ホテルサンラ イズ知念、沖縄、2007年8月)
- [37] 沙川貴大、黒谷雄司、上田正仁: Upper bound on our knowledge about noncommuting observables for a qubit system、RIMS 研究集会 - 非可換解析とミク ロ・マクロ双対性化 (京都大学数理解析研究所、京都、 2007 年 10 月)
- [38] 上田正仁: Symmetry Breaking in Spinor-Diopolar Bose-Einstein Condensates、湯川国際セミナー 2007:低次元系の多体相関効果とナノ構造の物理(京 都大学、2007年11月)
- [39] 沙川貴大、上田正仁: キュービット系に対する一般化 された同時測定の精度行列、第17回量子情報技術研 究会(光量子科学研究所、岡山、2007年11月)
- [40] 川口由紀: 原子気体 BEC における位相とコヒーレン ス、物性研短期研究会「短波長コヒーレント光と物質 中のコヒーレンスの生成・消滅」(東京大学物性研究 所、2007 年 11 月)

## 6 一般物理実験

## 6.1 牧島研究室 + 中澤研究室

6.1.1 「すざく」衛星の運用と稼働状況

○ 宇宙X線衛星「すざく」と硬X線検出器 (HXD)

2005年7月10日に打ち上げられた日本5機目の 宇宙X線衛星「すざく」は、搭載されたX線CCDカ メラ(XIS; X-ray Imaging Spectrometer) および硬 X線検出器(HXD, Hard X-ray Detector) とともに、 順調に観測を続けている[72,96,112]。HXDは我々 がJAXA、広島大、埼玉大、理研、金沢大、阪大、 青学大、Stanford 大などと協力して開発した装置で、 撮像機能は持たないが、10-600 keV の広い帯域で世 界最高レベルの感度を実現している。本年度も引き 続き、中澤らを中心として、衛星の運用を支援する とともに、HXD 装置の運用とその軌道上較正に貢献 し[30,73]、また初期試験観測データ、競争的公募で 獲得したデータ、公開データなどの解析を続けた。

◦ HXD-PIN のバックグラウンド

HXD は 10-70 keV の検出素子として 2 mm 厚の シリコン PIN ダイオードを用いる。PIN は BGO シ ンチレータで堅くシールドされているため、優れた 低バックグラウンド特性をもつが、そのカウント数 は地磁気緯度に相関して約 2 倍の変動を示す。北口 らは昨年に引き続き、UC Berkeley、JAXA などと 協力し、モンテカルロツール MGGPOD を用いて解 析を進めた結果、宇宙線が大気に突入して作る中性 子が衛星高度まで逆流し、PIN バックグラウンドの 主因となっている可能性を強めた [59, 69]。これまで の検出器では、荷電粒子やガンマ線によるバックグ ラウンドが高いため、中性子の信号はそれに隠され ていたものと考えられる。

◦ HXD-GSO のエネルギースケール

HXD の PIN 検出器の背後には、GSO 結晶シン チレータが置かれ、PIN を透過した 50-600 keV の 硬X線を検出する。そのゲインはフォトチューブの 特性変化のため、数分 ~ 数年の時間スケールで複雑 に変動する。そこで我々は、バックグラウンドデー タの中の電子陽電子対消滅線 (511 keV) や、結晶が 軌道上で宇宙陽子を浴びて生じた不安定同位体(放 射化同位体)が崩壊する際のガンマ線を用い、時々 刻々の検出器ゲインを較正している。ところが打ち 上げ以来、得られるパルスハイトとエネルギーの関 係が、地上測定と10%ほど食い違い、問題となって いた。山田は修士論文でこの課題に取り組んだ結果、 放射化同位体の崩壊信号は一般に、複数の過程によ るエネルギーデポジットの複合であり、各過程ごと



 $\boxtimes$  6.1.1: Actually measured *Suzaku* HXD-PIN background (solid line), compared with monte-Carlo simulated events induced by protons (crosses) and by neutrons (open circles) [69].

にシンチレータの発光損失があるため、総計のパル スハイトは単純な予想より低くなることを突き止め た[48,97]。この効果を考慮すると、軌道上での較正 は地上較正と良く一致し、図 6.1.2 に示すように、標 準天体である「かに星雲」のシンクロトロン放射ス ペクトルも、標準的なべキ関数で良く再現できる。



 $\boxtimes$  6.1.2: A count-rate spectrum of the Crab Nebula obtained with HXD-GSO onboard *Suzaku*, fitted with a single power-law model using older (filled triangles) and revised (open circles) calibrations [48]. The lower panel shows fit residuals.

#### 6.1.2 銀河系内のX線天体の観測的研究

#### ○ 太陽フレア

太陽フレアは惑星間空間と並んで、最も身近な粒 子加速の現場である。我々は天文台の古徳と協力し、 フレアで加速された電子からの制動放射ガンマ線の スペクトルが、コンプトン散乱で変形される様子を、 モンテカルロ計算により明らかにした [4]。

北口らは、2006年12月5日に起きたクラスX9.0 の強い太陽フレアのさい、太陽ガンマ線を完全にシー ルドできるはずの HXD-PIN 検出器が、強く反応し たことを発見した。これは太陽フレアで加速された 陽子が、ハドロン相互作用で > 500 MeV の中性子 を作り、それらが シールドをすり抜けて HXD 内部 に飛び込み、シリコン中で反跳信号を作り出したも のである可能性が高い [71, 102]。



 $\boxtimes$  6.1.3: Light curves of the X9.0 flare on 2006 December 5, detected in soft X-rays with *GOES* (gray curve) and with HXD-PIN onboard *Suzaku* [102]. Arrows at the top shows day/night information of the spacecraft, and that of the Earth in the HXD field of view.

#### ○ 白色わい星での加速現象

昨年度は埼玉大の寺田らと協力し、「すざく」で観 測した白色わい星 AE Aqr のデータ解析を行ない、 HXD-PIN により 10 keV 以上で非熱的な硬 X線パ ルスの検出に成功した。今年度はその理論的な解釈 を行なった結果、強磁場 (~10<sup>5</sup> G) と高速自転(周 期 33 sec)による誘導電場で、粒子が数十 GeV 以 上にまで加速され、シンクロトロン過程で硬 X線パ ルスを放射している可能性が高いことを突き止めた [3, 12, 62, 87]。結果は 2008 年 1 月 17 日、埼玉大学 にて記者発表された。図 6.1.2 は、宇宙の加速現場で 推定された電子の最高エネルギーを、系の典型的な 速度 v、磁場 B、サイズ L の三重積に対しプロットし たものである。AE Aqr、太陽フレア、かに星雲(図 6.1.2)を含め、美しいスケーリング則が成り立つ。

#### ○ X線パルサー

降着型パルサーは、中性子星に相手の星からガス が降着することでX線を放射し、それらのX線スペ クトル中に現れる電子サイクロトロン共鳴吸収線は、 中性子星の磁場計測の切り札となる。榎戸、牧島ら は降着型パルサー Her X-1 の「すざく」データか ら、既知の~38 keV のサイクロトロン基本共鳴に 加え、その2 倍波の幅広い吸収構造を検出した [29, 35, 75, 88, 110]。スペクトルを図 6.1.5 に示す。表面 磁場は、 $3 \times 10^{12}$  G と計算される。さらに複数の天 体で、吸収構造が同じプロファイルをもつこと、そ れが Gaussian では記述できず、古典的サイクロト ロン共鳴の微分断面積 (Lorentzian× $E^2$ ) で現せるこ と、したがって共鳴幅は熱的ドップラーでは説明し づいらいことを指摘し、誘導放射の可能性を論じた



 $\boxtimes$  6.1.4: An empirical scaling law (by Makishima) for various particle acceleration cites. Observed or estimated maximum electron energies are plotted against vBL, where v, B, and L are a typical velocity, magnetic field, and size of each accelerator.

[29, 56, 57, 98]。HXD 装置の特徴が活かされた成果 といえる。

上田らは、2006 年の Her X-1 の観測中に、X線 が数十分~数時間にわたり繰り返し不規則に弱まる、 dip 現象を検出した。この現象は既知だが、「すざく」 の広帯域(0.3~50 keV)データにより、これが降着 円盤の周辺部にある光電離物質による、X線の吸収・ 散乱に起因することを明らかにし、その柱密度や電 離状態を推定することができた[89,100]。

トランジェントX線パルサー GRO J1008-57 が明 るくなったとの報告を受け、理研の三原らの主導で 2007 年 11 月 30 日、「すざく」による ToO 観測を 行った。その結果、従来から示唆されていた、~80 keV のサイクロトロン吸収構造の徴候を得た。

#### ○ マグネター天体

銀河系内にある10個ほどのX線源は、様々な理由 から、10<sup>14-15</sup> G の超強磁場をもつ特殊な中性子星、 すなわちマグネターと考えられているが、その正体 は謎に包まれている。 榎戸らはその1つ 4U 0142+63 を「すざく」で観測し、HXD-GSO データを駆使した 結果、図 6.1.5 に灰色の破線でスケッチするように、 < 10 keV で卓越する柔かいスペクトル成分に加え、 ~ 300 keV まで光子指数 ~ 1 で延びる、異常に硬い パルスした硬X線を検出することに成功した[58]。そ うした成分の存在はすでに数年前、*INTEGRA*L に より報告されていたが、測定は~150 keV までに限 られていた。この成分の起源は不明だが、超強磁場 中で発生した電子陽電子対が、中性子星の表面に突 入する際の非熱的制動放射かもしれない。スペクト ルは Her X-1 のものと大きく異なるので、この天体 の物理状態が通常の中性子星のものと大きく異なる



 $\boxtimes$  6.1.5: A Suzaku HXD spectrum of the accreting pulsar Her X-1, shown in the  $\nu F \nu$  form [57]. The solid curve shows the estimated continuum, before attenuated/absorbed by cyclotron resonances (arrows). For comparison, an HXD spectrum of the magnetar  $4U\ 0142+63$  is shown in the dashed line [58].

- ことは、疑いない。
- ブラックホール連星

山田、牧島らは、広島大の高橋 [弘] らとの協力し、 「すざく」で観測したブラックホール連星 Cyg X-1 の解析を進めた。スペクトルは 0.6~350 keV (XIS、 HXD-PIN、HXD-GSO)の広帯域にわたり、温度~ 100 keV の熱的電子による2つのコンプトン成分(光 学厚み 0.4 と 1.5)、それらが円盤で反射した成分、そ のさい発生する鉄輝線、およびコンプトン過程の種光 子となる温度 0.2 keV の円盤の熱放射、という5 成分 の和でみごとに再現できた [2, 28, 33, 56, 63, 74]。得 られたモデルを図 6.1.6 に、星間吸収を除いて示す。

速い時間変動にともなう Cyg X-1 の広帯域スペク トルの変化を調べたところ、~1秒の時間スケール でX線が強くなるさいは、種光子の注入数が増える 一方で、逆コンプトン連続成分は柔らかくなること を発見した。よって冷たい円盤を覆う熱いコロナに、 多数の穴が開き、円盤の一部分が直接に見えており、 その開口率が変化していると解釈できる。開口率が 減ると、コンプトン信号の強度は増加するが、コロ ナは冷却により低温になり、硬X線スペクトルが軟 かくなると想像される [2, 63, 74]。

○銀河系に付随するディフューズX線放射

湯浅らは昨年度に続き「すざく」を用いた銀河系 ディフューズX線の研究を進め、銀河中心を含む銀 経 ±1.°5 銀緯 ±0.°5 の領域から、高温の熱的放射に 加え、HXD-PIN 検出器により、光子指数 2~3の 非熱的な広がった放射を検出した [26, 36, 70, 76]。 そのスペクトルは 10~40 keV の帯域で緩く折れ曲 がるので、白色わい星など、高温の熱的点源の集合 という解釈は捨て切れない。しかし銀河中心付近に ある濃い星間ガスによるX線の部分吸収を考えると、 加速された電子からのディフューズな非熱的放射と いう可能性も許される。図 6.1.7 に示すように、銀経 方向の硬X線の表面輝度分布は、「あすか」で測定し た電離鉄輝線の輝度分布とほぼ一致する [26]。より



一般物理実験

6

 $\boxtimes$  6.1.6: A double-Compton spectral model for the accreting black hole Cyg X-1, specified by the Suzaku data [2]. It is presented in the  $\nu F \nu$  form, after removing interstellar absorption. Individual components are specified in the figure.

詳細な情報を得るため、今年度も「すざく」チーム 内の広い協力により、銀河面に沿ったマッピング観 測が進んでいる[70]。

2005年に岡田らが着手した、球状星団に付随する 広がったX線放射の研究は、論文に掲載された [5]。 これは球状星団が銀河系ハロー内を運動するさい、 衝撃波で電子が加速され、おもに非熱的制動放射で 硬X線が放射される現象と考えられ、測定結果は図 6.1.2のスケーリングに良く乗る。代表的な天体であ る 47 Tuc は、湯浅を PI として「すざく」により観 測され、データ解析を進めている。



 $\boxtimes$  6.1.7: The galactic longitude distributions of the the 12-40 keV PIN count rates, obtained after subtracting backgrounds and the contributions from bright point sources [26]. The solid curve shows the 6.7 keV Fe line intensity distribution measured with ASCA GIS, convolved with the PIN angular response which is shown by a dashed triangle

#### 銀河系外のX線天体の観測的研究 6.1.3

#### ○ ULX 天体

今年度も、近傍銀河にに見られる超大光度×線天体 (ULX)の研究に取り組んだ [25, 31, 33, 45, 56, 77]。 宮脇は博士論文として、「すざく」、XMM Newton な どで観測された、約 10 個の ULX 天体を統一的に解 析した結果、図 6.1.8 に示す「カラー・カラー図」を えた [46]。天体ごとに、観測された (もしくは適当に 推定された)最大光度 L<sub>c</sub> を定義し、それで各時期で の光度を規格化すると、天体によらず、共通の軌跡 (図の灰色矢印) に沿ってスペクトルが変化する。

宮脇による詳しいスペクトル解析から、ULX の光 度が  $(0.6 \sim 1)L_c$  では、ブラックホール連星でいう 「スリム円盤状態」、 $(0.2 \sim 0.4)L_c$  の時はブラック ホール連星の「Very High 状態」、そして <  $0.1L_c$ ではブラックホール連星の High/Soft 状態に、ぞれ ぞれ良く似たスペクトルを示すことも明らかになっ た [46]。したがって  $L_c$  は近似的に Eddington 光度 と見なせ、ULX は Eddington 限界を大きく超えて はいないと結論される。これにより、ULX は数十~ 数百  $M_{\odot}$  の質量をもつ「中質量ブラックホール」で ある可能性が、一段と強まった。以上の結果は < 10 keV のバンドで得たものであるが、M82 X-1 と呼 ばれる ULX (図の灰色四角) からは、HXD-PIN で ~ 25 keV まで硬 X 線を検出することに成功した。



☑ 6.1.8: A color-color plot for 8 ULXs, observed with Suzaku and XMM-Newton. Count rate ratios between the 4–10 keV to 2–4 keV bands are plotted against those between 2–4 keV to 1–2 keV [46]. On this plot, the data points can be grouped according to the luminosity, normalized to  $L_c$ , that is the observed or estimated maximum luminosity of each source. Thick gray arrows indicate a common luminosity evolution locus.

#### ○ 活動銀河核 (AGN)

銀河の中心にある巨大  $(10^{6-9} M_{\odot})$  ブラックホー ルにガスが降着すると、活動銀河核 (AGN) となる。 セイファート銀河と呼ばれる天体たちはその代表で、 その中でも降着円盤に沿った角度から観測している ため、AGN のX線が降着物質で強い吸収を受けるも のを、2型セイファート銀河と呼ぶ [23]。 伊藤は博士論文の課題として、「すざく」で観測した5つの2型セイファート銀河(自ら観測提案したものを含む)の、XIS、HXD-PIN、HXD-GSOデータを統一的に解析した。スペクトルと時間変動を合わせて考えた結果、どの天体でも図 6.1.9 のように、検出されたX線スペクトルを複数の成分に分解することに成功した [47]。それらは;(i) AGN からの直接X線が吸収体で光電吸収を受け、低エネルギー側で減衰しつつ突き抜けてきた直接成分(図のD);(ii) X線が周囲の物質に当たってトムソン散乱などを受けた「反射」成分(図のR);(iii)高電離ガスにより、スペクトルの形を変えず散乱された成分(図のS)、(iv)反射や散乱に伴う輝線、などである。

この研究の結果、NGC 4945 などX線光度が低め の2天体では、Mkn 3 など他の3天体に比べ、(ii) の割合がひじょうに小さく、したがって降着物質は AGN から見て、大きな立体角を持ちえないことがわ かった [24, 47]。これは、「AGN に降着する物質は 厚いトーラスの形状をもつ」という通念に、大きな 変更を迫る結果である。さらに伊藤は、吸収体がひ じょうに厚くなった場合、その内部で散乱を繰り返 して観測者に到達する、"scatter-in"成分を考える 必要があることを見出した。

上原らは、「すざく」で長期観測した1型セイファート銀河 MCG-6-30-15 のデータで、反射成分が連続成分の変動にどう追従するか調べている。1日弱の時間スケールでは、連続成分が変動しても反射成分は追従した変動を示さないが、数日以上の時間スケールでは、反射成分も変動し始めることがわかった [91,99]。よって反射体は AGN から見て、Schwarzschild 半径の~ $10^3$ 倍の距離にあると推測される。

#### ○ 銀河群および銀河団からの硬 X 線

銀河団や銀河群の銀河間空間には、大量の高温プ ラズマ(Intra-cluster matter: ICM)が重力的に閉じ 込められ、強いディフューズX線を放射している。今 年度は中澤、北口、奥山らを中心に、理研や広島大 などと協力し、「すざく」を用いて銀河団からの硬X 線を探査した。我々はすでに「あすか」を用い、銀 河群から非熱的放射を検出しており[7]、銀河間空 間での粒子加速が、大きな興味の対象である。「すざ く」のデータ解析を通じ、以下の3つの重要な結果 を得た。

まずケンタウルス座銀河団、Abell 1060 [6, 43] な どの緩和した銀河団では、HXD-PIN で検出される 10-30 keV の信号は、10 keV 以下で卓越する熱的放 射の裾として理解でき、それを有意に超過する硬 X 線は検出されなかった [66, 94]。また ICM には、音 速を大きく超えるようなバルク運動はない [38]。よっ てこれらの銀河団では、プラズマの温度低下が顕著 な中心部を除けば、ほぼ等温のプラズマが、重力場 の中で静水圧平衡にあると見なしてよい。

次に、かみのけ座銀河団、Abell 3376 など、非熱的 放射が期待されるいくつかの銀河団や銀河群を観測 したが、どれからも有意な非熱的な硬 X 線成分は検出 されなかった。得られた上限値は、従来 BeppoSAX 衛星が主張していた信号レベルと同程度か、やや厳 し目である。ただし、視野が狭いことから、より特定 された領域ごとの上限を得ている [37, 41, 44, 61]。電


 $\boxtimes$  6.1.9: Suzaku spectra (in the  $\nu F\nu$  form) of the two Seyfert 2 galaxies, fitted with an absorbed direct component (denoted D), that reflected by cold materials (denoted R), and that scattered by highly ionized media (denoted S) [47].

波ハローをもつ銀河団の場合、シンクロトロン電波 の強度と、この逆コンプトン硬X線の上限値とから、 磁場は典型的に  $0.2 \sim 0.5 \mu$ G 以上と求まる。これは ファラデー回転などの測定値と矛盾せず、BeppoSAXの「検出」から言われていた、異常に弱い磁場の問 題は、解消したと言える。

最後に、強い電波ハローをもつ合体型銀河団 Abell 3667からは図 6.1.10のように、硬X線で明らかな超 過信号が検出された [60, 93, 95, 101]。それはスペ クトルの形から、非熱的放射ではなく、温度 15~30 keV の「超高温」な熱的放射と考えられ、10 keV 以 下で検出される通常の熱的成分に匹敵する大きなX 線光度をもつ。銀河団の合体に伴い、磁場増幅など を通じて一部のプラズマが選択的に加熱され、さら に磁場により熱伝導が抑制されることで、生成され た超高温プラズマが長時間にわたり高温を保ってい るのかもしれない。とすれば我々は、銀河団プラズマ 中で、大規模な磁気流体的なエネルギーの非等分配、 構造形成などを目撃し始めた可能性がある [78, 83]。

# 6.1.4 雷雲からのガンマ線の観測

我々は昨年度、宇宙での電場加速の手掛かりを得 るため、榎戸らを中心に理研と協力し、また新潟県 柏崎刈羽原子力発電所の協力も得て、冬期雷雲から のガンマ線を探査する実験を開始した。その結果、み



☑ 6.1.10: A Suzaku  $\nu F\nu$  spectrum of the clusters of galaxies Abell 3667 [60, 101]. In addition to the ~ 7 keV thermal emission dominating the energies below 10 keV, a very hot component has been newly discovered with the Suzaku HXD.

ごと 2007 年1月7日に、約40秒にわたるガンマ線 放射を検出することに成功した[8,67,79,84,106]。 結果は予想を大きく上回る反響を呼び、関連分野で 講演を行ったほか[67,109,111]、結果は2007年10 月5日、文科省記者クラブにて、東大と理研の共催 で記者発表を行なった。

今年度も、昨年度とほぼ同様な形で、12月より刈 羽原発の構内にて、自動運転による観測を行なって いたところ、2007年12月14日の日本時間01:00ご ろ、ふたたびガンマ線の増大イベントを捉えること に成功した。今回は前回よりやや長い約60秒の継続 時間をもつ。さらに図6.1.11に示すように、増大前 後の環境放射線バックグラウンドのスペクトル(点 線)が典型的に3 MeV 以下に限られ、またライン構 造があるのに対し、雷雲ガンマ線のスペクトル(黒 点)には顕著なラインは見られず、10 MeV 近くま で伸びる。また今回は前回と異なり、この増大の前 後に落雷は検知されなかった。したがってこうした ガンマ線放射は、落雷に伴うものではなく、雷雲の 中で準静的に、もしくは過渡的に、電子が静電場に より加速されていることを示唆する。

#### **6.1.5** NeXT 衛星計画

#### NeXT 衛星とその搭載装置

NeXT (New Exploration X-ray Telescope) は、 「すざく」の後継機として、2013 年の打ち上げを目 ざし、日本の宇宙X線研究グループが総力を挙げて 計画中のJAXA 科学衛星である。日本のX線衛星は 「はくちょう」から「すざく」まで、従来すべて固体 ミューロケットで内之浦より打ち上げられたが、同 ロケットシリーズの終焉に伴い、NeXT は HIIA ロ ケットで種子島から打ち上げられる。

NeXTは、名古屋大学を中心に開発中の「多層膜 スーパーミラー」により、80 keV までの集光撮像 観測を行なうとともに、「すざく」で不具合のため実



 $\boxtimes$  6.1.11: A second event of gamma-ray detection from thunderclouds, recorded on 2007 December 14 at the Kashiwazaki-Kariwa nuclear plant. Data points in solid lines represent background-subtracted signals during the enhancement event, whereas those with dashed lines illustrate the background.

現できなかった、極低温カロリメータ検出器による、 高分解能の分光観測を行なうもので、2010年代の高 エネルギー宇宙観測を、世界的にリードする野心的 な計画である。我々は、「すざく」HXD 装置の開発 体制の流れを汲んで、JAXA、広島大、埼玉大、ス タンフォード大などと協力し、スーパーミラーの焦 点面に置かれる硬X線撮像検出器 HXI、およびコン プトン運動学を用いた軟ガンマ線検出器 SGD の開 発を担当するほか、衛星機内バスとして、スペース ワイヤの開発なども支援する。中澤は、HXI 装置の Co-PI (PI は JAXA 国分准教授)を務める。

今年度、NeXTはJAXAの内部措置により、「前 プロジェクト」(あるいはphase A)として認定され、 日米の多数の参加機関を糾合して、多様な角度から、 衛星と搭載装置の概念設計、リスク検討、開発体制 の整備、内部審査、外部評価などを行なった。牧島 は京大・小山教授とともに、ミッションアドバイザー の役を務めた。NeXTは2008年6月、JAXAの内部 審査を経て、国家予算の裏付けをもつ制式プロジェ クト (phase B)としての発足を目指している。

#### ◦ HXI 装置と SGD 装置

HXIは、7分四方の視野を持ち、80 keV までの硬 X 線を1分精度で撮像し、同時に 1.5 keV 精度で分 光する検出器である。3.2 cm 四方の DSSD と CdTe イメージャを重ね、厚さ 4 cm の BGO シンチレー タシールドで囲んでおり、10-80 keV の帯域でこれ までよりも 2 桁近く優れた検出感度を実現する。

SGD は、8-9 台の半導体コンプトンカメラを、同 じく4 cm 厚さの BGO シールドで囲む、「狭視野の 半導体コンプトンカメラ」という新しい概念の検出 器であり、600 keV 程度までの帯域で、1 桁優れた感 度の実現を図る。1 台のコンプトンカメラは、5 cm 四方のシリコンイメージャを 24-32 層重ね、CdTe イ メージャで囲むもので、コンプトン運動学により数 度の精度でガンマ線の入射方向を知る。これにより、 視野方向以外の信号をバックグラウンドと判定する ことができる。多層半導体検出器を用いることで、1 回ずつの散乱と吸収の場合だけでなく、3回以上散 乱を起こした場合でも、入射方向と元のエネルギー を導出できるというアイデアは、1980年代に釜江教 授らが世界で始めて提唱した概念であり、半導体多 層コンプトンカメラの技術は、当研究室にも関係が 深い。

2007 年度は、概念設計を進める (phase-A) 期間で あり、検出器の基礎設計を進めた。具体的にはシール ドの厚さや視野サイズと、構造や重量のトレードオ フ検証をし、衛星設計に取り込んだ。要素技術の開 発を進めるとともに、宇宙線による放射化など、バッ クグラウンドレベルを推定し、硬 X 線、ガンマ線に 対する検出効率を計算するライブラリを構築し、デ ザイン変更にあたって、感度を決定づけるパラメー タの検証を進めている。今後は、2008 年中に、大ま かなデザインを決定して重量、電力を確定し、2009 年中にプロトタイプを制作する。2010 年からは、衛 星搭載装置(フライト品)の制作を開始する予定で ある。

牧島/中澤研では、中澤、奥山、湯浅らが、JAXA、 広島大、スタンフォードなどのグループとともに、こ れらの装置のための両面シリコンストリップ検出器 (DSSD)や、テルル化カドミウム(CdTe)イメージャ 検出器の開発を続けている[14, 15, 16, 17, 21]。

#### ○ スペースワイヤ (SpaceWire)の開発

SpaceWire とは、人工衛星の機内情報網を、柔軟 性を保ちつつ統一規格化するため開発されたデータ 通信 I/F 規格であり、NeXT衛星へも全面的な採用が 決まっている。いまや日本(と欧州)の科学衛星の搭 載機器は、SpaceWire で通信することが標準となって いる。インテリジェントなノードとして、TRON を OS とした、Space Cube と呼ばれる規格の小型コン ピュータを用い、Remote Memory Access Protocol にもとづきデータ転送を行う。すでに日、米、欧の 衛星内部バスとして採用されつつあり、NeXTもこ れを用いる。日本では、JAXA 高橋教授や阪大・能 町教授の主導の下、大小企業を糾合した「スペース ワイヤユーザー会」を組織し、開発と普及を進めて いる。

湯浅は修士論文で、SpaceWire バスと各機器との 接続を受け持つ、標準インタフェース基板の開発体 制を整備し、各ユーザーが自分の用途に合ったインタ フェース基板を開発するさいに利用できるよう、各種 の支援ファームウェアや支援ソフトウェアを開発した。 またその一例として、8チャンネル入力の、デジタル 波形取得型 AD 変換ボードを企業と共同開発し、市販 ADC と同等の性能を達成するとともに、サンプリン グレートが遅く波形情報が間引かれた場合も、テンプ レート波形との相互相関により、パルス高や到着時間 の情報を回生できることを示した [49, 68, 105, 114]。 図 6.1.12 に、このボードの写真を示す。この業績で 湯浅は、理学系研究科研究奨励賞を受賞した [1]。

○ 両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) の開発

奥山らは、JAXA と協力して *NeXT* HXI 検出器へ の搭載に向けた、DSSD の開発を進めている。2007 年度は、DSSD の p 面と n 面を、130 V 以上の電位 差をつけてフローティングで読み出す試験を進めて



 $\boxtimes$  6.1.12: A photograph of an 8-channel ADC board, which exemplifies "standard SpaceWire interface boards" [49]. Two square objects are FPGAs (Xilinx Spartan-3); one handles the standard SpaceWire I/F, while the other is user-alterable. The connector at the bottom left provides connection to the SpaceWire bus.

いる。具体的には、各面の読み出しシステム全体のグ ラウンドレベルを浮かせ、フローティングの DCDC コンバータを使って給電し、電磁カプラを用いてデー タ通信するが、とくに、4 層の DSSD 検出器を制作 し、各層の接続の安定性を評価した。評価の結果、4 層の DSSD を正しく動作できること、ただし、温度 を変えたときに接続不良になるピンが現れる場合が あることが分かった。ピンを1 層に制限すれば、問 題なく読み出せることも確認され、検出器システム 全体ではなく、ピンの改良を進めることが鍵を握る と確認された。[17, 14, 92, 103]。

この装置を、CdTe ピクセル検出器システムと組 み合せ、Si/CdTe コンプトンカメラを構成し、放射 性同位体を注入したサンプルに対して撮像分光実験 を行った。詳しくは 2008 年度出版予定の論文発表 を待ってから報告するが、高い位置分解能とエネル ギー分解能を示し、次世代イメージャとして有望な システムであることを示した。

○ BGO 結晶シンチレータの開発

HXI、SGD ともに、シールド部には BGO シンチ レータを用いる。2007 年度は、上原らがこの評価用 結晶を用いて、候補となる低コストの BGO につい て内在放射能を評価した。「すざく」衛星 HXD 検 出器で用いられていた BGO 結晶と比較して、内在 放射能がやや多いことが示唆されたが、結晶の外へ 放射されるガンマ線は非常に少ないことが分かった。 このため、5-80 keV 帯域を担当する HXI のシール ドとしては問題ない。600 keV までのより高いエネ ルギー帯域で、より低いバックグラウンドが要求さ れる SGD のシールドとして有効かどうかについて は、今後の評価の結果を待つ必要がある。 6.1.6 小型衛星計画への参加

 
 ・ 雷観測衛星 Sprite-SAT における雷雲ガンマ線検 出器

Sprite-SAT は、東北大学が中心となって開発を進めているミニ衛星であり、H2-A ロケット搭載のピギーバック衛星として、2008 年度の打ち上げが予定されている。本衛星は、雷雲から電離層に向かって走るスプライト発光現象と、軌道上で CGRO 衛星 BAT 検出器や、RHESSI 衛星で確認された、ミリ秒という短時間のガンマ線放射の関係を探るためのものである。牧島 / 中澤研究室では、榎戸、上田、中澤らが、JAXA のグループとともに、この衛星の主検出器の一つである、地球ガンマ線カウンタ (TGC)の開発、評価を行っている。

装置は、合計 8 つの小さな CsI 結晶を APD で読 み、4 段階のコンパレータを用いて、ライトカーブ を得るもので、全体で 2.4 kg、0.7 W と非常にコン パクトなものである。装置は 500 µs 刻みでライト カーブを得て、ガンマ線フラッシュの信号を受ける と、前後あわせて 0.5 s のデータを保存する。また これとは別に、30 秒刻みで積分ライトカーブを得て おり、簡単な宇宙ガンマ線モニターとして使用する。 APD とプリアンプ、高圧電源などは、NeXT などの 次世代衛星で使用する予定のもののブレッドボード モデルの宇宙実証を兼ねており、技術的にも重要な システムである。また、NeXT という本格的な衛星 ミッションを実行する前に、スタッフおよび学生の 経験を積む上でも非常に貴重な機会である。

2007 年度は、部品の手配から始まり、単体評価、 組上げ、ゲイン調整、環境試験を実施した。特に衛 星側の設計の特性から、打ち上げ時の振動条件が非 常に厳しく、多くの開発努力が払われている。また、 ミニ衛星であるために、温度環境の変化もある程度 予想されるため、-15°Cから+25°Cまでの広い範 囲で、特性評価をしている。2008 年度の打ち上げへ 向けて、いくつかの課題を解決しつつ、順調に開発 を進めている。

#### ○ 技術実証衛星1号機 SDS-1 における重力波検出器

東大坪野研と企業によって開発が進められてきた、 「SpaceWire 試験モジュール (SpaceWire Interface demonstration Module; SWIM)」は、日本初の SpaceWire の宇宙実証試験品であり、技術実証衛星1号機 (SDS-1) に搭載され、HIIA ロケットによる実用衛星のピ ギーバックとして、2008年度内に打ち上げが予定さ れている。SWIM 内には、インテリジェントなノード として宇宙仕様の SpaceCube が、また科学ミッショ ン機器ノードとして SWIMµv が搭載されている。 後者は、磁気浮上させたテストマスの振動を、LED と光センサで測定する、ねじれ型の重力波検出器で、 測定データを SpaceWire 経由で転送する。中澤、湯 浅らは坪野研と協力し、SWIM および SWIM $\mu\nu$  の 開発・試験に参加し、機上で SpaceWire/RMAP に よるデータ通信を行うための SpaceCube 用ソフトウ エアの開発、環境試験(振動・熱真空)などに貢献し た [80, 108]。この開発で蓄積された SpaceWire の技 術やソフトウエアは、NeXT を含めた将来衛星の開

発にも、資するところが大きい。

<【受賞】>

[1] 湯浅孝行、第2回理学系研究科研究奨励賞・修士の部 (2008 年 3 月)

```
(原著論文)
```

- [2] Makishima, K., Takahashi, H., Yamada, S., Done, C., Kubota, A., Dotani, T., Ebisawa, K., Itoh, T., Kitamot, S., Negoro, H., Ueda, Y., & Yamaoka, K.: "Suzaku Results on Cygnus X-1 in the Low/Hard State", *Publ. Astr. Soc. Japan* **60**, in press (2008)
- [3] Terada, Y., Hayashi, T., Ishida, M., Mukai, K., Dotani, T., Okada, S., Nakamura, R., Naik, S., Bamba, A., & Makishima, K.: "Suzaku Discovery of Hard X-ray Pulsations from AE Aquarii", *Publ. Astr. Soc. Japan* **60**, in press (2008)
- [4] Kotoku, J., Makishima, K., Matsumoto, Y., Kohama, M., Terada, Y., & Tamagawa, T.: "Effects of Compton scattering on the Gamma Ray Spectra of Solar flares", *Publ. Astr. Soc. Japan* 59, 1161-1174 (2007)
- [5] Okada, Y., Kokubun, M., Yuasa, T., & Makishima, K.: "Chandra Detections of Diffuse X-ray Emission From Globular Clusters", *Publ. Astr. Soc. Japan* 59, 727-742 (2007)
- [6] Sato, K., (5 名), Kitaguchi, T., Kawaharada, M., Kokubun, M., Makishima, K., Ota, N., Nakazawa, K., (6 名): "X-Ray Study of Temperature and Abundance Profiles of the Cluster of Galaxies Abell 1060 with Suzaku", *Publ. Astr. Soc. Japan* 59, 299-317 (2007)
- [7] Nakazawa, K., Makishima, K., & Fukazawa, Y.: "Hard X-Ray Properties of Groups of Galaxies as Observed with ASCA", *Publ. Astr. Soc. Japan* 59, 167-183 (2007)
- [8] Tsuchiya, H., Enoto, T., Yamada, S., Yuasa, T., Kawaharada, M., Kitaguchi, T., Kokubun, M., Kato, H., Okano, M., Nakamura, S., & Makishima, K.: "Detection of High-Energy Gamma Rays from Winter Thunderclouds", *Phys. Rev. Lett.* **99**, id. 165002
- [9] Naik, S., Dotani, T., Terada, Y., Nakajima, M., Mihara, T., Suzuki, M., Makishima, K., Sudoh, K., Kitamoto, S., Nagase, F., Enoto, T., & Takahashi, H.: "Broadband X-Ray Spectroscopy of A0535+262 with Suzaku", Astrophys. J. 672, 516-523 (2008)
- [10] Markowitz, A., Takahashi, T., Watanabe, S., Nakazawa, K., Fukazawa, Y., Kokubun, M., Makishima, K., (12 名): "The Suzaku Observation of the Nucleus of the Radio-loud Active Galaxy Centaurus A", Astrophys. J. 672, 209-224 (2008)

- [11] Tsuchiya, H., Miyasaka, H., Takahashi, E., Shimoda, S., Yamada, Y., Kondo, I., Makishima, K., Zhu, F., Tan, Y., (5 名): "Upper Limits on the Solar-Neutron Flux at the Yangbajing Neutron Monitor from BATSE-Detected Solar Flares", Astron. Astrophys. 468, 1089-1097(2007)
- [12] Terada, Y., Ishida, M., Mukai, K., Dotani, T., Makishima, K., Naik, S., Hayashi, T., Okada, S., Nakamura, R., & Enoto, T.: "Possible Suzaku detection of non-thermal X-ray signals from a rotating magnetized white dwarf", *Adv. Space Res.* **41**, 512-517 (2008)
- [13] Kishishita, T., Ikeda, H., Kiyuna, T., Tamura, K., Nakazawa, K., & Takahashi, T.: "Development of a Low-Noise Analog Front-End ASIC for CdTe Detectors", *Nucl. Inst. Meth. A.* 580, 1363-1371 (2007)
- [14] Nakazawa, K., Takeda, S., Tanaka, T., Takahashi, T., Watanabe, S., Fukazawa, Y., Sawamoto, N., Tajima, H., Itoh, T., & Kokubun, M., "A high-Energy Resolution 4 cm-Wide Double-Sided Silicon Strip Detector", *Nucl. Inst. Meth. A.* 573, 44-37 (2007)
- [15] Odaka, H., Takeda, S., Watanabe, S., Ishikawa, S., Ushio, M., Tanaka, T., Nakazawa, K., Takahashi, T., Tajima, H., & Fukazawa, Y.: "Performance Study of Si/CdTe Semiconductor Compton Telescopes with Monte Carlo Simulation", *Nucl. Inst. Meth. A.* 579, 878-885 (2007)
- [16] Watanabe, S., Takeda, S., Ishikawa, S., Odaka, H., Ushio, M., Tanaka, T., Nakazawa, (4 名): "Development of Semiconductor Imaging Detectors for a Si/CdTe Compton Camera", Nucl. Inst. Meth. A. 579, 871-877 (2007)
- [17] Takeda, S., Watanabe, S., Tanaka, T., Nakazawa, K., Takahashi, T., Fukazawa, Y., Yasuda, H., Tajima, H., Kuroda, Y., Onishi, M., & Genba, K.: "Development of Double-Sided Silicon Strip Detectors (DSSD) for a Compton Telescope", *Nucl. Inst. Meth. A.* 579, 859-865 (2007)
- [18] Itoh, T., Yanagida, T., Kokubun, M., Sato, M., Miyawaki, R., Makishima, K., Takashima, T., Tanaka, T., Nakazawa, K., Takahashi, T., Shimura, N., & Ishibashi, H.: "A 1-Dimensional γ-ray Position Sensor based on GSO:Ce Scintillators Coupled to a Si Strip Detector ", Nucl. Inst. Meth. A. 579, 239-242 (2007)
- [19] Yanagida, T., Itoh, T., Takahashi, H., Hirakuri, S., Kokubun, M., Makishima, K., Sato, M., Enoto, T., Nakazawa, K., Takahashi, T., (2 名).: "Improvement of Ceramic YAG(Ce) Scintillators to (YGd)3Al5O12(Ce) for Gamma-Ray Detectors", *Nuc. Instr. Meth. A.* 579, 23-26 (2007)
- [20] Kishishita, T., Ikeda, Hirokazu, Tamura, K., Hiruta, T., Nakazawa, K., Takashima, T., & Takahashi, T.: "Initial Performance of the

<sup>&</sup>lt;【報文】>

Two-Dimensional 1024-Channel Amplifier Array", Nucl. Inst. Meth. A. 578, 218-225 (2007)

[21] Watanabe, S., Ishikawa, S., Takeda, S., Odaka, H., Tanaka, T., Takahashi, T., Nakazawa, M. Yamazato, A. Higa, S. Kaneku, "New CdTe Pixel Gamma-Ray Detector with Pixelated Al Schottky Anodes" Japan J. Appl. Phys., 46, 6043 (2007)

Publ. Astr. Soc. Japan 60,「すざく」第2特集号

- [22] Tokoi, K., Sato, K., Ishisaki, Y., Ohashi, T., Yamasaki, N. Y., Nakazawa, K., Matsushita, K., Fukazawa, Y., Hoshino, A., Tamura, T., Egawa, C., Kawano, N., (5 名): "Suzaku Observation of HCG 62: Temperature, Abundance, and Extended Hard X-Ray Emission Profiles", S317–S332
- [23] Awaki, H., Anabuki, N., Fukazawa, Y., Gallo, L. C., Ikeda, S., Isobe, N., Itoh, T., Kunieda, H., Makishima, K., Markowitz, A., (8 名): "Wide-Band Spectroscopy of the Compton Thick Seyfert2 Galaxy Markarian 3 with Suzaku", S293–S306
- [24] Itoh, T., Done, C., Makishima, K., Madejski, G., Awaki, H., Gandhi, P., Isobe, N., Dewangan, G. C., Griffthis, R. E., Anabuki, N., Okajima, T., (5 名): "Suzaku Wide-Band X-Ray Spectroscopy of the Seyfert2 AGN in NGC 4945", S251–S262
- [25] Isobe, N., Kubota, A., Makishima, K., Ghi, P., Griffiths, R. E., Dewangan, G. C., Itoh, T., & Mizuno, T.: "Discovery of a Bright Transient Ultraluminous X-Ray Source, Suzaku J1305–4931 in NGC 4945", S241–S250
- [26] Yuasa, T., Tamura, K., Nakazawa, K., Kokubun, M., Makishima, K., Bamba, A., Maeda, Y., Takahashi, T., Ebisawa, K., Senda, A., Hyodo, Y., Tsuru, T. G., Koyama, K., Yamauchi, S., & Takahashi, H.: "Suzaku Detection of Extended/Diffuse Hard X-Ray Emission from the Galactic Center", S207–S222
- [27] Takahashi, T., Tanaka, T., Uchiyama, Y., Hiraga, J. S., Nakazawa, K., Watanabe, S., Bamba, A., Hughes, J. P., Katagiri, H., (7 名): "Measuring the Broad-Band X-Ray Spectrum from 400eV to 40keV in the Southwest Part of the Supernova Remnant RXJ1713.7?3946", S131–S140
- [28] Takahashi, H., Fukazawa, Y., Mizuno, T., Hirasawa, A., Kitamoto, S., Sudoh, K., Ogita, T., Kubota, A., Makishima, K., Itoh, T., Parmar, A., (15 名): "Low/Hard State Spectra of GRO J1655?40 Observed with Suzaku", S69–S84
- [29] Enoto, T., Makishima, K., Terada, Y., Mihara, T., Nakazawa, K., Ueda, T., Dotani, T., Kokubun, M., Nagase, F., Naik, S., Suzuki, M., Nakajima, M., & Takahashi, H.: "Suzaku Observations of Hercules X-1: Measurements of the Two Cyclotron Harmonics", S57–S68
- [30] Terada, Y., Enoto, T., Miyawaki, R., (7 名), Kamae, T., Kawaharada, M., Kokubun, M., Kuroda,

Y., Makishima, K., Masukawa, K., Mizuno, T., Murakami, T., Nakazawa, K., (11 名): "In-Orbit Timing Calibration of the Hard X-Ray Detector on Board Suzaku", S25–S34

#### (会議収録)

- The Extreme Universe in the Suzaku Era, Prog. Theor. Phys. Suppl. No. 169, ed. K. hayashida, T. Tsuru, & K. Koyama (Nov. 2007)
- [31] Mizuno, T., Miyawaki, R., Ebisawa, K., Kubota, A., Miyamoto, M., Winter, L., Ueda, Y., Isobe, N., Makishima, K.: Suzaku Observation of Two Ultraluminous X-Ray Sources in NGC1313", pp. 229-233
- [32] Kubota, A., Dotani, T., Cottam, J., Kotani, T., Done, C., Ueda, Y., Fabian, A. C., Yasuda, T., Takahashi, H., Fukazawa, Y.,Yamaoka, K., Makishima, K., Yamada, S., (2名).: "Suzaku Discovery of Absorption Lines from the Black Hole Transient 4U1630-472", pp. 225-228
- [33] Makishima, K.: "X-ray Study on Stellar/ Intermediate Mass Black Holes", pp.214-220
- [34] Takahashi, T., Tanaka, T., Uchiyama, Y., Hiraga, J. S., Nakazawa, K., Watanabe, S., Bamba, A, (9 名): "Suzaku Observation of TeV SNR RX J1713.7-3946", pp. 157-161
- [35] Mihara, T., Terada, Y., Nakajima, M., Suzuki, M., Enoto, T., Makishima, K., Nagase, F., & Sudoh, K., "Cyclotron Observations of Binary X-Ray Pulsars", pp. 191-195
- [36] Kokubun, M., Yuasa, T., Tamura, K., Makishima, K., Takahashi, T., Nakazawa, K., Yamasaki, N. Y., (12 名): "Hard X-Ray Investigation of the Galactic Center Region with Suzaku", pp.109-112
- [37] Nakazawa, K., Kawano, N., Fukazawa, Y., Egawa, C., Kitaguchi, T., Kawaharada, M., Makishima, K., Ota, N., Tokoi, K.,(4 名): "Suzaku Survey for Non-Thermal Hard X-Ray Emission from Clusters of Galaxies", pp. 45-48
- [38] Ota, N., Fukazawa, Y., Fabian, A. C., Kanemaru, T., Kawaharada, M., Kawano, N., Kelley, R. L., Kitaguchi, T., Makishima, K., Matsushita, K., Murase, K., Nakazawa, K., (4 名): "Absence of Bulk Motions of the Intracluster Medium in the Centaurus Cluster", pp. 25-28
- [39] Bautz, M., Miller, E., Arnaud, K., Porter, S., Hayashida, K., Henry, P., Hughes, J. P., Kawaharada, M., Makishima, K., Sato, K., Sanders, J., & Tamura, T.: "Suzaku Observations of Abell 1795: Cluster Emission to r<sub>200</sub>", pp. 20-24

#### その他の会議収録

[40] "Suzaku Observations of Low-Mass X-ray Binaries at High Mass-Accretion Rates", International Conference on Astrophysics of Compact Objects (AIP Conf. Proc. 968), pp. 322-324 (2008)

- [41] Kawano, N., Fukazawa, Y., & Nakazawa, K.: "Suzaku Observations of Non-thermal X-ray Emission from Galaxy Clusters", *The First GLAST Symp.* (AIP Conf. Proc. 921), pp. 488-489 (2007)
- [42] Fukazawa, Y., Ohno, M., Takahashi, T., Asano, T., Uehara, T., Yamaoka, K., Sugita, S., Terada, Y., Tamagawa, T., Suzuki, M., Sonoda, E., Sato, G., Enoto, T., Makishima, K., Takahashi, T., Kokubun, M., & Nakazawa, K.: "Suzaku HXD-WAM observations of Gamma-ray Prompt Emission and Collaboration with GLAST", *ibid.*, pp. 106-108
- [43] Sato, K., Yamasaki, N. Y., Ishida, M., Ishisaki, Y., Ohashi, T., Kitaguchi, T., Kawaharada, M., Kokubun, M., Makishima, K., Ota, N., Nakazawa, K., (5 名): "A Suzaku Observation of the Cluster of Galaxies A1060", *Heating versus Cooling in Galaxies and Clusters of Galaxies* (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007), pp. 398 (November 2007)
- [44] Nakazawa, K., Kawano, N., Fukazawa, Y., & Kitaguchi, T.: "Initial Results from Suzaku Hard X-ray Observations of Abell 3376", *ibid.*, pp.401
- [45] Makishima, K.: "Observational Evidence for Intermediate-Mass Black Holes: Ultra-Luminous X-ray Sources", Black Holes from Stars to Galaxies –Across the Range of Masses (Proc. IAU Symp. No.238: Cambridge University Press), ed. V. Karas and G. Matt,, pp.209-218 (April 2007)

#### (学位論文)

- [46] Miyawaki, Ryouhei: "X-ray Spectral Studies of Ultra-Luminous Compact X-ray Sources in Nearby Galaxies", 博士学位論文
- [47] Itoh, Takeshi: "Suzaku Studies of Time Variable X-ray Spectra of Edge-On Active Galactic Nuclei", 博士学位論文
- [48] Yamada, Shin'ya: "Improving the Calibration of Inorganic Scintillators Comprising the Suzaku Hard X-ray Detector", 修士学位論文
- [49] Yuasa, Takayuki: "Development of SpaceWirebased Waveform-Sampling Pulse-Height Analyzer and its Application to a Hard X-Ray Detector", 修 土学位論文

(国内雑誌)

- [50] 村島未生、牧島一夫、藤本正行、国分紀秀、松本宏 典:「X線で見る炭素合成の現場—高速星風をもつ惑星 状星雲」、天文月報(日本天文学会)、2007年9月号
- [51] 牧島一夫:「公開シンポジウム『宇宙科学と大学』開催される」、ISASニュース (JAXA 宇宙科学研究本部)、2007 年 12 月号
- [52] 村島未生:「できたての炭素をとらえる惑星状星雲からのX線」、ISASニュース (JAXA 宇宙科学研究本部)、2008 年 3 月号
- [53] 榎戸輝揚:「宇宙X線で強磁場の世界へ:中性子星の 電子サイクロトロン共鳴」、*ibid*

(著書)

- [54] 牧島一夫 (共著):「ブラックホールと高エネルギー現 象」、シリーズ現代の天文学 vol.8 (小山勝二、嶺重慎 編;現代評論社)
- <【学術講演】>

(国際会議)

招待講演

- [55] Makishima, K.: "X-ray Missions: Suzaku and beyond", United Nations Basic Space Science Workshop (2007年6月19日、国立天文台)
- [56] K. Makishima "Suzaku Results on Stellar-Mass Black Holes, ULXs, and Other Compact Objects", Astrophysics of Compact Objects (2007年7月5日、 中華人民共和国 黄山市)
  - The Suzaku X-ray Universe (2007 年 12 月 10-12 日、 San Diego)
- [57] Makishima, K.: "Neutron Star X-ray Binaries" (invited),
- [58] Enoto, T.: "Suzaku Observation of Anomalous Xray Pulsar 4U 0142+61" (oral)
- [59] Kitaguchi, T.: "Effects of neutrons on HXD-PIN onboard Suzaku: residual background and solar flare signals" (poster)
- [60] Nakazawa, K.: "Hard X-ray Properties of a Merging Cluster Abell 3667 as Observed with Suzaku" (poster)

American Astronomical Society HEAD Meeting (2008年3月28~4月3日、Los Angeles

- [61] Wik, D.R., Sarazin, C., Nakazawa, K., Finoguenov, A., Kawaharada, M., Kitaguchi, T., Okuyama, S., Matsushita, K., & Clarke, T. "The Continued Search for Non-thermal Hard X-ray Emission in the Coma and Abell 3667 Galaxy Clusters"
- [62] Terada, Y., Hayashi, T., Ishida, M., Makishima, K., Mukai, K., Dotani, T., Okada, S., Nakamura, R., Naik, S., Bamba, A., Morigami, K.: "Suzaku Discovery of Hard X-ray Pulsations from the Rotating Magnetized White Dwarf, AE Aquarii"
- [63] Takahashi, H., Makishima, K., Yamada, S., Done, C., Kubota, A., Dotani, T., Ebisawa, K., Itoh, T., Kitamoto, S., Negoro, H., Ueda, Y., & Yamaoka, K.: "Suzaku Broad-band Results On Cygnus X-1 In The Low/hard State"
- [64] Gandhi, P., Makishima, K., Fabian, A., Durant, M., Shahbaz, T., Dhillon, V., Marsh, T., Miller, J., & Spruit, H.: "Simultaneous Optical And X-ray Flickering Observations Of GX 339-4: Correlations On Sub-Second Timescales"

その他の一般講演

- [65] Yamada, S., Itoh, T., & Makishima, K: "Hard X-ray Obbservation of the M81 Nucleus with Suzaku", XMM-Newton Workshop: The Next Decade (2007年6月4~6日, Madrid)
- [66] Kitaguchi, T: "Suzaku Study of Hard X-ray Emission from Neaby Galaxy Clusters", XMM-Newton Workshop: The Next Decade (2007年6月4~6日, Madrid)
- [67] Enoto, T., Tsuchiya, H., Yamada, S., Yuasa, T., Kawaharada, M., Kitaguchi, T., Kokubun, M., Kato, H., Okano, M., Nakamura, S., & Makishima, K.: "Detection of gamma-rays from winter thunderclouds along the coast of Japan Sea", 30th International Cosmic Ray Conference (2007年7月3 ~11日, Merida, Yucatan, Mexico)
- [68] Yuasa, T., Nakazawa, K. Makishima, K., Odaka, H., Kokubun, M., Takashima, T., Takahashi, T., Nomachi, M., Fujishiro, I., & Hodoshima, F.: "Development of a SpaceWire/RMAP-based Data Acquisition Framework for Scientific Detector Applications", *International SpaceWire Conference* (2007年9月17~19日, Dundee, Scotland)
- [69] Kitaguchi, T.: "Effects of Neutrons on HXD-PIN Background onboard Suzaku", 5th Geant4 Space Users' Workshop (2007年2月13~15日、山上会館)
- [70] Yuasa, T.: "Suzaku HXD observation of the Galactic center", Swiss-Japan/ INTEGRAL-Suzaku meeting (2008 年 4 月 15~17 日, JAXA 相模原)
- (国内会議)
  - 日本物理学会・秋季大会(2007年9月21~24日、札 幌・北海道大学)
- [71] 北口貴雄,榎戸輝揚,中澤知洋,牧島一夫,国分紀 秀,川原田円,寺田幸功,(8名):「『すざく」衛星に よる 2006 年 12 月 5 日の X9.0 太陽フレアからの中 性子検出の可能性」、22aYJ-2
- [72] 国分紀秀,高橋忠幸,渡辺伸,中澤知洋,牧島一夫, 寺田幸功,川原田円,玉川徹,深沢泰司,水野恒史, 高橋弘充,田代信,山岡和貴,村上敏夫,米徳大輔, 他:「『すざく』衛星硬X線検出器(HXD)主検出部 の現状(IV)」、22aZJ-2
- [73] 寺田幸功,榎戸輝揚,石崎欣尚,海老沢研,国分紀秀, 牧島一夫,他:「X線パルサーを用いた『すざく』衛 星硬X線検出器の時刻較正(II)」、22aZJ-3
- [74] 山田真也,牧島一夫,伊藤健,中澤知洋,久保田あ や,高橋弘充,堂谷忠靖,海老沢研,北本俊二,山岡 和貴,根来均,他:「『すざく』衛星による Low-Hard 状態における CygX-1の観測」、22aZJ-5
- [75] 榎戸輝揚,三原建弘,寺田幸功,鈴木素子,長瀬文昭, 上田剛,中島基樹,高橋弘充,国分紀秀,中澤知洋, 牧島一夫:「『すざく』衛星による Her X-1 のサイク ロトロン共鳴線の観測」、22aZJ-6
- [76] 湯浅孝行,田村健一,中澤知洋,国分紀秀,牧島一夫, 高橋忠幸,海老沢研,馬場彩,千田篤史,森英之,乾 達也,兵藤義明,(9名):「『すざく』衛星による銀河 中心拡散 X 線放射の観測」、22aZJ-9

- [77] 磯部直樹,牧島一夫,高橋弘充,水野恒史,千田篤史, 川原田円,宮脇良平,吉田鉄生,Richard Mushotzky:
   「NGC2403 銀河中の超光度 X 線源 (ULX)の『すざく』衛星による観測」、22aZJ-11
- [78] 牧島一夫:「宇宙におけるプラズマ現象と非熱的過程」、 23aEF-2(レビューセッション)
- [79] 土屋晴文,榎戸輝揚,山田真也,湯浅孝行,川原田円, 北口貴雄,国分紀秀,岡野眞治,加藤博,中村聡史, 牧島一夫:「日本海の冬季雷雲に付随した X 線および ガンマ線の観測」、24aZJ-9
- [80] 穀山渉,安東正樹,森脇成典,石徹白晃治,新谷昌人, 麻生洋一,高島健,中澤知洋,高橋忠幸,国分紀秀, 吉光徹雄,小高裕和,湯浅孝行,石川毅彦,榎戸輝 揚,(12名):「宇宙実験実証プラットホーム(SWIM) を用いた超小型重力波検出器の開発 IV(現状)」、 21aZH-11
- [81] 石川真之介,渡辺伸,武田伸一郎,小高裕和,青野博 之,高橋忠幸,中澤知洋,田中孝明:「X線・線観 測に向けた新しい電極構造による CdTe 半導体撮像 検出器、22pZJ-3
- [82] 青野博之,石川真之介,小高裕和,武田伸一郎,渡辺 伸,国分紀秀,高橋忠幸,中澤知洋:「宇宙ガンマ線 観測に向けたショットキー型 CdTe 半導体検出器の評 価実験」、22pZJ-4
  - 日本天文学会・秋の年会(2007年9月26~29日、岐 阜大学)
- [83] 牧島一夫:「高温で希薄な宇宙磁化プラズマと長距離 相互作用」、A220a
- [84] 榎戸輝揚、土屋晴文、山田真也、湯浅孝行、北口貴 雄、国分紀秀、川原田円、岡野眞治、加藤博、中村 聡史、牧島一夫:「雷雲電場による粒子加速の地上観 測, A109b
- [85] 磯部直樹,千田 篤史,川原田 円,牧島一夫,高橋弘充, 水野恒史,宮脇良平,吉田鉄生,Richard Mushotzky;
   「NGC 2043 銀河中の超光度 X 線源のスペクトル状態の遷移」、J32a
- [86] 高橋弘充、吉良知恵、深沢泰司、牧島一夫、山田真 也、伊藤健、久保田あや)、Chris Done、堂谷忠靖、 海老沢研、北本俊二、根來均、上田佳宏、山岡和貴: 「『すざく』衛星による白鳥座 X-1 の Low/Hard 状 態の観測」、J33a
- [87] 林多佳由、寺田幸功、石田学、岡田俊策、中村良子、 馬場彩、向井浩二、堂谷忠靖、S.Naik、L.Gallo、榎 戸輝揚、牧島一夫:「『すざく』による強磁場白色矮星 連星 AE Aquarii における非熱的放射の探査」、J35a
- [88] 榎戸輝揚、牧島一夫、三原建弘、寺田幸功、中澤知 洋、上田剛、中島基樹、鈴木素子、長瀬文昭:「すざ く衛星による Her X-1 サイクロトロン共鳴吸収の観 測, J36a
- [89] 上田 剛、榎戸輝揚、中澤知洋、鈴木素子、牧島 一夫: 「『すざく』による Her X-1 のサイクロトロン第二共 鳴構造とディップ時の吸収構造の解析」、J37a
- [90] 国分紀秀、湯浅孝行、中澤知洋、牧島一夫、田村健一、 内山泰伸、村上弘志、馬場彩、前田良知、海老沢研、

高橋忠幸、兵藤義明、鶴剛、小山勝二、千田篤史、山 内茂雄、高橋弘充:「『すざく』による銀河中心領域か らの広がった硬 X 線放射の発見」、Q20a

- [91] 上原悠一、中澤知洋、伊藤健、山田真也、牧島一夫: 「『すざく』の広帯域スペクトルを用いた MCG-6-30-15のX線短期変動の解析」、S25a
- [92] 奥山翔、 武田 伸一郎、安田 創、中澤知洋、石川真 之介、小高裕和、渡辺伸、高橋忠幸、深沢泰司、田中 琢也、田島宏康、田中孝明、牧島一夫:「硬 X 線の精 密な撮像分光観測に向けた多層 DSSD システムの開 発の現状」、W75a
  - 「マクロでミクロな銀河団」(2007年10月24~26日、 山形蔵王)
- [93] 中澤知洋:「『すざく』による衝突銀河団 A3667 のマッ ピング観測
- [94] 北口貴雄:「すざく」衛星によるリラックスした近傍 銀河団の硬X線分光観測
- [95] 奥山 翔: A3667 銀河団の北西電波源上付近の X 線放 射の詳細観測
  - 日本物理学会・春の年会(2008年3月22~26日、東 大阪・近畿大学)
- [96] 山岡和貴,中川友進,杉田聡司,田代信,寺田幸功, 浦田裕次,恩田香織,遠藤輝,鈴木正信,小高夏来, 守上浩市,玉川徹,洪秀徴,国分紀秀,鈴木素子,高 橋忠幸,深沢泰司,大野雅功,高橋拓也,上原岳士, 吉良知恵,花畑義隆,中澤知洋,榎戸輝揚,牧島一夫, (8名):「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器広帯域全 天モニ夕部 (HXD-WAM)の現状 (IV)」、23aZX-1
- [97] 山田真也,北口貴雄,川原田円,国分紀秀,中澤知洋, 牧島一夫:「『すざく』搭載 GSO シンチレータのエネ ルギー応答関数の再考」、23aZX-2
- [98] 牧島一夫,榎戸輝揚,中島基樹,三原建弘,寺田幸功, 鈴木素子,岩切渉,上田剛,北口貴雄,中澤知洋,国 分紀秀:「『すざく』および RXTE 衛星で探る X 線 パルサーのサイクロトロン吸収線」、23aZX-3
- [99] 上原悠一,中澤知洋,伊藤健,山田真也,牧島一夫: 「X線衛星『すざく』を用いた活動銀河核からの放射 の時間変動解析」、23aZX-4
- [100] 上田剛, 榎戸輝揚, 中澤知洋, 鈴木素子, 牧島一夫: 「『すざく』による Her X-1 の軟 X 線吸収構造の解 析」、23aZX-5
- [101] 中澤知洋,奥山翔,北口貴雄,深沢泰司,滝沢元和, 井上進,牧島一夫:「X線衛星『すざく』が捉えた衝 突銀河団 Abell 3667 銀河団における ICM 加熱と銀 河間磁場、23aZX-6
- [102] 北口貴雄,榎戸輝揚,中澤知洋,牧島一夫,馬場彩, 国分紀秀,川原田円,遠藤輝,浦田裕次,寺田幸功, (5名):「『すざく』衛星による2006年12月5日のX9 太陽フレアからの中性子検出の可能性 II」、23aZX-7
- [103] 奥山翔,武田伸一郎,安田創,中澤知洋,石川真之 介,小高裕和,渡辺伸,高橋忠幸,深沢泰司,田中琢 也,田島宏康,田中孝明,牧島一夫:「硬X線の精密 な撮像分光観測に向けた多層 DSSD システムの開発 の現状」、23aZX-11

- [104] 玉川徹, 早藤麻美, 阿部幸二, 岩本慎也, 中村聡史, 原山淳, 岩橋孝典, 安田仲宏, 北村尚, 門叶冬樹, 牧 島一夫:「Thick-foil GEM のゲイン変動と放電率調 査」、23pZJ-12
- [105] 湯浅孝行,中澤知洋,牧島一夫,小高裕和,佐藤理 江,国分紀秀,高島健,高橋忠幸,能町正晴,森國 城:「SpaceWireを用いた波形サンプル型8 ch ADC 読み出しボードの開発とコンプトンカメラのシール ド部への応用」、23pZX-13
- [106] **榎戸輝揚:「雷雲ガンマ線の発生と素過程」**、24pQF-4
- [107] 石川真之介,青野博之,渡辺伸,武田伸一郎,小高 裕和,高橋忠幸,中澤知洋,田中孝明,兼久盛,比嘉 晃,黒田能克,加藤昌浩,大西光延:「X線・線観 測に向けた新しい電極構造による CdTe 半導体撮像 検出器 II」、23aZX-13
- [108] 穀山渉,安東正樹,森脇成典,石徹白晃治,新谷昌人, 麻生洋一,高島健,中澤知洋,高橋忠幸,国分紀秀, 吉光徹雄,小高裕和,湯浅孝行,石川毅彦,榎戸輝揚, (10名):「宇宙実験実証プラットホーム(SWIM)を 用いた超小型重力波検出器の開発V(試験の現状)」、 25pZW-4

その他の学会

- [109] 榎戸輝揚、土屋晴文、湯浅孝行、山田真也、北口貴雄、 川原田円、国分紀秀、加藤博、牧島一夫:「日本海側の 冬期雷雲に伴う X 線/ガンマ線の観測(1)」(口頭)、 地球惑星合同大会 大気電気一般 Z240-011、(2007年 5月24日)
- [110] 榎戸輝揚、寺田幸功、三原建弘、高橋弘充、幸村孝 由、中島基樹、岩切渉、鈴木素子、堂谷忠靖、長瀬文 昭、上田剛、中澤知洋、牧島一夫:「すざく衛星で探 る中性子サイクロトロン共鳴」(ポスター)、第8回 宇宙科学シンポジウム(2008年1月8~9日、JAXA 相模原)
- [111] 榎戸輝揚、土屋晴文、山田真也、湯浅孝行、上田剛、 北口貴雄、川原田円、国分紀秀、中村聡史、加藤博、 岡野眞治、三谷烈史、高島健、牧島一夫:「日本海側 の冬季雷雲に伴うガンマ線観測(2007 年度)」第9回 惑星圏研究会(2008 年 3 月 19 日、東北大学)

(セミナーなど)

- [112] 牧島一夫:「『すざく』観測結果のハイライト」、ビッ グバン宇宙国際センター夏の学校 (2007 年 9 月 1 日、 箱根)
- [113] 牧島一夫:「衛星計画の困難とその克服」、東京大学 理学系研究科先端理学コミュニケーション (2008年 2月5日)
- [114] 湯浅孝行 & SpaceWire ユーザ会:「宇宙機用デー 夕通信規格『SpaceWire』を用いたデータ取得系の 開発」、理研・宇宙放射線研究室・知の共有セミナー (2008 年 4 月 17 日)

# 6.2 高瀬研究室

# 6.2.1 TST-2 球状トカマク装置を用いた プラズマ実験

核融合研究に使われるトカマク装置では,プラズ マ中に流れる電流(プラズマ電流 I<sub>p</sub>)はプラズマ閉 じ込めに不可欠である。通常のトカマクでは変流器 の一次巻線にあたるセンターソレノイド (CS) の電 流を変化させることで,二次巻線に相当するプラズ マに電磁誘導で電流を駆動する。CS はトーラス中心 部の貴重な空間を占有するため,これを用いずにプ ラズマを生成・維持することができれば装置の工学 的制約が軽減されるため, 炉の小型化が可能となり 経済性が著しく改善される。当研究室で研究を行っ ている球状トカマク (ST) という配位では, CSの 有無はプラントの経済性を大きく左右するため,最 重要課題である。 $\operatorname{ST}$  では高 eta ( eta = プラズマ圧力/ 磁場圧力)のプラズマが得られるという利点があり、 これは低磁場でも高いプラズマ圧力を達成できるこ とを意味する。核融合出力密度はプラズマ圧力の2 乗に比例するので、いかに高 $\beta$ プラズマを安定に保 てるかが重要な課題となる。本研究室では主に柏キャ ンパスの TST-2 球状トカマク(図 6.2.13)を用い, 複数のアプローチによりこれらの課題に取り組んで いる。



☑ 6.2.13: TST-2 at Kashiwa Campus.

#### 高周波によるプラズマ生成・維持

TST-2では電子サイクロトロン(EC)周波数帯の マイクロ波によるプラズマ生成・維持法の研究を行っ ている。図 6.2.14 に典型的な放電波形を示す。マイ クロ波を入射するとプラズマが生成され,小さな電 流が流れるが,この状態では磁気面は開いてる。電流 が徐々に増加し,ある閾値に達すると電流が急激に増 加し,閉じた磁気面が形成される。これを電流ジャン プと呼ぶ。電流ジャンプ後のプラズマ電流は,外部よ り加えた垂直磁場にほぼ比例する。電流ジャンプ前の 電流増加率 dI<sub>p</sub>/dt [kA/s] のパラメータ依存性は,将 来の炉に外挿するためだけでなく,この状態の電流 駆動機構を解明するためにも重要である。実験結果 は,ポロイダル磁場(PF)の曲率の違いと入射する マイクロ波の偏波方向(O/X モード)の違い( $C_{PF}$  で表す),入射 EC 波のパワー( $P_{EC}$  [kW]),EC 共鳴位置( $R_{ECR}$  [m]),充填ガス圧( $p_{fill}$  [ $10^{-5}$ Torr]),外部垂直磁場強度( $B_z$  [mT])を用い,以下のパワー則でよく表現できることがわかった。

$$\frac{dI_{\rm p}}{dt} = C_{\rm PF} \frac{P_{\rm EC}^{2.1}}{R_{\rm ECR}^{2.4} \, p_{\rm fill}^{1.0} \, B_{\rm z}^{0.4}}$$

得られたパワー則を物理モデルで定性的に説明する ことはできるが,定量的な説明は今後の課題である。



 $\boxtimes$  6.2.14: Time evolutions of two discharges, one with only EC injection, the other with EC injection switching over to RF injection.

これまで波を用いたプラズマ生成・維持の研究は, いくつかのグループで行われているが,すべて EC 周 波数帯のマイクロ波を用いていた。TST-2 では,EC で生成したプラズマに RF(21 MHz)パワーを入射 することで,電流ジャンプを引き起こし,電流を維 持することに世界で初めて成功した(図 6.2.14)。こ の条件では伝播できる RF 波は存在しないので,RF の作る誘導電場によりプラズマ中の電子が加熱され たと考えられる。一方 EC 波は伝搬できるので,電 子加熱と同時に運動量注入,すなわち電流駆動が行 われる可能性がある。このような可能性のない条件 で電流が維持できたことは,この電流が圧力駆動型 であることを示唆する。

#### 高周波加熱実験

高次高調速波(HHFW)はイオンサイクロトロン 周波数の高次高調波帯の速波であり,理論によると 誘電率の高いSTプラズマ中を伝搬することができ 高βプラズマでは電子による吸収が強い。TST-2で は21 MHzのHHFWによる加熱が観測されている。 典型的な例では,電子温度は140 eVから210 eVに 増加し,イオン温度は50 eVから100 eVに増加する。 イオンによるHHFWの吸収は弱いので,イオン加 熱には不安定性が関与していると考えられる。RF入 射時に起こる不安定性としては,電場が閾値を超え

ると起きるパラメトリック崩壊不安定性(PDI)が 知られている。これはエネルギー・運動量を保存す る3つの波(または準モード)が関与する非線形現 象であり, TST-2 では RF 磁気プローブおよびマイ クロ波干渉計で観測されている。入射した HHFW はイオンバーンスタイン波 (IBW) とイオンサイク ロトン準モード (ICQM) に崩壊する。HHFW によ り励起された PDIの周波数スペクトルを RF 磁気プ ローブで計測した結果を図 6.2.15 に示す。入射波の 周波数(21 MHz)より低周波数側にイオンサイクロ トロン周波数だけ離れた 19 MHz 付近にサイドバン ド(f-1)が見えている。また過去の実験では見られ なかった  $20.4 \,\mathrm{MHz}$  付近 (  $f_{\mathrm{un}}$  ) にもピークが観測さ れている。このピークの周波数も f-1 のピークと同様にトロイダル磁場強度に依存することがわかった。 純粋な水素プラズマでは 20.4 MHz に対応する周波 数は考えられず,これまで知られている PDIとは明 らかに異なるものである。今後このようなピークが 生じる物理過程の解明を進める予定である。



⊠ 6.2.15: Frequency spectrum of PDI driven by HHFW, measured by RF magnetic probe.

マイクロ波反射計で HHFW 成分と IBW 成分の強 度を調べると,両者とも 10kHz 程度の激しい振幅変 調を示す。図 6.2.16 は両成分の関係を縦軸横軸に示 したものであり,それらの間に非線形(この場合は 2乗)の関係があることわかる。また,異なる運転 条件の放電でも同じ線上にあることから,この非線 形性は,比較的狭い空間の現象であることを示唆し, IBW が減衰しやすい(すなわちプラズマに吸収され やすい)波であることと矛盾しない。

#### 高速光計測

プラズマ中を伝搬する波動を直接計測するため,高 速光計測の開発を行っている。過去の実験では検出 器にフォトダイオードを用いていたが,フォトダイ オードは半導体であるため真空容器内で乱反射した 電磁波の影響を強く受けるので,外部より励起された 波動の検出には適していない。平成19年度にはフォ トダイオードに比べると電磁波の影響を受けにくい 光電子増倍管を用い,プラズマ中のHHFWの検出 に成功した。しかしプラズマからの光量が多く,光 電子増倍管の線形性が無い領域での測定であるため,



 $\boxtimes$  6.2.16: Dependence of the 1st lower sideband  $(f_{-1})$  power on the pump wave  $(f_0)$  power. Different symbols distinguish discharge types.

入射電力依存性等の定量的な測定には至っていない。 今後,定量測定ができるようにすること,PDIによ り励起された波動を測定することを目標に,高速光 計測のダイナミックレンジを改善する予定である。

マイクロ波反射計



 $\boxtimes$  6.2.17: Complex amplitudes and histograms of the absolute amplitude for raw data (a) and (c), and for corrected data (b) and (d).

マイクロ波反射計はマイクロ波をプラズマに入射 し、プラズマ中のカットオフ層からの反射波を測定 する手法である。カットオフは密度の関数なので、反 射波の位相を測定することにより、プラズマ中の密 度に関する情報が得られる。実際のプラズマ測定で は,回折効果により反射波の振幅が大きく変動し,し ばしば位相測定が困難になる。これまで一般的な測 定条件での回折効果の表式は知られておらず,多く の場合は数値計算によって個々のケースでの影響が 調べられていた。今回ガウスビームと真空中でのス カラー波の伝搬(ホイヘンスの原理)を仮定するこ とで,一般的な条件での測定電場の解析表現を得た。 また,揺らぎが凍結乱流である場合には,回折効果 を補正できることがわかった。図 6.2.17 は, テスト データに対する回折効果の補正の様子を示したもの である。ヒストグラムは振幅の分布を示したもので, 回折効果がない理想的な場合には,振幅は一定でと ストグラムはδ関数となる。補正によって,振幅の広 がりを減少させることに成功した。実際の測定デ タに適用するためには<u>,</u>ノイズの効果,凍結乱流か らのずれ,補正の良し悪しの評価方法等を考慮した 手法を確立する必要がある。

# 6.2.2 MHD 不安定性とモード数同定法の 開発

当研究室では , イギリスにある世界最大級の ST 装 置 MAST において, ST に固有の不安定性である内 部再結合現象(IRE)の物理機構の解明を目指した共 同研究を英国原子力機関(UKAEA)と行っている。 MAST では放電の前半で小規模な IRE が,また放電 の最後にプラズマ崩壊(ディスラプション)を伴う 大規模な IRE が頻繁に観測され, プラズマの性能を 制限している。三次元理論シミュレーションによる と、圧力駆動の低波数モードが非線形結合を経て成 長した結果,プラズマは変形し,崩壊に至る。通常の (アスペクト比の高い)トカマクプラズマでも観測さ れる鋸歯状振動との違いは,安全係数qが1となる 面より外側の位置から熱・粒子分布の崩壊が起きる ことであり,複数のモードの非線形結合による崩壊 が IRE を特徴づける。大規模 IRE では,前兆振動と しての m/n = 2/1 (m, nはトロイダル, ポロイダ ルモード数)のテアリングモード(TM)が崩壊の直 前で発生し,成長する場合が多い(時定数は数ms)。 IRE を伴う複数のショットにおいて,軟X線強度分 布はq=2面付近での崩壊を示しているが,高エネル ギー粒子起因の不安定性(EPM)が,TM発生より 約 50 ms 前の時間帯で発生している場合もある。小 規模 IRE では,トムソン散乱法で測定した電子圧力 勾配は IRE 以前の時間帯で増加しており, 圧力勾配 に駆動される不安定性であることが示唆される。電 流立ち上がり速度と圧力勾配や不安定性との明確な 相関は見られなかった。IRE が起きる条件を調べる ために, q = 2面における圧力勾配 (dP/dr)と磁気 シア(S=(r/q)(dq/dr))を比較した結果,磁気シ アが高い時は IRE はより高い圧力勾配で起きること がわかった (Fig. 6.2.18)。平成 20 年度には, MAST 装置において圧力分布や電流分布をトロイダル磁場 や粒子供給により変化させ,不安定性発生の条件を 明らかにする実験を行い,高時間分解能で計測した 軟X線強度分布から,崩壊直前のモードの振る舞い を調べる予定である。



 $\boxtimes$  6.2.18: Trajectories of magnetic shear and pressure gradient at the q = 2 surface prior to IRE. Different symbols indicate different discharges. Red circles indicate instances just before IRE.

ST プラズマの断面は非円形で,トーラス内側と 外側のトロイダル磁場の非対称性が通常のトカマク よりもはるかに大きいので , ポロイダルモード数を 同定するのは容易ではない。そこで3次元ヘリカル フィラメント電流モデルを用いて,磁気計測で測定 される信号を再現した。複数のフィラメントはトロ イダル方向に均等に分布させ,各フィラメントの電 流値もモード数に応じて決定した (Fig. 6.2.19)。3 次元のモード構造をよく反映していると考えられる 磁力線に沿ったヘリカルフィラメントモデルと, ロイダル方向の軸対象フィラメントモデルを比較し た結果,ヘリカルフィラメントの場合トーラス内側 ではポロイダル磁場が近接するフィラメント同士に より相殺しあうことがわかった。m/n=2/1 モード に対して磁気プローブ上での信号を算出し,実験で 得られた信号と比較した結果,誤差は2倍程度違い, モード同定におけるヘリカルフィラメントモデルの 優位性が定量化された。



 $\boxtimes$  6.2.19: Models with axisymmetric (left) and helical (right) filaments. Bottom figures show locations of filaments in a poloidal cross section (left) and poloidal distribution of filament currents.

# 6.2.3 プラズマ乱流によるメゾスケール構 造形成

プラズマ中に存在する密度・温度などの勾配によ リ、プラズマは乱流状態にある。乱流は、プラズマ の大きさとイオンラーマー半径の中間のメゾスケー ルの構造を自発的に作り出し、この構造がプラズマ の輸送に大きな影響を与える。メゾスケールの構造 には帯状流(ZF)と呼ばれる波がある。ZFは核融合 プラズマにおいては乱流による異常輸送を著しく減 らす働きがあるため、非常に重要である。木星の帯 状模様などもZFであり、自然界に普遍的に存在する 構造として物理学的にも興味深いものである。トロ イダルプラズマにおけるZFは測地線音波(GAM) と呼ばれる振動モードを伴う。ZFとGAMは非線形 的に結合しているため、GAMの固有モードの解析 も必要不可欠である。平成19年度はGAMに注目 し、以下の研究を行った。

(1) GAM のポロイダル固有関数 高アスペクト 比・円形断面プラズマにおいて,ジャイロ運動論方程 式をもとに,イオンラーマー半径の高次のオーダー まで考慮した GAM 固有モード解析を行い,実周波 数,減衰率,固有関数を得た。本研究により,固有 関数のパリティーが明らかになり,トーラスの上下 対称性が破れることがわかった。この対称性の破れ は実験観測可能な大きさであるため,モデルの妥当 性も検証可能であることがわかった。

(2) GAM の径方向固有関数(1)の研究をもとに, GAM の径方向構造を解析した。プラズマは径方向 に温度・密度勾配を持つため,それらをモデルによ り簡単化し,径方向構造を決める方程式を導いた。 径方向にはプラズマ・真空境界が存在するため,径 方向にも固有モードが存在し,実周波数・減衰率は 連続ではなく離散的に存在することがわかった。ま た径方向構造は固有周波数と1対1に対応し,径方 向の存在領域が変化することがわかった。この結果 は,実験で観測されていた結果を説明できるもので あった。

(3) 不純物イオン存在下の GAM の固有モード (1),(2) の研究をさらに不純物イオンの存在する系 に拡張させた。実際のプラズマには不純物が存在す るため,この拡張は非常に重要である。この研究に より,周波数の解析的表現を得,1イオン系におけ る GAM の周波数に比べ,現実のプラズマでは周波 数は小さくなることがわかった。それに伴い,減衰 率も変化する。この研究はイオンの実効的質量を測 定する GAM 分光測定において精度を上げるために 非常に重要な結果である。

# 6.2.4 JT-60Uトカマクにおける自発電流 によるプラズマ電流駆動実験

日本原子力研究開発機構のJT-60Uトカマクを用 いて,プラズマが自身の圧力勾配により自発的に流 すブートストラップ電流 I<sub>BS</sub>による電流駆動実験の データ解析を行っている。この実験では,垂直入射 および反電流駆動方向の接線入射の中性粒子ビーム 入射(NBI)のみを用い,非誘導電流駆動は負の寄与 しかしないようにしている。この間,電磁誘導によ る電流駆動もゼロないしは負であることが示せれば, I<sub>BS</sub> が全プラズマ電流を上回る「ブートストラップ オーバードライブ (BSOD)」が達成されたと結論さ れる。これは,プラズマ中に自発的に流れる IBS によ り, プラズマ電流の全てが駆動されるという, 自己維 持トカマクプラズマが実現されたこと, また BSOD によりプラズマ電流を増加させることが可能である ことを示す画期的な成果であり,経済的競争力の高い 核融合炉の実現にとって大変意義の高いものである。 しかしこのような放電ではプラズマ中心付近で電流 密度がゼロとなる「電流ホール」という状態にあり, それぞれの電流成分の推定誤差が大きい。BSOD 達 成の信頼性を高めるため,いくつかの異なるプラズ マ制御を用いた実験の解析を進めている。

# 6.2.5 プラズマ合体を使った超高ベータST プラズマ生成・維持の研究

ST の高 β・高閉じ込め特性を活用すれば , 小型装 置で体積中性子源或いは発電実証を実現し,核融合 開発の加速に貢献することができる。STの特徴であ る高 $\beta$ を更に高めた「超高ベータSTプラズマ」を 生成・維持するための新手法を開発することを目的 とし,新装置 UTST (図 6.2.20)を建設し,実験を 開始している。ST 核融合炉で採用されるためには, トーラス中心部の CS を用いない方法でなければな らない。具体的には,真空容器外コイルを用いてプ ラズマを2個生成し,これらの合体に伴う磁気リコ ネクション(磁力線の繋ぎ換え)による磁場から粒 子へのエネルギー変換を利用した超高ベータ ST プ ラズマ(トロイダルベータが30-50%)の新生成法の 開発, および HHFW などの先進的 RF 手法による 高ベータ ST プラズマの維持を目指している。平成 19年度には,コイル電源系の増強,加熱用のNBI装 置の設置などを行った。



⊠ 6.2.20: Newly constructed UTST device for ultra-high  $\beta$  ST plasma formation.

#### <報文>

(原著論文)

- M. Sasaki, K. Itoh, A. Ejiri, Y. Takase: Radial Eigenmodes of Geodesic Acoustic Modes, Contrib. Plasma Phys. 48, 68 (2008).
- [2] M. Sasaki, K. Itoh, A. Ejiri, Y. Takase: Modification of Symmetry of Poloidal Eigenmode of Geodesic Acoustic Modes, Plasma Fusion Res. 3, 009 (2008).
- [3] T. Yamada, A. Ejiri, Y. Shimada, T. Oosako, J. Tsujimura, Y. Takase, Y. Torii, M. Sasaki, H. Tojo, T. Masuda, H. Nuga, N. Sumitomo, S. Kainaga, J. Sugiyama: Reflectometry for Density Fluctuation and Profile Measurements in TST-2, Plasma Fusion Res. 2, S1037 (2007).
- [4] H. Tojo, A. Ejiri, Y. Takase, Y. Torii, T. Oosako, M. Sasaki, T. Masuda, Y. Shimada, N. Sumitomo, J. Tsujimura, H. Nuga, S. Kainaga, J. Sugiyama: Soft X-ray Emission Profile and Mode Structure During MHD Events in the TST-2 Spherical Tokamak, Plasma Fusion Res. 2, S1065 (2007).
- [5] H. Tamai, T. Fujita, M. Kikuchi, K. Kizu, G. Kurita, K. Masaki, M. Matsukawa, Y. Miura, S. Sakurai, A.M. Sukegawa, Y. Suzuki, Y. Takase, K. Tsuchiya, D. Campbell, F. Romanelli: Prospective performances in JT-60SA towards the ITER and DEMO relevant plasmas, Fusion Engineering and Design bf 82, 541 (2007).
- [6] T. Fujita, H. Tamai, M. Matsukawa, G. Kurita, J. Bialek, N. Aiba, K. Tsuchiya, S. Sakurai, Y. Suzuki, K. Hamamatsu, N. Hayashi, N. Oyama, T. Suzuki, G.A. Navratil, Y. Kamada, Y. Miura, Y. Takase, D. Campbell, J. Pamela, F. Romanelli, M. Kikuchi: Design optimization for plasma performance and assessment of operation regimes in JT-60SA, Nucl. Fusion 47, 1512 (2007).
- [7] H. Takenaga, the JT-60 Team: Overview of JT-60U results for the development of a steady-state advanced tokamak scenario, Nucl. Fusion 47, S563 (2007).
- [8] J.E. Menard, M.G. Bell, R.E. Bell, S. Bernabei, J. Bialek, ..., Y. Takase, ..., : Overview of recent physics results from the National Spherical Torus Experiment (NSTX), Nucl. Fusion 47, S645 (2007).
- [9] A. Ejiri, Y. Shimada, T. Yamada, T. Oosako, Y. Takase, H. Kasahara: Relative Frequency Calibration for Fast Frequency Sweep Microwave Reflectometry, Plasma Fusion Research 2, 040(2007).
- [10] Y. Nagashima, K. Itoh, S.-I. Itoh, A. Fujisawa, M. Yagi, K. Hoshino, K. Shinohara, A. Ejiri, Y. Takase, T. Ido, K. Uehara, Y. Miura, JFT-2M group: In search of zonal flows by using direct density fluctuation measurements, Plasma Phys. Control. Fusion 49, 1611 (2007).

- [11] T. Yamada, A. Ejiri, Y. Shimada, T. Oosako, J. Tsujimura, Y. Takase, H. Kasahara: Direct measurement of density oscillation induced by a radiofrequency wave, Rev. Sci. Instrum. **78**, 083502 (2007).
- [12] Y. Torii, A. Ejiri, T. Masuda, T. Oosako, M. Sasaki, H. Tojo, H. Nuga, Y. Shimada, N. Sumitomo, J. Tsujimura, S. Kainaga, J. Sugiyama, Y. Takase: First Observation of RF-Induced Visible Light Fluctuations, Plasma Fusion Res. 2, 023 (2007).
- [13] A. Ejiri, Y. Takase: Toroidal current initiation in low aspect ratio tokamaks based on single-particle orbit analysis, Nucl. Fusion 47, 403 (2007).

#### (国内雑誌)

- [14] 高瀬雄一他: 炉心プラズマの定常化に向けたトーラス プラズマ開発の現状と展望, J. Plasma Fusion Res.
   83, 413 (2007).
- [15] 東井和夫,武智学,大舘暁,榊原悟,庄司多津男,徳 沢季彦,江尻晶:高速イオン励起 MHD 不安定性とそ れらによる高速イオン輸送,J. Plasma Fusion Res. 83, 1000 (2007).
- [16] 松田慎三郎,西尾敏,長山好夫,高瀬雄一,飛田健次, 小西哲之,岡野邦彦,中村信吉,小野靖:実用炉に向 けた核融合炉開発,IEEJ Journal 128,74 (2008).

(学位論文)

[17] 海永壮一郎: "Electron temperature and density measurements in TST-2 spherical tokamak plasmas" (修士論文).

< 学術講演 >

#### (国際会議)

一般講演

- [18] Y. Takase: "LHCD Scenarios for Spherical Tokamak Plasmas" 17th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas, Clearwater, USA, 7– 9 May 2007.
- [19] M. Sasaki: "Geodesic Acoustic Mode in toroidal plasmas" 11th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, Takayama, Japan, 23–25 May 2007.
- [20] T. Oosako: "Combline antenna for Lower Hybrid Current Drive start-up experiments in Tokyo Spherical Tokamak-2", 2nd Korea-Japan workshop on heating technology of Fusion plasmas, Jeju, Korea, 16–17 August 2007.
- [21] A. Ejiri: "Design optimization of microwave reflectometry using Kirchhoff integral" 13th Int. Symposium Laser-Aided Plasma Diagnostics, Takayama, Japan, 18–21 Sept. 2007.
- [22] S. Kainaga: "Electron temperature and density measurements on TST-2" 13th Int. Symposium Laser-Aided Plasma Diagnostics, Takayama, Japan, 18–21 Sept. 2007.

- [23] H. Tojo: "Internal reconnection events studies in the MAST spherical tokamak" 13th Int. Workshop on Spherical Tori 2007, Fukuoka, 10–12 Oct. 2007.
- [24] A. Ejiri: "RF start-up and heating experiments on the TST-2 spherical tokamak" 13th Int. Workshop on Spherical Tori 2007, Fukuoka, 10–12 Oct. 2007.
- [25] M. Sasaki: "GAM eigenmode in multi-ion system" 17th Int. Toki Conference and 16th Int. Stellarator/Heliotron Workshop 2007, Toki, Gifu, Japan, 15–19 Oct. 2007.
- [26] H. Tojo: "Temporal evolution of the pressure profile and mode behavior during internal reconnection events in the MAST spherical tokamak" 17th Int. Toki Conference and 16th Int. Stellarator/Heliotron Workshop 2007, Toki, Gifu, Japan, 15–19 Oct. 2007.
- [27] A. Ejiri: "Measurements of rf wave by microwave reflectometry on the TST-2 spherical tokamak" US-Japan WS on Millimeter-Wave Plasma Diagnostics, UC Davis, USA, 25–27 Feb. 2008.
- [28] A. Ejiri: "Response of microwave reflectometry under generalized configuration" US-Japan WS on Millimeter-Wave Plasma Diagnostics, UC Davis, USA, 25–27 Feb. 2008.
- [29] Y. Takase: "Plasma start-up and heating experiments on TST-2" US-Japan RF Physics Workshop, PPPL, USA, 27–28 Feb. 2008.

#### 招待講演

[30] Y. Takase: "Nation-Wide Collaborative ST Research Program in Japan", 13th Int. Workshop on Spherical Tori 2007, Fukuoka, 10–12 Oct. 2007.

#### (国内会議)

#### 一般講演

- [31] 杉山純一:TST-2 球状トカマクプラズマにおける ECH スタートアップ実験 第46回若手夏の学校(鬼怒川 温泉)2007年8月7日-9日.
- [32] 江尻晶: 「TST-2 における高次高調速波入射実験」 電気学会プラズマ研究会「プラズマ一般,球状トカマ ク」(東京)2007 年 8 月 20 日-21 日.
- [33] 高瀬雄一:「アメリカおよびイギリスにおける ST 型 CTF の検討状況」 電気学会プラズマ研究会「プラ ズマー般,球状トカマク」(東京)2007年8月20日-21日.
- [34] 佐々木真:「GAM の径方向固有モード」 日本物理学 会第 62 回年次大会(札幌)2007 年 9 月 21 日-24 日.
- [35] 足立裕樹: 「TST-2 における 21MHz RF 加熱時の 可視光の高速測定」 日本物理学会第 62 回年次大会 (札幌) 2007 年 9 月 21 日-24 日.
- [36] 大迫琢也: 「LHCD start-up 用コムラインアンテナ の特性計測」日本物理学会第 62 回年次大会(札幌) 2007 年 9 月 21 日-24 日.

- [37] 杉山純一:「球状トカマク TST-2 における X-mode 及び O-mode 入射での ECHstartup の比較」プラズ マ・核融合学会第 24 回年会(姫路)2007 年 11 月 27 日-30 日.
- [38] 大迫琢也:「TST-2 における高次高調速波によるパラ メトリック崩壊不安定性」プラズマ・核融合学会第24 回年会(姫路)2007年11月27日-30日.
- [39] 渡邉理: 「TST-2 における ECH プラズマ電流生成」 研究会「球状トカマク炉への展望と課題」(土岐)2008 年1月31日-2月1日.
- [40] 渡邉理: 「ECH start up and RF sustainment on TST-2」境界プラズマ研究会,土岐,2008年2月28 日-29日.
- [41] 東條寛: 「球状トカマクにおける MHD 事象の解 析」,第11回若手科学者によるプラズマ研究会,那 珂,2008 年3月17日-19日.
- [42] 足立裕樹: 「TST-2における高次高調速波によるパ ラメトリック崩壊不安定性」第11回若手科学者によ るプラズマ研究会,那珂,2008年3月17日-19日.
- [43] 渡邉理:「高周波密度振動に対する電子衝突励起,脱 励起発光の応答」日本物理学会第63回年次大会(大 阪)2008年3月22日-26日.
- [44] 海永壮一朗:「TST-2 球状トカマクにおける高次高調 速波による電子加熱の検証」日本物理学会第63回年 次大会(大阪)2008年3月22日-26日.
- [45] 佐々木真: 「Zonal Flow と GAM の非線形競合過程」 日本物理学会第 63 回年次大会(大阪) 2008 年 3 月 22 日-26 日.

#### 招待講演

[46] 高瀬雄一:「日本における ST 研究の現状と将来展 望」プラズマ・核融合学会第 24 回年会(姫路)2007 年 11 月 27 日-30 日.

(セミナー)

- [47] 高瀬雄一: プラズマ物理から核融合への挑戦「ロード・マップとタイムテーブル 球形トカマク」五月祭特別講演・討論企画: 徹底討論・核融合「点火&アフター」(東大)2007年5月28日.
- [48] 高瀬雄一: "Japanese ST Programme Status & Plans -" ST Workshop, Culham, UK, 22-23 May 2007.
- [49] 江尻晶: プラズマ研究と計測の発展 第46回若手夏 の学校(鬼怒川温泉)2007年8月7日-9日.

# 6.3 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。 2007 年度、われわれの研究室で書かれた 2 つの博 士論文が奨励賞などに輝いた。ひとつは麻生洋一氏 の論文に対してであり、GWIC (Gravitational Wave International Committee) より GWIC Thesis Prize が授与された。もうひとつは沼田健司氏の論文であ り、日本物理学会の日本物理学会若手奨励賞を受賞 した。[1, 2]

重力波は光速度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。また宇宙のごく 初期に起源をもつ重力波も予想されており、将来的 には重力波によって、電磁波では決して見ることが できない宇宙の姿をとらえるようになると期待され る。これらの重力波観測によって、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 類の新たな知の開拓につながる。

これまでの研究では、三鷹に設置された TAMA300 を用いた近傍銀河からの重力波探査と、次世代レー ザー干渉計 LCGT の開発が2 つの主軸となってい た。最近これにくわえて、宇宙空間を利用した重力 波検出計画が構想されるようになった。地上に干渉 計を作る限り、基線長の制限や地面振動といった障 害は避けることができない。しかし自由な宇宙空間 ではこれらの制限が取り払われ、理想的な環境が期 待できる。特に、地上では不可能な低周波の重力波 検出が可能となることが大きな魅力である。われわ れは、日本独自のスペース重力波検出器 DECIGO を 提唱している。これを実現するための基礎研究とし て、小型衛星を用いた予備実験などの準備を進めて いる。これらの基礎研究をもとにして、DECIGO に よって巨大ブラックホールや宇宙初期のインフレー ションに起源をもつ重力波をとらえようとする計画 を検討中である。[5,16,53]

# 6.3.1 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。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 のような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。これまで取得された3000 時間以上におよぶデータは現在、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。また、米欧の干渉計との同時 観測を実施しているが、LIGO(米国)との共同観測 で得られたデータの解析結果が既に公表されている。 その他、散乱光雑音や電気系雑音、変調系雑音など を想定した雑音源検討の研究を実施している。現在 は、われわれの研究室で基礎開発を行った SAS とよ ばれる次世代の高性能防振装置を TAMA に組み込

むための作業を進めているところである。既に4台のSASが設置されたが、このインストール作業が完 了すれば、低周波において一層の感度向上が見込ま れる。[6,17,18,41,42,43,44,45]

#### TAMA300 モニター信号の系統的解析

重力波検出器 TAMA300 は非常に高い感度を持つ ために、地面振動などの外乱により不安定になるこ とがある。そのために、検出器のメイン信号(2つ の腕の差動変動信号)から得られた重力波イベント 候補が真に重力波か外乱の影響であるかを区別でき ない。そこで、検出器の全モニター信号を系統的に 解析して、メイン信号とモニター信号が同時に異常 な振る舞いをすれば、それは重力波でなく外乱の影 響としてイベント候補から除去した。結果、イベン ト候補数を約1/100 (このときの偶然に真の重力波イ ベントを除去する確率は 3.2%である。)にすること に成功した。[2]

#### 次期大型レーザー干渉計計画 LCGT

現在、TAMA300 を含めて世界各国で稼動中の重 力波検出器は、我々の銀河系内で発生した連星中性 子星合体からの重力波イベントを検出するのに十分 な感度を持っている。ただ、このようなイベントが 発生する確率は 10<sup>5</sup>年に1回程度という非常に稀な ものである。そこで、重力波を用いた本格的な天文 学の創生を目指して次世代検出器の建設計画が、世 界各国で進められている。

その中で、日本のグループが中心となって進めて いる LCGT 計画は、基線長 3km のレーザー干渉計 型重力波検出器を神岡地下のサイトに建設するもの である。この重力波検出器では、干渉計を構成する 鏡を 20 K の低温に冷却するとともに、高出力レー ザー光源を用い、干渉計方式を RSE と呼ばれる方式 を採用する事で、TAMA より 2 桁以上高い感度が実 現される。それによって、連星合体からの重力波に ついては約 200 Mpc 遠方のイベントまで観測する事 ができる見込みである。その範囲にある銀河数を考 慮すると、1 年に 10 回程度の頻度で重力波イベント を観測できることが期待できる。また、もし我々の 銀河系内で超新星爆発が発生すれば、そこからの重 力波も、LCGT によって十分観測可能である。

現在、LCGTの具体的な設計と、その実現のための要素技術の研究開発が日本の各機関で精力的に進められている。その中で、当研究室では、高性能防振装置の開発、干渉計方式の最適化の研究、干渉計制御方式の研究などが行なわれている。[19,46]

## 6.3.2 宇宙空間レーザー干渉計

#### 宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO

DECIGO(DECi-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory) は、日本のグループが中心となっ て進めている宇宙空間重力波望遠鏡計画である。DE-CIGO は、互いに 1000 km 離れた 3 台のスペースク ラフト内に収められた鏡の間の距離をレーザー干渉 計を用いて精密に測定することで重力波を観測する 装置である。DECIGO は、連星中性子星や連星ブ ラックホールの合体現象に関してはほぼ宇宙全体を 観測範囲に持ち、また、初期宇宙で発生した重力波 を直接捕らえることができるだけの感度を持つ、非 常に強力な観測装置になるはずである。

DECIGOで得られる知見としては、初期宇宙からの重力波を観測することで得られる、インフレーションなどの宇宙創成期に対する知見、遠方の連星からの重力波を観測することで得られる、宇宙の加速膨張やダークエネルギーに対する知見、ブラックホール連星からの重力波を観測することで得られる、巨大ブラックホールの形成に対する知見などがある。これらの知見は従来の電磁波による観測では得ることのできないもの、もしくは、電磁波による観測とは相補的な知見になることが期待されている。

DECIGO は、2025 年ごろの観測を目指して、検 討が進められている。[8, 9, 24, 27, 35, 37, 48]

#### DECIGO パスファインダー

宇宙空間レーザー干渉計型重力波検出器 DECIGO のような大型のミッションを実現させるためには、地 上での入念な試験と共に、宇宙でしかできない試験を 行うことや、各要素技術を宇宙実証することも不可欠 である。そこで、DECIGO グループでは、DECIGO パスファインダー(DPF)と呼ばれる小型衛星を打ち 上げ、軌道上での各種試験を行うと共に、実際の重 力波観測も行うことも目指している。

DPF では、高度 500 km の地球周回軌道 (太陽同期 極軌道) に投入される 300 kg 級の小型衛星を想定し ている。衛星内にはミッション機器として、ドラッグ フリー制御によって衛星内に非接触保持された2つ の試験質量(鏡)と安定化レーザー光源、小型・低雑 音スラスタを搭載する。これらの鏡で構成された基 線長 30 cm のファブリ・ペロー干渉計の基線長変化 を、安定化 Nd:YAG レーザー光源を用いて測定する ことで、0.1-1 Hz 付近での重力波観測を行う。DPF がターゲットとする周波数帯では、地上検出器では 観測することのできないため、これまでに実際に重 力波を観測した例は無い。その一方で、銀河中心ブ ラックホールの準固有振動や、中間質量ブラックホー ル合体からの重力波は、この周波数帯で放射されて いることが予想されている。従って、DPF で得られ た観測結果は、これまでにない貴重なものになると 期待できる。

その一方で、DPFで用いられる技術は、安定な宇 宙環境と安定なレーザー干渉計を用いた精密計測・制 御技術、ドラッグフリー技術などであり、宇宙空間 を用いた精密基礎物理実験、安定な時間・周波数基 準、地球重力観測や、ドラッグフリーを用いたフォー メーションフライト技術などへの広い応用が考えら れる。[12, 23, 25, 28, 36, 50, 51, 52]

#### 小型重力波検出器 SWIM<sub>uv</sub>

SWIM (SpaceWire Interface demonstration Module) は、次世代の宇宙用通信規格 SpaceWire を持っ た汎用小型演算処理・制御システムであり、2008 年 度打上予定の小型実証衛星 (SDS-I) への搭載に向け て開発が進められている。

我々は、このSWIMの超小型宇宙実験プラットホーム開発の一環として、超小型重力波検出器(SWIM<sub>μν</sub>)の開発を進めている。この超小型重力波検出器は、小型であるために実際の重力波観測に十分な感度は実現できないが、試験質量変動の検出や非接触制御など、将来の本格的な検出器と同様を実証試験をする最初のステップとなる。

SWIM<sub>µν</sub>は、80mm 立方程度の大きさのモジュー ル2つと制御用基板で構成されている。各モジュー ル内には、長さ50mm, 質量50g 程度の試験質量が 非接触保持されており、その試験質量とフレームと の間の距離をフォトセンサーで読み取ることによっ て、衛星と試験質量の間の相対変動を検出できるよ うになっている。2つのモジュール内の試験質量は互 いに直交する方向に配置されており、重力波によっ てそれらが差動回転変動する効果を観測する、とい うのが重力波検出の原理になる。

現時点までに、衛星搭載品の製作と総合試験が完 了しており、衛星本体との結合試験と、衛星全体で の総合試験を控えている。[26, 31, 49]

#### SWIM-信号処理系開発

重力波検出器 SWIM<sub>µν</sub> は、基板上の FPGA に実 装されたデジタルフィルターによって試験質量を浮 上制御するが、地上からのコマンドを受けた検出器 の動作や状態診断、データレコーダへの観測データ の記録などは、SWIM<sub>µν</sub> が接続している宇宙用小型 コンピュータ、「SpaceCube2」が行う。

そこで、JAXA/ISAS や牧島研究室、各メーカの 協力のもと、SpaceCube2 搭載用オンボードソフト ウェアの開発を行った。このソフトウェアは、リアル タイム OS「T-Kernel」上で動作するマルチタスクプ ログラムで、SpaceCube2 上でのユーザ環境を提供す るミドルウェア「uRXCE」や、SpaceWire RMAP を実現するライブラリ「RmapHongo」を利用しつつ 動作する。これらは、今後の小型衛星で標準となっ ていくであろう、モジュール化の考え方を積極的に 取り入れた思想で設計されたものである。

ソフトウェアの開発はすでに終了し、重力波検出 器が生成したデータを適切に処理できることを確認 した。また、SpaceWireの大きな特徴であるダイナ ミックルーティングを実現するため、地上からのコ マンドにより重力波検出器への通信経路を変更できる機能を組み込み、実機での動作試験にも成功した。 [21]

SWIM-制御系開発

SWIM<sub>µν</sub>では試験質量の非接触支持をフィードバック制御で実現している。本年度は、FPGA によるデジタルフィルターの開発と開発したデジタルフィルターによる制御特性評価を行った。結果、我々は PDフィルターを FPGA に実装することに成功し、地上の特性評価で回転方向が UGF~ 3Hz、縦方向が UGF~60Hz の試験質量制御の実現を確認した。また、このとき制御後の変動は  $10^{-8}$ [m/Hz<sup>1/2</sup>] 程度であった。[40]

#### SWIM-気球実験・航空機実験

重力波検出器 SWIM<sub>uv</sub> は、磁気浮上を用いたね じれ型重力波検出器という特性上、地上の重力下で はセンサーの制御をかけることができない。そのた め、JAXA/ISAS が研究中である高高度気球を用い た無重力実験機「BOV」(Balloon-based Operation Vehicle)の内部搭載実験装置として、本センサーの プロトタイプ実験を行うことを計画した。この実験 は、BOV の内部にある無重力落下部に SWIM<sub> $\mu\nu$ </sub>の センサーを搭載し、 $1.SWIM_{\mu\nu}$ の無重力制御試験を 行う、2.BOV 無重力実験部の無重力品質評価を行う、 3.SpaceCube/SpaceWire を用いたデータ取得のフラ イト実証を行う、という目的をもつ。実験装置は直径 27cm の球形・約 7.5kg で、その内部に SWIM<sub>uv</sub> セン サー、電源系、通信系、熱制御系、データ取得系など の機能が詰め込まれている。重力波検出器 SWIM<sub>ルル</sub> は高精度加速度計としての側面も持つが、この装置 では10Hz において $2 \times 10^{-5}$ ms<sup>-2</sup>/Hz<sup>1/2</sup>という、市 販加速度計の10倍の加速度感度を持つことを確認 した。



図 6.3.21: SWIM<sub>µν</sub> センサー部フライトモデルの航 空機弾道飛行による無重力実証実験 しかし、BOV4 号機は天候不良のため実験が延期と なった。このため、JAXA/ISAS などの協力のもと、 航空機の弾道飛行による無重力実験に参加した。こ の実験は、航空機内に気球用に製作した実験装置を持 ち込み、弾道飛行中に機内に浮遊させることにより、 高品質な無重力を得るものである。2 日間、計 20 回 の弾道飛行による実験の結果、延べ 64 秒間、最長 6.0 秒連続の浮遊に成功した。これにより、1.SWIM<sub>μν</sub> フライト品の無重力下での制御が想定どおり行われ た、2.浮遊によって航空機の残留加速度の影響を取り 除くことに成功した、といった成果を得た。[33, 34]

#### 6.3.3 磁気浮上重力波検出器の開発

#### 超伝導磁気浮上重力波検出器の開発

我々は低周波 (0.1-1Hz) 領域に感度を持つ新しい 重力波検出器の開発を進めている。開発している検 出器は、直交する方向に配置した2つの棒状回転子 が重力波による潮汐力で差動回転する効果から重力 波を検出するものである。特に、棒状回転子を超伝 導ピン止め効果により非接触支持することで、回転 に非常にやわらかい系を実現している。本年度は、 真空中での安定な超伝導ピン止め浮上系の開発、及 び回転変動精密測定のためのレーザー干渉計構築を 行った。現在、長さ 40cm の棒状回転子により重力 波の歪に対する感度 1.8×10<sup>-9</sup> [Hz<sup>-1/2</sup>]@0.1Hz を実 現している。この周波数帯域では世界最高感度であ る。[13, 20, 29, 32, 39]

#### 永久磁石を利用した磁気浮上の研究

高性能防振装置を使用した場合、振動振幅が微小 であるため、支持に用いるワイヤーの内部摩擦や弾 性の影響で防振比が制限されてしまう場合がある。 そこで、本研究室では、永久磁石を用いて、被防振 体を非接触で浮上支持することで、摩擦や、弾性に よる復元力の影響を排除した高性能防振装置の開発 を行っている。その結果、25-400g程度の質量を持 つマスを、安定に浮上支持し、その安定性や制御特 性の評価、性能の向上実験を行った。

#### 6.3.4 精密計測の研究

#### 光ファイバーを用いたレーザー安定化

LCGT のような大型干渉計の光学素子の変動を抑 えるための制御や DECIGO のような宇宙干渉計で は、アラインメントのずれの影響を受けにくく、かつ 高い安定度を持つレーザー光源が不可欠となる。そ こで、当研究室では光ファイバ光学系を用いたレー ザーの安定化実験を行なっている。レーザー光源や 安定化のためのレファレンス共振器等を全て光ファ イバを用いて構成することで、環境の変化や外乱に 対する耐性の強い安定化光源が実現できる事が期待 できるのである。

当研究室では、光ファイバで構成された光共振器を 基準として光ファイバ結合のレーザー光源の周波数を 安定化する実験、また、光ファイバ結合された音響光 学変調器 (AOM)を用いた光強度安定化実験を行なっ ている。この研究の結果、従来の空間光を用いた方法 では制御の難しかった 1Hz 帯において、周波数・強度 をそれぞれ 20Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ,  $3 \times 10^{-7}/\sqrt{\text{Hz}}$  まで安定化す ることに成功した。周波数安定化に関しては、NASA, ESA の宇宙干渉計計画である LISA の 1Hz における 要求を満たす値である。現在, さらなる安定化の向上 に向けて研究を継続中である。[7, 11, 14, 22, 30, 38]

### 6.3.5 熱雑音の研究

#### 宇宙重力波検出器における熱雑音の研究

宇宙空間レーザー干渉計重力波検出器 DECIGO は、地上のレーザー干渉計では検出困難な低周波数 領域の重力波を観測することを目的としている。

DECIGO の場合、低周波数帯の感度を制限する要 因として加速度雑音、輻射圧雑音、鏡の熱雑音などが あげられる。これらのいずれもが鏡の質量が大きく することによって低減することができる。そのため、 打ち上げに問題がない範囲で鏡を重くする必要があ る。実際、DECIGO の鏡は直径 1m、質量 100kg と いう大きなものを予定している。このような大きな 鏡の熱雑音については前例が無く熱雑音がどの程度 になるのかを調べる必要があるため、溶融石英で直 径 1m の一枚鏡を作成したときの鏡の熱雑音につい て数値シミュレーションにより推定し、そのときに DECIGO の目標感度を達成するために必要な Q 値 を見積もった。また、このように大型の鏡を1枚鏡 として作成するのは困難であるから複合鏡の可能性 も考えた。複合鏡にする場合、鏡同士の接触面にお ける機械損失が問題となる。そのため、接触面の機 械損失を知るひとつの例として熱はめという手法を 取り入れ、単体のときと熱はめしたときの鏡材料の Q値を測定し接触面による機械損失がどの程度であ るかを見積もった。以上の研究を修士論文としてま とめた。[3, 10, 15, 47]

#### <受賞>

- [1] 麻生洋一, GWIC Thesis Prize, GWIC (Gravitational Wave International Committee), 2007 年.
- [2] 沼田健司,日本物理学会若手奨励賞,日本物理学会, 2007年.

#### <報文>

#### (原著論文)

[3] Kazuhiro Yamamoto, Masaki Ando, Keita Kawabe, and Kimio Tsubono: Theoretical approach to thermal noise caused by an inhomogeneously distributed loss: Physical insight by the advanced modal expansion, Phys. Rev. D 75-8 (2007) 082002.

- [4] K. Ishidoshiro, M. Ando, K. Tsubono, N. Kanda, H. Takahashi, and the TAMA Collaboration: Systematical veto by all monitor signals in a gravitational-wave detector, Class. Quantum Grav. 24 (2007) S405-S413.
- [5] D. Tatsumi, R. Takahashi, K. Arai, N. Nakagawa, K. Agatsuma, T. Yamazaki, M. Fukushima, M. Fujimoto, A. Takamori, A. Bertolini, V. Sannibale, R. DeSalvo, S. Marka, M. Ando, K. Tsubono, T. Akutsu, K. Yamamoto, H. Ishitsuka, T. Uchiyama, S. Miyoki, M. Ohashi, K. Kuroda, N. Awaya, N. Kanda, A. Araya, S. Telada, T. Tomaru, T. Haruyama, A. Yamamoto, N. Sato, T. Suzuki and T. Shintomi: Current status of Japanese detectors, Class. Quantum Grav. **24** (2007) S399-S403.
- [6] R Takahashi, K Arai, D Tatsumi, M Fukushima, T Yamazaki, M-K Fujimoto, K Agatsuma, Y Arase, N Nakagawa, A Takamori, K Tsubono, R De-Salvo, A Bertolini, S M ´arka, V Sannibale and the TAMA Collaboration, Operational status of TAMA300 with the Seismic Attenuation System (SAS), Class. Quantum Grav. (in press).
- [7] Kakeru Takahashi, Masaki Ando and Kimio Tsubono, Stabilization of Laser Intensity and Frequency Using Optical Fiber, Class. Quantum Grav. (in press).

#### (会議抄録)

- [8] 安東 正樹,川村 静児,中村 卓史,坪野 公夫,瀬戸 直 樹,その他 DECIGO ワーキンググループ:スペース 重力波アンテナ DECIGO 計画,第6回宇宙科学シン ポジウム (2008 年1月9日 宇宙科学研究本部 相模 原,神奈川).
- [9] 安東 正樹,川村 静児,DECIGO ワーキンググループ:宇宙重力波望遠鏡 DECIGO,低推力・連続加速を用いた宇宙ミッションに関する研究会 (2007 年 11月2日東京国際フォーラム,有楽町).
- (学位論文)
- [10] 小野里光司:鏡材料接合面の機械損失に関する研究、 修士論文、2008年.
- [11] 高橋走:宇宙重力波検出器用レーザー光源の光ファイ バーを用いた安定化、修士論文、2008年.

一般講演

- [12] Masaki Ando and DECIGO Pathfinder working Group: DECIGO Pathfinder, International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (Sept. 11, 2007, Sendai, Japan ).
- [13] Masaki ANDO, Koji Ishidoshiro, Wataru Kokuyama, Akiteru Takamori, Akito Araya, Kimio Tsubono: Development of a Low-Frequency Gravitational-Wave Detector Using Superconductor Magnets, 7th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (July 8-14, 2007, Sydney, Australia).

<sup>&</sup>lt;学術講演>

<sup>(</sup>国際会議)

[14] Kakeru Takahashi, Masaki Ando, Kimio Tsubono, Stabilization of Laser Intensity and Frequency Using Optical Fiber, 7th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (July 8-14, 2007, Sydney, Australia).

#### 招待講演

- [15] K. Tsubono: Thermal Noise in Gravitational-Wave experiments, The 21COE International Symposium on the Linear Response Theory in Commemoration of its 50th Anniversary (Nov. 6, 2007, Univ. of Tokyo, Koshiba hall)
- [16] Masaki Ando: Gravitational-wave experiments, Accelerators in the Universe (March 13, 2008, KEK, Tsukuba).

#### (国内会議)

一般講演

- [17] 高橋竜太郎,我妻一博,荒瀬勇太,福嶋美津広,山崎 利孝,辰巳大輔,新井宏二,中川憲保,高森昭光,A. Bertolini,R. DeSalvo,佐藤修一,麻生洋一,阿久 津智忠,常定芳基,長野重夫,安東正樹,三代木伸二, 森脇成典,神田展行,武者満,藤本眞克,川村静児, 三尾典克,大橋正健,黒田和明,坪野公夫,TAMA Collaboration,干渉計型重力波検出器 TAMA300開 発の現状 XIX(低周波防振装置),日本物理学会 2008 年年次大会(2008年3月、近畿大学、東大阪).
- [18] 新井宏二,辰巳大輔,高橋竜太郎,和泉究,我妻一博, 荒瀬勇太,若林野花,福嶋美津広,山崎利孝,石崎秀 晴,中川憲保,高森昭光,A.Bertolini,R.DeSalvo, 佐藤修一,麻生洋一,阿久津智忠,常定芳基,長野重 夫,安東正樹,三代木伸二,森脇成典,神田展行,武 者満,藤本眞克,川村静児,三尾典克,大橋正健,黒 田和明,坪野公夫,TAMA Collaboration,干渉計型 重力波検出器 TAMA300 開発の現状 XX(干渉計開 発),日本物理学会 2008 年年次大会(2008 年 3 月、 近畿大学、東大阪).
- [19] 黒田和明, 大橋正健, 三代木伸二, 内山隆, 石塚秀 喜,岡田淳,徳成正雄,阿久津朋美,我妻一博,森岡 友子,斉藤陽紀,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,石崎秀晴 , 瀬戸直樹 , 山本明 , 齊 藤芳男,春山富義,鈴木敏一,木村誠宏,佐藤伸明, 都丸隆行,坪野公夫,安東正樹,高城毅,石徹白晃 治,高橋走,小野里光司,穀山渉,米田仁紀,中川 賢一,武者満,三尾典克,森脇成典,新谷昌人,高 森昭光,阿久津智忠,荒瀬勇太,和泉究,神田展行, 寺田聡一,高辻利之,尾藤洋一,長野重夫,田越秀 行,藤田龍一,中村卓史,田中貴浩,佐々木節,西澤 篤志,阪田紫帆里,川添史子,苔山圭以子,西田恵里 奈,柴田大,新冨孝和,高橋弘毅,宗宮健太郎,山元 一広, Archana Pai, Yanbei Chen, 河邊径太, 宮川 治, M.E.Tobar, D. Blair, JuLi, Chunnong Zhao, Linqing Wen, Warren Johnson, 端山和大, 中野寛 之, Zong-Hong Zhu, S. Dhurandhar, S. Mitra, H. Muckhopadhyay, V. Milyukov, L. Baggio, Yang Zhang, Chao-Guang Huang, Wei-Tou Ni, Sheau-Shi Pan, Sheng-Jui Chen, 沼田健司, 麻生洋一, 佐

合紀親,大型低温重力波望遠鏡(LCGT)計画IX,日本物理学会2008年年次大会(2008年3月、近畿大学、東大阪).

- [20] 石徹白晃治,安東正樹,高森昭光,坪野公夫,磁気浮 上を利用した低周波重力波検出器の開発 II,日本物 理学会 2008 年年次大会(2008 年 3 月、近畿大学、東 大阪).
- [21] 穀山渉,安東正樹,森脇成典,石徹白晃治,新谷昌人, 麻生洋一,高島健,中澤知洋,高橋忠幸,国分紀秀, 吉光徹雄,小高裕和,湯浅孝行,石川毅彦,榎戸輝 揚,苔山圭以子,坂井真一郎,佐藤修一,高森昭光, 高橋走,坪野公夫,戸田知朗,橋本樹明,松岡彩子, 宇宙実験実証プラットホーム(SWIM)を用いた超小 型重力波検出器の開発 V(試験の現状),日本物理 学会 2008 年年次大会(2008 年 3 月、近畿大学、東 大阪).
- [22] 高橋走,安東正樹,坪野公夫,光ファイバーを用いた レーザー光源の強度・周波数安定化V,日本物理学会 2008年年次大会(2008年3月、近畿大学、東大阪).
- [23] 安東正樹,川村静児,中村卓史,坪野公夫,田中貴浩,船木一幸,瀬戸直樹,その他DECIGOワーキン ググループ,スペース重力波アンテナDECIGO計画 XIII(設計・計画・パスファインダー),日本物理学会 2008年年次大会(2008年3月、近畿大学、東大阪).
- [24] 瀬戸直樹,川村静児,安東正樹,中村卓史,坪野公 夫,田中貴浩,船木一幸,その他 DECIGO ワーキン ググループ,スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 XIV(サイエンス),日本物理学会2008年年次大会 (2008年3月、近畿大学、東大阪).
- [25] 安東正樹,川村静児,高橋龍一,中村卓史,坪野公 夫,田中貴浩,瀬戸直樹,沼田健司,その他 DECIGO ワーキンググループ:小型重力波観測衛星 DPF,宇 宙科学シンポジウム (2008 年1月9日,宇宙科学研 究本部).
- [26] 穀山渉,安東正樹,森脇成典,石徹白晃治,高橋走, 新谷昌人,麻生洋一,高島健,中澤知洋,高橋忠幸, 国分紀秀,吉光徹雄,小高裕和,湯浅孝行,石川毅 彦,榎戸輝揚,川浪徹,苔山圭以子,坂井真一郎, 佐藤修一,高森昭光,坪野公夫,戸田知朗,橋本樹 明,松岡彩子,野海俊文,澤木了,稲富裕光,門岡 昇平,小林弘明,澤井秀次郎,清水成人,坂東信 尚,福島玄三,伊藤正光:SWIM 搭載にむけた超小 型重力波検出器の開発 第8回宇宙科学シンポジウ ム(2008年1月9日、JAXA宇宙科学研究本部).
- [27] 安東正樹,川村静児,高橋龍一,中村卓史,坪野公夫,田中貴浩,瀬戸直樹,沼田健司,船木一幸,その他 DECIGO ワーキンググループ:宇宙重力波望遠鏡 DECIGO,低推力・連続加速を用いた宇宙ミッションに関する研究会(2007年11月2日東京国際フォーラム,有楽町).
- [28] 安東正樹,川村静児,高橋龍一,中村卓史,坪野公夫, 田中貴浩,瀬戸直樹,沼田健司,船木一幸,その他 DECIGO ワーキンググループ:小型重力波観測衛星 (DPF)合同研究発表会(2007年11月2日,JAXA 総合技術研究本部,筑波).
- [29] 石徹白 晃治, 安東 正樹, 高森 昭光, 坪野公夫, 超伝導 磁気浮上を用いた低周波重力波検出器の開発 II, 「高

エネルギー天体現象と重力波」研究会 (2007 年 11 月, 東京大学).

- [30] 高橋 走, 安東 正樹, 坪野 公夫, 宇宙重力波検出器用 レーザー光源の光ファイバーを用いた安定化,「高エ ネルギー天体現象と重力波」研究会(2007 年 11 月, 東京大学).
- [31] 穀山 渉, 安東 正樹, 森脇 成典,石徹白 晃治,高橋 走,新谷 昌人,麻生 洋一,高島健,中澤 知洋,高橋 忠幸,国分 紀秀,吉光 徹雄,小高 裕和,湯浅 孝行, 石川 毅彦,榎戸 輝揚,川浪 徹,苔山 圭以子,坂井 真一郎,佐藤 修一,高森 昭光,坪野 公夫,戸田 知 朗,橋本 樹明,松岡 彩子,野海 俊文,澤木 了:衛 星搭載用 超小型重力波検出器の開発「高エネルギー 天体現象と重力波」研究会(2007年11月17日、東 京大学).
- [32] 石徹白 晃治, 超伝導磁気浮上を用いた低周波重力波 検出器の開発,「極限量子系とその対称性」シンポジ ウム 2007, 2007 年 11 月, 東京大学.
- [33] 安東正樹, 穀山 渉: BOV4 号機 中子系, BOV4 号機 結果検討会 (2007 年 10 月 4 日、JAXA 宇宙科学研 究本部).
- [34] 穀山 渉, 安東正樹: BOV4 号機 中子系, BOV4 号機 結果検討会 (2007 年 10 月 4 日、JAXA 宇宙科学研 究本部).
- [35] 川村静児,安東正樹,瀬戸直樹,中村卓史,坪野公夫, 田中貴浩,船木一幸,沼田健司,その他DECIGOワー キンググループ,スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 X(設計・計画),日本物理学会2007年年次大 会(2007年9月、北海道大学、札幌).
- [36] 安東正樹,川村静児,瀬戸直樹,中村卓史,坪野公夫, 田中貴浩,船木一幸,沼田健司,その他DECIGOワー キンググループ,スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 XII(パスファインダー),日本物理学会2007 年年次大会(2007年9月、北海道大学、札幌).
- [37] 瀬戸直樹,川村静児,安東正樹,中村卓史,坪野公夫, 田中貴浩,船木一幸,沼田健司,その他DECIGOワー キンググループ,スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 XI(サイエンス),日本物理学会2007年年次大 会(2007年9月、北海道大学、札幌).
- [38] 高橋走,安東正樹,坪野公夫,光ファイバーを用いた レーザー光源の強度・周波数安定化 IV,日本物理学会 2007 年年次大会(2007 年 9 月、北海道大学、札幌).
- [39] 石徹白晃治,安東正樹,小野里光司,穀山渉,高森昭光,坪野公夫,磁気浮上を利用した捩れ型重力波検出器の開発,日本物理学会2007年年次大会(2007年9月、北海道大学、札幌).
- [40] 穀山渉,安東正樹,森脇成典,石徹白晃治,新谷昌人,麻生洋一,高島健,中澤知洋,高橋忠幸,国分紀秀,吉光徹雄,小高裕和,湯浅孝行,石川毅彦,榎戸輝揚,川浪徹,苔山圭以子,坂井真一郎,佐藤修一澤木了,高森昭光,高橋走,坪野公夫,戸田知朗,野海俊文,橋本樹明,松岡彩子,宇宙実験実証プラットホーム(SWIM)を用いた超小型重力波検出器の開発IV(現状),日本物理学会2007年年次大会(2007年9月、北海道大学、札幌).

- [41] 高橋竜太郎,我妻一博,荒瀬勇太,福嶋美津広,山崎 利孝,石崎秀晴,辰巳大輔,新井宏二,和泉究,中川 憲保,高森昭光,A.Bertolini,R.DeSalvo,佐藤修 一,麻生洋一,阿久津智忠,常定芳基,長野重夫,安 東正樹,三代木伸二,森脇成典,神田展行,武者満, 藤本眞克,川村静児,三尾典克,大橋正健,黒田和 明,坪野公夫,TAMA Collaboration,干渉計型重 力波検出器 TAMA300 開発の現状 XIV(低周波防振 装置1),日本物理学会 2007 年年次大会(2007 年 9 月、北海道大学、札幌).
- [42] 我妻一博,高橋竜太郎,荒瀬勇太,福嶋美津広,山崎 利孝,石崎秀晴,新井宏二,辰巳大輔,和泉究,高 森昭光,A.Bertolini,R.DeSalvo,佐藤修一,麻生 洋一,阿久津智忠,常定芳基,長野重夫,安東正樹, 三代木伸二,森脇成典,神田展行,武者満,藤本眞 克,川村静児,三尾典克,大橋正健,黒田和明,坪 野公夫,TAMA Collaboration,干渉計型重力波検出 器 TAMA300 開発の現状 XV(低周波防振装置2), 日本物理学会2007年年次大会(2007年9月、北海 道大学、札幌).
- [43] 荒瀬勇太,高橋竜太郎,我妻一博,福嶋美津広,山 崎利孝,石崎秀晴,新井宏二,辰巳大輔,和泉究,高 森昭光,A. Bertolini,R. DeSalvo,佐藤修一,麻生 洋一,阿久津智忠,常定芳基,長野重夫,安東正樹, 三代木伸二,森脇成典,神田展行,武者満,藤本眞 克,川村静児,三尾典克,大橋正健,黒田和明,坪野 公夫,TAMA Collaboration,干渉計型重力波検出器 TAMA300開発の現状 XVI(低周波防振装置3),日 本物理学会2007年年次大会(2007年9月、北海道 大学、札幌).
- [44] 辰巳大輔,新井宏二,和泉究,高橋竜太郎,我妻一 博,荒瀬勇太,福嶋美津広,山崎利孝,石崎秀晴,高 森昭光,A. Bertolini,R. DeSalvo,佐藤修一,麻生 洋一,阿久津智忠,常定芳基,長野重夫,安東正樹, 三代木伸二,森脇成典,神田展行,武者満,藤本眞 克,川村静児,三尾典克,大橋正健,黒田和明,坪野 公夫,TAMA Collaboration,干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 XVII (回路系改良),日本物 理学会 2007 年年次大会(2007 年 9 月、北海道大学、 札幌).
- [45] 新井宏二,辰巳大輔,和泉究,高橋竜太郎,我妻一 博,荒瀬勇太,福嶋美津広,山崎利孝,石崎秀晴,高 森昭光,A.Bertolini,R.DeSalvo,佐藤修一,麻生 洋一,阿久津智忠,常定芳基,長野重夫,安東正樹, 三代木伸二,森脇成典,神田展行,武者満,藤本眞 克,川村静児,三尾典克,大橋正健,黒田和明,坪野 公夫,TAMA Collaboration,干渉計型重力波検出器 TAMA300開発の現状 XVIII(干渉計開発),日本物 理学会 2007年年次大会(2007年9月、北海道大学、 札幌).
- [46] 黒田和明,大橋正健,三代木伸二,内山隆,石塚秀喜, 山元一広,岡田淳,徳成正雄,阿久津朋美,我妻一博, 森岡友子,斉藤陽紀,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,石崎秀晴,山本明,斎藤芳男,春 山富義,鈴木敏一,木村誠宏,佐藤伸明,都丸隆行, 坪野公夫,安東正樹,高城毅,石徹白晃治,高橋走, 小野里光司,穀山渉,米田仁紀,中川賢一,武者満,

三尾典克,森脇成典,新谷昌人,高森昭光,阿久津智 忠,荒瀬勇太,和泉究,神田展行,寺田聡一,高辻利 之,尾藤洋一,長野重夫,田越秀行,藤田龍一,中村 卓史,田中貴浩,佐々木節,西澤篤志,阪田紫帆里, 川添史子,苔山圭以子,西田恵里奈,柴田大,新冨孝 和,宗宮健太郎,高橋弘毅,,Yanbei Chen,Archana Pai,Linqing Wen,河邊径太,宮川治,M.E.Tobar, D.Blair,JuLi,Chunnong Zhao,端山和大,中野寬 之,Zong-Hong Zhu,S.Dhurandhar,S.Mitra,H. Muckhopadhyay,V.Milyukov,L.Baggio,Yang Zhang,Chao-Guang Huang,沼田健司,麻生洋一, 佐合紀親,大型低温重力波望遠鏡(LCGT)計画XIII, 日本物理学会2007年年次大会(2007年9月、北海 道大学、札幌).

- [47] 小野里光司,安東正樹,大塚茂巳,坪野公夫,沼田健司,山元一広,山崎利孝,重力波検出器における複合 鏡接合面の機械損失,日本物理学会2007年年次大会 (2007年9月、北海道大学、札幌).
- [48] 安東正樹,川村静児,高橋龍一,中村卓史,坪野公夫,田中貴浩,瀬戸直樹,沼田健司,船木一幸,その他 DECIGO ワーキンググループ:宇宙重力波望遠鏡 DECIGO,スペースウィーク 2007 フォーメーション フライトワークショップ (2007 年 6 月 26 日 JAXA 総合技術研究本部,筑波).
- [49] 安東 正樹,高島健,森脇成典,石徹白 晃治,穀山 渉,新谷 昌人,麻生洋一,中澤 知洋,高橋 忠幸, 国分 紀秀,吉光 徹雄,小高 裕和,湯浅 孝行,石川 毅彦,榎戸輝揚,川浪 徹,苔山 圭以子,坂井 真一 郎,佐藤 修一,高森 昭光,坪野 公夫,戸田 知朗, 橋本 樹明,松岡 彩子:宇宙実験実証プラットホーム (SWIM)を用いた超小型重力波検出器の開発,日本地 球惑星科学連合 2007 年大会 (2007 年 5 月 23 日,幕 張メッセ 国際会議場,幕張).
- [50] 安東正樹,川村静児,船木一幸,高島健,坂井真一郎, その他 DECIGO ワーキンググループ:小型重力波検 出器 DECIGO パスファインダー,第5回 DECIGO ワークショップ (2007年4月18日,国立天文台・解 析研究棟・大セミナー室,三鷹).
- [51] 安東正樹,川村静児,船木一幸,高島健,坂井真一郎,その他 DECIGO ワーキンググループ:DECIGO パスファインダー 干渉計,第5回 DECIGO ワークショップ (2007年4月18日,国立天文台・解析研究棟・大セミナー室,三鷹).
- [52] 安東正樹,川村静児,船木一幸,高島健,坂井真一郎,神田展行,佐藤修一,植田憲一,武者満,森脇成典,田中貴浩,山川宏,その他 DECIGO ワーキング グループ:小型重力波検出器 DECIGO パスファイン ダー,小型科学衛星 WG 第1回研究会 (2007 年 4 月 13 日 JAXA 宇宙科学研究本部,相模原).

#### 招待講演

 [53] 安東 正樹: 重力波天文学, 日本学術会議シンポジウム
 「天文学・宇宙物理学の展望」 (2007 年 12 月 28 日, 日本学術会議講堂, 東京).

# 6.4 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い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。

2007 年度は、村山能宏助教が 2008 年 2 月 1 日付 けで、東京農工大へ准教授として転出した。

#### **6.4.1** 非線形非平衡系の物理

非平衡系の相転移:Directed Percolation 転移の 動的臨界現象の普遍性

吸収状態、すなわち入ったら二度と出られない状 態への相転移は多種多様の非平衡系に偏在する現象 であり、そこで見られる臨界現象は非常にロバスト な普遍性を示すことが数値的・理論的によく知られて いる。実験的には、吸収状態相転移の最も基本的な クラスである Directed Percolation (DP) クラスでさ え十分な実証がなかったのだが、当研究室において、 液晶電気対流系における乱流間転移 (DSM1-DSM2 転移)の静的臨界指数が全て DP と一致し、従ってこ の乱流間転移が疑いなく DP クラスに属するという ことが発見された [3, 17, 19, 47, 48, 49, 50]。

一方で、DSM1-DSM2 転移の動的臨界現象の検証 は未完である。動的臨界現象の普遍性は非平衡相転 移の特徴であり、活性状態の核成長に伴って定義さ れる動的臨界指数  $\beta'$ を測定することで DP クラスが もつとされる rapidity 対称性  $\beta' = \beta$  を実験的に検証 することには大いなる意義がある。我々は、この動 的臨界指数  $\beta'$  が DSM1-DSM2 転移の示すヒステリ シスから間接的に測定可能であることを示した。実 験的に観測されるヒステリシスは吸収状態転移に自 発生成を付加した数値モデルで大変よく再現され、 rapidity 対称性を仮定した場合の振る舞いと定量的 に一致した。さらに、ヒステリシスの臨界現象から DP 以外のクラスでも指数  $\beta'$  が測定可能であり、他 の実験系においても吸収状態転移の有用な測定手段 となりうることを示した [5, 18, 47, 48, 49, 50]。



図 6.4.22: 吸収状態転移におけるヒステリシス臨界現象。 稀な自発生成の下ではパラメータの掃引速度 r とヒステリ シスの幅  $\Delta$  が冪関係にあり、臨界指数はクラスによって 異なる (a:DP クラス、b:voter クラス) [5]。

DSM1-DSM2 転移の動的臨界現象の実験による直 接測定も行っており、活性状態である DSM2 乱流を レーザーにより人工的に核生成することに成功した。 臨界現象の検証は進行中であるが、DP クラスと矛 盾しない結果が得られている。

#### 散逸粒子系の動力学

粉体粒子などマクロな粒子の多体系ではエネルギー 保存が成り立たず、有効な構成方程式も存在しない。 このような系を散逸粒子系と呼ぶ。散逸粒子系にお いて外部からのエネルギーの注入に駆動され流動化 する現象は普遍的に観察される.その性質は系の密 度,エネルギー強度によって大きく変化し,その基礎 付けを与える事はこうした流動現象を理解する上で 肝要な課題である.本研究では粉体系の流動現象の 基礎を確率することを目的の第一として研究を行っ ている。そのために1)希薄領域における統計則,2) 稠密領域における緩和現象,3)流体混相系における 動力学,の3点についての研究を行った。

#### 粉体ガスの統計則

擬 2 次元系の定常粉体ガスの巨視的な性質,及びその統計性が,系の励起頻度を表すパラメータ, $\kappa_{en} = ($ 平均励起間隔)/(平均衝突時間)によって理解される事を得た [9]。具体的には,系の詳細に関わらず速度分布関数は  $f(v) = \exp(-C |v/v_0|^{\alpha})$ の形をとり,その指数  $\alpha$  は系が十分熱化されている状態 ( $\kappa_{en} < 1$ )

において  $1.55 \pm 0.05$ , そうでない状態 ( $\kappa_{en} \simeq 1$ )に おいて  $\sim 1$  といった値をとる事が明確になった。こ れは本質的に熱的な効果が系に存在するか否かを示 唆しているが,理論的な基礎付けについて,数値計 算を通じその正当性を実証した [15, 1]。一方,理想 一様冷却粉体ガス系においては,エネルギーの減衰 が Haff 則に従い,理論とよく一致すること,そして その際の速度分布関数が指数分布になる事を実験的 に実証し,これが系の非一様性と大きく関わってい ることを示した [26, 14](図 6.4.23)。この事を通じ, 系の非一様性が統計性に及ぼす影響について明確に する事が出来た。以上の結果は前年度において行わ れた微小重力実験を通じて得られたものであり,微 小重力環境の粉体実験における理想性を利用する事



図 6.4.23: (a) 冷却粉体気体のエネルギー減衰.(b) エネ ルギー減衰の理論からのずれの時間発展.値が1であれば 完全に一致していることを示す。

#### 流体混相系における動力学

従来鉛直加振下における分散質の粒子径が小さい 懸濁液系において stable hole, delocalized hole と 呼ばれる現象が、界面の変形に誘起される新奇な不 安定性として報告されていた.本研究では鉛直加振下 のシリコンオイルとガラスビーズ懸濁液系で粒子径 が 0.05mm 0.8mm, 粘性が 100cSt, 500cSt において, 拡大する hole 解が観測され、広いパラメーター領域 で界面の不安定性が現れることが分かった.またポテ トスターチ懸濁液系では,次々を分裂を繰り返す hole 解が観測された.現在さまざまなパラメーターに対す る界面の安定・不安定性についての相図を得ている [28]. 今後の課題は,不安定性が起こる機構の解明と モデルの確立をすることであり、研究を進めている.

#### 稠密粉体系の遅い緩和

稠密粉体系において,密度の増加に伴い遅い緩和 現象が観察される事がわかっている.我々の研究を 含む先行研究 [9] を通じ,粉体系においても外部の エネルギー印加に従って系が熱的に振舞うことがわ かっているが,密度の増加は粒子配置について非自



図 6.4.24: 混相系における分裂する hole 解

明な競合を生み出し,系の"熱的"な性質のみでは規 定できない奇妙な振る舞いを生み出す.それは外面 的には,例えば密度の時間相関関数の遅い緩和とし て表現されてきた.一般的に粉体系におけるこのよ うな性質は系の構成粒子の多分散性の結果として理 解されてきたが,我々は単分散粉体系においても似 たような遅い緩和が生み出されることを得た[27].こ の結果はまだ端緒的な結果であり,重要な物理量を 如何にうまく取り出すかが今後の重要な課題として 残されており,現在その点について研究を継続して いる.

#### 小さな非平衡定常系のエネルギー散逸率

近年、非平衡統計力学の分野においていくつかの新 しい関係式の発見があいついでいる。熱揺らぎが無視 できない小さな系において、エネルギー散逸率を測定 することは一般に困難である。しかし、最近導出され た等式を用いることで、Langevin 方程式で記述され る非平衡定常状態において、エネルギー散逸率を速度 の相関関数および応答関数といった実験で比較的得や すい量から計算することが可能であることが示された [Harada and Sasa (2005)]。この等式は当初、Markov 的な Langevin 等式に対して導かれたものであるが、 最近、Non-Markov 的な場合への拡張が Deutsche と Narayan によって行われ、一般化 Langevin 方程式 で記述される系に対して新しい等式が成立すること が分かった [Deutsch and Narayan(2006)]。この拡張 は、摩擦に時間遅れがある系でも散逸率を比較的容 易に計算可能であることを示唆しており、実験で確 認されれば非常に広範囲の応用が期待できる。

我々は、水中で直径1μmのポリスチレン粒子を光 ピンセットでトラップし、時間的にこのレーザートラ ップを駆動することで非平衡定常状態を構成し、また、 Poly(Ethylene Oxide)の高分子溶液中で同様の実験 を行い、拡張された Fluctuation Response Relation 関係式を用いてエネルギー散逸率を高い精度で測定 することに初めて成功した(図 6.4.25)。このことは 一般化 Langevin 方程式による系の記述の妥当性も 示唆している。 [8, 43]



図 6.4.25: 高分子溶液の記憶効果を表すレオロジー特性

#### 6.4.2 非平衡ソフトマターの物理

#### 非平衡を利用した新しい光トラップ

温度勾配により物質が輸送される現象は古くから 熱泳動現象として知られ、線形非平衡熱力学の教科 書に現れるトピックである。我々は水溶液中で局所的 に急激な温度勾配を形成し、しかも温度差は小さく 留めることができる方法を開発し、制御された勾配 下でナノ粒子や蛍光標識したDNAの単一粒子、単 分子の熱泳動現象を観測した。その結果、この方法 が単分子 DNA を移動させたり引き伸ばす方法とし て使えることを見出した。[3, 2, 24] さらに、溶液中 に高分子をわずかに溶解させると通常のレーザーピ ンセットではトラップできない不定形のコロイド粒 子や DNA 分子、さらには細胞までがトラップでき る現象を発見した。(図 6.4.26)。現在そのメカニズ ムの解明と熱揺らぎの中で動作する分子機械への応 用に向け、研究を進めている。[11, 45, 25]



図 6.4.26: 非平衡を利用した新しいマイクロマニピュレー ション: (a)100nm ビーズ、(b)500nm ビーズ、(c) λDNA、 (d)E. *coli* (e) 赤血球

単一 DNA 分子伸長時のエネルギー散逸

DNAは生体内で階層的に折れ畳まれており、遺 伝子発現や複製時には凝縮構造がほどかれる。高分 子鎖の変形に対し、いかなる要因がいかなる時間ス ケールで支配的なのか明らかにすることは、高分子 物理学のみでなく生物学、生物物理学においても重 要な課題である。荷電高分子鎖であるDNAは、多価 陽イオン存在下で高度に凝縮することが知られてい る。光ピンセットを用いて凝縮DNAの一分子伸長 実験を行った結果、DNA伸長時に凝縮相内部でエ ネルギー散逸が生じることを見出した(図 6.4.27)。 この時の実効的摩擦力が伸長速度に比例することか ら、力学的脱凝縮過程を Kramers タイプの二状態遷 移モデルでモデル化し、測定結果を定量的に説明で きることを示した。[1, 13, 44]



図 6.4.27: エネルギー散逸の伸長速度依存性。

AFM による一分子タンパク質の構造変性過程の観測

熱揺らぎが無視できないようなミクロな世界では、 環境の揺らぎの効果が顕著に現れ、生体分子の構造 形成や細胞内輸送などに見られるような非平衡系に 特有の多様なふるまいが存在する。このようなミク ロな系でのふるまいを支配する物理法則を理解し、 制御する方法を見出すことは重要な課題である。

本研究では、タンパク質の構造変性ダイナミクス に着目し、原子間力顕微鏡(AFM)を用いて立体構 造形成のメカニズムにかんする研究を行ってきた。 生命活動を担うタンパク質は、固有の天然構造を自 発的に形成し、構造に対応した機能を発現する。ど のようにしてタンパク質はいつも同じ天然構造を形 成するのか?という問題は、生物学における重要な 研究課題であったが、一分子レベルでの「ダイナミ クス」に関する理解はあまり進んでいないといえる。 そこでわれわれは、AFMを用いてタンパク質一分 子を伸張し、力学的に構造変性を起こすことによっ て変性の途中過程におけるタンパク質のふるまいを 詳細に調べる実験を行った。伸張に用いるタンパク 質はStaphylococcal nuclease (SNase) で、これまで 生化学的手法により、構造の形成過程や安定性の研 究がさかんに行われてきたモデルタンパク質である。 本研究の特徴として、従来の一分子実験で用いられ てきたタンデム状の巨大タンパク質ではなく、分子 量が小さく簡潔な立体構造をもつタンパク質を用い ることによってより一般的な性質を明らかにするこ とが可能なことである。

これまでの実験の結果、力学的に伸張された SNase は複数の準安定な中間構造を経て変性し、その変性経 路が確率的な性質をもつことがわかった。また、酸変 性条件下や阻害剤分子の存在下で伸張実験を行うこ とにより、それらの分子が SNase の変性経路に与え る影響を明らかにした。測定により得られた Force-Extension 曲線をモデルを用いて解析し、これまで の生化学的研究により示唆されている結果との比較 から、中間構造の同定と一分子変性経路のモデルの 提案を行った。今後は、伸張過程の性質をより定量 的に取り扱うために、伸張に要する仕事量の測定や 変性経路の伸張速度依存性について調べる実験を行 う予定である



図 6.4.28: AFM により SNase の両端を固定して伸張・ 緩和をくり返したときに見られる伸張距離-負荷応答の関 係。伸張過程において複数の中間構造が見られた。伸張 過程ごとに負荷ピークは確率的に現れているが、いくつ かの共通する中間構造が見られることが分かった。曲線 は worm-like-chain モデルによるフィッティングを表して いる。

#### 非一様な弾性を持つ高分子の折り畳み

生体高分子の多くは多種のモノマーから構成され ていて、その配列が分子全体の構造と強い相関を持 つことが知られている。このような非一様性高分子 の物理的な理解のために、ここでは、特定の高分子 の特定の配列に注目するのではなく、統計的に特徴 付けられた配列やそれに伴う不均一性が分子全体の 構造に及ぼす影響についての理解を目的としている。 具体的には、曲げ弾性の不均一性を持つ高分子を用 いて、折り畳み構造とその動力学について分子動力 学計算で調べた。硬い(曲げ弾性が大きい)ブロック と柔らかい(曲げ弾性が小さい)ブロックをつないだ プロック共重合体の折り畳み構造とそれにいたる動 力学について調べた。その結果、動力学の経路に依 存せずに、柔らかい部分の周りに硬いブロックが覆 いかぶさるようなコアシェル状の折り畳み構造が得 られることを明らかにした。[4,21]

# 6.4.3 生命現象の物理

#### 膜変形の秩序と自発的細胞運動

細胞運動は胚分割・傷の修復・癌の転移などの生 理学的・医学的に重要なプロセスにおいて中心的な 役割を果たすが、そのメカニズムについては未だ解 明されていない点が多い。細胞性粘菌 Dictyostelium discoideum は外部からの刺激や誘引物質がなくとも 自発的に運動することができる。外部からの誘導の ない自発運動では単にランダムに膜を変形させなが ら動いているにすぎないと考えられ注目を集めては こなかったが、我々は細胞膜の変形がランダムではな く秩序的であることを見出した。外部刺激の無い環 境下で自発運動中の単一細胞性粘菌を顕微鏡により 撮影した。重心から細胞膜の境界までの長さを 360° すべての角度について求め、細胞形態を定量化した。 自己相関関数を用いてランダムな膜変動成分を除去 したところ膜変形には基本的な3つのパターン - 伸 張、回転、振動 - が存在することが明らかとなった。 これら3つのパターンは vegetative および starved と異なる発生段階のいずれにおいても見出されたこ とから膜変形の基本モードであると考えられる。 らに、膜変形のパターンと細胞運動の運動方向の相関 を解析したところ、PTEN および PI3-kinase(PI3K) の自発的な局在を介して膜伸張方向へ運動をバイア スしていることも見出した。以上の結果から、細胞が PI3K と PTEN を介して自らの形態を秩序化し、自 発運動を制御していることが示唆された[31,16,46]。 また、単一細胞が発生する応力の接着面内における 分布と細胞内ミオシン II の局在を比較し、極性を形 成した細胞においては、後部にミオシンIIが局在 していることを明らかにした [7]。

#### <受賞>

[1] Soichi Tatsumi, Mohri Poster Session Excellent Poster Award, Third International Symposium on Physical Sciences in Space.

#### <報文>

#### (原著論文)

- [2] Y. Murayama, H. Wada, and M. Sano: Dynamic force spectroscopy of a single condensed DNA, Europhys. Lett., 79, 58001(p1-p6) (2007).
- [3] Hong-Ren Jiang and Masaki Sano: Stretching Single Molecular DNA by Temperature Gradient , Appl. Phys. Lett. 91, 154104 (2007).

- [4] K. A. Takeuchi, M. Kuroda, H. Chaté, and M. Sano: Directed percolation criticality in turbulent liquid crystals, Physical Review Letters, 99, 234503 (2007).
- [5] Natsuhiko Yoshinaga and Kenichi Yoshikawa: Core-shell structures in single flexible-semiflexible block copolymers: Finding the free energy minimum for the folding transition, J. Chem. Phys., 127 (2007) 044902
- [6] K. A. Takeuchi: Scaling of hysteresis loops at phase transitions into a quasiabsorbing state, Phys. Rev. E, 77, 030103(R) (2008).
- [7] H. Delanoye-Ayari, S.Iwaya, Y.T.Maeda, J.Inose, C.Riviere, M.Sano, and J.P.Rieu: Changes in the magnitude and Distribution of Forces at Different Developmental Stages of Dictyostelium, Cell Motility and the Cytoskeleton, 65, 314-331 (2008).
- [8] Shoichi Toyabe and Masaki Sano: Evaluating Energy Dissipation of a Brownian Particle in a Viscoelastic Fluid, Phys. Rev. E 77, 041403 (2008).

#### (国内雑誌)

[9] 辰己 創一,村山 能宏,佐野雅己,一様励起粉体ガ スの緩和ダイナミクス,物性研究,物性研究刊行会, vol.88, No.2, pp.200-203,2007年5月

#### (学位論文)

- [10] 前多裕介: A Study on Intercellular Stochasticity (博士論文).
- [11] Hong-Ren Jiang: Thermophoresis, Thermal Force, and Optothermal Manipulation of Single Molecules and Colloids (博士論文).
- [12] 岩谷卓: Tranction Force Microscopy of Single Cells for the General Property of the Dynamics on Cell Migration (修士論文).
- <学術講演>

#### (国際会議)

- 一般講演
- [13] Y. Murayama, H. Wada, and M. Sano: Internal friction of a single condensed DNA, International Soft Matter Conference, Oct. 1-4, 2007, Aachen, Germany.
- [14] Soichi Tatsumi, Masaki Sano: The Observation of Freely Evolving Granular Gas, Third International Symposium on Physical Sciences in Space, Dec. 22-26, 2007, Nara, Japan
- [15] Soichi Tatsumi, Masaki Sano, Kinetics of the Steady Granular Gas: Third International Symposium on Physical Sciences in Space, Dec. 22-26, 2007, Nara, Japan

- [16] Y.T.Maeda, J.Inose, M.Matsuo, S.Iwaya, and M.Sano: Orderly Patterns of Morphological Dynamics Direct Spontaneous Cell Migration Independent of Chemotaxis, 8th International Conference on Systems Biology, Long Beach, California, USA October, 2007
- [17] K. A. Takeuchi, M. Kuroda, H. Chaté, and M. Sano: Directed Percolation Criticality in Turbulent Liquid Crystals -Static and Dynamic Scaling-, XXIII IUPAP International Conference on Statistical Physics, Statphys23, Jul. 9-13, 2007, Genoa, Italy.
- [18] K. A. Takeuchi: Directed Percolation Criticality in Turbulent Liquid Crystals (II) -Universal Scaling of Hysteresis Loops-, STATPHYS 2007 Satellite Conference, Fluctuation and dissipation phenomena in driven systems far from equilibrium, Jul. 16-18, 2007, Dresden, Germany.
- [19] K. A. Takeuchi, M. Kuroda, H. Chaté, and M. Sano: Directed Percolation Criticality in Turbulent Liquid Crystals, Satellite Meeting of STAT-PHYS 23, Conference and Research Workshop: Perspectives in Nonlinear Dynamics, Jul. 16-27, 2007, Trieste, Italy.
- [20] K. A. Takeuchi, F. Ginelli, and H. Chaté: Detecting collective modes in globally coupled systems by Lyapunov analysis, New perspectives in Lyapunov stability analysis: hydrodynamic limit, characterization of the phase space, predictability, Nov. 14-16, 2007, Florence, Italy.
- [21] Natsuhiko Yoshinaga: Folding and unfolding kinetics of a single semiflexible polymer, International Soft Matter Conference, Aachen, 2007/10/01-04
- [22] T. Ishii, Y. Murayama, A. Katano and M. Sano: Probing Intermediates in Mechanical Unfolding Process of Single Monomeric Protein, International Symposium: Linear Responce Theory inCommemoration of its 50th Anniversary - Recent Developments in Equilibrium and Non-Equilibrium Response, November 5-7, 2007, Tokyo, Japan
- [23] Hong-Ren Jiang, Masaki Sano: Thermiphoresis and Thermal force of single DNA, The 21st COE International Symposium on the Linear Response Theory in Commemoration of its 50th Anniversary- Recent Development in Equilibrium And Non-Equilibrium Response, Nov. 5-7, 2007, Tokyo, Japan
- [24] Hong-Ren Jiang, Masaki Sano: Stretching single molecular DNA by temperature gradient, The YITP workshop on "New Frontiers in Colloidal Physics : A Bridge between Micro- and Macroscopic Concepts in Soft Matter", July 25-27, 2007, Kyoto, Japan

招待講演

[25] M. Sano: Entropy Method for Optical Manipulation of Matter, Applied Math. Seminar, Department of Physics and Courant Institute, New York University, March 6, 2008.

#### (国内会議)

#### 一般講演

- [26] 辰己創一,佐野雅己,散逸粒子系の統計則,2007年6 月22日,ソフトマター物理第2回領域研究会,米沢
- [27] 辰己創一,佐野雅己,加振された擬二次元単一分散粉 体系における中距離秩序の発現,2008年3月26日, 日本物理学会第63回年次大会,近畿大学
- [28] 江端宏之, 辰己創一, 佐野雅己:鉛直加振下でのペー スト界面の不安定化,2008 年 3 月 22~26 日, 日本物 理学会 第 63 回年次大会, 近畿大学
- [29] 鈴木量、辰巳創一、佐野雅己: 垂直加振された粘弾性 物質の対流現象,2008 年 3 月 22~26 日,日本物理学 会 第 63 回年次大会,近畿大学
- [30] 辰己創一,第3回「高校生のためのサイエンスカフェ 本郷」,"砂がつくる豊かな世界~粒の「大きさ」からわかる身近な科学~",東京大学理学部1号館小柴 ホール,2007年12月22日
- [31] 前多 裕介、猪瀬 淳也、松尾 美希、岩谷 卓、佐野 雅 己「細胞性粘菌ー細胞における形態変化揺らぎに隠 れた秩序と機能」第40回発生生物学会/第59回日本 細胞生物学会 合同大会、福岡国際会議場平成19年5 月
- [32] 岩谷 卓,前多 裕介, Rieu Jean-Paul, 佐野 雅巳「細 胞性粘菌における単一細胞の力測定」日本生物物理 学会第 45 回年会、横浜パシフィコ平成 19 年 12 月
- [33] 加藤 高基,前多 裕介,時田 理恵,脇田 順一,松下 貢,佐野 雅己「Escherichia coli が作り出す同心円状 パターンにおける界面揺らぎの解析」日本生物物理 学会第 45 回年会、横浜パシフィコ平成 19 年 12 月
- [34] Hong-Ren Jiang, Masaki Sano: Single DNA Molecule Thermophorsis and Thermophoresis Force、非平衡ソフトマター物理学の創成:メソスコ ピック系の構造とダイナミクス、第1回公開シンポ ジウム、2007年3月15・16日、東京大学
- [35] 石井孝明、村山能宏、片野厚人、佐野雅己:「AFM によるたんぱく質の力学的アンフォールド過程の観 測,非平衡ソフトマター物理学の創生:第2回領域 研究会、2007年6月21~23日、伝国の杜(米沢市)
- [36] 石井孝明、村山能宏、片野厚人、佐野雅己:「1分子 タンパク質の力学的変性経路と基質類似体による構 造安定性の観測」、日本物理学会:第62回年次大会、 2007年9月21~24日、北海道大学
- [37] 石井孝明、村山能宏、片野厚人、佐野雅己:「タンパ ク質1分子の構造変性ダイナミクスの観測」、極限量 子系とその対称性:シンポジウム2007、2007年 11月13~15日、東京大学理学部1号館小柴ホール
- [38] 黒田真史,佐野雅己:液晶中のトポロジカル欠陥の 流体力学応答,日本物理学会第62回年次大会,札幌、 2007年9月21~24日,北海道大学

- [39] 辰己創一,佐野雅己,混相系のパターン形成」,2007
   年9月26日, Sapporo Dynamics Days,北海道 大学
- [40] 石井 孝明: 「魚の体色変化における黒色胞の輸送・ 拡散ダイナミクス」, 2007 年 9 月 26 日, Sapporo sDays, 北海道大学
- [41] 岩谷 卓: 「細胞運動における力場のダイナミクスと 細胞極性」, 2007 年 9 月 26 日, Sapporo Dynamics Days, 北海道大学
- [42] 佐野 雅己:「非平衡を利用した新しい計測技術」,
   2007 年 9 月 26 日, Sapporo Dynamics Days, 北 海道大学

#### 招待講演

- [43] 佐野雅己:「非平衡開放系のダイナミクス」,京都大学21世紀 COE 全体シンポジウム「物理学の多様性と普遍性」,京都大学百周年時計台記念館,2007年10月2日
- [44] 村山能宏:「生体高分子伸長実験で見えてきたもの」, 日本物理学会第 63 回年次大会,領域 12 シンポジウム,ソフト凝縮系のマイクロ・ナノ空間,近畿大学, 2008 年 3 月 24 日.
- [45] 佐野雅己:「エントロピー・トラップと非平衡への応用」,九州大学スーパースターシンポジウム、バイオメカニクスの物理的理解を目指して(非平衡・特殊環境下におけるバイオメカニメカニクス),九州大学理学研究院,2008年2月20日.
- (セミナー)
- [46] 前多 裕介「膜揺らぎの秩序と細胞運動」生物理論研 究会「生物理論の前後左右(仮)」、神戸セミナーハ ウス平成 20 年 3 月
- [47] 竹内一将:液晶の乱流状態における Directed Percolation ユニバーサリティ,京都大学 基礎物理学研究 所物性談話会,2007年6月7日.
- [48] 竹内一将:液晶の位相乱流が暴く非平衡相転移の普 遍性,大阪市立大学素励起物理学研究室セミナー, 2007年6月8日.
- [49] K. A. Takeuchi: Directed Percolation Universality in Turbulent Liquid Crystals, École Normale Supérieure, Non Linear Physics Group セミナー, 2008年1月9日.
- [50] K. A. Takeuchi: Directed Percolation Criticality in Turbulent Liquid Crystals, Commissariat à l'Énergie Atomique, Réunion SPEC, 2008 年 1 月 17 日.
- [51] 石井孝明、畑本憲志、真行寺千佳子、「ゼブラフィッシュ黒色素胞における色素顆粒移動運動に関わるモータータンパク質の役割」、特定領域研究「生体ナノシステム」小セミナー、2007年11月16日、東京大学理学部2号館323号室

# 6.5 山本研究室

【はじめに】星と星の間にはガスと塵からなる希薄な 雲(星間雲)が存在している。その中でも密度が比 較的高いものが星間分子雲で、新しい恒星と惑星系 が形成される場所として世界的に活発な研究が行わ れている。星間分子雲の主成分は水素分子であるが、 その中には様々な原子・分子が僅かに存在している。 これらの微量分子の組成は、星間分子雲の形成、進 化、及びそこでの星形成・惑星系形成過程を克明に 記憶している。即ち、微量分子の組成を調べること により、どのようにして星が生まれてきたかという 「過去」を見ることができる。本研究室では、このよ うな物質的な視点から、宇宙における最も基本的な 構造形成過程である星形成・惑星系形成を総合的に 理解することを目指している。

【電波で物質を見る】星間分子雲の温度はおよそ10 K程度と非常に低い。この「宇宙の中でも最も低温 の天体」に存在する原子・分子を観測するには、最 もエネルギーの低い電磁波である「電波」を利用す る。電波領域は波長によってセンチ波帯、ミリ波帯、 サブミリ波帯、テラヘルツ帯に分けられるが、これ らの領域にはいずれも特徴的な原子・分子のスペク トル線が存在する。それらの高感度観測により、星 形成・惑星系形成における物質進化を詳細に捉える ことができる。

【星形成・惑星系形成の観測研究】近年、センチ波、ミ リ波、サブミリ波観測の進展は著しい。超伝導技術を 用いた低雑音ヘテロダイン受信機の実現、広帯域かつ 高分解能のデジタル電波分光計の普及がその技術的背 景にある。なかでも、ミリ波帯からサブミリ波帯にお ける最終兵器とも言うべきものが ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) である。南 米チリの標高 5000 m の高原に 12 m アンテナ 54 台 と 7 m アンテナ 12 台からなる巨大電波望遠鏡 (電 波干渉計)を建設するもので、日本、北米、欧州の 共同プロジェクトとして建設が進んでいる。ALMA は 2012 年に本格稼動を始める。ALMA はその桁外 れの感度と解像度により、星・惑星系形成の理解を ー挙に進展させるであろう。現在、ALMA を意識し た観測研究が激しい競争的環境下で進んでいる。本 研究室では、上記の独自の視点を生かして、既存望 遠鏡を用いた観測研究を活発に展開している。

【テラヘルツ帯観測技術の開拓】一方、テラヘルツ帯 は電波と赤外線との中間にあたり、まだ、観測的研 究が十分に行われていない波長域である。この領域 には C<sup>+</sup>, N<sup>+</sup> などのよく知られた原子スペクトル線 の他、CH, H<sub>2</sub>D<sup>+</sup>, HD<sup>+</sup>2 などの基本的分子のスペク トル線が存在する。それらの観測により、上で述べた 星形成・惑星系形成における物質進化の根源を掴むこ とができると期待されている。世界的にはHerschel 宇宙赤外線望遠鏡が近い未来に打ち上げられる予定 で、これによりテラヘルツ帯観測のフロンティアが 開かれるであろう。本研究室では、それとは相補的 な地上大口径望遠鏡による高分解能観測を目指して、 テラヘルツ帯における独自の観測技術の開拓を重点 的に進めている。本研究室には、1998年から2005年 までの間、富士山頂に口径1.2 mのサブミリ波望遠 鏡を設置し、中性炭素原子輝線(492 GHz, 809 GHz) の広域観測により星間分子雲形成の研究を展開した 実績がある。この経験を発展させて、テラヘルツ天 文学の創生に寄与したいと考えている。

# 6.5.1 テラヘルツ帯観測技術の開拓

天体観測においては、観測感度が命である。テラヘ ルツ帯における観測を行うためには、テラヘルツ帯 で動作する低雑音の周波数混合器(ヘテロダインミク サ)の開発が不可欠である。サブミリ波帯においては、 SIS (Superconductor Insulator Superconductor) ミ クサ素子が広く用いられてきた。ジョセフソン接合 の非線形性を利用したもので、Nb(ニオブ)を超伝 導物質に用いたものは、750 GHz 以下では量子雑音 限界に迫る性能を発揮している。しかし、750 GHz 以上の周波数では、超伝導キャップ間の吸収による 損失が増大するため、急激に性能が低下する。テラ ヘルツ帯観測のためには、新しいミクサ素子の開発 が求められる。

本研究室では、超伝導ホットエレクトロン・ボロ メータ(HEB)ミクサ素子の開発を進めている。HEB ミクサ素子は電磁波の吸収による超伝導状態の破壊 を利用し、受信信号と局部発振信号の「うなり」 中 間周波信号 に伴う電力変化をバイアス電流の変化 として鋭敏に検知するものである。そのためには、 超伝導体をサブミクロンサイズの大きさにすること そして、素子内に生じた熱電子を「うなり」の周期 よりも早く冷却し、超伝導状態を回復させる必要が ある。この冷却メカニズムには、(1)熱電子の拡散に よって電極に逃がす方法(拡散冷却)と、(2)フォノ ンとの相互作用を介して基板に逃がす方法(格子冷 却)の2つがある。本研究室では、Nbを用いた拡散 冷却型 HEB ミクサ素子と、NbTiN (窒化ニオブチ タン)を用いた格子冷却型 HEB ミクサ素子の開発 研究を進めている。[10][12][18][25][26]

#### NbTiN を用いた HEB ミクサ素子の開発

本研究室では、2004 年度から研究室内のクリーン ブースに HEB ミクサ素子製作に必要な装置群の導入 を行い、独自の技術で HEB ミクサの製作方法の確立 を目指してきた。試行錯誤の後、昨年度、Nb を用い た拡散冷却型の HEB ミクサの製作、および、NbTiN を用いた格子冷却型の HEB ミクサの製作に成功し た。導波管マウントに装着して 800 GHz 帯で雑音温 度の測定を行ったところ、Nb HEB ミクサでは 3000 K、NbTiN HEB ミクサせは 1200 K 程度の性能が得 られた。これらは世界レベルから見るとまだやや劣 るが、素子製作方法の確立という点で第一のハード ルを越えることができた。[10][12]

本年度は、NbTiN ミクサの製作を数度にわたって 行い、製作毎の性能変化を調べた。その結果、雑音温 度は1200 - 1500 K と安定しており、製造プロセスの 再現性が確認された。この段階の素子を用いて、後で述べるように雑音温度の動作温度依存性を調べた。

本年度より、Ling Jiang 氏が PD として本研究室 に加わった。Jiang 氏は HEB ミクサ素子と導波管マ ウントのインピーダンスマッチングの最適化を電磁 界シミュレーションを用いて行い、新しい素子アン テナパターンを設計した。それを用いて NbTiN を用 いた HEB ミクサを製作し、導波管マウントに装着 して 800 GHz 帯で性能試験を行ったところ、最高で 500 K まで雑音温度を低減することに成功した(図 1)。この性能は世界水準に並ぶものである。現在の HEB ミクサ素子は12 nmの膜厚の NbTiN 薄膜を用 いているが、これは格子冷却を考えると最適値より もまだかなり厚い。それにもかかわらず上記の性能 が達成されたことは、一層の薄膜化により格段の性 能向上が見込まれることを意味しており、相当な将 来性が期待される結果と言える。



☑ 6.5.29: I-V curve and hot-cold response of the fabricated HEB mixer

## NbTiN を用いた HEB ミクサ素子の動作温度依 存性

本研究室における HEB ミクサの性能評価におい ては、HEB ミクサの冷却方法として 4 K GM 2 段 冷凍機を用いている。そのため、冷却ステージに取 り付けたヒーターへの供給電力を適当に調整するこ とにより、HEB ミクサの動作温度を 4 K から 10 K 程度の間で自由に変えることができる。このメリッ トを生かして、製作した NbTiN HEB ミクサのミク サ性能の動作温度依存性を詳しく調べた。このよう な温度変化の実験はこれまで系統的には行われてこ なかった。

図2に雑音温度の動作温度依存性を示す。雑音温 度は4Kから7K程度まではほぼ平坦であるが、7 Kを超えて臨界温度に近くなると急激に上昇するこ とがわかった。4K近傍では温度上昇に伴う雑音温 度の上昇は非常に緩やかであり、これは、NbTiNを 用いた格子冷却型 HEB ミクサーが動作温度の変動 に強いことを示している。この結果は、実際の観測 運用における性能安定化の観点からも重要な知見と 言える。 図 2 の動作温度依存性を HEB ミクサの古典理論 に基いて解析した。動作温度を T、素子の超伝導転 移温度を  $T_c$ とすると、雑音温度は近似的に  $T^n - T_c^n$ に反比例する。ここで n は素子の冷却メカニズムに よって決まる指数であり、拡散冷却の場合 n = 2、格 子冷却の場合は n = 4 程度の値をとる。図 2 のフィッ ティングの結果からわかるように、製作した NbTiN HEB ミクサの場合、n = 4 程度の値でもっともよく 実験結果を再現することから、格子冷却によって動 作していることが確認された。これまで、HEB 素子 の冷却メカニズムは、素子サイズや中間周波帯域幅 をもとに議論されてきたが、動作温度依存性の実験 はそれらよりもはるかに容易で再現性が高いので、 非常に有効であることが示された。[10][28]



 $\boxtimes$  6.5.30: Bath temperature dependence of the receiver noise temperature. Solid lines represent expected dependences for various values of n

#### NbTiN を用いた準光学 HEB ミクサの開発

導波管を用いたミクサではビームパターンを正確 に決めることができるという利点があるが、周波数 が高くなるにつれ導波管の微細な加工技術が必要と なる。また、それにともないミクサ素子の大きさも 小さくなり、薄く研磨する必要も出てくる。そのよ うな困難を回避し、高周波ミクサ素子を開発するた め、準光学型のミクサ素子の開発を進めている。こ れまではリフトオフプロセスを用いた作成法を用い てきたが、アスペクト比が高く、パターン形成、リフ トオフが困難となってくるため、ICP を用いたエッ チングによって、細線を形成するプロセスを構築し、 素子の作成を行った。その結果、リフトオフプロセ スよりも冷却時に壊れてしまうトラブルが減り、素 子の歩留まりを上げることができた。現在、リフト オフプロセスで作成した素子と、エッチングプロセ スで作成した素子とで、周波数特性に違いが現れる かを国立天文台にあるフーリエ変換型分光器を用い て調べている。なお、この研究は筑波大学の山倉鉄 矢氏、中井直正氏、名古屋大学の前澤裕之氏との共 同研究である。

#### 性能評価システムの改良

HEB ミクサ素子の性能評価実験を進めるにあたっ て、今年度はその測定系周辺の改良にも取り組んだ。 昨年度まで、素子の電流-電圧特性や IF 出力などは アナログのペンレコーダーもしくは写真によって記 録していたが、実験の精密化に伴いデジタルデータ として取り込む必要性が出てきた。そこで、ADC を 介して PC ヘデータを取り込むよう性能評価実験に 特化したソフトウェアを開発した。実験データをデ ジタルで扱うことにより、データ解析の効率化が進 んだ。この改良は4年生の特別実験 II として行った (黒田氏、下川邊氏)。

HEB ミクサ素子は非常に壊れやすく、昨年度は性 能評価以前に静電気によるサージ電流で素子が破壊 されてしまうことが相次いでいた。そこで、素子保 護のための安全回路を作製し、液体ヘリウム冷却に よる DC 測定系と受信機デュワーの双方に取り付け た。これにより、静電気由来と見られる素子の破壊 はほとんど無くなり、着実に実験を進めることがで きるようになった。

本研究では、機械式冷凍機を用いた冷却を行って いるため、機械的振動が避けられない。HEB ミクサ の性能は光学系の振動に対して非常に敏感であるた め、性能評価実験を行う上ではこの振動の抑制が重 要である。これまでは受信機デュワーを台の上に載 せているだけだったが、固定台を新規に製作して振 動の抑制を図った。また、ビームスプリッタを固定 するフレームも製作し、安定的に局部発振信号を導 入できるようになった。

# 6.5.2 星間分子雲、星形成領域の観測的研究

国内外の様々なミリ波、サブミリ波望遠鏡(国立 天文台45m望遠鏡、IRAM30m望遠鏡、米国国 立電波天文台100m望遠鏡など)を用いて広範な観 測研究を展開している。特に、化学組成が天体の現 在の物理状態のみならず過去の履歴の情報をもつこ とに着目し、独自の視点から星形成過程を探究して いる。

#### Warm Carbon Chain Chemistry の発見

昨年度、小質量星形成領域における大型飽和有機 分子探査の過程で、おうし座のL1527 原始星におい て、不飽和有機分子の1つである炭素鎖分子 C<sub>4</sub>H<sub>2</sub> が非常に豊富に存在することを発見した。野辺山45 m望遠鏡、GBT 100 m望遠鏡、IRAM 30 m望遠鏡 などを用いた観測の結果、この天体では、C<sub>4</sub>H<sub>2</sub>をは じめとする様々な炭素鎖分子の存在量が非常に多い ことがわかった。これまで、炭素鎖分子は、TMC-1 など星形成が起こっていない分子雲コアで豊富に存 在し、星形成領域では少ないと考えられてきた。この ことは、CCS などで理論的にも観測的にも示されて おり、炭素原子が徐々に CO 分子に固定されていく 化学進化と星間塵への吸着の複合効果として理解されている。事実、「典型的」原始星 IRAS 16293-2422 や NGC1333 IRAS4B では、ほとんどの炭素鎖分子 は検出されていない。しかし、L1527 では様々な炭 素鎖分子が原始星近傍の高密度で暖かい領域に豊富 に存在していた。一方、HCOOCH3 などの大型飽和 有機分子は検出されない。

これらの原因としては、母体となるコアの速やかな 収縮と原始星近傍の暖かい領域における炭素鎖分子 の再生成が複合的に関与しているものと考えられる。 特に、後者はダストからの CH<sub>4</sub> の蒸発に起因する新 しいプロセスで、Warm Carbon Chain Chemistry (WCCC) と命名した。本研究による発見を契機とし て、WCCC は新しい炭素鎖分子の化学として現在非 常に注目されており、モデル計算をはじめとした活 発な研究がはじまっている (e.g. Millar et al. 2007; Aikawa et al. 2008; Hassel et al. 2008)。

これまで、小質量星形成領域の化学組成は一様と 考えられてきたが、上記の結果は、物理的には同じ に見える天体でも化学組成にはバラエティーがある ということを明瞭に示した。また、様々な領域にある 16 個の原始星に対してサーベイ観測を行った結果、 第二のWCCC 天体を発見した。さらに、WCCC は 程度の差はあれ、どの星形成領域でも起こっている 可能性があることがわかった。この事実は、化学組 成の違いから星形成過程や収縮過程の違いを調べる ことができることを意味し、これまでの星形成の理 解を大きく変える可能性を持つ。[5][9][13][15][21]

#### L1527 における C<sub>4</sub>H<sup>-</sup> の検出

また、上記の観測の過程で大きな展開があった。星 形成領域で初めて $C_6H^-$ という負イオンをL1527 原 始星で発見した。さらに、IRAM 30 m 望遠鏡では、  $C_4H^-$ も検出した。 $C_4H^-$ についてはTMC-1でも検 出されておらず、分子雲としても初めての検出例で ある。これらの結果は、星形成領域における負イオ ンの振舞いを明らかにしたという点だけでなく、電 子と炭素鎖分子の放射性結合反応などについても重 要な知見を与えた。また、L1527 原始星は、新しい 星間分子の探査という観点でも大変興味深い天体で あることがわかった。[3][6][9][22] [23]

## L1527 における HCO<sub>2</sub><sup>+</sup>の検出

さらに最近、気相中の CO2 をトレースする重要な イオン HCO<sup>+</sup><sub>2</sub> を L1527 において検出した。この検出 は、小質量星形成領域で初めて気相の CO<sub>2</sub> を捉えた もので、惑星系における CO<sub>2</sub> の起源を考える上で点 で非常に大きな意義がある。また、その存在量の考 察から、L1527 における気相 CO<sub>2</sub> の主な起源は、原 始星のごく近傍における気相 CO<sub>2</sub> の主な起源は、原 始星のごく近傍における気相反応で作られた可 能性が高いことがわかった (図 3)。HCO<sup>+</sup><sub>2</sub> は第二の WCCC 天体 IRAS15398-3359 でも検出され、気相に おける CO<sub>2</sub> の生成に WCCC が大きく関与している 可能性が高まった。[7][16][24]



 $\boxtimes$  6.5.31: Abundance of HCO<sub>2</sub><sup>+</sup> as a function of the assumed source radius

#### 大質量星形成領域における重水素濃縮

星間分子雲中の分子には、重水素原子が多く含ま れることが知られており、重水素濃縮と呼ばれる。本 研究では、大質量星形成領域における重水素濃縮度 を系統的に調べる目的で、野辺山 45m 望遠鏡により DNC (J = 1 - 0) および  $HN^{13}C$  (J = 1 - 0) のサー ベイ観測を行った。廣田らによって行われた低質量 星形成コアにおける結果と比較したところ、低質量 星形成コアでは DNC/HNC の柱密度比が 0.05 程度 またはそれ以上であるのに対し、大質量星形成コア では 0.01 以下のものが多く存在した(図4)。

低質量星形成領域では,母体となるコアの温度が 低く、Depletion も進んでいるため、重水素濃縮度が 高くなる。重水素を含む分子(特に中性分子)は星 形成後も10<sup>5</sup> yr 程度は壊されずに残るので、現在は すでに星が生まれているコアであっても重水素濃縮 度に関しては星形成が起こる前の情報を保持してい る可能性が高い。したがって、大質量星形成領域で 重水素濃縮度が低い傾向にあることは、母体となる コアの温度が高く、重水素濃縮が進まなかったため と考えられる。今回の結果は、重水素濃縮度を指標 として星形成コアの過去の物理状態を知ることがで きる可能性を示している。なお、HDCS/H<sub>2</sub>CS に関 しても観測を行ったところ、同様の結果が得られた。 [27]

#### 星形成領域のラインサーベイ

中小質量星形成領域の化学組成を先入観なく理解 するためには、ある周波数領域のスペクトル線を網 羅的に観測するラインサーベイが非常に有効である。 そのような観測は、IRAS16293-2422 ではすでに行 われているが、先に述べた中小質量製形成領域の化 学組成の多様性に鑑み、特に典型的WCCC天体であ るL1527 のラインサーベイ観測は非常に重要である。 さらに、原始星からの双極分子流による衝撃波が化 学組成に与える影響を理解するために、双極分子流と 分子雲が衝突して衝撃波を形成しているL1157(B1) 領域を調べることが有効である。本研究室では、国立



 $\boxtimes$  6.5.32: Plot of the HN<sup>13</sup> and DNC column densities for various star forming regions. For massive star forming regions (diamond marks), DNC tends to be deficient in comparison with HNC.

天文台野辺山宇宙電波観測所の所内プロジェクトと して、L1527とL1157のラインサーベイを行ってい る。なお、この研究は、高野秀路氏, Sheng-Yuan Liu 氏をはじめ ALMA 星間物質サブワーキンググルー プを中心とするメンバーとの国際共同研究である。

本年度はラインサーベイの初年度として、その戦略を確立するための観測を行った。それらのデータの解析は現在進行中であるが、いくつかの重要な成果が得られた。L1527 については、HC<sub>5</sub>Nの超高励起スペクトル線を複数検出した。さらに、HC<sub>3</sub>Nの<sup>13</sup>C同位体種のスペクトル線も検出した。一方、L1157については、HCOOCH<sub>3</sub>, HCOOH, CH<sub>3</sub>CHOなどの有機分子のスペクトル線を検出し、衝撃波領域における複雑な有機分子の存在を示した(図5)。これらはいずれも星間塵の氷マントルから蒸発してきたものと思われる。



 $\boxtimes$  6.5.33: A portion of the line survey toward L1157. Cross marks represent artificial singals

#### <sup>13</sup>C 同位体種を用いた星間化学反応の追跡

炭素鎖分子 CCS は、分子雲進化のよい指標として星なしコアの進化段階の診断に広く用いられて

きた。しかし、CCSの生成メカニズム自体は必ずし も確立されているとは言えない。いくつかのイオン 分子反応や中性分子反応が提案されているが、それ らの相対的重要性については未解明のままであった。

この問題に切り込むために CCS の  $^{13}$ C 同位体種 の相対比に着目し、 $^{13}$ CCS と C $^{13}$ CS を TMC-1 で探 索した。その結果、 $^{13}$ CCS と C $^{13}$ CS を TMC-1 で探 には大きく差があることがわかった。これは、CCS の生成過程において、2 つの炭素原子が非等価であ ることを意味する。また、 $^{13}$ CCS の存在量が星間空 間における [ $^{13}$ C]/[ $^{12}$ C] 比よりも低いことがわかり、 CCS において  $^{13}$ C 同位体の「希釈」が起こっている ことがわかった。このような現象はこれまでに CO 以外では認識されてこなかった。

これらの観測結果から、これまで提案されている 様々な生成ルートの中で、<sup>13</sup>C 同位体種の存在量の 非対称性を説明できる CH + CS CCS + H 反応が最も有力な主要生成経路として絞り込まれた。ま た、CCH においても同様の観測を行い、<sup>13</sup>CCH と C<sup>13</sup>CH でそれらの存在量にも差があることがわかっ た (図 6)。このことから、 $C + CH_2$  $C_2H + H \mathbf{\Sigma}$ 応の寄与が重要であることがわかった。このような 同位体を用いた星間分子の生成過程の探求は、どの 分子がおもにどの分子から形成されているかを、観 測から具体的に調べることができるという点で非常 に強力な手法であり、宇宙の化学を理解する方法と して画期的な展開である。今後観測装置の高感度化 で同位体を使った化学反応の追跡が非常に容易にな れば、星間分子雲における化学進化の理解を大きく 促進すると期待される。[2][9][14][17]



 $\boxtimes$  6.5.34: Spectra of <sup>13</sup>CCH and C<sup>13</sup>CH toward TMC-1

#### 銀河系中心領域における高速度分子ガス

高速度コンパクト雲 (HVCC) は銀河系中心分子層 に存在する、極めて広い速度幅 (~100 km s<sup>-1</sup>)を 持つ小さな (5 pc 以下)分子雲群である。我々はこ れまでに CO  $J = 3 - 2 \ge$  CO J = 1 - 0の広域サー べイによって 122 個の HVCC を同定している。これ らに対し、CO 輝線のデータを用いて物理量 (大き さ、速度幅、質量、運動エネルギー)の分布を明ら かにした。運動エネルギーは  $10^{49}$  から  $10^{51}$  erg と 膨大かつ広範囲にわたる。また、LVG モデルを使っ て各 HVCC の温度・密度を推定し、HVCC 内のガ スが様々な励起状態にあることを示した。HVCC は 複数の超新星爆発からの衝撃波によって局所的に加 速されたガス雲であると考えられる。多くの HVCC 内部には多数の超新星爆発を供給した大質量星団が 埋もれていると予想される。こうした状況はスター バースト銀河におけるスーパーバブルの縮小版と理 解することができ、スターバースト研究の重要な知 見を与えることが期待される。[20]

<報文>

(原著論文)

- Sakai, N., Sakai, T., & Yamamoto, S. "Methyl Formate in the NGC2264 IRS1 Region", ApJ, 660, 363 (2007)
- [2] Sakai, N., Ikeda, M., Morita, M., Sakai, T., Takano, S., Osamura, Y., & Yamamoto, S. "Production Pathways of CCS and CCCS Inferred from their <sup>13</sup>C Isotopic Species", ApJ, 663, 1174 (2007)
- [3] Sakai, N., Sakai, T., Osamura, Y., & Yamamoto, S. "Detection of C<sub>6</sub>H<sup>-</sup> toward the Low-Mass Protostar IRAS04368+2557 in L1527", ApJ, 667, L65 (2007)
- [4] Sakai, N., Sakai, T., & Yamamoto, S. "Complex Organic Molecules in an Early Stage of Protostellar Evolution", Ap&SS, 313, 153 (2008)
- [5] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T. & Yamamoto, S. "Abundant Carbon-Chain Molecules toward the Low-Mass Protostar IRAS04368+2557 in L1527", ApJ, 672, 371 (2008)
- [6] Sakai, N., Sakai, T., & Yamamoto, S. "Tentative Detection of  $C_4H^-$  toward the Low-Mass Protostar IRAS04368+2557 in L1527", ApJ, 673, L71 (2008)
- Sakai, N., Sakai, T., Aikawa, Y. & Yamamoto, S. "Detection of HCO<sub>2</sub><sup>+</sup> toward the Low-Mass Protostar IRAS04368+2557 in L1527", ApJ, 675, L89 (2008)
- [8] Sakai, T., Sakai, N., Kamegai, K., Hirota, T., Yamaguchi, N., Shiba, S., & Yamamoto, S. "A Molecular Line Observation toward Massive Clumps Associated with Infrared Dark Clouds", ApJ, in press (2008)

#### (国内雑誌)

[9] 坂井 南美、山本 智、高感度宇宙観測が拓く極限環 境下での化学、化学と工業、2008 年 2 月、Vol.61-2、 119-121

#### (学位論文)

- [10] 新保謙、"Developmental Study on an NbTiN HEB MIxer for Astronomical Applications," 博士論文, 2008 年 3 月
- [11] 永井 誠、"High-velocity Gas in the Central Molecular Zone of our Galaxy", 博士論文, 2008 年 3 月

[12] 芝祥一、テラヘルツ帯観測を目指した超伝導 HEB ミクサ受信機の開発」、修士論文

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [13] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T. & Yamamoto, S. "Extremely Rich Carbon-Chain Molecules in Low-Mass Protostar L1527", The Third ALMA J-T Science Meeting (13-14, Apr 2007, Jhongli in Taiwan)
- [14] Sakai, N., Ikeda, M., Morita, M., Sakai, T., Takano, S., Osamura, Y., & Yamamoto, S. "Production Pathways of CCS and CCCS Inferred from their <sup>13</sup>C Isotopic Species", The Third ALMA J-T Science Meeting (13-14, Apr 2007, NCU, Jhongli, Taiwan)
- [15] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., & Yamamoto, S. "Warm Carbon-Chain Chemistry in L1527", NRO WS on Carbon-Chain Chemistry (7-8, December 2007, Tokyo Univ., Japan)
- [16] Sakai, N., Sakai, T., & Yamamoto, S. "Carbon Dioxide in L1527", NRO WS on Carbon-Chain Chemistry (7-8, December 2007, Tokyo Univ., Japan)
- [17] Yamamoto, S., Sakai, N., Ikeda, M., Morita, M., Sakai, T., T.Takano, S., & Osamura, Y. "Observational Study on the Formation Pathways of CCS and CCCS", NRO WS on Carbon-Chain Chemistry (7-8, December 2007, Tokyo Univ., Japan)

#### 招待講演

- [18] Yamamoto, S., Shimbo,K., Shiba, S., Sakai, N., Sugimura, M., & Maezawa, H.: "Hot Electron Bolometer Mixer and its Application to Astrochemistry," The 3rd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity 2007 -Superconducting Sensors- (NVLS2007-SS), S-Cube (Sakai, Osaka), October 21-22, 2007
- [19] Yamamoto, S., "Carbon Chains in Molecular Clouds", Star Formation Workshop, ASIAA (Taipei, Taiwan), December 3-7, 2007

#### (国内会議)

#### 一般講演

- [20] 永井 誠、岡 朋治、亀谷和久、田中邦彦、銀河系中心 領域内の高速度コンパクト雲の励起状態、日本天文 学会、秋季年会(岐阜大学、2007年9月26-28日) Q19a
- [21] 坂井 南美、酒井 剛、廣田朋也、山本 智、Preliminary Line Survey toward Low-Mass Protostar in L1527、 日本天文学会、秋季年会(岐阜大学、2007年9月26-28日)、Q13a

- [22] 坂井 南美、酒井 剛、長村吉洋、山本 智、Detection of Molecular Anion, C<sub>6</sub>H<sup>-</sup>, toward Low-Mass Protostar L1527、日本天文学会、秋季年会(岐阜大学、 2007年9月 26-28日)、Q14b
- [23] 坂井 南美、酒井 剛、山本 智、Molecular Anions in the Low-Mass Star-Forming Region, L1527、日本 天文学会 春季年会(国立オリンピック記念青少年総 合センター、2008 年 3 月 24-27 日)、P46b
- [24] 坂井 南美、酒井 剛、相川 祐理、山本 智、Detection of HCO<sub>2</sub><sup>+</sup> toward the Low-Mass Protostar IRAS 04368+2557 in L1527、日本天文学会 春季年会(国 立オリンピック記念青少年総合センター、2008 年 3 月 24-27 日)、P54a
- [25] 芝祥一、新保謙、前澤裕之、山本智、Nbを用いたHEB ミクサ素子の開発と性能評価、2007年秋季第68回応用物理学会学術講演会(北海道工業大学、2007年9月4-8日)、5p-ZH-4
- [26] 新保 謙、芝 祥一、坂井 南美、前澤 裕之、山本 智、 NbTiN 薄膜を用いた格子冷却型 HEB ミクサの製作 と評価、2007 年秋季 第 68 回応用物理学会学術講演 会(北海道工業大学、2007 年 9 月 4-8 日)、5p-ZH-6
- [27] 芝祥一、坂井南美、酒井剛、廣田 朋也、山本智、 大質量星形成領域における重水素濃縮、日本天文学 会春季年会(国立オリンピック記念青少年総合セン ター、2008年3月24-27日)、P62a
- [28] 新保 謙、芝 祥一、蒋 玲、前澤 裕之、P. G. Ananthasubramanian 山本 智、NbTiN HEB ミクサ性能 の動作温度依存性の評価、2008 年春季 第 55 回応用 物理学関係連合講演会(日本大学理工学部 船橋キャ ンパス、2008 年 3 月 27-30 日)、28a-ZA-6

#### 招待講演

- [29] 山本 智、Chemical Evolution of Molecular Clouds; Recent Progress、日本分光学会シンポジウム(東京 工業大学大岡山キャンパス、2007年11月13日)
- [30] 山本 智、スペクトル分析でみる星の形成、スペクト ル化学研究センターシンポジウム(東京大学本郷キャ ンパス、2007 年 12 月 21 日)
- [31] 山本 智、星空に巡らす化学の夢、分子科学フォーラ ム講演会(分子科学研究所、2008 年 2 月 13 日)
- (セミナー)
- [32] Sakai, N. "Chemistry in low-mass star-forming regions" (19, July 2007, Leiden Univ., Holland)

# 6.6 酒井広文 研究室

本研究室では、(1) 高強度レーザー電場を用いた 分子操作、(2) 整形された超短パルスレーザー光によ る原子分子中の量子過程制御、(3) 高次の非線形過程 (多光子イオン化や高次高調波発生など) に代表され る超短パルス高強度レーザー光と原子分子等との相 互作用に関する研究、(4) アト秒領域の現象の観測と その解明を中心に活発な研究活動を展開している。 始めに、分子の配列と配向の意味を定義する。分 子の頭と尻尾を区別せずに分子軸や分子面を揃える ことを配列(alignment)と呼び、頭と尻尾を区別し て揃えることを配向(orientation)と呼ぶ。英語では 混乱はないが、日本語では歴史的経緯からしばしば 逆の訳語が使用されて来たので注意する必要がある。 本年度の主要な研究内容は以下のとおりである。ま た、実験室座標系で分子の向きを規定する三つのオ イラー角のうち、一つを制御することを1次元的制 御と呼び、三つとも制御することを3次元的制御と 呼ぶ。

# 6.6.1 静電場と整形されたレーザー電場の 併用による分子配向の制御

本研究室では、レーザー技術に基づいた分子操作 と配列あるいは配向した分子試料を用いた応用実験 を進めている。分子の向きが揃った試料を用いるこ とが出来れば、従来、空間平均を取って議論しなけれ ばならなかった多くの実験を格段に明瞭な形で行う ことが出来る。そればかりでなく、化学反応における 配置効果を直接的に調べることができるのを始めと し、物理現象における分子軸や分子面とレーザー光 の偏光方向との相関や分子軌道の対称性や非対称性 の効果を直接調べることができるなど、全く新しい 実験手法を提供できる。実際、配列した分子試料の 有効性は、I<sub>2</sub> 分子中の多光子イオン化過程を、時間 依存偏光パルスを用いて最適制御することに成功し たり (T. Suzuki et al., Phys. Rev. Lett. 92, 133005 (2004))、配列した分子中からの高次高調波発生実験 において、電子のド・ブロイ波の打ち消しあいの干 渉効果を観測することに成功したり (T. Kanai et al., Nature (London) **435**, 470 (2005)) するなどの、本 研究室の最近の成果でも実証されている。

分子の配向については、静電場とレーザー電場の 併用により、既に1次元的および3次元的な分子の配 向が可能であることの原理実証実験に成功した。こ れらの実験は、分子の回転周期に比べてレーザー光 のパルス幅が十分長い、いわゆる断熱領域で行われ たものである。この場合、分子の配向度は、レーザー 強度に追随して高くなり、レーザー強度が最大のと きに配向度も最大となる。一方、光電子の観測や高 精度の分光実験では、高強度レーザー電場が存在し ない状況で試料分子の配向を実現することが望まれ る。昨年度、静電場とレーザー電場の併用による手法 が断熱領域で有効なことに着目し、回転周期 Trot に 比べて立ち上がりのゆっくりしたパルスをピーク強 度付近で急峻に遮断することにより、断熱領域での 配向度と同等の配向度を高強度レーザー電場が存在 しない状況下で実現する全く新しい手法を提案した (Y. Sugawara *et al.*, Phys. Rev. A **77**, 031403(R)  $(2008))_{\circ}$ 

今年度は、上記の提案に基づいて、レーザー電場 の存在しない条件下で分子配向を実現することに初 めて成功した。ピーク強度付近で急峻に遮断される ようなパルスは、プラズマシャッターと呼ばれる手法 を用いて整形した。その概略は以下のとおりである。

ナノ秒 Nd:YAG レーザーの基本波 (波長  $\lambda = 1064$ nm) のピークとフェムト秒 Ti:sapphire レーザー光 (波長 $\lambda \sim 800 \text{ nm}$ )のタイミングを合わせ、同軸上 でエチレングリコールのジェットシートに集光する。 Ti:sapphire レーザー光のピーク強度が 10<sup>13</sup> W/cm<sup>2</sup> 程度以上になると、エチレングリコールがプラズマ 化する。いったんプラズマが形成されると Nd:YAG レーザー光のピーク強度以降の光は吸収されてプラ ズマ形成を維持するとともに、吸収あるいは反射に より YAG レーザー光は透過できず急峻に遮断され たパルスが得られる。試料として断熱領域での実験 でも用いた OCS 分子を用い、実証実験を行った。ま ず、2次元イオン画像化装置を用い、レーザー光が 遮断されるところ、 $T_{
m rot}/2$ 及び $T_{
m rot}$ 付近で分子の配列度の時間発展を観測したところ、理論計算の時間 発展とほぼ対応していることが確認できた。つぎに、 飛行時間 (TOF) 型質量分析装置を用い、TOF 軸方 向に偏光したプローブパルスを照射して観測される forward フラグメントと backward フラグメントのイ オン量を調べた。フラグメントイオンの総量に対す る forward フラグメントの割合を配向度の指標とし、 レーザー光が遮断されるところと Trot 付近でその時 間発展を観測したところ、理論計算の時間発展とほ ぼ対応していることが確認できた。これらの観測結 果は、分子配向がレーザー電場の存在しない状況下 で実現していることの確実な証拠と解釈できる。こ の成果は、化学反応ダイナミクス、分子内電子の立 体ダイナミクス、アト秒科学、表面物理学などの応 用研究において、レーザー電場の存在しない条件下 で頭と尻尾も区別して向きの揃った状態にある分子 試料が新しい研究対象となったことを意味する。

# 6.6.2 急峻に遮断される高強度非共鳴2波 長レーザー電場を用いた完全にフィー ルドフリーな分子配向

上述したように、静電場とピーク強度付近で急峻 に遮断される高強度レーザー電場を用いることによ リ、レーザー電場の遮断直後や分子の回転周期後に、 電場強度で~40 MV/cmに相当する高強度レーザー 電場の存在しない条件下で分子配向を実現すること ができた。静電場を数100 フェムト秒で遮断する支 術は存在しないため、この手法では~1 kV/cm 程度 の静電場は存在し続けている。したがって、次なる 課題はレーザー電場だけでなく静電場も存在しない 完全にフィールドフリーな条件下で分子配向を実現 することである。本年度は、この目的を実現するた めに、ピーク強度付近で急峻に遮断される高強度非 共鳴2波長レーザー電場を用いる手法を新たに提案 し、数値計算により、この手法の有効性を明らかに するとともにその背景となる物理について考察した。

本研究室ではさきに、分子の回転周期よりも十分 長いパルス幅をもつ高強度非共鳴2波長レーザー電 場を用いて断熱的に分子配向を実現する手法を提案 していた (T. Kanai and H. Sakai, J. Chem. Phys. 115,5492 (2001))。この手法では、使用するレーザー の周波数がパルス幅の逆数よりも十分大きな場合に は、分子の永久双極子モーメントとレーザー電場と の相互作用はパルス幅にわたって平均するとゼロと なる。したがって、分子の配向に寄与しているのは 分子の超分極率の異方性とレーザー電場の3乗の積 に比例する相互作用、すなわち、それによって形成 されるポテンシャルの非対称性である点に注意する 必要がある。

本研究では FCN 分子を試料として数値計算を行っ た。まず始めに、この手法に単なる超短パルスを使用 してもパルスの照射直後や分子の回転周期後に有意 な分子配向が得られないことを確認し、ナノ秒オー ダーの立ち上がりをもち、数 100 フェムト秒の立下 りをもつように整形されたパルスを用いることによ り、レーザー光の遮断直後や分子の回転周期後に有 意な分子配向を実現できることを確認した。静電場 とレーザー電場を併用する手法と同様に、有意な配 列の実現には分子の回転周期の数倍程度のパルス幅 で十分であるのに対し、有意な配向の実現には非常 に長い立ち上がりが本質的に重要であり、FCN 分子 に対して2波長レーザー電場の手法を用いる場合、 回転周期の 50 倍程度以上の立ち上がりを必要とす ることが明らかとなった。これは、立ち上がりが早 く短時間で強度の増大するパルスを用いると、配列 の効率的な実現にのみ寄与する深いポテンシャルが 形成され、分子の回転状態、特に分子配向に効果的 に寄与する (J, M)=(0, 0) 状態が浅いポテンシャル から深いポテンシャルにトンネルすることができず、 配向の実現が妨げられるためであると考えられる。

本年度はさらに、この手法の原理実証実験を行う ため、12ナノ秒のパルス幅をもち、数10mJ級の エネルギーをもつ2波長レーザーパルスにプラズマ シャッター技術を適用してそのピーク強度付近で急 峻に遮断するとともに、2波長レーザー電場の間の相 対位相を制御し、整形後のパルスの評価を行うため の光学系の設計も行った。現在、高強度2波長レー ザーパルスに対するプラズマシャッター技術の開発 と整形されたパルスの特性評価を進めている。

# 6.6.3 H<sub>2</sub> / D<sub>2</sub> 中での高次高調波発生と 核波束のダイナミクス

高強度フェムト秒レーザー光を原子・分子に照射 することにより発生する高次高調波は典型的な非摂 動論的現象の一つであり、極端紫外軟X線領域の超 短パルスコヒーレント光源としての有用性から、実 験的・理論的研究が1990年前後から精力的に進めら れている。

最近 Baker らは、H<sub>2</sub>分子とその同位体である D<sub>2</sub> 分子を試料とし、高次高調波の強度比と振動の自己 相関関数の比が対応することを利用して、H<sub>2</sub>や D<sub>2</sub> の振動ダイナミクス、すなわち、核間距離の時間発展 を追跡できることを示した。彼女らは、Ti:sapphire レーザー増幅システムの出力である 775 nm の光を 基本波として用いたが、高調波が基本波の1周期以 内で発生することを考えると、1 $\mu$ m 以上の長波長の 基本波を用いることにより、振動、すなわち核波束の ダイナミクスがより顕著に現れる可能性がある。さ らに、長波長の基本波を用いた分子中からの高次高 調波発生に関しては、理論的にも未解明な部分が多 く、実験的に新規な現象が観測される可能性もある。

上記の問題意識から、基本波として Ti:sapphire レーザー増幅システムの出力である 800 nm の光と 超短パルスパラメトリック増幅器からの出力である 1300 nm の光を用い、H<sub>2</sub> および D<sub>2</sub> 分子中で発生す る高次高調波の強度を比較するなどして核波束のダ イナミクスや関連する現象について調べ、数多くの 新たな知見を得ることができた。

まず、800 nm の光を基本波としたとき、H<sub>2</sub> や D<sub>2</sub> とイオン化ポテンシャルがほぼ等しい N2 や Ar から の高調波強度と比べ、H2やD2からの高調波強度が  $1\sim 2$ 桁弱いことを見出した。これは、 $N_2$ やArに比 べて H<sub>2</sub> や D<sub>2</sub> の分極率が 1/2 程度であることを考 えると、 $H_2$ や $D_2$ の振動の自己相関関数の効果が加 わっているためと考えられる。さらに、 $H_2 \ge D_2$ か らの高調波の強度比  $I_{\mathrm{D2}}/I_{\mathrm{H2}}$  が  $\mathrm{Baker}$  らの結果より も有意に大きいことも明らかになった。Bakerらはパ ルス幅 7.5 fs の基本波を用いているのに対し、本研究 ではパルス幅 50~60 fs の基本波を用いている。この ため、本研究では、 $H_2^+$ や $D_2^+$ 中で $1s\sigma_a$ 状態と $2p\sigma_u$ 状態間の遷移が起こり、repulsive な  $2p\sigma_u$  状態に遷 移した核波束が高調波の強度比 $I_{
m D2}/I_{
m H2}$ の増大に寄 与している可能性がある。実際に数値計算を行ったと ころ、 $H_2^+$ の場合には 10 fs 以降で、 $D_2^+$ の場合には 5 fs 以降で $2p\sigma_u$ の存在確率が大きくな0、 $2p\sigma_u$ 状態 への遷移を考慮して高調波の強度比を評価すると有 意に増大することが初めて明らかになった。ただし、 増大の程度は実験結果よりも小さめであり、 $1s\sigma_q$  状 態と  $2p\sigma_u$  状態間の遷移の効果に加え、電子波束が レーザー電場中で何度か往復してから再衝突するい わゆる later returns の効果が効いている可能性もあ る。これらの効果の詳細な検討は今後の課題である。

一方、1300 nm の光を基本波とした場合、N<sub>2</sub> や Ar 中からの高調波スペクトルが途中で強度がやや増大 する典型的な形状を示すのに対し、H<sub>2</sub> や D<sub>2</sub> 中から の高調波スペクトルは強度が単調に減少し、見かけ のカットオフもカットオフ則よりも小さいことが初め て明らかになった。H<sub>2</sub> や D<sub>2</sub> 中からの高調波発生に は、核波束の運動に伴う振動の自己相関関数の減少 の効果が顕著に現れているためと考えられる。1300 nm の光を用いた場合にも、高調波の強度比  $I_{\rm D2}/I_{\rm H2}$ は、数サイクルパルスを仮定した Lein の計算結果よ りも大きな傾向を示すことが分かった。

本研究に関する有益な議論をしていただいたドイ ツKassel大学のManfred Lein 博士に感謝する。

# 6.6.4 長波長レーザー電場の併用による高次の和・差周波発生

本研究室では先に、高次高調波発生の基本波として 用いるフェムト秒 Ti:sapphire レーザー光(800 nm) よりも波長が長く、強度が2桁以上低く、それ自身 の高調波は発生しないナノ秒 Nd:YAG レーザー光 (1064 nm)を併用すると、YAG レーザー光の光子 が1つあるいは2つ関与した和周波や差周波が高効率 で発生することを見出した(Y. Nomura *et al.*, Phys. Rev. A **75**, 041801(R) (2007))。併せて行った理論 計算に基づいて、高調波発生のための基本波よりも 長波長側に高次の和周波や差周波の発生効率を著し く高める波長領域があることも指摘した。

本年度は、パルス幅 60 fs 程度の光パラメトリック 増幅器からの出力である 1300 nm の光を併用し、高 次の和周波と差周波の発生について実験的および理 論的研究を行った。60 fs 程度のパルス幅の利用によ リ、ナノ秒 YAG レーザー光のときと比べ、媒質が絶 縁破壊を起こす強度を大きく高めることができ、高 調波発生用の Ti:sapphire レーザー光の強度と同程度 の強度を利用することができるようになった。実際、 800 nm 光と 1300 nm 光の強度がともに 1.0 × 10<sup>14</sup> W/cm<sup>2</sup> で両者の偏光が平行のとき、少なくとも 11 光子以上の1300 nm 光が関与する高次の和周波や差 周波を観測できた。2波長 Lewenstein モデルに基づ いて、任意の偏光の組み合わせや非摂動的な強度の 光を併用する場合にも適用できるなどの改良を加え たモデルを構築し、実験結果の特徴を説明すること ができた。また、800 nm 光と 1300 nm 光の偏光が 直交しているときに、1300 nm 光が2光子関与する 和周波を初めて観測することに成功した。実際、1光 子関与する過程よりも2光子関与する過程の方が高 効率であることも理論計算から明らかになった。

さらに、光パラメトリック増幅器の出力が波長可 変であることを生かして、高次の和周波や差周波出 力に対する併用する長波長パルスの波長依存性を調 べ、実験で調べた波長範囲(600 nm~1500 nm)で は、より長波長ほど高効率になる傾向があることも 明らかになった。

# 6.6.5 cross-defocusing 法を用いた非断 熱的分子配列の検出(4年生特別実 験)

超短パルスレーザー光を分子に照射すると回転波 束が形成される。非断熱的分子配列は、超短レーザー パルスの照射後に、回転波束の(fractional) revivals として、レーザー電場の存在しない状況で実現する。 非断熱的分子配列の時間発展を検出する手法の一つ として、分子の配列の仕方に応じて屈折率分布が変 化することを利用して、ポンプ光とわずかに角度を 付けて入射したプローブ光の defocusing を検出する 方法が知られている。これは、予めプローブ光のビー ム径と同じ大きさの遮蔽板を設置しておき、分子の 配列に伴う屈折率分布の変化によってプローブ光が defocusing を起こし、遮蔽板の外側に広がった光を 検出するものである。

本研究では、まず、この cross-defocusing 法を用 いて非断熱的な分子配列を検出するための光学系を 新たに構築し、この手法の有効性を検証した。実験 の結果、実際の超短パルス Ti:sapphire レーザー光の ビーム形状が厳密には楕円形であるため、従来用い られている円形の遮蔽板では測定が極めて困難であ ることが判明した。そこで、より現実的で簡便な手 法として、矩形の遮蔽板を用い、上下あるいは左右 から広がってくるプロープ光を検出する手法を提案 し、実際に簡便な手法として用いることができると ともに、測定結果も分子の配列を正確に反映し、妥 当なものであることを検証した。

## 6.6.6 その他

本年度は修士課程の大学院生3名が加入する一方、 修士2名を輩出した。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荒井慧悟君、堀泰斗君(以上夏学 期)、小野哲平君、武村友尚君(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、科学研究費補助金、基 盤研究(A)、「配列または配向した分子中からの高次 高調波発生とその物理(研究代表者:酒井広文)」に よって行われた。ここに記して謝意を表する。

<受賞>

[1] 碁盤晃久、「レーザー電場のない状況下での分子配向」 (共同研究者:峰本紳一郎、酒井広文)、第13回レー ザー学会優秀論文発表賞、2008年5月.

<報文>

(原著論文)

- [2] Shinichirou Minemoto, Tsuneto Kanai, and Hirofumi Sakai, "Alignment dependence of the structural deformation of CO<sub>2</sub> molecules in an intense femtosecond laser field," Phys. Rev. A 77, 041401(R) (4 pages) (2008).
- [3] Yu Sugawara, Akihisa Goban, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Laser-field-free molecular orientation with combined electrostatic and rapidly-turned-off laser fields," Phys. Rev. A 77, 031403(R) (4 pages) (2008).
- [4] Takayuki Suzuki, Yu Sugawara, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Optimal control of nonadiabatic alignment of rotationally cold N<sub>2</sub> molecules with the feedback of degree of alignment," Phys. Rev. Lett. **100**, 033603 (2008).
- [5] Yutaka Nomura, Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Efficient generation of high-order sum and difference frequencies in the xuv region by combining a weak longerwavelength field," Phys. Rev. A 75, 041801(R) (4 pages) (2007).

#### (会議抄録)

[6] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Basis for ultrafast imaging of molecular orbitals with high-order harmonic generation," Ultrafast Phenomena XV, Springer, P. Corkum, D. Jonas, R. J. D. Miller, and A. M. Weiner (Eds.), pp. 27–29 (2007). [7] Takayuki Suzuki, Yu Sugawara, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Optimal control of molecular alignment with the feedback of ion images," Ultrafast Phenomena XV, Springer, P. Corkum, D. Jonas, R. J. D. Miller, and A. M. Weiner (Eds.), pp. 579–581 (2007).

#### (著書)

[8] Hirofumi Sakai, "Molecular manipulation techniques and their applications," to appear in Advances in Multi-Photon Processes and Spectroscopy, Vol. 15, (25 pages) World Scientific (2008).

#### (学位論文)

- [9] 水谷弘毅、「水素分子中からの高次高調波発生におけ る核波束のダイナミクス」、修士論文、2008 年 3 月.
- [10] 村松雅弘、「整形した2波長レーザー電場を用いた分 子の配列と配向の制御」、修士論文、2008年3月.

< 学術講演 >

(国際会議)

#### 招待講演

- [11] Hirofumi Sakai, "Title to be announced," The Second Conference on Ultra-Fast Dynamic Imaging of Matter, Ischia, Italy, April 30–May 3, 2009.
- [12] Hirofumi Sakai, "(Tentative) Laser-field-free molecular orientation," The International Conference on Multiphoton Processes (ICOMP) XI, Heidelberg, Germany, September 18–23, 2008.
- [13] Hirofumi Sakai, "(Laser)-field-free molecular orientation: Proposal and its implementation," Minisymposium on Manipulating Atoms and Molecules by Strong Short Laser Pulses, Aarhus, Denmark, October 11, 2007.

#### 一般講演

[14] Akihisa Goban, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Laser-field-free molecular orientation," The 2008 Multiphoton Processes Gordon Research Conference, New Hampshire, U.S.A., June 8–13, 2008.

#### (国内会議)

#### 招待講演

[15] 酒井広文、「レーザー光を用いた分子操作技術とその 応用」、原子構造体・クラスタービームテクノロジー に関する先導的研究開発委員会第8回委員会、東京、 2008年5月8日.

#### 一般講演

[16] 大口 雄一郎、峰本 紳一郎、酒井 広文、「2 波長を 用いた高次和・差周波発生とその偏光依存性」、第 55 回応用物理学関係連合講演会、日本大学船橋キャンパ ス、2008 年 3 月.
- [17] 水谷 弘毅、峰本 紳一郎、大口 雄一郎、酒井 広文、 「H<sub>2</sub>,D<sub>2</sub> からの高次高調波発生における核波束のダイ ナミクス」、第 55 回応用物理学関係連合講演会、日 本大学船橋キャンパス、2008 年 3 月.
- [18] 峰本 紳一郎、櫃本 研太郎、酒井 広文、「時間依存偏 光パルスによる配列した窒素分子からの高次高調波 発生」、日本物理学会第 63 回年次大会、近畿大学、 2008 年 3 月.
- [19] 水谷 弘毅、峰本 紳一郎、大口 雄一郎、酒井 広 文、「水素および重水素分子中からの高次高調波発生 における核波束のダイナミクス」、日本物理学会第63 回年次大会、近畿大学、2008年3月.
- [20] 村松 雅弘、 峰本 紳一郎、酒井 広文、「2 波長レー ザー光のスイッチパルスを用いた完全に外場のない条 件下における分子配向の制御」、レーザー学会学術講 演会第 28 回年次大会、名古屋国際会議場、2008 年 1 月.
- [21] 櫃本 研太郎、峰本 紳一郎、酒井 広文、「時間依存偏 光パルスを用いた配列分子からの高次高調波発生」、 レーザー学会学術講演会第28回年次大会、名古屋国 際会議場、2008年1月.
- [22] 碁盤 晃久、峰本 紳一郎、酒井 広文、「レーザー電 場のない状況下での分子配向」、レーザー学会学術講 演会第 28 回年次大会、名古屋国際会議場、2008 年 1 月.
- [23] 水谷 弘毅、峰本 紳一郎、大口 雄一郎、酒井 広 文、「1300 nm を基本波とする H<sub>2</sub>/D<sub>2</sub> 分子からの高 次高調波発生」、レーザー学会学術講演会第 28 回年 次大会、名古屋国際会議場、2008 年 1 月.
- [24] 村松 雅弘、酒井 広文、「完全にフィールドフリー な状況下での分子の配向制御法の提案」、日本物理学 会第 62 回年次大会、北海道大学、2007 年 9 月.
- [25] 峰本 紳一郎、 碁盤 晃久、 酒井 広文、「高強度レー ザー電場のない状況下での分子の配列および配向制 御」、日本物理学会第 62 回年次大会、北海道大学、 2007 年 9 月.
- [26] 碁盤 晃久、峰本 紳一郎、酒井 広文、「静電場と 整形されたレーザー電場の併用による分子の配列およ び配向制御」、第68回応用物理学会学術講演会、北 海道工業大学、2007年9月.
- [27] 水谷 弘毅、峰本 紳一郎、 大口 雄一郎、 酒井 広文、 「1.3 μm 光を用いた H<sub>2</sub>,D<sub>2</sub> 分子からの高次高調波発 生」、第 68 回応用物理学会学術講演会、北海道工業 大学、2007 年 9 月.
- [28] 村松 雅弘、 酒井 広文、「整形された 2 波長レーザー パルスを用いた完全に field-free な条件下での分子配 向の制御手法」、第 68 回応用物理学会学術講演会、北 海道工業大学、2007 年 9 月.
- <その他>
- [29] Yu Sugawara, Akihisa Goban, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Laser-field-free molecular orientation with combined electrostatic and rapidly-turned-off laser fields," Virtual Journal of Ultrafast Science, Vol. 7, No. 4 (2008).

- [30] Takayuki Suzuki, Yu Sugawara, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Optimal control of nonadiabatic alignment of rotationally cold N<sub>2</sub> molecules with the feedback of degree of alignment," Virtual Journal of Ultrafast Science, Vol. 7, No. 2 (2008).
- [31] Yutaka Nomura, Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Efficient generation of high-order sum and difference frequencies in the xuv region by combining a weak longerwavelength field," Virtual Journal of Ultrafast Science, Vol. 6, No. 5 (2007).

## 6.7 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。 ヒトの脳には1000億もの神経細胞が存在し、それぞ れが平均1000個のシナプスを介して他の神経細胞 と連絡している。このような膨大な数の神経配線を 確実に実現するために如何なる原理が働いているの だろうか?当研究室では、動物の発生過程において 神経細胞がどのようにして自分の結合相手を見つけ 出し、シナプスを形成するのかを研究している。特に、シナプスが形成される際、細胞間でどのような コミュニケーションが取られているのかを分子レベ ルで理解することをめざしている。また、シナプス は「記憶の場」としても注目を集めており、その基 礎となるシナプスの性質を明らかにする、という観 点からも研究を進めている。

## 6.7.1 シナプス形成の生物物理

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、についてのわれわれの理解は限られている。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。特 に、バイオイメージング、電気生理学等の生物物理 学的諸技術を用い、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理解することを 目標としている。

シナプス形成期における細胞接着分子ファシクリン 2の生体内可視化(高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直)

神経細胞とその標的細胞(シナプス後細胞)との 間には、多様な分子群からなるシナプス構造が形成 される。シナプス部への分子集積はシナプス機能発 現の基盤になっていると考えられているが、生体内 で進行する発生過程において、タンパク質分子がど のようにシナプス部に集積するのかは明らかになっ

ていない。本研究では、シナプス部の分子集積に重 要な役割を果たすと考えられる細胞接着分子ファシ クリン2の生体内可視化を行なった。神経細胞に膜局 在型の黄色蛍光タンパク質 (mYFP)を発現し、同 時に筋肉細胞(標的細胞)にファシクリン2とシア ン蛍光タンパク質の融合体(Fas2-CFP)を発現する ショウジョウバエ系統を作成した。この系統の胚の 中で進行するシナプス形成過程を、レーザー共焦点 顕微鏡を用いて可視化解析した。神経細胞と筋肉細 胞が接触する前において、筋肉細胞上のファシクリ ン2は細胞膜上にほぼ均一な分布をしていたのに対 し、神経細胞と筋肉細胞との接触に伴って、その接触 部位へのファシクリン2の集積が観察された。シナ プス部への分子集積が生体内でのシナプス形成過程 のいつごろから始まるかは明らかになっていなかっ たが、本研究の生体内可視化の結果から、神経細胞 と標的細胞との接触後の数分から数十分で分子集積 が進行することが明らかになった。

次にファシクリン2のシナプス部集積をより詳細 に解析した。筋肉細胞に、膜局在型の YFP (mYFP) と Fas2-CFP の両方を同時に発現させ、シナプスが 形成される時期の膜形態とファシクリン2分布を可 視化した。筋肉細胞はシナプス形成期に微小な突起 (フィロポディア)を伸縮させることが知られている が、mYFPを用いることでそのフィロポディアを可視 化できる。神経細胞との接触がおこる前の時期では、 筋肉細胞上にフィロポディアが観察されるが、フィ ロポディア上に Fas2-CFP のシグナルは見られない。 一方、神経細胞と筋肉細胞との接触がおこる時期に なると、筋肉細胞のフィロポディア上に Fas2-CFP のシグナルが見られるようになった。この結果は、神 経細胞との接触依存的な Fas2-CFP の集積がフィロ ポディア(長さ数マイクロメートル、太さ数百ナノ メートル)のレベルで起こることを示唆する。これ までに様々な培養細胞系を用いた研究で、シナプス 形成過程における細胞接着分子の集積が示されてき た。本研究は、遺伝学と可視化技術を組み合わせる ことにより、生体内でのシナプス形成過程の初期に 細胞接着分子が集積すること明らかにし、さらにそ の集積がフィロポディアのレベルで起こることを明 らかにした。

細胞接着分子ファシクリン2によってシナプス部集 積する分子の探索と同定(高坂洋史、能瀬聡直)

これまでの我々の研究から、シナプス形成初期に おいて、後シナプス部に細胞接着分子ファシクリン 2が集積することが明らかになった。また、ファシク リン2は足場タンパク質ディスクスラージとグルタ ミン酸受容体の分布を制御することが明らかになり、 接着分子による他のタンパク質のシナプス部集積が 生体内で起こることが示された。そこで、シナプス 形成におけるファシクリン2の役割を更に調べるた めに、ファシクリン2によってその分布が制御され るような分子の探索を行なった。まず、成熟したシ ナプスに集積することが知られている分子いくつか についてシナプス形成期での分布を抗体染色法を用 いて調べた。14 種類の候補タンパク質の中から、5 種類が形成期のシナプスへの局在を示した。この5 種類の中で、足場タンパク質スクリブルのシナプス 部集積は、ファシクリン2欠失変異体で低下してい た。このことは、スクリブルの分布がファシクリン 2に制御されていることを示している。抗体染色法 では、前細胞と後細胞との区別がつけられないため、 スクリブルと緑色蛍光タンパク質との融合体 (Scrib-GFP)を筋肉細胞に発現させ、シナプス後細胞での 分布を調べた。Scrib-GFP は、後シナプス部に集積 し、ファシクリン2欠失変異体ではScrib-GFPの集 積が減少した。このことから、ファシクリン2が後 シナプス部へのスクリブルの集積を担っていること が明らかになった。我々は以前、足場タンパク質ディ スクスラージの後シナプス部集積にもファシクリン 2が関与していることを示しているが、足場タンパ ク質スクリブルの後シナプス部集積もファシクリン 2 によって制御されていることから、ファシクリン2 が後シナプス部への分子集積ネットワークの基点で あることが示唆される。また、候補タンパク質の中 には、ファシクリン2欠失体でシナプス部局在が減 少しなかったものもあったことから、ファシクリン 2による接着とは独立に並行して働く分子集積機構 の存在が予測された。

シナプス形成過程において神経支配により発現制御 される遺伝子の同定と機能解析(福井愛、外江岳、能 瀬聡直)

シナプスの形成過程においては、神経細胞(シナ プス前細胞:プレ)とその標的細胞(シナプス後細 胞:ポスト)が互いに互いの分化を誘導し合うこと でシナプスを形成していることが分かっている。中 でも特に重要であると考えられているのが、遺伝子 の発現制御である。その理由は、遺伝子の発現変化 は、シナプス構造を長期的に安定化することが可能 だからである。しかし、実際にどのような遺伝子が 発現制御されているのか、さらにそれがシナプス形 成においてどのような役割を持っているのかは、ほ とんど明らかになっていない。そこで我々は、特に、 プレによってポスト内での発現レベルが制御され、 シナプス形成を誘導する働きを持つような遺伝子を 同定することを試みた。モデルとして用いたショウ ジョウバエの神経筋結合系においては、運動神経が プレにあたり、それに支配される筋肉細胞がポスト にあたる。シナプス形成過程において、運動神経支 配依存的に筋肉細胞内で発現量が変化している遺伝 子を同定するために、まず、神経の支配を受けてい る筋肉細胞(野生型のシナプス形成後の時期の胚の 筋肉)と支配を受けていない筋肉細胞(野生型のシ ナプス形成前の時期の胚、及び神経支配が欠失した 変異体の胚の筋肉)を、それぞれの胚からマイクロ ピペットで単離して集める作業を行った。次に、それ ぞれの筋肉細胞内での全遺伝子の発現レベルを DNA Microarray を用いて比較した。DNA Microarray と は細胞内の全遺伝子の発現量を一度に検出できる技 術である。解析の結果、神経支配により筋肉細胞内 で発現制御される遺伝子を 82 個同定することに成 功した。この中には、転写因子など遺伝子発現に関 わる分子や、細胞表面分子などの細胞間相互作用に 関わる因子など、シナプス構造の形成に関わると期 待される遺伝子が多く含まれていた。現在、これら の遺伝子のシナプス形成における機能を調べるため、 遺伝子の機能欠失体や、逆に遺伝子を過剰に発現さ せた個体において、シナプスの形態に異常が起こら ないかを観察している。現在までに、いくつかの遺 伝子について形態の異常が観察されており、これら については、シナプスの形態変化の度合いを定量的 に解析している。今後は、シナプス形成に関与して いることが判明したこれらの遺伝子について、その 上流あるいは下流で働いている分子を同定し、シナ プス構造の形成に至るまでのメカニズムを解明する。 また、神経活動と遺伝子発現との関係を調べること で、記憶や学習に関わるとされているシナプス可塑 性(神経活動に応じてシナプスの強度が変化する現 象)と共通のメカニズムを探索できると考えている。 本研究は本学先端科学技術研究センター、油谷浩 幸教授との共同研究である。

神経支配依存性なミトコンドリア代謝活性上昇の解 析(市川彩子、風間北斗(現ハーバード大)、高坂洋 史、谷藤(森本)高子(現東京薬科大)、能瀬聡直)

ミトコンドリアの酸化的代謝は、真核細胞がエネ ルギーを得るために不可欠な機構である。ミトコン ドリアは細胞の活性に応じて、細胞内での分布や代 謝レベルを変化させ、適切なエネルギー供給を行う ことが知られている。近年、技術的な発達に伴い、ミ トコンドリアを生きたまま可視化することが可能と なった。その結果、ミトコンドリアの機能と神経活 動の間に密接な関係があることがわかってきた。し かし発生過程においてミトコンドリアの活動がどの ように制御されているのかはほとんど知られていな い。我々は、ショウジョウバエ胚の筋肉細胞が、シ ナプス形成過程において自発的な自家蛍光の変動を 示すことを見出し、それがフラビンたんぱく質に由 来することを、数々の実験により確認した。フラビ ンたんぱく質はミトコンドリアに局在し、酸化的代 謝の過程で自家蛍光性が変化する。従って、その蛍 光変動をイメージングすることによりミトコンドリ アのエネルギー代謝活性を、非侵襲的に観測するこ とが可能となった。

神経筋シナプスは神経細胞と筋肉細胞との相互作 用で形成される。我々はシナプス形成期の筋肉細胞に おいて上記の自家蛍光イメージングを行い、筋肉細 胞が数分に一回の頻度で自家蛍光の一過性上昇を示 すこと、その頻度がシナプス形成に伴い2~3倍程度 上昇することを見出した。また、この頻度上昇が、神 経軸索の伸長が遅れる prospero 変異体や神経伝達物 質放出過程に異常のある Syntaxin 変異体においては 起こらないことから、神経支配、神経伝達物質放出に 依存した過程であることを示した。今年度はさらに、 シナプス形成・維持に関わる細胞接着分子 Fasciclin2 の欠失体、足場タンパク Discs Large(Dlg)の欠失体 において自家蛍光イメージングを行い、フラビンた んぱく質活性化の頻度増加が阻害されていることを 見いだした。従って、シナプス形成過程における細胞 接着分子の働きが、シナプス後細胞である筋肉細胞 における代謝を調節していることが示唆された。ま た、細胞内の主要なシグナル伝達経路に関連する分子 である cAMP に対する分解阻害剤 (FORSKOLIN)、 calmodulin kinase II (CAMKII) に対する阻害剤、 calcineurin に対する阻害剤 (cyclosporinA)を様々な 濃度で用いて、このようなシグナル伝達経路が自家 蛍光変動頻度に関与しているのかを調べた。その結 果、どれもある程度の濃度に達すると自家蛍光の変動 頻度と、これらの主要なシグナル伝達系との関連が 示唆された。

## 6.7.2 シナプス特異性を決める分子の同定 と機能解析

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。われわれは、神 経細胞を個々に見分けて、その配線(軸索)ができる 過程を詳しく調べることができる、ショウジョウバ エの神経系をモデル系として、この問題にアプロー チしている。今年度は以下のような研究を行った。

単一細胞遺伝子発現解析による神経標的認識分子の 網羅的同定(稲木美紀子、鄭凌霄、新座(亀田)麻 記子、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。このような冗長性のある系において神 経の標的認識の分子機構を解明するため、少数の標 的細胞に的を絞り、そこで働く神経標的認識分子を 網羅的に同定することを試みた。具体的にはショウ ジョウバエの全遺伝子を解析できる DNA マイクロ アレイを用い、単一細胞レベルでの遺伝子発現解析 を行った。これまでに、異なる運動神経細胞 RP5 及 び RP1 によりそれぞれ支配されている 2 つの筋肉、 筋肉 12 及び筋肉 13 で 2 倍以上他方より高く発現す る遺伝子を、それぞれについて約100個ずつ同定し ている。これらの候補分子のうち、標的認識過程に 直接関与する可能性のある膜局在型または分泌型タ ンパク質に焦点をあてた機能解析を行い、これまで に新たな標的認識分子として Wnt4 を同定、報告し た。

本年度はさらに、筋肉特異的な遺伝子発現を制御 している可能性のある転写因子に着目し、欠失体を 用いた機能解析を行った。その結果、転写因子 acj6 の標的認識過程への関与を明らかにした。acj6 はホ メオボックスを持つ転写因子で、筋肉13においてよ り多く発現している。acj6 機能欠失変異体では、筋 肉12 の神経終末が小さくなる一方、筋肉13 では神 経終末が大きくなっていた。逆に、acj6 を筋肉12 に おいて異所発現させると、この運動神経の筋肉12上 での終末形成が阻害された。以上の結果から、acj6 が筋肉13に発現し、筋肉12に投射すべき運動神経 に対し阻害的に働きかけるような標的認識分子の発 現を正に制御していることが示唆された。本研究は 本学先端科学技術研究センター、油谷浩幸教授との 共同研究である。

Toll の機能解析:標的認識過程における抑制因子と その転写制御機構(稲木美紀子、新座(亀田)麻記 子、能瀬聡直)

ショウジョウバエの神経筋結合系において機能す る神経標的認識分子を網羅的に同定し、その転写制 御機構を明らかにする上記の試みのなかで同定した 遺伝子 Toll について、解析を進めている。Toll は、 哺乳動物まで保存され、生体内の様々な過程で重要な 役割を果たす LRR(leucine-rich repeat) ファミリー に属する膜タンパク質である。今回のマイクロアレ イ及び生体での発現解析の結果、Toll は M13 に発現 しているが、M12ではほとんど発現していないこと が示された。また、観察の結果、Toll の機能欠失変 異体では、筋肉12の神経終末が小さくなる一方、筋 肉13では神経終末が大きくなることが明らかになっ た。これらの結果から、Toll は筋肉 13 で発現し、筋 肉12に投射すべき運動神経細胞に対し阻害的に働 きかけることにより、それらが正しい標的細胞と結 合するよう制御していることが示唆された。さらに、 筋肉 12 に特異的に発現する転写因子 tey の機能欠失 変異体においては、Toll 遺伝子が、本来発現しない M12 にも発現するようになることを見出した。tey の機能欠失変異体では、筋肉の発生にも異常を伴う が、Tollの機能欠失変異体と同様の神経投射異常が 観察された。したがって、tey は Toll の発現を制御 することにより標的特異性を決定すると考えられる。 今後さらに tey による転写制御機構の解析を進めて いく予定である。

#### 6.7.3 神経回路の形成と可塑性の研究

これまでの研究により、神経回路のひとつの素子、 すなわち、神経細胞と標的間の配線の形成について、 その分子機構を明らかにしてきた。今後、得られた 知見をもとに、素子の研究を素子が集まった回路の 研究へと発展させたい。そのため、運動制御回路の 形成と可塑性の解析を開始した。研究はまだ始まっ たばかりだが、今後、神経活動イメージングや光に よる神経活動操作等の新技術とショウジョウバエの 発達した遺伝学とを組み合わせた研究を進めること により、神経回路形成の原理を明らかにしたいと願っ ている。 ぜん動運動を制御するセントラルパターン・ジェネ レータの形成と可塑性の解析(太知ゆかり、高坂洋 史、能瀬聡直)

セントラルパターン・ジェネレータ(CPG)は、生体内に存在し、摂食や移動などの定型運動を生成する神経回路である。CPGによって規定される運動パターンは、感覚入力によって調整されることで、状況にあった行動が行われると考えられている。しかし、CPGの形成や可塑性(神経活動の状況を反映して回路が調整されること)の機構は、ほとんど明らかになっていない。そこで、我々は、CPGによって制御されるショウジョウバエ胚のぜん動運動を観察することによって、CPGが形成される過程を解析することを試みた。

ショウジョウバエ胚は、産卵後22時間で、ぜん動 運動により孵化する。この運動を制御する CPG を 解析するために、胚が筋収縮を開始する産卵後17時 間と、孵化直前である産卵後19時間での運動パター ンを観察し、両者の比較を行った。その結果、産卵 後17時間の胚では、各体節が協調せずに、個々の筋 肉がランダムに痙攣する運動パターンが観察された。 産卵後19時間の胚では、このような散発的な痙攣は ほとんど観察されず、隣接した体節が協調的に収縮 と弛緩を繰り返す成熟したぜん動運動のパターンが 観察されるようになった。この結果は、産卵後19時 間に、CPG が完成することを示唆している。

CPG 形成の初期においては、CPG の神経回路自 身が発火を開始するとともに、その出力(筋肉の動 き)に伴う感覚器からのフィードバック等の入力を初 めて受ける。このように、CPG 回路内部および他か らの入力の影響を受けながら、回路の構築・調整が進 むため、他の時期より可塑性が高いことが予想され る。したがって、この時期に、人工的に神経活動を亢 進させることによって、CPG に可塑的変化が起こる と期待できる。そこで、我々は、channelrhodopsin-2(ChR2) タンパク質を用い、この系において神経活 動を強制的に亢進する手法を開発した。ChR2は、光 によって活性化するイオンチャネルタンパク質で、波 長488nmの光を照射すると即座に開き、一価または 価の陽イオンを透過する。その結果、神経細胞は 脱分極し、活動電位が発生する。ChR2をすべての 神経細胞に発現するショウジョウバエ系統を作製し、 産卵後19時間の胚において、波長488nmの光を照 射したところ、即座にぜん動運動を発生した。した がって、期待通り、神経活動を強制的に亢進できた と考えられる。今後、特定の神経を活性化させ、そ の結果、ぜん動運動の頻度や周期にどのような変化 が生じるかを観察することにより、CPGの可塑性の 機構を調べる予定である。

## 6.7.4 その他

能瀬の本務が新領域創成科学研究科・複雑理工学 専攻に移ったことに伴い、11月に研究室を柏キャン パス・基盤棟に移動した。今後も物理学教室の一員 として研究・教育活動を行う。

#### <報文>

(原著論文)

- Inaki, M., Yoshikawa, S., Thomas, J.B., Aburatani, H. and Nose, A. Wnt4 is a local repulsive cue that determines synaptic target specificity. Curr. Biol. 17, 1574-1579 (2007).
- [2] Kohsaka, H., Takasu, E. and Nose, A. In vivo induction of postsynaptic molecular assembly by the cell adhesion molecule Fasciclin2. J. Cell Biol. 179 1289-1300 (2007).
- [3] Kazama, H., Ichikawa, A, Kohsaka, H., Morimoto-Tanifuji, T. and Nose, A. Innervation and activity dependent dynamics of postsynaptic oxidative metabolism. Neuroscience, 152, 40-49 (2008).

(国内雑誌)

 [4] 能瀬聡直、稲木美紀子、新座(亀田)麻記子.神経特 異結合の分子機構 負のシグナルによる標的決定 蛋白質・核酸・酵素 53, 531-536 (2007).

(学位論文)

- [5] 市川彩子:シナプス形成過程における神経支配依存的 な代謝変動のイメージング(修士論文)
- [6] 鄭凌霄:神経軸索ガイダンスにおける acj6 遺伝子の 機能解析(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

#### 一般講演

- [7] Kohsaka, H., Takasu, E. and Nose, A.: Imaging postsynaptic assembly of the cell adhesion molecule Fasciclin2 in neuromuscular synaptogenesis. Cold Spring Harbor Meeting on "Neurobiology of Drosophila " 2007.10.3-7, Cold Spring Harbor, USA.
- [8] 高坂洋史、能瀬聡直: Target recognition at the tips of postsynaptic filopodia in Drosophila neuromuscular junction ,CDB Symposium 2008 "Turning neurons into a nervous system" 2008.3.24-26、 Kobe.
- [9] 福井 愛、稲木 美紀子、油谷 浩幸、能瀬 聡直: Single-Cell Analysis of Innervation-Dependent Gene Expression during Synaptogenesis, CDB Symposium 2008 ""Turning neurons into a nervous system" 2008.3.24-26, Kobe.

#### 招待講演

[10] Hiroshi Kohsaka, Etsuko Takasu, Akinao Nose: Induction of molecular assembly by cell adhesion molecule in Drosophila neuromuscular junction, US-Japan Brain Research Collaborative Program "Workshop on Receptor Trafficking and Cell Biology of Neurons: Physiology and Disease", Asilomar, USA, 2008.2.24-2.27

#### (国内会議)

#### 一般講演

- [11] 福井愛、稲木美紀子、油谷浩幸、能瀬聡直: Single-Cell Analysis of Innervation-Dependent Gene Expression During Synaptogenesis. 日本ショウジョ ウバエ研究会第8回研究集会、2007.7.2-4、淡路島
- [12] Kohsaka, H., Takasu, E. and Nose, A.: Postsynaptic accumulation of cell adhesion molecules imaged in vivo. 第 30 回日本神経科学大会、2007.9.10-12、 横浜
- [13] 福井愛、稲木美紀子、油谷 浩幸、能瀬 聡直: Analysis of innervation-dependent gene expression during synaptogenesis 日本神経科学大会、2007.9.10-12、横浜
- [14] Nose, A., Inaki, M, Aburatani, H.: Wnt4 is a local repulsive cue that determines target specificity. 第 30 回日本神経科学大会、2007.9.10-12、横浜
- [15] 高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直:細胞接着分子を介し たシナプス形成過程の可視化.東京大学生命科学研 究ネットワークシンポジウム 2007、2007.9.15、東京
- [16] 福井愛、稲木美紀子、油谷浩幸、能瀬聡直:シナプス 形成過程における神経支配依存的な遺伝子発現変化 の解析 東京大学生命科学研究ネットワークシンポ ジウム 2007、2007.9.15、東京
- [17] 福井愛、稲木美紀子、油谷浩幸、能瀬聡直:シナプ ス形成過程における神経支配依存的な遺伝子発現変 化の解析 生理学研究所 2007 年度シナプス研究会、 2007.12.6-7、岡崎
- [18] Ryou-Syou Tei, 稲木美紀子、新座 亀田麻記子、能瀬 聡直:神経標的認識の転写制御機構.日本分子生物学会 年会・日本生化学会大会 合同大会 2007、2007.12.11-15、横浜.
- [19] 市川彩子、風間北斗、高坂洋史、谷藤(森本)高子、 能瀬聡直:神経支配によるミトコンドリア代謝活性の調節:自家蛍光イメージングによる解析.日本分子 生物学会年会・日本生化学会大会 合同大会 2007、 2007.12.11-15、横浜.

#### 招待講演

- [20] Kohsaka, H., Takasu, E. and Nose, A.: Imaging postsynaptic molecular assembly in neuromuscular synaptogenesis. ショウジョウバエ研究会第8回研究 集会、2007.7.2-4、淡路島
- [21] 高坂洋史:細胞接着を介したシナプス誘導過程の生体内可視化. 生理学研究所 2007 年度シナプス研究会、2007.12.6-7、岡崎
- [22] 能瀬聡直:神経標的決定の制御機構:Wnt4を介した 負の選択. 日本分子生物学会年会・日本生化学会大 会 合同大会 2007、2007.12.11-15、横浜.
- [23] 能瀬聡直:シナプス分子集積の生体内イメージング. 第45回日本生物物理学会年会、2007.12.21-23、横浜.

(セミナー)

- [24] 能瀬聡直:神経回路形成の原理を探る,東京大学大学 院新領域創成科学研究科・基盤系アカデミックセミ ナー、07.05.10、柏
- [25] Akinao Nose: Watching and dissecting selective synapse formation, 07.10.09 Harvard Medical School.

(その他)

- [26] 能瀬聡直:神経配線形成の仕組みと生体内観察、東京 大学大学院新領域創成科学研究科・先端生命科学専攻 生命科学概論、07.11.16、 柏
- [27] 能瀬聡直:神経回路形成の分子メカニズム、東京大学大学院理学系研究科・教育クラスター講義 II、07.07.05、東京
- [28] Akinao Nose: Watching and dissecting selective synapse formation、システム神経生物学スプリング スクール 2008、08.3.1、京都

(新聞報道)

- [29] 日経産業新聞(2007年8月31日10面)神経との接 続を拒むたんぱく質を発見
- [30] 日刊工業新聞(2007年8月31日27面)負の印から 正しい配線
- [31] 読売新聞(2007 年 9 月 2 日朝刊 2 面) 誤った神経結 合拒むたんぱく質
- [32] 毎日新聞(2007 年 9 月 5 日朝刊 15 面)神経誘導物 質を発見
- [33] 科学新聞(2007 年 9 月 21 日 2 面)神経回路形成で 働く負の目印
- [34] 日刊工業新聞 (2007 年 12 月 18 日 22 面)動物個 体のシナプス 形成過程を可視化
- [35] 科学新聞(2008年1月1日4面) シナプス構築の 仕組み明らかに
- [36] 東京読売新聞朝刊(2008年1月6日19面) 神経 と筋肉「接続」の瞬間
- [37] 日経産業新聞 (2008 年 1 月 7 日 9 面) シナプスの 形成過程 生体内で可視化
- [38] 東京新聞朝刊 (2008 年 1 月 15 日 15 面) シナプス 形成 生体内で観察
- [39] 中日新聞夕刊 (2008 年 1 月 15 日 10 面) シナプス 形成 生体内で観察
- [40] 毎日新聞朝刊 (2008 年 2 月 17 日 19 面) シナプス 形成過程 ハエの卵で初確認

## 7 技術部門

## 7.1 技術部門

(大塚、佐伯、藤代、山本、\*樫村、\*\*南城)

\* 再雇用職員、\*\*技術補佐員

技術部門では、実験装置試作室業務、安全衛生・薬 品管理業務、IT 関連業務、学生実験、学生実習、研 究支援などの業務を行っている。技術部門担当の教 員(内田専攻長、坪野、早野、岡本、小澤(地惑)) と技術職員とで月に1度の物理技術室ミーティング を行っている。

#### 7.1.1 実験装置試作室(大塚、南城)

#### 利用状況

2007 年 4 月から 2008 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。

- 物理教室製作件数(240件)
- 設計及び部品等の問い合わせ(50件)
- 外注発注(25件)
- 他教室等からの作業依頼及び問い合わせ(25 件)主な依頼者(五月祭、生物科学 寺島研、 地球惑星科学 杉浦研、吉川研、船守研、多田 研、小暮研、田中研、素粒子物理国際センター)

#### 工作実習

物理学教室及び地球惑星科学所属の大学院修士1年 生を対象として、6月4日から7月5日まで下記の 内容で工作講習会を行なつた。

- 参加人員:42 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

- 5. 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
- 7.1.2 安全衛生·薬品管理(佐伯、山本)

安全衛生管理(佐伯)

- 物理学専攻の安全衛生管理
- 理学系研究科における産業医の巡視の同行(衛 生管理者)
- 理学系研究科・理学部環境安全管理室会議への オブザーバー参加

薬品管理(山本)

- 実験廃棄物処理 189 件
- 水銀系廃棄物処理・回収4月、7月、10月、翌1 月
- アスベスト廃棄処理2月
- 廃棄試薬処理依頼 50 件
- 不明試薬分析・処理依頼 20 件
- 労働安全衛生法指定化学物質使用量調査4月、 7月、10月、翌1月
- PRTR 法指定化学物質調查 5 月
- 毒物・劇物・特定毒物等調査6月、翌3月
- 不要化学物質等の廃棄希望調査8月
- 薬品管理システム (UTCRIS) の試薬等の一括 管理 16 研究室

高圧ガス管理(山本)

- 高圧ガス貯蔵量削減対策 WG 委員
- 不要ボンベ廃棄処理5本

#### 実験機器管理(山本)

 X線回折装置3台の定期点検(漏洩放射線測定) 10月、翌3月

- 7.1.3 IT 関連業務(藤代)
  - 専攻内各サーバ運用
  - 専攻内ネットワークシステムの運用(各研究室 及び理学部ネットワーク室)
  - 理学部情報システム室業務
  - 学務システム運用
  - テレビ会議システムの運用と管理
  - ソフトウェアのライセンス管理
- 7.1.4 学生実験(佐伯、藤代、山本、樫村)
  - 物理学実験 II(佐伯)
     3年生冬学期の物理学実験 II の生物物理学を 指導した。
  - 物理学実験I(藤代)
     3年生夏学期の物理学実験Iの計算機の技術指導をした。
  - 学生実験 (山本)
     3年生夏学期の物理学実験Iの放射線の技術指 導をした。
  - 学生実験 (山本)
     3年生夏学期の物理学実験IのX線回折の技術 指導をした。
  - 学生実験 II(山本)
     3 年生冬学期の物理学実験 II の分光測定の技術指導をした。
  - 3年生実験(物理学実験 I、II)のテーマの振 り分け(樫村)
  - 4年生の研究室(特別実験と理論演習)の振り 分け(樫村)

## 7.1.5 学生実習(佐伯)

当教室の大学院生を対象として、下記の内容で生物物理学実習を行った。

- 実習内容
  - 1. 基本操作(ピペットマンの使い方、生物試 料の扱い方と廃棄の仕方、試薬の調製等)
  - 2. 蛋白質(蛋白質の定量、蛋白質の電気泳動)
  - 3. 遺伝子(形質転換、プラスミドの調製、プ ラスミドの濃度測定と電気泳動)
  - 4. 応用(細胞性粘菌を用いた実験)

- 7.1.6 研究支援&特別実験(山本)
  - 高温超伝導物質の作成等7月~翌2月
  - 4年生特別実験の技術指導10月~翌2月 実験内容:TSFZ法による LNSCO【La<sub>1.48</sub>Nd<sub>0.4</sub>Sr<sub>0.12</sub>CuO<sub>4</sub>】及びLSCO 【La<sub>1.94</sub>Sr<sub>0.06</sub>CuO<sub>4</sub>、La<sub>1.85</sub>Sr<sub>0.15</sub>CuO<sub>4</sub>】の単結 晶作成と物性評価(試料作成、X線回折による 単結晶の同定、抵抗測定等)
- <報文>
- [1] 平成 19 年度理学系研究科技術報告集 (東京大学大学 院理学系研究科技術部、2008 年 3 月 )

<学術講演>

(国内会議)

一般講演

- [2] 佐伯喜美子:法人化後の安全衛生、第23回理学系研 究科・理学部 技術シンポジウム(東京大学、2007 年9月14日).
- [3] 佐伯喜美子: 生物物理学生実験の紹介、第19回生物 学技術研究会(岡崎コンファレンスセンター、2008 年2月14日-15日).

 $\mathbf{II}$ 

# Summary of group activities in 2007

## 1 Theoretical Nuclear Physics Group

Subjects: Structure and reactions of unstable nuclei, Monte Carlo Shell Model, Molecular Orbit Method, Mean Field Calculations, Quantum Chaos Quark-Gluon Plasma, Lattice QCD simulations, Structure of Hadrons, Color superconductivity Relativistic Heavy Ion Collisions, Relativistic Hydrodynamics, Color Glass Condensate

Member: Takaharu Otsuka, Tetsuo Hatsuda, Tetsufumi Hirano, Noritaka Shimizu and Shoichi Sasaki

In the nuclear theory group, a wide variety of subjects are studied. The subjects are divided into three major categories: Nuclear Structure Physics, Quantum Hadron Physics and High Energy Hadron Physics.

#### **Nuclear Structure Physics**

In Nuclear Structure group (T. Otsuka and N. Shimizu), nuclear structure physics is studied theoretically in terms of the quantum many-body problem. The major subjects are the structure of unstable exotic nuclei, shell model calculations including Monte Carlo Shell Model, reactions between heavy nuclei, Bose-Einstein condensation, symmetries and quantum chaos, etc. The structure of unstable nuclei is the major focus of our interests, and examples of the current subjects are the disappearance of conventional magic numbers and appearance of new ones, as studied extensively by using the Monte Carlo Shell Model [1, 2]. These phenomena are due to the change of the shell structure (shell evolution), and are largely due to nuclear forces such as the tensor force and the three-body force. We have proposed a new type of ab initio calculations. This method is designed for the description of heavier nuclei, and its application has been made for exotic carbon isotopes. Abnormally small B(E2) value of 16C has been reproduced, and predictions have been made [3]. We are working on the relation between symmtries and quantum chaos. A regularity occuring in a single-j-shell of the shell model calculation has been explained in a simple and basic way [4].

#### Quantum Hadron Physics

In Quantum Hadron Physics group (T. Hatsuda and S. Sasaki), many-body problems of quarks and gluons are studied theoretically on the basis of the quantum chromodynamics (QCD). Main research interests are the quark-gluon structure of hadrons, 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. Lattice QCD studies of hadron structure [5]
- 2. Lattice QCD study of the nuclear force [6]
- 3. Lattice QCD study of the quark-gluon plasma [7]
- 4. Phase transition in high density quark matter [8]
- 5. Study of the confinement proof in Yang-Mills theory
- 6. Heavy quark diffusion in the quark-gluon plasma

#### **High Energy Hadron Physics**

In High Energy Hadron Physics group (T. Hirano), the physics of the quark-gluon plasma and dynamics of relativistic heavy ion collisions are studied theoretically based on relativistic hydrodynamics and relativistic kinetic theories. Main subjects include (1) hydrodynamic description of the space-time evolution of the quark-gluon plasma, (2) transport description of hadrons and their dissipation (3) analyses of the quark-gluon plasma through hard probes such as jets and heavy quarks/quarkonia [9], and (4) color glass condensate for high energy colliding hadrons/nuclei.

## References

- A. Gade, P. Adrich, D. Bazin, M. D. Bowen, B. A. Brown, C. M. Campbell, J. M. Cook, S. Ettenauer, T. Glasmacher, K. W. Kemper, S. McDaniel, A. Obertelli, T. Otsuka, A. Ratkiewicz, K. Siwek, J. R. Terry, J. A. Tostevin, Y. Utsuno, and D. Weisshaar, "Spectroscopy of Mg-36: Interplay of normal and intruder configurations at the neutron-rich boundary of the Island of Inversion", Phys. Rev. Lett., 99, 072502, (2007).
- [2] S. Zhu, R. V. F. Janssens, B. Fornal, S.J. Freeman, M. Honma M, R. Broda, R. M. P. Carpenter, A. N. Deacon, B. P. Kay, F. G. Kondev, W. Krolas, J. Kozemczak, A. Larabee, T. Lauritsen, S. N. Liddick, C. J. Lister, P. F. Mantica, T. Otsuka, T. Pawlat, A. Robinson, D. Seweryniak, J. F. Smith JF, D. Steppenbeck, B. E. Tomlin, J. Wrzesinski, and X. Wang, "One-particle excitations outside the Ti-54 semi-magic core: The V-55 and Ti-55 yrast structures", Phys. Lett. B, 65, 135, (2007).
- [3] S. Fujii, T. Mizusaki, T. Otsuka, T. Sebe, and A. Arima, "Microscopic shell-model description of the exotic nucleus C-16", Phys. Lett. B, 650, 9 (2007).
- [4] N. Shimizu and T. Otsuka, "Ground State Properties with a Random Two-Body Interaction", Prog. Theor. Phys., 118, 491 (2007).
- [5] P. Boyle, A. Jüttner, R. Kenway, C. Sachrajda, A. Soni, S. Sasaki, R. Tweedie and J. Zanotti: "Kl3 semileptonic form factor from 2+1 flavour lattice QCD", Phys. Rev. Lett. 100, 141601 (2008).
- [6] N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda: "The Nuclear Force from Lattice QCD", Phys. Rev. Lett. 99, 022001 (2007).
- [7] Y. Maezawa, N. Ukita, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii and K. Kanaya [WHOT-QCD Collaboration]: "Heavy-Quark Free Energy, Debye Mass, and Spatial String Tension at Finite Temperature in Two Flavor Lattice QCD with Wilson Quark Action", Phys. Rev. D 75, 074501 (2007).
- [8] N. Yamamoto, M. Tachibana, T. Hatsuda and G. Baym: "Phase structure, collective modes, and the axial anomaly in dense QCD", Phys. Rev. D 76, 074001 (2007).
- [9] T. Gunji, H. Hamagaki, T. Hatsuda, T. Hirano : "Onset of J/ψ Melting in Quark-Gluon Fluid at RHIC", Phys. Rev. C 76, 051901 (2007).

## 2 Theoretical Particle and High Energy Physics Group

**Research Subjects:** The Unification of Elementary Particles & Fundamental Interactions

Member: Tohru Eguchi, Tsutomu Yanagida, Yutaka Matsuo, Koichi Hamaguchi Yuji Sugawara, Yosuke Imamura, Teruhiko Kawano, Taizan Watari

The main research interests at our group are in string theory, quantum field theory and unification theories. String theory, supersymmetric 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.

We list the main subjects of our researches below.

- 1. Superstring Theory.
  - 1.1 Calabi-Yau and T-fold compactifications [1, 10, 16, 17]
  - 1.2 Topological strings and matrix models [12, 18, 20]
  - 1.3 Black holes and string theory [14, 15]
- 2. Gauge theories and gauge/string duality
  - 2.1 Superconformal field theories and AdS/CFT [11, 21, 9]
  - 2.2 Spin chains and classical strings [8, 13]
- 3. High Energy Phenomenology.
  - 3.1 Phenomenology of beyond the standard models [6, 19]
  - 3.2 Particle cosmology [2, 5, 7]
  - 3.3 String inspired models [3, 4, 22, 23]

## References

- T. Eguchi and Y. Tachikawa, "Rigid Limit in N=2 Supergravity and Weak-Gravity Conjecture," JHEP 0708 (2007) 068.
- [2] K. Hamaguchi, T. Hatsuda, M. Kamimura, Y. Kino, T. T. Yanagida, "Stau-catalyzed 6Li production in bigbang nucleosynthesis," Phys. Lett. B 650 (2007) 268-274.
- [3] W. Buchmuller, K. Hamaguchi, O. Lebedev, S. Ramos-Sanchez, M. Ratz, "Seesaw neutrinos from the heterotic string," Phys. Rev. Lett. 99 (2007) 021601.
- [4] W. Buchmuller, K. Hamaguchi, O. Lebedev, M. Ratz, "Supersymmetric Standard Model from the Heterotic String (II)," Nucl. Phys. B 785 (2007) 149-209.
- [5] K. Hamaguchi, K. -I. Izawa, H. Nakajima, "Supersymmetric inflation of dynamical origin," Phys. Lett. B 662 (2008) 208-212.
- [6] K. Hamaguchi, S. Shirai and T. T. Yanagida, "Determining the mass for a light gravitino," Phys. Lett. B 651 (2007) 44.
- [7] K. Hamaguchi, S. Shirai and T. T. Yanagida, "Composite Messenger Baryon as a Cold Dark Matter," Phys. Lett. B 654 (2007) 110.
- [8] H. Hayashi, K. Okamura, R. Suzuki and B. Vicedo, "Large Winding Sector of AdS/CFT," JHEP 0711 (2007) 033.
- Y. Imamura, K. Kimura and M. Yamazaki, "Anomalies and O-plane charges in orientifolded brane tilings," JHEP 0803 (2008) 058.
- [10] T. Kawano, H. Ooguri, and Y. Ookouchi, "Gauge Mediation in String Theory," Phys. Lett. B652 (2007) 40.
- [11] T. Kawano and F. Yagi, "Supersymmetric  $\mathcal{N} = 1$  Spin(10) Gauge Theory with Two Spinors via a-Maximization," Nucl. Phys. **B786** (2007) 135.
- [12] J. E. Bourgine, K. Hosomichi, I. Kostov and Y. Matsuo, "Scattering of Long Folded Strings and Mixed Correlators in the Two-Matrix Model," Nucl. Phys. B 795 (2008) 243.
- [13] N. Dorey and K. Okamura, "Singularities of the Magnon Boundstate S-Matrix," JHEP 0803 (2008) 037.
- [14] J. Raeymaekers, "Open string attractors," JHEP 0704 (2007) 075.
- [15] J. Raeymaekers, "Near-horizon microstates of the D1-D5-P black hole," JHEP 0802 (2008) 006.
- [16] S. Kawai and Y. Sugawara, "D-branes in T-fold conformal field theory," JHEP 0802 (2008) 027.
- [17] S. Kawai and Y. Sugawara, "Mirrorfolds with K3 Fibrations," JHEP 0802 (2008) 065.
- [18] T.-S. Tai, "Instanton counting and matrix model," Prog. Theor. Phys. 119 (2008) 165-177.
- [19] Y. Nakayama, M. Taki, T. Watari and T. T. Yanagida, "Gauge mediation with D-term SUSY breaking," Phys. Lett. B 655 (2007) 58.
- [20] M. Taki, "Refined Topological Vertex and Instanton Counting," JHEP 0803 (2008) 048.

- [21] Y. Tachikawa and F. Yagi, "A-D-E Quivers and Baryonic Operators," JHEP 0801 (2008) 010.
- [22] L. J. Hall, M. P. Salem and T. Watari, "Quark and Lepton Masses from Gaussian Landscapes," Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 141801.
- [23] L. J. Hall, M. P. Salem and T. Watari, "Statistical Understanding of Quark and Lepton Masses in Gaussian Landscapes," Phys. Rev. D 76 (2007) 093001.

## 3 Sakai (Hideyuki) Group

**Research Subjects:** Experimental Nuclear Physics

Member: Hideyuki Sakai, Kentaro Yako

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 "spin-polarizations": spin-polarized beams  $(\vec{p}, \vec{n} \text{ and } \vec{d})$ , spin-polarized targets  $(\vec{p} \text{ and } {}^3\vec{H}e)$ , and spin-polarization analysis of reaction products  $(\vec{p}, \vec{n} \text{ and } \vec{d})$ .

Major activities during the year are summarized below.

#### ICHOR project: Isospin-spin responses in CHarge-exchange exOthermic Reactions —SHARAQ spectrometer

Spin-isospin response of nucleus is a unique excitation mode since it is related with mesons in nuclei and consequently it provides valuable information on nuclear forces. So far the research has been performed by using endothermic reactions by a stable beam such as (p, n) or (n, p), which is inevitably accompanied by a finite momentum transfer to nucleus. Such reactions hamper the study of spin-isospin responses in highly excited regions. We will try to overcome this difficulty by using exothermic reactions by an unstable beam such as  $({}^{12}N, {}^{12}C)$  or  $({}^{12}B, {}^{12}C)$ . With this new experimental means, we pursue the study of spin-hasping responses in the highly excited region. Aiming to identify new spin excitation modes, we are constructing a high energy resolution spectrometer SHARAQ dedicated to the exothermic reactions by unstable beams. In this year, we installed the analyzer magnets of SHARAQ and started measurement of the magnetic field of each element.

#### —First test of exothermic reaction—

In order to confirm the usefulness of the exothermic charge-exchange reaction for the spin-isospin response study, we performed the measurement of the exothermic reaction  ${}^{13}C({}^{12}N, {}^{12}C){}^{13}N^*$  as well as the endothermic reaction  ${}^{13}C({}^{12}C, {}^{12}B){}^{13}N^*$  at 100A MeV at zero degrees. Since the reaction Q value is different by 30 MeV, the cross section going to the excited 1<sup>+</sup> state at 15.1 MeV relative to that going to the 3.5 MeV 1<sup>+</sup> state will be enhanced in the exothermic reaction. The measurement was carried out at the National Superconducting Cyclotron Laboratory, Michigan University. The data analysis is in progress.

#### -Intermediate states involved in nuclear double beta decay

The double  $\beta$  decay of nuclei is the rarest process confirmed so far in nature. It is a second-order weak process, described by successive virtual Gamow-Teller transitions from the mother nucleus to the intermediate nucleus, and then from the intermediate to the daughter nucleus, emitting two neutrinos. Therefore GT strength distributions give information through which intermediate states the decay occurs. The intermediate GT states of double-beta decay nuclei, <sup>116</sup>Cd and <sup>48</sup>Ca, have been studied by the <sup>116</sup>Cd(p, n) / <sup>116</sup>Sn(n, p) and <sup>48</sup>Ca(p, n) / <sup>48</sup>Ti(n, p) measurements, respectively, at Research Center for Nuclear Physics, Osaka University. The GT strength distributions in the continuum region up to 30 MeV excitation energy have been derived for the first time. It has been found that for the present theoretical calculations underestimate the GT strength especially in the continuum in the (n, p) channel, which suggests that the contribution of the GT giant resonance region is underestimated.

#### Spin correlation in entangled two-nucleon system

In 1935, Einstein, Podolsky and Rosen presented a paradox to quantum correlations and concluded that the quantum mechanical description of nature is incomplete. So-called hidden variables are introduced in the classical approach to describe the correlation. The Bell's inequality shows that correlation produced by the hidden variables is weaker than that predicted by quantum mechanics. Having completed the study of the spin correlation between the two-proton system as one of the first severe tests in hadronic systems, we tested the quantum mechanical correlation in the proton-neutron system by measuring the spin correlation between the proton-neutron pair in [ ${}^{1}S_{0}$ ] produced by the  ${}^{1}H(d, pn)$  reaction at  $E_{d} = 270$  MeV. The measurement was performed by using the magnetic spectrograph SMART at the RIKEN accelerator research facility, employing two polarimeters EPOL and SMART-NPOL. The *S* value in CHSH type of the Bell's inequality is obtained as  $S_{exp}(45^{\circ}) = 3.47 \pm 1.80$ . Although this value is rather near to the prediction of quantum mechanics (S = 2.82), it is also within the  $1\sigma$  error from the local reality limit ( $S \leq 2$ ) due to the difficulty in the polarization measurement. If deuteron beam with a higher energy becomes available, the spin analysis at the polarimeter becomes more effective.

## 4 Hayano Group

**Research Subjects:** Precision spectroscopy of exotic atoms and nuclei

Member: Ryugo S. Hayano & Takatoshi Suzuki

#### 1) Precision X-ray spectroscopy of kaonic atoms

The X-ray spectroscopy of kaonic atoms is a unique tool to pin down the strength of kaon-nucleus strong interaction. The advent of silicon drift detector (SDD), a new type of high-resolution x-ray detector, enables us to study kaonic hydrogen and kaonic helium atoms with unprecedented precision.

- 1. X-ray spectroscopy of kaonic helium 4 solution to the long-standing kaonic helium puzzle [1]. It has been known since many years that there exists a large discrepancy between measured  $(-43\pm8$  eV) and calculated (~ 0 eV) values of the 2*p*-level strong interaction shift of the  $K^{-.4}$ He atom. We used the SDDs and sophisticated background-reduction and calibration techniques to measure the  $3d \rightarrow 2p$  X-rays of kaonic helium 4 at the KEK proton synchrotron, and determined the shift to be  $+2\pm2$  (stat.)  $\pm 2$  (syst.) eV, and thus solved the long-standing "kaonic helium puzzle".
- 2. X-ray spectroscopy of kaonic helium 3. The same technique will be used to study kaonic helium 3 in the J-PARC E17 experiment, which is the first experiment to be carried out at J-PARC in 2008-2009. Construction of the setup is in progress.
- 3. X-ray spectroscopy of kaonic hydrogen. SDDs will be also used to measure kaonic hydrogen x rays at the DA $\Phi$ NE  $e^+e^-$  collider (Frascati, Italy).

#### 2) Study of kaonic nuclei

 Study of kaonic nucleus and multi-nucleon absorption processes via the stopped K<sup>-</sup> reaction in helium 4 [2, 3].

In the  ${}^{4}\text{He}(K_{stopped}^{-}, YN/Yd)$  spectra measured in the KEK-PS E549 experiment , we have identified clearly the non-mesonic multinucleon absorption processes of  $K^{-}$  at rest on  ${}^{4}\text{He}$ . The isospin dependence of the two-nucleon absorption process has been revealed, and the three-nucleon absorption process has been experimentally identified for the first time. On the spectra, we have observed yet unresolved wide strength which are well separable from those simple multi-nucleon absorption processes, and they could be the signal of non-mesonic YN/YNN decay of strongly-bound  $\bar{K}NN/\bar{K}NNN$  states.

2. Search for  $K^-pp$  and  $K^-pn$  deeply-bound kaonic states at J-PARC.

The J-PARC E15 experiment (under construction, to be scheduled after E17) will use the <sup>3</sup>He( $K^-, n/p$ ) reaction to search for  $K^-pp$  and  $K^-pn$ . E15 is a kinematically complete experiment in which we measure both missing mass (n/p time of flight) and invariant mass (e.g.,  $\Lambda - p$ ) spectra, so as to provide decisive information on the nature of the much-debated "deeply-bound kaonic states".

#### 3) Antimatter study at CERN's antiproton decelerator

1. Determination of proton-to-electron mass ratio using the precision laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms [4, 5, 6].

In 2007, using a Doppler-suppressed two-photon spectroscopy of antiprotonic helium, we succeeded to determine the (anti)proton-to-electron mass ratio with a precision of  $10^{-9}$ , almost as precise as the known proton-to-electron mass ratio. We anticipate that this precision can be further improved in coming years, so that our measurement can provide the most precise value of  $m_p/m_e$ , an important fundamental constant.

2. Antihydrogen [7, 8, 9]. Antihydrogen atoms can now be abundantly produced by mixing antiprotons and positrons in a Penning trap. By superimposing an octupole magnetic field, we are now attempting to trap the produced antihydrogen atoms.

#### 4) Precision spectroscopy of pionic atoms.

Precision spectroscopy of the 1s level of pionic atoms using the  $(d, {}^{3}\text{He})$  reaction is a powerful method to study the  $\langle q\bar{q} \rangle$  condensate, and to understand why the proton is so heavy compared to its constituents, the u, d quarks. A new experimental setup based on a dispersion-matched optics is being constructed at the BigRIPS facility of RIBF.

- [1] S. Okada et al., Physics Letters B 653 (2007) 387.
- [2] T. Suzuki et al., Physical Review C 76 (2007) 068202.
- [3] M. Sato et al., Physics Letters B 659 (2008) 107.
- [4] R.S. Hayano, Canadian Journal of Physics 85 (2007) 453.
- [5] Ryugo S Hayano et al., Reports on Progress in Physics 70 (2007) 1995.
- [6] R. S. Hayano, Lecture Notes in Physics 745 (2007) 187.
- [7] R. Funakoshi et al., Physical Review A 76 (2007) 012713.
- [8] G B Andresen et al., Journal of Physics B 41 (2007) 011001.
- [9] G. B. Andresen et al., Phys. Plasmas 15 (2008) 032107.

## 5 Ozawa Group

#### **Research Subjects:** Experimental study of non-perturbative QCD

#### Member: Kyoichiro Ozawa

We have three research activities.

- Study of quark-gluon-plasma and hadronic matter under high-temperature and high density condition at Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at Brookhaven National Laboratory
- Study of mechanism of hadronic mass generation at KEK and J-PARC
- R&D of new detector for future J-PARC experiment

#### Study of quark-gluon-plasma at RHIC

In 6 years operation of Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at Brookhaven National Laboratory (BNL), many new phenomena related to hot and dense nuclear matter have been discovered. We performed the PHENIX experiment at RHIC and produced many new results on a wide range of physics subjects, including charged and neutral hadron production, single electron production, event isotropy, and many other topics.

In spite of these fruitful results, there are still remaining questions to be answered to further characterize the state of matter formed at RHIC. In particular, chiral properties of the dense matter produced has not been obtained, and should be provided. For the study of the chiral properties,  $\phi(1020)$  is an interesting meson because the restoration of approximate chiral symmetry at high temperature may modify its mass and width. These modifications can be shown directly in the line shape of the  $\phi \longrightarrow e^+e^-$  peak. In addition, it can affect the branching ratio of  $e^+e^-$  and  $K^+K^-$  decays, since  $\phi \longrightarrow K^+K^-$  has very small Q-value. To realize such measurements, baseline measurements in p + p collisions are important for comparison. In this year, we focused on the analysis of  $\phi \longrightarrow e^+e^-$  in p + p collisions. Figure 2.1.7 shows the comparison of transverse momentum distribution of  $\phi$  mesons between  $e^+e^-$  and  $K^+K^-$  decays. Results shows good consistency between both decay modes.

#### Study of mechanism of hadronic mass generation at J-PARC

Recently, the chiral property of QCD in hot( $T \neq 0$ ) or dense( $\rho \neq 0$ ) nuclear matter has attracted wide interest in the field of hadron physics. The dynamical breaking of chiral symmetry in the QCD vacuum induces an effective mass of quarks, known as constituent quark mass, which then determines the known mass of all the hadrons. In hot and/or dense matter, this broken symmetry is subject to be restored either partially or completely and, hence, the properties of hadrons can be modified. To observe such an effect, measurements of the in-medium decay of vector mesons are highly desirable for the direct determination of the meson properties in matter. We performed an experiment at KEK and are planning two new experiments at J-PARC to measure vector mesons at normal nuclear density.

One new experiment aim to collect 100 times larger statistics of  $\phi$  meson than that collected by the KEK experiment. We can discuss the velocity dependence of the mass spectra of vector mesons more pricisely and compare with the theoretical predictions. We are also able to use larger and smaller nuclear targets as lead and proton,

In another experiment, we propose combined measurements of nuclear  $\omega$  bound state and direct  $\omega$  mass modification. Nuclear  $\omega$  bound states are measured in  $p(\pi^-, n)\omega$  reaction and decays of generated  $\omega$  meson are also measured with  $\omega \to \pi^0 \gamma$  mode. Such exclusive measurement can supply essential information to establish partial restoration of the chiral symmetry in nucleus.

#### R&D of new detector for future J-PARC experiment

We have performed an R&D for future J-PARC experiment. The development of new detector based on Gas Electron Multiplier (GEM), which is originally developped at CERN. Using GEM, we are investigating 2 dimensional tracker for high rate counting. A prototype is reconstructed and reasonable signals are observed as shown in Fig. 2.1.8. Detailed evaluation of postion resolution is under way.

## 6 Komamiya group

**Research Subjects:** (1) Preparation for an accelerator technology and an experiment for the International linear  $e^+e^-$  collider ILC; (2) Data analysis for the BES-II experiment at BEPC-I, and TOF detector construction for BES-III experiment at BEPC-II; (3) Detector development for studying gravitational quantum effects and searching for new medium range force using ultra-cold neutron beam; (4) Preparation for physics analyses in the ATLAS experiment at the LHC *pp* collider; (5) Data analyses for the OPAL experiment at the LEP  $e^+e^-$  collider;

Member: Sachio Komamiya, Yoshio Kamiya (Tomoyuki Sanuki: up to June 2007)

We, particle physicists, are entering an exciting period in which new paradigm of the field will be opened on the TeV energy scale by new discoveries expected in experiments at high-energy frontier colliders, LHC and ILC.

<sup>1)</sup> Preparation for the International  $e^+e^-$  Linear Collider ILC: ILC is the energy frontier machine for  $e^+e^-$  collisions in the near future. In 2004 August the main linac technology was internationally agreed to use superconducting accelerator structures. In 2007 March, the Reference Design Report was issued by the Global Design Effort (GDE) and hence the project has been accelerated as an international big-science

project. We are working on ILC accelerator related hardware development, especially on the beam delivery system. We are developing the Shintake beam size monitor for the ATF2, which is a test accelerator system for ILC located at KEK. Also beam position monitors with a nano-meter position accuracy were developed with the KEK accelerator laboratory. Also we have been studying possible physics scenario and the large detector concept (ILD) for an experiment at ILC.

2) BES-II/-III experiment at IHEP: 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 ILC. We have made a research and development for TOF detector for the BES-III experiment together with IHEP, USTC. We successfully completed a test of over 500 photomultipliers in 1[T] magnetic field and they are already installed to the BES-II detector. We have studied the data analysis of baryon-pair production in  $J\psi$  decay using 5.8M BES-II  $J/\psi$  events.

3) Detector development for studying gravitational quantum bound states and searching for new medium range force using ultra-cold neutron beam: A detector to measure gravitational bound states of ultra-cold neutrons (UCN) is under way. We decided to use CCD's for the position measurement of the UCN's. The CCD is going to be covered by a Li layer to convert neutron to charged nuclear fragments. The simulation studies on the quantum effects of UCN in a narrow slit with 100  $[\mu]$  height is also done. In 2008 we will test our neutron detector at ILL Grenoble.

4) ATLAS experiment at LHC: The epoc of new paradigm for particle physics is going to open with the experiments at LHC. LHC is going to be operated in 2008. The ATLAS detector is almost ready. Some of our students work on the preparation for physics analysis at LHC. Search for supersymmetric particles with the missing transverse energy, and detector related and physics background are under study.

5) OPAL experiment at LEP: It is the experiment at the highest energy  $e^+e^-$  collider LEP of 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 Higgs boson was driven to a narrow mass range of 114-200 GeV. 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 38.0 GeV. The W boson mass was determined to be  $80.412\pm 0.042$  GeV (statistical and systematic errors combined).

## 7 Minowa-Group

#### **Research Subjects:** Experimental Particle Physics without Accelerators

#### Member: MINOWA, Makoto and INOUE, Yoshizumi

Various kinds of astro-/non-accelerator/low-energy particle physics experiments have been performed and are newly being planned in our research group.

We are 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 TOKYO 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. Previously, we put upper limits of  $g_{a\gamma\gamma} < (6.8 - 10.9) \times 10^{-10} \text{GeV}^{-1}$  to axion - photon coupling constant for the axion mass less than 0.27 eV.

We just started the third phase measurement in which we scanned the mass region around 1 eV using the upgraded apparatus to withstand higher pressure gas. After checking if everything with the system is working fine the mass scan will be continued to cover still wider mass range around 1 eV.

Another long-running project of our group is the direct experimental search for supersymmetric neutralino dark matter in an underground cell of the Kamioka Observatory. The search has been suspended for the improvement of the  $CaF_2(Eu)$  scintillation detector in order to get still higher sensitivity for the possible feeble neutralino signals. The improvement includes the pulse shape analysis for the discrimination between nuclear recoil events and electron recoil events. It has been commonly used for other scintillators like NaI(Tl) but not established for the  $CaF_2(Eu)$  yet. We are also studying a possibility of wavelength discrimination for the scintillation light. It is also confirmed with a certain kind of scintillators but not for the  $CaF_2(Eu)$  yet.

The third project is an R and D of a resonance ionization mass spectroscopy, RIMS, aiming at neutrino detection by a trace analysis of an exotic atomic element produced by charged current interaction of an electron neutrino or an anti-electron neutrino on a nucleus in the target material. We first started with an analysis of metal contamination on a silicon wafer, which is a big issue in contemporary semiconductor industry and could potentially be improved by a use of RIMS, too. We introduced a blue LASER diode for the resonant excitation and a red LASER diode for the ionization, and successfully examined the effectiveness of the method by trying to detect a small amount of potassium vapor. The next step is to find out a way to get a high detection efficiency.

We also started a new R and D of a compact anti-electron neutrino detector with plastic scintillator to be used at a nuclear reactor station, for the purpose of monitoring the power and plutonium content of the nuclear fuel. It can be used to monitor a reactor from outside of the reactor containment with no disruption of day-to-day operations at the reactor site. This unique capability may be of interest for the reactor safeguard program of the International Atomic Energy Agency(IAEA), as well as for the precision monitoring of the antineutrino flux in the close vicinity of a reactor in a short baseline neutrino oscillation experiment for the determination of the mixing angle  $\theta_{13}$ .

We have done a performance test of a plastic scintillator module, which is to be used as a building block of the detector. The basic design has been mostly completed with a help of computer simulation program.

## 8 Aihara Group

**Research Subjects:** Study of CP-Violation and Search for Physics Beyond the Standard Model in the *B* Meson System (Belle), Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment (T2K), Dark Energy Survey at Subaru Telescope (Hyper Suprimecam), and R&D for Hybrid Photodetectors and the ILC Silicon Detector Concept (SiD).

Members: H. Aihara, M. Iwasaki, H. Kakuno, T. Abe, N. Hastings and T. Uchida

One of the major research activities has been a study of CP-violation in the *B* meson system using the KEK *B*-factory (KEKB). This past year we presented a measurement of CP violating asymmetries in the neutral *B* meson decaying to two neutral Kaons ( $K_S^0$ 's). It was based on a data sample containing 657M  $B\bar{B}$  pairs. In this study, one neutral B meson was fully reconstructed in the  $B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$  decay mode, and the flavor of the accompanying *B* meson was identified by its decay products. The CP-violating parameters were measured from the asymmetry in the distributions of the proper-time interval between the two B decays:  $S = -0.38^{+0.69}_{-0.77}(\text{stat}) \pm 0.09(\text{syst})$  and  $A = -0.38 \pm 0.38(\text{stat}) \pm 0.05(\text{syst})$ , consistent with the Standard Model prediction. We have also started to develop the beamline simulation for the KEKB luminosity upgrade.

We are working on the instrumentation of J-PARC beamline for T2K long baseline neutrino oscillation experiment. In particular, we have fabricated the position (Eelectrostatic) and profile (Segmentd Secondary Emission) monitors for the primary proton beams. We have also successfully developed 13-inch hybrid photodetector combining a large-format phototube technology and avalanche diode as photo-electron multiplier.

We are building a 1.5 Giga pixel CCD camera (Hype Suprime-Cam) to be mounted on the prime focus of the Subaru telescope. With this wide-field camera, we plan to conduct extensive wide-field deep survey to investigate weak lensing. This data will be used to develop 3-D mass mapping of the universe. It, in turn, will be used to study Dark Energy.

SiD is a detector concept based on silicon tracking and a silicon-tungsten sampling calorimeter, complemented by a powerful pixel vertex detector, and outer hadronic calorimeter and muon system. Optimized forward detectors are deployed. In order to meet the ILC physics goals, we have designed the general purpose detector taking full advantage of the silicon technology. Our R&D program includes development of a silicon tracker and a 5Tesla superconducting solenoid.

- 1. Y. Nakahama *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of Time-Dependent CP-Violating Parameters in  $B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$  decays," Phys. Rev. Lett. **100**, 121601 (2008) [arXiv:0712.4234 [hep-ex]].
- H. Aihara *et al.*, "Status and Upgrade Plans of The Belle Silicon Vertex Detector," Nucl. Instrum. Meth. A582, 709 (2007).
- T. Tsuboyama *et al.*, "Silicon vertex detector for the KEK Super B factory," Nucl. Instrum. Meth. A572, 321 (2007).
- 4. Y. Kawai et al., "Large-aperture hybrid photo-detector," Nucl. Instrum. Meth. A579, 42 (2007).

## 9 Asai group

Research Subjects: (1) Particle Physics with the energy frontier accelerators (LEP and LHC) (2) Physics analysis in the ATLAS experiment at the LHC: (Higgs, SUSY and Extra-diemnsion) (3) Particles Physics without accelerator: tabletop size (4) Positronium and QED

## Member: S.Asai

- (1) LHC (Large Hadron Collider) has the excellent physics potential. Our group is contributing to the ATLAS group in the Physics analyses: focusing especially on three major topics, the Higgs boson, Supersymmetry and Extra-dimension.
  - Higgs: We are focusing on Higgs boson whose masses is lighter than 140 GeV.  $H \rightarrow \gamma \gamma$  or  $\tau \tau$  are the promising channel with the Vector boson fusion production processes. We are contributes on these two modes especially on (1) Background study, (2) Fake gamma estimation, (3) rapidity gap between the forward jets.
  - SUSY: We contributes SUSY study at the ATLAS experiment as a convener. We have developed methods of the data-driben background estimation for all channels, and we found out that we can estimate background number//distributions from the data itself with accuracy of 10-20% even in the early of the state.
  - Missing Et and jet calibration: We are working on performance of the mET and jet calibration of the ATLAS detector.
  - Extra-dimension If the extra-dimension is compactificated at a few TeV scale, Mini-black hole and KK excitation are interesting signals. We are study on these physics at the ATLAS experiments and have shown the ATLAS has good performance.
- (2) Small tabletop experiments have the good physics potential to discover the physics beyond the standard model, if the accuracy of the measurement or the sensitivity of the research is high enough. We perform the following tabletop experiments:
  - Search for extra-dimension with  $o Ps \rightarrow$  invisible.
  - Search for CP violation of the lepton sector using positoronium.
  - Precise measurement Search HFS of the posittronium.
  - Developing high power (>100W) stable sub THz RF source

## 10 Aoki Group

Subject: Theoretical condensed-matter physics

Members: Hideo Aoki, Takashi Oka

Our main interests are 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* should be possible. Specifically we study:

- Superconductivity in repulsively interacting electron systems
  - How to optimise  $T_C$  through the "fermiology" [1]
  - Superconductivity in iron-oxypnictides with a disconnected Fermi surface [2]
  - Coexistence of electron-phonon and electron-electron interactions [3]
- Magnetism in repulsively interacting electron systems
  - Itinerant ferromagnetism in multi-orbital systems [4]
  - Flat-band ferromagnetism in a designed organic polymer
- Carbon systems
  - Quantum Hall effect in graphene: Topological aspects[5], edge states, Landau-level laser[6]
  - Giant loop current in carbon nanotubes [7]
- Electron correlation effects in strong magnetic fields
  - Many-body states in graphene [8]
  - Electron-molecule picture for quantum dots in magnetic fields [9]
- Non-equilibrium and nonlinear phenomena in correlated electron systems
  - Landau-Zener tunnelling in the breakdown of Mott's insulator [10]
  - Correlated electrons in intense laser lights
- Dynamics of superfluid-Mott insulator transition in cold atoms in optical lattices
- Electronic structure of periodic nanostrucutures
  - "Supercrystal" picture in alkali-metal-loaded zeolites
  - Electrons on periodic curved surfaces

[1] Hideo Aoki: Superconductivity in highly correlated systems, in H. Akai, A. Hosaka, H. Toki and F. B. Malik (eds): *Condensed Matter Theories* Vol. 21 (Nova Science, 2007), Chapter 14.

[2] K. Kuroki, S. Onari, R. Arita, H. Usui, Y. Tanaka, H. Kontani and H. Aoki: Unconventional superconductivity originating from disconnected Fermi surfaces in  $LaO_{1-x}F_xFeAs$ , arXiv0803.3325.

[3] M. Tezuka, R. Arita and H. Aoki: Phase diagram for the half-filled one-dimensional Hubbard-Holstein model, *Phys. Rev. B* **76**, 155114 (2007).

[4] S. Sakai, R. Arita and H. Aoki: Itinerant ferromagnetism in the multiorbital Hubbard model — a dynamical mean-field study, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 216402 (2007).

[5] Y. Hatsugai, T. Fukui and H. Aoki: Topological aspects of graphene — Dirac fermions and the bulk-edge correspondence in magnetic fields, *Eur. Phys. J. Special Topics* **148**, 133-141 (2007);

[6] T. Morimoto, Y. Hatsugai and H. Aoki: Cyclotron radiation and emission in graphene, arXiv0712.4200.
[7] N. Tsuji, S. Takajo and H. Aoki: Large orbital magnetic moments in carbon nanotubes generated by resonant transport, *Phys. Rev. B* 75, 153406 (2007).

[8] Y. Hatsugai, T. Fukui and H. Aoki: Topological low-energy modes in N = 0 Landau levels of graphene — a possibility of a quantum-liquid ground state, *Physica E* 40, 1530 (2008).

[9] P.A. Maksym, Y. Nishi, D.G. Austing, T. Hatano, L.P. Kouwenhoven, H. Aoki, S. Tarucha: Accurate model of a vertical pillar quantum dot, arXiv0804.3191; P.A. Maksym, R. Arita and H. Aoki: Spin configuration in the electron molecule in few-electron quantum dots in strong magnetic fields — superposition of multiple configurations, *Int. J. Modern Phys. B* **21**, 1643 (2007).

[10] T. Oka and H. Aoki: Nonequilibrium quantum breakdown in a strongly correlated electron system, *Quantum Percolation and Breakdown (Lecture Notes in Physics)* (Springer Verlag), arXiv:0803.0422.

## 11 Miyashita Group

Research Subjects: Statistical Mechanics, Phase Transitions, Quantum Spin systems,

Quantum Dynamics, Non-equilibrium Phenomena

Member: Seiji Miyashita and Keiji Saito

#### 1. Novel Quantum States, Excited States, and Quantum Dynamics

In strongly interacting quantum systems, various interesting phases appear in the ground state, and also coherent motion of quantum mechanics exhibits various characteristics which are not found in classical systems. They would play important roles in controls of quantum information processing. We have studied such novel quantum phases and quantum responses.

As a novel quantum state, we have studied "super-solid state". In particular, we investigated conditions for the existence of this state. We obtained the phase diagram of the superfluid, solid, and super-solid state in the ground state, and also studied finite temperature properties of them. We also found a novel size dependence of excited states in a spin chain consisting of S = 1/2 and 1 in the collaboration with Professor Pati's group (JNCASR) in Bangalore. We also studied quantum effects when we carry particles by potential trap, and found the tunneling escape during carry-up procedure. We analyzed it from the view point of a successive Landau-Zener transition. Effects of the acceleration were also investigated. Energy-gap control by a transverse field in an easy-axis magnets and effects of oscillating field were also investigated. In the transverse Ising model, we studied the dynamics of magnetization under swept-field, and found a kind of quantum spinodal decomposition phenomena with a collaboration of Professor De Raedt group in Groningen University. The dynamics of itinerant magnetism as a function of filling parameter was also studied. In particular, we studied how the Mott-insulator antiferromagnetic state changes to the Nagaoka's ferromagnetism when we remove an electron. Moreover we studied magnetic states of itinerant systems with larger spins, e.g. S = 1 (Boson), 3/2 (Fermion), etc. Formalism for the line shapes of the electron spin resonant (ESR) in dissipative environments and also general formalism of the quantum master equation were also studied. The problem of domain wall in a uniaxial anisotropic Heisenberg spin systems was studied from the view point of quantum spin dynamics with a collaboration of Professor De Raedt. Problems of quantum annealing, qubit controls, quantum transport phenomena, and problems in quantum measurements were also studied. These studies are executed as a crest project in JST on "Quantum-mechanical cooperative phenomena and their applications".

#### 2. Phase Transition in Spin-Crossover Materials

We studied cooperative properties of spin-crossover materials, which attract much interest because of their interesting responses to the light-irradiation. In particular, the so-called LIESST (light-induced excited spin state trapping) phenomena have been extensively studied. We have studied, the thermodynamical properties including metastable state which would play important roles for the photo-excitation. We proposed so called "generic scenario" of ordering processes, which have been found in experiments. In the last year, we studied the origin of the cooperativity of the spin transition. We pointed out that the difference of the sizes of the high-spin (HS) and the low-spin (LS) states is an important ingredient, and demonstrated that the elastic interaction of lattice distortion due to the size difference can induce a phase transition which satisfies the generic sequence. We also studied the pressure dependence of the phases in this elastic model and found the generic sequence again. Moreover, we studied the critical property of the model and we found that this model belongs to the universality class of the "mean-field model" which would be due to the effective long range interaction in the elastic interaction. We have proposed that the clusterization, which is a typical future of phase transition and causes the critical opalescence, would be strongly suppressed in this model.

#### 3. Slow Relaxation in Highly Frustrated Systems

Non-equilibrium phenomena are also important research topics of our group. In models with frustration, we studied slow relaxations caused by the so-called entropy-origin in which the structure of density of states plays important roles. In a model with a decorated-bonds we have pointed out that the ordering process becomes very slow due to a kind of spin-screening effect. We have studied the mechanism of the screening and estimated the time scale quantitatively. In the standard thermal annealing methods it is difficult to find the ground state of this model and we applied the quantum annealing method to it. We also studied the slow relaxation in the ordered state of the Ising-like kagome antiferromagnetic Heisenberg model. In this system, reflecting the macroscopic degeneracy of the grand state which is a characteristic of the cornersharing frustrated systems, we found a slow relaxation process even after the magnetization reached to the equilibrium value. We studied this process by observing the number of the weathervane loops which represent degenerate configurations. We found the a kind of entropy-induced ordering process. We also studied a relaxation processes in which the order parameter moves opposite direction to the equilibrium value in the early stage of the relaxation. We studied this problem from a view point of eigenvalue problem of time evolution operator, and demonstrated examples explicitly in simple systems.

## 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

The t-J model as a mechanism for the oxide high- $T_c$  superconductors.[1]

Mott metal-insulator transition and superconductivity.

- Multi-orbital superconductivity in  $Na_x CoO_2 \cdot yH_2O$  [2-4]
- Organic conductors

Dimensional crossover and superconductivity in quasi-one-dimensional organic conductors.[5] Novel spin-liquid state in an organic system with geometrical frustration.[6] Static nonequilibrium state of the competing charge orders under an electric field.

• Theories of anisotropic superconductivity

Superconductivity and antiferromagnetism in a non-centrosymmetric system.[7,8] FFLO superconductivity near an antiferromagnetic quantum critical point.[9] Anderson localization and superconductivity fluctuation in an impurity band.

- Electronic and spin states in frustrated systems
  Effects of carrier doping in a Kagomé lattice.
  Numerical simulation in classical XY spin systems with frustration.
  Ground states of the frustrated quasi-two-dimensional Hubbard model.[10]
  Analysis of the rattling transition with classical Potts model.
- Kondo effect and heavy fermion systems
   Kondo effects in quantum dots.[11]
   Fermi surface reconstruction with Kondo screening at quantum critical point.[12]
- Two-dimensional <sup>3</sup>He system on graphite A new quantum liquid ralized in the two-dimensional *t-J-K* model with ring-exchange interaction.[13]
- Microscopic theory for the magnetic domail wall driving.
- Interband effects of magnetic field on Hall effects for Dirac electrons in Bismuth.[14]
- [1] M. Ogata and H. Fukuyama: Rep. Prog. Phys. 71, 036501 (2008).
- [2] M. Ogata: J. Phys.: Condens. Matter 19, 145282 (2007).
- [3] M. Mochizuki, H. Q. Yuan and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. 76, 023702 (2007).
- [4] D. Yoshizumi, Y. Muraoka, Y. Okamoto, Y. Kiuchi, J. Yamaura, M. Mochizuki, M. Ogata, and Z. Hiroi: J. Phys. Soc. Jpn. 76, 063705 (2007).
- [5] Y. Fuseya and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. 76, 093701 (2007).
- [6] Y. Hayashi and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. 76, 053705 (2007).
- [7] Y. Yanase and M. Sigrist: J. Phys. Soc. Jpn.76, 043712 (2007).
- [8] Y. Yanase and M. Sigrist: J. Phys. Soc. Jpn.76, 124709 (2007).
- [9] Y. Yanase: J. Phys. Soc. Jpn.77, No.6 (2008).
- [10] T. Yoshikawa and M. Ogata: arXiv:0804.2548, submitted to Phys. Rev. B.
- [11] D. Matsubayashi and M. Eto, Phys. Rev. B 75, 165319 (2007).
- [12] H. Watanabe and M. Ogata: Phys. Rev. Lett. 99, 136401 (2007).
- [13] Y. Fuseya and M. Ogata: arXiv:0804.4329, submitted to J. Phys. Soc. Jpn.
- [14] Y. Fuseya, M. Ogata and H. Fukuyama: arXiv:0804.0076, submitted to Phys. Rev. Lett.

## 13 Tsuneyuki Group

**Research Subjects:** Theoretical Condensed-matter physics

#### Member: Shinji Tsuneyuki and Kazuto Akagi

Computer simulations from first principles 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 extreme conditions like ultrahigh pressure or at surfaces where experimental data are limited. Our principal tool is molecular dynamics (MD) and first-principles electronic structure calculation based on the density functional theory (DFT), while we are also developing new methods that go beoynd the limitation of classical MD and DFT.

Our research subjects in FY2007 were as follows:

- Structures and electronic properties of surfaces
  - Effect of strong electric field on organic molecules chemisorbed on Si surfaces
  - Stability and band profile of a SiON insulating layer on SiC(111)
  - Soft X-ray spectra of a SO<sub>2</sub> molecule chemisorbed on Ni
  - Strain-induced self-organization of N/Cu(001)
- Structures and electronic properties of solids
  - Potential energy surface of  $Ba_{1-x}Ca_xTiO_3$
  - 3D C60 polymer
- Electronic structure analysis of proteins by the LCMO scheme
- New methods of electronic structure calculation
  - First-principles wavefunction theory for solids based on the transcorrelated method
  - First-principles calculation of phonon dispersion relation by a direct method

## 14 Fujimori Group

**Research Subjects:** Photoemission Spectroscopy of Strongly Correlated Systems

Member: Atsushi Fujimori and Teppei Yoshida

We study the electronic structures of strongly correlated systems using high-energy spectroscopic techniques such as photoemission spectroscopy, x-ray absorption spectroscopy and x-ray magnetic circular dichroism using synchrotron radiation. We investigate mechanisms of high-temperature superconductivity [1], metal-insulator transitions, giant magnetoresistance, carrier-induced ferromagentism, spin/charge/orbital ordering in strongly correalted systems such as transition-metal oxides [2], magnetic semiconductors [3], and their interfaces.

[1] M. Hashimoto, T. Yoshida, H. Yagi, M. Takizawa, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Tanaka, D.H. Lu, Z.-X. Shen, S. Ono and Y. Ando: Doping Evolution of the Electronic Structure in the Single-Layer Cuprates  $Bi_2Sr_{2-x}La_xCuO_{6+\delta}$ : Comparison with Other Single-Layer Cuprates, Phys. Rev. B 77 (2008) 094516-1–8.

[2] H. Wadati, A. Maniwa, A. Chikamatsu, I. Ohkubo, H. Kumigashira, M. Oshima, A. Fujimori, M. Lippmaa, M. Kawasaki and H. Koinuma: *In-situ* Photoemission Study of  $Pr_{1-x}Ca_xMnO_3$  Epitaxial Thin Films with Suppressed Charge Fluctuations, Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 026402–1-4.

[3] J.I. Hwang, M. Kobayashi, G.S. Song, A. Fujimori, A. Tanaka, Z.S. Yang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, H.C. Jeon and T.W. Kang: X-Ray Magnetic Circular Dichroism Characterization of  $GaN/Ga_{1-x}Mn_xN$  Digital Ferromagnetic Heterostructure, Appl. Phys. Lett. **91** (2007) 072507–1-3.

## 15 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 as a superconductor-insulator transition 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 an s-wave like symmetry which is evidenced by a coherence peak at  $T_c$  in the nuclear relaxation rate, revealed by the first successful NMR measurement under high pressure.

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), and inelastic X-ray scattering (with P. Abbamonte and G. A. Sawatzky).

4) In the undoped compound  $La_6Ca_8Cu_{24}O_{41}$  spin thermal conductivity is remarkably enhanced to the level of silver metal along the ladder-leg direction due to the presence of a spin gap and to a ballistic-like heat transport characteristic of 1D.

## (2) Observation of Two Gaps, Pseudogap and Superconducting Gap, in Underdoped High-T $_c$ Cuprates.

The most important and mysterious feature which distinguishes cuprate from conventional superconductors is the existence of "pseudogap" in the normal state which has the same d-wave symmetry as the superconducting gap does. We employed c-axis optical spectrum of  $Yba_2Cu_3O_{6.8}$  as a suitable probe for exploring gaps with d-wave symmetry to investigate the inter-relationship between two gaps. We find that the two gaps are distinct in energy scale and they coexist in the superconducting state, suggesting that the pseudogap is not merely a gap associated with pairs without phase coherence, but it might originate from a new state of matter which competed with d-wave superconductivity.

#### (3) Nanoscale Electronic Phenomena in the High- $T_c$ Superconducting State

The STM/STS collaboration with J. C. Davis' group in Cornell Univ. 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 non-magnetic Zn (magnetic 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 highlights are as follows:

#### 1) Granular structure of high-Tc superconductivity

The STM observation of "gap map" has been extended to various doping levels of  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ . The result reveals an apparent segregation of the electronic structure into SC domains of ~3mm size with local energy gap smaller than 60meV, located in an electronically distinct background ("pseudogap" phase) with local gap larger than 60meV but without phase coherence of pairs. With decrease of doped hole density, the (coverage) fraction of the superconducting area decreases or the density of the number of superconducting islands decreases. Apparently, this is related to the doping dependence of superfluid density as well as the doping dependence of the normal-state carrier density.

#### 2) Homogeneous nodal superconductivity and heterogeneous antinodal states

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 (angle-resolved-photoemission).

These dispersive quasiparticle interference is observed at all dopings, and hence the low-energy states, dominated by the states on the "Fermi arc" formed surrounding the gap nodes, are spatially homogeneous(nodal superconductivity). By contrast, the quasiparticle states near the antinodal region degrade in coherence with decreasing doping, but have dominant contribution to superfluid density. This suggests that the volume fraction of spatial regions all of whose Fermi surface contributes to superfluid decreases with reduced doping. The result indicates the special relationship between real-space and momentum-space electronic structure.

## 16 Hasegawa Group

#### **Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics**

#### Members: Shuji HASEGAWA and Toru HIRAHARA

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. Peculiar atomic arrangements and surface electronic states, characteristic of the surface superstructures and ultra-thin films, on semiconductor surfaces, are our platforms for studying physics of atomic-scale low-dimensional systems by using ultrahigh vacuum experimental techniques such as electron diffraction, scanning electron microscopy, scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy, and *in-situ* 4-point-probe conductivity

measurements with four-tip STM and monolithic micro-4-point probes. Main results in this year are as follows.

(1) Surface electronic transport: Metal-insulator transitions, hopping conduction, and a Mott insulator in surface states. Quantitative evaluation of surface-state conductivity from Fermi surface mapping. Conductance of individual Cobalt silicide nanowires and metal-coated carbon nanotube tips.

(2) Surface phases, ultra-thin films, and phase transitions: Order-disorder phase transition, chargedensity-wave transition, Mott transition on various metal-induced surface superstructures of Si and Ge. Quantum-well state in ultra-thin Pb, Bi, and Ag films. Ge nanodots layer. Rashba effect in surface state and hybridization with quantum-well states.

(3) Construction of new apparatuses: Green's-function STM (low-temperature four-tip STM), Magnetooptical Kerr effect apparatus. Magneto-resistance apparatus.

- I. Matsuda, C. Liu, T. Hirahara, M. Ueno, T. Tanikawa, T. Kanagawa, R. Hobara, S. Yamazaki, S. Hasegawa, and K. Kobayashi: *Electron-phonon interaction and localization of surface-state carriers in a metallic monolayer*, Physical Review Letters **99**, 146805 (Oct 2007).
- [2] H. Kakuta, T. Hirahara, I. Matsuda, T. Nagao, S. Hasegawa, N. Ueno, and K. Sakamoto: *Electronic structures of the highest occupied molecular orbital bands of a pentacene ultrathin film*, Physical Review Letters 98, 247601 (Jun 2007).
- [3] Y. Nakayama, S. Yamazaki, H. Okino, T. Hirahara, I. Matsuda, S. Hasegawa, and M. Ichikawa: *Electrical conduction of Ge nanodot arrays formed on an oxidized Si surface*, Applied Physics Letters **91**, 123104 (Sep 2007).
- [4] T. Hirahara, I. Matsuda, S. Yamazaki, N. Miyata, T. Nagao, and S. Hasegawa: Large surface-state conductivity in ultrathin Bi films, Applied Physics Letters 91, 202106 (Nov 2007).
- [5] H. Okino, I. Matsuda, S. Yamazaki, R. Hobara, and S. Hasegawa: Transport in Defective Quasi-One-Dimensional Arrays of Chains of Gold Atoms on a Vicinal Silicon Surfaces, Physical Review B 76, 035424 (Jul 2007).
- [6] T. Hirahara, K. Miyamoto, I. Matsuda, T. Kadono, A. Kimura, T. Nagao, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, S. Qiao, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, and S. Hasegawa: *Direct Observation of Spin Splitting in Bismuth Surface States*, Physical Review B 76,153305 (Oct 2007).
- [7] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobara, S. Hasegawa, Y. H. Kim and G. S. Lee: Influence of Defects on Transport in Quasi-One-Dimensional Metallic Atomic-Chain Arrays on Silicon Surfaces, Physical Review B 76, 195418 (Nov 2007).
- [8] H. Morikawa, I. Matsuda, and S. Hasegawa: Absence of Charge-Density Waves on the Dense  $Pb/Ge(111)-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  Surface, Physical Review B, in press (2008).
- [9] Y. Nakayama, K. Takase, T. Hirahara, S. Hasegawa, T. Okuda, A. Harasawa, I. Matsuda, Y. Nakamura, and M. Ichikawa: *Quantum-Size Effect in Uniform Ge-Sn Alloy Nanodots Observed by Photoemission Spectroscopy*, Japanese Journal of Applied Physics 46, L1176 (Nov 2007).
- [10] I. Matsuda and S. Hasegawa: Fermiology and transport in metallic monatomic layers on semiconductor surfaces, Journal of Physics: Condensed Matter 19, 355007 (Aug 2007).
- [11] S. Hasegawa: Surface One-Dimensional Structures, Chinese Journal of Physics 45, 385 (Aug 2007).
- [12] S. Hasegawa, M. Namiki, and K. Kitahara: *Japan Has Joined the IPhO*, Bulletin of The Association of Asia Pacific Physical Societies **17** (No. 3), 23 (Jun 2007).

## 17 Fukuyama Group

**Research Subjects:** Low Temperature Physics (Experimental):

Two-dimensional (2D) quantum fluids and solids with strong correlations and

frustration,

Low temperature scanning tunneling microscopy and spectroscopy of 2D electron systems (2DES) and exotic superconductors.

## Member: Hiroshi Fukuyama, Tomohiro Matsui

Our current interests are (i) new quantum phases with strong correlations and frustration in 2D <sup>3</sup>He. (ii) quantum and relativistic phenomena in Graphene, a single sheet of graphite, and (iii) electronic and vortex properties of exotic superconductors. We are investigating these phenomena at ultra-low temperatures down to 50  $\mu$ K, using various experimental techniques such as NMR, calorimetry, scanning tunneling microscopy and spectroscopy (STM/STS), *etc.* 

#### 1. Novel quantum phases in strongly correlated fermions in 2D:

#### (a) Zero-point vacancies in 2D <sup>3</sup>He

The zero-point vacancies (ZPVs) are atomic vacancies hopping on crystalline lattice cites even at absolute zero. Our previous heat-capacity measurements show that the ZPVs exist in monolayer solid <sup>3</sup>He adsorbed on a graphite surface at densities ( $\rho$ ) near the low-density commensurate phase (the 4/7 phase). In this fiscal year, the spin-spin relaxation time ( $T_2$ ) of this possible ZPV phase has been measured with the spin-echo technique of pulsed-NMR. Two-component exponential decay of the echo amplitude was observed in a wide time range, and the longer  $T_2$ component contributes only by 5% to the total amplitude. Because the ratio between the two components does not vary with density nor temperature in such a way expected from the twpphase coexisting model, we speculate that the longer component is not associated with intrinsic properties of 2D <sup>3</sup>He but from extrinsic one like the mosaic angle spread of Grafoil substrate. Note that  $T_2$  values in 2D systems are strongly anisotropic with respect to the angle between the 2D planes and the magnetic field direction. This means that the intrinsic echo signal would have the singe exponential decay with shorter  $T_2$  which decreases linearly with increasing density towards the density of the 4/7 phase. The present result contradicts the previously believed phase-separation scenario for this phase but supports our ZPV model.

#### 2. STM/STS studies of Graphite-based materials:

#### (a) Electron and hole properties in Graphene

Graphene is a monatomic sheet of carbon atoms densely packed in a honeycomb lattice. Its charge carriers behave as massless Dirac fermions due to the unique linear dispersion relation, which results in unusual properties such as anomalous integer quantum-Hall-effect and weak anti-localization. Since Graphene is fabricated directly on substrate surfaces, one can access to such an ideal 2D electron/hole system with the STM/STS technique.

We have succeeded in fabricating Graphene samples of 50  $\mu$ m wide by micro-mechanical cleavage on oxidized silicon wafers. The thickness of the samples was checked by several different ways: atomic force microscopy, gate voltage dependence of the Hall conductivity, and optical contrast measurements. STM/STS measurements for graphene are now going at very low temperatures and in high magnetic fields.

#### (b) Quasi particles in graphite surfaces

The magnetic field dependence of the Landau levels (LLs) of the quasi-2D electron system at graphite surfaces (HOPG and Kish graphite) was studied in detail. The measured LLs are categorized into two types; LLs with the linear field (B) dependence and those with the  $\sqrt{B}$  dependence. Interestingly, the field dependence of the latter type of LLs at graphite surfaces is the same as that of the LLs of the massless Dirac fermion in Graphene. All the measured LLs converge on the lowest LL, whose energy is nearly field independent, in the limit of  $B \to 0$  T.

#### 3. STM/STS studies of exotic superconductors:

#### (a) Tunneling spectroscopy on CeCoIn<sub>5</sub>

There are several experimental indications that CeCoIn<sub>5</sub>, a heavy-fermion superconductor, has an FFLO phase at temperatures below 500 mK and in magnetic fields above 4.5 T. Because the superconducting order parameter is spatially modulated in the FFLO state, STS should be a powerful tool to verify this hypothesis from real-space spectroscopy of the vortex state. In this year, we started tunneling spectroscopy measurements of cleaved surfaces of single crystal CeCoIn<sub>5</sub>. Preliminary data show an clear superconducting energy gap of  $2\Delta \sim 1.5$  meV which disappears in the normal state.

## 18 Okamoto Group

#### **Research Subjects:** Experimental Condensed Matter Physics,

Low temperature electronic properties of two-dimensional systems.

#### Member: Tohru Okamoto and Ryuichi Masutomi

We study low temperature electronic properties of semiconductor two-dimensional systems. The current topics are following:

1. Two dimensional electrons at cleaved semiconductor surfaces:

At the surfaces of InAs and InSb, conduction electrons can be induced by submonolayer deposition of other materials. Recently, we have performed in-plane magnetotransport measurements on in-situ cleaved surfaces of p-type substrates and observed the quantum Hall effect which demonstrates the perfect two dimensionality of the inversion layers. Research on the hybrid system of 2D electrons and adsorbed atoms has great future potential because of the variety of the adsorbates as well as the application of scanning probe microscopy techniques.

In this year, we study the magnetic properties of submonolayer Fe films on InAs via transport measurements on the 2DESs formed in the surface inversion layers. The results can be understood in terms of spin glass ordering in the Fe films. The main observations are as follows: (1) At low temperatures ( $\sim 2$  K), clear hysteresis is observed in the magnetoresistance curve between 0 T and 9 T. It appears only in a narrow coverage range around 0.4 monolayer (ML). It becomes very small in the coverage ranges below 0.3 ML and over 0.5 ML. The coverage dependence of the width of the hysteresis loop was found to be reproducible in different experimental runs. Since the electron density and mobility do not significantly change in this range, we believe that the magnetism of the Fe film affects on electron scattering in the inversion layer and causes the hysteresis behavior of the magnetoresistance. (2) The hysteresis becomes weaker as the temperature increases and disappears above 9 K. We also obtained results indicating that the remanent magnetization can be completely removed by annealing at 10 K. (3) We observed the relaxation behavior with long time constant on the order of 100 sec. The relaxation time decreases rapidly with increasing temperature. This is another typical feature of spin glass systems.

We also performed low temperature Hall measurements on two-dimensional electron systems induced by deposition of Cs or Na on *in situ* cleaved surfaces of *p*-type InAs. The surface donor level, at which the Fermi energy of the 2DES is pinned, is calculated from the observed saturation surface electron density using a surface potential determined self-consistently. The results are compared to those of previous photoelectron spectroscopy measurements.

#### 2. Strongly correlated two dimensional systems:

We performed systematic magnetotransport measurements on a very high mobility Si 2DES in the vicinity of the coincidence of the spin-up and spin-down LLs with n = 0 and 1, respectively. In order to sweep the pseudospin effective field, which is proportional to  $\hbar\omega_c - g^*\mu_B B_{tot}$ , the data were obtained by continuously changing  $\theta$  at a fixed magnetic field. The resistance peak at the coincidence exhibits a strong anisotropy with respect to the angle  $\varphi$  between the in-plane magnetic field and direction of the electric current. The anisotropy factor reaches up to 50 at 50 mK. Large hysteresis, which demonstrates the Ising QH ferromagnetism, was observed at low temperatures while it disappears as T increases. In the paramagnetic regime ( $T \gtrsim 0.5$  K), the resistance peak is split into two peaks. Using the mean field approach for the T-dependent peak positions, we deduced that strong electron scattering occurs when the pseudospin is partially polarized. We also studied the current-voltage characteristics. A wide voltage plateau observed at 0.37 K was explained in terms of the breakdown of the uniform current distribution.

## **19** Shimano Group

Research Subjects: Optical and Terahertz Spectroscopy of Condensed Matter

#### Member: Ryo Shimano and Shinichi Watanabe

We study light-matter interactions and many body quantum correlations in: 1)optically excited high density electron-hole systems in semiconductors, low dimensional systems such as 2) carbon nanotubes, 3) quasi-1D organic conductors, 4)superconductors, and 5) multi-ferroic materials. In order to investigate the role of electron correlations on the excited state as well as the ground state, we are focusing on the low energy electromagnetic responses in terahertz(THz) (1THz $\sim$ 4meV) frequency range where quasi-particle excitations and various collective excitations exist. The research summary in this year is as follows.

#### 1. High density electron-hole system :

Photo-excited electron-hole system in semiconductors exhibits various phases depending on their density and temperature, such as exciton gas, electron-hole plasma, electron-hole liquid (droplets). Insulator-metal transition in e-h system, namely the exciton Mott transition has long been one of the central issues, while the role of Coulomb correlation is yet to be solved problem. We approach this problem by terahertz spectroscopy which can directly reflect the effect of electron correlation with high temporal resolution. For this purpose, we developed optical pump and terahertz probe measurements setup which covers broad frequency range from 2 to 24meV. We applied the scheme to Si, the most well-known material which is also attractive for the study of high density e-h phenomena due to relatively long carrier lifetime and also due to the existence of electron-hole droplets. Temporal evolution of 1s-2p Lyman transition of exciton in indirect semiconductor was for the first time observed. The behavior in high density region around Mott transition is currently under the investigation.

#### 2. Quasi-1D organic conductor :

We studied the optical responses of quasi-1D organic conductor  $(TMTSF)_2PF_6$  which shows metalinsulator transition below 12K accompanied by spin density wave formation. Since the single particle excitation energy in SDW phase is located in terahertz frequency range, it is possible to investigate the spin and charge dynamics of SDW phase under photo-excitation by terahertz time domain spectroscopy. We have developed a reflection type measurement system with diffraction-limitted spatial resolution, which allows one to determine the complex dielectric function of small samples less than 1mm that is typical for organic conductor single crystals. A clear SDW gap is observed in optical conductivity spectrum in b'-axis direction.

#### 3. Vortex dynamics in superconductor :

Transmission type terahertz polarization spectroscopy setup combined with 7T superconductor magnet was developed to investigate the complex diagonal and off diagonal conductivity of materials. By using the developed system, vortex dynamics in superconductor NbN film was investigated. The change of conductivity spectrum around 1.1THz(the BCS gap of NbN) under the magnetic field was observed. We analyzed the results based on effective medium theory and determined the magnetic field dependence of the volume fraction of vortex. The results were well explained by taking into account the dissipation due to quasi-particles in vortex and also the dissipation caused by vortex motion.

#### 4. Multiferroics :

Low energy(1-10meV) electromagnetic dynamics of spin excitations in multi-ferroic rare-earth manganites  $RMnO_3$ , (R=Eu<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>, Tb,Dy) were investigated by terahertz time domain spectroscopy. Electricdipole active pronounced absorptions were observed in all the above materials when electric field vector was along a-axis. The possible origin of the observed absorption was discussed in terms of 2-magnon excitations and dipole active 1-magnon excitation(electromagnon).

#### References

- H. Nishimura, N. Minami, and R. Shimano: Dielectric properties of single-walled carbon nanotubes in the terahertz frequency range, Appl. Phys. Lett. 91, 011108 (2007)
- [2] S. Watanabe and R. Shimano: Compact terahertz time domain spectroscopy system with diffraction-limitted spatial resolution, Review of Scientific Instruments 78, 103906 (2007)

[3] Y. Ikebe and R. Shimano: Characterization of doped silicon in low carrier density region by terahertz Faraday effect, Appl. Phys. Lett. 92, 012111 (2008)

## 20 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, & Shinji Mukohyama

The Theoretical Astrophysics Group carries out a wide range of research programmes. However, astrophysics is a very broad field of research, and it goes without saying that our group alone cannot cover all the various important astrophysical research topics on hand; we therefore place particular emphasis on the following three areas of research - "Physics of the Early Universe", "Observational Cosmology", and "Paricle and Nuclear Astrophysics". Let us delve into the specifics of these areas below.

The understanding of the very early universe saw a sort of renaissance in 1980's by applying the ideas of particle physics around the epoch close to the Planck time, of which the prime example 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 within the language of physics. Our group activities include inflationary universe models, cosmological phase-transition and topological defects, big-bang nucleosynthesis, the 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.

"Particle and Nuclear Astrophysics" explores the interfaces between particle physics, nuclear physics, and astrophysics. We place particular attention on the physics of supernovae. This 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 40 years. It is, therefore, 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. Additionally, we have also recently been working on the effects of magnetic fields and those of nuclear structural transitions on the explosion mechanism.

Let us summarize this report by presenting recent titles of the doctor and master theses in our group; 2007

- The Rossiter effect of extrasolar transiting planetrary systems perturbative approach and application to the detection of planetary rings
- Stability of flux compactifications and de Sitter thermodynamics
- Study of core-collapse supernovae in special relativistic magnetohydrodynamics
- Spectroscopic Studies of Transiting Planetary Systems
- The relation of the Galactic extinction map to the surface number density of galaxies
- Brane Inflation in String Theory

#### 2006

- Numerical studies on cosmological perturbations in braneworld
- Inflationary braneworld probed with primordial black holes
- Galaxy Biasing and Higher-Order Statistics
- Probing circular polarization of Gravitational Wave Background with Cosmic Microwave Background Anisotropy
- Gravitational Collapse of Population III Stars

#### 2005

- Brane gravity and dynamical stability in warped flux compactification
- Neutrino Probes of Galactic and Cosmological Supernovae
- Detectability of cosmic dark baryons through high-resolution spectroscopy in soft X-ray band
- Propagation of Ultra-High Energy Cosmic Rays in Cosmic Magnetic Fields
- The study of nuclear pasta investigated by Quantum Molecular Dynamics

#### 2004

- Strong Gravitational Lenses in a Cold Dark Matter Universe
- Effect of Rotation and Magnetic Field on the Explosion Mechanism and Gravitational Wave in Core-Collapse Supernovae
- "Bulk Fields in Braneworld"
- "Gravitational collapse and gravitational wave in the brane-world"

- Magnetohydrodynamical Simulation of Core-Collapse Supernovae
- A Search for the Atmospheric Absorption in the Transiting Extrasolar Planet HD209458b with Subaru HDS
- Baryogenesis and Inhomogeneous Big Bang Nucleosynthesis
- The large-scale structure of SDSS quasars and its cosmological implication

#### 2003

- Non-Gravitational Heating of Galaxy Clusters in a Hierarchical Universe
- Discoveries of Gravitationally Lensed Quasars from the Sloan Digital Sky Survey
- One, Two, Three measuring evolved large scale structure of the Universe
- Higher-order Statistics as a probe of Non-Gaussianity in Large Scale Structure
- Primordial black holes as an imprint of the brane Universe
- Probing the Extra Dimensions with Gravitational Wave Background of Cosmological Origin

#### 2002

- Nuclear "pasta" in dense stars and its properties
- Supernova Neutrinos: Their Relic Background and Resonant Spin-Flavor Conversion
- Arrival Distribution of Ultra-High Energy Cosmic Rays and Implications for Their Source Candidates
- Non-linear evolution of the cosmological large scale structure from the local collapse model

## 21 Murao Group

#### **Research Subjects:** Quantum Information Theory

Member: Mio Murao, Damian Markham (-August 2007)/ Peter Turner (February 2008-)

Quantum information processing seeks to perform tasks which are impossible or not effective 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 that appears in certain types of quantum states (non-separable states) and has become considered as a fundamental resource for quantum information processing. In our group, we investigate new properties of multipartite and multi-level entanglement and the use of these properties as resources for quantum information processing. Our current projects are the following:

- Entanglement and local information access for graph states [1]
- Local encoding of classical information onto quantum states [2]
- Survival of entanglement in thermal states [3]
- The role of entanglement in quantum information and in statistical physics [4]
- LOCC and SLOCC convertibility of quantum states in infinite dimensional systems [5]
- Entanglement and group symmetries: stabilizer states, symmetric and antisymmetric states [6]
- Quantum state discrimination: a geometric approach [7]
- Remote extraction and destruction of asymmetrically spread qubit information [8]
- Thermal Robustness of multipartite entanglement of 1-D spin 1/2 XY model
- Searching for the maximally entangled state in terms of the geometric measure
- Authorized quantum computation
- Generalization of measurement based quantum computation
- Continuous variable SIC-POVMs

Please refer our webpage: http://eve.phys.s.u-tokyo.ac.jp/indexe.htm

#### References

- 1. D. Markham, A. Miyake and S. Virmani, N. J. Phys. 9, 194 (2007)
- 2. Y. Tanaka, D. Markham and M. Murao, J. Mod. Opt. 54, 2259-2273 (2007)
- 3. D. Markham, J. Anders, V. Vedral, M. Murao and Akimasa Miyake, Europhys. Lett. 8, 40006 (2008)
- J. Anders, D. Markham, V. Vedral and M. Hajdusek, Found. Mod. Phys. DOI 10.1007/s10701-008-9218-0 (2008)
- M. Owari, S. L. Braunstein, K. Nemoto, M. Murao, Quantum Information and Computation 8, 0030-0052 (2008)
- 6. M. Hayashi, D. Markham, M. Murao, M. Owari and S. Virmani, Phys. Rev. A 77, 012104 (2008).
- 7. D. Markham, J. Miszczak, Z. Puchala and K. Zyczkowski, Phys. Rev. A. 77, 042111 (2008)
- 8. Y. Ogata and M. Murao, arXiv:0711.1699 (quant-ph), to appear in Phys. Rev. A.

### 22 Ueda Group

**Research Subjects:** Bose-Einstein condensation, Fermionic superfluidity, cold molecules, mesurement theory, quantum information, quantum control

Member: Masahito Ueda and Yuki Kawaguchi

A gaseous Bose-Einstein condensate (BEC) offers an ideal testing ground for studying symmetry breaking, because a trapped BEC system is in a mesoscopic regime, and situations exist under which symmetry breaking may or may not occur. Investigating this problem can explain why mean-field theories have been so successful in elucidating gaseous BEC systems and when many-body effects play a significant role. We substantiate these ideas in four distinct situations: namely, soliton formation in attractive BECs, spontaneous magnetization in spinor BECs, and spin texture formation in dipolar BECs.

#### 22.1 Soliton formation in a quasi-1D attractive BEC

We begin by discussing symmetry breaking in a quasi-1D attractive BEC. Suppose that an attractive BEC is confined in a quasi-1D torus. On a mean-field level, the properties of the system can be described by the Gross-Pitaevskii (GP) equation

$$\left(-\frac{\partial^2}{\partial\theta^2} - \pi\gamma|\Psi_0|^2\right)\Psi_0 = E\Psi_0, \qquad (22.1.1)$$

where  $\Psi_0(\theta)$  is the ground-state wave function and  $\gamma$  is the dimensionless strength of interaction. When dimensionless strength of interaction  $\gamma$  is smaller than 1, the ground-state density is uniform. However, when it exceeds 1, the translational symmetry is spontaneously broken and a bright soliton is formed. Thus the mean-field theory predicts a second-order quantum phase transition at  $\gamma = 1$ .

We have numerically obtained the Bogoliubov spectrum and many-body spectrum. In the Bogoliubov spectrum, the zero-energy mode emerges in the soliton regime, this being the Goldstone mode associated with the breaking of translational symmetry. The many-body spectrum in the uniform BEC regime is similar to that of the Bogoliubov spectrum. However, a dramatic change in the landscape of the energy spectrum occurs in the bright soliton regime. In particular, a quasi-degenerate spectrum appears above the ground state in the bright soliton regime. This quasi-degeneracy is a signature of the breaking of the translational symmetry that generates a bright soliton. It is remarkable that many-body physics can automatically generate such a symmetry-breaking-inducing quasi-degenerate spectrum which is absent at the mean-field level.

#### 22.2 Spinor BEC: chiral symmetry breaking

A long-standing question with magnetism is how the spontaneous magnetization of a ferromagnet can occur in an isolated system in which the total spin angular momentum is conserved. One possible solution is that all spins align in the same direction and that the system is in a quantum-mechanical superposition state over all directions. We propose here a different scenario, in that the system develops local magnetic domains of various types that depend on the nature of the interaction, conservation laws, and the geometry of the trapping potential.

Suppose that all atoms are prepared again in the m = 0 state in a pancake-shaped trap. In the low density region, the Bogoliubov modes with orbital angular momentum  $\ell = \pm 1$  have imaginary parts, and they are therefore dynamically unstable and grow exponentially. When a <sup>87</sup>Rb BEC is prepared in this region, the m = 0 atoms are transfered into the  $m = \pm 1$  states due to the dynamical instability, and they obtain the orbital angular momentum. The angular momentum conservation implies that the m = 1 and m = -1 components must have opposite sign of orbital angular momentum. There are two possibilities:

the m = 1 component can have either orbital angular momentum of  $\ell = 1$  or  $\ell = -1$ ; correspondingly, the m = -1 component can have either -1 or 1 orbital angular momentum. These two possibilities are degenerate, this degeneracy being a statement of the chiral symmetry. However, since a chirally symmetric state has higher energy than a chiral-symmetry-broken states, the chiral symmetry is dynamically broken and each spin component begins to rotate spontaneously.

Our predictions have recently been observed by the Berkeley group. They carried out experiments subject to the same initial conditions, i.e., all the atoms were initially prepared in the m = 0 state. As we predicted, the system remained unmagnetized during a certain latency period, before spontaneously developing magnetization. They also observed a polar-core vortex corresponding to our chiral-symmetrybroken state.

#### 22.3 Dipolar BEC: Einstein–de Haas Effect and ground-state mass flow

The magnetic dipole-dipole interaction is a tensor force which causes spin-orbit coupling, and only the total, spin plus orbital, angular momentum is conserved. Therefore, the dipolar interaction transfers angular momentum between the spin and orbit, i.e., the Einstein–de Haas effect occurs. We have pointed out that the Einstein–de Haas effect occurs in the  ${}^{52}$ Cr BEC and numerically shown the dynamics.

The dipole-dipole interaction is also expected to yield ground-state spin texture in a ferromagnetic BEC, as in the case of the domain structure in a solid-state ferromagnet. The unique feature of the spinor dipolar BEC which is absent from a solid-state ferromagnet is the spin-gauge symmetry which relates the spin texture to a mass current. The fundamental query is whether or not a spinor dipolar BEC can exhibit a spontaneous mass current in the ground state. we have numerically explored the ground state of the spinor dipolar BEC and found that the ground state has nonzero orbital angular momentum in a certain parameter region.

### 23 Makishima Group & Nakazawa 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, Kazuhiro Nakazawa

We study cosmic and solar high-energy phenomena in the X-ray and  $\gamma$ -ray frequencies, mainly using scientific satellites launched by the Japan Aerospace Exploration Agency.

The Suzaku satellite: In collaboration with several domestic and US groups, we have developed the Hard X-ray Detector (HXD) working in the 10–600 keV range. It was put onboard the cosmic X-ray satellite Suzaku, which was launched successfully into orbit on 2005 July 10.

**Physics of Compact Objects:** Mass accretion onto compact objects provides our favorite research subject. Observations of X-ray pulsars with the *Suzaku* HXD have yielded accurate measurements of the spectral features arising from electron cyclotron resonance in the extremely strong magnetic fields [5]. Utilizing  $\sim 0.3$  keV to  $\sim 500$  keV *Suzaku* spectra of several black-hole binaries (including the prototypical Cygnus X-1), we are investigating into the physics of hot corona around accreting black holes. We have

strengthened the intermediate-mass black hole scenario for Ultra-Luminous X-ray sources (ULXs) in nearby galaxies. The *Suzaku* data on the type 2 Seyfert galaxy NGC 4945 has revealed that its obscring materials cannot have a thick torous geometry [7], in contrast to the currently popular view.

**Plasma Heating and Particle Acceleration:** Our studies reveal that the vast inter-stellar and intergalactic space is a site of ubiquitous plasma heating and particle acceleration. Examples include; colliding stellar winds; globular clusters moving through the Galactic halo gas [3], and galaxy groups [2]. *Suzaku* observations have demonstrated that the interstellar space near the Galactic center is filled with hot thermal X-ray emission, as well as non-thermal hard X-ray signals [6]. Using *Suzaku*,we are placing tight upper limits on non-thermal emission from clusters of galaxies. In addition, unusually hot thermal emission was unexpectedly detected from a few merging clusters of galaxies.

**Particle Acceleration in Thunderclouds and Solar Flares:** From winter thunder clouds in a coastal area of the Sea of Japan, we have successfully detected two events of intense gamma-ray emission [1]. On both occasions, the emission lasted for about 1 minutes, and the gamma-ray spectrum extended up to 10 MeV. This means that electrons are accelerated in thunder clouds, either continuously or sporadically. Such electro-static particle acceleration may be relevant to the generation of energetic particles in solar flares [4]. There is a hint of *Suzaku* detection of neutrons from a solar flare on 2006 December 5.

**Future Instrumentation:** Together with many domestic and foreign groups, we are planning a cosmic X-ray/gamma-ray mission called *NeXT* (New Exploration X-ray Telescope). Scheduled for launch in 2013, it will serve as a successor to *Suzaku*, and will carry out hard X-ray imaging observations as well as high-resolution X-ray spectroscopy. Aiming at instrumentation for *NeXT*, we are developing double-sided Silicon strip detectors, large-volume BGO scintillators, and an onboard network using SpaceWire protocol.

- Tsuchiya, H., Enoto, T., Yamada, S., Yuasa, T., Kawaharada, M., Kitaguchi, T., Kokubun, M., Kato, H., Okano, M., Nakamura, S., & Makishima, K.: "Detecdtion of High-Energy Gamma Rays from Winter Thunderclouds", *Phys. Rev. Lett.* **99**, id. 165002 (2007)
- Nakazawa, K., Makishima, K., & Fukazawa, Y.: "Hard X-Ray Properties of Groups of Galaxies as Observed with ASCA", *Publ. Astr. Soc. Jp.* 59, 167 (2007)
- Okada, Y., Kokubun, M., Yuasa, T., & Makishima, K.: "Chandra Detections of Diffuse X-ray Emission From Globular Clusters", Publ. Astr. Soc. Jp. 59, 727 (2007)
- Kotoku, J., Makishima, K., Matsumoto, Y., Kohama, M., Terada, Y., & Tamagawa, T.: "Effects of Compton scattering on the Gamma Ray Spectra of Solar flares", *Publ.Astr.Soc.Jp.* 59, 1161 (2007)
- Enoto, T., Makishima, K., Terada, Y., Mihara, T., Nakazawa, K., Ueda, T. et al.: "Suzaku Observations of Hercules X-1: Measurements of the Two Cyclotron Harmonics", Publ. Astr. Soc. Jp. 60, S57 (2008)
- Yuasa, T., Tamura, K., Nakazawa, K., Kokubun, M., Makishima, K. et al.: "Suzaku Detection of Extended/Diffuse Hard X-Ray Emission from the Galactic Center", Publ. Astr. Soc. Jp. 60, S207 (2008)
- Itoh, T., Done, C., Makishima, K., Madejski, G., Awaki, H., Gandhi, P. et al.: "Suzaku Wide-Band X-Ray Spectroscopy of the Seyfert2 AGN in NGC 4945", Publ. Astr. Soc. Jp. 60, S251 (2008)

### 24 Takase Group

Research Subjects: High Temperature Plasma Physics Experiments, Spherical Tokamak, Nonlinear Physics, Collective Phenomena, Fluctuations and Transport, Advanced Plasma Diagnostics Development

#### Members: Yuichi Takase, Akira Ejiri

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 the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) is being constructed to study the behavior of burning plasmas. 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 (the ratio of plasma pressure to magnetic pressure). High beta plasma research using ST is a rapidly developing field worldwide, and is being carried out in our group using the TST-2 spherical tokamak. TST-2 is now located in a new experimental building in Kashiwa Campus. Our group is tackling the problem of creating and sustaining a high beta plasma using a variety of approaches.

#### Formation, heating and sustainment of the TST-2 spherical tokamak plasma

It is crucially important for ST to develop a scenario of plasma formation, heating and sustainment without the use of the central solenoid (CS). The physics of noninductive plasma initiation by RF power in the presence of a vertical magnetic field is being investigated on TST-2. Plasma is initiated and a small plasma current is formed by injection of microwave power at 2.45 GHz, which is resonant with electrons gyrating in a magnetic field of 0.0875 T. The plasma current ramp-up rate depends on the vertical field curvature and strength, gas pressure, microwave power, and electron cyclotron resonance position. Once the plasma current reaches a threshold level, closed flux surfaces are formed and the plasma current increases abruptly (current jump). Sustainment of the plasma current by radio-frequency power at 21 MHz was also demonstrated for the first time. Plasma heating by the high harmonic fast wave (HHFW) at 21 MHz is also being investigated. The electron temperature increases from 140 to 210 eV and the ion temperature increases from 50 to 100 eV in a typical discharge. A nonlinear process known as parametric decay was observed by both RF magnetic probes and microwave reflectometry. In addition to the well-know decay from HHFW to the ion Bernstein wave and the ion-cyclorton quasi-mode, a previously unknown decay into an intermediate frequency was discovered. A new diagnostic based on fast visible light detection is being developed to obtain further information on waves inside the plasma. The high beta plasma produced in ST is highly autonomous. Spontaneous deformation of the plasma by an instability and subsequent recovery are observed. This process involves nonlinear coupling of multiple modes leading to reconnection of magnetic field lines, and is called the internal reconnection event (IRE). A new analysis method is being developed to identify the mode structure. Analysis of the evolutions of the current density profile and the plasma pressure profile suggests that the instability is driven by the pressure gradient.

#### Formation of Ultra-High Beta Plasma by Plasma Merging

A new ST device, UTST, aiming at formation of ultra-high beta plasma by plasma merging is now in operation. Power aupply upgrades and installation of a neutral beam injector for plasma heating were carried out. In UTST, two ST plasmas are formed by induction from external coils. Strong ion heating due to magnetic reconnection is expected to form one ST plasma with very high beta (30–50%). Access to the second stability regime becomes much easier using this unique method. It is a challenge to maintain the plasma in such a state for long enough time (exceeding the energy confinement time) after reconnection is over. This is planned to be accomplished by innovative methods of heating and current drive using RF waves (such as the HHFW) and neutral beam injection.

#### Collaborations

Collaborative experiments are being carried out on the JT-60U tokamak at Japan Atomic Energy Agency (JAEA). Plasma current sustainment by the bootstrap current, driven spontaneously by the pressure gradient, was demonstrated using the newly developed constant surface flux control algorithm, which eliminates the possibility of inductive current drive. Collaborations with larger ST devices NSTX (USA) and MAST (UK), as well as a high magnetic field tokamak device Alcator C-Mod (USA) are also being carried out.

### 25 Tsubono Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Gravitational Wave, 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, and have accumulated over 3,000 hours data. We are now analyzing the obtained data searching for the gravitational waves from coalescing binaries, supernovae and pulsars. We are expecting to start the Japanese large-scale laser interferometer, LCGT, soon.

A space laser interferometer, DECIGO, was proposed through the study of the gravitational wave sources with cosmological origin. DECIGO could detect primordial gravitational waves from the early Universe at the inflation era. We have just stared the theoretical and technical investigation for the realization of the DECIGO space detector.

We summarize the subjects being studied in our group.

- Laser interferometric gravitational wave detectors
  - Current status of TAMA project

- Systematic analysis of TAMA monitoring signal
- Study of the next-generation laser interferometer, LCGT
- Space laser interferometer
  - Space laser interferometer, DECIGO
  - DECIGO pathfinder, DPF
  - Small size detector, SWIM
  - SWIM-signal processing
  - SWIM-control system
  - SWIM-balloon and airplane experiments
- Development of a gravitational wave detector using magnetic levitation
  - Gravitational wave detector using superconducting magnetic levitation
  - Experiments using permanent magnets
- Study of the precise measurements
  - Laser stabilization using optical fiber
- Study of the thermal noise
  - Study of the thermal noise in a space interferometer

#### references

- Kazuhiro Yamamoto, Masaki Ando, Keita Kawabe, and Kimio Tsubono: Theoretical approach to thermal noise caused by an inhomogeneously distributed loss: Physical insight by the advanced modal expansion, Phys. Rev. D 75-8 (2007) 082002.
- [2] K. Ishidoshiro, M. Ando, K. Tsubono, N. Kanda, H. Takahashi, and the TAMA Collaboration: Systematical veto by all monitor signals in a gravitational-wave detector, Class. Quantum Grav. 24 (2007) S405-S413.

# 26 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

- Y. Murayama, H. Wada, and M. Sano: Dynamic force spectroscopy of a single condensed DNA, Europhys. Lett., 79, 58001(p1-p6) (2007).
- Hong-Ren Jiang and Masaki Sano: Stretching Single Molecular DNA by Temperature Gradient, Appl. Phys. Lett. 91, 154104 (2007).
- K. A. Takeuchi, M. Kuroda, H. Chaté, and M. Sano: Directed percolation criticality in turbulent liquid crystals, Physical Review Letters, 99, 234503 (2007).
- 4. Natsuhiko Yoshinaga and Kenichi Yoshikawa: Core-shell structures in single flexible-semiflexible block copolymers: Finding the free energy minimum for the folding transition, J. Chem. Phys., **127** (2007) 044902
- 5. K. A. Takeuchi: Scaling of hysteresis loops at phase transitions into a quasiabsorbing state, Phys. Rev. E, 77, 030103(R) (2008).
- H.Delanoye-Ayari, S.Iwaya, Y.T.Maeda, J.Inose, C.Riviere, M.Sano, and J.P.Rieu: Changes in the magnitude and Distribution of Forces at Different Developmental Stages of Dictyostelium, Cell Motility and the Cytoskeleton, 65, 314-331 (2008).
- Shoichi Toyabe and Masaki Sano: Evaluating Energy Dissipation of a Brownian Particle in a Viscoelastic Fluid, Phys. Rev. E 77, 041403 (2008).

## 27 Yamamoto Group

**Research Subjects:** Submillimeter-wave and Terahertz Astronomy, Chemical Evolution of Interstellar Molecular Clouds, Star and Planet Formation, Development of Terahertz Detectors

#### Member: Satoshi Yamamoto and Tomoharu Oka

Molecular clouds are birthplaces of new stars and planetary systems, which are being studied extensively as an important target of astronomy and astrophysics. Although the main constituent of molecular clouds is a hydrogen molecule, various atoms and molecules also exist as minor components. The chemical composition of these minor species reflects formation and evolution of molecular clouds as well as star formation processes. It therefore tells us how a particular star has been formed. We are studying star formation processes from such a unique viewpoint. Since the temperature of molecular cloud is as low as 10 K, only way to observe its physical structure and chemical composition is to observe the radio wave emitted from atoms and molecules. In particular, there exist a number of atomic and molecular lines in the millimeter to terahertz region, and we are observing them with various radio telescopes such as Nobeyama 45 m telescope and IRAM 30 m telescope.

We have recently established a new chemistry occurring in the vicinity of a newly born star, which is called Warm Carbon Chain Chemistry (WCCC). We have found high abundances of various carbon-chain molecules in a lukewarm region near the protostar in L1527. This is very surprising, because carbon-chain molecules are known to exist in the early stages of cold starless cores. In WCCC, carbon-chain molecules are produced by gas phase reactions of  $CH_4$  which is evaporated from ice mantles. Existence of WCCC clearly indicates a chemical variety of low-mass star forming regions, which would probably reflect a variety of star formation.

In parallel to such observational studies, we are developing a hot electron bolometer mixer (HEB mixer) for the future terahertz astronomy. We are fabricating the diffusion cooled HEB mixer using Nb and the phonon cooling HEB mixer using NbTiN in our laboratory. Our NbTiN mixer shows the noise temperature of 500 K at 800 GHz, which is well comparable to the results reported by other groups. We are also studying bath-temperature dependence of the noise temperature in order to explore the mixing mechanism of the HEB mixer.

[1] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., "Abundant Carbon-Chain Molecules toward the Low-Mass Protostar IRAS04368+2557 in L1527", ApJ, 672, 371 (2008)

## 28 Sakai (Hirofumi) Group

**Research Subjects:** Experimental studies of quantum optics and atomic/molecular physics

Member: Hirofumi Sakai and Shinichirou Minemoto

Our research interests are as follows: (1) Manipulation of neutral molecules based on the interaction between a strong nonresonant laser field and induced dipole moments of the molecules. (2) Controlling quantum processes in atoms and molecules using shaped ultrafast laser fields. (3) High-intensity laser physics typified by high-order nonlinear processes (ex. multiphoton ionization and high-order harmonic generation). (4) Ultrafast phenomena in atoms and molecules in the attosecond time scale. A part of our recent research activities is as follows:

#### (1) Laser-field-free molecular orientation with combined electrostatic and shaped laser fields

A sample of aligned or oriented molecules is an ideal anisotropic quantum system to investigate many interesting phenomena such as multiphoton ionization and high-order harmonic generation. As for the molecular orientation, we have already succeeded in the proof-of-principle experiments of one- and threedimensional orientation of molecules with combined electrostatic and intense, nonresonant laser fields. These experiments were performed in the adiabatic regime, where the pulse width of the laser field is rather long compared to the rotational period of the molecules. In this case, the degree of molecular orientation follows the temporal profile of the laser pulse and reaches the maximum at the peak of the laser pulse.

On the other hand, in precise spectroscopic measurements and experiments including the observation of photoelectrons, it is desirable to prepare a sample of oriented molecules in the laser-field-free condition. Noting that molecules can be oriented with combined moderate electrostatic and intense, nonresonant laser fields in the adiabatic regime, we have proposed that we use a shaped pulse which has a long rising edge compared to the rotational period of the molecule and is rapidly turned off at the peak of the pulse. Such a rapidly-turned-off pulse can be shaped with the plasma shutter technique. Thereby, in the laser-field-free condition at the rotational period of the molecule, we can expect the same degree of orientation as that achieved adiabatically by the peak of the shaped pump pulse. In this academic year, we developed a technique to shape the pump pulse with 12-ns duration and 100-mJ-class energy so that it can be truncated with the falling time of  $\sim 200$  fs. With the shaped pump pulse, we have demonstrated nonadiabatic laser-field-free orientation of OCS molecules. In fact, the observed temporal evolutions of both degree of alignment and the degree of orientation have been confirmed to be in good agreement with theoretical expectations.

# (2) Efficient generation of high-order sum and difference frequencies in the xuv region by combining a longer-wavelength field

In our earlier study, high-order sum and difference frequencies in the xuv region were found to be efficiently generated by combining a weak longer-wavelength field with an intense Ti:sapphire laser field centered at 800 nm. In this academic year, we employed a 60-fs 1300-nm laser field delivered from an optical parametric amplifier as a combined field. The ultrashort duration of the 1300-nm pulse has made it possible to use the high intensity of  $1 \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> without significant ionization of the nonlinear medium. When the polarization of the 1300-nm pulse is parallel to that of the 800-nm pulse, sum and difference frequencies including at least 11 1300-nm photons were observed. Our observations were successfully reproduced by our theoretical model, which was developed based on the 2-color Lewenstein model so that a field with arbitrary polarization and nonperturbative intensity can be combined.

- Shinichirou Minemoto, Tsuneto Kanai, and Hirofumi Sakai, "Alignment dependence of the structural deformation of CO<sub>2</sub> molecules in an intense femtosecond laser field," Phys. Rev. A 77, 041401(R) (4 pages) (2008).
- [2] Yu Sugawara, Akihisa Goban, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Laser-field-free molecular orientation with combined electrostatic and rapidly-turned-off laser fields," Phys. Rev. A 77, 031403(R) (4 pages) (2008).
- [3] Takayuki Suzuki, Yu Sugawara, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Optimal control of nonadiabatic alignment of rotationally cold N<sub>2</sub> molecules with the feedback of degree of alignment," Phys. Rev. Lett. **100**, 033603 (2008).
- [4] Yutaka Nomura, Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Efficient generation of high-order sum and difference frequencies in the xuv region by combining a weak longer-wavelength field," Phys. Rev. A 75, 041801(R) (4 pages) (2007).

#### 29 Nose Group

#### Research Subjects: Molecular Mechanism of Neural Network Formati

Member: Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka 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 and function by using, as a model, the simple nervous system of the fruitfly, Drosophila. We focus on the synapses between motor neurons and their target muscles, and study the molecular mechanisms of how specific synaptic partners recognize each other and form synaptic connections. The following research plans are in progress.

1. Molecular mechanism of the neuromuscular target recognition 1.1. Genome-wide search for target recognition molecules by microarray To systematically identify novel genes involved in neuromuscular target recognition, we performed microarray analysis. We compared the expression of genes in two neighboring muscles, 12 and 13, which are innervated by distinct motor neurons, and identified 200 genes that are differentially expressed. We conducted functional analyses of genes encoding transmembrane or secreted proteins and showed that Wnt4, a secreted protein of WNT family plays a major role in target specificity.

2. Molecular Mechanisms of Synaptogenesis 2.1 Live imaging of neuromuscular synaptogenesis Cell adhesion molecules (CAMs) have been proposed to mediate interactions between innervating axons and their targets. However, such interactions have never been directly observed in vivo. We studied the function and dynamics of Fasciclin2, a homophilic CAM expressed both pre- and postsynaptically during the formation of neuromuscular synapses in Drosophila. By live-imaging of functional Fas2-GFP, we show that postsynaptic Fas2 accumulates at the synaptic contact site soon after the arrival of the nerve. The accumulation of postsynaptic Fas2 was dependent on its extracellular domain and the presence of axonal Fas2, consistent with recruitment by presynaptic Fas2-dependent reduction of postsynaptic Fas2 motility. In fas2 mutants, we found reduced postsynaptic accumulation of glutamate receptors and Dlg/PSD-95, a scaffolding protein known to bind Fas2. These results suggest that Fas2 mediates trans-synaptic adhesion that is necessary for the initiation of postsynaptic assembly.

2.2. Innervation and activity dependent changes in postsynaptic oxidative metabolism The level of mitochondrial energy metabolism is highly correlated with neuronal activity to ensure the balance of energy consumption and production. Yet it remains largely unknown whether this relationship holds in the postsynaptic cell during synaptogenesis when it receives increasing amount of inputs from the presynaptic neuron. We have studied the changes in postsynaptic oxidative metabolism by monitoring the redox of mitochondrial flavoproteins during neuromuscular synaptogenesis. Flavoproteins cycle between fluorescent and non-fluorescent states as they are oxidized and reduced in the respiratory chain. We found that the postsynaptic muscle cells spontaneously emit green autofluorescence transients originating in flavoproteins under blue light excitation. The fluorescence transient is dependent on external Ca2+ and correlates with an increase in intracellular Ca2+ concentration. Notably, the rate of transients in muscle cells increases during synapse formation presumably through a contact with motoneuronal axon. The rate is also influenced by the magnitude of synaptic inputs. Thus, our results indicate that presynaptic cells dynamically regulate the level of postsynaptic energy metabolism during the early stage of neuromuscular synapse formation.  $\mathbf{III}$ 

# 2007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: 駒宮幸男
- 1. 講義の概要
- 1.1 物理学の体系における電磁気学の位置
- 2. 特殊相対性理論
- 2.1 相対性原理
- 2.2 ローレンツ変換
- 2.3 ミンコウスキー時空
- **2.4** 速度の変換則
- 2.5 時間のパラドクス
- 2.6 スカラー、ベクトル、テンソル
- 2.7 質点の相対論的運動方程式
- 2.8 重心系 (CMS)座標
- 2.9 相対論的運動
- 3. 電場
- 3.1 動いている電荷
- 3.2 異なる座標系での電場
- 3.3 動いている電荷に働く力
- 3.4 動いている電荷どうしに働く力
- 4. 磁場
- 4.1 磁場の性質
- 4.2 ベクトルポテンシャル

#### 1.1.2 解析力学·量子力学1: 須藤 靖

- 1. 物理学を学ぶ意味
- 1.1 窮理学の階層
- 1.2 自然界の論理階層

- **4.3** 電磁場の変換則 4.4 ローレンツ力とローレンツ変換 5. 電磁誘導とマックスウエルの方程式 5.1 電磁誘導 5.2 電磁場に蓄えられたエネルギー 5.3 変位電流 5.4 マックスウエルの方程式 6. 準静的過程と交流回路 6.1 静電場・静磁場の適用限界 6.2 交流回路 7. 電磁場内の電荷の運動 7.1 電磁場中での荷電粒子の運動方程式 7.2 静電場中での運動 **7.3 静磁場中での運動** 7.4 一様な電磁場中での運動 8. 電磁磁気学の相対論的形式 8.1 4元ポテンシャルとローレンツゲージ 8.2 電場、磁場のテンソル表示
- 8.3 マックスウエルの方程式の相対論的共変形
- **1.3** 物理学を学ぶ意義
- 1.4 解析力学と量子力学
- 1.5 教科書は必ず買おう

2. ニュートンの法則からラグランジュ形式へ	6.1 マクスウェル方程式と電磁ポテンシャル
2.1 ラグランジュ形式の要約	6.2 電磁場内の荷電粒子の相互作用
2.2 ニュートンの法則	<b>6.3</b> 電磁場の4次元形式
2.3 慣性系とガリレイ変換	6.4 電磁場の作用の推定
2.4 質点のデカルト座標に対するラグランジュ方程	7. 黒体輻射とエネルギー量子
式の導出	7.1 19世紀物理学にたちこめる二つの暗雲
2.5 拘束条件と一般化座標	7.2 黒体輻射
2.6 ダランベールの原理	7.3 エネルギーの量子化
2.7 ホロノーム系に対するラグランジュ方程式	7.4 プランク分布とウィーンの変位則
2.8 ニュートンの運動方程式の限界とラグランジュ	7.5 太陽の温度と宇宙の温度
	8. 原子の構造と前期量子論
2.9 拘束宗件とファファシュの未定来数法	8.1 水素原子のスペクトル
3. 最小作用の原理からニュートンの法則へ	8.2 長岡の原子モデル
<b>3.1</b> 最小作用の原理	8.3 ラザフォード散乱
3.2 変分法とオイラー・ラグランジュ方程式	8.4 ボーアの仮説
<b>3.3</b> 測地線の方程式	9. 粒子性と波動性
3.4 非相対論的自由粒子のラグランジアン	9.1 量子的実在
3.5 相対論的自由粒子のラグランジアン	9.2 光電効果
3.6 「最小作用の原理」的世界観	9.3 コンプトン散乱
	9.4 光子の裁判と電子の干渉実験
	9.5 黒体輻射の粒子性と波動性
	10. 波動関数とシュレディンガー方程式
4.2 時間の一様性とエネルギー保存則	10.1 粒子と波束
4.3 空間の一様性と運動量保存則	10.2 物質波とシュレディンガー方程式
4.4 空間の等方性と角運動量保存則	10.3 波動関数の意味: 確率解釈
4.5 ネーターの定理	10.4 物理量の平均値と古典的極限: エーレンフェス
5. ハミルトン形式と正準変換	トの定理
5.1 ラグランジュ形式とハミルトン形式	10.5 ハミルトン・ヤコビの方程式とシュレディン ガー方程式
5.2 ハミルトン方程式	
5.3 正準変換と母関数	
5.4 正準変換の例	11. 経路積分による定式化: 解析刀字から量子論へ
5.5 ポアソン括弧	11.1 重ナノ子的経路と催率振幅
5.6 ハミルトン・ヤコビの方程式	
5.7 シンプレクティック条件とリウビーユの定理	11.3
<ol> <li>電磁場の古典論</li> </ol>	12. 一次元量子系

230

- 12.1 時間に依存しないシュレディンガー方程式
- 12.2 1次元波動関数のパリティ
- 12.3 ポテンシャル障壁: 非束縛状態とトンネル効果 13.3 演算子とその固有値・固有ベクトル
- 12.4 井戸型ポテンシャル
- **12.5** 波動関数の規格化
- **12.6 固有関数の完全性**
- 12.7 調和振動子
- 13. 量子論における物理量と演算子: ヒルベルト空間 13.8 シュレディンガー描像とハイゼンベルグ描像
- 1.1.3 物理数学 I: 常行 真司
- 1. 複素関数の性質
- 1.1 物理学における複素数の使い方
- 1.2 複素平面
- 1.3 複素関数
- 1.4 リーマン面
- 1.5 初等関数と収束半径
- 1.6 対数関数と一般のべき乗関数
- 1.7 無限乗積
- 2. 複素関数の微分と正則性
- 2.1 微分可能性
- 2.2 コーシー-リーマンの関係式
- 2.3 調和関数
- 3. 複素積分
- 3.1 定義といくつかの性質
- 3.2 コーシーの積分定理
- 4. コーシーの積分公式とその応用
- 4.1 コーシーの積分公式
- 4.2 テーラー展開
- 4.3 ローラン展開
- 1.1.4 物理実験学 : 早野 龍五、岡本 徹
- 1. 序論
- 1.1 実験物理学者の心得

- 13.1 ヒルベルト空間
- 13.2 ブラとケット
- 13.4 状態ベクトルの座標表示と運動量表示
- 13.5 シュツルム・リウビーユ方程式と直交関数
- **13.6 演算子の交換関係**
- 13.7 正準交換関係と座標表示・運動量表示
- 4.4 特異点と留数 4.5 解析接続 4.6 部分分数展開と無限乗積 4.7 関数と主値積分 5. 等角写像 5.1 写像としての正則関数 5.2 <br />
  等角写像の例 6. ガンマ関数 6.1 ガンマ関数 6.2 ガンマ関数の無限乗積表示 6.3 ハンケル表示 6.4 スターリングの公式と漸近展開 6.5 鞍点法 7. フーリエ級数とフーリエ変換 7.1 固有関数展開 7.2 フーリエ級数 7.3 フーリエ変換 7.4 関数
- 8 ラプラス変換
- 1.2 歴史的に重要な実験
- 2. 単位系と基本物理定数

2.1 単位系の定義	4.2 磁気測定
2.2 基本定数の測定法に関する概論	4.3 放射線測定器
3. 実験の基礎	4.4 加速器
3.1 電気回路	4.5 回路、コンピューターの利用
3.2 試料作成技術	5. 誤差論
<b>3.3</b> 実験環境技術	5.1 誤差の分類
4. 各種の計測法	5.2 誤差伝播の法則
4.1 電気伝導測定	5.3 最小二乗法

# 1.2 3年生 夏学期

1.2.1 電磁気学 II: 酒井広文

1. 電磁場の基本法則	<b>3.6</b> 誘電体中の Gauss の法則
1.1 電場と磁場	3.7 誘電体の境界条件
1.2 Coulomb の法則	3.8 境界値問題
1.3 Faraday の電磁誘導の法則	4. 定常電流
1.4 Ampère の法則	4.1 定常電流の基本方程式
1.5 電荷保存則と変位電流	4.2 定常電流による静磁場の決定
1.6 Maxwellの方程式	4.3 ベクトルポテンシャルの多重極展開
1.7 電磁ポテンシャルとゲージ変換	4.4 定常電流による磁場のエネルギー
1.8 エネルギー保存則	4.5 定常電流の分布
1.9 運動量保存則	<b>4.6</b> Joule 熱最小の定理
2. 静止物質中の Maxwell 方程式	5. 静磁場
2.1 静止物質中の電磁場	
2.2 静止物質中の Maxwell 方程式	5.1 静磁場の基本万程式
<b>2.3</b> Ohm の法則	5.2 永久磁化
2.4 エネルギー保存則	5.3 境界条件
3. 静電場	5.4 物質の磁性
3.1 静電場の基本方程式	6. 電磁波
3.2 電荷分布が与えられたときの静電場	6.1 真空中の電磁波の基本法則
3.3 静電場の多重極展開	6.2 真空中の電磁波 平面波と一般解
3.4 静電場のエネルギーと Thomson の定理	6.3 誘電体中の電磁波
3.5 導体系の静電場と Green の相反定理	6.4 導体中の電磁波

### 1.2.2 量子力学 II : 村尾 美緒

- 1. 軌道角運動量
- 1.1.1 波動関数を用いた量子力学の復習
- **1.1.2** 中心場の定常状態の Schr?dinger 方程式
- 1.2.1 軌道角運動量
- 1.2.2 球面調和関数
- 2. 角運動量の一般論
- 2.1 ブラ・ケットを用いた量子力学の復習
- 2.2 角運動量の一般化
- **2.3 角運動量の合成**
- 3. 中心場中の Schr?dinger 方程式の解
- 3.1 動径部分の Schr?dinger 方程式の一般論
- 3.2 三次元調和振動子

3.3 水素原子

- 4. 摂動論
  - 4.1 時間によらない摂動 縮退の無い場合
    - 4.2.1 時間によらない摂動 縮退のある場合
    - **4.2.2** 時間によらない摂動の例: Van der Waals 力 とパリティ
    - 4.2.3 時間によらない摂動の例: LS 結合
    - 4.3 時間による摂動
    - 4.4 WKB 近似
    - 5. スピン角運動量と量子力学の本質
      - 5.1 スピン 1/2 系の量子力学
        - 5.2 測定演算子と密度演算子
- 1.2.3 現代実験物理学I: 長谷川修司, 溝川貴司

1. X線	3.3 伝導
1.1 X 線の発見、	4. 磁場を利用する実験技術
1.2 特性X線と連続X線、Moseleyの法則、	4.1 磁場の発生
1.3 Thomson 散乱と Compton 散乱、	4.2 SQUID ≿ MEG
1.4 X線回折	4.3 NMR ≿ MRI
1.5 X線研究の拡がり;CT,リソグラフィ、宇宙 X線	5. 電磁波を利用する実験技術術
2. 電子	5.1 光源技術
2.1 粒子性と波動性	5.2 ポンプ・プローブ分光
2.2 電子回折と顕微鏡	5.3 X線散乱
2.3 Aharonov-Bohm 効果	6. 粒子線を利用する実験技術
<b>2.4 トンネル効果と</b> STM	6.1 電子線散乱
3. 多様な実験手法	6.2 光電子分光
3.1 顕微鏡	6.3 中性子散乱
3.2 分光法	6.4 $\mu$ SR

# 1.2.4 物理数学 II : 松尾 泰

1. Fourier 変換を用いた偏微分方程式の解法	3.2 球面調和関数
1.1 Fourier 級数と Fourier 変換	3.3 角運動量の量子化との関係
1.2 偏微分方程式の分類	3.4 スピノール表現
1.3 Fourier 変換による解法	4 Bessel 関数
<b>1.4</b> Green <b>関数</b>	4.1 母関数
2. 直交多項式論	4.2 直交性
2.1 直交多項式の一般論	4.3 偏微分方程式との関係
2.2 Rodrigues の公式	44 球 Bessel 関数
2.3 微分方程式	
2.4 母関数	
2.5 漸化式	
3. 回転群	5.2 超幾何関数とその性質
<b>3.1</b> Legendre 陪関数	5.3 合流型超幾何関数とその性質
1.2.5 統計力学 I : 佐野 雅己	
1. 熱力学	2.6 固体の比熱
1.1 熱力学法則	2.7 高分子鎖とゴム弾性
1.2 熱力学関数	3. 量子統計力学
2. 統計力学の基礎と適用	3.1 量子統計の考え方
2.1 統計力学の原理	3.2 理想フェルミ気体
2.2 ミクロカノニカル分布	3.3 理想ボース気体
2.3 カノニカル分布	3.4 縮退したフェルミ気体
2.4 グランドカノニカル分布	3.5 固体の比熱
2.5 理想気体 (単原子分子、2原子分子)	3.6 黒体輻射
2.6 磁性	3.7 ボース・アインシュタイン凝縮

# 1.3 3年生 冬学期

# 1.3.1 物理数学 III: 小形正男

PART I 群論およびその表現論	1.2	群表
1. 群の基本概念	1.3	組み換え定理
1.1 群の定義	1.4	同型

1.5 部分群と剰余類	4.6 分子振動への応用
1.6 共役	4.7 赤外吸収とラマン散乱の選択則
1.7 不变部分群	5. 連続群と Lie 代数
2. 群の表現論	5.1 Lie 群と Lie 代数
2.1 表現とは	5.2 構造定数
2.2 表現の基底	5.3 連結成分
2.3 同値な表現、可約と既約表現	5.4 単連結と Lie の定理
2.4 可約表現の例	5.5 SU(2) の例
2.5 同次多項式による表現	6 计按理
2.6 一般論	0. 刈柳研 6.1 対称群の性質
2.7 既約表現行列の直交性	
2.8 指標	
2.9 正則表現と指標定理	6.3 ヤング図形
2.10 指標の直交性	PART II 微分形式
2.11 既約表現の求め方	7. 微分形式とは
3. 表現論と量子力学	7.1 外積と外微分
3.1 対称操作群	<b>7.2</b> p-ベクトル空間
3.2 表現の例	7.3 微分形式
3.3 摂動によるエネルギー準位の分裂	7.4 外微分の性質
3.4 選択則	7.5 微分方程式との関係
3.5 積表現	8. 多様体
3.6 3次元回転群	8.1 微分可能多様体
4. 点群	8.2 接空間
4.1 点群の例	8.3 多様体上の微分形式
4.2 分子軌道	<b>8.4</b> m 単体
4.3 2 原子分子への応用	8.5 多様体上の積分
4.4 ベンゼンの $\pi$ 電子への応用例	8.6 Stokes の定理
4.5 混成軌道	<b>8.7</b> Stokes の定理の具体例

# 1.3.2 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、剛体球と井戸型ポテ ンシャル
- 1.4 S行列、光学定理、ボルン近似
- 1.5 有効距離理論と低エネルギー共鳴

1.6 アイコナール近似と回折散乱	2.4 第二量子化と場の演算子
2. 多粒子系の量子論	3. 経路積分による量子論
2.1 波動関数の対称性と統計	3.1 1粒子問題
2.2 対称化(反対称化)された波動関数の例	3.2 停留位相法と半古典近似
2.3 ハートリー・フォック近似	3.3 有限温度への拡張
1.3.3 流体力学: 高瀬 雄一	
0. 流体と流体力学	6. 水波
1. 流体力学の基礎方程式	6.1 水波および静水圧
1.1 流れを表す量	6.2 深い水の表面波
1.2 運動の調べ方	6.3 微小振幅の波
1.3 境界条件	6.4 位相速度と群速度
1.4 流線・流跡線・流条線	6.5 有限深さの表面波
1.5 渦運動と渦無し運動	
1.6 運動方程式の第一積分	7.粘性流体
	7.1 Navier-Stokes 方程式
2. 縮まない流体の渦無し運動	7.2 遅い流れ
<b>2.1 渦無し運動と</b> Laplace 方程式	7.3 境界層
<b>2.2</b> Laplace 方程式の簡単な解	7.4 平行流
	7.5 回転流
3. 二次元の渦無し運動	
3.1 二次元の流れと流れの関数	
3.2 複素速度ポテンシャル	
3.3 円柱の運動	
3.4 等角写像	8.3 衝撃波
<b>3.5</b> 等角写像の応用	9 流れの安定性
	9.2 Kalvin Halmhaltz 不安定性
	9.3 Reviewh-Trenhortz 不安定任
4.2 Stokes の流れの 第数	
5、冯谓劼	
5.1 Helmholtzの過定理	10. 乱流
	10.1 アンサンブル平均方程式
5.2 企及の11注意回回 5.3 わき出し公本と過公本	10.2 一様乱流
	10.3 Kolmogorov スケーリング
	10.4 非一様乱流

1.3.4 現代実験物理学 II : 蓑輪 眞、小沢 恭一郎

- 1. 誤差と統計処理の方法
- 2. 同軸ケーブルとインピーダンス整合
- **3.**物理量の測定
- 4. 振動現象の物理学
- 1.3.5 電磁気学 III : 内田 慎一
- 1. 電磁波の放射

電磁、遅延ポテンシャル 双極子放射

- 2. 光学
   電磁波の反射・屈折・回折
   空洞共振器、導波路
- 1.3.6 生物物理学:能瀬聡直、佐野雅己
- 序:生物物理学とは何か 生きている状態とは、生命の特徴、生命の起 源、細胞の組成と構成要素
- 2. 蛋白質の構造 アミノ酸の特性と化学構造、蛋白質の立体構 造、膜蛋白質の構造解析
- 3. 遺伝子と組み換え DNA 技術 遺伝情報の流れ、遺伝子クローニング技術、個 体レベルの遺伝子操作技術、ゲノムプロジェク トとバイオインフォマティックス
- Wi神経系の生物物理:序論 神経ネットワークの構造と機能、ネットワーク 解析の方法論
- 5. 脳高次機能:視覚系を例として 網膜・1次視覚野における情報抽出、大脳視覚

### 1.3.7 統計力学 II: 宮下精二

1. 相互作用がある系での相転移

- 5. 粒子と物質の相互作用
- 6. 断面積と崩壊率
- 7. 粒子検出器
- 8. 加速器
- 荷電粒子の運動と電磁波
   運動する荷電粒子がつくる電磁場
   相対論的運動がつくる電磁波
   ・軌道放射
  - チェレンコフ放射

野における高次処理

- 記憶の分子機構
   記憶の起こる仕組み、神経可塑性、長期増強現 象、バイオイメージングによる可塑的過程の解 析、記憶のモデル
- 神経系における信号の生成と伝達機構
   神経膜電位、活動電位(神経インパルス)の
   生成機構、電気生理学実験、ホジキン・ハクス
   レー方程式
- システム生物学 遺伝子ネットワークの構成実験、遺伝子スイッ チ、動的解析
- 2. 定量的生物学
   定量的生物学の可能性、遺伝子発現とそのゆら
   ぎ、形態形成モデルへ

1.1 相互作用のある系での統計力学の方法

1.2 相転移(気相·液相相転移,強磁性相転移)

1.3 分子場近似

- 1.4 転送行列
- 1.5 スケーリング則と繰り込み群の考え方
- 2. 非平衡統計力学

#### 1.4 4年生 夏学期

#### 1.4.1 場の量子論 : 柳田 勉

#### 1. Relativistic Quantum Theory

**1.1** Relativistic Quantum Mechanics

- 1.2 Dirac Equation
- 1.3 Lorentz Covariance
- ${\bf 1.4}\,$  Solutions to the Dirac Equation
- 1.5 Hole Theory

#### 1.4.2 固体物理学I: 青木 秀夫

1. 固体の凝縮メカニズム
 1.1 序:何故固体物理か
 1.2 結合形態と凝集力
 2. 結晶構造
 3. 電子のバンド構造とフェルミ面
 3.1 Bloch の定理
 3.2 バンド・ギャップとフェルミ面

#### 1.4.3 一般相対論 : 柳田 勉

I. Special Relativity
II. The Eqivalence Principle
III. Mathematical Preliminary
IV. Gravitational Effects

#### 2.1 オンサーガーの相反定理

- 2.2 線形応答理論
- 2.3 ブラウン運動
- 2.4 ランジェバン方程式とフォッカープランク方程式
- 2.5 マスター方程式

#### 2. Quantum Field Theory

- 2.1 Canonical Quantization of Fields
- 2.2 Real Spinless Fields
- 2.3 Meaning of Field Quantization
- 2.4 Dirac Fields
- 2.5 Electromagnetic Field
- 3.3 殆ど自由な電子 vs 強結合模型
  4. 半導体
  4.1 バンド構造と電子物性
  4.2 電子と正孔
  5. 金属と絶縁体
  5.1 Wilson の理論
- 5.2 Mott の金属・絶縁体転移
- V. Curvature
  VI. Einstein Field Equations
  VII. Solutions to the Einstein Field Equations
  VIII. Application to Cosmology

## 1.4.4 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 Deby 遮蔽
- 1.3 プラズマ振動
- **1.4** Larmor 運動 (Cyclotron 運動)
- 2. 単一粒子の軌道
- 2.1 各種のドリフト
- 2.2 ミラー磁場と断熱不変量
- 2.3 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 拡散係数と閉じ込め時間
- 4. 電磁流体としてのプラズマ
- 1.4.5 原子核物理学:大塚 孝治、平野 哲文
- 1. 原子核の構造
- 1.1 原子核の大きさと質量
- 1.2 原子核の平均ポテンシャルと殻構造
- 1.3 多核子系の持つ対称性と構造
- 1.4 原子核内の核子間相関と核力
- 1.5 核子の集団運動
- 1.6 RIビーム、不安定原子核
- 1.7 原子核の崩壊

2. クォークとハドロン、及びその多体系
 2.1 物質の基本構成要素としてのクォーク
 2.2 中間子、核子のクォーク模型
 2.3 中間子交換による核力
 2.4 ハドロンガスとクォークグルーオンプラズマ
 2.5 陽子、中性子の起源
 2.6 宇宙初期におけるクォークハドロン相転移
 2.7 中性子星の話題

4.1 電磁流体方程式

4.4 MHD 発電, MHD 加速

5.1 円柱プラズマの平衡

5.3 不安定性の直感的な説明

6.1 冷たいプラズマの分散式

6.3 冷たいプラズマの分散式

**5.2** 不安定性の分類

6. プラズマ中の波動

**6.2** 不安定性の分類

4.2 MHD 方程式

4.3 抵抗の役割

5. 平衡と安定性

1.4.6 統計物理学特論 : 常次 宏一

- 1. 相転移と臨界現象
- 1.1 さまざまな相転移
- 1.2 自発的対称性の破れ
- 1.3 格子ガス模型と磁気系
- 2. 平均場と揺らぎ
- 2.1 Ising 模型
- 2.2 平均場近似
- 2.3 相関関数
- 2.4 Landau-Ginzburg の自由エネルギー
- 2.5 平均場近似の破綻と Ginzburg の判定条件
   3. スケーリング則と臨界指数
   3.1 スケーリング仮説
   3.2 臨界指数
   3.3 スケーリング関係式
   4. 繰り込み群
   4.1 ブロック自由度と実空間繰り込み群
   4.2 固定点と relevant/irrelevant/marginal
- 4.3 繰り込み群とスケーリング則

4.4 波数空間繰り込み群	6. 輸送現象と Boltzmann 方程式
4.5 Landau-Ginzburg 模型の繰り込み群	6.1 Boltzmann 方程式
4.6 Gaussian 固定点	6.2 緩和時間近似
4.7 $\epsilon$ 展開と Wilson-Fisher 固定点	6.3 電気伝導と熱伝導
5. 計算物性物理- Monte Carlo 法の基礎	7. 量子反強磁性スピン系の最近の話題
1.4.7 量子光学 : 島野 亮	
1. 光の放出と吸収	3.3 コヒーレント状態
1.1 電磁波のモード密度	3.4 スクイーズド状態
1.2 電磁波のエネルギー	3.5 モード位相演算子
1.3 黒体輻射、プランクの熱放射式	3.6 量子化した場と二準位系の相互作用
1.4 自然放出と誘導放出	4. 非線形光学の基礎
2. 輻射場と二準位系の相互作用(半古典論)	4.1 古典振動子モデル
2.1 双極子近似、回転波近似	4.2 非線形分極と非線形感受率
2.2 ラビ振動	4.3 二次の非線形光学効果
2.3 密度行列	4.4 位相整合
2.4 光ブロッホ方程式	5. レーザーの基礎
2.5 縦緩和と横緩和	5.1 光共振器のモード
3. 輻射場の量子論	5.2 光共振器の安定性
3.1 自由場の量子化	5.3 発振条件
3.2 光子数状態	5.4 各種レーザー

# 1.5 4年生 冬学期

1.5.1 宇宙物理学: 牧島一夫

- 1. 重力
- 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 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
  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 宇宙における重元素合成の現場
  4. 星の進化と終末
- 4.1 星の進化

4.2 星の終末 5.2 膨張宇宙の力学と宇宙論パラメータ 4.3 電子縮退した星:白色わい星 5.3 宇宙の創成と素粒子 4.4 核子が縮退した星:中性子星 5.4 バリオン数の牛成と軽元素の合成 5. ビッグバン宇宙論 5.5 宇宙の「晴れ上がり」とマイクロ波背景放射 **5.1** 膨張宇宙の記述

- 1.5.2 場の量子論 II: 濱口 幸一
- 1. 自由スカラー場の量子化 2.4 Wick の定理 2. 相互作用するスカラー場 2.5 Feynman diagram 2.1 摂動論 2.6 S 行列 遷移確率 2.2 S 行列 2.3 相互作用表示 3. 経路積分による量子化

物性物理学特論 (大学院「表面物理学」共通): 小森文夫、長谷川修司 1.5.3

- 1. 概論
- 2. 表面構造
- 2.1 表面超構造と相転移
- 2.2 回折法
- 2.3 顕微鏡法
- 2.4 動的過程
- 3. 表面電子状態
- 3.1 表面電子状態
- 3.2 (逆)光電子分光法
- 3.3 トンネル分光法
- 3.4 光電子分光によるバンド分散・原子結合状態測定
- 3.5 時間分解測定
- 2. 走査トンネル顕微鏡
- 1.5.4 固体物理 II : 長谷川修司
- 1. 格子振動と熱的性質
- 子の1次元格子、
- 1.2 格子振動の量子化

4.1 走査トンネル顕微鏡の原理

5.1 表面空間電荷層の2次元電子系

5.3 原子マニピュレーション

6.1 磁気モーメントと相転移

5.2 表面電子バンドの2、1次元電子系

4.2 表面原子構造観察

4.3 局所電子状態測定

4.4 表面バンドの観測

4.5 表面電子定在波

5. 表面電子輸送

6. 表面超薄膜磁性

6.2 強磁性超薄膜

6.3 表面ナノ強磁性体

- 1.3 フォノン分光
- 1.1 格子振動;単一原子1次元格子の波動、二種原 1.4 比熱;実験事実、Dulong-Petit の法則、格子比 熱、電子比熱、
  - 2. 電子輸送現象

- 2.1 Ohm 則と電気伝導度
- 2.2 結晶内での電子の運動 (I)-電子波の波束-
- 2.3 結晶内での電子の運動 (II)-バンド内での電子の 運動-
- 2.4 電子と正孔
- 2.5 Boltzmann 方程式
- 2.6 電気伝導度 Boltzmann 描像 -
- 2.7 不純物散乱とフォノン散乱
- 2.8 熱電効果
- 3. 半導体
- 3.1 半導体とは
- 3.2 真性半導体中のキャリア濃度
- 3.3 半導体のドーピング
- 3.4 ドープされた半導体中のキャリア濃度
- 3.5 半導体中の伝導度
- 3.6 pn 接合とトランジスタ; 熱平衡における pn 接合、バイアスされた pn 接合、
- 3.7 ヘテロ接合と2次元電子ガス、量子井戸
- 4. 超伝導

#### 1.5.5 固体物理学 II: 福山 寛

固体物理学 I に引き続き、物質の示す多彩な性質 を量子力学や統計力学の知識をもとにミクロに理解 するための基礎を解説する。

- 1. 格子振動
- 1.1 フォノン
- 1.2 デバイ模型
- 2. 固体中の伝導現象
- 2.1 電気伝導
- 2.2 ホール効果
- 2.3 熱伝導

#### 1.5.6 素粒子物理学 : 浅井祥仁

1. 物質と放射線の反応、検出器

- 4.1 超伝導の歴史
- 4.2 完全導体と完全反磁性(マイスナー効果)
- 4.3 London 方程式
- 4.4 その他の実験事実; エネルギー・ギャップ、比熱、 同位体効果、
- 4.5 超伝導の機構 Fröhlich の理論 -
- 4.6 Cooper 対の形成
- 4.7 BCS理論
- 4.8 超伝導電流と臨界電流
- 4.9 BCS基底状態とマイスナー効果
- 4.10 磁束の量子化
- 5. 磁性
- 5.1 原子・イオンの常磁性・反磁性(気体の磁性)
- 5.2 自由電子ガスの磁性
- 5.3 自由電子間の交換相互作用
- 5.4 強磁性体のバンドモデル
- 5.5 バンド強磁性体の自発磁化の温度依存性
- 5.6 局在電子間の強磁性結合
- 3. 磁性
- 3.1 常磁性と反磁性
- 3.2 磁気的相互作用と磁気秩序
- 3.3 スピン波
- 4. 超流動
- 4.1 ボース・アインシュタイン凝縮
- 4.2 巨視的量子現象
- 4. 超伝導
- 5.1 基本的性質と現象論
- 5.2 BCS 理論

3. 量子電磁気学 (QED) とファイマン図の計算	7. 電弱理論の精密検証
4. 弱い相互作用 5. 強い相互作用、陽子の構造関数 6. 電弱理論の枠組み、ゲージ原理	8. ハドロンの内部構造 9. 素粒子と宇宙
1.5.7 化学物理学 : 山本 智	
1. 原子の電子状態とスペクトル	3.2 水素分子
1.1 水素および水素類似原子	3.3 分子軌道法の考え方
1.2 ヘリウム原子	<b>3.4</b> 2原子分子の電子状態
1.3 HF-SCF 法	3.5 電子相関
1.4 原子スペクトル	<b>3.6</b> ab initio 計算
1.5 スピン軌道相互作用	3.7 近似的分子軌道法計算
2. 分子の対称性と群論	3.8 化学反応への応用
2.1 対称操作と点群	39 分子スペクトルの概要
2.2 既約表現と可約表現	
2.3 指標表による表現の簡約	
2.4 直積の表現	4. 分子集合体
2.5 積分の評価	4.1 分子間力
3. 分子の電子状態とスペクトル	4.2 分子衝突と化学反応
<b>3.1</b> Born-Oppenheimer 近似	4.3 化学平衡

# 2 各賞受賞者紹介

## 2.1 上田 正仁 教授: 平成 19 年度文部科学大臣表彰科学技術賞 研究部門

引力相互作用をするボース・アインシュタイン凝縮(BEC)が微小領域に閉じ込められた結果生じる量子 力学的零点圧力が引力相互作用とバランスして準安定状態を保っていることを指摘し、それが巨視的量子ト ンネリングを起こして崩壊することを予言した。また引力 BEC 系において循環の量子化が破れていることを 指摘し、引力系の超流動が従来知られていたものと質的に異なる性質を示すことを明らかにした。

# 2.2 向山 信治 助教 (宇宙理論研究室:現数物連携宇宙研究機構メンバー): 第1回日本物理学会若手奨励賞

向山信治助教は、「"Brane-world solutions, standard cosmology, and dark radiation", Phys. Lett. B **473**, 241 (2000)」、「"Gauge-invariant gravitational perturbations of maximally symmetric spacetimes", Phys. Rev. D **62**, 084015 (2000)」において第1回日本物理学会若手奨励賞を受賞された。ブレーン宇宙論は、超弦理論の予言する余剰次元をテストする重要な試みであり、日本の貢献度が顕著な分野でもある。向山氏は、Randall と Sundrum によって提唱された 5 次元ブレーンワールドのシナリオにおいて、一様等方宇宙を表す 一般的な厳密解を発見し、余剰次元の存在による効果を具体的な項として書き下す事に成功した。この効果を dark radiation と名付けたのは向山氏で、これは現在では業界での標準的な用語となっている。また発見した一様等方宇宙解に対する摂動の解析においても、重要な発見をした。 5 次元ブレーン宇宙論での計量の摂動は、通常の4 次元宇宙論に比べて成分の数が多く、それらの成分の満たす方程式を同時に解く必要がある。向山氏は、これらの成分が全て、たった1つのマスター変数を微分していくことで得られることを示した。さらに、このマスター変数が満たすべきマスター方程式を導くことで、完全な定式化を与えた。向山氏の発見した厳密解とマスター方程式は、世界各地の研究グループによる計算で使用され、宇宙背景輻射のスペクトル等の、観測との比較可能な結果が出てきているなど著しい成果を上げており、その業績が高く評価された。

# 2.3 川口 由紀 助教 (上田研究室): 第2回日本物理学会若手奨励賞

冷却原子気体の2個の原子のスピン間に働く磁気的双極子間の相互作用は、長距離かつ異方的であるが、その強さは従来は無視できるものと考えられてきた。この常識に反し、ダイポール相互作用がBECの超流動性な大きな影響を与えることを詳細な計算により明らかにし、アインシュタインード・ハース効果や基底状態で循環が存在するカイラル渦状態など注目すべき物理現象を予言することで、スピノール・ダイポールBECと呼ばれる新しい分野を切り開いた。

# 2.4 麻生 洋一 博士 (坪野研) : GWIC Thesis Prize, GWIC (Gravitational Wave International Committee)

GWIC Thesis Prize は、重力波研究に関する世界中の学位論文の中から毎年1名だけが選ばれて贈られる 名誉ある賞である。麻生洋一が開発したのは、日本の将来計画であるLCGT 重力波検出器に組み込むための 懸架点干渉計 (SPI) である。SPI は彼によって世界で初めてその効果が実証された超低雑音の能動防振システ ムであり、低温環境を利用するLCGT の実現にとって不可欠の技術と考えられている。彼は懸架点干渉計実 験の当初のデザインの段階から、最終的なオペレーションテストまでほとんど一人でやりとげた。彼が有効 性を実証したこの方法は、レーザー干渉計重力波検出器の低周波防振のプレイクスルーになる可能性を持っ ており、世界的にも大きな期待がかけられている。

# 2.5 日下 暁人 博士(相原研究室):第9回高エネルギー物理学奨励賞、第 2回日本物理学会若手奨励賞、および第24回井上研究奨励賞

日下氏は、博士論文「Measurement of CP-Violating Asymmetries in the Neutral B Meson Decaying to the rho-pi State Using a Time-Dependent Dalitz Plot Analysis」により B 中間子の rho 中間子と pi 中間子 への崩壊における粒子と反粒子の対称性の破れ(CP 対称性の破れ)を、終状態の運動学を記述する Dalitz plot と B 中間子崩壊の時間発展測定とを組み合わせるという新しい解析手法を用いて、世界に先駆けて測定 した。素粒子の標準理論の検証に新たな精密データを提供しただけでなく、B ファクトリー実験での CP 非 対称測定の新しい方向を打ち出した。その業績と完成度の高い優れた論文が高く評価された。

# 2.6 所 裕子 博士 (宮下研): 第2回日本物理学会若手奨励賞

所裕子博士は、「シアノ架橋型金属錯体における電荷移動に基づいた光誘起相転移現象の研究」という題目 で、物理学会若手奨励書を受賞した。光磁性に関する研究を精力的に進め、光物性やスピンクロスオーバー 相転移に関して、次々と新しい現象の発見、関連物質の合成などを世界に先駆けて進めている。特に、プル シャンブルー類似体と呼ばれる一連の物質で組成比を系統的に変化させることで、非常に大きな温度ヒステ リシスをもつ物質を発見し、その機構を理論的に解明している。また、その理論機構で予想される、秩序化 の形態に関する系統的変化についても明らかにするなど、スピンクロスオーバー関連の相転移の理解を非常 に進めた。また、強誘電体の発見や、光照射による磁化の急激な変化や履歴現象など多岐にわたる新現象を 発見し、この分野の発展に大きな寄与をした。

# 2.7 堀 正樹 博士(早野研究室):第4回ヨー ロッパ若手研究者賞

ヨー ロッパ若手研究者賞(European Young Investigator Awards)は人文科学を含むすべての研究分野の、 ポスドク経験2年以上10年以下の若手研究者から20名を精選し、ヨーロッパ内の研究機関において独立の 研究グループを率いるチャンスを与える制度である。堀博士は「反物質原子の精密レーザー・マイクロ波分 光?反物質制御の新技術」という意欲的な研究テーマで見事に栄冠を勝ち取った。今後は2005年のノーベル 物理学賞を受賞した、マックス・プランク研究所(ドイツ)のヘンシュ教授のグループ内に独立研究室を組 織し、大学院生やポスドクを指導しつつ、CERN研究所における反物質研究を推進することになっている。

## 2.8 沼田 健司 博士 (坪野研): 第1回日本物理学会若手奨励賞

沼田健司博士は第1回日本物理学会若手奨励賞(宇宙線・宇宙物理領域)を受賞した。彼は干渉計型重力波 検出器の開発に携わってきており、これまでに特に熱雑音に関する研究で大きな成果を収めてきた。特筆す べきは、鏡の熱雑音の直接測定を試み、三桁の周波数にわたって鏡の熱雑音の直接測定に初めて成功したこ とである。これは、揺動散逸定理の実験的な検証という熱統計物理の観点からも重要であり、機械系での熱 雑音の理論との比較検証が、広い周波数帯域で初めて行われたことになった。この成果は、彼の学位論文及 びいくつかの論文において報告され、内外の研究者から賞賛をもって迎えられた。

## 2.9 岡村 圭祐 君 (松尾研):平成 19 年度東京大学総長賞 (博士)

全ての物質とその間の相互作用を統一的に取り扱う理論として超弦理論が有力視されている。その鍵とな る概念が、一般相対論で記述される重力理論と量子色力学などで代表されるゲージ理論との間の「双対性」で ある。岡村博士は両者の背後にあって双対性を保証していると予想される「可積分性」の概念の発展に、厳 密解の発見、双対性の新しい検証舞台の提唱などを通じて目覚ましい貢献を果たした。一流専門誌に発表さ れた一連の研究成果は国際的に高い評価を受けており、トップレベルの研究者として、国内はもとより英ケ ンプリッジ大学をはじめとした多くの海外の大学・研究所に招聘され、共同研究や講演、集中講義など精力 的な活動を行った。

## 2.10 田中 宗 君 (宮下研):平成 19 年度理学系研究科研究奨励賞(博士)

田中宗博士は、博士課程の研究において、非平衡統計力学の重要な問題である非常にゆっくりした緩和現 象に関して、系の縮重度、つまりエントロピー起因の機構について精力的に研究を進め、秩序形態が温度に よって定性的に変わるいわゆるリエントラント相転移を引き起こす飾りボンド系における非常に遅い緩和現 象を数値計算で発見し、その機構を解析的に解明した。また、秩序状態に置いても巨視的な縮重度をもつ容 易軸的な異方性を持つかごめ格子反強磁性体において、磁気的に秩序した相の中でさらにエントロピー的に 有利な配位に向かって非常にゆっくりした緩和があることも発見し、その機構の理論的解明を行っている。そ の他、量子効果強い系での緩和現象に関して量子アニーリング法についても詳しい研究を行い、この分野の 進展に大きな寄与を与えた。

# 2.11 碁盤 晃久 君 (酒井広文研): レーザー学会優秀論文発表賞

碁盤晃久君(現在、酒井広文研究室修士課程2年)が、レーザー学会学術講演会第28回年次大会での講演 レーザー電場のない状況下での分子配向(共同研究者:峰本紳一郎、酒井広文)に対し、第13回優秀論文発 表賞を受賞した。本賞は、レーザー科学の発展に貢献しうる優秀な講演を行った若手会員(発表時に35歳以 下)に贈呈されるものであり、酒井広文研究室では4人目の受賞となる。碁盤君らは、弱い静電場とピーク 強度付近で急峻に遮断されるレーザー電場を併用することにより、これまで未到技術であったレーザー電場 のない状況下での分子配向をレーザー電場の遮断直後や分子の回転周期後に実現することに初めて成功した。

## 2.12 高島 憲一 君 (内田研): 平成 19 年度理学系研究科研究奨励賞(修士)

高島君は、「多層系銅酸化物高温超伝導体の単結晶成長と光電子分光測定による電子状態の研究」と題する 修士論文で、理学部研究奨励賞を受賞した。銅酸化物の高温超伝導は、現在でもそのメカニズムは未解明で、 物理学最大の謎の1つである。数ある高温超伝導体の中でも多層系と呼ばれる銅-酸素の2次元面(CuO面) を3枚以上もつ物質は絶対温度100Kを優に超える超伝導臨界温度Tcをもち、現実に、超伝導ケーブル等の 応用のための開発目標となっている。しかしながら、物性研究のための単結晶作製が非常に難しく、これま で殆ど手付かずの状況であった。高島君は、多層系の結晶成長に挑戦し、これまでにない高い品質の単結晶 を作製することに成功した。のみならず、この結晶の物性研究に最適といえる光電子分光を測定手段として 選び、これまでに知られていなかった多層系特有の電子状態を明らかにすることができた。

# 2.13 山崎 雅人 君 (江口研): 平成 19 年度理学系研究科研究奨励賞(修士)

山崎君の修士論文 "Brane Tilings and Their Applications" はブレーンタイリングの最近の発展を自身の 研究成果とともにまとめたものである。ブレーンタイリングは、AdS/CFT 対応と呼ばれるゲージ理論と重 力理論の間の双対関係を決めるための手法であり、近年大きな発展があった。山崎氏の研究はこの対応関係 を物理的側面、および数学的側面双方から捉えたものであり、高く評価されている。

## 2.14 湯浅 孝行 君 (牧島研): 平成 19 年度理学系研究科研究奨励賞(修士)

湯浅君は修士論文で、次世代の宇宙標準のシリアル通信規格である Space Wire に基づく放射線計測用の データ収集システムを構築した。ハードウェアとしてシステムを構築した上で、ユーザーが実際に Space Wire 通信を使うための公開ライブラリの整備まで行い、動作を実証した。これは日本中の宇宙機器ユーザに配ら れ使用されることとなる。さらに、試作したハードウェアを用いて、データ収集装置の時間分解能を超える 精度で時刻を決定できるロジックを構築し、10 倍精度を実証した。低い電力が大切な衛星搭載機器のシステ ムとして有力なロジックであり、今後の実際の応用も検討されている。本研究により、新世代の衛星搭載デー タ処理システムが、実用化へ向けて大きく進んだ。

## 2.15 森貴司君、西尾亮一君、中村祥子君:平成19年度理学部学修奨励賞

# 3 人事異動

[物理学教室に来られた方々]					
浅井	祥仁	准教授	2007年4月1日	配置換	
				(素粒子物理国際研究センター)	
中澤	知洋	講師	2007年4月1日	採用	
樫村	圭造	技術職員	2007年4月1日	再雇用 (理学系研究科物理学専攻)	
小野	涼子	物理教務	2007年4月1日	採用	
須川	和歌子	第一事務分室	2007年6月18日	採用	
管波	明子	物理事務室	2007年7月1日	配置換(工学系・	
				情報理工系・経理課経理チーム)	
常行	真司	教授	2007年8月16日	昇任 (物理学専攻准教授)	
工藤(	伯子	第一事務分室	2007年10月1日	採用	
松井	朋裕	助教	2007年11月1日	採用	
ターナ	·				
ピ-	-ターシップリー	助教	2008年2月1日	採用	
上田	正仁	教授	2008年3月1日	採用 (東京工業大学教授)	

## [物理学教室から移られた方々]

奥村	知恵子	第一事務分室	2007年6月30日	辞職
河島	淑美	物理事務室	2007年7月1日	配置換(医学部附属病院管理課)
須川	和歌子	第一事務分室	2007年6月30日	辞職
ダミア	ン・マーカム	助教	2007年8月31日	辞職(パリ第7大学 PD(研究員))
神原浩		助教	2007年10月31日	辞職(産業技術総合研究所)
村山能	宏	助教	2008年1月31日	辞職(東京農工大准教授)
岡朋治		助教	2008年3月31日	辞職(慶應大准教授)
菅原祐.	_	助教	2008年3月31日	辞職(立命館大准教授)
赤木	和人	助教	2008年3月31日	辞職(東北大准教授)
山崎	重男	物理事務室	2008年3月31日	辞職
加藤	眞理子	物理教務	2008年3月31日	辞職

# 4 役務分担

\*太字は責任者

役務	担当教員	技術職員・事務職員
専攻長・学科長	内田	新井、川崎、河島、上間、 佐々木
幹事	大塚、山本	新井、川崎、河島、上間、 佐々木
専攻主任	福山	佐々木、加藤、小野
専攻副主任	須藤	佐々木、加藤、小野
常置委員	早野、藤森	佐々木、加藤、小野
教務係	坪野 (理学部教務委員)、宮下、長谷川	佐々木、加藤、小野
	常行 (大学院)	佐々木、加藤、小野
学生実験	蓑輪、佐野、島野 (理実験管理部会)	樫村
就職係	牧島 (大学院他部局:榊原)	横山
奨学金	青木	小野田
会計係	酒井 (広) (COE 担当)、村尾	新井、川崎、河島、原
号館関係	酒井 (英) (1 号館)、坪野 (旧 1 号館)	新井
部屋割	岡本	新井
技術部門 (統括)	坪野	大塚 (茂)
試作室	坪野	大塚 (茂)
薬品管理	岡本	山本
研究材料・回路	酒井 (広)	樫村、蝦原
IT 関連	早野	藤代
衛生安全	早野	佐伯
低温	岡本	
電顕	長谷川	
図書係	初田 (理兼任)、青木、長谷川、村尾	小野澤、南、森村
談話会	柳田、初田、藤森、常行	田中、原
年次報告	平野	横山
記録係	濱口、小沢	
物品供用官	酒井 (英)	新井
環境安全	岡本	川崎
放射線管理	蓑輪	新井
事務分室	相原 (第1)、須藤 (第2)、常行 (第3)	新井
理交会	小沢	新井
教職員親睦会	浅井	親睦会委員
建物	相原、酒井 (英)	新井
進学指導	佐野	佐々木
ホームページ	松尾、中澤	藤代
理学部広報	小形	
理・国際交流委員	村尾	
理・男女共同参画	村尾	

# 5 教室談話会

場所:理学部4号館1320号室(3階)または1220号室(2階)

2008年2月8日
 16:30~18:00

Ulf Leonhardts  ${\ensuremath{\mathbb K}}$  (University of St Andrews, Scotland )

 ${}^{\Gamma}\operatorname{Geometry},$  light and a wee bit of magic  ${}_{J}$ 

# 6 物理学教室コロキウム

- 平成18年4月21日(金) 16:30-18:00
   高安秀樹氏 (ソニーCSL)
   「物理学が解き明かす経済現象」
- 平成19年5月11日(金) 16:30-18:00
   吉村 太彦氏 (岡山大学)
   「消えた反物質の謎 宇宙から探る素粒子の世界 」
- 平成19年6月1日(金) 16:30-18:00
   入来 篤史氏 (理化学研究所)
   「サルの「時空間」理解と自己意識」
- 平成19年7月6日(金) 16:30-18:00
   古澤明氏(東京大学)
   「量子テレポーテーションの実現とその応用」
- 平成19年10月12日(金) 16:30-18:00
   須藤靖氏 (東京大学)
   「太陽系外惑星:その先にあるもの」
- 平成19年11月9日(金) 16:30-18:00
   Andre Geim 氏 (The University of Manchester)
   「Graphene: Exploring Carbon Flatland」
- 平成19年12月14日(金) 16:30-18:00
   宇川 彰氏 (筑波大学)
   「スーパーコンピュータを通して自然に迫る」
## 2007年度 年次研究報告

2008年6月30日					
東京大学大学院理学系研究科・理学部					
	物	理	学	教 刍	
74	仁	-1-	14 <del>73</del>	.⊐iz.	3/5
ヂ	1J	入	小	孚	宿
編	集	中	澤	知	洋

450