ISSN 0910-0709

Department of Physics School of Science The University of Tokyo

Annual Report

2012

平成24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



図 1: KOI-94 は、ケプラー宇宙望遠鏡によって発見された複数惑星系の候補天体であり、中心星の近傍に木 星および海王星サイズの巨大惑星を含む4つのトランジット惑星を有する(図 A)。我々は KOI-94.01 に対し 複数惑星系で初となるロシター効果の検出を行い、この惑星の公転軸と中心星スピンが揃っていることを結論 づけた。さらに過去のケプラーのデータから、KOI-94.01 と KOI-94.03 による "planet-planet eclipse"(2つ の惑星が同時に恒星面上を横切り、かつその途中で重なり合う)と呼ばれる非常にまれな現象を発見し、その 結果生じた明るさの変化を解析することで両者の公転面もまた高い精度で揃っていることを見出した(図 B)。 以上の結果から、この系においては中心星スピンと惑星の公転軸の全てがきわめてよく揃っていることが結 論づけられる(図 C)。この結果は、KOI-94 が disk migration による軌道進化を経験したことを示唆するもの である。(須藤研)

KOI-94 is a multi-transiting system discovered by *Kepler* space telescope, and hosts four transiting planet candidates including Jupiter and Neptune-size planets in the proximity of the host star (Fig. A). We observed the Rossiter-McLaughlin effect of KOI-94.01 for the first time in a multiple system to find that the orbital axis of this planet is well aligned with the spin axis of the host star. Furthermore, in the archived data of *Kepler*, we identified an amazingly rare event of a planet-planet eclipse, in which KOI-94.01 and KOI-94.03 crossed the stellar disk simultaneously and even overlapped each other (Fig. B). Detailed analysis of this event revealed that the orbital planes of these two planets are also well aligned. These results imply a remarkable level of alignment of the orbital planes of the planets and the stellar spin (Fig. C), which supports a quiescent migration as a formation scenario of this system. (Suto group)



図 2: (a) ゼオライトを鋳型に使って、京谷等が合成した炭素物質の結晶構造。 (b) 伝導帯を構成するカイラ ル状態の基となる3重縮退ワニエ軌道。 (c) 伝導帯のバンド分散と、軌道角運動量(青矢印)。スピン・軌道 相互作用系に類似の磁気軌道効果が現れる(青木研)。 / (a) Zeolite-templated carbon structure fabricated by Kyotani et al. (b) Three-fold degenerate Wannier orbitals that are the ingredients of chiral states in the conduction band. (c) Dispersion of the conduction band and the orbital angular momentum (blue arrows), with a magneto-orbital effect reminiscent of spin-orbit. (Aoki lab.)



図 3: ⁶⁸Ni 原子核 (Z = 28, N = 40)の四重極変形に対する全エネルギー曲面を計算した図。球形 (赤)、みかん型 (緑)、ラグビーボール型 (青)の形状に対応した 3 つの極小点が存在する。京コンピュータを用いたモンテカルロ殻模型計算によって、これらの変形に対応する状態が近いエネルギーに存在することが予言された。このように複数の異なる変形状態が近いエネルギーに現れる現象は変形共存と呼ばれ、エキゾチック原子核でのその現れ方は新たなテーマになっている。(大塚研) / The calculated total energy surface of quadrupole deformation in the ⁶⁸Ni nucleus (Z = 28, N = 40). Three minimum points correspond to spherical (red), oblate (green) and prolate (blue) shapes. We predicted the existence of states with similar energies corresponding to these deformations by the Monte Carlo Shell Model calculation on the K computer. Such a phenomenon with several states of different shapes but similar energies is known as shape coexistence, and its appearance in exotic nuclei is becoming a new theme. (Otsuka lab.)

平成24年度(2012年4月-2013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 研究報告をお届けします。この小冊子が物理学教室で広く行われている多彩で活発な研究・教育の現状を知っ ていただく手がかりになれば幸いです。

最初に、教員の異動についてですが、吉田直紀教授(宇宙物理:IPMUより)、立川裕二准教授(素粒子理 論:IPMUより)、谷口耕治講師(物性実験:新領域創成科学研究科より)、森 貴司助教(宮下研)、竹内一将 助教(佐野研)、新倉 潤助教(櫻井研)、阿部 喬助教(大塚研)、石田 明助教(浅井研)、古川俊輔助教(上田 研)、細川隆史助教(吉田研)、辻 直人特任助教(青木研)、辻井直人助教(高瀬研)、渡邉祥正特任助教(山 本研)、Denis Epifanov 特任助教(相原研)が着任されました。また、原田崇広講師、角田直文助教、吉田鉄 平助教(京都大学人間・環境学研究科:准教授)、ピーター・ターナー助教、岡 隆史助教(工学系研究科:講 師)、矢向謙太郎助教(原子核科学研究センター:准教授)、川口由紀助教(工学系研究科:特任准教授)、掛 下照久特任助教が転出されました。

本年度は高温超伝導をはじめとする強相関物理学の内田慎一教授、重力波検出分野の坪野公夫教授が定年 を迎えられました。両先生はそれぞれの分野で世界的かつ独創的な研究成果を上げられるとともに多くの優 れた人材を育ててこられました。先生方の多年にわたる研究教育における貢献と教室運営における御尽力に 深く感謝申し上げます。

本年度も教室関係者の活発な研究・教育活動の結果、多くの方が受賞されています。小林孝嘉名誉教授が 公益社団法人日本化学会より「日本化学会フェロー」の称号を授与されました。浅井祥仁准教授が日本学術 振興会賞を受賞しました。五神 真教授、大塚孝治教授が Fellow of the American Physical Society に選出さ れました。早野龍五教授がドイツ GENCO 会員賞 (Membership Award)を受賞、五神 真教授が Fellow Member of The Optical Society (OSA) に選出されました。若い方々では、坂井南美氏(山本研助教)、細川 隆史氏(吉田研助教)が、2012 年度日本天文学会研究奨励賞を受賞、古川俊輔氏(上田研助教)、新倉 潤氏 (櫻井研助教)、長井 稔氏(諸井研特任研究員)、渡辺 優君(元上田研)が日本物理学会若手奨励賞を受賞しま した。村上洋平君(早野研)が Second International School for Strangeness Nuclear Physics にて, Osamu Hashimoto Prize の Best Oral Presentation を受賞しました。西 隆博君(早野研)が平成24 年度 理研 研究 奨励賞を、松原隆彦氏(1996-2000 須藤研助手)が2012 年度日本天文学会 林忠四郎賞を受賞しました。田 中良樹君(早野研)が J-PARC Hadron Hall User's Association Master Thesis Award を受賞しました。ま た、清水浩之君、村下湧音君、荒川尚輝君が平成24 年度理学部学修奨励賞を、本橋隼人君、杉山太香典君、 門内晶彦君、平野照幸君が平成24 年度理学系研究科研究奨励賞(博士課程)を、谷崎佑弥君、横山 輪君、村 上雄太君、鈴木博人君が平成24 年度理学系研究科研究奨励賞(修士課程)を受賞しました。

教室では若手のサポートの強化に努めています。平成 20 年度に開始された博士課程研究遂行協力制度およ びグローバル COE プログラム「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」、2010 年 3 月から始まった研究者海 外派遣基金助成金(組織的な若手研究者等海外派遣プログラム)「物理学における国際的に自立した研究者育 成プログラム」によって修士課程生を含む大学院生の海外派遣が行われました。これらの制度は平成 24 年度 で修了しましたが、引き続き、「卓越した大学院拠点形成支援」が開始する予定です。また昨年度リーディング 大学院「Advanced Leading Graduate Course for Photon Science (ALPS)」として博士コースー貫教育、広 く社会へのキャリアパスをめざした制度も始まりました。さらに、平成 24 年度には「統合物質科学リーダー 養成プログラム (MERIT)」、「数物フロンティアリーディング大学院(FMPS)」のリーディング大学院も開 始され、物理学専攻も参加しています。

平成24年度は、外部評価委員会が開かれました。小林 誠委員長、吉村太彦委員、安藤恒也委員、秋光 純 委員、観山正見委員、植田憲一委員、蔵本由紀委員、内永ゆか子委員によって教室、構成員個人の活動報告 書、及び1月8-10日の現地調査によって評価をいただき、貴重な御提言をいただきました。なお、今回の外 部評価はビックバン宇宙国際研究センターと共同で行われました。詳細はホームページに掲載されています。 大学の国際化を始め、学科・専攻のあり方についてこれからも真剣に考えていき、発信できる物理学教室とし て、基礎研究のおもしろさや重要性をアピールして行きたいと思っています。今後とも、先輩の先生方、関 係各位の皆様のご支援のほど、よろしくお願い申し上げます。

この年次研究報告は、松尾 泰准教授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。

2013 年 5 月 1 日 物理学専攻専攻長・教室主任 宮下精二

目 次

I 研究室別 2012 年度 研究活動報告

1		原子核・素粒子理論	11
	1.1	原子核理論研究室 (大塚)	11
	1.2	素粒子論研究室(諸井・浜口・松尾・立川)	19
		1.2.1 現象論	19
		1.2.2 弦理論	21
2		原子核・素粒子実験	27
	2.1	原子核実験グループ 【 見 野 ・ 櫻 土 】	97
		▲ 1 (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2)	21
		2.1.1 (人物員の) がん (平均) がしま) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	21
		2.1.2 千段定/ / / / / / / / / / / / / / / / / / /	20
		2.1.3 Λ 午间] 你] 你有名力儿 (平时听元主) $\dots \dots \dots$	20
		2.1.4 及 A 干面」示」 (400 町元 (十封町元主) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	29
		2.1.3 休 不裕さ 40 (二) 中间丁原丁の相省万九 (平均切九里)	30
		2.1.0 η 中間丁尿丁核の研究 (平野研究室)	00 01
		2.1.7 ミュオーリム生成標的の研究 (平野研究室)	31
		2.1.8 朋 場 分光法による个女正核構造研究 (櫻井研究室)	32
		2.1.9 インビーム γ 線核分光法による不安正核構造研究 (櫻开研究室)	33
	2.2		39
		2.2.1 電子・陽電子リニアコフイター ILC 計画	39
		2.2.2 LHC 実験	40
		2.2.3 小規模実験	41
		2.2.4 EPR 相関測定とベル不等式検証	42
	2.3	蓑輪 研究室	45
		2.3.1 PANDA – 原子炉ニュートリノモニター	45
		2.3.2 Sumico, アクシオンヘリオスコープ実験と Hidden photon 探索実験	46
	2.4	相原・横山研究室	49
		2.4.1 Belle 実験	49
		2.4.2 Belle II 実験	49
		2.4.3 HSC 暗黒エネルギー研究	50
		2.4.4 T2K 長基線ニュートリノ振動実験	51
		2.4.5 次世代大型水チェレンコフ検出器・ハイパーカミオカンデ計画	52
		2.4.6 SciBooNE(FNAL-E954) 実験	54
	2.5		57
	-	2.5.1 LHC・ATLAS 実験での研究	57
		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	67
	3.1	青木研究室	67
		3.1.1 超伝導	67
		3.1.2 トポロジカル系、トポロジカル効果	68

9

		3.1.3	非平衡現象
		3.1.4 -	その他
	3.2	宮下研究	昭室
		3.2.1	局所格子構造のちがう双安定系での協力現象の研究
		3.2.2	確率過程
		3.2.3	量子統計力学の研究
		3.2.4	統計力学の基礎的研究
	3.3	小形研究	昭室
		3.3.1	高温超伝導の理論
		3.3.2	鉄砒素系超伝導体に関する理論
		3.3.3	有機導体に関する理論
		3.3.4	ディラック電子系
		3.3.5	重い電子系および近藤効果
		3.3.6	※性体およびスピン軌道相互作用
	3.4	常行研究	"二日"中心的""一","二"(二)"二"(二)"(二)""一"(二)"(二)""一"(二)"(二)""一"(二)"(二)""一"(二)"(二)""一"(二)"(二)""一"(二)"(二)""一"(二)"""一"(二)""一"(二)"""一"(二)""""""(二)"""""(二)""""""(二)"""""(二)"""""(二)"""""(二)"""""(二)"""""(二)"""""(二)"""""(二)"""""(二)"""""(二)"""""(二)"""""(二)"""""(二)"""""(二)""""""(二)"""""(二)"""""(二)"""""(二)"""""(二)"""""(二)"""""(二)"""""(二)"""""(二)"""""
	0.1	341	シミュレーション手法の開発 90
		342	第一回理電子状能計算の応用
		0.1.2	
4		物性実驗	97
	4.1	藤森研究	光室
		4.1.1	高温超伝導
		4.1.2	強相関界面・スピントロニクス
	4.2	内田研究	昭室
		4.2.1 2	2012 年度の研究その1
		4.2.2	高温超伝導体の擬ギャップ相
		4.2.3	鉄化合物高温超伝導体の出現 107
		4.2.4	<i>T_c</i> は上がるか?
	4.3	長谷川碇	 F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
	4.4	福山研究	『室
		4.4.1 2	2 次元の量子凝縮相研究
		4.4.2	グラフェンの電子物性研究
	4.5	岡本 研	究室
	-	4.5.1	
		4.5.2	通相関2次元電子系
	4.6	鳥野研究	[[室]
	1.0	4.6.1	半導体高密度電子正孔系
		462 2	有機導体 128
		463 2	2 次元時間領域テラヘルツ分光法の開発と超伝導体の超高速光制御 128
		464	グラフェンにおける光学量子ホール効果 129
		465	時間分解テラヘルツ近接場顕微鏡の開発 129
	17	直木_公	口研究室
	1.1		日前元里・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
		479	2 C
		473	イオン- 雷子複合物性の開拓 133
		1.1.0	
5		一般物理	里理論 137
	5.1	宇宙理論	輪研究室 (須藤・吉田)
		5.1.1 着	観測的宇宙論

		5.1.2 星形成	42
		5.1.3 系外惑星	43
	5.2	村尾研究室	50
		5.2.1 測定ベース量子計算	50
		5.2.2 量子計算ネットワーク符号化 11	51
		523 量子アルゴリズム 1	51
		5.2.6 量子測定 (トモガラフィ) 1	52
		5.2.4 単「例2.(「ビノノノイ)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	52 52
		5.2.5	52 52
		5.2.0 里丁帽々	ງວ ະຈ
		5.2.1 単丁儿子ボにわける単丁旧報処理	55 74
	F 0	5.2.8 重于制御	54 54
	5.3		56
		5.3.1 冷却原子気体	56
		5.3.2 量子論および統計力学と情報理論の融合	57
0			~~
6	0.1		52 00
	6.1	牧島研究至十甲澤研究至	62
		6.1.1 宇宙X線の発見 50 年	ö2
		6.1.2 科学衛星の運用と稼働状況 [111] 10	62
		6.1.3 質量降着するブラックホール 10	62
		6.1.4 中性子星の研究 [48, 49, 65, 67, 89] 10	63
		6.1.5 超新星残骸および中心天体の研究 [89] 10	65
		6.1.6 銀河面と銀河中心のX線放射の研究 1	65
		6.1.7 銀河団の研究	66
		6.1.8 ASTRO-H衛星計画 10	67
	6.2	高瀬研究室	75
		6.2.1 TST-2 実験	75
		6.2.2 共同研究	77
	6.3	· 择野研究室 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	83
	0.0	6.3.1 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA 12	83
		6.3.9 字宙空間レーザー手渉計 DECIGO 11	84
		6.3.2 1 h L h μ 重力波 望遠 倍 TOBA	94 85
		6.3.5 4x C4 0 主星/J 放 主述 説 TOBA ····································	90 85
		0.0.4 低価ル共振価で用いた地向女だ化レックル赤の用光 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	50 06
		0.3.5 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	50 06
		0.3.0 全間守万性の切先 1 c.2.2 E畑的振動スの見て測定 1	50 00
	C 4	0.3.1 ERT 2010	50 00
	0.4		<u>59</u>
		6.4.1 巨視的非平衡糸の物理	39 04
		6.4.2 小さな非平衡糸の物理 1	91
		6.4.3 生命現象の物理	92
	6.5	山本研究室	98
		6.5.1 はじめに	98
		6.5.2 星形成の観測研究	98
		6.5.3 系外銀河の化学組成	00
		6.5.4 テラヘルツ帯観測技術の開拓 20	01
	6.6	酒井広文 研究室	04
		661 レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展 2	<u>04</u>
			υı
		6.6.2 搬送波包絡位相を制御したフェムト秒パルスを用いた原子分子中からの高次高調波発生 20	01
		6.6.2 搬送波包絡位相を制御したフェムト秒パルスを用いた原子分子中からの高次高調波発生 20 6.6.3 分子イメージング法の高度化のための位相スペクトル観測装置の開発	01 05 06

		6.6.5 配列した分子中から発生する第3高調波の偏光特性の時間発展の評価	207 208
	6.7	五神研究室	210
		6.7.1 物質系の巨視的量子現象の探索	210
		6.7.2 非自明な光学現象の探索とその応用	211
		6.7.3 新規コヒーレント光源開発と新しい分光手法開拓	212
7		生物物理	216
	7.1		216
		7.1.1 運動パターン生成の基盤となる神経細胞の同定と機能解析	216
		7.1.2 神経回路の活動ダイナミクス	218
		7.1.3 回路構造と神経機能の発生機構	219
		7.1.4 運動パターン生成の統合制御	221
	7.2	樋口研究室	224
		7.2.1 研究の背景と目的 ····································	224
		7.2.2 マウス骨格筋構造の in vivo イメージングの開発	224
		7.2.3 ヒトダイニン分子機能の網羅的解明に向けた研究	224
		7.2.4 非侵襲 in vivo がん細胞・白血球のイメージング	224
		7.2.5 非侵襲がん細胞の観察	225
		7.2.6 筋肉内分子観察の試み	225
			-
8		技術部門	227
	8.1	実験装置試作室 (大塚、柏葉、南城、阿部)	227
	8.2	学生実験 (佐伯、八幡、南野)	227
		8.2.1 物理学実験 I、II	227
		8.2.2 物理学実験 I	227
		8.2.3 物理学実験 II	227
		8.2.4 物理学実験機器更新 (八幡)	227
	8.3	IT 関連業務 (南野)	228
	8.4	安全衛生 (八幡)	228
	8.5	全学技術研修 (佐伯、南野、八幡、吉田 (地惑専攻))	228
	8.6	各種委員会等	228
Π	Sı	ummary of group activities in 20112	231
	1	Theoretical Nuclear Physics Group	233
	2	Theoretical Particle and High Energy Physics Group	234
	3	Hayano Group	236
	4	Sakurai Group	239
	5	Komamiya Group	240
	6	Minowa-Group	241
	7	Aihara & Yokoyama Group	241
	8	Asai Group	243
	9	Aoki Group	243
	10	Miyashita Group	244
	11	Ogata Group	246
	12	Tsuneyuki Group	247
	13	Fujimori Group	248
	14	Uchida Group	248
	15	Hasegawa Group	250
	16	Fukuyama Group	251

17	Okamoto Group	253
18	Shimano Group	253
19	Takagi Group & Taniguchi Group	254
20	Theoretical Astrophysics Group	255
21	Murao Group	257
22	Ueda Group	259
23	Makishima Group & Nakazawa Group	261
24	Takase Group	262
25	Tsubono Group	263
26	Sano Group	264
27	Yamamoto Group	265
28	Sakai (Hirofumi) Group	267
29	Gonokami Group	268
30	Nose Group	269
31	Higuchi Group	270

III 2011 年度 物理学教室全般に関する報告

9	学部講義概要 275	5
1	2年生 冬学期	5
	1.1 電磁気学 I : 駒宮幸男	5
	1.2 解析力学・量子力学 I : 須藤 靖, 相原博昭	5
	1.3 物理実験学 : 藤森 淳, 酒井 広文	3
	1.4 物理数学 I: 小形正男	3
	1.5 物理数学 II: 立川 裕二	7
2	3年生夏学期	7
	2.1 電磁気学 II : 高瀬 雄一	7
	2.2 量子力学 II: 浜口 幸一 277	7
	2.3 現代実験物理学I: (前半)江尻 晶 (後半)福山 寛 278	3
	2.4 流体力学 I: 佐野 雅己	3
	2.5 統計力学I:宮下精二278	3
3	3年生 冬学期)
	3.1 物理数学 III: 松尾 泰 279)
	3.2 量子力学 III : 大塚孝治)
	3.3 固体物理学 I: 島野 亮 280)
	3.4 現代実験物理学 II: 横山 将志, 中澤知洋 280)
	3.5 電磁気学 III : 内田慎一	L
	3.6 生物物理学:樋口秀男、能瀬聡直 281	l
	3.7 統計力学 II : 青木 秀夫 281	L
4	4年生夏学期	2
	4.1 場の量子論 I:諸井 健夫 282	2
	4.2 サブアトミック物理学:早野龍五 282	2
	4.3 統計力学特論:常行 真司 282	2
	4.4 宇宙物理学:牧島一夫	3
	4.5 固体物理学 II: 岡本 徹	3
	4.6 量子光学:五神 真 284	1
5	4年生冬学期	1
	5.1 化学物理学:山本 智	1
	5.2 素粒子物理学 I: 浅井祥仁 285	5
	5.3 原子核物理学 : 櫻井博儀	5

 $\mathbf{273}$

	5.4 電子回路論:坪野 公夫 5.5 現代物理学入門:高木 英典, 吉田 直紀	$285 \\ 285$
10	各賞受賞者紹介	287
1	小林孝嘉 名誉教授:日本化学会フェロー	287
2	浅井祥仁教授:日本学術振興会賞	287
3	五神真教授: Fellow of the American Physical Society, Fellow Member of the Optical Society	287
4	大塚孝治教授: Fellow of the American Physical Society	287
5	早野龍五教授:ドイツ GENCO 会員賞(Membership Award)	288
6	松原隆彦氏: 第17回 日本天文学会林忠四郎賞	288
7	細川隆史氏 (吉田研助教): 2012 年度日本天文学会研究奨励賞	288
8	坂井南美氏(山本研助教):2012 年度日本天文学会研究奨励賞	288
9	古川俊輔氏(上田研助教): 第7回日本物理学会若手奨励賞	289
10	新倉潤氏(櫻井研助教): 第7回日本物理学会若手奨励賞	289
11	長井稔氏(諸井研特任研究員): 第7回日本物理学会若手奨励賞	289
12	渡辺優氏(上田研:現 京都大学基礎物理学研究所): 第7回日本物理学会若手奨励賞	290
13	四隆博氏 (早野研): 平成 24 年度 埋研 研究 24 (中)	290
14	小林挧悟氏 (牧島研) およい村上浩草氏 (甲澤研) :ASTRO-H International Summer School 2012 ポスター銀営	200
15	2012 がバア 歌員	290
16	本上注亚氏(早野研): Second International School for Strangeness Nuclear Physics: Osamu	230
10	Hashimoto賞(best oral presentation)	290
11	人事異動	291
12	役務分担	293
13	教室談話会	295
14	物理学教室コロキウム	296
15	金曜ランチトーク	297

Ι

研究室別 2012年度 研究活動報告

1 原子核·素粒子理論

1.1 原子核理論研究室 (大塚)

原子核物理学の理論研究では、原子核やハドロン に関係した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、一般に「原子 核構造」と呼ばれている分野である。二つ目は、ハド ロンの多体系の構造や運動を、量子色力学に基づい て研究する分野で、「ハドロン物理学」と呼ばれる。 現在、物理学教室には「原子核構造」を扱う大塚 孝治教授、阿部喬助教、博士研究員と大学院学生か ら成る研究室があり、世界的にも先端を行く研究を

ら成る研究室かめり、世界的にも元端を行く研究を 活発に行っている。ここではその活動と成果の概要 を述べる。物理学教室内では「ハドロン物理学」の 活動は現在一時的に休止しているものの、近い将来 に再開されるべく努力されている。

研究の概要

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
- 現代的な殻模型計算による原子核の多体構造の 解明
- 3) 原子核の表面の運動や、時間に陽に依存する現 象 (反応、融合、分裂)

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、共同研究者によって後で述べられて いる研究についてはほとんど省略する。ここで参照 される文献、講演も後で出て来ないものが主である。 安定核とは、我々の身のまわりの物質を構成して いる原子核で、陽子の数と中性子の数はほぼ等しい か、中性子の方が少し多い程度である。名前のとお り、無限に長いか、十分に長い寿命を持っている。一 方、これから話題にするエキゾチック核とは、陽子 数と中性子数がアンバランスな、安定核から見れば 特異 (エキゾチック) なものである。 アンバランスの ために寿命が短く、不安定核と呼ばれることもある。 短い寿命のために、実験の対象にするには人工的に 作らなければならない。そこで稀少なものでもあり、 英語では Rare Isotope (RI: 稀少アイソトープ) とも 呼ばれる。エキゾチック核は、陽子数と中性子数の 比のアンバランスのために、様々な特異な量子的性 質を示すことが分かってきた。つまり、未知の性質 や現象に満ち溢れたフロンティアでもある。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 2, 8, 20, 50, 82, 126 という決まった数で あった。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 核のそれとは異なることが最近判明しつつある。そ の原因は核力のスピン・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、ということ も2005年頃から分かってきた。これは我々の研究室から発信された予言であり、その影響する範囲の広 さとインパクトの大きさから世界の原子核研究に明 確な指針を与えてきた。それを受けて、2010年1月 に Phys. Rev. Lett. に掲載された論文は特に重要 な2%に入る論文として Viewpoint 紹介論文に選ば れた。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。[7, 21, 22, 34, 35, 37, 38, 39, 43, 44, 45, 48, 50, 68

核子の間には2体力だけでなく、3体力も働く。 テ ンソルカに加えて、3体力が不安定核の殻構造、魔法 数、ドリップライン (存在限界) に特徴的な効果を及 ぼすことをやはり我々のグループが見つけた。藤田-宮沢3体力は50年前からその存在が知られている。 バリオンの一つであるデルタ粒子に核子が転換され るプロセスに起因するものである。この3体力が多 体系に及ぼす効果はほとんど研究されて来なかった。 我々は、その力の効果の中に、強いモノポール斥力 があることを発見した。その定量的な評価は伝統的 なπ中間子ーデルタ粒子結合からもできるし、有効 場の理論などの核力の最近の研究によっても調べら れ、似た結果を出す。計算の詳細にはよらずに、極 めて特徴的な効果を生むことが示せるので、不安定 核の構造の(中性子数などの変化の関数としての)進 化に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。このように、核力の果たす役割の重要 性が改めて認識され直している。[4, 21, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 42, 43, 44, 45, 48, 67, 68

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、従来のものとは異なる「連 続状態に結合した殻模型 (Continuum-Coupled Shell Model)」を提唱し、又、ガモフ殻模型なども用いて 研究している。重イオン反応による、多核子移行反 応により放出される中性子のエネルギー分布などか ら議論を進めている。[38, 49]

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。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=2 0の魔法数構造が普遍的に壊れていることを示した。 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。さらに、通常の考えでは二重 閉殻原子核のはずの⁴²Siがオブレートに大きく変形 していることなども示した。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。モンテカルロ殻模型を第一原 理計算に使う研究も本格的に進行している。同時に、 計算機用プログラムを並列計算機用に大幅に改良し、 又、外挿による厳密解の予知も行えるようになりつ つある。それらによる、スーパーコンピューターによ る計算を行い、次世代スパコンでのさらに大きな計 算に備えている。ニュートリノと原子核の反応など も引き続き研究の対象であり、天体核現象への応用 を行っている。[5, 6, 8, 9, 10, 34, 41, 46, 47, 48, 69]

従来型の直接対角化による殻模型計算において、 計算機技術上、及び、並列計算アルゴリズム上のブ レークスルーがあり、ここ数年、計算可能な最大次 元数が10億程度に止まっていたのが、一気に10 00億にまで拡大した。それにより、質量数100 近辺の原子核の構造解明が進みつつある。従来型の 計算は計算時間が次元の指数関数で増大するので、 ここで述べたブレークスルーの効用は計算限界が質 量数で20程度先に延びることになり、その範囲内 ではモンテカルロ殻模型よりも有用である。限界の 先はモンテカルロ殻模型を使うことになる。一方、 従来型の計算方法でも、新たな物理量の計算により、 特に実験データの解析を共同で行った研究もある。 [14, 15, 16, 17]

原子核には表面が球形から楕円体に変形し、楕円 体に固定されて回転したり、変形の度合が時間とと も変化する振動が起こったりする。これらには多数の 核子がコヒーレントに関与しているので集団運動と 呼ばれる。集団運動と表面の変形は密接に関係して おり、核子多体系の平均場理論によって記述される。 一方、集団運動をボソンによって記述する相互作用 するボソン模型も成功を収めてきた。前者は、核子 系から原子核の固有座標系での密度分布は出しやす いが、励起状態のエネルギーなどは出しにくい。後 者は現象論的であるが、励起エネルギーなどは実験 をよく説明するものを出せる。この2つを結びつけ る方法を考案し、その論文が出版された。これによ り、相互作用するボソン模型に予言能力が付与され て実験のない不安定核への応用が可能になり、また、 平均場理論との関連があきらかになって理解の深化 が可能になるなど、発展の道が開かれた。今年度は、 回転運動において、フェルミオン多体系とボソン多 体系の間で系を回転させた時の応答が異なることに 注目し、エネルギーに関してはこの応答を摂動1次 で等しくする項を導入することを提案した。それは いわゆる LL 項と呼ばれるものであり、これにより きれいな回転バンドを見せる強く変形した原子核に 対しても相互作用するボソン模型を導出できること が初めて示された。[11, 12, 13, 20, 40]

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。最近、 エネルギーの高い反応での荷電平衡化の抑制現象を 一般的な観点から理論的に見つけたが、その論文が 出版された。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。

さらに、量子カオスや原子核の回転運動などの量 子多体問題も独自の観点から研究している。

モンテカルロ殻模型アルゴリズムの進展

近年、次世代スーパーコンピュータ「京」での大 規模並列化計算の実行を想定して、モンテカルロ殻 模型のコードを MPI/OpenMP を用いて大幅に書き 換えた。さらに、コードの書き換えに加え、アルゴ リズム自体についても検討を重ねた。主要な変更及 び実装として、(1)エネルギー分散による外挿法と 基底順序並び替えの導入、(2)共役勾配法による基 底探索の導入、(3)二体行列要素の行列積演算によ る高速化を行った。

具体的には、モンテカルロ殻模型によって得られ た近似波動関数列を用いたエネルギー分散による外 挿法と基底順序並び替えの導入により、直接対角化 が不可能であるような大次元の模型空間におけるハ ミルトニアン行列の固有値を精密に推定することが できるようになった。また、従来のモンテカルロ殻模 型アルゴリズムでは基底の探索をすべて確率的サン プリングによって行っていたが、確率的サンプリン グに加え、共役勾配法による基底探索を導入するこ とによって、より少ない基底の数でエネルギーを最 小化することができるようになった。さらに、モンテ カルロ殻模型計算で一番計算時間を費やす _体行列 要素に関する計算の部分において、核力による相互 作用の対称性を利用することにより、高度にチュー ニングされた行列積演算のライブラリである BLAS level 3による実装が可能となり、大幅に計算時間を 短縮できるようになった。

上記のアルゴリズムの変更及びその実装の結果、 京でのテスト計算において、約40%と高い単体性能、 及び、約10万コアに上る高並列化を実現すること ができた。現在、このモンテカルロ殻模型コードを 用いて京を含む種々のスーパーコンピュータを使い 実際の原子核における実計算を行っている。[5,9,10, 24, 25, 26, 29, 30, 31, 32, 33, 41, 46, 47, 48, 51, 52, 55, 56, 59, 60, 61, 62, 69]

軽い原子核におけるモンテカルロ殻模型による第一 原理計算

近年、計算機性能と核子多体系における数値計算 手法の飛躍的発展により、現実的核力を用いた核子 多体系における第一原理計算が実行可能となった。 しかしながら、閉殻を仮定しない殻模型などに代表 される第一原理手法による大規模数値計算は、現在 のスーパーコンピュータをもってしても、その適用 領域は軽い原子核領域か閉殻近傍に限られる。そこ で、従来の閉殻を仮定する殻模型計算において、よ り重い核へと適用領域拡大に成功を収めたモンテカ ルロ殻模型を第一原理手法のひとつである閉殻を仮 定しない殻模型へと応用する試みを行っている。相 互作用としては、3体力の効果を出来る限り2体力 に繰り込んでいると期待される JISP16 という現実 的2体核力を用いた。炭素12までの軽い原子核の特 定の基底状態や励起状態について、束縛エネルギー、 平均自乗半径、電気四重極モーメント、磁気双極子 モーメントなどの物理量に対して、その他の閉殻を 仮定しない殻模型計算とのベンチマークを行い、そ の結果に関する論文を出版した。[8] また、この成 果に関して、国内外での会議で口頭発表を行った。 [23, 25, 26, 51, 55, 56] 今後、3 体力や連続状態との 結合をモンテカルロ殻模型に導入し、京コンピュー タなどを用いてさらに重い原子核へ適用可能である ことが実証されれば、この閉殻を仮定しないモンテ カルロ殻模型は現実的核力に基づいた原子核におけ る多体構造の系統的理解へ向け有力な手法のひとつ になりうると期待される。

Mathematics of Complexity Approach to Solving the Schrödinger Equation for Nuclear Structure

The goal of the proposed research is to efficiently compute accurate energy eigenvalues using the formalism I introduced for electronic structure. I planned to generalise the formalism for the electronic structure to compute accurate wave functions for the purposes of theoretical nuclear structure physics. Prof. Takaharu Otsuka's group have developed the Monte-Carlo Shell Model method for solving this problem. Monte-Carlo is a successful method, but does not necessarily take advantage of the inherent smoothness of the problem. The convergence for Monte-Carlo methods is n-1/2 for n points. If one has a D-dimensional function that is simultaneously m-times times differentiable with respect to every variable, then the convergence for the grid algorithm in my thesis, the Smolyak algorithm, is n $m/D(\log n)m(D-1)/(D+1)$. Mathematicians have proved that this is the most efficient possible method up to a logarithmic factor and is our motivation for implementing it. We believe this approach will expedite nuclear shell model computations.

Briefly, the method I have developed for electronic structure works by constructing direct product multidimensional grids. These are a subset of the simple product grid. The grids are formed based on the polynomial degree of one-dimensional grids. Specifically, each point in each one-dimensional grid is the root of some orthogonal polynomial of a given degree. An index set is used that prescribes which polynomial degree for each dimension should be used. These polynomial degrees dictate which polynomial's roots to choose in the set of orthogonal polynomials chosen for this grid for each dimension. The final grid is constructed by including every allowed multidimensional grid within the index set. The choice of index set is what determines the efficiency of the method. If the simple product set is used (each dimension has the highest allowed degree) then the method will have exponential cost. I will employ the Smolyak set and its generalisations to create efficient methods with polynomial cost.

The approach I developed in my thesis for the electronic Schrödinger equation was developed as a first quantized method. However, most methods employed in theoretical nuclear structure physics generally need to be formulated in second quantization. The original formulation of my method is most appropriate (and straight forward to implement) for first quantized applications. I have been working towards generalising the approach to make it appropriate for second quantized computations while minimizing the sacrifice to the efficiency of the method. To generalise the approach one can use an effective polynomial degree arising from the basis functions. This is accomplished by choosing orthogonal basis functions with an appropriate number of nodes (this effectively dictates the degree). In nuclear shell model calculations the basis functions are generally exact functions that come as solutions to eigenvalue problems where the operator is Hermitian (for example the Harmonic Oscillator basis). The exact solutions to eigenvalue problems involving Hermitian operators provide a complete set of orthogonal functions. When the solutions are exact the number of nodes of each solution is known a priori. We use these nodes as a way to find the effective polynomial degree.

So now instead of placing points using a grid that arise from choosing a polynomial degree, we keep the states that have the appropriate effective degree. Just like Gaussian quadrature gives the most efficient way to integrate polynomials with a grid, this approach, in principle, should give the most efficient states to keep in a variational procedure possible provided the basis functions are well chosen.

I have used this approach on small model systems such as Helium-4 and deuterium. We were able to compute these with the NuShell software package. I computed the energies at different basis sizes using different total angular momentum values. Unfortunately, this software is limiting in terms of the size of the basis set that can be used. As such, I am currently writing a computer code so I can increase the size of the basis sets we are employing and try more sophisticated systems. We also want to include extrapolation techniques to obtain the full configuration interaction value. We intend to publish this work in the next few months. I gave talks on this work in seminars [70, 71, 72, 73, 74, 75] invited international talks [53, 54], and in international conference talk [28], though, and briefly described the idea in international conference talk [27].

I have also worked on developing the second-order reduced density matrix method (the RDM method). I have also demonstrated the robustness of the reduced density-matrix method in the strong correlation limit and published the findings in a paper in Computational Theoretical Chemistry (published paper [18]) using the Hubbard model. This work showed that even when correlation is strong that typical necessary conditions used in the method are able to provide an accurate description.

奇中性子核の電気双極子能率

物理学では様々な重要な対称性があり、その中の 一つに CPT 対称性がある。C は荷電共役対称性、P はパリティ、T は時間反転不変性を表している。ま た、CPT 対称性とは物理で使われている方程式は CPT 変換を同時に行うと元に戻るという対称性であ る。現在までにパリティ対称性の破れと CP 対称性 の破れがあることがわかっている。特に CP 対称性 が破れているということは CPT 対称性から間接的 に時間反転不変性の破れを示すことになるが、時間 反転不変性の破れを直接的に示したという実験結果 は今のところ発表されていない。

時間反転不変性の破れを直接的に検証するための 研究として孤立系電気双極子能率の測定実験がある。 Xe 原子、Hg 原子を用いた原子 EDM(電気双極子能 率)の実験、中性子 EDMの実験、また、最近では イオン原子 EDMの実験が行われている。原子 EDM は Schiff の定理によって計算過程で EDMの項がほ とんど消されてしまい、理論的にはかなり小さい値 でしか観測できないのではないかと考えられている。

Schiff の定理では系が中性の場合に遮蔽されると 示されている。系が中性の場合に EDM の値が小さ いとして摂動計算を行うと、1 次の摂動項と 2 次の摂 動項が符号が逆で同じ値になり打ち消される。しか し、イオンの場合で計算すると電子による遮蔽がさ れないので核子 EDM の項が残る。そこで、今後イ オン原子 EDM が実験される場合の目安となるよう な計算が必要と思われたので、核子 EDM が磁気能 率と同様にスピンに比例する表現であることに着目 し、磁気能率の実験値を用いて様々な種類のイオン 原子 EDM を計算し、陽子 EDM と中性子 EDM で 表された簡単な表を作った。[19, 77]

2パイ中間子交換力

原子核は核力によって核子が束縛され原子核を構成していて、核力は中間子の交換によって生じると考えられている。中間子は π 、 η 、 σ 、 ρ 、 ω の種類があり、これらの交換で核力が記述される。一方、 その核力の中で、中間レンジ領域の核力はまだ明らかにされていない問題のひとつである。 π 、 η 、 ρ 、 ω ボソンは実験的にも確認されているが、 σ ボソンはスカラーボソンでもあり、理論・実験共にその存在は確認されているとはいえない。しかし、OBEP模型の中ではこの σ ボソン交換力が最も重要な中間レンジ引力を与えていると考えられている。そこで2 π 交換力による新たな核子一核子ポテンシャルを計算した。その結果、 2π 交換力は確かに引力を与え、特にT=0における核力はReidポテンシャルと良く似たポテンシャルとなることがわかった。[57, 58, 76]

モンテカルロ殻模型による中重核構造の研究

殻模型計算により不安定核の性質を理論的に予言 し、その起源を解明するために、陽子数 Z = 28 近 傍の中重核を主な対象として研究を行った。不安定 核の性質を記述するためには広い模型空間を用いる 必要があるが、従来の殻模型計算の手法では計算資 源の面から広い模型空間における計算は困難である。 本研究では、モンテカルロ殻模型法と最先端のスー パーコンピュータを用いることで、従来よりも広い 模型空間での計算を成し遂げた。

具体的には、pf 殻に $g_{9/2}$, $d_{5/2}$ 軌道を加えた $pfg_{9}d_5$ 模型空間における有効相互作用を改良し、大規模殻 模型計算を行うことで、Cr, Fe, Ni, Zn 同位体などの 偶偶核および Cu 同位体について性質を調べた。ま た、中性子数 N = 40,50の魔法数としての性質およ び陽子数の多い領域での相互作用の有効性を調べる ため、N = 40,50 アイソトーンの偶偶核について計 算を行った。

また、モンテカルロ殻模型法の特性を活かした原子 核変形の解析により、異なる変形に対応する固有状態 が近いエネルギーに現れる変形共存現象について調 べた。特に、陽子数が28で魔法数、中性子数が40で 準魔法数である⁶⁸Niについて多数のスピンパリティ 状態を計算し、励起エネルギーの実験値を再現すると ともに、個々の状態の変形について解析し、異なる変 形状態に対応する複数の回転バンドが存在すること を予言した。[5, 9, 29, 30, 31, 32, 33, 59, 60, 61, 62]

有効相互作用のスピン・テンソル分解

スピン・テンソル分解により、2体の相互作用の 調和振動子基底における行列要素を、それぞれ中心 力、LS力、そしてテンソル力の3つの成分に分解す ることができる。USD、GXPF1Aなどの現象論的な 有効相互作用や、 χ EFTやCD-Bonnなどから導出 された微視的な相互作用などをスピン・テンソル分 解した。またそれらの結果を用いて、殻模型計算に より各スピン・テンソル成分の束縛エネルギーへの 寄与を計算した。[63, 64]

原子核の荷電半径

近年、原子核構造を第一原理計算に基づいて理解 することに注目が集まっている。しかし、No-Core Shell Model(NCSM)などに代表されるような第一原 理計算では原子核の核子数が増えるにつれ、対角化 すべき行列の次元が爆発的に増加するため、中重核領 域の原子核について計算を行うことは困難である。そ こで、第一原理的な計算手法である Unitary-Model-Operator-Approach(UMOA)を用いて、中重核領域 の原子核である¹⁶Oの結合エネルギーと荷電半径の 計算をおこなった。また、それらの結果をもとに原 子核が持つ飽和性について議論した。[65, 66]

<受賞>

- [1] 大塚孝治: アメリカ物理学会フェロー
- [2] J. S. M. Anderson, Riken Foreign Postdoctoral Researcher (FPR) Fellowship, March 2014 — February 2017
- [3] J. S. M. Anderson, Natural Science and Engineering Research Council Postdoctoral Fellowship (NSERC PDF), January 2013 — December 2014

<報文>

(原著論文)

- [4] J.D. Holt, T. Otsuka, A. Schwenk and T. Suzuki, "Three-body forces and shell structure in calcium isotopes", J. Phys. G39, 085111 (2012).
- [5] N. Shimizu, Y. Utsuno, T. Mizusaki, M. Honma, Y. Tsunoda, and T. Otsuka, "Variational procedure for nuclear shell-model calculations and energy-variance extrapolation", Phys. Rev. C 85, 054301, (2012).
- [6] L. Liu, T. Otsuka, N. Shimizu, Y. Utsuno, and R. Roth, "No-core Monte Carlo shell model calculation for ¹⁰Be and ¹²Be low-lying spectra", Phys. Rev. C 86, 014302 (2012).
- [7] Y. Utsuno, T. Otsuka, B.A. Brown, M. Honma, T. Mizusaki and N. Shimizu, "Shape transitions in exotic Si and S isotopes and tensor-force-driven Jahn-Teller effect", Phys. Rev. C 86 051301(R), (2012).
- [8] T. Abe, P. Maris, T. Otsuka, N. Shimizu, Y. Utsuno, and J.P. Vary, "Benchmarks of the full configuration interaction, Monte Carlo shell model, and no-core full configuration methods", Phys. Rev. C 86, 054301 (2012).
- [9] N. Shimizu, T. Abe, Y. Tsunoda, Y. Utsuno, T. Yoshida, T. Mizusaki, M. Honma, and T. Otsuka, "New generation of the Monte Carlo shell model for the K computer era", Prog. Theor. Exp. Phys. 2012(1), 01A205 (2012).

- [10] Y. Utsuno, N. Shimizu, T. Otsuka and T. Abe, "Efficient computation of Hamiltonian matrix elements between non-orthogonal Slater determinants", Comp. Phys. Comm. 184, 102 (2013).
- [11] K. Nomura, N. Shimizu, D. Vretenar, T. Niksic, and T. Otsuka, "Robust Regularity in gamma-Soft Nuclei and Its Microscopic Realization", Phys. Rev. Lett. 108, 132501 (2012)
- [12] J. Kotila, K. Nomura, L. Guo, N. Shimizu, and T. Otsuka, "Shape phase transitions in the interacting boson model: Phenomenological versus microscopic descriptions", Phys. Rev. C 85, 054309 (2012)
- [13] M. Alders et al., "Evidence for a Smooth Onset of Deformation in the Neutron-Rich Kr Isotopes", Phys. Rev. Lett. **108**, 062701 (2012)
- [14] S. Schwertel et al., "One-neutron knockout from Sc51-55", Euro. Phys. J. A 48, 191 (2012).
- [15] D.K. Sharp et al., "Neutron single-particle strength outside the N=50 core", Phys. Rev. C 87, 014312 (2012)
- [16] E. Ganioglu et al., "High-resolution study of Gamow-Teller transitions in the Ti-47(He-3, t)V-47 reaction", Phys. Rev. C 87, 014321 (2012)
- [17] J.P. Schiffer et al., "Valence nucleon populations in the Ni isotopes", Phys. Rev. C 87, 034306 (2012)
- [18] J. S. M. Anderson, M. Nakata, R. Igarashi, K. Fujisawa, M. Yamashita "The second-order reduced density matrix method and the two-dimensional Hubbard model"; Comput. Theor. Chem. **2012**, 1003, 22-27.
- [19] T. Fujita and S. Oshima, "Electric dipole moments of neutron-odd nuclei", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., **39**, 095106 (2012)
- (会議抄録)
- [20] T. Otsuka, "Interacting boson model and nucleons", Proc. of Beauty in Physics, Theory and Experiment in honor of Francesco Iachello on the occasion of his 70th birthday, AIP Conf. Proc. 1488, 445 (2012).
- [21] T. Otsuka, "Exotic nuclei and nuclear forces", in Proc. of the 152nd Nobel Symposium on Physics with Radioactive Beams, Phys. Scr. T152, 014007 (2013).
- [22] Y. Utsuno, T. Otsuka, B.A. Brown, M. Honma, T. Mizusaki, and N. Shimizu, "Shell evolution around and beyond N=28 studied with large-scale shellmodel calculations", Prog. Theor. Phys. Suppl. 196, 304-309 (2012).
- [23] T. Abe, P. Maris, T. Otsuka, N. Shimizu, Y. Utsuno, J. P. Vary and T. Yoshida, "Benchmark of the No-Core Monte Carlo Shell Model in Light Nuclei", Few-Body Systems (Springer Online Journal), DOI 10.1007/s00601-013-0678-1 (2013).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [24] T. Abe, "No-core Monte Carlo shell model towards ab initio nuclear structure", Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS2012), Nara Prefectural New Public Hall, Nara, Japan, Dec. 13-16, 2012.
- [25] T. Abe, "Recent development of Monte Carlo shell model and its application to no-core calculations", Conference on Computational Physics (CCP2012), Nichii Gakkan Conference Center, Integrated Research Center and Convention Hall of Kobe University, and K-computer building (AICS), Kobe, Japan, Oct. 14-18, 2012.
- [26] T. Abe, "Benchmark of the No-Core Monte Carlo Shell Model in Light Nuclei", the 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20), Fukuoka International Congress Center (FICC), Fukuoka, Japan, Aug. 20-25, 2012.
- [27] J. S. M. Anderson, "Breaking the Curse of Dimension for the Nuclear Structure Schrödinger Equation with Functional Analysis" The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB) Fukuoka, August 2012.
- [28] J. S. M. Anderson, "Multidimensional Quadrature Approaches for Solving the Electronic Schrödinger Equation" presented at 2nd Workshop on Sparse Grids and Applications (SGA) Munich, June 2012.
- [29] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, Y. Utsuno, "Study of medium-mass nuclei by largescale shell model calculations", The 11th CNS International Summer School, RIKEN, Wako, Japan, September 3 (August 29-September 4), 2012.
- [30] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, Y. Utsuno, "Study of medium-mass nuclei by largescale shell model calculations", International Symposium on Exotic Nuclear Structure From Nucleons (ENSFN 2012), University of Tokyo, Tokyo, Japan, October 12 (10-12), 2012.
- [31] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, Y. Utsuno, "Study of medium-mass nuclei by largescale shell model calculations", The 4th international conference on "Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions" (COMEX4), Shonan Village Center, Hayama, Japan, October 24 (22-26), 2012.
- [32] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, Y. Utsuno, "Study of Medium-Mass Nuclei by Large-Scale Shell Model Calculations", GCOE International Symposium on Physical Sciences Frontier, University of Tokyo, Tokyo, Japan, December 9 (8-9), 2012.

[33] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, Y. Utsuno, "Study of medium-mass nuclei by large-scale shell model calculations", Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2012), Nara Prefectural New Public Hall, Nara, Japan, December 14 (13-16), 2012.

招待講演

- [34] T. Otsuka, "Novel structure of exotic nuclei and nuclear forces", 14th National Conference on Nuclear Structure in China, April 12 (12-14), 2012, Huzhou, China.
- [35] T. Otsuka, "Shell evolution in exotic nuclei", Symposium for the 40th Anniversary of DNP of KPS, April 26 (24-27), 2012, Daejeon, Korea.
- [36] T. Otsuka, "Spin properties of effective two-body interaction extracted from three-body forces", EMMI Program The extreme matter physics of nuclei : from universal properties to neutron-rich extremens, May 3 (April 16-May 11), 2011, GSI, Darmstadt, Germany.
- [37] T. Otsuka, "Shell evolution in exotic nuclei", Workshop on RI Physics Theory, May 11 (11-12), 2012, Riviera Hotel, Daejeon, Korea.
- [38] T. Otsuka, "Shell evolution with tensor and threebody forces", 11th International Conference on Nucleus-Nucleus Collision, May 30 (27-June 1), 2012, San Antonio, Texas, USA.
- [39] T. Otsuka, "Exotic nuclei and nuclear forces", the 152nd Nobel Symposium on Physics with Radioactive Beams, June 12 (10-15), 2012, Goteborg, Sweden.
- [40] T. Otsuka, "Rotating around atomic nuclei and my cup of models", Gelberg 90 Colloqium, June 28, 2012, IKP, Koeln, Germany.
- [41] T. Otsuka, "Perspectives of Monte Carlo Shell Model", International Symposium Nuclear Structure and Dynamics II, July 11 (9-13), 2012, Opatija, Croatia.
- [42] T. Otsuka, "Three-body forces and neutron-rich exotic nuclei", 20th International IUPAP Few-Body Conference, Aug. 22 (20-25), 2012, Fukuoka international Congress Center, Japan.
- [43] T. Otsuka, "Nuclear Structure towards the driplines: understanding many-body forces and correlations", Zakopane Conference on Nuclear Physics Extremes of the Nuclear Landscape, 47th in the series of Zakopane Schools of Physics, Aug. 30 (Aug. 27-Sep. 1), 2012, Zakopane, Poland.
- [44] T. Otsuka, "Perspectives of Physics of Exotic Nuclei", 11th CNS Summer School, Sep. 4 (August 29- September 4), 2012, CNS (Wako campus of RIKEN) and the University of Tokyo,
- [45] T. Otsuka, "Perspectives of Physics of Exotic Nuclei", APCTP mini-workshop on nuclear structure, APCTP headquarter, Sep. 21 (21-22), 2012, Pohang, Korea.

- [46] T. Otsuka, "New horizon of computational nuclear structure physics in the K computer era -A shell-model perspective -", International Conference on Computational Physics, Oct. 15 (15-18), 2012, Kobe, Japan.
- [47] T. Otsuka, "Advanced Monte Carlo Shell Model calculations and exotic nuclei around Z=28", LACM-TORIJIN-JUSTIPEN workshop, Nov. 2 (Oct. 31-Nov. 2), 2012, Oak Ridge, USA.
- [48] T. Otsuka, "An Overview of Exotic Nuclei and Nuclear Forces, and Monte Carlo Shell Model", 7th Italy-Japan Symposium, November 20 (20-23), 2012, Milano, Italy.
- [49] T. Otsuka, "Low-lying continuum states of dripline Oxygen isotopes", Resonance workshop, December 13 (12-13), 2012, RIFP, Kyoto, Japan.
- [50] T. Otsuka, "Quest for signatures of tensor and other force - A proposal for relativistic heavyion beam facility", NUSTAR annual meeting 2013, February 28 (25-March 1), 2013, GSI, Darmstadt, Germany.
- [51] T. Abe, "No-core Monte Carlo shell model toward the ab initio no-core shell model", Collective Motions in nuclei under EXtreme conditions (COMEX4), Shonan Village Center, Kanagawa, Japan, Oct. 22-26 2012.
- [52] T. Abe, "Application of the Monte Carlo shell model to the ab initio no core calculations", International Workshop on Nuclear Theory in the Supercomputing Era (NTSE2012), Pacific National University, Khabarovsk, Russia, Jun. 18-22, 2012.
- [53] J. S. M. Anderson, "GKCI Approach to Solving the Nuclear Structure Schrödinger Equation" GCOE (Global Center for Physical Science Frontier, University of Tokyo) Interdisciplinary Workshop on Numerical Methods for Many-Body Correlations Tokyo, February 2013
- [54] J. S. M. Anderson, "GKCI Approach for Solving the Electronic Schrödinger Equation" 25th Canadian Symposium on Theoretical and Computational Chemistry (CSTCC) Guelph, July 2012

(国内会議)

一般講演

- [55] 阿部喬, "モンテカルロ殻模型による第一原理計算に 向けて", 基研研究会「微視的有効相互作用の理論と核 構造・反応研究」, 基礎物理学研究所, 京都大学, 2013 年2月12-14日.
- [56] 阿部喬, "原子核殻模型計算プログラム"rmcsm"の 高速化",第4回 HPCI 戦略プログラム合同研究交流 会,計算科学研究機構, 2012 年7月 10 日.
- [57] 大島佐知子、神田直大、藤田丈久
 2 パイ中間子交換力の新しい評価
 日本物理学会秋季大会、京都産業大学、2012年9月
 13 日

- [58] 大島佐知子、藤田丈久、吉見彰洋
 2パイ中間子交換力は重陽子を束縛できるか
 日本物理学会第68回年次大会、広島大学、2013年3
 月29日
- [59] 角田佑介、大塚孝治、清水則孝、本間道雄、宇都野 穣、「大規模殻模型計算による中重核の研究」、日本 物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学、2012 年 9月12日(11-14日)
- [60] 角田佑介、大塚孝治、清水則孝、本間道雄、宇都野穣、 「大規模殻模型計算による Z = 28 近傍核の研究」、基 研研究会「微視的有効相互作用の理論と核構造・反応 研究」、京都大学基礎物理学研究所、2013 年 2 月 12 日(12-14 日)
- [61] 角田佑介、大塚孝治、清水則孝、本間道雄、宇都野 穣、「大規模殻模型計算による Z = 28 近傍核の研 究」、HPCI 戦略プログラム分野 5「物質と宇宙の起 源と構造」全体シンポジウム、富士ソフトアキバプラ ザ、2013 年 3 月 6 日 (5-6 日)
- [62] 角田佑介、大塚孝治、清水則孝、本間道雄、宇都野穣、 「大規模設模型計算による Z = 28 近傍核の研究」、日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学東広島キャン パス、2013 年 3 月 28 日 (26-29 日)
- [63] 小嶋祐人、大塚孝治、清水則孝、阿部喬、角田佑介、「有効相互作用のスピン・テンソル分解」、基研研究会「微視的有効相互作用の理論と核構造・反応研究」、 基礎物理学研究所、2013年2月
- [64] 小嶋祐人、大塚孝治、清水則孝、阿部喬、角田佑介、 「有効相互作用のスピン・テンソル分解」、日本物理 学会第 68 回年次大会、広島大学東広島キャンパス、 2013 年 3 月
- [65] 宮城宇志、阿部喬、岡本良治、大塚孝治、「多体計算 による原子核の質量分布、陽子分布、中性子分布の平 均2乗半径の解析」、基研研究会「微視的有効相互作 用の理論と核構造・核反応」、京都大学基礎物理学研 究所、2013年2月
- [66] 宮城宇志、阿部喬、岡本良治、大塚孝治、「原子核の 質量分布、陽子分布、中性子分布の平均2乗半径の多 体論的計算の試み」、日本物理学会第68回年次大会、 広島大学東広島キャンパス、2013年3月

招待講演

- [67] 大塚孝治 殻構造と3体力 中性子星キックオフミーティング 理化学研究所、2012年10月27日(26-27日)
- [68] 大塚孝治 核力と核構造のパラダイム -3体力、テンソル力、 LS 力の観点からー
 「微視的有効相互作用の理論と核構造・核反応」研究 会
 京都大学基礎物理学研究所、2013年2月12日(12-14日)
- [69] 大塚孝治 大規模量子多体計算による核物性解明とその応用 HPCI 戦略プログラム分野 5「物質と宇宙の起源と構

造」全体シンポジウム 富士ソフトアキバプラザ6階セミナールーム1、2013 年3月5日(5-6日)

(セミナー)

- [70] J. S. M. Anderson, Prof. Yoshi Fujiwara Group, Kyoto University — "Breaking the Curse of Dimension for the Nuclear Structure Schrödinger Equation with Functional Analysis", October 2012.
- [71] J. S. M. Anderson, Prof. Emiko Hiyama Group, Riken — "GKCI Approach for Solving the Electronic and Nuclear Schrödinger Equation", November 2012.
- [72] J. S. M. Anderson, Prof. Seiichiro Ten-no Group, Kobe University — "GKCI Approach for Solving the Electronic and Nuclear Schrödinger Equation", November 2012.
- [73] J. S. M. Anderson, Prof. Hiroshi Nakatsuji Group, Quantum Chemistry Research Institute — "GKCI Approach for Solving the Electronic and Nuclear Schrödinger Equation", November 2012.
- [74] J. S. M. Anderson, Prof. Jie Meng Group, Peking University — "GKCI Approach for Solving the Nuclear Schrödinger Equation", March 2013.
- [75] J. S. M. Anderson, Prof. Wenjian Liu Group, Peking University — "GKCI Approach for Solving the Electronic and Nuclear Schrödinger Equation", March 2013.
- [76] 大島佐知子: "中間子交換による核子-核子ポテンシャ ル", (埼玉大学、2012 年 9 月 20 日)
- [77] 大島佐知子: "原子核 EDM 研究の現状", (埼玉大学、 2012 年 9 月 20 日)

(その他)

[78] T. Otsuka and A. Schwenk, Nuclear Physics News, Vol. 22, Issue. 4, 12-17(2012).

1.2 素粒子論研究室(諸井・浜口・ 松尾・立川)

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。

2012年度は立川が准教授として着任した。

1.2.1 現象論

超対称模型

超対称模型は素粒子標準理論を越える物理として 有力な候補であると考えられている。素粒子標準理 論を超対称化した超対称標準模型について以下の研 究がなされた。

論文 [2] において、諸井は柳田と横崎 (IPMU) と 共に、宇宙論的に無矛盾な超対称模型を考察し、そ の模型においてはヒッグス粒子の質量が極めて自然 に観測値(約126GeV)と近い値を取ることを指摘 した。

佐藤は伊部(宇宙線研究所)とともに、R 対称性 を持つゲージ伝達型超対称性模型について、ヒッグ ス粒子の質量が LHC 実験と矛盾しない大きさにな り、なおかつ同時にグラビティーノが暗黒物質の良 い候補となることを示した [3]。

北原は、超対称標準模型においてヒッグス場を含 むスカラーポテンシャルの真空の準安定性を考慮に いれると、ヒッグス粒子が2つの光子へ崩壊する崩 壊幅が強く制限されることを示した[4]。

佐藤は飛岡(IPMU)、横崎(IPMU)とともに、 ヒッグス粒子が2つの光子へと崩壊する分岐比が大 きくなる超対称性模型に着目し、LHC実験と標準模 型の予言のずれを説明可能なパラメーター領域を調 べ、さらに真空の安定性が模型に対して重要な制限 を与えることを指摘した[5]。

ミュー粒子の異常磁気モーメント (g-2)µ の観測 値は、標準模型における理論値と整合していない。そ の不整合は超対称性理論の効果だ、という説がある が、その説においては超対称性粒子は比較的軽くな ければならない。すると、126 GeV というヒッグス 粒子の質量を超対称標準模型 (MSSM) の枠内で説明 することは困難になる。2011 年度、遠藤、濱口、岩 本、横崎(IPMU)は、MSSM に更にクォークを付 け加えることで、 $(g-2)_{\mu}$ の不整合の理由を説明した ままヒッグス粒子の質量を大きくできることを示し た。発見されたヒッグス粒子の質量 (126 GeV) を実 現する上でその模型が有効であることを示し、付け 加えたクォークの質量に対する加速器実験からの制 限について議論した [6]。また、その模型および類似 の模型は、真空の安定性から強く制限されることを示 した [7]。遠藤、濱口、石川、岩本は、横崎 (IPMU)

と共に、この模型への LHC での SUSY 探索からの 制限を調べ [8]、石川はこれを修士論文としてまとめ た [48]。岩本は、以上の一連の成果を博士論文とし て発表した [53]。

同様のことは、MSSM に対して U(1) ゲージ対称 性を付け加えた模型でも可能である。遠藤、濱口、 岩本、中山は、横崎(IPMU) と共同でこれを示し た [9]。

中山は横崎 (IPMU) とともに、MSSM にベクター 粒子を導入する模型において、Strong CP 問題を解決 するのに必要な Peccei-Quinn 対称性により、125GeV ヒッグスを説明するための自然なパラメータが実現 できることを示し、そのような模型における現象論、 宇宙論を詳しく調べた [10]。

佐藤は伊部(宇宙線研究所)、松本(IPMU)とと もに、アノマリー伝達型超対称性模型において、荷 電ウィーノと中性ウィーノの質量差を2ループダイ アグラムの寄与を取り入れて評価した。質量差の補 正の結果として LHC 実験による制限が1ループの 質量差を用いたものより厳しくなることを指摘した [11]。その成果を学会で発表し[94]、博士論文にま とめた [55]。

佐藤は飛岡(IPMU)、白井(カリフォルニア大 バークレー校)とともに、スカラー粒子がLHC実験 で生成不可能な程度の質量を持つような超対称性模 型について、グルイーノの崩壊分岐比に着目するこ とで、スカラー粒子の質量の大きさが推定可能であ ることを示した[12]。

浜口、中山は横崎 (IPMU) とともに、Next-to-MSSM (NMSSM) 模型に隠れたゲージ対称性を導入することで、ドメインウォール問題とゲージ伝達模型における $\mu/B\mu$ 問題が同時に解かれることを示し、この模型での現象論および宇宙論を詳しく調べた [13]。

山田は、兼村・進藤とともに、超対称強結合ゲージ理論の低エネルギー有効理論として得られる拡張 ヒッグス模型を研究した。この拡張ヒッグス模型で は、新たなアイソスピン二重項および一重項のカイ ラル超場が、超対称標準模型のヒッグス超場と大き な結合定数で結合するという構造が、自然にかつ UV complete に導かれる。こうした新たなカイラル超場 が寄与する輻射補正が、ヒッグス粒子の質量や初期 宇宙での電弱相転移の強さに大きく影響することを 示した。[14]

U(1)_{B-L} 模型におけるリゾナントレプトジェネシス

山田は、岡田・折笠とともに、標準模型に U(1)B-Lゲージ対称性を付加した模型でリゾナントレプトジェ ネシスを自然に実現するシナリオを研究した。この 模型では、U(1)B-Lゲージ対称性が TeV スケール で破れており、右巻きニュートリノは TeV スケール の質量を持っている。我々のシナリオでは、高いス ケールで右巻きニュートリノがフレーバー対称性を 持ち、それがニュートリノのディラック湯川結合に よって明示的に破れている。繰り込み群の効果によ り、低いスケールでは、右巻きニュートリノが湯川 結合に比例した微小な質量差を持ち、リゾナントレ プトジェネシスの仕組みが働く。このシナリオは、レ プトジェネシスが加速器実験によって直接検証でき る唯一の可能性である。我々は、以上のシナリオで、 宇宙のバリオン数非対称を正しく導出できることを 示した。[15]

LHC における輻射ゼロ領域の観測

山田は、萩原とともに、輻射ゼロ領域 (null radiation zone) と呼ばれる、1 光子+2 ジェットのイベ ントの微分断面積が抑制される領域が、LHC 実験に おいて観測可能かどうか研究した。輻射ゼロ領域は、 クォーク・クォーク散乱に光子の放出が伴うプロセス に寄与するダイアグラム間の干渉によって起こり、標 準模型の予言の一つと言える。我々は、LHC のデー タに対して特殊なカットをかけることで、輻射ゼロ 領域の効果を 8TeV, 20fb⁻¹ の LHC で観測できるこ とを示した。[16]

Higgs 場の高次微分相互作用

高い energy 領域の物理は低い energy 領域におい て、高次相互作用として現われる。数多ある高次相 互作用の中で、Higgs 場の微分相互作用は、今後の 実験で精密に調べられることが期待されていること、 その影響が高い energy 領域で増大していくことから 重要である。山本は、菊田 (KEK) との共同研究にお いて、微分相互作用の摂動的な unitarity の制限を調 べることで微分相互作用の影響は模型に依存して大 きく変わること、他の制限と合わせると、微分相互 作用が現われる模型は強く制限されることを指摘し た [17]。

CP 対称性の破れ

梁は久野、津村(ともに名古屋大)とともに、こ れまで考えられていなかったクォーク4点の演算子 からの寄与を含めた、次元6までのCPを破る有効 演算子のウィルソン係数に対する繰り込み群方程式 を導いた[18]。以上の研究成果を博士論文にまとめ た[56]。

論文 [19] は、Mass insertion 近似の下、chargino contribution も含めた $\Delta F = 1$ の有効ハミルトニア ンを与え、 $B \rightarrow K\pi$ 崩壊の CP の破れに応用した。

トップクォーク前方後方非対称性

Tevatron 実験において、トップクォーク対生成での前方後方対称性の破れの大きさが測定されているが、その測定値は標準模型に基づく理論値と整合していないことが知られている。この不整合は、*t*-*d*-*W*′という結合のみを持つ粒子*W*′により説明されうることが知られており、その粒子はLHC実験において探されている。岩本、遠藤は、CMS グループによ

る W'の探索において、生成断面積の理論値が正し く見積もられていない可能性を指摘した [20]。

Heavy Photon モデル

遠藤、浜口、三嶋は論文[21]において電子の異常磁 気モーメントと水素原子のエネルギー準位を用いて Heavy Photon モデルに対する新たな制限を課した。

三嶋は修士論文において異常磁気モーメントと水 素原子のエネルギー準位の、測定値と理論値の比較 を行い、Heavy Photon モデルへの制限を議論した [49]。

Peccei-Quinn 模型の宇宙論

諸井と瀧本は論文 [22] において、超対称性を持つ Peccei-Quinn 模型において現れる、saxion と呼ばれ る粒子が、宇宙初期にどのように振る舞うかを、特 に熱浴の効果に注目して議論した。

モジュライ問題への解

超弦理論や超重力理論に現れるモジュライと呼ば れるスカラー場が、宇宙論的に深刻な問題を引き起 こすことが知られている(モジュライ問題)。

中山、柳田は高橋(東北大)とともに、断熱解と呼 ばれるモジュライ問題への解を詳細に調べ、断熱解 の適用限界を示した。その上で、断熱解が働くため には再加熱温度やインフレーションのエネルギース ケールに制限が付くことを示した [23]。また、このア イデアを重力伝達模型における Polonyi 場に適用し、 具体的なインフレーション模型において、Polonyi 問 題が解かれることを示した [24]。

さらに、中山は、川崎、北嶋(東大宇宙線研)と ともに、断熱解のアイデアを押し進め、もっと広い クラスの模型において、スカラー場の振幅を抑える ことが可能であることを示した [25]。

原始重力波で探る初期宇宙

神野、諸井、中山は将来の DECIGO 衛星におけ る背景重力波観測により、初期宇宙での相転移過程 を探査することが可能であることを示した [26]。ま た、近年報告されている暗黒輻射(dark radiation) 成分の存在が本当であった場合、背景重力波スペク トルの詳細な解析により、dark radiation の存在を 検証できることを示した [27]。神野は以上の研究内 容を修士論文にまとめた [50]。 中山は、川上、川崎、宮本(東大宇宙線研)、関 ロ(名古屋大)とともに、現在の宇宙背景放射観測の データを用いて、ニュートリノおよび dark radiation が持つ非ガウス的な等曲率揺らぎに対する制限を導 いた [28] 。これにより、レプトン非対称性や dark radiation の生成機構が制限される。

超重力理論におけるインフレーション模型

中山は、高橋(東北大)とともに、B-L ヒッグス場 がインフレーションを引き起こした可能性について 詳しく調べ、この模型が観測結果をよく説明し、さ らに1000TeV 程度の超対称性の破れのスケールが自 然に予言されることを示した [29]。また、インフラ トンが再加熱過程において、MSSM のヒッグス場に 自動的に変化する模型を提唱した [30]。

中山、柳田は、高橋(東北大)とともに、インフ ラトンからの崩壊で生成されるグラビティーノの量 を抑制するメカニズムを提案し、多くのインフレー ション模型が、100-1000TeV 程度の重い SUSY のシ ナリオと整合することを示した [31]。

中山は、川崎、北嶋(東大宇宙線研)とともに、ある種の超対称アクシオン模型において、自然にインフレーションが実現されることを示し、特に位相欠陥を生じないような模型の構築に成功した[32]。

熱浴中におけるスカラー場のダイナミクス

向田、中山は熱場の理論を用いて、初期宇宙にお ける高温プラズマ中でのスカラー場のダイナミクス を詳細に解析し、特に熱的な散逸効果が重要な役割 を果たすことを示した [33]。また、この定式化をイ ンフレーション後の再加熱過程に適用し、宇宙の熱 史、特に再加熱温度が散逸効果により劇的に変わる 場合があることを示した [34]。

暗黒物質からの 130GeV ラインガンマ線

遠藤、浜口、リュウ、向田、中山は、R-パリティ が小さく破れた超対称模型において、アクシーノ暗 黒物質の崩壊によって、Fermi衛星により観測され た銀河中心からの130GeV ガンマ線の超過を説明可 能であることを示した [35]。

グラヴィティーノ問題

宇宙のエネルギー密度を支配的に占めたスカラー 場からのグラヴィティーノ生成率を求めることは素 粒子論的宇宙論において重要な課題の一つである。 この生成率は、超対称性の破れ方に依存している。 超対称性の破れには F タームによる破れと D ター ムによる破れという2種類があるが、既存の研究で は、Fタームで超対称性が破れている場合のグラヴィ ティーノ生成率しか研究されていなかった。遠藤、濱 ロ、寺田は、FタームだけでなくDタームの破れが あるという一般的な状況でのスカラー場からのグラ ヴィティーノ生成率を計算した[36]。これにより、一 般の超対称性の破れにおけるグラヴィティーノ生成 率の公式が求められた。モデル計算によりDターム で超対称性を破った方がグラヴィティーノの生成量 を少なくできる可能性が明示的に示され、これはグ ラヴィティーノ問題の一つの解決法となりえる。

ゲージ/重力対応による現象論への応用

西尾は柳田、渡利 (共に IPMU)、米倉 (基研) とと もに、標準模型を越えたモデル構築の際に頻繁に応 用される Naive Dimensional Analysis をゲージ/重 力対応に基づく検証を与えた [37]。

また西尾は、深部仮想コンプトン散乱に代表され るハドロン散乱現象をゲージ/重力対応により解析す る研究について博士論文をまとめた [54]。さらに渡 利 (IPMU) とともに、ハドロン散乱現象の skewness 依存性をもゲージ/重力対応により導く方法について の研究を行った。

1.2.2 弦理論

M 理論の研究

M 理論の構成要素である空間自由度が5次元のブレーンは4次元ゲージ理論の強弱双対性を理解する 上で本質的な役割を果たしていることが期待されている。一方 M 理論のブレーンの Lagrangian 定式化 は最近急激に発展していて、2次元のブレーンの定 式化ができたのは数年前である。松尾は台湾大学の Pei-Ming Ho とともに5次元のブレーンの定式化を 試みている。5次元ブレーンの上の自己双対2形式 場にどのように非可換ゲージ対称性を導入すること ができるかについて昨年一つの提案を行ったが、今年 の研究[38]ではその一般化を行い一般の群に対して 任意の表現を含む2形式場ゲージ理論の構成を行っ た。また、超対称性な模型を構成し、その性質を調 べた。

立川は、ブラジルサンパウロ大の Oscar Chacaltana と米国テキサス大オースティン校の Jacques Distler と共に、空間 5 次元のブレーン上の理論の余 次元 2 の欠陥について詳しく調べた。[39].

超弦理論の幾何の研究

弦理論の対称性を尊重したような幾何学として Doubled Geometry が知られており、時空の一般の 幾何を理解する役割を果たす可能性がある。この幾 何学と弦理論の性質が追究され、近年、Dブレーン

1. 原子核·素粒子理論

を Dirac 構造として解釈する発展があった。仲村は、 doubled geometry の基礎から、その D ブレーンと の関係までを修士論文にまとめた [52]。

4 次元の超共形指数、5 次元 SYM および 2 次元 q-YM の関連

近年上記空間 5 次元に広がったブレーンを $S^1 \times S^3 \times C$ (ただし C はリーマン面) に置いた際の分配 関数を考察することで、面白い数理物理的現象が見 いだされている。この系は、 S^1 , S^3 , C のどれがもっ とも小さいかに応じて、次元還元の順序を変えるこ とでさまざまな解析が可能であることも面白さの一 つである。C が小さければ、4 次元で共形指数とい う量を計算することに、 S^1 が小さければ、5 次元で N = 2 SYM を考察することに、 $S^1 \ge S^3$ が双方小 さければ、C 上で 2 次元の q-YM と呼ばれる理論を 考察することになる。これらの分配関数がすべて一 致するというのが予想である。

立川は、これまでの定式化では 4 次元の共形指数 は 2 次元 q-YM の分配関数で面積がゼロになる極限 をとったものであったが、面積を正にするには 4 次 元側では T^*G_C に値をもつ非線形超対称 σ 模型を 考えれば良いことを示した [40]。

川野、松宮は、 $S^3 \times R^2 \pm 0.5$ 次元 N = 1 SYM の分配関数を、局所化の手法を用いて計算した。そ の結果、これが $R^2 \pm 0.2$ 次元 YM の分配関数と一 致することを確認し、これらが双対の関係にあるこ とを示した。[41]

福田、川野、松宮は、さらに、 $S^3 \times \Sigma(\mathcal{Y} - \mathcal{V} \sim \mathcal{V})$ 上の5次元 N = 2 SYM の分配関数を局所化の手法 で計算し、これが Σ 上の2次元 q-YM の分配関数と 一致することを示した。この5次元 SYM と2次元 q-YM は、 $S^1 \times S^3 \times \Sigma$ 上の6次元 N = (2,0) 理論 とある種の対応関係にあると予想されており、本研 究における結果はこの予想と合致した。[42]

立川はドイツハイゼンベルク研の Noppadol Mekareeya および米国カリフォルニア工科大の Jaewon Song と共に、 S^1 方向に外部自己同型による捻りが 入っている場合の 4 次元の場の理論の共形指数をし らべた。これは non-simply-laced 型の 2 次元 q-YM を与えた [43]。

4次元超対称ゲージ理論の研究

4次元の超対称ゲージ理論の分配関数と2次元戸 田理論の相関関数が一致することが Alday-Gaiotto-Tachikawa らにより数年前予想されている。この予 想はいくつかの特殊な場合には証明がなされている。 菅野・松尾・張は $\beta = 1$ というパラメータの設定の 場合 $W_{1+\infty}$ 代数の対称性を系が持つことを示した。 [44] またゲージ理論のインスタントン分配関数がそ の対称性に関連する recursion formula(Virasoro 拘 東条件) に従うことを示し、AGT 予想の部分的な証 明を行った。菅野は、以上の結果に基づき一連の研 究成果を博士論文にまとめた [58]. 立川は、米国シンシナティ大の Philip C. Argyres と米国カリフォルニア工科大の丸吉一暢と共に、 $\mathcal{N} = 2$ 超対称純粋ゲージ理論の真空のモジュライ空間上 でもっとも特異な点において、互いに電気的なモノ ポールが同時に真空期待値を持つことで、あらたな モジュライ空間の方向が生じることを調べた [45]。

AdS/CFT 対応

AdS/CFT 対応の一つの分野として可解スピン鎖 と重力の対応がある。これまでは主にゲージ理論の 2点相関関数について調べられてきたが、ここ数年3 点関数の計算が可能になってきた。松尾はSaclayの Kostovとともに[46]3点関数の計算に関連する可解 スピン鎖の相関関数の一般的な公式を代数的Bethe Ansatzの手法を用いて導いた。

田中は3次元のABJM理論とAdS空間の重力理 論との対応関係を調べた。特にマグノン束縛状態の 散乱振幅を厳密に計算してAdS/CFT対応の検証を 行い学位論文にまとめた[57]。

<受賞>

 [1] 長井 稔,日本物理学会若手奨励賞 素粒子論領域,日 本物理学会,2013年3月

<報文>

(原著論文)

- [2] "Enhanced Higgs Mass in a Gaugino Mediation Model without the Polonyi Problem," T. Moroi, T. T. Yanagida and N. Yokozaki, Phys. Lett. B 719, 148 (2013).
- [3] M. Ibe and R. Sato, "A 125 GeV Higgs Boson Mass and Gravitino Dark Matter in R-invariant Direct Gauge Mediation" Phys. Lett. B 717, 197 (2012).
- [4] T. Kitahara, "Vacuum Stability Constraints on the Enhancement of the $h \rightarrow \gamma \gamma$ rate in the MSSM," JHEP **1211**, 021 (2012) [arXiv:1208.4792 [hep-ph]].
- [5] R. Sato, K. Tobioka and N. Yokozaki, "Enhanced Diphoton Signal of the Higgs Boson and the Muon g-2 in Gauge Mediation Models" Phys. Lett. B **716**, 441 (2012).
- [6] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto and N. Yokozaki, "Higgs mass, muon g-2, and LHC prospects in gauge mediation models with vectorlike matters," Phys. Rev. D 85, 095012 (2012) [arXiv:1112.5653 [hep-ph]].
- [7] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto and N. Yokozaki, "Vacuum Stability Bound on Extended GMSB Models," JHEP **1206**, 060 (2012) [arXiv:1202.2751 [hep-ph]].
- [8] M. Endo, K. Hamaguchi, K. Ishikawa, S. Iwamoto and N. Yokozaki, "Gauge Mediation Models with Vectorlike Matters at the LHC," JHEP **1301**, 181 (2013) [arXiv:1212.3935 [hep-ph]].

- [9] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto, K. Nakayama and N. Yokozaki, "Higgs mass and muon anomalous magnetic moment in the U(1) extended MSSM," Phys. Rev. D 85, 095006 (2012) [arXiv:1112.6412 [hep-ph]].
- [10] K. Nakayama and N. Yokozaki, "Peccei-Quinn extended gauge-mediation model with vector-like matter," JHEP **1211**, 158 (2012) [arXiv:1204.5420 [hep-ph]].
- [11] M. Ibe, S. Matsumoto and R. Sato, "Mass Splitting between Charged and Neutral Winos at Two-Loop Level," Phys. Lett. B 721, 252 (2013).
- [12] R. Sato, S. Shirai and K. Tobioka, "Gluino Decay as a Probe of High Scale Supersymmetry Breaking," JHEP **1211**, 041 (2012).
- [13] K. Hamaguchi, K. Nakayama and N. Yokozaki, "A Solution to the mu/Bmu Problem in Gauge Mediation with Hidden Gauge Symmetry," JHEP **1208**, 006 (2012) [arXiv:1111.1601 [hep-ph]].
- [14] S. Kanemura, T. Shindou and T. Yamada, "A light Higgs scenario based on the TeV-scale supersymmetric strong dynamics," Phys. Rev. D 86 (2012) 055023 [arXiv:1206.1002 [hep-ph]].
- [15] N. Okada, Y. Orikasa and T. Yamada, "Minimal Flavor Violation in the Minimal $U(1)_{B-L}$ Model and Resonant Leptogenesis," Phys. Rev. D 86 (2012) 076003 [arXiv:1207.1510 [hep-ph]].
- [16] K. Hagiwara and T. Yamada, "Null radiation zone at the LHC," Phys. Rev. D 87 (2013) 014021 [arXiv:1210.0973 [hep-ph]].
- [17] Y. Kikuta and Y. Yamamoto, "Perturbative unitarity of Higgs derivative interactions," arXiv:1210.5674 [hep-ph].
- [18] J. Hisano, K. Tsumura, and M. J. S. Yang, "QCD Corrections to Neutron Electric Dipole Moment from Dimension-six Four-Quark Operators", Phys.Lett. B713, 473 (2012), arXiv:1205.2212.
- [19] M. Endo, and T. Yoshinaga, "Mass Insertion Formula for Chargino Contribution to $\Delta B = 1$ Wilson Coefficients and its Application to CP Asymmetries of $B \to K\pi$," Prog. Theor. Phys. **128** (2012) 1251-1268.
- [20] M. Endo and S. Iwamoto, "Comment on the CMS search for charge-asymmetric production of W' boson in ttbar + jet events," Phys. Lett. B 718, 1070 (2013) [arXiv:1207.5900 [hep-ex]].
- [21] M. Endo, K. Hamaguchi and G. Mishima, "Constraints on Hidden Photon Models from Electron g-2 and Hydrogen Spectroscopy," Phys. Rev. D 86, 095029 (2012).
- [22] T. Moroi and M. Takimoto, "Thermal Effects on Saxion in Supersymmetric Model with Peccei-Quinn Symmetry," Phys. Lett. B 718, 105 (2012).

- [23] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, "Cosmological Moduli Problem in Low Cutoff Theory," Phys. Rev. D 86, 043507 (2012) [arXiv:1112.0418 [hep-ph]].
- [24] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, "Gravity mediation without a Polonyi problem," Phys. Lett. B **714**, 256 (2012) [arXiv:1203.2085 [hep-ph]].
- [25] M. Kawasaki, N. Kitajima and K. Nakayama, "Revisiting the Cosmological Coherent Oscillation," Phys. Rev. D 87, 023513 (2013) [arXiv:1112.2818 [hep-ph]].
- [26] R. Jinno, T. Moroi and K. Nakayama, "Imprints of Cosmic Phase Transition in Inflationary Gravitational Waves," Phys. Lett. B **713**, 129 (2012) [arXiv:1112.0084 [hep-ph]].
- [27] R. Jinno, T. Moroi and K. Nakayama, "Probing dark radiation with inflationary gravitational waves," Phys. Rev. D 86, 123502 (2012) [arXiv:1208.0184 [astro-ph.CO]].
- [28] E. Kawakami, M. Kawasaki, K. Miyamoto, K. Nakayama and T. Sekiguchi, "Non-Gaussian isocurvature perturbations in dark radiation," JCAP **1207**, 037 (2012) [arXiv:1202.4890 [astroph.CO]].
- [29] K. Nakayama and F. Takahashi, "PeV-scale Supersymmetry from New Inflation," JCAP **1205**, 035 (2012) [arXiv:1203.0323 [hep-ph]].
- [30] K. Nakayama and F. Takahashi, "Alchemical Inflation: inflaton turns into Higgs," JCAP **1211**, 007 (2012) [arXiv:1206.3191 [hep-ph]].
- [31] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, "Eluding the Gravitino Overproduction in Inflaton Decay," Phys. Lett. B **718**, 526 (2012) [arXiv:1209.2583 [hep-ph]].
- [32] M. Kawasaki, N. Kitajima and K. Nakayama, "Smooth hybrid inflation in a supersymmetric axion model," Phys. Rev. D 87, 035010 (2013) [arXiv:1211.6516 [hep-ph]].
- [33] K. Mukaida and K. Nakayama, "Dynamics of oscillating scalar field in thermal environment," JCAP 1301, 017 (2013) [arXiv:1208.3399 [hep-ph]].
- [34] K. Mukaida and K. Nakayama, "Dissipative Effects on Reheating after Inflation," JCAP 1303, 002 (2013) [arXiv:1212.4985 [hep-ph]].
- [35] M. Endo, K. Hamaguchi, S. P. Liew, K. Mukaida and K. Nakayama, "Axino dark matter with Rparity violation and 130 GeV gamma-ray line," Phys. Lett. B 721, pp. 111 (2013) [arXiv:1301.7536 [hep-ph]].
- [36] M. Endo, K. Hamaguchi and T. Terada, "Scalar Decay into Gravitinos in the Presence of D-term SUSY Breaking," Phys. Rev. D 86 (2012) 083543 [arXiv:1208.4432 [hep-ph]].

- [37] R. Nishio, T. Watari, T. T. Yanagida and K. Yonekura, "Naive Dimensional Analysis in Holography," Phys. Rev. D 86, 016010 (2012) [arXiv:1205.2949 [hep-ph]].
- [38] P. -M. Ho and Y. Matsuo, "Note on non-Abelian two-form gauge fields," JHEP **1209**, 075 (2012) [arXiv:1206.5643 [hep-th]].
- [39] O. Chacaltana, J. Distler and Y. Tachikawa, "Nilpotent orbits and codimension-two defects of 6d N=(2,0) theories," Int. Jour. Mod. Phys. A 28 1340006 (2013) [arXiv:1203.2930 [hep-th]].
- [40] Y. Tachikawa, "4d partition function on S^1xS^3 and 2d Yang-Mills with nonzero area," PTEP **2013**, 013B01 (2013) [arXiv:1207.3497 [hep-th]].
- [41] T. Kawano and N. Matsumiya, "5D SYM on 3D Sphere and 2D YM," Phys. Lett. B **716**, 450 (2012) [arXiv:1206.5966 [hep-th]].
- [42] Y. Fukuda, T. Kawano and N. Matsumiya, "5D SYM and 2D q-Deformed YM," Nucl. Phys. B 869, 493 (2013) [arXiv:1210.2855 [hep-th]].
- [43] N. Mekareeya, J. Song and Y. Tachikawa, "2d TQFT structure of the superconformal indices with outer-automorphism twists," JHEP 1303 (2013) 171 [arXiv:1212.0545 [hep-th]].
- [44] S. Kanno, Y. Matsuo and H. Zhang, "Virasoro constraint for Nekrasov instanton partition function," JHEP 1210, 097 (2012) [arXiv:1207.5658 [hep-th]].
- [45] P. C. Argyres, K. Maruyoshi and Y. Tachikawa, "Quantum Higgs branches of isolated N=2 superconformal field theories," JHEP **1210**, 054 (2012) [arXiv:1206.4700 [hep-th]].
- [46] I. Kostov and Y. Matsuo, "Inner products of Bethe states as partial domain wall partition functions," JHEP 1210, 168 (2012) [arXiv:1207.2562 [hep-th]].
- (会議抄録)
- [47] S. Iwamoto, "Muon g-2 anomaly and 125 GeV Higgs: Extra vector-like quark and LHC prospects," AIP Conf. Proc. 1467, 57 (2012) [arXiv:1206.0161 [hep-ph]].
- (国内雑誌)

(学位論文)

- [48] 修士論文:K. Ishikawa, "超対称性模型の現象論と LHC 実験からの制限."
- [49] 修士論文:三嶋剛, "双極子モーメント測定と水素原 子分光による軽い新粒子への制限."
- [50] 修士論文:神野隆介, "Gravitational Waves as a Probe of New Physics."
- [51] 修士論文: 瀧本 真裕 "超対称 Peccei-Quinn 模型の宇 宙論 Cosmology of Supersymmetric Peccei-Quinn model."
- [52] 修士論文:仲村智, "Doubled Geometry と D ブレーン."

- [53] 博士論文: S. Iwamoto, "Supersymmetry after the Higgs discovery and its phenomenology."
- [54] 博士論文: R. Nishio, "High Energy Scattering of Hadrons in Holographic QCD."
- [55] 博士論文: R. Sato, "Precise Calculation of the Mass Splitting between Charged and Neutral Winos."
- [56] 博士論文: M. J. S. Yang, "Improved Evaluations of Lepton-Flavor Violating Processes and Neutron Electric Dipole Moment by non-Standard Higgs Interactions."
- [57] 博士論文:田中裕彬, "CP³内のジャイアントマグノンと AdS/CFT 対応"
- [58] 博士論文: Shoichi Kanno, " $W_{1+\infty}$ symmetry in 4D N=2 supersymmetric gauge theories."

(著書)

```
<学術講演>
```

(国際会議)

一般講演

- [59] S. Iwamoto, "LHC SUSY searches after the Higgs discovery: respecting the muon g-2," Toyama International Workshop on Higgs as a Prope of New Physics 2013, U. of Toyama, Feb. 2013.
- [60] K. Ishikawa, "LHC constraints on gauge mediation model with vectorlike matters," KEK-PH 2013, KEK, Mar. 2013.
- [61] T. Kitahara, "Vacuum Stability Constraints on the Enhancement of the Higgs to Diphoton Rate in the MSSM," The annual Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology 2013, KEK, March 2013.
- [62] G. Mishima, "Constraints on Hidden Photon Models from Electron g-2 and Hydrogen Spectroscopy," KEK-PH2013, KEK, 6 March 2013.
- [63] K. Mukaida, "Dynamics of Oscillating Scalar Field in Thermal Environment," The 22nd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan(JGRG22), The University of Tokyo, 2012/11/12.
- [64] K. Mukaida, "Dissipative Effects on Reheating after Inflation," The annual Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology 2013, KEK, March 2013.
- [65] K. Nakayama, "Probing dark radiation with inflationary gravitational waves," The 22nd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG22), The University of Tokyo, 2012/11/12.
- [66] R. Nishio, "Nave dimensional analysis in holography," SUSY2012, Beijing university. 2012 年 8 月.
- [67] T. Terada, KEK-PH2013.
- [68] T. Yamada, "Iso-spin violating dark matter at the LHC," Pheno 2012, University of Pittsburgh, 8-May.

- [69] T. Yamada, "Iso-Spin Violating Dark Matter at the LHC," SUSY 2012, Peking University, 16-Aug.
- [70] Y. Yamamoto, "Structure of derivarive interactions in N pseudo Nambu Goldstone Higgs doublet models," Pheno 2012, Pittsburgh, USA, May 2012.
- [71] Y. Yamamoto, "Descrimination possibility between composite and fundamental multi-Higgs doublet models with derivative interactions," Workshop on Multi-Higgs Models, Lisboa, Portugal, August 2012.
- [72] Y. Yamamoto, "Unitarity bound of the Higgs derivative interactions," HC 2012, The University of Tokyo, November 2012.
- [73] M. J. S. Yang, "Renormalization Group Effects on the Chromo-electric Dipole Moment via CP violating Four Fermion Operators,", FLASY 12 Workshop on Flavor Symmetries (30 June 2012 - 4 July 2012), Dortmund, Germany.

招待講演

- [74] 川野 輝彦, "Notes on F-Theory Compactifications,"
 Progress in Quantum Field Theory and String Theory, 大阪市立大学、2012 年 4 月 3 日-7 日.
- [75] 川野 輝彦, "5D SYM on 3-Sphere and 2D qdeformed YM," International Symposium on Exact Results in SUSY Gauge Theories and Integrable Systems, 立教大学、2013 年 1 月 12 日-14 日.
- [76] T. Moroi, "Non-WIMP Dar Matters in SUSY Models," Cosmic Frontier (March 6 – March 8, 2013), Palo Alto, CA, U.S.A.
- [77] T. Moroi, "Supersymmetry, Peccei-Quinn symmetry, and cosmology," SUSY2012 (August 13 – August 18, 2012), Beijin, China.
- [78] T. Moroi, "Enhancement of the Higgs mass in SUSY model with extra matters," PLANCK2012 (May 28 – June 1, 2012), Warsaw, Poland.
- [79] T. Yamada, "Phenomenology of a light Higgs scenario with strongly-coupled Higgs sector arising from SUSY strong dynamic," LCWS 12, University of Texas at Arlington, 24-Oct.
- [80] 立川裕二, "On four-dimensional defects of 6d N = (2,0) theory," Progress in Quantum Field Theory and String Theory, 大阪市立大学、2012 年 4 月 3 日-7 日.
- [81] 立川裕二, "Nilpotent orbits and supersymmetric gauge theories," Workshop on geometric representation theory, 京都大学 2012 年 9 月 24 日-28 日
- [82] 立川 裕二, "Yet another duality for N = 1 SQCD," International Symposium on Exact Results in SUSY Gauge Theories and Integrable Systems, 立教大学、2013 年 1 月 12 日-14 日.
- (国内会議)

一般講演

- [83] K. Hamaguchi, "Axino DM with R-parity Violation and 130 GeV γ-ray Line," KEK-PH 03, KEK, March 2013.
- [84] 岩本 祥, "MSSM with Vector-like Quarks can explain 126 GeV Higgs,"原子核三者若手夏の学校,山 梨県富士吉田市, 2012 年 8 月.
- [85] 石川 和哉, "Vectorlike-matter-assisted GMSB Model with LHC SUSY searches,"物理学会第68 回年次大会,広島大学,2013年3月.
- [86] 北原鉄平, "Vacuum Stability Constraints on the Enhancement of the Higgs to Diphoton Rate in the MSSM," 日本物理学会 2013 年年次大会, 広島大 学, 2013 年 3 月 27 日.
- [87] 北原鉄平, "超対称性理論におけるヒッグス粒子の崩壊 に課せられる真空準安定性からの制限,"GCOE「未 来を拓く物理科学結集教育拠点」第9回 RA キャン プ, 熱海, 2013 年2月21日.
- [88] 三嶋剛, "水素原子分光を用いた軽い新粒子への制限," 日本物理学会,広島大学,2013年3月.
- [89] 向田享平, "Dynamics of Scalar Condensation in the Early Universe," 日本物理学会 2012 年年次大会, 京 都産業大学, 2012 年 9 月 14 日.
- [90] 中山和則, "Adiabatic solution to the Polonyi problem and its implications," 日本物理学会 2012 年秋 季大会, 京都産業大学, 2012 年 9 月 14 日.
- [91] 西尾 亮一, "Generalized parton distribution with nonzero skewedness in holographic QCD," 基研研 究会「場の理論と弦理論」, 基礎物理学研究所 2012 年7月.
- [92] 西尾 亮一, "Nave dimensional analysis in holography,"素粒子物理学の進展 2012 基礎物理学研究所 2012 年 7 月.
- [93] 西尾 亮一, "Nave dimensional analysis in holography" 日本物理学会 2012 年秋期大会, 京都産業大学 2012 年 9 月.
- [94] 佐藤亮介,"荷電ウィーノと中性ウィーノの質量差の 精密計算,"日本物理学会,広島大学,2013年3月.
- [95] 瀧本 真裕, "Sommerfeld 効果を考慮した wino 暗黒 物質の比熱的生成量の見積もり"日本物理学会秋期大 会,広島.
- [96] 寺田隆広, 日本物理学会秋季大会.
- [97] T. Yamada, "SUSY Extended Higgs Sectors and Strong Dynamics"、HPNP 2013、富山大学、2月 15日.
- [98] 山田敏史, "A light Higgs scenario based on the TeVscale supersymmetric strong dynamics," 基研研究 会 素粒子物理学の進展 2012, 京都大学 基礎物理 学研究所, 7 月 21 日.
- [99] 山田敏史, "LHCを用いた、アイソスピンを破るダー クマターの検証,"物理学会 2012 年秋季大会, 京都産 業大学, 9月13日.
- [100] 山田敏史, "TeV 領域の超対称強結合ダイナミクスに よる軽いヒッグスボゾンのシナリオ,"物理学会 2012 年秋季大会, 京都産業大学, 9 月 13 日.

- [101] 山田敏史, "126GeV ヒッグスボゾンを出す超対称強 結合ヒッグス模型の UV 理論,"物理学会 2012 年年 次大会, 広島大学, 3月 27 日.
- [102] 山本康裕, "微分相互作用を用いた複合 Higgs 模型の 判別可能性,"日本物理学会, 京都産業大学, 2012 年 9 月.
- [103] 山本康裕, "Higgs の微分相互作用に対する unitarity からの制限," 日本物理学会,広島大学,2013 年 3 月.
- [104] 吉永 尊洸, "Muon g-2 and LHC signatures in SUSY models," 基研研究会「素粒子物理学の最先 端」 京都大学基礎物理学研究所 2013 年 3 月 23 日.
- [105] 吉永 尊洸, "Muon g-2 and LHC signatures in SUSY models," 日本物理学会 2013 年年次大会 広島 大学 2012 年 3 月 28 日.

招待講演

- [106] K. Hamaguchi, "Leptogenesis," Fundamental Physics Using Atoms 2012, Tohoku University, September 2013.
- [107] 長井稔, "超対称性素粒子模型における電気双極子能 率について,"日本物理学会,広島大学,2013年3月.
- [108] 中山和則, "130GeV gamma-ray line and dark matter," 高エネルギーガンマ線でみる極限宇宙 2012, 東 京大学宇宙線研究所, 2012 年 09 月 26 日.
- [109] 遠藤基, "Higgs Mass and Muon g-2 in SUSY Models," 基研研究会「素粒子物理学の進展」, 京都大学 基礎物理学研究所, 7月 20日.

(セミナー)

[110] 松尾泰, "Higher nonabelian gauge symmetry and its application to M5 brane," 第5回静岡素粒子集 中セミナー 2013 年3月1日~2日.

2 原子核·素粒子実験

2.1 原子核実験グループ 【早野・櫻井】

原子核実験グループは、早野研、櫻井研の二つの 研究室で構成され、国内外の加速器を利用して原子 核物理の実験的研究を行っている。両研究室が取り 組んでいる研究テーマは各々異なるが、大学院生の 居室や実験室は共通とし、セミナーなども共催して いる。

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、特別推進研究「エキゾチック 原子の分光による基礎物理量の精密測定 (2008 年度 ~2012 年度)」によって進めている。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、 J-PARC 及びイタリアの DA ϕ NE 加速器にて K 中 間子原子・原子核を、ドイツの GSI においては η' 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。

櫻井研究室では、天然に存在する安定核よりも中 性子数や陽子数が極端に多い不安定核を生成し、そ の高アイソスピンに由来するエキゾチックな性質を 探る実験研究を行っている。特に中性子過剰核に現 れる特異な現象に着目し、中性子過剰核のハロー構 造や殻構造の変化(魔法数の喪失など)、核反応を 用いた動的性質の研究を進めている。また、元素合 成過程で重要な役割を果たす不安定核の研究にも取 り組んでいる。実験は、主に理化学研究所の重イオ ン加速器研究施設「RIビームファクトリー(RIBF)」 で得られる不安定核ビームを利用している。

2.1.1反物質の研究(早野研究室)

早野研究室は、世界唯一の超低速反陽子源である CERN研究所の反陽子減速器施設においてASACUSA (Atomic Spectroscopy and Collisions Using Slow Antiprotons)という研究グループを率い、反物質研 究を行っている。その主要な目的は、反陽子へリウ ム原子や反水素原子の分光により、物質と反物質の CPT 対称性を高精度で検証することである。

反陽子ヘリウム原子のレーザー分光

準安定反陽子ヘリウム(化学記号 pHe⁺)は、ヘリ ウム原子核のまわりを基底状態の電子と、高い主量子 数 $n \sim 38$ と軌道角運動量量子数 $\ell \sim n+1 \sim 38$ を持つ反陽子がまわる三体系のリドベルグ原子であ る。この原子の遷移エネルギーをレーザー分光で精密 に測ることによって、反陽子と電子の質量比 $M_{\overline{p}}/m_e$ を求めて、陽子のものと等価か検証する事ができる [58]。精密分光にあたり実験データの分解能と精度 を制限するものは、原子の熱運動によって引き起こ されるスペクトル線のドップラー幅である。2012年 度、早野研究室とマックスプランク量子光学研究所 らの実験グループは、温度が T=1.5 K 程度の極低 温状態の反陽子ヘリウム原子の合成を試みた。そし て、低温の pHe⁺ に対向する二本のレーザー光線を 照射して、深紫外の遷移波長 197.0 nm をもつ反陽 子の二光子遷移を励起する実験を行った。これによ り、ドップラー幅を従来に比べて大幅に減少させて、 鋭い分光スペクトルを測定して、原子の遷移周波数 を 1×10⁻⁹ 程度の実験精度で求める事が期待され ている。この結果を JINR の Korobov らによる三体 量子電磁学 (QED) 計算と比較することで、 $M_{\overline{n}}/m_e$ の値を世界最高精度で求める予定である。最終的に は、反陽子と電子の質量比を、陽子と電子の質量比 より高い精度で決定できるはずである。

また、反陽子へリウム原子を超流動へリウム中で 生成して、レーザー分光を試みた。フェルミ縮退し た媒質中で、反陽子へリウムがどのように振る舞う のかが解明される事が期待される。比較のため、高 圧ガス中で生成された反陽子へリウム原子について も、同様の測定を行った。

また、遷移波長が1154 nm であるような、従来に 比べて高い励起状態の反陽子へリウム原子の共鳴線 を探索した。エギゾチック原子の生成過程について、 詳細な知見が得られることが期待される。現在、こ れらの実験についてデータ解析を行っており、2013 年度中に成果報告する予定である。

これらの実験を実現するために、国際実験グルー プは新型の半導体励起型固体レーザーや、長パルス 型色素レーザーの開発を行った。また、波長が1154 nm であるような大強度の赤外光を生成するために、 水素分子を用いた誘導ラマン散乱による赤外線レー ザーを導入した。また、超流動ヘリウム標的や高圧 ヘリウムガス標的、静電四重極レンズの開発なども 行った(早野・小林・山田)。

超低速反陽子の原子核吸収断面積測定

反陽子は原子核に強く吸収され、高エネルギーでは その吸収断面積は原子核の幾何学的な面積で決まり、 標的原子核の質量数の2/3乗に比例 ($\sigma_{ann} \propto A^{2/3}$)す ることが知られている。反陽子のドブロイ波長が原子 核のサイズを超えるような超低エネルギー ($E_{\bar{p}} \sim 100$ keV) では、 $A^{2/3}$ からのズレが見えることが予想さ れるが、これまでこのような超低エネルギー反陽子 ビームが存在しなかったため、実験的な検証はなさ れていない。我々は、反陽子ヘリウム原子分光など のために開発した反陽子線形減速器を利用して、130 keVでの反陽子一原子核吸収断面積測定に着手した。 反陽子を厚さ100 nm の金属膜に当て、標的中で反 陽子が消滅した時に出すパイ中間子を検出し、その 数を数えることによって消滅反陽子数、そして断面 積を求める。2012 年度に CERN の反陽子減速器で 炭素、パラジウム、白金標的を用いて測定実験を実 行し、反陽子の原子核中での消滅反応を観測するこ とに成功した。反陽子の運動エネルギーが 600 keV 以下の領域では世界初であり、この結果を論文にま とめ発表した [34]。現在、断面積を求めるために解 析を進めている (早野・轟・小林・村上)。

2.1.2 不安定フランシウム同位体のレーザー 分光 (早野研究室)

レーザー分光で、不安定原子核の基底状態の特性 を調べる研究を行う。レーザー分光では原子の遷移 周波数を高い精度で測定できる。ここでは、原子核の 影響による原子の遷移周波数の微小なシフト(10⁻⁶ 程度)を測定する。このシフトはいくつかの要因で生 じ、同位体シフト、超微細構造と呼ばれている。同 位体シフトから、同位体間の平均2乗荷電半径の差 が、超微細構造から、核のスピン、パリティー、磁気 双極子モーメント、電気四重極モーメントが求まる。

CERNのISOLDEで、Manchester, Leuven, Birmingham, Orsay, マックスプランク量子光学研究所, 東京大学 (早野研究室)のグループで構成されている CRIS コラボレーションが、不安定フランシウム同位 体を測定するために、Collinear Resonant Ionization Spectroscopy (CRIS)実験を提案した。ISOLDEで 得られる不安定原子核のイオンビームにパルスレー ザーを照射し、遷移周波数を測定する。特に、中性 子数が極端に少ない不安定フランシウム同位体では、 基底状態のスピン、パリティーや原子核の形状がよ く分かっていない。過去の α 崩壊実験で、安定核と 比べて、基底状態と励起状態が逆転し、大きく変形し ている兆候が見つかっており、この実験で検証する。

2012年度は、²⁰⁷Frと²¹¹Frの測定に成功した。早 野研究室とマックスプランク量子光学研究所では、独 自開発したナノ秒チタンサファイヤレーザーを提供 した。2011年度には、市販のポンプレーザーを用い たが、2012年度は本研究のために自作し、パワーが 10倍増加した。しかし、検出効率が予想より低く、 ビームライン装置の改善等の新たな課題が浮き彫り になった。生成量の少ない(1秒あたり数個程度)同 位体の測定は、今後行う予定である(早野・小林)。

2.1.3 K 中間子原子の精密分光 (早野研究 室)

早野研究室では水素や重水素、ヘリウム等の軽い 原子核における K 中間子原子の精密分光実験をイタ リアの DAΦNE 及び J-PARC 加速器にて精力的に進 行中である。K 中間子原子の研究において我々は直接の測定が困難である0エネルギーでのK 中間子-核子あるいは原子核の間に働く強い相互作用についての知見を得る事が出来る。これらの研究は後述する反K 中間子原子核の問題とも密接な関連を持っている。

$DA\Phi NE$ における K 中間子原子 X 線の精密測定

イタリアの DA Φ NE 電子陽電子衝突型加速器で行われた SIDDHARTA 実験では、電子・陽電子正面 衝突で大量に生成した ϕ 中間子の $\phi \rightarrow K^+K^-$ 崩 壊で生じる低エネルギー K^- 中間子を気体標的に静 止させることで K 中間子原子を生成し、その遷移 X 線を有効面積 1 cm² のシリコンドリフト検出器 (SDD) 144 個を使って検出した。2012 年度において は、2009 年度のビームタイムで行われた各標的測定 の解析を完了し、その成果は主に以下の二点にまと められる。

一つは、K中間子水素 X 線の絶対収量と K中間 子重水素 X 線絶対収量の上限値の定量評価である。 絶対収量とは、標的に止まる K中間子ごとに発生し た K中間子原子 X 線の数と定義されている。その 定量評価は、モンテカルロシミュレーションで見積 もった X 線の検出効率を実験値に比較することよっ て行われる。系統誤差を正確に評価するために、シ ミュレーションで見積もられた検出効率の再現性の 良い水素標的のデータを入念に選んで、改めて重水 素標的データと同時解析を行った。結果として、標 的密度が標準状態における気体水素密度の 15 倍の とき、K中間子水素の 2p - 1s 遷移 X 線 K_{α} 及び全 部の p軌道状態から 1s 状態への全遷移 X 線 K_{tot} の絶対収量はそれぞれ:

$$Y_{K_{\alpha}} = 0.012^{+0.003}_{-0.004},$$

$$Y_{K_{tot}} = 0.045^{+0.009}_{-0.012}$$

と求められた。一方で、K 中間子水素原子が脱励起 するプロセスを記述するカスケードモデルにおいて、 K 中間子水素原子 2p 状態の核子吸収幅は、入力パ ラメータの中で唯一値が定まらないものである。図 2.1.1 のように、本研究と 1997 年に KEK-PS で行 われた E228 実験の結果に現れている K 中間子水素 X 線収量の標的密度依存性は、Jensen ら (2003) の カスケードモデル計算によって再現されている。ま た、実験値を異なる 2p 幅のもとで計算された理論 値との比較より、K 中間子水素 2p 状態の核子吸収 幅が 0.2~0.6 meV であると見積もられ、これは現 時点で尤も信頼できる定量評価となっている。 最後 に、同時解析の結果より K 中間子重水素 2p-1s 遷移 X線絶対収量はバックグラウンドレベルであること が確認されて、絶対収量の上限値が90%の信頼度 で 0.011 と評価された [60]。 この上限値は、本研究 における重水素測定のために行われたもう一つの解 析結果[37]と一致して、今後計画される重水素測定 における 2p-1s 遷移 X 線の観測を成功させるための 重要な情報を与える。



図 2.1.1: *K* 中間子水素 X 線絶対収量測定の結果 [60] : 横軸と縦軸はそれぞれ標的の比密度及び絶対収量。 塗りつぶされたデータ点は本研究の結果で、中空の 点は 1997 年の KEK-PS E228 実験の結果である。曲 線は Jensen ら (2003) によるカスケードモデルの計 算値で、異なる幾つかの 2p 幅に対して計算された。

二つ目の成果として、ヘリウム3とヘリウム4標 的の測定結果から、*K*中間子ヘリウム原子2*p*状態 の強い相互作用による幅をそれぞれ

$$\Gamma_{2p}({}^{3}\mathrm{H}e) = 6 \pm 6(\mathrm{stat.}) \pm 7(\mathrm{sys.})\mathrm{eV},$$

$$\Gamma_{2p}({}^{4}\mathrm{H}e) = 14 \pm 8(\mathrm{stat.}) \pm 5(\mathrm{sys.})\mathrm{eV}$$

と求めた [10]。これらの結果は理論で予想された 1~2 eV の幅を再現している。図 2.1.2 に示されるように、 70~80 年代のヘリウム 4 標的実験で得られた、理論 的には説明困難な数+ eV もの 2p 状態幅の問題も過 去の実験結果の誤りとして解決された。また、シフ トと幅に関しては、³He と ⁴He によるアイソトープ 依存性の可能性が示唆されている (次節参照) が、本 研究の精度では検知されていない (早野・施)。

J-PARC における *K* 中間子ヘリウム原子 X 線の精 密測定 (E17)

早野研究室では 2005 年度に K 中間子ヘリウム 4 の精密分光実験 KEK-PS E570 を行い「K 中間子ヘ リウムパズル」として長年問題になっていた理論と 実験の不一致 (前節参照)を解決した。そして K 中間 子と原子核間のポテンシャルに関する知見をより完 全なものにするため、J-PARC E17 実験では K 中間 子ヘリウム 3 及び K 中間子ヘリウム 4 の強い相互作 用による 2p 軌道シフトの差 (同位体シフト)を X 線 分光によって決定することを目指している。この実 験は J-PARC K1.8BR ビームラインで行なわれる。

2012 年度は、後述する E15 実験として、K 中間 子ビームや共通の検出器群の調整を進めた。またシ リコンドリフトX線検出器の基礎研究やK 中間子 ビームを標的中に止めるシミュレーションも進めた (早野・鈴木・佐藤・橋本)。



図 2.1.2: ヘリウム標的測定から得られた *K* 中間子 ヘリウム原子 2*p* 状態のシフトと幅 [10]。ヘリウム 3 標的の測定は本実験が世界初のものである。

2.1.4 反 K 中間子原子核の研究 (早野研究 室)

反 K 中間子が原子核に強い相互作用で束縛された、準安定かつ高密度な「反 K 中間子原子核」が存在するのではないかという議論が近年活発に成されている。もしもそのような状態が実在するならば、全く新しい形態のハドロン系としてその存在自体が興味深い上に、超高密度核物質の実験的研究への道を 拓く事が期待される。

J-PARC における *K*⁻*pp*/*K*⁻*pn* 状態の探索 (E15)

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^- pp 状態の同定を目指し、J-PARC K1.8BR ビームラインにおいて E15 実験を行う。実験では先述 の E17 と同一の液体ヘリウム 3 標的を使用し、入射運 動量 1.0 GeV/cの (K^- ,N)反応によって K^- pp/ K^- pn を生成し、生成時に前方に投射される核子と同時に 状態の崩壊で生じる Λ を CDS(Cylindrical Detector System)を用いて再構成する。

2012年度においては、前方の中性子検出器、陽子 検出器を建設した。そして2度のエンジニアリング ランを行いシステム全体の健全性を確認し、2013年 3月に物理データの取得を開始した。加速器の故障 ですぐにデータ取得は中断されてしまったが、2013 年夏のシャットダウンまでに初期フェイズとして10 kW×3 週程度のデータ取得を完了する予定である。 図 2.1.3にエンジニアリングランで得られた前方中性 子の1/βスペクトルを示した。初期フェイズではこ の50倍程度の統計を蓄積できる予定である(早野・ 鈴木・佐藤・施・橋本)。



図 2.1.3: 2012 年 6 月に行われた E15 コミッショニ ングランによって得られた前方散乱中性子の 1/β ス ペクトル。中性子とガンマ線がはっきりと分離され、 バックグラウンドが非常に少ないことがわかる。

2.1.5 深く束縛された π 中間子原子の精密 分光 (早野研究室)

今日のハドロン物理学における最重要課題の-として、ハドロン質量の核物質中での変化の問題を 挙げることが出来る。ハドロン質量はカイラル対称性 の自発的な破れのパラメータであるクォーク反クォー ク対 $(\bar{q}q)$ の真空期待値と密接に関連していることが 広く知られている。カイラル動力学の観点からは軽 い擬スカラー中間子、即ち π , K は対称性の自発的 破れに付随する南部-Goldstone ボゾンとして解釈さ れ、それらの質量は核密度と共に変化すると考えら れる āg 真空期待値に直接に関係付けられる。必然と して高密度の核媒質中では中間子質量の変化が期待 されるため、核媒質中での中間子質量、言い換えれば 中間子-原子核間の強い相互作用、に関する実験的な 情報を得る事でこの問題の最終的な解決に到達する ことが出来ると考えられる。"深い束縛状態"におい ては中間子は原子核のごく近傍に位置するかあるい は完全に内部に埋め込まれ、相互作用は短距離で高 密度に於いて働くため、それらがもしも観測されれ ば我々が興味を持っているレンジに於ける相互作用 に関する決定的な情報を得ることが出来る。このよ うな状態としては中間子原子及び原子核状態が挙げ られるが、現在に至る迄中間子原子核状態が疑問の 余地無く明確に同定された例は存在しないため、深 く束縛された π 中間子原子は精密分光が実施可能で あるという点に於いて極めて重要なプローブである。

$(d, {}^{3}\text{He})$ 反応を用いた π 中間子原子の精密分光

我々は現在理化学研究所の RIBF において、250 MeV/uの重陽子ビームによる $^{122}Sn(d,^{3}He)$ 反応を用いた π 中間子の 1s 軌道のエネルギー及びその幅

の高精度分光実験を計画している。2012年度は(i) 加速器を使った光学系の研究の為のマシンスタディ (ii)2010 年度に行われたパイロット実験の解析 (iii) 本実験で用いる検出器の作成 を行った。(i) につい ては、2012 年 4 月にパイロット実験で用いたイオン 輸送系を再現し、輸送系のアクセプタンス及びディ スパージョンの測定を行った。(ii) については、2011 年度までの解析によりこのパイロット実験において ¹²¹Sn 中に束縛された π⁻ の測定に成功していたこと が分かっていた。2012年度はさらにマシンスタディ の結果などを踏まえ 2011 年に得られた運動量スペ クトルの精緻な較正を行った。また、エネルギー較 正用のピークに補正を加えるためにコンピュータシ ミュレーションを行い、比較をすることで較正の精 度を向上させた。現在は最終的な運動量スペクトル を作成すると共に、理論的に計算されたスペクトル との比較を行なっている。 (iii) については、前回実 験で用いたプラスチックシンチレータを改良したも のを新たに作成した。さらに前回の実験では標的上 での焦点の調整が非常に難しかったため、調整手順 を新たに考案し、その実現可能性を見積もった。現 在は25年度末に実験を行うことを目標とし、その為 の準備を進めている(早野・西・大河内・田中)。

逆運動学を用いた π 中間子原子の分光の実現可能性 の検討

既に述べたように、原子核中の π 中間子は、有限 密度中での強い相互作用の研究という点で重要な意 味を持つ。我々は不安定核に束縛された π 中間子を 調べることにより、より広範囲での強い相互作用の 研究の密度依存性を調べることを計画している。不 安定核を標的に用いることは不可能なため、(d, ³He) の逆運動学、すなわち不安定核をビームとして用い、 重陽子を標的とした実験の実現可能性について研究 を行った。

本研究では特に重イオン (HI) ビームと重陽子ガス を用いたアクティブ標的 TPC を用いる手法を考え、 シミュレーションによって収量及び分解能の評価を行 った。このセットアップではガス標的中で d(HI,³He) 反応によって生成された³He を磁場によって取り出 し、TPC による軌跡の測定及び Full Energy 検出器 によるエネルギーの測定により反応の Q 値を求める (図 2.1.4)。このセットアップのもとシミュレーション を行った結果、分解能はおよそ 500 keV (FWHM)、 収量が1×10³ event / 日と見積もらた。これらの結 果はこのセットアップで実験が十分可能なことを示 唆している。今後は実際にシリコン検出器のエネル ギー分解能の評価を行うと共に、このセットアップ をより最適化していく予定である(早野・大河内・ 西・田中)。

2.1.6 η' 中間子原子核の研究 (早野研究室)

 η' 中間子は、958 MeV/ c^2 という特異に大きな質量を持つ。これは、 $U_A(1)$ 量子異常の効果で η' 中間



図 2.1.4: 本研究で考案された、逆運動学を用いた π 中間子原子の分光実験のセットアップ。重イオンビーム(シミュレーションでは¹²²Sn)及び重陽子 (D₂) のアクティブ TPC を用いる。生成された ³He は磁 場によって曲げられ、TPC 及び Full Energy 検出器 によって測定される。

子が真空中のクォーク・反クオーク凝縮(カイラル凝縮)と相互作用する結果と考えられている。原子核中では、カイラル凝縮の大きさが減少するため、この η' 中間子の質量が減少すると予想され、原子核に η' 中間子が束縛される状態(η' 中間子原子核)の存在が予言されている。

我々は、この η' 中間子原子核を探索する実験を、 ドイツのGSI研究所において計画している。2.5 GeV の陽子ビームを炭素標的に打ち込み、 $^{12}C(p,d)$ 反応 により η' 中間子を炭素原子核中に生成し、出てくる 重陽子の運動量をスペクトロメーターで測定するこ とで、 η' 中間子原子核のエネルギー準位を調べる。

2012 年度には、バックグラウンドになると予想 されている陽子を識別して除去するために、エアロ ジェルチェレンコフ検出器を開発し、性能評価実験 を行った。その結果、バックグラウンドの速度に対 しては図2.1.5の実線、シグナルの重陽子の速度に対 しては破線の出力(光電子数)のヒストグラムが得 られ、本実験に必要とされるバックグラウンド除去 効率(>99.5%)が十分達成できることを確認した。

今後は本実験の実施に向けて、他の検出器 (MWDC 検出器、シンチレーションカウンター) やスペクトロ メーター光学系の準備を行う予定である(早野・田 中・西)。

2.1.7 ミュオニウム生成標的の研究 (早野 研究室)

ミュオニウムとは、正の電荷を持つミュオン (μ^+) 一つと電子一つが束縛された原子様状態で、 μ^+ を物 質中に静止させることで生成される。電子と正ミュ



図 2.1.5: エアロジェル・チェレンコフ検出器のテス ト結果(実線がバックグラウンドの速度,破線がシ グナルの速度に対する光電子数ヒストグラム)。

オンという二つの異なるレプトンから構成されてい る単純な系であるため、これまでミュオンの異常磁 気能率や電子ミュオン間超微細相互作用の測定がミュ オニウムのエネルギー準位の精密分光を通して行わ れてきた。近年では、物質内部の磁性を測定する手 法である µSR 法において、特に深さ方向の分解能を 要求される場合に活躍する超低速偏極ミュオンビー ムの生成においてもミュオニウム生成は欠かせない プロセスとなっている。このような状況の中で、ミュ オニウムの生成並びにその真空への放出効率を改善 することが求められている。この問題を、我々はシ リカエアロジェルをミュオニウム生成標的として用 いることで解決しようと試みた。

μSR 法を用いた測定によって、まず我々はシリカ エアロジェルは入射ミュオンをミュオニウムへ 60 % 程度の効率で転換することを明らかにした。この結 果を受けて我々はミュオニウム生成後の過程、即ち シリカエアロジェル標的内部でのミュオニウムの拡 散と、標的外部へ放出されるミュオニウムの時間発 展を昨年度カナダの TRIUMF 研究所に於いて測定 した。

本年度は得られたデータの解析を行った。真空中 へ放出されたミュオニウムの収量、及びミュオニウ ムの空間分布の時間発展を明らかにするために、ガ ラス標的を用いたデータから構成したバックグラウ ンドを実験データから差し引くことを行った。 で、ガラス板を生成標的として用いた場合、その内 部に於いてミュオニウムは生成される一方で、標的 の外部、即ち真空中へミュオニウムが放出されない ことは 2010 年の μSR 測定で明らかにしている。さ らに、得られたシグナルとシミュレーションを比較 した。シミュレーションでは、シリカエアロジェルを 均一に分散するシリカ粒子と見立て、その間をミュ オニウムが散乱するというモデルを計算した。 のミュオニウムの持つ速度が従う分布は、標的の温 度、すなわち 293 K を平均値にもつマクスウェル分 布と比較してより高速であることが示唆された。ミュ オニウムがシリカエアロジェル中で散乱する際の平 均自由行程は、シリカエアロジェルの持つ密度、電 子顕微鏡で測定した粒径から幾何学的に計算される

平均自由行程に比べ小さくなることが示された。これらの実験結果を説明するため、現在モデルの見直 し及びシリカエアロジェルそのものの物性に関する より詳しい測定を行なっている (早野・藤原)。

2.1.8 崩壊分光法による不安定核構造研究 (櫻井研究室)

不安定核の基底状態もしくは核異性体 (アイソマー) からの β 崩壊および脱励起 γ 放出の測定による核分 光を進めている。

不安定核はその定義からいって、必ず β 崩壊によっ て安定核へと変化する。 β 崩壊はその機構がよく理 解されているため、崩壊の始状態・終状態の核構造 を知るための優れた手法である。そのため、 β 崩壊 を用いた核分光は、すべての不安定核研究に適応で きる汎用性をもち、かつ2次反応を用いた核分光法 に比べ、きわめて効率のよい実験手段である。安定 線から離れた陽子・中性子過剰核は β 崩壊のQ値が 一般に 10-20 MeV 程度と大きいため、 β 線と β 遅 発 γ 線の測定だけではなく、遅発陽子・中性子を同 時に測定する方法も有効である。我々は実験目的に 応じた測定方法の考案、必要な検出器の開発を行う ことで、不安定核の構造研究を推進している。

崩壊分光法による⁷⁸Ni 近傍の核構造研究

原子核を構成する陽子・中性子が閉殻となる魔法 数 28・50を持つ⁷⁸Niは、現在知られている最も中性 子過剰な二重魔法数核である。この非常に中性子過 剰な⁷⁸Niは生成確率が非常に小さく、これまでは核 分光による詳細な核構造研究は非常に困難であった。 我々は、この領域の新異性体、新半減期測定を目的と した β 崩壊核分光実験を、2012 年後期に EURICA 国際共同研究プロジェクトの一環として行った。

実験では、RIBF の超伝導リングサイクロトロン (SRC)で核子あたり 345 MeV まで加速した大強度 ²³⁸Uビームを⁹Be標的に照射し、飛行核分裂反応に よって不安定核を生成した。生成した様々な不安定 核から⁷⁸Ni近傍核を、超伝導 RI ビーム分離生成装 置「BigRIPS」で分離し、粒子ごとに粒子識別を行っ た(図 2.1.6)。およそ 7.5 日の実験で、これまで観測 されているおよそ 300 倍にあたる 4000 個の⁷⁸Ni を 同定することに成功した。

生成分離された不安定核は、電極分離型シリコン検 出器によるアクティブストッパー (WAS3ABi, Widerange Active Silicon Strip Stopper Array for β and Ion) に打ち込み停止させる。WAS3ABi は8枚の両電 極読み出しストリップシリコン検出器で構成され、目 的となる不安定核をすべて停止させるために十分な厚 さを持つ。停止した不安定核の崩壊 β 線をWAS4ABi によって、同時に放出される β 遅発 γ 線を大球形ゲ ルマニウム半導体検出器 (EUROBALL) によって同 時計測した。EUROBALL は、欧州ガンマ線検出器 委員会が管理する 7 個の高純度ゲルマニウム結晶か



図 2.1.6: 実験で得られた粒子識別図。横軸が質量電 荷比、縦軸が原子番号。赤い破線の右側が本実験で 初めて半減期が測定された原子核。

らなるクラスター検出器を球状装置に12台、合計84 結晶配置した、世界最高レベルのエネルギー分解能 と検出効率を併せ持つ検出器アレイである。

図 2.1.6 の赤い破線の右側にある原子核は、これ まで半減期が測定されておらず、本実験によって世 界で初めてその測定に成功した。これら新しく測定 した半減期の情報は様々な理論計算の検証を可能に し、非常に中性子過剰な原子核における核構造の新 しい知見を得ることが期待される。データは、現在 も解析が進行中である。[123]

中性子過剰核で18種の新核異性体を発見

不安定核の準安定な励起状態である核異性体は、 原子核の核構造を敏感に反映して出現するため、そ の性質や崩壊様式を調べることは核構造を解明する うえで非常に有効である。2008 年 11 月に我々は核 異性体の測定を行った。²³⁸Uビームの飛行核分裂反 応によって生成した核異性体を BigRIPS で分離・収 集し、アルミニウム中に打ち込んで停止させた。こ のとき放射される遅発ガンマ線の測定から、これま で発見されていない 18 種類を含む、全部で 54 種類 の核異性体の観測に成功した。さらに、γ線のエネ ルギースペクトルや崩壊様式、核異性体の半減期の 詳細な解析の結果、こうした準安定な核異性体がど のような核構造に起因して出現するのかという知見 を得ることができた。[30]

ベータ遅発中性子測定のための He-3 検出器開発

現在のウラン合成仮説では、超新星爆発によって 中性子過剰な原子核が瞬時に合成され (R 過程, rapid neutron-capture process)、それらがベータ崩壊して ウランまでの重元素ができたとされている。R 過程 がどのような経路を辿って反応が進むのかは、ベータ
崩壊の寿命と中性子捕獲反応断面積で決まるが、安定核から遠く離れた中性子過剰核で反応が進行するため、実験的なデータは限られている。特に、ベータ崩壊の際にある確率で中性子を放出する同位体が存在し、このベータ遅発中性子の放出確率によって R過程の経路は変化する。したがってR過程の経路を明らかにするためには、ベータ遅発中性子の放出確率(P_n)を実験的に決定する必要がある。

我々は、この Pn 測定のためにの He-3 中性子検 出器アレイを開発を行っている。He-3 中性子検出器 は、パラフィンなどを用いた減速材によってベータ 遅発中性子を熱中性子に変換し、He-3 ガスとの核反 応 $(^{3}\text{He} + n \rightarrow t + p)$ によって中性子の検出を行う。 中性子とHe-3の反応断面積は中性子のエネルギーが 低いほど指数関数的に増えるため、He-3を用いた中 性子検出器は高い検出効率をもつ。本年度は、2014 年度から予定されている本格データ収集に向けて、 最適な検出器と減速材の配置をシミュレーションに よって検証した。中性子ソース (Cf-252) を用いた中 性子測定を様々な検出器、減速材の配置のもとで行 い、測定結果を三次元連続エネルギーモンテカルロ コード (MCNP5) を用いたシミュレーションと比較 した。中性子測定効率はシミュレーションによって よく再現されることが確認され、今後の大型アレイ を設計するために必要なシミュレーションの有用性 を実証することが出来た。[122]

2.1.9 インビームγ線核分光法による不安 定核構造研究(櫻井研究室)

インビーム γ 線核分光は、不安定核の構造研究に おいて有力な実験手段の一つである。核分裂や核破 砕反応で生成した不安定核ビームをビームライン上 に配置した標的との核反応により励起し、脱励起す る際の γ 線のエネルギーと絶対強度を測定すること で、励起準位のエネルギー、スピン・パリティー、遷 移強度等の知見が得られる。特に、低励起状態には、 原子核の回転や振動運動に対応する 2^+ 、 4^+ 状態、殻 構造を特徴づける一粒子状態など、原子核の典型的 な励起様式が現れるため、核構造研究の重要な研究 対象である。

我々は、理化学研究所の RI ビームファクトリー で得られる高速不安定核ビームを利用して 2008 年 から実験を推進している。BigRIPS スペクトロメー ターで生成分離されたビームを二次標的に照射し、 標的周りに配置したガンマ線検出器で脱励起ガンマ 線を観測すると同時に反応生成物を ZeroDegree ス ペクトロメータで粒子識別し、反応チャンネルを実 験的に決定する。対象となる不安定核の種類や得ら れるビーム強度に応じて、様々な物理量を測定すべ く、様々な測定方法、励起方法を用いた研究を行っ ている。また、より広範囲の原子核を対象とし、多 様な物理量を測定すべく、新しい検出器と手法の開 発も行っている。

N = 20-28 の中性子過剰核

中性子過剰な $Z \sim 10$ の原子核は中性子数 N = 20の魔法数で大きく変形していることが知られている。 同時に N = 28 でも魔法数の喪失現象が議論されて おり、N = 20 から 28 に至る領域は、核内の有効核 力の変化や弱束縛性の効果などから核構造研究のパ イロット領域として注目されている領域である。本 年度は 2010 年末に取得したデータから ⁴²Si の第二 励起準位のエネルギーの決定を行い、第一励起準位 のエネルギー異常とともに集団性が大きく発達して いることを見出した。[28]

次世代 γ 線検出器 SHOGUN の開発

現在 RIBF におけるインビーム γ線核分光は NaI(Tl) シンチレーターを用いているが、エネルギー分解能が 7-8%程度と劣るため、研究対象が質量数の小さな核や 魔法数周辺の偶偶核など、励起準位密度の低い原子核 に限定されている。この現状を打破するため、我々は 次世代ガンマ線検出器アレイ SHOGUN (Scintillator based High-resOlution Gamma-ray spectrometer for Unstable Nuclei)の建設を計画している。SHOGUN は現行の NaI(Tl) に代わり LaBr₃(Ce) シンチレー タ結晶を用いた検出器アレイである。LaBr₃(Ce)は NaI(Tl)よりも高い検出効率を持つのみならず、従 来のNaI(Tl)結晶では実現できなかった高いエネル ギー分解能 (約3%@662 keV) と高い時間分解能 (約 100 ps) を持つ。また、この高分解能を最大限生か すため約 1000 個に細分化した LaBr₃(Ce) 結晶を図 2.1.7 のように配置することで、相対論的速度で運動 する原子核から放出される γ線のドップラー効果を 高精度で補正し、また高励起状態からカスケード崩 壊する複数のγ線の同時計測を可能にする。

本年度は、SHOGUN プロトタイプー号機となる直 方体形状 (17×40×80 mm³) を持つ LaBr₃(Ce) 結晶 の基本性能の評価測定、GEANT4 によるシミュレー ションプログラムの開発に着手した。これらの結果 を基に、現在最適な LaBr₃(Ce) 結晶の形状や、光読 み出しの光電子増倍管の比較検討を行っているほか、 SHOGUN 検出器による原子核の高励起状態の寿命の 直接測定のための新手法開発も行っている。[73, 124]

<受賞>

- 早野龍五:GENCO Membership Award, GSI, Feb. 7, 2013.
- [2] 村上洋平: Osamu Hashimoto Prize, SNP School 2013, Feb. 20, 2013.
- [3] 西隆博: RIKEN Research and Technology Incentive Award, RIKEN, March 14, 2013.
- [4] 新倉潤:日本物理学会第7回若手奨励賞,日本物理学会,2013年3月26日.
- [5] 田中良樹: HUA 修士論文賞, J-PARC ハドロンホー ルユーザー会 (HUA), 2013 年 3 月 26 日.

<報文>

(原著論文)



図 2.1.7: SHOGUN 検出器のデザインモデル。約 1000 個の LaBr₃(Ce) 結晶をビーム軸に対して同心 円状に配置する。

- [6] M. Bazzi *et al.*: "Kaonic hydrogen X-ray measurement in SIDDHARTA", Nucl. Phys. A 881, 88 (2012).
- [7] K. Tshoo *et al.* : "N = 16 Spherical Shell Closure in ²⁴O", Phys. Rev. Lett. **109**, 022501 (2012).
- [8] L. H. Lv *et al.*: "Knockout reaction induced by ⁶He at 82.3 MeV/u", J. Phys. G **39**, 065102 (2012).
- [9] T. Yamazaki, S. Hirenzaki, R.S. Hayano and H. Toki : "Deeply bound pionic states in heavy nuclei", Phys. Reports 514, 1 (2012).
- [10] M. Bazzi *et al.*: "Measurement of the strong- interaction width of the kaonic ³He and ⁴He 2p levels", Phys. Lett. B **714**, 40 (2012).
- [11] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : "Deviation from quark number scaling of the anisotropy parameter v_2 of pions, kaons, and protons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", Phys. Rev. C **85**, 064914 (2012).
- [12] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : "Ground and excited state charmonium production in p + pcollisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV", Phys. Rev. D 85, 092004 (2012).
- [13] G.B. Andresen *et al.* (ALPHA collaboration) : "Antihydrogen annihilation reconstruction with the ALPHA silicon detector", Nucl. Instr. Meth. A 684, 73 (2012).
- [14] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : "Nuclear-modification factor for open-heavy-flavor production at forward rapidity in Cu+Cu collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", Phys. Rev. C **86**, 024909 (2012).
- [15] K. Agari *et al.*: "Secondary charged beam lines at the J-PARC hadron experimental hall", Prog. Theor. Exp. Phys., 02B009 (2012).
- [16] K. Agari *et al.*: "The K1.8BR spectrometer system at J-PARC", Prog. Theor. Exp. Phys., 02B011 (2012).

- [17] T. Motobayashi and H. Sakurai : "Research with fast radioactive isotope beams at RIKEN", Prog. Theor. Exp. Phys., 03C001 (2012).
- [18] M. Iio *et al.*: "Development of liquid ³He target for experimental studies of antikaon-nucleon interaction at J-PARC", Nucl. Instr. Meth. A 687, 1 (2012).
- [19] J. Xiao *et al.*: "New Measurements for ⁸He Excited States", Chin. Phys. Lett. **29**, 082501 (2012).
- [20] K.-A. Li *et al.* : "Inelastic Scattering of ³²Mg at 190 MeV/Nucleon from a Thick Proton Target", Chin. Phys. Lett. **29**, 102301 (2012).
- [21] K. Itahashi *et al.* : "Feasibility Study of Observing η ' Mesic Nuclei with (p, d) Reaction", Prog. Theor. Phys. **128**, 601 (2012).
- [22] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : "Observation of Direct-Photon Collective Flow in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", Phys. Rev. Lett. **109**, 122302 (2012).
- [23] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : "Direct photon production in p + p collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV at midrapidity", Phys. Rev. D 86, 072008 (2012).
- [24] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : "Cross sections and double-helicity asymmetries of midrapidity inclusive charged hadrons in p + p collisions at $\sqrt{s} = 62.4$ GeV", Phys. Rev. D **86**, 092006 (2012).
- [25] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : "Measurement of transverse single-spin asymmetries for J/Ψ production in polarized p + p collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV", Phys. Rev. D **86**, 099904 (2012).
- [26] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : "Evolution of π^0 Suppression in Au + Au Collisions from $\sqrt{s_{NN}}$ =39 to 200 GeV", Phys. Rev. Lett. **109**, 152301 (2012).
- [27] A. Afanasiev *et al.* (PHENIX collboration) : "Measurement of Direct Photons in Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", Phys. Rev. Lett. **109**, 152302 (2012).
- [28] S. Takeuchi et al. : "Well Developed Deformation in $^{42}\mathrm{Si"},$ Phys. Rev. Lett. **109**, 182501 (2012).
- [29] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : "Coldnuclear-matter effects on heavy-quark production in *d*+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", Phys. Rev. Lett. **109**, 242301 (2012).
- [30] D. Kameda *et al.*: "Observation of new microsecond isomers among fission products from in-flight fission of 345 MeV/nucleon ²³⁸U", Phys. Rev. C 86, 054319 (2012).
- [31] N. Kobayashi *et al.*: "One- and two-neutron removal reactions from the most neutron-rich carbon isotopes", Phys. Rev. C 86, 054604 (2012).

- [32] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : "J/ Ψ suppression at forward rapidity in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 39$ and 62.4 GeV", Phys. Rev. C 86, 064901 (2012).
- [33] E.L. Rizzini *et al.* : "Further evidence for lowenergy protonium production in vacuum", Eur. Phys. Journ. Plus **127**, 124 (2012).
- [34] H. Aghai-Knozani *et al.*: "First experimental detection of antiproton in-flight annihilation on nuclei at 130 keV", Eur. Phys. Journ. Plus **127**, 125 (2012).
- [35] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : "Transverse-momentum dependence of the J/Ψ nuclear modification in d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", Phys. Rev. C **87**, 034904 (2013).
- [36] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : "Double-spin asymmetry of electrons from heavyflavor decays in p + p collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV", Phys. Rev. D **87**, 012011 (2013).
- [37] M. Bazzi *et al.* : "Preliminary study of kaonic deuterium X-rays by the SIDDHARTA experiment at DA Φ NE", Nucl. Phys. A **907**, 69 (2013).
- [38] M. Corradini *et al*: "Experimental apparatus for annihilation cross-section measurements of low energy antiprotons", Nucl. Instr. Meth. A **711**, 12 (2013).
- [39] K. Hadyńska-Klçk *et al.*: "Towards the Determination of Superdeformation in ⁴²Ca", Acta Phys. Pol. B 44, 617 (2013).

(会議抄録)

- [40] A. Rizzo et al. : "Kaonic atoms measurements at the DAΦNE accelerator : the SIDDHARTA experiment", J. Phys. Conf. Ser. 348, 012003 (2012).
- [41] R.S. Hayano : "20 years of antiprotonic helium", Hyperfine Interactions 209, 9 (2012).
- [42] K. Itahashi *et al.*: "Measurement of Pionic ¹²¹Sn atoms at the RI beam factory", Hyperfine Interactions **209**, 51 (2012).
- [43] M.D. Ashkezari *et al.* : "Progress towards microwave spectroscopy of trapped antihydrogen", Hyperfine Interactions **212**, 81 (2012).
- [44] R. Hydomako *et al.*: "Antihydrogen detection in ALPHA", Hyperfine Interactions **212**, 91 (2012).
- [45] R.S. Hayano : "Hadronic atoms", Hyperfine Interactions 212, 149 (2012).
- [46] K. Todoroki *et al.*: "Beam profile monitor for annihilation cross section measurements of antiprotons at 100 keV", Hyperfine Interactions **213**, 199 (2012).
- [47] T. J. Procter *et al.*: "Development of the CRIS (Collinear Resonant Ionisation Spectroscopy) beam line", J. Phys. Conf. Ser. **381**, 012070 (2012).

- [48] K. M. Lynch *et al.*: "Laser assisted decay spectroscopy at the CRIS beam line at ISOLDE", J. Phys. Conf. Ser. **381**, 012128 (2012).
- [49] V. Lapoux *et al.*: "Spectroscopy of the Unbound States of the Drip-Line Nucleus ²⁴O", Prog. Theor. Phys. Suppl. **196**, 111 (2012).
- [50] J. Marton *et al.*: "X-ray spectroscopy of light kaonic atoms - new results and perspectives", Nucl. Phys. B Proceedings Supplements 233, 173 (2012).
- [51] R.S. Hayano : "Weighing the antiproton", Hyperfine Interactions 215, 9 (2013).
- [52] Y. Satou *et al.*: "Invariant Mass Spectroscopy of ²³O via the (p,p') Reaction in Inverse Kinematics", Few-Body Systems **54**, 287 (2013).
- [53] K. Tshoo *et al.* : "The N = 16 Spherical Shell Closure in ²⁴O", Few-Body Systems **54**, 459 (2013).
- [54] C. Curceanu *et al.*: "Unlocking the secrets of the kaon-nucleon/nuclei interactions at low-energies: The SIDDHARTA(-2) and the AMADEUS experiment at the DAΦNE collider", Nucl. Phys. A, in press (2013).
- [55] T. Ishiwatari *et al.*: "Strong-interaction shifts and width of kaonic helium isotopes", Nucl. Phys. A, in press (2013).
- [56] K. Itahashi *et al.*: "First Precision Spectroscopy of Pionic Atoms at RI Beam Factory", Few Body Systems, published online, ISSN 0177-7963 (2013).
- [57] Y.K. Tanaka *et al.* : "Spectroscopy of η ' Mesic Nuclei with (p,d) Reaction", Few Body Systems, published online, ISSN 0177-7963 (2013).

(国内雑誌)

- [58] 堀正樹、早野龍五:日本物理学会誌 67,575 (2012).
- [59] Y.K. Tanaka *et al.* : "Development of an aerogel Cherenkov detector for spectroscopy of η ' mesic nuclei at GSI", RIKEN Accelerator Progress Report **45**, 172 (2012).

(学位論文)

- [60] H. Shi: "Precision spectroscopy of kaonic hydrogen atomic X-rays", 早野研博士論文, 2012.
- [61] 大河内公太: "Feasibility Study of Pionic Atom Spectroscopy in d(HI,³He) Reaction", 早野研修士 論文, 2012.
- [62] 田中良樹: "Development of a High Refractive Index Aerogel Cherenkov Counter for the Spectroscopy of η' Mesic Nuclei", 早野研修士論文, 2012.

<学術講演>

(国際会議)

- [63] K. Todoroki : "Beamline and Diagnostics for Antiproton Annihilation Cross-section Measurements at 130 keV", CIPANP 2012, St. Pertersburg (USA), June 1, 2012.
- [64] T. Hashimoto: "Precision Spectroscopy of Kaonic Helium X-rays at J-PARC", The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20), Fukuoka (Japan), Aug. 21, 2012.
- [65] H. Shi : "Yield of kaonic hydrogen X-rays in SIDDHARTA experiment", The 11th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2012), Barcelona (Spain), Oct. 2, 2012.
- [66] T. Hashimoto: "Precision Spectroscopy of Kaonic Helium X-rays at J-PARC", The 11th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2012), Barcelona (Spain), Oct. 2, 2012.
- [67] Y. Murakami : "The annihilation cross section of the antiproton", SNP School 2013, Sendai (Japan), Feb.16, 2013.

一般講演

- [68] Y.K. Tanaka : "Spectroscopy of η ' Mesic Nuclei with (p, d) Reaction", The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Fukuoka (Japan), Aug. 23, 2012.
- [69] M. Sato: "Precision spectroscopy of kaonic helium X-rays at J-PARC", New trends in the low-energy QCD in the strangeness sector: experimental and theoretical aspects, ECT*, Trento (Italy), Oct. 15, 2012.
- [70] T. Nishi : "BigRIPS as a high resolution spectrometer for pionic atoms", XVI-th International Conference on Electromagnetic Isotope Separator and Techniques Related to their Applications, Matsue (Japan), Dec. 5, 2012.
- [71] Y. Murakami : "Measurement of the antiprotonnucleus annihilation cross section", SNP School 2013, Sendai (Japan), Feb.16, 2013.
- [72] M. Niikura : "Study of shell evolution towards to ⁷⁸Ni by in-beam gamma-ray spectroscopy", Sunflower workshop, Saitama (Japan), Feb. 21, 2013.
- [73] M. Niikura : "Gamma-ray spectroscopy in the vicinity of ⁷⁸Ni", IFJ PAN, Poland - RIKEN JSPS, Japan Collaboration Meeting, Krakow (Poland), Mar. 21, 2013.
- [74] T. Nishi : "Precision measurement of pionic atom using 122 Sn $(d, ^{3}$ He) reaction", "Workshop on Elucidation of New Hadrons with a Variety of Flavors" -Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas, Tsukuba (Japan), Mar. 22, 2013.

招待講演

- [75] H. Sakurai : "Leapfrog in nuclear physics with RIBF", Korean Physics Society, Division of Nuclear Physics, Daejeon (Korea), April 26-27, 2012.
- [76] R.S. Hayano : "Meson-Nucleus bound states", Hadrons in the Nuclear Medium, ECT*, Trento (Italy), May 17, 2012.
- [77] R.S. Hayano : "Weighing the antiproton: precision laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms", 5th International Symposium on Symmetries in Subatomic Physics, Groningen (The Netherlands), June 21, 2012.
- [78] H. Sakurai : "Highlights and future plans at RIBF", The 2nd International Nuclear Physics Conference "Nuclear Structure and Dynamics", Opatija (Croatia), July 9-13, 2012.
- [79] H. Sakurai : "Highlights and future plans at RIBF", Nuclear Structure 2012, Argonne (USA), Aug. 13-17, 2012.
- [80] H. Sakurai : "Few-Body Programs at RIKEN RIBF Facility", 20th International Conference on Few-body Problems in Physics, Fukuoka (Japan), Aug. 20-25, 2012.
- [81] H. Sakurai : "Recent highlights and future plans at RIBF", APCTP Mini-Workshop on Nuclear Structure, Pohang (Korea), Sept. 21-22, 2012.
- [82] H. Sakurai : "Recent results at RIBF", XLI International Workshop on Gross Properties of Nuclei and Nuclear Excitations, Hirschegg (Austria), Jan. 26 - Feb. 1, 2013.

(国内会議)

一般講演

- [83] 早野龍五: "反物質の研究の実際とエネルギー源としての利用について", JAXA 筑波センター, 2012 年 4 月 12 日.
- [84] 早野龍五: "WBC と食品検査", コラッセふくしま (福島市), 2012 年 4 月 21 日.
- [85] 早野龍五: "福島で日常を暮すために", テレビユー福 島(福島市), 2012 年 5 月 2 日.
- [86] 早野龍五: "給食まるごと検査とホールボディーカ ウンター データから見えるもの", 南相馬市 南相馬 チャンネル, 2012 年 5 月 8 日.
- [87] 早野龍五: "3.11 以降の日本",日本政府ジュネーブ 代表部,2012年5月11日.
- [88] 早野龍五: "先生助けてください ホールボディーカ ウンターが変なんです",東京大学五月祭本部企画講 演,2012年5月20日.
- [89] 早野龍五:"東日本大震災と科学コミュニケーション の今後の課題",国際広報連絡会議リスクコミュニケー ションサブグループ (霞ヶ関),2012年5月22日.
- [90] 早野龍五: "心のゆとりにつながる食品検査",相馬サイエンスカフェ(相馬市),2012年5月26日.

- [91] 早野龍五: "WBC と食品検査 データから何が分 かるか", チェンバおおまち(福島市), 2012 年 5 月 27 日.
- [92] 早野龍五: "食品検査,WBC 検査,除染,…の便益分析 コメント",26 回リスク評価研究会(文京シビックセンター),2012 年 5 月 28 日.
- [93] 早野龍五: "CERN Physicist in Fukushima", World Meteorological Organization (WMO) Lunch time forum, 2012 年 6 月 15 日.
- [94] 早野龍五: "Internal contamination of Fukushima citizens",市民科学者国際会議(猪苗代),2012年6 月 24 日.
- [95] 早野龍五: "ホールボディカウンター検査 何のため にやるのか,何が分かるのか",いわき常磐病院(福 島),2012年6月29日.
- [96] 早野龍五: "七夕の日に宇宙を考える", 荒川区自然科 学フォーラム(東大理学部にて), 2012年7月7日.
- [97] 早野龍五: "ホールボディーカウンター〜調べてわかった被ばくの現状", ラジオ福島, 2012 年 7 月 14 日.
- [98] 早野龍五: "暮らしのための放射線防護", ガイガーカ ウンターミーティング福島, 2012 年 7 月 15 日.
- [99] 早野龍五: "福島の内部被ばくと外部被ばく― デー タを見て考えよう ―",ガイガーカウンターミーティ ング郡山, 2012 年7月 16 日.
- [100] 早野龍五: "測定を市民のために ~ 陰膳法から学ぶ ~",大地を守る会(千代田区立日比谷図書文化館・コ ンベンションホール),2012 年 7 月 21 日.
- [101] 早野龍五: "理学の本懐", 東京大学オープンキャン パス, 2012 年 8 月 7 日.
- [102] 藤原裕也: "シリカエアロジェル標的からのミュオ ニウム放出測定:解析および結果の理解",文部科学省 科学研究費補助金 新学術領域研究 "超低速ミュオ ン顕微鏡が拓く物質・生命・素粒子科学のフロンティ ア"第2回領域会議,北海道大学,2012年9月1日.
- [103] 橋本直: "J-PARC K1.8BR ビームラインスペクト ロメータの性能評価",日本物理学会 2012 年度秋季大 会,京都産業大学,2012 年 9 月 11 日.
- [104] 西隆博: "(d,³He) 反応を用いた π 中間子原子の精 密分光 (7)", 日本物理学会 2012 年度秋季大会, 京都 産業大学, 2012 年 9 月 12 日.
- [105] 渡辺珠以: "(d,³He) 反応を用いた π 中間子原子の精 密分光:Be(O18,O14) 反応を用いたマシンスタディ", 日本物理学会 2012 年度秋季大会, 京都産業大学, 2012 年9月12日.
- [106] 早野龍五: "福島のデータを見て考えよう",府省 庁有志による放射線講演会(南青山),2012年9月 18日.
- [107] 藤原裕也: "J-PARC ミュオン g-2/EDM 精密測定 の為のミューオン源開発 シリカエアロジェル標的 のミュオニウム生成効率と拡散のイメージング測定 3",日本物理学会 2012 年度秋季大会、横浜国立大学, 2012 年 9 月 20 日.
- [108] 早野龍五: "福島原発事故 情報発信とデータのアー カイブ", サイエンティフィック・システム研究会(神 戸), 2012 年 10 月 25 日.

- [109] 早野龍五: "Project HAYANO 最終報告", ビッグ データワークショップ(東京大学), 2012 年 10 月 28 日.
- [110] 早野龍五: "放射線測定から見えてきた 過去・現 在・未来 ~牛久市内部被ばく検査最終報告会",牛 久市, 2013 年 2 月 3 日.
- [111] 早野龍五: "福島と周辺県での内部被ばく検査の現 状",松戸市, 2013年2月6日.
- [112] 早野龍五: "データで見る東京電力福島第一原発事故の住民への影響",福島県議会議員研修会(福島市), 2013年2月13日.
- [113] 早野龍五: "2011 年 7~9 月の南相馬市立総合病院 における WBC 測定データを見直す", 第3回ホール ボディーカウンター学術会議(福島市), 2013 年 2 月 23 日.
- [114] 早野龍五: "内部被ばくと外部被ばく", 第5回福島 ダイアログセミナー(伊達市), 2013年3月2日.
- [115] 田中良樹: "Inclusive Measurement of η' Mesic Nuclei with (p,d) Reaction at GSI", 2012 年度「多 彩なフレーバーで探る新しいハドロン存在形態の包 括的研究」領域研究会, KEK, 2013 年 3 月 22 日.
- [116] 田中良樹: "η' 核分光実験のための高屈折率エアロ ジェルチェレンコフ検出器の性能評価",日本物理学 会第 68 回年次大会,広島大学,2012 年 3 月 26 日.
- [117] 轟孔一: "超低エネルギー反陽子の原子核吸収断面 積測定",日本物理学会第68回年次大会,広島大学, 2013年3月26日.
- [118] 小林拓実: "反陽子ヘリウム原子の赤外分光のため のレーザーの開発",日本物理学会第68回年次大会, 広島大学,2013年3月27日.
- [119] H. Shi,: "Yield of kaonic hydrogen X-rays in SID-DHARTA experiment", 日本物理学会第 68 回年次 大会, 広島大学, 2013 年 3 月 27 日.
- [120] 大河内公太: "d(HI, ³He) 反応を用いた π 中間子原 子分光の検討 2", 日本物理学会第 68 回年次大会, 広 島大学, 2013 年 3 月 27 日.
- [121] 西隆博: "(d, ³He) 反応を用いた π 中間子原子の精 密分光 (8)", 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大 学, 2013 年 3 月 27 日.
- [122] 松井圭司: "ベータ遅発中性子放出確率測定による 中性子過剰核研究のための He-3 中性子検出器開発に ついて",日本物理学会第68回年次大会,広島大学, 2013年3月27日.
- [123] 徐正宇: "Report on the recent EURICA campaign with ²³⁸U beam at RIBF, RIKEN", 日本物 理学会第68回年次大会, 広島大学, 2013年3月27日.
- [124] 谷内稜: "RIBF での次世代インビームガンマ線核 分光に向けた LaBr3(Ce) シンチレーターの性能測定 と検出器のデザインスタディ",日本物理学会第68回 年次大会,広島大学,2013年3月28日.
- [125] 山田裕之: "ELENA からの低エネルギー反陽子ビー ムの静電輸送ラインにおけるシミュレーション",日本物理学会第68回年次大会,広島大学,2013年3月 29日.

【早野・櫻井】

招待講演

- [126] 早野龍五: "内部被ばくの放射線計測学",日本物理 学会第68回年次大会,広島大学,2013年3月25日.
- [127] 新倉潤: "^{72,74}Zn 核第一 2⁺ 励起準位寿命の世界初 直接測定",日本物理学会第 68 回年次大会,広島大学, 2013 年 3 月 26 日.
- [128] 櫻井博儀: "非対称核物質 EOS への挑戦",日本物理 学会第 68 回年次大会,広島大学,2013 年 3 月 28 日.

(セミナー)

- [129] 早野龍五: "Exotic Atoms", 名古屋大学集中講義, 2012 年 6 月 26-28 日.
- [130] 早野龍五: "超低速反陽子を用いた基本対称性の検 証",名古屋大学 物理学教室 談話会,2012 年 6 月 27 日.
- [131] 早野龍五: "先生助けてください,ホールボディーカ ウンターが変なんです",名古屋大学講演会,2012年 6月28日.
- [132] 早野龍五: "Internal contamination of Fukushima citizens", テンプル大学日本校, 2012 年 7 月 3 日.
- [133] 早野龍五: "弦理論,ビッグバン,超新星.宇宙の 歴史から生命を考える",東京大学文学部 多分野交流 演習「生命をめぐる科学と倫理」,2012年7月5日.
- [134] 早野龍五: "E17 Status Report", J-PARC PAC, KEK, 2012 年 7 月 13 日.
- [135] 早野龍五: "Muonic Hydrogen Puzzle", 日本大学 理工学部, 2012 年 8 月 3 日.
- [136] R.S. Hayano : "Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant Accident", Juelich (Germany), Nov. 16, 2012.
- [137] R.S. Hayano : "What's the matter with antimatter ?", Juelich (Germany), Nov. 16, 2012.
- [138] 早野龍五: "福島原発事故:測り,知り,伝える",岐 阜大学フォーラム,2012年12月7日.
- [139] 早野龍五: "クライシスにおける研究者の情報発信", 北海道大学 CoSTEP, 2012 年 12 月 12 日.
- [140] 新倉潤: "Lifetime measurement of 2⁺ states in ^{72,74}Zn by recoil-distance Doppler-shift method", 筑波大学, 2012 年 12 月 14 日.
- [141] 早野龍五: "Progress of ASACUSA in 2012", CERN, 2013年1月15日.
- [142] H. Sakurai : "Emergence of Exotic Nuclei", GSI Kolloquium, Darmstadt (Germany), Feb. 5, 2013.

2.2 駒宮研究室

われわれは、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 おける粒子衝突型加速器(コライダー)実験がもっ とも有効な手段であることは実験的な事実として認 められている。

2012年7月に、世界最高エネルギーの陽子・陽子 相互衝突型加速器 LHC でヒッグス粒子が発見され た。これを「7月革命」と呼んでいる。ヒッグス粒 子は真空と同じ量子数を持つのでヒッグス場が真空 に凝縮し、素粒子はこれと相互作用する事で質量を 得る。発見されたヒッグス粒子の質量は125 GeV と 軽く、ヒッグス粒子が、恐らく複合粒子ではなく素 粒子である。しかし、その質量自身は量子補正で不 安定であり、これを安定化する何らかのメカニズム が必要であり、超対称性が有望である。ヒッグス粒 子は標準理論で予言された最後の未発見粒子であっ たが、それ以上に、この粒子の性質の詳細を研究す ることで標準理論を越える新たな方向を決定できる。 即ち、ヒッグス粒子は、標準理論を越えて見通す窓 である。7月革命はさらなる大革命の前哨戦に過ぎ ない。将来はLHCに続く電子・陽電子衝突のリニア コライダーILC(図 2.2.8)を建設し、精密実験によっ てヒッグス粒子の粒子の詳細を研究し物理の原理に 高めていくことになる。

ILC 関連の技術開発では、特に、衝突点でのナノス ケールのビームのサイズを測定する「新竹ビームサ イズモニター」の開発研究を行ない、KEK の ATF2 において実証実験を行なっている。さらに ILC での 実験の検討においては、ILC 実験で主要な電磁カロ リメータの開発研究を、2012 年秋から新たに研究室 に参加したイギリス人の研究者が中心となって本格 的に始めた。また、CERN の LHC における ATLAS 実験のデータ解析にはヒッグス粒子や超対称性の探 索に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、小規模実験や粒子検出器の開発研究を おこなっている。超冷中性子の地球の重力場中での 束縛量子状態の測定の測定においては、2012年には 大きなブレークスルーがあり、束縛量子状態の証拠 である超冷中性子の鉛直分布の凹凸が明確に観測で き、それらを量子力学で説明することができた。

2.2.1 電子・陽電子リニアコライダー ILC 計画

電子と陽電子($e^+ \& e^-$)は、素粒子とみなすこと ができるので、それらの衝突は素過程である。また、 $e^+ \& e^-$ は粒子と反粒子の関係にあるので、衝突に よって対消滅が起こり、その全ての衝突エネルギー は新たな粒子の生成に使われる。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



図 2.2.8: 陽電子・電子衝突のリニアコライダー、ILC

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+e-リニアコ ライダーを高エネルギー物理の次期基幹計画として 取り上げ、主加速器の技術開発と極細ビームを作り 衝突点で衝突させる技術の開発を進めてきた。7年 前から ICFA (International Committee for Future Accelerators) では、各国でバラバラに行なってきた 加速器開発を統合し、超電導主加速器を主体とした リニアコライダーを国際的に推進する体制を整えた。 2012年7月にはヒッグス粒子が発見され、ILCの初 期に行なう物理学が明確になり、12月には技術設計 書が完成しプロジェクトは国際的に大きく進展した。 2013 年からは ILC は新たな国際組織 LCC (Linear ColliderCollaboration) で運営される。LCC を監督 するするのが LCB(Linear Collider Board) であり、 駒宮はその議長を務める。2012年3月には我が国の 素粒子実験分野の「将来計画検討小委員会」が答申を 出し、ILCの早期建設を提唱し、10月には、高エネ ルギー物理学研究者会議(研究コミュニティー)は、 ILC を早期に我が国に建設して、ヒッグス粒子の詳 細研究から初めて徐々に加速器を足してゆき、エネ ルギーを段階的に増強して、トップクォーク、暗黒 物質を担う粒子、ヒッグス粒子の自己結合と順次研 究していくという段階的実施案についての合意の文 書を発表した。本研究室は、わが国に ILC を誘致す るべく、物理学教室の相原研究室、浅井研究室とも 連携し、全国の研究者と共に努力を重ねている。

ATF2 仮想衝突点ビームサイズモニター (新竹モニ ター)の開発研究

ATF2の仮想衝突点において縦方向に37nmに収束 した極小のビームを測定するビームサイズモニター として,新竹モニターと呼ばれるモニターを研究開発 している.

新竹モニターは、電子ビームに直交する平面上に レーザー干渉縞を作り、干渉縞プローブとしてビーム をスキャンすることでビームサイズを測定するビー ムサイズモニターである.干渉縞上で磁場強度の山の 位置に電子ビームがある時,モニター後方に置いたγ 線検出器で測定されるコンプトン信号量は多くなり, 谷の位置では少なくなる.ビーム位置に応じたコンプ トン信号量の変調から,ビームサイズを算出すること が可能である.このようなビームサイズ測定方式は新 竹積氏によって提唱され,FFTBプロジェクトでは波 長 1064nm のレーザーを用いてビームサイズ 65nm の測定に成功した.

ATF2で測定する上での改良点は、より小さい37nm のビームサイズを測定するために二倍高調波を使い 波長532nmのレーザーを生成する、ビームを固定し たままでのサイズ測定を可能にする光学遅延の導入、 水平方向のビームサイズ測定にも対応する様にレー ザーワイヤーとして使うことも可能にした点、シグ ナルに比較して高エネルギーのバックグラウンドに 対応するための多層構造のγ線検出器の導入などで ある.

新竹モニタはレーザー干渉を用いる革新的な手 法により、100 nm 以下の σ_y (電子ビームの仮想衝突 点における垂直方向ビームサイズ)を測れる唯一の 手段であり、ATF2の目標達成と、ILCの実現にとっ て不可欠である。精密測定した σ_u を加速器にフィー ドバックすることによりビームチューニングに常時 安定に貢献している。 2012 春までには約 150 nm の σ_yを安定に測定できた。2012 夏の間、光路アライ ンメントの精度向上を目指してレーザー光学系、及 び DAQ モニタ類が大幅に改良された。秋からの運 転再開以降、新竹モニタの安定性と性能の向上が明 確に確認された。12月中の連続稼働ではビームサ イズ収束や wakefield 効果などの study など、様々な 場面で活躍し続け、年末の最終週にこれまでに世界 で測られたほぼ最小の σ_y 70 nm を再現性を以って 連続測定できた。その後も様々なレーザー由来の系 統誤差要因の細かい分析が続けられてきた。 2013年春のビームタイム再開に伴い、更なる σ_uの収束と モニターの誤差要因の解明のための dedicated study が盛んに実施されている。長時間の間に $\sigma_y \sim 65$ nm を安定に測定でき、一番小さくて 55 nm[®]程度の測

定まで達成してある。これらはまだモニタ自身の系 統誤差が込みの結果であるので、残留の誤差は精密 に評価し、 σ_y の測定値を補正し「真」のビームサイ ズの導出を目指していく。

今後、新竹モニタと電子ビーム調整が期待性能を 満たせば、最終目標である $\sigma_y = 37 \text{ nm}$ の安定測定 は後一歩のところと思われる。

ILD カロリメーター

ILCでは、ヒッグス粒子やトップクォークの精密 測定、新物理の探索などが行われる。これらの実験 の多くは、複数のジェットを含むイベントの測定が鍵 となる。ILD検出器では、Particle Flow Algorithm (PFA)という解析手法を用い、50GeVのエネルギー を持ったジェットに対して3-4%程度の分解能となる ことを目標としている。これはZボゾンとWボゾ ンのクォークへの崩壊を十分に区別できる水準であ る。PFAでは、飛跡検出器からの情報を用いること で、荷電粒子の寄与を推定するなど、粒子の種類に 適した方法でエネルギーの測定を行う。これによっ て、高いエネルギー分解能が達成できる。この PFA が有効に働くためには、十分な細密度を有する電磁 カロリメーターを必要とする。また、シャワー半径 を小さくし電磁シャワーとハドロンシャワーを区別 しやすいようにタングステンの吸収体を使ったサン ドイッチカロリメーターにしている。検出器層には、 5mm 四方のピクセルに分けられたシリコン PIN ダ イオードを用いる案 (SiECAL)、格子状に並べられ た 5mm 幅のストリップシンチレーターと MPPCを 用いる案 (ScECAL)がある。前者は分解能が良い が製作コストが高く、後者は分解能が劣るがコスト は低く抑えることができる。この二つを組み合わせ たハイブリッドカロリメーターも検討されている。

シミュレーションを用いて、SiECALにおけるジ ェットエネルギー分解能の最適化を行った。一つ目は シリコン検出器の不感領域となるガードリングの厚 みの影響を調べたところ、0mmから 2mmではほぼ 線形に分解能が悪化することがわかった。二つ目は 信号のシリアライズのために ECAL の各層に入れる PCBの厚みの影響で、0.8mmから 2.0mmではとく に分解能の悪化はみられていない。三つ目はデッド ピクセルがある場合の影響で、ランダムに分布して いる場合については 15 %デッドピクセルになってい ても大きな分解能の変化はなく、それ以上では分解 能が悪化していく。

ハイブリッドカロリメーターのシミュレーション では、ストリップ状のシンチレーターでのエネルギー 損失を、上下の層のエネルギー損失の分布を元にし て 5mm 四方の仮想ピクセルにふりわける strip split algorithm (SSA)を使うことで、位置分解能を向上 させることができる。このような解析手法の最適化 を進めた。

PIN ダイオードの I-V、C-V 特性から基本特性の 評価をしている。また、中性子暴露による放射性耐 性試験を設計し、準備を進めている。

2.2.2 LHC 実験

CERN の誇る世界最大の陽子・陽子衝突加速器 LHC は、2012 年にヒッグス粒子を発見し、アップ グレードのための2年間の休止期間にはいった。軽 いヒッグス粒子に発見によって、超対称性が有利と なったが、まだその兆候は見えていない。今後に期 待したい。国際的な超大規模実験である ATLAS に、 十分に訓練を積んだ博士課程の大学院生を送り込み、 他国の研究者や学生と切磋琢磨させることで、真に 国際的実力を持った研究者を育てている。国際競争 は特に厳しいが、素粒子物理国際研究センターの有 能な研究者と協力して様々な成果を上げてきた。

ヒッグス粒子の発見

2012 年の運転で ATLAS 検出器は、衝突エネル ギー 8TeV の p-p 衝突データを、積算ルミノシティ



図 2.2.9: 測定されたヒッグス粒子の p0-value

21fb⁻¹ 記録した。2011、2012 年のデータと用いて、 ヒッグス粒子発見に対して最も感度の高い二光子に 崩壊するモードでの探索を行い、ヒッグス粒子を発 見した [1]。

図 2.2.9 は背景事象のみで測定結果を説明できる確 率 (p0-value) を、仮定するヒッグス粒子の質量でス キャンしたプロットである。発見された新粒子の質 量である 126 GeV 付近に、6σ という大きな excess が存在しており、ここから新粒子の存在が実証され た。なお図 2.2.9 は各崩壊モードでの解析結果を統合 したプロットである。発見後のさらなる解析の結果、 新粒子はスピンが0のスカラー粒子であることが実 証され、新粒子はヒッグス粒子であると結論付けら れた。結合定数や質量などの各性質測定も進めてお り、発見されたヒッグス粒子の性質は、現在標準理 論の予言と無矛盾である。

2.2.3 小規模実験

UCN 実験

低速な中性子は、長い波長を持つため、原子核ポ テンシャルを直接感じることは出来ず、平均化した 実効的なフェルミポテンシャルのみを感じることに なる。フェルミポテンシャルよりも小さい運動エネ ルギーを持つ中性子は、超冷中性子(UCN)と呼ば れ、あらゆる入射角に対して物質表面で全反射する 性質を持つ。

重力ポテンシャルと粒子を反射する床からなる系 にある粒子は、古典力学においてはバウンドを繰り 返すことになる。このポテンシャルをシュレディン ガー方程式に代入し、量子力学で扱うと、束縛状態 の波動関数は Airy 関数を用いて表すことが出来る。 存在確率分布は、周期が粒子質量の-1/3 乗に比例し た特徴的な濃淡を持つ。超冷中性子は、物質表面で 全反射し、電荷を持たず、寿命が長く、質量が小さ いため、この束縛状態の存在確率分布を測定するた めに非常に適している。

2002年、Nesvizhevskyらのグループによって、超 冷中性子の重力による束縛状態は、初めて観測され た。しかし、これまでの重力による束縛状態の存在 確率分布の測定は、現在の中性子検出器の分解能(数



図 2.2.10: 測定器システムの主要部分。

 μ m)によって制限されていた。 μ m オーダーの距離での重力相互作用には、実験的に検証する余地がある。また、到達距離が μ m の未知短距離力の存在も予言されており、加速器を用いた実験とは独立な、このようなユニークなシステムでの新物理探索は重要な意味を持っている。

これまでの位置分解能の制限を超えるため、ニッ ケル円筒面を凸面鏡のように用いて、超冷中性子の 分布を拡大して観測する検出器システムを開発した (図 2.2.10)。超冷中性子は、ガラス製中性子ガイドの 中を通り、床の上で重力による量子状態に遷移する。 主量子数の高い中性子は、100 µ m の高さにある粗 さを持つ天井で反射すると、鉛直方向に大きいエネ ルギーを得て、床と天井との衝突回数を増やし、取 り除かれる。ガイドを通ってきた超冷中性子は、ニッ ケル円筒面(拡大ロッド)で全反射し、高さ方向の分 布が25倍程度に拡大される。円柱面は、大阪大学超 精密科学研究センターで、中性子の波長と比べて十 分なめらかに研磨された。拡大された分布を、CCD ベースのピクセル検出器によって測定する。CCD 受 光面の上に、中性子を荷電粒子に変換するボロン10 コンバーターを蒸着することで、位置分解能を損な うこと無く、中性子検出を可能にした。以上の装置 を組み合わせた検出器システムで、サブミクロンの 精度を達成する。

2011年、フランス、ラウエ-ランジュバン研究所 において、物理測定を行った。得られた実験データ と、計算による中性子分布を比較した(図 2.2.11)。 超冷中性子分布の拡大過程については、位相空間上 の量子状態を記述するウィグナー関数を用いて計算 を行った。実験データと計算の分布は一致し、特に はじめの数個の分布の濃淡が一致していることが確 かめられた。検出器システムの位置分解能は、0.7 μ m と見積もられた。超冷中性子の重力による束縛状 態をサブミクロンの精度で観測したことは、世界初 の結果である。

新しい近接力の探索

中性子と原子ガスの散乱角分布を精密に測定し、 既知の散乱過程による分布からのずれを評価するこ とで、新しい近接力の探索実験を進めている。国内 外において、古くから、結合強度の弱い、新しい近接 力の探索が行われてきているが、その探索対象とし



図 2.2.11: 実験結果と計算による分布(第50準位まで)の比較。(a)全体と(b)分布の立ち上がり部分。

て、電弱スケールでの新粒子や小さく畳まれた余剰 次元があった場合に予想される未知のゲージ粒子な ど、いくつか理論からの魅力的な提案がされている。 実験の評価には湯川型で表現される結合ポテンシャ ルが使われる。有限の質量を持った単一スカラー粒 子が媒介するとした最もシンプルな相互作用の描像 で、モデル依存の少ないものである。新しい結合荷 を質量数やバリオン数とすることで、探索する対象 を、重力またはそれに準ずる力としている。

大韓民国の研究炉 (HANARO) にある波長が 5Å の中性子ビームを用いることを予定する。Xe ガスを 散乱原子とし解析方法の最適化を行った。また、現 地で予備実験を行い環境バックグラウンドなどから くる系統誤差の評価を行った。その結果、既存の中 性子ビームラインへ大幅な変更を行うことなく、数 日間の実験で世界で最も高い感度まで到達できると 見積ることができた。その結果を受け、実験の準備 を進めている。

2.2.4 EPR 相関測定とベル不等式検証

我々の世界は量子論でしか記述できないのか、あ るいは拡張した古典論によって再現されうるか。べ ルの不等式はその間いに対する最も有用な実験的判 別式として知られている。これまでにエンタングル した光子対を用いた光学実験などにより多数破れが 確認されているが、質量を持った粒子系あるいはフェ ルミオン系での実験例は依然として少なく、破れの 普遍性という観点で非常に興味深いセクターである。 我々は現在コライダーで生成される重い粒子の崩壊 系を用いたベルの不等式の検証を計画している。特 にスピン 0 を始状態とする $\eta_c \to \Lambda \overline{\Lambda}, \chi_{c0} \to \Lambda \overline{\Lambda}$ は、 ΛΛ 対のスピンが完全にエンタングルしており、統計 量も豊富で有力な検証チャネル候補である。 $\Lambda \overline{\Lambda}$ は直 ちに弱崩壊 $\Lambda \rightarrow p\pi^-, \bar{\Lambda} \rightarrow \bar{p}\pi^+$ を行うためスピンの 直接測定は困難だが、弱崩壊のパリティ非対称性に より終状態粒子 $p(\bar{p})$ の分布が Λ のスピンの方向 ($\bar{\Lambda}$ のスピン逆方向)に偏る性質を利用し、pp の運動量 相関から ΛΛ のスピン相関を逆算することが可能で ある。モンテカルロ・シミュレーションで $\eta_c \to \Lambda\Lambda$ 、

 $\chi_{c0} \rightarrow \Lambda \overline{\Lambda}$ チャネルの実験感度を計算した結果、既存のコライダー実験の統計量で十分検証が可能であることを示した。また $J/\psi \rightarrow \Lambda \overline{\Lambda}$ 、 $Z^0 \rightarrow \tau \tau$ のようなエンタングルが不完全な一般のチャネルに関して、ベルの不等式の破れの有無および破れの大きさはこれまで解析的な計算法がなかったが、我々はその解析解を求めることに成功し、各チャネルにおける実験感度などについて一般的な定式化を確立した。

<報文>

(原著論文)

- The ATLAS Collaboration, "Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC", Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29
- [2] The ATLAS Collaboration, "A Particle Consistent with the Higgs Boson Observed with the ATLAS Detector at the Large Hadron Collider", Science 338 (2013) 1576-1582
- [3] The ATLAS Collaboration, "Measurement of k_T splitting scales in $W \rightarrow l\nu$ events at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector", arXiv:1302.1415
- [4] The ATLAS Collaboration, "Measurement with the ATLAS detector of multi-particle azimuthal correlations in p+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV", arXiv:1303.2084
- S. Chen, Y. Nakaguchi, S. Komamiya "Testing Bell's Inequality using Charmonium Decays" Progress of Theoretical and Experimental Physics (accepted)

(会議抄録)

[6] Jacqueline Yan: "MEASUREMENT OF NANOMETER ELECTRON BEAM SIZES WITH LASER INTERFERENCE USING IPBSM", Proceedings for IBIC2012, International Beam Instrumentation Conference, Oct 1-4,2012, KEK, Japan

(国内雑誌)

[7] 駒宮幸男,「-22 世紀の物理学を考える- 未来は霧の 中」, パリティー Vol.27 No.11 (2012) 54

(学位論文)

- [8] 大録誠広「レーザー干渉を用いた高精度ビームサイズモニターの研究」,博士論文(東京大学大学院理学系研究科),2013年3月
- [9] 市川豪 「ピクセル検出器を用いた超冷中性子の重力 によって束縛された量子状態の観測」 博士論文(東 京大学大学院理学系研究科),2013年3月
- [10] 谷美慧「低速中性子散乱実験による新しい近接力の探索」修士論文(東京大学大学院理学系研究科),2013 年3月

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [11] J. Yan : "IP-BSM: Beamtime Performance and Error Evaluations" 14th ATF2 Project Meeting, June,2012, , KEK, Japan
- [12] Y. Kamiya, M. Tani, S. Komamiya, G. N. Kim, K. S. Kim: Search for a weakly-coupled scalar boson using neutron-Xenon scattering, 6th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms, Sendai, Japan, 28-30 September 2012.
- [13] J. Yan : "Measurement of Nanometer Electron Beam Sizes with Laser Interference using IPBSM ": IBIC2012, International Beam Instrumentation Conference, Oct 1-4,2012, KEK, Japan
- [14] J. Yan : "Measurement of Nanometer Electron Beam Sizes with Laser Interference using IPBSM ": LCWS2012, Joint CLIC/ILC Working Group Instrumentation and Technical Systems, Oct 25, 2012, Arlington, Texas
- [15] J. Yan : "IPBSM: Beam Size Measurement and Performance Evaluation" 15th ATF2 Project Meeting, Jan , 2013, KEK, Japan
- [16] J. Yan: "Beam Size Measurement using IPBSM: Newest Results and Performance Evaluation", FJPPL - FKPPL on ATF2 Accelerator R&D, Feb,2013, LAL, Orsay

招待講演

- "History [17] Sachio Komamiya, of Particle Physics and Linear Collider -Discovery of Higgs Boson and the ILC Project-" ASIAA/CCMS/AMS/LeCosPa/NTU-Phys Joint Colloquium, 24 September 2012, National Taiwan University
- [18] Sachio Komamiya, "Community Proposal for Japanese Particle Physics Priorities", CERN SPC Meeting, 27 November 2012, CERN Geneva
- [19] Sachio Komamiya, "Discovery of Higgs Boson and Impact on Particle Physics", GCOE Seminar, 9 December 2012, The University of Tokyo
- [20] Sachio Komamiya, "Progress of Particle Physics and International Linear Collider", ILC Symposium, 15 December 2012, Akihabara UDX Theater Tokyo
- [21] Sachio Komamiya, "Particle Physics Now and in the Future", International Symposium Nanoscience and Quantum Physics, 19 December 2012, Tokyo Institute of Technology
- [22] Sachio Komamiya, "International Linear Collider", ACFA Meeting, 26 February 2013, Butker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia (on-line talk)

[23] Sachio Komamiya, "The Rising Sun of the Linear Collider", Aspen Winter School, 10 March 2013, Aspen Colorado, USA

(国内会議)

一般講演

- [24] ジャクリン ヤン:「新竹モニタによるレーザー干 渉を用いた nm 電子ビームサイズ測定:最新結果と 性能評価」,ILC 夏の学校(2012 年 7 月),佐賀
- [25] 山口洋平, "LHC-ATLAS 実験における二光子に崩壊 するヒッグス粒子の探索".日本物理学会 (秋) 2012 年9月、京都産業大学
- [26] ジャクリン ヤン:「新竹モニタによるレーザー干渉 を用いたナノメートル電子ビームサイズ測定」、日本 物理学会 (秋) 2012 年 9 月、京都産業大学
- [27] 谷美慧、神谷好郎、駒宮幸男:「低速中性子散乱実験 による弱結合スカラー粒子の探索」:日本物理学会 (秋) 2012 年 9 月、京都産業大学
- [28] 陳詩遠、中口悠輝、駒宮幸男
 「チャーモニウム崩壊を用いた EPR 相関の測定とベル不等式の検証」
 日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、2013 年 3月 27 日
- [29] 市川豪, 駒宮幸男, 神谷好郎, 山村和也, 永野幹典:「重 力に束縛された超冷中性子の量子状態の観測および それを用いた未知短距離力の探索」,日本物理学会 (2013年3月),広島大学,広島
- [30] 神谷好郎、谷美慧、駒宮幸男、G. N. Kim, K. S. Kim: 中性子-キセノン散乱の精密測定による弱結合スカラー 粒子の探索実験、日本物理学会第68回年次大会、広 島大学、2013年3月28日
- [31] 大録誠広:「新竹モニタによるレーザー干渉を用い たナノメートル電子ビームサイズ測定」,日本物理学 会 (2013 年 3 月),広島大学,広島
- [32] ジャクリン ヤン:「新竹モニタによるレーザー干渉 を用いた nm 電子ビームサイズ測定:最新結果と性 能評価」、日本物理学会 (春)2013 年 3 月、広島 大学
- [33] 小坂井千紘、陳詩遠、Daniel Jeans、駒宮幸男:「線 形加速器のための電磁カロリメーターのシミュレー ション研究」、日本物理学会 (春) 2013 年 3 月、広 島大学
- [34] 山口洋平, "LHC-ATLAS 実験における二光子への崩 壊過程を用いた新粒子の研究".日本物理学会 (春) 2013 年 3 月、広島大学

招待講演

- [35] 駒宮幸男:「ヒッグス粒子の発見」,日韓シンポジウム,(2013年7月28日)松本大学
- [36] 駒宮幸男:「巨大加速器が解明する素粒子と宇宙の 謎」,東京大学エキゼクティブ・マネージメント・プ ログラム (2012年9月1日)東京大学
- [37] 駒宮幸男:「シンポジウム:ヒッグスとコライダー 趣旨説明」,日本物理学会(2012年9月12日)京都 産業大学

- [38] 駒宮幸男:「素粒子物理最前線 2012」,九州大学先 端素粒子物理研究センター開所式記念講演 (2012 年 10 月 1 日)九州大学
- [39] 駒宮幸男:「素粒子と宇宙 -極微の世界と壮大な宇宙 を結ぶ加速器-」,楽しむ科学教室 (2012 年 11 月 11 日) 福岡
- [40] 駒宮幸男:「巨大加速器が解明する素粒子と宇宙の 謎」,東京大学エキゼクティブ・マネージメント・プ ログラム (2012 年 12 月 22 日)東京大学
- [41] 駒宮幸男:「ヒッグス粒子発見-素粒子物理学の一大 革命-」,SSH 特別講義 (2013 年 1 月 12 日) 東京学芸 大学附属高等学校
- [42] 駒宮幸男:「ヒッグス粒子と見られる新粒子の発見」, 東京大学エキゼクティブ・マネージメント・プログラム (2013 年1月 25 日)東京大学
- [43] 駒宮幸男:「ビーム物理物理領域・素粒子実験領域 合同シンポジウム:ILC計画の展望」,日本物理学会 (2013年3月27日)広島大学
- [44] 駒宮幸男:「「ヒッグス粒子」の発見」,朝日カル チャーセンター (2012 年 11 月 17 日) 横浜
- [45] 駒宮幸男:「「ヒッグス粒子」の発見と素粒子物理学の発展」,朝日カルチャーセンター (2012 年 12 月 1日)藤沢
- [46] Sachio Komamiya, "Discovery of Higgs Boson and Impact on Particle Physics", GCOE Seminar, 9 December 2011, The University of Tokyo

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 PANDA - 原子炉ニュートリノモ ニター

国際原子力機関(IAEA)が世界各地の原子力関連 施設で実施している現在の核不拡散保障措置は、原 子炉から放出される中性子のモニタリングや使用済 み核燃料のモニタリングなどの侵襲的な方法であり、 査察機関と査察対象国双方にとって負担が大きいこ とが課題となっている。そこで反電子ニュートリノ の検出技術を応用して非侵襲的なモニタリングを実 現しようと、世界の複数のグループにより研究開発 が進められている。反電子ニュートリノ検出器を用 いるモニタリング方法では、原子炉内で発生する反 電子ニュートリノを捉えることで、原子炉の運転状 況を外部から把握することができる。ニュートリノ は透過性が極めて高く、また代替のニュートリノ源 を用意することが困難であることから、保障措置の 新技術として期待されている。

さらに、ウランとプルトニウムでは生成エネルギー あたりのニュートリノ放出数が異なることを利用す れば、原子炉内でウランが燃焼してプルトニウムが 作られる過程も追跡することができる。これにより、 正当な申告なしにプルトニウムを抜き取ることがな いかの監視ができるようになる。

我々のグループでは、原子炉モニタリングへの応 用を目的として可搬性の反電子ニュートリノ検出器 PANDA (Plastic Anti-Neutrino Detector Array)の 開発を行っている。PANDA はターゲット部分に可燃 性の液体シンチレータでなく不燃性のプラスチック シンチレータを使用しており、高い安全性が求めら れる原子力発電所に持ち込む際には大きなメリット となる。またトラックや貨物輸送用コンテナに積載し た状態で移動および測定が可能である点も PANDA の特長である。同一の検出器を用いて複数の原子炉 で測定を行うことができるため、燃料組成比の異な る核燃料を使用している複数の原子炉に設置するこ とで、それぞれの原子炉におけるニュートリノスペ クトルの違いを観測することが可能であると考えて いる。

原子炉で発生した反電子ニュートリノがプラスチッ クシンチレータ中の陽子と反応すると、逆 β 崩壊に より陽電子と中性子が発生する。陽電子はシンチレー タにエネルギーを落としながら短距離を移動し、そ の後シンチレータ中の電子と対消滅して2本の γ 線 を放出する。一方、中性子はシンチレータ中で繰り 返し散乱しエネルギーを十分に失った後、ガドリニ ウムよって吸収され合計約8MeVの γ 線を放出する。 陽電子と中性子によるこの2つの信号の時間差(平 均 60μ s程度)を利用することで、バックグラウン ドの影響を大幅に減らすことができる。PANDA は $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 100\text{cm}$ の様状プラスチックシンチレー タにガドリニウム含有フィルムを巻きつけたものを モジュールとして、そのモジュールを縦横に10本 ×10本の計100本を積み重ねた構造である。我々の グループは現在までに、モジュールを16本使用した 第1次プロトタイプ lesserPANDA、36本使用した 第2次プロトタイプ PANDA36、64本使用した第3 次プロトタイプ PANDA64(図2.3.12)の3つのプ ロトタイプ検出器を開発してきた。



図 2.3.12: 第3次プロトタイプ検出器 PANDA64

2011 年度に第2次プロトタイプである PANDA36 を関西電力大飯発電所の2号機近傍に設置して約2ヶ 月間ニュートリノ測定を行った結果、原子炉稼働中 (ON) と停止中 (OFF) にニュートリノ由来だと思 われるイベント数の差を確認したが、2012年度はさ らに測定結果についてセレクションの最適化と、得 られたニュートリノイベント数の系統誤差の見積り を行った。系統誤差の見積りは陽電子及び中性子線 源を用いた測定とモンテカルロシミュレーションの 結果を比較することで行い、この見積りによって原 子炉 ON/OFF でのニュートリノイベント数の変化 から環境要因の中性子イベントの寄与を減算する際 の系統誤差を得た。結果として大飯発電所における PANDA36 を用いた測定では、原子炉 ON/OFF に 伴う1日当りのニュートリノイベント数の変化の確 度は2σであったことが分かった。

PANDA36で得られた結果の解析後、第3次プロト タイプであるPANDA64の開発を開始した。PANDA36 からモジュール数が倍程度になったことに伴い、検 出器からコンピュータへのデータ転送速度の不足が 予想されたため、データ取得系の改良を行った。128 本の光電子増倍管のうち有意に発光したものについ てのみデータを転送するよう、各増倍管ごとの適当 なデータ転送の閾値を測定開始時に求め、ADCに 設定されるようプログラムした。この改良によって PANDA36より高いイベントレート下での測定が可 能になった。さらにコインシデンスロジックなどを担 当する2台のFPGAモジュールの動作ロジックおよ び動作周波数を改善し、データ取得プログラムにつ いても解析時間の短縮などの目的で再設計を行った。



図 2.3.13: 貨物輸送用コンテナに積載された PANDA64

開発した PANDA64 は現在、理学部 4 号館脇に設置した貨物輸送用コンテナに積載され、温湿度の変化 や検出器の状況をモニタリングしながら試験測定を 行っている(図 2.3.13)。PANDA36 はシールドを設 置せずバックグラウンドに苦しんだため、PANDA64 では検出器を全面取り囲むように厚さ 24cmの水シー ルドを設置した。シールドの設置前後でバックグラ ウンドである高速中性子および環境 γ線を比較した ところ大幅な減少が確認された。

今後は、十分な試験測定を行ったのち商業用原子 炉の近傍でニュートリノ測定を行うことを予定してい る。PANDA64をPANDA36と同じく熱出力3.4GWth の原子炉炉心から35.9mの位置に設置した場合、原 子炉 ON/OFF の1日当りのニュートリノイベント 数の差を2日以内に 3σ の確度で確認できる見込み である。

また、近年、近距離での原子炉ニュートリノ検出 率のわずかな欠損 (reactor antineutrino anomaly) な どによって示唆される、 $\Delta m^2 \sim 1 \text{ eV}^2$ を持つ第4番 目の sterile neutorino(不活性ニュートリノ)の存在 が疑われている。もし小型の炉心を持つ原子炉の近 くに PANDA を設置出来れば、このような短い振動 長の sterile neutrino の存在を検証できるデータが得 られる可能性がある。外国の原子炉も含めて、この ような実験のできる原子炉での neutrino 振動実験を 行いたいと考えている。

2.3.2 Sumico, アクシオンヘリオスコー プ実験と Hidden photon 探索実験

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。しかし、今のところこの素粒子はいかなる 実験、観測によっても発見されていない。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。

我々は太陽由来の太陽アクシオンを捉えるために、 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 きる東京アクシオンヘリオスコープ (Tokyo Axion Helioscope、愛称Sumico)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。また、磁場領域にHeガス を導入することで質量を持ったアクシオンに対して 感度を持たせることができる。

Sumicoは、CERN で稼働中の同様の装置 CAST(CERN Axion Solar Telescope) より 6 年先行して実験結果 を発表しており、アクシオンの質量 $m_a = 1 \text{ eV}$ 近傍 で世界で初めて QCD アクシオンのパラメータ領域 の探索に成功している。

現在は、その太陽追尾装置を利用して、hidden photon 探索実験を行なっている。

Hidden photon 探索実験

概要

Hidden photon とは、標準理論の $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 対称性の外の「隠れた」U(1)対称性に対応するゲージボソンのことである。このような追加の対称性は、標準理論を拡張する多くの模型において出現する。

この hidden photon は通常の光子との間に kinetic mixing を持ち、Stückelberg 機構などにより質量をもつ可能性がある。この場合、hidden photon と通常の光子との間でニュートリノ振動と同様の振動が生じる。

我々の研究室ではこの振動現象を用いた hidden photon 探索を行っている。強力な hidden photon 源である太陽から飛来する hidden photon を実験室 内の真空容器で光子へと変換し光検出器で捕らえる。 同様の方法で DESY の SHIPS グループも測定を目 指しているが、我々はそれに先駆け、世界で初めて 太陽 hidden photon 観測を行った [2]。この測定では hidden photon のシグナルは得られず、このことか ら光子と hidden photon の混合パラメータ χ に対 する制限をつけた (図 2.3.14)。

バックグラウンド測定手法

上述の測定では、温度変化による光検出器のダー クカウントレート変動により、大きな系統誤差が生 じていた。測定装置の光検出器 (PMT) は温度制御 せずに室温で用いていたが、換気等により室温が変 動することでカウントレートが変化してしまう。太 陽追尾時とバックグラウンド測定時のカウントレー トを引き算することで hidden photon のシグナルを 得るため、このダークカウントレート変動が大きな 系統誤差の要因となった。

これを改良するため、シャッター、首振りという 二つの手法でのバックグラウンド測定について検討 を行った。シャッターは光路を遮断することにより、 また首振りは検出器の方向を太陽からずらすことに よって、それぞれバックグランド測定が可能となる。 太陽追尾測定/バックグランド測定を十分短い時間 で繰り返すことによって、温度変化の影響を無視す ることができる程度まで減らすことができる。

シャッターについては問題が生じ、使うことがで きないことがわかった。予備実験を行った結果、集 光を行うための放物面鏡に用いられているアルミニ ウムが光を発していることが判明し、それが測定に 影響を及ぼすことが見積もりの結果明らかになった。 現在ではその原因と、銀などのアルミニウム以外の 材質を用いた場合の影響について調査を行っている。

首振りについては予備測定の結果問題がないこと が分かった。Hidden photon 探索装置はSumico にマ ウントすることで太陽追尾能力を得ている。Sumico ではこれまで首振り測定を行ったことがなかったた め、ソフトウェアの開発・動作検証を行った。

測定装置の改良

現在我々は hidden photon 探索装置の感度向上に 向け、放物面鏡の巨大化および新しい光検出器の導 入を検討している。

放物面鏡は現在使用している直径 50cm のものか ら直径 100cm のものに拡張する予定であり、これに 合わせ真空容器も新たに作る必要がある。しかし真 空容器を巨大化した場合、その大きさのため Sumico に搭載することが出来なくなる。このため我々は新 たな経緯義の購入などを検討している。

光検出器においては高量子効率、低ダークカウン トのものが求められる。例えば ET-Enterprises 社の 9893-350B という PMT は現在用いている浜松ホト ニクス社の PMT(R3550P) より量子効率が高く、ま た冷却を行うことでダークカウントも低くなること が SHIPS グループが行った試験測定から報告されて いる。特にダークカウントレートは現在用いている PMT よりも一桁近く低くなるため、大いに感度向上 が期待される。

これらの改良により図 2.3.14 の実線部までの範囲 が観測可能となる。



図 2.3.14: 2010 年度における測定により得られた χ の上限値 (present) および改良した場合に期待され る観測可能範囲 (planned)。塗りつぶされた領域は他 グループの実験、考察によって否定された領域。

Hidden photon ダークマター探索

現在様々な研究グループにより WIMP ダークマ ター(暗黒物質)の探索が行われているが、axion や hidden photon のような WISP(Weakly Interacting Slight Particles)もダークマターの候補である。 WISP は質量が軽く、WIMP のように原子核反跳を 用いた測定手法を使うことができない。代わりに通 常の光子との混合を用いて探索を行うことになり、 WIMP 探索とは全く違った実験装置が必要となる。 混合は極めて弱いため、何かしらの手法を用いて S/N 比を向上させる必要があり、これまでに axion ダー クマターの探索を行っている ADMX のように resonant cavity を用いる方法の他、新たに dish antenna を用いる手法が提案されている。

我々の研究室ではこの dish antenna による手法で hidden photon ダークマターの探索を計画している。

<報文>

(原著論文)

- Y. Kuroda, S. Oguri, Y. Kato, R. Nakata, Y. Inoue, C. Ito, M. Minowa: A mobile antineutrino detector with plastic scintillators, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 690 (2012), 41-47, arxiv:1206.6566 [hep-ex].
- [2] T. Mizumoto, R. Ohta, T. Horie, J. Suzuki, Y. Inoue, M. Minowa: Experimental search for solar hidden photons in the eV energy range using kinetic mixing with photons, arXiv:1302.1000 [astroph.SR].

(学位論文)

[3] 小栗秀悟: Reactor neutrino monitoring with a plastic scintillator array as a new safeguards method、 平成 24 年 7 月博士(理学)、東京大学大学院理学系 研究科物理学専攻. [4] 鈴木惇也: Hidden photon 探索手法改善に向けての 研究、平成25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

[5] Y. Kuroda: Reactor On/Off Monitoring with a Relatively Small and Mobile Plastic Anti-neutrino Detector Array (PANDA), Neutrino2012, Kyoto TERRSA, Japan, 5 June 2012.

招待講演

- [6] Y. Kuroda: Reactor On/Off Monitoring with a Prototype of Plastic Anti-neutrino Detector Array (PANDA), AAP2012(Applied Antineutrino Physics workshop 2012), the University of Hawaii Manoa Campus, U.S.A., 4 October 2012.
- [7] M. Minowa: Axion Hunting, AIU2012 (Accelerators In the Universe 2012) Axion Cosmophysics, KEK, 6 November 2012.
- [8] M. Minowa: Reactor Monitoring, Neutrino Geoscience 2013, Takayama, 22 March 2013.

(国内会議)

一般講演

- [9] 蓑輪 眞: Axion と光、ビッグバンセンター研究交流 会、東京大学 2012 年 06 月 14 日.
- [10] 井上慶純: Sumico experiment Tokyo axion helioscope—、物理学教室ランチトーク、東京大学 2012 年 6月15日.
- [11] 蓑輪 眞: Reactor antineutrino measurement at Ohi power plant、RESCEU サマースクール、「第 12 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、福島県耶 麻郡「休暇村 裏磐梯」、2012 年 7 月 27 日.
- [12] 鈴木惇也:太陽 hidden photon 探索(1) hidden photon 探索の現状日本物理学会2012年秋季大会、京都 産業大学2012年9月11日.
- [13] 堀江友樹:太陽 hidden photon (2) 新たな探索装置 の開発、日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大 学 2012 年 9 月 11 日.
- [14] 黒田康浩:小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) による原子炉モニタリング [1] 関西電力大飯発電所に おけるニュートリノ測定結果、日本物理学会 2012 年 秋季大会、京都産業大学 2012 年 9 月 13 日.
- [15] 加藤陽:小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) に よる原子炉モニタリング [2] 検出器の改良に向けた 検討、日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学 2012 年 9 月 13 日.
- [16] 富田望:小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) に よる原子炉モニタリング [3] PANDA64 へ向けての DAQ の改良、日本物理学会 2012 年秋季大会、京都 産業大学 2012 年 9 月 13 日.

- [17] 富田望: 原子炉モニタリングのための小型ニュートリ ノ検出器 PANDA64[1]、日本物理学会第 68 回年次大 会、広島大学 2013 年 3 月 26 日.
- [18] 加藤陽: 原子炉モニタリングのための小型ニュートリ ノ検出器 PANDA64[2]、日本物理学会第 68 回年次大 会、広島大学 2013 年 3 月 26 日.
- [19] 堀江友樹:太陽 hidden photon 探索 (1) シャッター を用いたバックグラウンド測定について、日本物理学 会第 68 回年次大会、広島大学 2013 年 3 月 28 日.
- [20] 鈴木惇也:太陽 hidden photon 探索(2)新しいバッ クグラウンド測定手法を用いた探索日本物理学会第 68回年次大会、広島大学2013年3月28日.

セミナー

[21] 蓑輪 眞:安価な食品放射能測定器、東日本大震災復 興支援哲学会議 哲学ランチ、東京大学 2012 年 7 月 12 日.

2.4 相原·横山研究室

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) およびその高度化(Belle II 実験)、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、茨 城県東海村にある J-PARC 加速器と岐阜県飛騨市の スーパーカミオカンデ検出器を使った長基線ニュー トリノ振動実験(T2K実験)、次世代大型水チェレ ンコフ検出器(ハイパーカミオカンデ)の準備研究、 米国フェルミ国立加速器研究所でのニュートリノ-原 子核反応測定実験(SciBooNE 実験)、さらに、将来 の研究に向けた新型光検出器(HPD・MPPC)の開 発、などを行っている。これら世界最先端の実験設 備を駆使して、素粒子や宇宙の謎を実験的に解き明 かすことが、当研究室の目標である。

2.4.1 Belle 実験

1999年から運転を続けてきた KEK のBファクト リー (KEKB加速器/Belle 測定器)は、ルミノシティ 増強のための高度化作業に伴い、2010年6月30日 に運転を停止した (図 2.4.15)。現在は、2016年に予 定される Super KEKB ファクトリーの始動まで、こ れまでに蓄積した約11億のB中間子・反B中間子対 に代表される高統計データを使って素粒子物理学の 喫緊の課題である、標準理論と呼ばれる現パラダイ ムを越える新しい、より根源的な原理の探求を行っ ている。

本研究室では、第三世代レプトンであるタウレプ トンの異常磁気能率の測定によって新物理探索を行 う研究を行っている。荷電レプトンの異常磁気能率 (スピン 1/2 の点電荷粒子の Dirac 磁気能率からの ずれ)の精密測定は、標準理論の厳密な検証となる。 また、新物理の異常磁気能率への寄与は、新物理の 発現するエネルギースケールをΛとすると、レプト ン質量 (m_{ℓ}) と Λ の比の二乗 $(m_{\ell}/\Lambda)^2$ に比例する。 タウレプトンの質量は、ミュオンの質量の約17倍 であり、新物理に対してその二乗、約290倍の感度 を有する。われわれは KEK B ファクトリー加速器 で得られた約9億のタウ・反タウ対を使ってタウレ プトンの異常磁気能率をこれまでの10倍の精度で 測定する。KEK B ファクトリーにおけるタウレプ トンの輻射レプトン崩壊 (radiative leptonic decay; $\tau \to \mu\nu\nu\gamma \ \varepsilon \ \tau \to e\nu\nu\gamma$; 図 2.4.16 参照) を用いて タウレプトンの静的な (on mass-shell) 性質である 異常磁気能率 $F_2(0) = a_\tau \ \epsilon \ 10^{-3} \ o$ 精度で測定し、 かつ、フレーバーに強く依存する新物理の可能性に ついて制限を与える。 副産物として、輻射レプトン 崩壊の分岐比の精密測定から、TVW 結合の非標準理 論モデルについても制限を与えることができる。さ らに、タウレプトンのレプトン崩壊のパラメータで ある Michel パラメータを従来の 10 倍の精度で(例 えばρパラメータを10⁻³の精度で)決定する。 Ξħ によって、荷電カレントの非標準理論モデル(例え ば右巻きカレント) に対してもきわめて厳密な制限 を与えることができる。



図 2.4.15: 改造するためにビームラインから引き出 した Belle 測定器



図 2.4.16: タウレプトンの輻射レプトン崩壊の最低 次のファインマンダイアグラム

2.4.2 Belle II 実験

小林・益川両博士のノーベル賞受賞の決め手になるなど多大な成功を収めた Belle 実験のアップグレードとして、Super KEKB 加速器と Belle II 測定器の建設が進行中である。Super KEKB は、KEKB の 40 倍のルミノシティ(8×10^{35} cm⁻²s⁻¹)を得ることを目標とする最先端ファクトリー型加速器であり、Belle II 測定器(図 2.4.17)は、その加速器から最大限の物理成果を引き出すために最先端技術を駆使して作る測定器である。

Bファクトリー実験で物理成果を引き出すために は、多くの場合 B 中間子の崩壊点を高性能で再構 成するための崩壊点検出器と呼ばれる装置の性能が 鍵となる。BelleII 検出器の崩壊点検出器はビーム衝 突点近傍からピクセル型 (PXD) 検出器 2 層とスト リップ型 (SVD) 検出器 4 層の 6 層からなる。PXD、 SVD 検出器ともにラダーと呼ばれる短冊状の検出器 モジュールがビーム衝突点を中心に円筒状に配置さ れる。

本研究室は Belle II 用 SVD 検出器の開発・量産を 主導している。昨年度から東京大学 国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) と KEK の協力を得て、Kavli IPMU 内に最新設備をもつ実 験室を立ち上げ、SVD 検出器のラダーモジュールの 量産に向けた組み立て方法の研究開発を進めている。



図 2.4.17: Belle II (ベルツー) 測定装置の完成予想図

SVD 検出器製作において物理解析に必要となる崩 壊点の位置再構成精度を得るために、その検出器構 成単位となるラダーの組立精度は 10 μ m 以下を目指 す。また、新たに導入した三次元測定器を用いて量 産過程でラダー組立精度を検査することにより、ラ ダー内センサーのミスアライメントを直接測定して 補正することにより更なる崩壊点再構成精度の向上 を図る予定である。これにより K_S 粒子の再構成の S/N 比が高まり、超対称性模型などの素粒子標準模 型を超えた新物理への感度があると期待される $b \rightarrow s$ や $b \rightarrow s\gamma$ などの K_S を含む崩壊モードの検出効率 が改善される (2.4.18)。

本年度の成果として、2012年夏に SVD の読み出 し基本単位となる「オリガミモジュール」を横に2 つ連ねた「2連オリガミモジュール」の初製作に成 功した (図 2.4.19)。これは実際の SVD 検出器の最外 層6層自と5層自のラダーに採用されている構造と 同じであり、その製作に成功したことは実機の建設 に向けた重要な成果である。秋には CERN130GeV ハドロンビームを用いた試験を行い、製作した2連 モジュールによる荷電粒子の検出を確認した。その 後も6層目フルラダー製作に向けた準備をすすめ、 2013年2月に量産組立手法を確立した。この手法を 用いたモックアップラダーの組立検証試験を3月初 旬から開始し、同月末日に初の精密モックアップラ ダーが完成した (図 2.4.20)。これによりラダー量産 が可能であることが実証された。また、本年度には 4層目ラダーを担当しているインドの TIFR グルー プが東大 IPMU に合流して生産することが決まり、 更に本研究室の貢献度が増すことになった。現在は 2013年度夏からのラダー量産に向けて着々と準備を 進めている。

また、本研究室では電子やγを含む終状態の研究 で決定的な役割を果たす電磁カロリメータのアップ グレードに向け、SuperKEKBにおける高輝度・高 バックグラウンド環境に対応するための新しい読み 出しエレクトロニクスの開発試験、および現在用い ている CsI(TI) 結晶よりも時定数の短い pure CsI 結 晶などのシンチレータの試験を行っている。



図 2.4.18: $b \rightarrow s\gamma$ 崩壊のダイアグラム(上)と Belle II 実験で期待される新物理に対する感度(下)。標準 理論では $b \rightarrow s(d)\gamma$ 過程からの光子はほぼ左巻きと なり, *CP* 非対称度は < 0.02 と予想されている。一 方,新物理による右巻きカレントがあると時間に依 存した *CP* 非対称度が現れ,超対称性を仮定したモ デルでは 10% 程度の *CP* 非対称度を予言するもの もある。

2.4.3 HSC 暗黒エネルギー研究

宇宙の全エネルギーのうち、既知の物質が占める のはたった約5%であり、約27%は暗黒物質に、残り の約68%は、暗黒エネルギーによって占められてい ることが観測的に明らかになっている。特に加速膨 張の源である暗黒エネルギーは正体不明であり、素 粒子物理学と天文学に跨がる、現代物理学の大きな 謎である。

本研究室では、すばる望遠鏡次世代超広視野主焦 点カメラ Hyper Suprime-Cam(HSC)を開発し、そ れを用いて暗黒エネルギーの性質に強い制限を付け ることを目指している。HSC は 1.77 平方度の視野 を 104 枚の CCD(1.2 ギガピクセル)で撮像する。こ れにより 1400 平方度を限界等級 26 等という深さで サーベイする。この観測領域に含まれる 約1億個程 度の銀河の形状測定から、宇宙の大規模構造によっ て引き起こされる重力レンズ効果 (宇宙論的弱重力レ



図 2.4.19: 当研究室で製作した、Belle II SVD ラダー を構成する 2 連オリガミモジュール



図 2.4.22: 試験観測において観測されたアンドロメ ダ銀河。国立天文台/HSC プロジェクト提供。



図 2.4.20: 当研究室で確立した量産手法を用いて製作 した Belle II SVD ラダーのモックアップモジュール

ンズ効果)を測定することによって、暗黒エネルギー の性質に制限を付ける。

HSCの開発は2012年8月に完了し、ファーストラ イトを迎えた。HSCの概観を図 2.4.21 に示す。2012 年8月後半および 2013年1月終わりから2月初め にかけて、試験観測が行われた。この試験観測では HSCの望遠鏡への搭載手順の確認や、ポインティン グ、ガイディング、波面センサーといった機能の確 認が行われ、実際にいくつかの観測が行われた。こ の観測において、全視野を平均して0.6秒角以下の シーイングが得られ、設計通りの高精度観測が可能 であることが示された。試験観測中に撮像したアン ドロメダ銀河の画像を図 2.4.22 に示す。本研究室で はオートフォーカスのためのアルゴリズムの検討を 行った。今後はさらなる試験観測を行い、その中で オートフォーカスのテストを行う予定である。試験 観測完了後、2014年2月からサーベイを開始する予 定である。

サーベイ開始に向け、昨年度と同様に画像解析用 プログラム群(パイプライン)や弱い重力レンズ効 果を測定するために必要な銀河の形状測定アルゴリ ズムの開発を進めた。特に銀河の形状測定アルゴリ ズムに関しては、今までに開発されたアルゴリズム を系統的に比較し、どのアルゴリズムが要求を満た すか調べている。さらに、銀河団周りの暗黒物質の 様子を探るため、銀河団領域の弱い重力レンズ効果 ("シア")に着目し、銀河団-シア-シア三点相関関数 という新しい統計法を開発し、Suprime-Camのデー タを用いて検証している。冷たい暗黒物質構造形成 モデルのN体シミュレーションを用い、HSCサーベ イを想定し、銀河団周りの暗黒物質フィラメントを 有意に検出でき得ることを見つけた [51]。

2.4.4 T2K 長基線ニュートリノ振動実験

T2K 長基線ニュートリノ振動実験では、茨城県東 海村の J-PARC (大強度陽子加速器)実験施設で大 強度のミューオンニュートリノビームを生成し、岐阜 県飛騨市の大型水チェレンコフ検出器スーパーカミ オカンデでニュートリノ事象を観測することで、過 去の実験よりも一桁以上よい感度でのミューニュー トリノ消滅現象の精密測定 および 電子ニュートリノ の発現現象の発見を狙う。中でも特に、電子ニュー トリノ発現現象が観測されれば将来の実験で CP 対 称性の破れの探索ができる可能性が高まるため、こ の測定は世界のニュートリノ研究の将来を決める実 験として期待と注目を集めてきた。

電子ニュートリノ発現現象の発見 我々は、2011年3 月 11 日以前に取得したデータに基づき、電子ニュー



補正光学系

図 2.4.21: 完成した Hyper Suprime-Cam の概観。

トリノ発現現象の存在を強く示唆する結果を2011年 6月に発表した。今年度は、さらに 2012 年 6 月ま でのデータを加え統計量を約2倍に増やした解析を 行った。電子ニュートリノ発現による電子ニュート リノ反応の候補を選択した結果、背景事象の期待値 3.3±0.4 事象に対し実データ中に 11 事象を観測し、 3.1σの有意度で電子ニュートリノ発現現象の確証を 得た。同時期に公表された原子炉反電子ニュートリ ノ消失実験の結果と合わせ、2年前まで上限値しか 知られていなかった、最後のニュートリノフレーバー 混合角 θ₁₃ が有限であり、過去の実験で得られてい た上限値に近い比較的大きな値 $(\sin^2 2\theta_{13} \simeq 0.1)$ で あることが確実となった。これは、世界中のニュー トリノ研究者が過去10年にわたって追い求めてきた 大きなマイルストーンであり、今後のニュートリノ 研究の方向性に決定的な影響を与える成果である。

ミューニュートリノ消滅現象の精密測定 ミューニ ュートリノ消滅現象では、大気ニュートリノ観測と同 じニュートリノフレーバー混合角 θ_{23} を測定する。過 去の測定では、 θ_{23} は最大混合(45°, sin² $2\theta_{23} = 1$) と実験誤差の範囲で一致している。もし最大に混合 しているとすると、背後に隠れた対称性の存在が示 唆される。また最大混合でない場合には、その値によ り*CP* 非対称性や質量階層性の測定感度が変わるた め、精密測定が必要とされている。T2K 実験で2012 年6月までに得られた58 事象のミューオンニュート リノ反応候補を用いて解析を行った結果、世界最高 精度での測定を行うことに成功した(図 2.4.24)。今 後データ収集を継続し、さらに精度を上げた測定を 行っていく。

π中間子-原子核散乱断面積の測定 長基線ニュート リノ振動実験では、ニュートリノを検出装置内の物質 と反応させ、生成された粒子を観測することでニュー トリノの研究を行うため、ニュートリノと原子核の間 の反応断面積の理解が重要であり、その不定性が系 統誤差の主な要因の一つとなっている。特に、ニュー トリノ-原子核反応で生成された π 中間子は、標的原 子核中で核力による散乱を受ける確率が大きく、そ の影響で終状態を誤認することがバックグラウンド の一つの要因となる。我々はπ中間子-原子核散乱の 不定性を抑えるため、T2K 実験の関連実験として、 カナダ TRIUMF 研究所で π[±] の原子核による吸収 反応と荷電交換反応の断面積を測定する実験を行っ ている。データ収集は2010年と2011年の2回にわ たって行ったが、このうち2010年のデータを解析し た結果が金沢の修士論文 [42] としてまとめられた。

2.4.5 次世代大型水チェレンコフ検出器・ ハイパーカミオカンデ計画

前述の通り、T2K実験で電子ニュートリノ発現事 象が観測され、3世代のニュートリノフレーバー間 の振動が全て確立した現在、ニュートリノ研究の次 の大きな目標はニュートリノ(レプトン)で*CP*対称



図 2.4.23: T2K 実験で得られた電子ニュートリノ反 応事象候補の,再構成されたニュートリノエネルギー 分布。黒点がデータ、ヒストグラムは $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$ を仮定したシミュレーションによる予測。

性(粒子-反粒子間の非対称性)が破れているかどう かを確かめることである。クォークの*CP* 非対称性 は、Bファクトリーをはじめとする各種の実験で詳 細に調べられているが、ニュートリノを含むレプト ンでは実験的に全く未知の領域である。宇宙の物質-反物質の非対称性を理解するためには、小林-益川理 論で説明されるクォークの CP 非対称性では足りな いことが知られており、レプトンの CP 非対称性が 宇宙の物質-反物質の素になったとするレプトジェネ シスと呼ばれるシナリオが有力な候補の一つとなっ ている。

レプトンセクターで CP 非対称性の測定をするた めの最も現実的で有望な方法は、電子ニュートリノ 発現事象の頻度をニュートリノと反ニュートリノで 比較することであるが、非対称性の有意な観測のた めにはT2K実験の数十倍の統計が必要となる。当研 究室では、このような次世代の実験を行うための装 置として、現行のスーパーカミオカンデの約20倍の 大きさを持つニュートリノ検出器、「ハイパーカミオ カンデ」検出器(図2.4.25)の実現のための研究を進 めている。ハイパーカミオカンデ検出器は、100万ト ンの総質量をもつ水チェレンコフ検出器で、ニュー トリノの CP 非対称性測定だけでなく、素粒子の大 統一理論で予言されている陽子崩壊の探索や、超新 星からのニュートリノ検出などを世界最高感度で行 うことのできる、宇宙と素粒子の分野にわたる幅広 い研究を行うための実験装置である。

我々の研究室では、2009年から宇宙線研、京都大 学、名古屋大学などの国内関係者に呼びかけてワー キンググループを結成し研究を推進するとともに、 ハイパーカミオカンデでの最も重要なテーマである、 加速器からのニュートリノビームを使った長基線実



図 2.4.24: T2K 実験で得られた $|\Delta m_{32}^2| \ge \theta_{23}$ に対す る制限。スーパーカミオカンデ実験,米国の MINOS 実験の結果と重ねてプロットしてある。



図 2.4.25: ハイパーカミオカンデ検出器の概念図。

験での CP 対称性の破れに対する感度を研究してい る。今年度は、実現に向けて国際的に協力して計画 を進めるために、2回の国際オープンミーティング を開き、国際ワーキンググループを結成した。現在 ワーキンググループには9カ国から約100人が参加 している。

新型大口径光検出器の開発 ハイパーカミオカンデ に使用する光検出器の候補として、光電面とアバラン シェダイオード (AD) からなる大口径 Hybrid Photo Detector (HPD)を開発している。HPD では、光電 面と AD の間に約 10kV の高印加電圧をかけること により、まず光電面から出た光電子を加速して AD に打ち込み二次電子を生成することで数千倍に増幅 する。さらに、AD 内部の電場によるアバランシェ 増幅により数十倍の増幅を得る。この二段の増幅機 構により、最終的に約 O(10⁵)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、i) 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



図 2.4.26: 試験中の8インチ HPD。

に比べてよくなる、ii) 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、iii) 部品数が PMT の 1/10 ですみ安価である、 などの特長がある。

HPD の水チェレンコフ検出器用の光検出器として の性能を評価するとともに、年単位の長期使用の経 験を得るため、神岡坑内でガドリニウム試験用に建 設された 200 トンの水タンク中に HPD を設置し長 期試験を行う計画を進めている。本年度は、8 イン チ HPD (図 2.4.26)の性能評価を行い、水中での長 期試験に耐えうる基本性能を持つことを確認した後、 10 本の 8 インチ HPD を製作して較正を行った。

2.4.6 SciBooNE(FNAL-E954) 実験

米国フェルミ国立加速器研究所でのニュートリノ-原子核反応断面積実験 SciBooNE(FNAL-E954)の データを使って、同じビームラインの下流で実験を 行っている MiniBooNE グループと共同でニュート リノ振動の探索を行った。

LSND 実験や MiniBooNE 実験の結果を説明する シナリオのいくつかでは、他の物質と反応しないス テライルニュートリノの存在を仮定し、ニュートリ ノ質量の二乗差 1–10 eV² でのニュートリノ振動を 予言するものがある。我々の測定はこの領域で世界 最高精度の感度を持つ。特に、SciBooNE 実験での 荷電カレント反応の反応率測定を用いることによっ て、ニュートリノ振動実験の大きな不定性源の一つ であるニュートリノフラックスと断面積の不定性を 大幅に削減し、ニュートリノ振動に対する感度を向 上させることに成功した。



図 2.4.27: SciBooNE 実験と MiniBooNE 実験の共 同解析で得られた,反ミューオンニュートリノとス テライルニュートリノの間の振動パラメータに対す る制限。点線は過去の実験による制限。灰色の部分 はシミュレーションによる予想感度の 90%CL 領域。

前年度のミューオンニュートリノビームを用いた 測定に続き、本年度は反ニュートリノビームでの測 定結果を公表した。ニュートリノ振動の有意な兆候 は得られず、ニュートリノ振動のパラメータに制限 を与えた。図 2.4.27 に、今回の測定 [37] で得られた ニュートリノ振動パラメータに対する制限を示す。

<受賞>

[1] H. Aihara, M. Yokoyama *et al.* (T2K collaboration として), "Le Prix La Recherche 2012 (Physique)," La Recherche (フランス科学雑誌), 2012 年 10 月 23 日

<報文>

(原著論文)

- [2] Y. Sato *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the CP-violation Parameter $\sin 2\phi_1$ with a New Tagging Method at the $\Upsilon(5S)$ Resonance," Phys. Rev. Lett. **108**, 171801 (2012).
- [3] I. Adachi *et al.* [Belle Collaboration], "Precise measurement of the CP violation parameter $\sin 2\phi_1$ in $B^0 \rightarrow (c\bar{c})K^0$ decays," Phys. Rev. Lett. **108**, 171802 (2012).
- [4] J. Li *et al.* [Belle Collaboration], "First observation of $B_s^0 \rightarrow J/\psi\eta$ and $B_s^0 \rightarrow J/\psi\eta'$," Phys. Rev. Lett. **108**, 181808 (2012).
- [5] Z. Q. Liu *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of new resonant structures in $\gamma\gamma \rightarrow \omega\phi$, $\phi\phi$ and $\omega\omega$," Phys. Rev. Lett. **108**, 232001 (2012).

- [6] C. P. Shen *et al.* [Belle Collaboration], "Search for double charmonium decays of the P-wave spintriplet bottomonium states," Phys. Rev. D 85, 071102 (2012).
- [7] T. Higuchi *et al.* [Belle Collaboration], "Search for Time-Dependent CPT Violation in Hadronic and Semileptonic B Decays," Phys. Rev. D 85, 071105 (2012).
- [8] M. C. Chang *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of $B^0 \rightarrow J/\psi \eta^{(\prime)}$ and Constraint on the $\eta \eta'$ Mixing Angle," Phys. Rev. D **85**, 091102 (2012).
- [9] B. R. Ko *et al.* [Belle Collaboration], "Evidence for CP Violation in the Decay $D^+ \to K_S^0 \pi^+$," Phys. Rev. Lett. **109**, 021601 (2012).
- [10] M. Rohrken *et al.* [Belle Collaboration], "Measurements of Branching Fractions and Time-dependent CP Violating Asymmetries in $B^0 \to D^{(*)\pm}D^{\mp}$ Decays," Phys. Rev. D **85**, 091106 (2012).
- [11] H. Aihara *et al.* [Belle Collaboration], "First Measurement of ϕ_3 with a Model-independent Dalitz Plot Analysis of $B \to DK$, $D \to K_{\rm S}\pi\pi$ Decay," Phys. Rev. D **85**, 112014 (2012).
- [12] K. Negishi *et al.* [Belle Collaboration], "Search for the decay $B^0 \to DK^{*0}$ followed by $D \to K^-\pi^+$," Phys. Rev. D **86**, 011101 (2012).
- [13] C. P. Shen *et al.* [Belle Collaboration], "First observation of exclusive $\Upsilon(1S)$ and $\Upsilon(2S)$ decays into light hadrons," Phys. Rev. D **86**, 031102 (2012).
- [14] S. Uehara *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of $\gamma\gamma^* \to \pi^0$ transition form factor at Belle," Phys. Rev. D **86**, 092007 (2012).
- [15] J. Dalseno *et al.* [BELLE Collaboration], "Measurement of Branching Fraction and First Evidence of CP Violation in $B^0 \rightarrow a_1^{\pm}(1260)\pi^{\mp}$ Decays," Phys. Rev. D **86**, 092012 (2012).
- [16] R. Mizuk *et al.* [Belle Collaboration], "Evidence for the $\eta_b(2S)$ and observation of $h_b(1P) \rightarrow \eta_b(1S)\gamma$ and $h_b(2P) \rightarrow \eta_b(1S)\gamma$," Phys. Rev. Lett. **109**, 232002 (2012).
- [17] J. H. Kim *et al.* [Belle Collaboration], "Search for $B \rightarrow \phi \pi$ decays," Phys. Rev. D **86**, 031101 (2012).
- [18] C. C. Zhang *et al.* [Belle Collaboration], "First study of η_c , $\eta(1760)$ and X(1835) production via $\eta' \pi^+ \pi^-$ final states in two-photon collisions," Phys. Rev. D **86**, 052002 (2012).
- [19] Y. Miyazaki *et al.* [Belle Collaboration], "Search for Lepton-Flavor-Violating and Lepton-Number-Violating $\tau \rightarrow \ell h h'$ Decay Modes," Phys. Lett. B **719**, 346 (2013).
- [20] C. L. Hsu *et al.* [Belle Collaboration], "Search for B^0 decays to invisible final states," Phys. Rev. D **86**, 032002 (2012).

- [21] B. Kronenbitter *et al.* [Belle Collaboration], "First observation of CP violation and improved measurement of the branching fraction and polarization of $B^0 \rightarrow D^{*+}D^{*-}$ decays," Phys. Rev. D 86, 071103 (2012).
- [22] J. Stypula *et al.* [Belle Collaboration], "Evidence for $B^- \to D_s^+ K^- \ell^- \bar{\nu}_\ell$ and search for $B^- \to D_s^{*+} K^- \ell^- \bar{\nu}_\ell$," Phys. Rev. D 86, 072007 (2012).
- [23] S. Esen *et al.* [Belle Collaboration], "Precise measurement of the branching fractions for $B_s \rightarrow D_s^{(*)+}D_s^{(*)-}$ and first measurement of the $D_s^{*+}D_s^{*-}$ polarization using e^+e^- collisions," Phys. Rev. D **87**, 031101(R) (2013).
- [24] Y. -T. Duh *et al.* [Belle Collaboration], "Measurements of Branching Fractions and Direct CP Asymmetries for $B \to K\pi$, $B \to \pi\pi$ and $B \to KK$ Decays," Phys. Rev. D 87, 031103(R) (2013).
- [25] U. Tamponi *et al.* [Belle Collaboration], "Study of the Hadronic Transitions $\Upsilon(2S) \rightarrow (\eta, \pi^0)\Upsilon(1S)$ at Belle," Phys. Rev. D 87, 011104(R) (2013).
- [26] X. L. Wang *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of $\psi(4040)$ and $\psi(4160)$ decay into $\eta J/\psi$," Phys. Rev. D 87, 051101(R) (2013).
- [27] I. Adachi *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of $B^- \to \tau^- \bar{\nu}_{\tau}$ with a Hadronic Tagging Method Using the Full Data Sample of Belle," Phys. Rev. Lett. **110**, 131801 (2013).
- [28] B. R. Ko *et al.* [Belle Collaboration], "Search for CP Violation in the Decay $D^+ \to K^0_S K^+$," JHEP **1302**, 098 (2013).
- [29] H. Miyatake, A. J. Nishizawa, M. Takada, R. Mandelbaum, S. Mineo, H. Aihara, D. N. Spergel and S. J. Bickerton *et al.*, "Subaru weak-lensing measurement of a z = 0.81 cluster discovered by the Atacama Cosmology Telescope Survey," Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **429** 3627–3644 (2013).
- [30] H. Miyatake, H. Fujimori, H. Aihara, S. Mineo, S. Miyazaki, H. Nakaya, T. Uchida, "Back-End Readout Electronics for Hyper Suprime-Cam," IEEE Transactions on Nuclear Science, **59** 1767– 1771 (2012).
- [31] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Measurements of the T2K neutrino beam properties using the INGRID on-axis near detector," Nucl. Instrum. Meth. A 694, 211 (2012).
- [32] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "First Muon-Neutrino Disappearance Study with an Off-Axis Beam," Phys. Rev. D 85, 031103 (2012).
- [33] K. Ueno *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Search for GUT Monopoles at Super-Kamiokande," Astropart. Phys. **36**, 131 (2012).
- [34] H. Nishino *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Search for Nucleon Decay into Charged Anti-lepton plus Meson in Super-Kamiokande I and II," Phys. Rev. D 85, 112001 (2012).

- [35] P. A. Amaudruz *et al.* [T2K ND280 FGD Collaboration], "The T2K Fine-Grained Detectors," Nucl. Instrum. Meth. A **696**, 1 (2012).
- [36] C. Regis *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Search for Proton Decay via $p \to \mu^+ K^0$ in Super-Kamiokande I, II, and III," Phys. Rev. D 86, 012006 (2012).
- [37] G. Cheng *et al.* [MiniBooNE and SciBooNE Collaborations], "Dual baseline search for muon antineutrino disappearance at $0.1 \text{eV}^2 < \Delta m^2 < 100 \text{eV}^2$," Phys. Rev. D **86**, 052009 (2012).
- [38] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "The T2K Neutrino Flux Prediction," Phys. Rev. D 87, 012001 (2013).

(会議抄録)

[39] Yoshiyuki Onuki, "SuperB and Belle II prospects on direct CP violation measurements," Proceedings of 7th International Workshop on the CKM Unitarity Triangle, Sep. 28–Oct. 2, 2012, Cincinnati, Ohio, USA.

(その他)

[40] J. L. Hewett *et al.*, "Fundamental Physics at the Intensity Frontier," arXiv:1205.2671 [hep-ex].

(国内雑誌)

 [41] 宮武広直,相原博昭,「いよいよ動き出した Hyper Suprime-Cam」,高エネルギーニュース,第31巻3 号

(学位論文)

[42] 金沢康孝, 修士論文: "Measurement of absorption and charge exchange cross sections in π⁺-N scattering" (2013 年 2 月)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [43] Denis Epifanov, "Belle pion form factor in tauola," Tau lepton decays workshop: hadronic currents from Belle BaBar data and LHC signatures, May 14–19 2012, Institute of Nuclear Physics, Cracow, Poland.
- [44] Denis Epifanov, "CP violation in charm and tau at B-factories," 24th Rencontres de Blois, Particle Physics and Cosmology, May 27–June 1 2012, Blois, France.
- [45] Yoshiyuki Onuki, "SuperB and BelleII prospects on direct CP violation measurements," 7th International Workshop on the CKM Unitarity Triangle, Sep. 28–Oct. 2, 2012, Cincinnati, Ohio, USA.
- [46] Masashi Yokoyama, "Development of Large Aperture Hybrid Photodetector," Cosmic Frontier Workshop, Mar. 6–8 2013, SLAC, USA.

招待講演

- [47] Masashi Yokoyama, "Future Water Cherenkov Detectors," The XXV International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (NEU-TRINO2012), June 3-9 2012, Kyoto, Japan.
- [48] Masashi Yokoyama, "Developments in Asia," Intensity Frontier Neutrino subgroup meeting, Mar. 6–7 2013, SLAC, USA.

(国内会議)

一般講演

- [49] 金沢康孝,「T2K 実験のための荷電 π 中間子反応断面 積測定 7」,日本物理学会 2012 年秋季大会,2012 年 9月 11-14 日,京都産業大学
- [50] 須田祐介、「ハイパーカミオカンデ用ハイブリッド光 検出器の実用性評価」、第19回 ICEPP シンポジウ ム、2013年2月18日
- [51] 峯尾聡吾,「重力レンズ3点相関関数を用いたX線銀 河団の暗黒物質の形状の制限」,日本天文学会2013 年春季年会,2013年3月20日
- [52] 須田祐介,「ハイパーカミオカンデ用ハイブリッド光 検出器開発 実証試験に向けた特性評価」,日本物理 学会第68回年次大会、2013年3月26-29日,広島 大学
- [53] 横山将志,「J-PARC-ハイパーカミオカンデ長基線ニ ュートリノ振動実験による CP 非対称性測定感度の 研究」,同上
- [54] 清水信宏,「BelleII 実験シリコンストリップ型半導体 崩壊点検出器の量産開発手法の研究」,同上
- [55] 金沢康孝,「T2K 実験のための荷電 π 中間子反応断面 積測定 10」,同上

招待講演

- [56] 横山将志,「T2K 実験の最新結果と今後の展望」,素 粒子物理学の進展 2012,京都大学基礎物理学研究所, 2012 年 7 月 19 日
- [57] 横山将志,「MPPC/PPD 過去,現在,未来」,第4 回次世代光センサーワークショップ& EASIROC 研 究会,大阪大学,2012年12月25-26日
- [58] 横山将志、「ニュートリノ実験将来計画」、日本学術会 議素粒子物理・原子核物理分野の「大型施設計画・ 大規模研究計画マスタープラン」に関するシンポジ ウム、日本学術会議講堂、2013年2月8日
- [59] 横山将志,「加速器ニュートリノ実験,など」,GCOE 「未来を拓く物理科学結集教育拠点」第9回 RA キャ ンプ,熱海,2013 年 2 月 20-22 日

(その他)

[60] 相原博昭、「学術行政と学術会議」、日本学術会議「学術と社会及び政府との関係改革検証分科会」 平成 25年3月22日



図 2.5.28: LHC 加速器

2.5 浅井研究室

本研究室は、「真空の構造の解明」、「力の統一の 実現」等を目指して、エネルギーフロンティア加速 器実験と非加速器実験の両面から研究を行っている。 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粒子や余剰次元の 探索で主導的な役割を果たしてきた。これと並んで 小規模な非加速器実験を多数展開し、標準理論を超 えた新しい素粒子現象の探索を二つの異なる角度か ら行っている。特に、光を使った素粒子実験の開拓 を目指している。

2.5.1 LHC・ATLAS 実験での研究

世界最高エネルギー加速器実験 LHC(写真 2.5.28) は、2010年より重心系エネルギー7TeVでの運用が 開始され、TeV (テラ電子ボルト)領域の研究の新た な時代が始まった。2012年 LHC 加速器は重心系エネ ルギー8TeV で運転され最終的には、最終のデザイン ルミノシティーとほぼ等しい (7.6×10³³cm⁻²s⁻¹)に まで達し、積算ルミノシティー、21 fb^{-1} 以上のデー タを観測した。

本研究室は、**ヒッグス粒子の発見**と超対称性粒子の探索に大きな成果をあげた。

ヒッグス粒子発見

ヒッグス粒子は標準理論の枠組みの中で唯一未発 見の粒子であり、素粒子の質量の起源と考えられて いる。

2012年中には、ヒッグス粒子についてはっきりとした結論が得られる。ヒッグスの研究を通して、「真空がもつ豊かな構造」を解明され、素粒子研究における「真空」の役割が重要となるだろう。これまで、容れ物で脇役だった真空が研究の中心になる。

軽いヒッグス粒子は、 発見感度の高い順番に $H \rightarrow \gamma\gamma, H \rightarrow ZZ(\rightarrow 4l) H \rightarrow W^+W^-(\rightarrow l\nu l\nu), H \rightarrow \tau\tau, H \rightarrow b\bar{b}, 05 つのチャンネルが重要なモードである。我々のグループは、<math>\gamma\gamma,\tau\tau$ 及びWW 03 つのモードに絞って研究を行いっている。この3つのチャンネルは、ヒッグス粒子のスピンやフェルミオ

ンとの湯川結合の存在の有無などいろいろな情報が 含まれている。この3つモードのヒッグスの研究は、 ヒッグスの発見のみならず、ヒッグス粒子の性質や 標準理論の様々な素粒子の質量起源を解明する上で 鍵となるものである。

図 2.5.29 に $H \rightarrow \gamma\gamma$ モードの探索結果を示す。 観測された候補事象と、横軸は観測された γ 線の運 動量から再構成した質量である。バックグラウンド は、連続分布になるのに対し、ヒッグス粒子の崩壊 で出てきた場合は、ヒッグス粒子の質量に信号が観 測される。γ線のエネルギー測定精度が高いため、質 量測定の分解能が高く ($\sigma = 1.7 \ GeV$)、シャープな ピークが期待できる。図に示すように、126GeV に きれいなピークが観測された。統計的な有意さは8 σ であり $H \rightarrow \gamma \gamma$ のみで充分な確度である。 γ 線 2 つに崩壊していることより、親の粒子のスピンは0 か2に限定できる。スピン1のグルオン対から出来 ているため、スピン2の場合は、γ線はもともとの グルオンの方向に出やすくなる。一方スピン0だっ た場合は、方向(角度)の情報が失われるため、 y 線は等方的に出る。実験データはスピン0を支持し ており、ヒッグス粒子の性質と一致する。



図 2.5.29: ヒッグス粒子が γγ に崩壊したモード: 観 測された事象、再構成した γγ 質量分布

 $H \rightarrow ZZ(\rightarrow 4l)$ も、 $\gamma\gamma$ 同様に質量測定の分解能 が高く ($\sigma = 3 \; GeV$)、シャープなピークが期待でき る。更に、再構成された質量が 180GeV 以下の領域 は、バックグランドが少なく、感度が高いチャンネ ルである反面、崩壊分岐比が少ないので多くのデー タが必要である。きれいなピークが125~6GeVに観 測された。まだ統計量が少ないため、質量の中心値 などの誤差が大きいが、ヒッグス粒子から期待され ている量のきれいなピークである。4つのレプトン の方向の相関から親粒子のスピンやパリティーの測 定が可能であり、スカラー(スピン0パリティー変 換に対して正)であることが分かった。

図 2.5.30 に $H \to W^+W^-(\to l\nu l\nu)$ モードの探 索結果を示す。このチャンネルは、 ν が二つ放出され るため、不変質量を再構成できず、横方向質量 MT を用いる。このため綺麗なピークにならず広がった分 布になり、感度が低くなる。二つのレプトン以外に、 ジェットを伴わないもの(0jet モード)と1つジェッ トを伴うもの(1jet モード)に分けてある。0jet モー ドはグルオン融合過程(GF)で生成された信号が主 で、バックグラウンドは、W+W- が主である。-方 1jet モードは、GF ばかりでなくベクターボソン 融合過程 (VBF) の信号も寄与する。またバックグラ ウンドは、W+W- ばかりでなくトップクォークペ アー生成も効いてくる。異なるバックグラウンド環 境である点が重要である。図 2.5.30 の示す様に、期 待どおりの強さでヒッグスの信号が観測された。信 号の確度は、このチャンネル単体で3.8σであり、こ の3番目に感度の高いチャンネルでも確実に信号が 捉えられた。



図 2.5.30: ヒッグス粒子が W⁺W⁻ に崩壊した時の 横方向質量分布 (a)0jet モード (b)1jet モード

超対称性粒子探索

超対称性は、力の統一を実現する上で鍵となる性 質であり、LHCでの発見が大いに期待されている。 一番軽い超対称性粒子は宇宙の暗黒物質の良い候補 であり、物質と反応しないで検出器を通り抜けてし まう。そのため横方向消失運動量(mE_T と呼ぶ)が 特徴であり、バックグラウンドと比べて超対称性粒 子の信号は大きな mE_T を持っている。更に、信号 からは高い横向き運動量(P_T)を持った複数のジェッ トが放出される特徴があるので、 mE_T とジェットの P_T のスカラー和(M_{eff})も、信号はバックグラウン ドに比べて高くなる。

超対称性粒子の信号の特徴は、超対称性粒子質量 スペクトラムや崩壊パターンでいろいろ考えられる。 我々の研究室は、以下の4つの探索チャンネルの研 究をおこなった。実験データからバックグラウンド を評価する方法を開発し、感度の高い探索を行った。

- 1. レプトンを含まず、ジェットと m E_T が信号
- レプトンを含み、それ以外にジェットと m E_T が信号
- 3. b クォークを含む信号 (スカラークォーク)
- 超対称性粒子の質量スペクトラムが縮退している場合。Initial State Radiation(ISR) ジェットとソフトレプトンが信号

図 2.5.31 にレプトンを含まず、ジェットと m E_T が信号の探索モードの結果を示す。もし、超対称性 粒子 (グルイーノ、スクォークの質量 1.2TeV) が存 在すると図中の点線に示す様に大きな M_{eff} 領域に 信号が期待されるが、実験データはバックグラウン ド (実線) の分布と一致しており、超対称性信号の兆 候は去年のデータには無かった。

重要な4つの探索モード全てで、標準モデルから の有意なズレは観測されなかった。グルイーノは約 1TeV とスカラークォークは、1.6TeV 程度まで棄却 された。スカラークォークが軽い場合には、グルイー ノ、スカラークォーク共に約1.6TeV 程度まで棄却 された。図 2.5.32 にグルイーノとスカラークォーク の質量平面で 2012 年のデータで棄却した領域を示 す。軽い (< 1TeV)の超対称性モデルはこれでかな り厳しくなった。

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

大規模なエネルギーフロンティア加速器実験 (LHC / ATLAS 実験)の対極である、テーブルトップでの 小規模実験も行っている。エネルギーフロンティア 実験が未知の素粒子現象を直接たたき出すのに対し、 テーブルトップ実験では高感度な検出器や、高精度 での測定によって標準理論からのズレを探索し、間 接的に未知の素粒子現象を探る。





図 2.5.31: レプトンを含まない超対称性探索モード で期待される横方向消失運動量とジェットの横運動 量のスカラー和分布 (Meff):共に黒点が 2012 年度実 験したデータ、実線ヒストグラムがバックグラウン ド (標準モデル過程)、点線が期待される信号

強カミリ波源を用いたポジトロニウム超微細構造の 直接測定

電子と陽電子の束縛系であるポジトロニウム (Ps) の基底状態は、スピン状態に応じてオルソポジトロ ニウム (o-Ps、スピン = 1) とパラポジトロニウム (p-Ps、スピン = 0) の二つが存在する。両者のエ ネルギー準位はスピン相互作用によって 0.84 meV (203 GHz) だけ異なり、Ps の超微細構造 (HyperFine Structure、HFS) と呼ばれる。

Ps HFS の値は束縛系 QED を検証する上で重要 であり、過去に多くのグループによって測定されて いるが、いずれも静磁場を印加してゼーマン分裂し た幅から間接的に得られた値である。このため、直 接ミリ波を照射して Ps HFS 遷移をおこし、その値 を測定する検出器を開発している。

検出器の概要を図 2.5.33 に示す。ジャイロトロン から出力されたミリ波をファブリペロー共振器に導 く。共振器中のガスに²²Naの崩壊から放出された 陽電子を照射し、Psを生成する。生成された Ps の うちの o-Ps は共振器中に蓄積された大強度ミリ波 によって p-Ps に遷移し、周囲のガンマ線検出器で 511 keV の単色ガンマ線の増加として観測される。

本年度は、ジャイロトロンの周波数を可変にする ことに成功した。ジャイロトロン内の共振器につい て、径の異なる複数の共振器を用意し、換装するこ とで、それぞれの共振器に応じて、異なる周波数のミ リ波が出力されることを確認した。まず、202.9 GHz において約一週間の測定を行い、HFS 遷移を確認し た。現在、異なる3点分のデータを取得し、解析を 行っている。

今後、より多くの周波数で遷移を測定し、Ps HFS 遷移の共鳴曲線を求め、Ps HFS の値を測定する予



図 2.5.32: グルイーノとスカラークォークの質量平 面で棄却された領域 赤線の左側が今回棄却した領 域 (95%CL)

定である。

ゼーマン効果を利用したポジトロニウム超微細構造 の精密測定

Ps HFS は、1980 年代にゼーマン効果を利用して 3.3 ppm の精度で複数のグループによって測定され ている。しかし、この測定値は束縛系 QED の理論 計算によって得られた値と 15 ppm (3.9σ) もズレて おり、未知の物理現象が寄与している可能性がある。 このズレの原因を解明するために、考えられる系統 誤差を排除した新しい測定を行っている。

この測定では、静磁場 (0.87 T) を印加してゼーマ ン分裂した o-Ps の準位差 (3 GHz) を測定する事で、 間接的に Ps HFS の値を求める。我々は、磁場の不 定性を無くすために KEK 超伝導低温工学センター にある大型精密磁石 (ボア径 80 cm、長さ 2 m) 中に 測定装置全体を設置し、さらにマイクロ波キャビティ のまわりに補償コイルを巻いて Ps 生成領域で ppm の精度の一様磁場を製作した (図 2.5.34)。印加マイ クロ波を一定にしながら磁場を変更するとゼーマン 共鳴が変化し、共鳴の中心値と印加磁場から Ps HFS の値が計算で得られるが、最終的な結果を得る上で はキャビティ内のガスが Ps HFS に与える影響が無 視できない。このため、われわれは複数のガス圧で ゼーマン共鳴曲線を測定し、Ps HFS の真空中での 値を外挿によって得る。現在測定を終了し、解析を 行っている。今までに得た暫定結果を図 2.5.35 に示 す。物質の効果を正しく取り入れて外挿し、2013年 度の早い段階で結論を得る予定である。

オルソポジトロニウム崩壊スペクトルの測定

o-Ps は通常3本のガンマ線に崩壊し、そのガンマ 線のエネルギースペクトルは511 keV を頂点とした ほぼ三角形となる。しかし、このスペクトルはTree level でしか確認されていない。前述のように、Ps HFS は実験と理論でズレており、もしズレが新しい



図 2.5.33: 上: Ps HFS 直接測定のセットアップ。下: ジャイロトンとそのビームプロファイル及び発振周 波数。



図 2.5.34: ゼーマン効果を使用した Ps HFS 測定セッ トアップ



図 2.5.35: Ps HFS の値とキャビティ内のイソブタ ンガス圧との関係。真空での理論値と過去の測定値 も併せて示した。

素粒子現象で引き起こされているとすると、o-Ps の 崩壊スペクトルに変化をもたらす可能性がある。そ こで、O(α)の精度でスペクトルを精密測定し、束縛 系 QED の精密検証を行う。われわれはエネルギー 分解能の良い LaBr₃(Ce) 検出器を用いて崩壊エネル ギースペクトルの精密測定を行った。今後、検出器 のガンマ線に対するレスポンスを精密測定し、O(α) での検証を行う予定である。

放射光施設を用いた光と弱い結合を持つ粒子の探索

標準理論を超えた理論の中には、光子と弱い結合 を持つ軽い粒子の存在を予言するものがいくつかあ り、そのような粒子が仮に存在すれば、非常に高いエ ネルギーでの物理を反映していると考えられている。 われわれは、そのような粒子としてアクシオンやパ ラフォトン、ディラトンを仮定し、放射光施設を用 いて探索実験を行うセットアップを考えた。実験は いわゆる 'light shining through a wall' と呼ばれる 方式であり、未知粒子を介して壁越しに光が伝播す る現象を探索する。本年度は、放射光施設 SPring-8 の BL19LXU ビームラインを用い、Ge 半導体検出 器を用いてパラフォトンを探索した (図 2.5.36)。-週間の測定を行った結果、パラフォトン質量 0.04 eV から 26 keV の領域において、光子・パラフォトン混 合角 χ について、 $\chi < 8.06 \times 10^{-5}$ (95% C.L.) の 地上実験として最も強い制限を与えることに成功し た。今後、同じセットアップに磁石を加えることで、 アクシオンを探索することを計画している。

ミリ波を用いた光と弱い結合を持つ粒子の探索

放射光施設を用いた探索と同様に、ミリ波領域で も、光と弱い結合を持つ粒子の探索を行っている。最 近まで、ミリ波領域では、大強度光源や高感度検出 器が存在しなかったため、ミリ波領域では他の波長 領域に比べて探索が遅れていた。そこで我々は、光 源として、Ps HFS 直接測定で用いているジャイロ



図 2.5.36: 放射光施設を用いたパラフォトン探索の セットアップ。

トロンを使用し、ミリ波高感度検出器として、低温 検出器 (SIS 検出器)を用いた探索を行う。現在、SIS の調整と、ミリ波光学系の設計を行っており、2013 年度中を目処に、ミリ波領域での探索を行う予定で ある。

X線自由電子レーザーを用いた光子・光子散乱の測定

量子電磁力学 (QED) では、古典電磁気学と異な り、光子と光子が相互作用し、散乱することが予言 されている。しかしこの散乱は、断面積が非常に小 さく、未だ観測されておらず、これを観測すること は、云わば「QED の最後の検証」である。そこで、 大強度 X 線自由電子レーザーである SACLA を用 いて、光子・光子散乱を観測する実験を計画してい る。現在、X 線検出器の設計と、光子を交差させる チェンバーの設計を行っており、2013 年夏に最初の 測定を行う予定である。

<受賞>

- [1] 浅井祥仁 学術振興会奨励賞.
- [2] PLHC2012 Poster Awards, Yuichi Sasaki, "Search for supersymmetric particles using final states with one lepton, jets and missing transverse momentum with ATLAS detector" (June 2012).
- [3] 石田明, "若手優秀講演賞", 第 49 回アイソトープ・ 放射線研究発表会, 東京大学, 2012 年 7 月.

<報文>

(原著論文)

- [4] S. Asai, E. Nakamura S.Shirai. Discriminating Minimal SUGRA and Minimal Gauge Mediation Models at the Early LHC, JHEP 1204 003 (2012)
- [5] S.Asai et.al., Direct Measurement of Positronium HyperFine Structure: - A New Horizon of Precision Spectroscopy Using Gyrotron, J Infrared Milli Terahz Waves 33, 766-776 (2012).
- [6] The ATLAS Collaboration, "Search for a fermiophobic Higgs boson in the diphoton decay channel with the ATLAS detector", Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2157.
- [7] The ATLAS Collaboration, "Search for the decay $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ with the ATLAS detector", Phys. Lett. B 713 (2012) 387.

- [8] The ATLAS Collaboration, "Search for Pair Production of a New b' Quark that Decays into a Z Boson and a Bottom Quark with the ATLAS Detector. Search for pair production of a new quark that decays to a Z boson and a bottom quark with the ATLAS detector", Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 071801.
- [9] The ATLAS Collaboration, "Search for resonant WZ production in the $WZ \rightarrow l\nu l'l'$ channel in \sqrt{s} = 7 TeV pp collisions with the ATLAS detector", Phys. Rev. D 85 (2012) 112012.
- [10] The ATLAS Collaboration, "Search for charged Higgs bosons decaying via $H^{\pm} \to \tau \nu$ in $t\bar{t}$ events using pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector. Search for charged Higgs bosons decaying via $H^{\pm} \to \tau \nu$ in top quark pair events using pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", J. High Energy Phys. 06 (2012) 039.
- [11] The ATLAS Collaboration, "Search for supersymmetry with jets, missing transverse momentum and at least one hadronically decaying tau lepton in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Lett. B 714 (2012) 197-214.
- [12] The ATLAS Collaboration, "Searches for TeVscale Gravity Signatures in Final States with Leptons and Jets with the ATLAS Detector at $\sqrt{s} =$ 7 TeV", Phys. Lett. B 716 (2012) 122-141.
- [13] The ATLAS Collaboration, "Search for supersymmetry in events with three leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector", Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 261804.
- [14] The ATLAS Collaboration, "Measurement of τ polarization in $W \rightarrow \tau \nu$ decays with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2062.
- [15] The ATLAS Collaboration, "Search for scalar top quark pair production in natural gauge mediated supersymmetry models with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", Phys. Lett. B 715 (2012) 44-60.
- [16] The ATLAS Collaboration, "Search for lepton flavour violation in the $e\mu$ continuum with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions at the LHC", Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2040.
- [17] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the top quark pair cross section with ATLAS in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using final states with an electron or a muon and a hadronically decaying τ lepton", Phys. Lett. B 717 (2012) 89-108.
- [18] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the W boson polarization in top quark decays with the ATLAS detector", J. High Energy Phys. 06 (2012) 088.

- [19] The ATLAS Collaboration, "Measurement of $W\gamma$ and $Z\gamma$ production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV and limits on anomalous triple gauge couplings with the ATLAS detector", Phys. Lett. B 717 (2012) 49-69.
- [20] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the t-channel single top-quark production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Lett. B 717 (2012) 330-350.
- [21] The ATLAS Collaboration, "Search for the resonances in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 081801.
- [22] The ATLAS Collaboration, "A search for $t\bar{t}$ resonances with the ATLAS detector in 2.05 fb⁻¹ of proton-proton collisions at $\sqrt{\langle s \rangle} = 7$ TeV", Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2083.
- [23] The ATLAS Collaboration, "Evidence for the associated production of a W boson and a top quark in ATLAS at $\sqrt{s} = 7$ TeV", Phys. Lett. B 716 (2012) 142-159.
- [24] The ATLAS Collaboration, "Search for a Standard Model Higgs boson in the $H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+ l^- \nu \bar{\nu}$ decay channel using 4.7 fb⁻¹ of $\sqrt{s} = 7$ TeV data with the ATLAS detector", Phys. Lett. B 717 (2012) 29-48.
- [25] The ATLAS Collaboration, "A search for flavour changing neutral currents in top-quark decays in pp collision data collected with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 7$ TeV", J. High Energy Phys. 09 (2012) 139.
- [26] The ATLAS Collaboration, "Search for the Standard Model Higgs boson in the $H \to WW^{(*)} \to l\nu l\nu$ decay mode with 4.7 fb⁻¹ of ATLAS data at $\sqrt{s} = 7$ TeV", Phys. Lett. B 716 (2012) 62-81.
- [27] The ATLAS Collaboration, "Hunt for new phenomena using large jet multiplicities and missing transverse momentum with ATLAS in 4.7 fb⁻¹ of $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions", J. High Energy Phys. 07 (2012) 167.
- [28] The ATLAS Collaboration, "Measurement of event shapes at large momentum transfer with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2211.
- [29] The ATLAS Collaboration, "Search for a Standard Model Higgs boson in the mass range 200-600 GeV in the $H \to ZZ \to l^+ l^- q\bar{q}$ decay channel with the ATLAS detector", Phys. Lett. B 717 (2012) 70.
- [30] T. Yamazaki, A. Miyazaki, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, I. Ogawa, T. Idehara, and S. Sabchevski, "Direct Observation of the Hyperfine Transition of Ground-State Positronium", Phys. Rev. Lett. 108, 253401 (2012).

- [31] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the b-hadron production cross section using decays to $D^{*+}\mu^- X$ final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Nucl. Phys. B 864 (2012) 341-381.
- [32] The ATLAS Collaboration, "ATLAS measurements of the properties of jets for boosted particle searches", Phys. Rev. D 86 (2012) 072006.
- [33] The ATLAS Collaboration, "Search for the Higgs boson in the $H \to WW \to l\nu j j$ decay channel at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Lett. B 718 (2012) 391-410.
- [34] The ATLAS Collaboration, "Search for the Standard Model Higgs boson in the $H \to \tau^+ \tau^-$ decay mode in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with ATLAS", J. High Energy Phys. 09 (2012) 070.
- [35] The ATLAS Collaboration, "Search for the Standard Model Higgs boson produced in association with a vector boson and decaying to a b-quark pair with the ATLAS detector", Phys. Lett. B 718 (2012) 369-390.
- [36] The ATLAS Collaboration, "Combined search for the Standard Model Higgs boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Rev. D 86 (2012) 032003.
- [37] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the Λ_b^0 lifetime and mass in the ATLAS experiment", arXiv:1207.2284.
- [38] The ATLAS Collaboration, "A search for $t\bar{t}$ resonances in lepton+jets events with highly boosted top quarks collected in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", J. High Energy Phys. 09 (2012) 041.
- [39] The ATLAS Collaboration, "Search for top and bottom squarks from gluino pair production in final states with missing transverse energy and at least three b-jets with the ATLAS detector", Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2174.
- [40] The ATLAS Collaboration, "Measurements of top quark pair relative differential cross-sections with ATLAS in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", Eur. Phys. J. C 73 (2012) 2261.
- [41] The ATLAS Collaboration, "Search for magnetic monopoles in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector", Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 261803.
- [42] The ATLAS Collaboration, "Measurement of charged-particle event shape variables in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton interactions with the ATLAS detector", arXiv:1207.6915.
- [43] The ATLAS Collaboration, "Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC", Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29.

- [44] The ATLAS Collaboration, "Underlying event characteristics and their dependence on jet size of charged-particle jet events in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Rev. D 86 (2012) 072004.
- [45] The ATLAS Collaboration, "Time-dependent angular analysis of the decay $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ and extraction of $\Delta\Gamma_s$ and the CP-violating weak phase ϕ_s by ATLAS", J. High Energy Phys. 12 (2012) 072.
- [46] The ATLAS Collaboration, "Search for squarks and gluinos with the ATLAS detector in final states with jets and missing transverse momentum using 4.7 fb⁻¹ of $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collision data", arXiv:1208.0949.
- [47] The ATLAS Collaboration, "Measurement of $W^{\pm}Z$ production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2173.
- [48] The ATLAS Collaboration, "Search for a supersymmetric partner to the top quark in final states with jets and missing transverse momentum at \sqrt{s} = 7 TeV with the ATLAS detector", Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 211802.
- [49] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the jet radius and transverse momentum dependence of inclusive jet suppression in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector. Jet size dependence of single jet suppression in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector at the LHC", arXiv:1208.1967.
- [50] The ATLAS Collaboration, "Search for displaced muonic lepton jets from light Higgs boson decay in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", arXiv:1210.0435.
- [51] The ATLAS Collaboration, "Search for direct top squark pair production in final states with one isolated lepton, jets, and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions using 4.7 fb⁻¹ of ATLAS data", Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 211803.
- [52] The ATLAS Collaboration, "Search for new phenomena in the $WW \rightarrow l\nu l'\nu'$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Lett. B 718 (2012) 860-878.
- [53] The ATLAS Collaboration, "Search for direct slepton and gaugino production in final states with two leptons and missing transverse momentum with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", Phys. Lett. B 718 (2012) 879-901.
- [54] The ATLAS Collaboration, "Search for direct production of charginos and neutralinos in events with three leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector", Phys. Lett. B 718 (2012) 841-859.

- [55] The ATLAS Collaboration, "Search for light scalar top-quark pair production in final states with two leptons with the ATLAS detector in \sqrt{s} = 7 TeV proton-proton collisions", Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2237.
- [56] The ATLAS Collaboration, "Further search for supersymmetry at $\sqrt{s} = 7$ TeV in final states with jets, missing transverse momentum and isolated leptons with the ATLAS detector", Phys. Rev. D 86 (2012) 092002.
- [57] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the flavour composition of dijet events in pp collisions at \sqrt{s} =7 TeV with the ATLAS detector", arXiv:1210.0441.
- [58] The ATLAS Collaboration, "Measurements of the pseudorapidity dependence of the total transverse energy in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS", J. High Energy Phys. 11 (2012) 033.
- [59] The ATLAS Collaboration, "Search for diphoton events with large missing transverse momentum in 7 TeV proton-proton collision data with the ATLAS detector", Phys. Lett. B 718 (2012) 411-430.
- [60] The ATLAS Collaboration, "Search for light top squark pair production in final states with leptons and b-jets with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions", Phys. Lett. B 720 (2012) 13-31.
- [61] The ATLAS Collaboration, "Search for high-mass resonances decaying to dilepton final states in pp collisions at a center-of-mass energy of 7 TeV with the ATLAS detector", arXiv:1209.2535.
- [62] The ATLAS Collaboration, "Search for a heavy top-quark partner in final states with two leptons with the ATLAS detector at the LHC", J. High Energy Phys. 11 (2012) 094.
- [63] The ATLAS Collaboration, "ATLAS search for a heavy gauge boson decaying to a charged lepton and a neutrino in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2241.
- [64] The ATLAS Collaboration, "Search for dark matter candidates and large extra dimensions in events with a photon and missing transverse momentum in pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Rev. Lett. 110 (2012) 011802.
- [65] The ATLAS Collaboration, "Search for resonant top quark plus jet production in $t\bar{t}$ +jets events with the ATLAS detector in pp collisions at \sqrt{s} = 7 TeV", Phys. Rev. D 86 (2012) 091103.
- [66] The ATLAS Collaboration, "Search for Supersymmetry in Events with Large Missing Transverse Momentum, Jets, and at Least One Tau Lepton in 7 TeV Proton-Proton Collision Data with the ATLAS Detector", Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2215.

- [67] The ATLAS Collaboration, "ATLAS search for new phenomena in dijet mass and angular distributions using pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV", arXiv:1210.1718.
- [68] The ATLAS Collaboration, "Search for direct chargino production in anomaly-mediated supersymmetry breaking models based on a disappearing-track signature in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector", arXiv:1210.2852.
- [69] The ATLAS Collaboration, "Measurement of W^+W^- production in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous WWZ and WW_{γ} couplings", arXiv:1210.2979.
- [70] The ATLAS Collaboration, "Search for R-parityviolating supersymmetry in events with four or more leptons in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector", J. High Energy Phys. 12 (2012) 124.
- [71] The ATLAS Collaboration, "Search for dark matter candidates and large extra dimensions in events with a jet and missing transverse momentum with the ATLAS detector", arXiv:1210.4491.
- [72] The ATLAS Collaboration, "Search for anomalous production of prompt like-sign lepton pairs at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", J. High Energy Phys. 12 (2012) 007.
- [73] The ATLAS Collaboration, "Search for pair production of massive particles decaying into three quarks with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions at the LHC", J. High Energy Phys. 12 (2012) 086.
- [74] The ATLAS Collaboration, "Search for pairproduced massive coloured scalars in four-jet final states with the ATLAS detector in proton-proton collisions at sqrt(s) = 7 TeV", arXiv:1210.4826.
- [75] The ATLAS Collaboration, "Search for doublycharged Higgs bosons in like-sign dilepton final states at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2244.
- [76] The ATLAS Collaboration, "Search for pair production of heavy top-like quarks decaying to a high- p_T W boson and a b quark in the lepton plus jets final state at $\sqrt{s}=7$ TeV with the AT-LAS detector", arXiv:1210.5468.
- [77] The ATLAS Collaboration, "Search for the neutral Higgs bosons of the Minimal Supersymmetric Standard Model in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector", arXiv:1211.6956.
- [78] The ATLAS Collaboration, "Measurement of angular correlations in Drell-Yan lepton pairs to probe $Z/\gamma*$ boson transverse momentum at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Lett., B 720 (2012) 32.

- [79] The ATLAS Collaboration, "Jet energy resolution in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV recorded in 2010 with the ATLAS detector", arXiv:1210.6210.
- [80] The ATLAS Collaboration, "Measurement of Z boson Production in Pb+Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV with the ATLAS Detector", arXiv:1210.6486.
- [81] The ATLAS Collaboration, "A search for highmass resonances decaying to tau+tau- in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", arXiv:1210.6604.
- [82] The ATLAS Collaboration, "Search for longlived, heavy particles in final states with a muon and multi-track displaced vertex in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector", arXiv:1210.7451.
- [83] The ATLAS Collaboration, "Search for Extra Dimensions in diphoton events using proton-proton collisions recorded at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the AT-LAS detector at the LHC", arXiv:1210.8389.
- [84] The ATLAS Collaboration, "Search for supersymmetry in events with photons, bottom quarks, and missing transverse momentum in protonproton collisions at a centre-of-mass energy of 7 TeV with the ATLAS detector", arXiv:1211.1167.
- [85] The ATLAS Collaboration, "Search for contact interactions and large extra dimensions in dilepton events from pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Rev. D 87 (2012) 015010.
- [86] The ATLAS Collaboration, "Searches for heavy long-lived sleptons and R-Hadrons with the AT-LAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", Phys. Lett. B 720 (2012) 277-308.
- [87] The ATLAS Collaboration, "Measurement of isolated-photon pair production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", J. High Energy Phys. 01 (2012) 086.
- [88] The ATLAS Collaboration, "Search for resonances decaying into top-quark pairs using fully hadronic decays in pp collisions with ATLAS at $\sqrt{s} = 7$ TeV", arXiv:1211.2202.
- [89] The ATLAS Collaboration, "Measurement of ZZ production in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV and limits on anomalous ZZZ and ZZ γ couplings with the ATLAS detector", arXiv:1211.6096.
- [90] The ATLAS Collaboration, "Search for new phenomena in events with three charged leptons at a center-of-mass energy of 7 TeV with the ATLAS detector", arXiv:1211.6312.
- [91] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in the tau+jets channel using the ATLAS detector", arXiv:1211.7205.

- [92] The ATLAS Collaboration, "Measurement of Upsilon production in 7 TeV pp collisions at AT-LAS", arXiv:1211.7255.
- [93] The ATLAS Collaboration, "Search for a heavy narrow resonance decaying to $e\mu, e\tau$, or $\mu\tau$ with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions at the LHC", arXiv:1212.1272.
- [94] The ATLAS Collaboration, "Search for charged Higgs bosons through the violation of lepton universality in $t\bar{t}$ events using pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment", arXiv:1212.3572.
- [95] The ATLAS Collaboration, "Observation of Associated Near-side and Away-side Longrange Correlations in $\sqrt{s_{NN}}$ =5.02 TeV Protonlead Collisions with the ATLAS Detector", arXiv:1212.5198.
- [96] The ATLAS Collaboration, "A search for prompt lepton-jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Lett. B 719 (2012) 299-317.
- [97] The ATLAS Collaboration, "Multi-channel search for squarks and gluinos in $\sqrt{s}=7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector", arXiv:1212.6149.
- [98] The ATLAS Collaboration, "Search for single b*quark production with the ATLAS detector at $\sqrt{s}=7$ TeV", arXiv:1301.1583.
- [99] The ATLAS Collaboration, "Search for longlived, multi-charged particles in pp collisions at \sqrt{s} =7 TeV using the ATLAS detector", arXiv:1301.5272.
- [100] T. Inada, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, Y. Tanaka, K. Tamasaku, K. Sawada, and T. Ishikawa, "Results of a Search for Paraphotons with Intense X-ray Beams at SPring-8", arXiv:1301.6557 (2013).
- [101] The ATLAS Collaboration, "Measurement of hard double-parton interactions in $W(\rightarrow l\nu)+2$ jet events at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector", arXiv:1301.6872.
- [102] The ATLAS Collaboration, "A Particle Consistent with the Higgs Boson Observed with the AT-LAS Detector at the Large Hadron Collider", Science 338 (2013) 1576-1582.
- [103] The ATLAS Collaboration, "Measurements of $W\gamma$ and $Z\gamma$ production in pp collisions at $\sqrt{s}=$ 7 TeV with the ATLAS detector at the LHC", arXiv:1302.1283.
- [104] The ATLAS Collaboration, "Measurement of k_T splitting scales in $W \rightarrow l\nu$ events at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector", arXiv:1302.1415.
- [105] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the cross-section for W boson production in association with b-jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", arXiv:1302.2929.

- [106] The ATLAS Collaboration, "Search for a light charged Higgs boson in the decay channel $H^+ \rightarrow c\bar{s}$ in $t\bar{t}$ events using pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", arXiv:1302.3694.
- [107] The ATLAS Collaboration, "Search for WH production with a light Higgs boson decaying to prompt electron-jets in proton-proton collisions at \sqrt{s} =7 TeV with the ATLAS detector", arXiv:1302.4403.
- [108] The ATLAS Collaboration, "Improved luminosity determination in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector at the LHC", arXiv:1302.4393.
- [109] The ATLAS Collaboration, "Characterisation and mitigation of beam-induced backgrounds observed in the ATLAS detector during the 2011 proton-proton run", arXiv:1303.0223.
- [110] The ATLAS Collaboration, "Search for third generation scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", arXiv:1303.0526.
- [111] The ATLAS Collaboration, "Measurement with the ATLAS detector of multi-particle azimuthal correlations in p+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ =5.02 TeV", arXiv:1303.2084.
- (会議抄録)
- [112] T. Suehara, K. Owada, A. Miyazaki, T. Yamazaki, S. Asai, and T. Kobayashi, "Hidden particle search using Sub-THz gyrotron", Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2012 37th International Conference on, 1 (2012).
- [113] T. Yamazaki, A. Miyazaki, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, Y. Tatematsu, I. Ogawa, and T. Idehara, "Direct measurement of the hyperfine structure of the ground state positronium using high power sub-THz radiation", Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2012 37th International Conference on, 1 (2012).
- [114] A. Miyazaki, T. Yamazaki, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, Y. Tatematsu, I. Ogawa, and T. Idehara, "The sub-THz direct spectroscopy of positronium hyperfine splitting", Journal of Physics: Conference Series (accepted).
 - (国内雑誌)
- [115] 浅井祥仁 . 新粒子発見, ヒッグス粒子か? パリティー 2012 年 12 月号
- [116] 浅井祥仁, ヒッグス粒子に迫る、日本物理学会誌 67 (2012) 367

(学位論文)

- [117] 博士論文, 東裕也, "Search for Long-lived Chargino with Anomaly-Mediated Supersymmetry Breaking Scenarios in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV".
- [118] 博士論文,山口博史, "Search for Supersymmetry and Universal Extra Dimensions with Degenerate Mass Spectrum in Proton-Proton Collisions at \sqrt{s} = 7 TeV".
- [119] 修士論文, 大和田健太, "ミリ波を用いた弱結合未知 粒子の探索".
- [120] 修士論文, 森永真央, "LHC-ATLAS 実験における H $\rightarrow \tau^+ \tau^- \rightarrow l^+ l^- + 4\nu$ を用いた標準模型 Higgs 粒 子の探索".

(著書)

[121] 浅井祥仁 (2012), "ヒッグス粒子の謎", 祥伝社新書.

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [122] S.Asai Highlight topics of LHC October AEPSHEP2012
- [123] A. Miyazaki, "The direct spectroscopy of positronium hyperfine structure using sub-THz gyrotron", International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT2012), Japan, November 2012.

一般講演

- [124] A. Miyazaki, "The sub-THz direct spectroscopy of positronium hyperfine splitting", 16th International Conference on Positron Annihilation (ICPA-16), UK, August 2012.
- [125] M. Morinaga, "Search for the Standard Model Higgs Boson in the H to $\tau^+\tau^-$ to lepton-lepton Decay Mode with the ATLAS Detector" (Poster), The 12th International Workshop on Tau Lepton Physics (TAU2012), Japan, September 2012.

(国内会議)

招待講演

[126] 浅井祥仁 LHC の最新成果 7月基研

一般講演

- 第 49 回アイソトープ・放射線研究発表会:東京大 学:2012 年 7 月
- [127] 大和田健太, "オルソポジトロニウム崩壊におけるガ ンマ線スペクトル測定".
- [128] 石田明, "ポジトロニウム超微細構造の精密測定".
- [129] 宮崎彬, "ポジトロニウム超微細構造の直接測定".

日本物理学会秋季大会:京都産業大学:2012 年 9 月

[130] 宮崎彬, "ポジトロニウム超微細構造の直接測定 II (ミリ波共振器)".

- [131] 石田明, "ポジトロニウム超微細構造の精密測定".
- [132] 森永真央, "LHC-ATLAS 実験における $H \rightarrow \tau \tau \rightarrow ll$ を用いたヒッグス粒子の探索".
- [133] 川西裕基, "LHC ATLAS 検出器アップグレードに 向けたマイクロメガスのビームテストの結果報告".
- [134] 佐々木雄一, "LHC-ATLAS 実験における 1 レプト ンモードでの超対称性粒子の探索".
- 陽電子科学とその理工学への応用:京都大学原子炉実験 所:2012 年 11 月
- [135] 石田明, "ポジトロニウム超微細構造の精密測定".
- [136] 宮崎彬, "ポジトロニウム超微細構造の直接測定の現 状".

日本物理学会:第68回年次大会:広島大学:2013年3月

- [137] 宮崎彬, "ポジトロニウム超微細構造の直接測定 II (測定の経過)".
- [138] 石田明, "ポジトロニウム超微細構造の精密測定".
- [139] 安達俊介, "オルソポジトロニウム崩壊ガンマ線のエ ネルギースペクトル精密測定".
- [140] 山道智博, "高輝度 X 線光源を用いた光子光子散乱 実験の考察".
- [141] 大和田健太, "ミリ波大強度光源を用いた弱結合未知 粒子の探索".
- [142] 森永真央, "LHC-ATLAS 実験における H $\rightarrow \tau \tau \rightarrow$ lepton-lepton 崩壊チャンネルを用いたヒッグス粒 子の探索".
- [143] 佐々木雄一, "LHC-ATLAS 実験における 1 レプト ンモードでの超対称性粒子の探索".

(セミナー)

- [144] 浅井祥仁 LHC 講義 12 月東北大学
- [145] A. Miyazaki, "Terahertz Direct Spectroscopy of Positronium Hyperfine Splitting" Cargèse International School on QED & Quantum Vacuum, Low Energy Frontier, France, April 2012.

3 物性理論

3.1 青木研究室

青木研では一貫して、超伝導に代表される多体効 果や、量子ホール効果、グラフェンに代表されるト ポロジカル系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 的に破れたり、破れない場合でも「トポロジカル」な 系であれば新奇な現象が起きる。面白い物質構造か ら面白い物性物理を探る「物質設計」も目指してい る。さらに、強相関系やトポロジカル系において、非 平衡で生じる顕著な物性を探ることを最近の大きな 柱としている。

3.1.1 超伝導

銅酸化物高温超伝導体 — 物質依存性と圧力効果

鉄系など、高温超伝導のファミリーが増えている が、いまだに最高の Tc をもつ銅酸化物を、現在の視 野で再訪するのは意味が大きい。銅酸化物では、実 験的に Tc が低い La₂CuO₄ と高い HgBa₂CuO₄ が あり、前者のフェルミ面は弯曲が小さくネスティン グが良く、理論的には前者の方が高い Tc のはずで、 この矛盾が謎となっていた。榊原、臼井、黒木(電 通大、現阪大)、有田(東大工)と青木は、通常考 えられている $dx^2 - y^2$ 軌道に加え dz^2 軌道をあら わに考慮した2軌道模型で超伝導を調べた。これに より、 La_2CuO_4 でネスティングが良いのは dz^2 軌 道がエネルギー的に EF に近いので強く混成するた めであるが、dz² 軌道が混じると超伝導が抑制され、 この効果がフェルミ面形状効果を凌駕することが分 かり、さらに、頂点酸素の寄与も重要な因子であり、 これらが物質依存性を支配することを明らかにした $[1, 18, 31, 32]_{\circ}$

さらにこの結果を基に、上記の著者および Scalapino (UC Santa Barbara)は、この系を制御する方法とし て、銅酸化物に一軸性圧力を加えたときの効果を考 察した。 $dx^2 - y^2, dz^2$ の2軌道は頂点酸素位置に支 配され、このため a 軸圧を加えると T_C は上昇し、 c 軸圧では減少することを示した。この結果は、最 近の Karlsruhe グループの一軸圧効果の実験結果と も整合する。さらに、意外にも銅の 4s 軌道の混成 も効き、圧力下でこれらの成分が薄められる「軌道 浄化効果」により、転移温度が上がることを示した [2, 33, 34, 49, 50]。特に 4s 軌道を浄化すれば銅酸化 物以上に高い転移温度を持つ物質の発見につながる 可能性もある。

銅酸化物高温超伝導体 — 多層系

単位胞に複数の CuO2 面を有する多層銅酸化物高 温超伝導体は、 CuO_2 面の枚数を n = 1, 2, 3 と増加 させると実験的に Tc が上昇し、n = 3 で現在最高 の転移温度 $T_C = 135 \text{K}$ を持つ。これを理論的に理 解するため、西口、黒木、有田と青木は、密度汎関 数法に基づく第一原理計算およびそれに基づくダウ ンフォールディングから模型を構築し、自己エネル ギーを考慮した FLEX によって Eliashberg 方程式を 解き、1-3 層系の超伝導性を調べた [35, 36]。特に、 多層系において Cooper ペアが層間をホップする過 程を取り入れ、この過程が Tc を増大させる、とい う重要な結果を得た (Fig.3.1.1)。層間のペアー・ト ンネリングは、Anderson 等により(Anderson の直 交定理の発想から) 一体の層間トンネリングの2次 過程として考えられていたが、我々のアイディアは、 電子間の多体相互作用の行列要素として存在するペ ア散乱を考え、また、d波超伝導を扱っているので、 隣り合うサイトのペアの層間散乱を考た。西口(現 在理研)はこの成果を博士論文にまとめた [70]。



 \boxtimes 3.1.1: Phase diagram on T and n (carrier concentration) for the double-layer high-Tc cuprate with and without inter-layer pair hopping. SC: superconducting phase, AF: antiferromagnetic.[35, 36]

芳香族新有機超伝導体の電子構造

芳香族(ピセン)の有機分子の固体にカリウムを ドープした固体が $T_C = 7 - 18K$ において超伝導転 移することが久保園(岡山大)らによって報告され、 その超伝導機構の解明への第一歩として、青木のグ ループは固体ピセンの電子状態を第一原理計算によ り解析してきた。本年度は、神戸(岡山大)らが新 な溶液法により $T_C = 18K$ 相を選択的に合成できる ことを示したことを受け、苅宿(現在筑波大物理)、 青木はその理論解析を行った [3, 51, 52, 53]。

また、上野(千葉大)のグループが固体ピセン結 晶の電子構造を UPS, LEED から求めた実験結果に 理論解析を与えた(*Phys. Rev. Lett.*に出版)[4]。

強い電子間斥力と強い電子・格子相互作用の共存系

強相関系において、電子・格子相互作用も強い場合は、多彩な相が実現され得る。村上、Werner (Fribourg大学)、辻、青木は、電子間、電子・格子相互作用を共にもつ最も単純なモデルの一つである Holstein-Hubbard 模型の秩序相(反強磁性、電荷秩序、超伝導)の性質を、秩序まで考慮した動的平均場理論(DMFT)により初めて扱い、調べた[61]。これにより、フォノン振動数が有限のために発生する遅延効果とクーロン相互作用の超伝導への効果と、フォノン媒介の電子間引力とクーロン斥力がキャンセルする近傍での、有限温度での相図を求めた。村上はこの成果を修士論文にまとめた[72]。

村上等はまた、量子多体系における異なる秩序が共 存する場合(特に、supersolidになる場合)を量子ス ピン系において理論的に調べた[41, 42, 58, 59, 60]。

非平衡により誘起される超伝導



 \boxtimes 3.1.2: A monocycle pulse applied to a correlated electron system.

強相関電子系は平衡において超伝導、磁性、Mott 転移などの多彩な相転移現象を示すが、辻等は、こ れらをレーザーなどで非平衡にして発現させる方法 を提案した。すなわち、強相関電子系や、光格子中の 冷却原子系において、定常的なレーザー光を照射す ると、一定の条件が満たされると粒子間相互作用を 斥力から引力へと変換することが可能であるが理論 的に示される。このメカニズムは、レーザー光によ り粒子が光を着た (Floquet) 状態になるためにバン ドが反転し、さらに、光を突然照射する (ac quench) すると負温度状態が実現するためである。本年度は、 辻、Werner (Fribourg 大)、岡、青木は、より現実的 なモノサイクル・パルスを用いても (Fig.??)、非平 衡と多体の相乗効果により斥力・引力転換が生じる ことも見出した [5]。

3.1.2 トポロジカル系、トポロジカル効果

鉄系超伝導体におけるスピン・ホール効果

様々な物質において、スピン・ホール効果(スピン自由度に対するホール効果)に興味がもたれているが、Pandey、紺谷、平島(名大)、有田、青木は、 鉄系超伝導化合物において、バンド構造にディラック・コーンがあるために、鉄のスピン・軌道相互作 用により、ホール・ドープされた 122 系で大きなス ピン・ホール効果が生じることを予言した [6]。

グラフェンの量子ホール効果とカイラル対称性

グラフェンの蜂の巣格子は massless Dirac 粒子の バンド分散 (Dirac cone) をもつために、興味深い。 グラフェン量子ホール効のトポロジカルな性質の一 つは、massless Dirac 粒子特有の N = 0 ランダウ 準位であるが、不規則性を入れたときににも、カイ ラル対称性が保たれれば、この準位はトポロジカル に安定に存在する。河原林(東邦大)、初貝(筑波 大)、青木は、一般化されたカイラル対称性や、2層 グラフェンなどの解析を行い、カイラル対称性がラ ンダウ準位の特異な振る舞いを支配することを示し た [7, 19, 20, 21]。

また、濱本(筑波大)、青木、初貝は、多体効果を 考えた場合もカイラル対称性は鍵となり、N=0ラ ンダウ準位の基底状態はトポロジカル縮退度2をも つカイラル凝縮体であり、これは試料の端において ケクレ構造をもつボンド秩序として現れることを予 言した[8]。

THz 領域における「光学量子ホール効果」

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(理研)、初貝、青木は、光学(ac)ホール 伝導度において、ホール・プラトーが意外にもac領域でも残ることを、通常の2次元電子系およびグラフェンの双方で理論予言していた。本年度は、ac領域でのプラトーが波動関数の局在に支配されることから、2パラメータ・スケーリングである $\sigma_{xx}(\omega) - \sigma_{xy}(\omega)$ ダイアグラムを ac 領域に拡張し、その物理描像を明らかにした [9]。また、2層グラフェンや3層グラフェンに対しても光学ホール伝導度が特徴的な振る舞いをして、ランダウ準位の性質のプローブになることを示した [10]。初貝等は、これらのグラフェン に関する理論のまとめの論文を出版した [11]。
グラフェンにおける光学量子ホール効果

森本等の理論的予言を受け、実験的には、本物理 学教室の島野のグループが量子ホール系の THz 帯 におけるファラデー回転角の測定を行い、2次元電 子系では光学ホール伝導度におけるプラトーを観測 していた。本年度は、島野のグループがグラフェン においても光学ホール伝導度におけるプラトーを観 測することに成功し、プラトーの位置は質量ゼロの ディラック粒子特有の半整数値に対応する位置に現 れ、またディラック・ランダウ準位を反映して比較 的低磁場でも観測された。森本、青木はこの理論解 析に加わり、論文は nature commun に出版予定であ る [12]。

グラフェン量子ドット

原子物理においては、Coulomb 引力ポテンシャル 中の電子は、原子番号が微細構造定数の逆数の程度 (~172)を超える (supercritical nuclei になる) と電 子・陽電子対生成に対して不安定化し、これは QED における真空崩壊と、それに伴う charged vacuum になることが理論的に予言されているが、未だに観 測はされていない。一方、グラフェンを或る種の基 板上では小さな質量ギャップを開かせて、Coulomb 引力ポテンシャルを印加すると superciritical になる ことは提案されていた。Maksym (Leicester 大) と青 木は、(a) charged vacuum への不安定化は、ポテン シャルが Coulombic である必要はなく、グラフェン を量子ドットにすれば charged vacuum が実現する、 (b) 原子物理では、10⁸⁻¹⁰ T 程度の巨大な外部磁場 をかけてサイクロトロン・エネルギーが rest mass energy 程度になると charged vacuum は discharge し得えるが、グラフェン量子ドットにおいても磁場 誘起 vacuum discharging が起き、しかも1T程度の 低磁場において discharging, charging が交互に起き ることを示した [22, 55]。

酸化物における分数量子ホール効果

酸化物は普通は絶縁体であるが、川崎(東大工)は MgZnO/ZnO界面に高易動度の2次元電子系を実現 させることに成功していた。Maryenko(理研)、川崎 のグループは、強磁場中のこの系で5/11など複雑 な分数に至る分数量子ホール効果を観測し、小野田 (秋田大)、青木はこれを理論的に解析することによ り、分数量子ホール効果の標準理論である複合フェ ルミオン描像において、通常は複合フェルミオンは 相互作用しないと見なすのに対し、この系では複合 フェルミオン間が強く相互作用している示唆を得た。 実験・理論合同の論文として、Phys. Rev. Lett. に 出版された [13]。

ゼオライト鋳型炭素構造

近年、東北大の京谷グループで合成された"ゼオ ライト鋳型炭素"は、グラフェンが曲面として3次元 ナノ周期構造をなすものであり、その特異な性質に 興味がもたれる。是常(東工大理工)、有田、青木は、 理論の立場から第一原理的にこの物質の電子状態を 明らかにした [14] (巻頭口絵; PRB Kaleidoscope に も掲載)。特に、価電子帯トップには、軌道磁性を伴 う対称性の異なる2個の状態から構成されるという 意味で「カイラル」であり、さらに構造が空間反転 対称性を欠くことに起因して Γ 点まわりで非対称と いう興味深いバンド構造を実現し、このために新奇 な軌道磁気輸送効果が予言される。

3.1.3 非平衡現象

強相関電子系やトポロジカル系における非平衡現象 [25] については上記の様々な節で解説したが、本 年度は以下も行った。

モット絶縁体の絶縁破壊

モット絶縁体に強い電場をかけると絶縁破壊現象 が起き、岡、青木は「多体 Landau-Zener 遷移」に よってモット絶縁破壊を説明し、特に、量子トンネル 現象に対する Dykhne-Davis-Pechkas 理論をハバー ド模型に適用し、そこで現れる非エルミート化され たハバード模型を、厳密 (Bethe 仮説) 解を拡張する ことによって解いた。岡は本年度、破壊で生成され た doublon-hole 対の非平衡分布が、Keldysh line の 両側で大きく異なること、これが非平衡角度分解光 電子分光で観測できるであろうことを示した [15]。

相関電子系における動的相転移

動的相転移現象は、初期宇宙の進化から固体中の光 誘起相転移まで自然界に普遍的に見られる現象であ る。最近のポンプ・プローブ時間分解分光実験により、 相転移のダイナミクスが相関電子系のミクロな時間 スケールで観測できるようになってきている。このよ うな実験に動機づけられて、辻, Eckstein (Hamburg 大)、Werner は、Hubbard 模型の反強磁性相に対し て動的相転移現象を非平衡動的平均場理論を用いて 調べた [43, 44, 45, 56, 57]。その結果、励起エネル ギーが温度に換算して平衡状態の臨界温度を超えて いるにもかかわらず、対称性が破れた秩序相が長時 間にわたって生き残ることがわかった。また、秩序パ ラメーターのダイナミクスは、平衡の臨界点と、そ れとは別の非平衡臨界点による多重臨界現象として 特徴付けられることがわかった。

非平衡 dp 模型

近年のポンプ・プローブ技術の進展により,絶縁体 への光キャリア注入に伴う相転移現象の探求が精力 的に行われている。特に銅酸化物(cuprate)への光 キャリア注入は興味深いが、銅酸化物の現実的な格子 模型である dp 模型を、電荷移動型の遷移を含めて非 平衡状態を議論する必要があるとおもわれる。そこ で、見上、岡、青木は、ac 電場下における dp 模型の 非平衡定常状態を、Keldysh-Floquet-Green 関数法 に基づく動的平均場近似を用いて調べ、Zhang-Rice singlet の変質の様子や、バンド分解された光キャリ アの非平衡分布を明らかにした [62]。

キャヴィティ中の固体における Dicke 転移

単一モードの光が多数の自由度と相互作用して生じ る協力現象である超放射 (superradiance) は、Dicke 模型で記述され、量子相転移を示すことから、長年 理論的には調べられてきており、近年では冷却原子 系で Dicke 転移が実現され、注目を集めている。最 近では、キャビティ中に固体を置いた系も、量子光 学と固体物理の交点という観点から注目を集め始め た。電子系における超放射では、ベクトル・ポテン シャルの二次の項が Dicke 転移を妨げるという "nogo theorem"があるが、この theorem で禁止されな い自発分極の発生は起こりうることが Keeling によ り示されている。仮屋、岡、青木は、キャビティ中 の電子系における超放射転移について、(a) 二層グラ フェン、(b) 二本梯子系に対し、Keeling の自発分極 発生という意味での量子相転移が起きることを示し た[63, 64]。鍵となるのは層やlegに垂直な光との相 互作用を考慮することである。この結果、バンド・ ギャップが生じ、また転移の次数は通常の Dicke 模 型と異なり一次となることが分かった。仮屋はこの 成果を修士論文にまとめた [71]。

非平衡量子スピン系

光誘起相転移は、従来は殆ど電子系に対して研究さ れてきた。一方、量子スピン系においては、スピン・ポ ンピングのように電子遷移を利用した光誘起現象は知 られていたが、直接スピンをレーザー光照射によって コヒーレントに制御する方法については未開拓であっ た。高吉(現在物材機構)、青木、岡は、円偏光レー ザーを量子スピン系(異方的なS = 1反強磁性XXZ 模型)に照射すると、その磁場成分(回転磁場)が xy 面内のときに、z 方向に磁化が誘起される、という 全く新しい現象を見出した [37, 38, 39, 40, 65, 66]。 数值計算(infinite time-evolving block decimation (iTEBD)法)の結果は、この Haldane 系のトポロジ カル状態が、光誘起磁化状態に量子相転移すること を示す。その機構は、多体 Floquet 法を量子スピン 系に初めて適用することにより、磁化誘起は、基底状 態と磁化状態の Floquet 準位がレーザー照射によっ て共鳴するためである。これは、量子スピン系に新 たな非平衡物理の可能性を拓くと期待される。必要 なレーザーは THz 領域と見積もられる。

3.1.4 その他

青木研修士2年の村上雄太は理学系学修奨励賞を 受賞した。助教の岡 隆史は本学工学部物理工学科に 異動し、後任には辻 直人が着任した。苅宿は、超伝 導体 Na(Fe_{1-x}Co_x)Asの不純物効果 [16] や Dirac 電 子系のバンド構造 [54, 69] も調べた。

青木は、国際会議招待講演で、超伝導(銅酸化物、 鉄系、芳香族の俯瞰[17]、超伝導物質設計[30]、グラ フェンのトポロジカル、カイラルな性質[28]、グラ フェンの光学ホール、非平衡ホール効果[29]につい て講演し、セミナー講演も行った[67,68]。グラフェ ンの編著[23,24]、および国内会議招待講演や解説 を、炭素系超伝導の理論[46]、BCS 理論[26]、物性 物理とハドロン物理を結ぶ非平衡物理[47]、電子系、 冷却原子系、光系におけるトポロジカル、非平衡の 性質[48]について行った。岡、青木は非平衡物理の 解説を強相関系や光誘起グラフェン・ホール効果など について執筆した[25]。「物理学ゼミナール」では、 物性と素粒子の学際を学部生と考えた[27]。

<報文>

(原著論文)

- H. Sakakibara, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki: Origin of the material dependence of T_c in the single-layered cuprates, *Phys. Rev. B* 85, 064501 (2012) (Editor's Suggestion).
- [2] H. Sakakibara, K. Suzuki, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita, D. J. Scalapino and H. Aoki: Multiorbital analysis of the effects of uniaxial and hydrostatic pressure on T_C in the single-layered cuprate superconductors, *Phys. Rev. B* **86**, 134520 (2012).
- [3] Takashi Kambe, Xuexia He, Yosuke Takahashi, Yusuke Yamanari, Kazuya Teranishi, Hiroki Mitamura, Seizi Shibasaki, Keitaro Tomita, Ritsuko Eguchi, Hidenori Goto, Yasuhiro Takabayashi, Takashi Kato, Akihiko Fujiwara, Toshikaze Kariyado, Hideo Aoki and Yoshihiro Kubozono: Synthesis and physical properties of metal-doped picene solids, *Phys. Rev. B* 86, 214507 (2012) (Editors' Suggestion).
- [4] Q. Xin, S. Duhm, F. Bussolotti, K. Akaike, Y. Kubozono, H. Aoki, T. Kosugi, S. Kera and N. Ueno: Accessing the surface Brillouin zone and the band structure of picene single crystals, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 226401 (2012).
- [5] Naoto Tsuji, Takashi Oka, Hideo Aoki and Philipp Werner: Repulsion-to-attraction transition in correlated electron systems triggered by a mono-cycle pulse, *Phys. Rev. B* 85, 155124 (2012).
- [6] Sudhakar Pandey, Hiroshi Kontani, Dai S. Hirashima, Ryotaro Arita and Hideo Aoki: Spin

Hall effect in iron-based superconducting materials — An effect of Dirac point, *Phys. Rev. B* 86, 060507(R) (2012).

- [7] Tohru Kawarabayashi, Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Topologically protected Landau levels in bilayer graphene in finite electric fields, *Phys. Rev. B* 85, 165410 (2012).
- [8] Yuji Hamamoto, Hideo Aoki and Yasuhiro Hatsugai: Chiral condensate with topological degeneracy in graphene and its manifestation in edge states, *Phys. Rev. B* 86, 205424 (2012).
- [9] Takahiro Morimoto and Hideo Aoki: Two parameter flow of $\sigma_{xx}(\omega) - \sigma_{xy}(\omega)$ for the graphene quantum Hall system in ac regime, *Phys. Rev. B* **85**, 165445 (2012).
- [10] Takahiro Morimoto, Mikito Koshino and Hideo Aoki: Faraday rotation in bilayer and trilayer graphene in the quantum Hall regime, *Phys. Rev.* B 86, 155426 (2012).
- [11] Y. Hatsugai, T. Morimoto, T. Kawarabayashi, Y. Hamamoto and H. Aoki: Chiral symmetry and its manifestation in optical responses in graphene interaction and multi-layers, New J. Phys. 15, 035023 (2013).
- [12] R. Shimano, G. Yumoto, J. Y. Yoo, R. Matsunaga, S. Tanabe, H. Hibino, T. Morimoto and H. Aoki: Quantum Faraday and Kerr rotations in graphene, *Nature Commun.*, to be published.
- [13] D. Maryenko, J. Falson, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Onoda, H. Aoki and M. Kawasaki: Temperature dependent magnetotransport around ν= 1/2 in ZnO heterostructures, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 186803 (2012).
- [14] Takashi Koretsune, Ryotaro Arita and Hideo Aoki: Magneto-orbital effect without spin-orbit interactions — noncentrosymmetric zeolite-templated carbon structure, *Phys. Rev. B* 86, 125207 (2012).
- [15] Takashi Oka: Nonlinear doublon production in a Mott insulator: Landau-Dykhne method applied to an integrable model, *Phys. Rev. B* 86, 075148 (2012).
- [16] H. Yang, Z. Wang, D. Fang, S. Li, T. Kariyado, G. Chen, M. Ogata, T. Das, A. V. Balatsky, and H.-Hu. Wen: Unexpected weak spatial variation in the local density of states induced by individual Co impurity atoms in superconducting Na(Fe_{1-x}Co_x)As crystals revealed by scanning tunneling spectroscopy, *Phys. Rev. B* 86, 214512 (2012).
- (国際会議録(招待講演))
- [17] Hideo Aoki: A perspective of superconductivity as multiband phenomena — Cuprate, iron and aromatic systems, Proc. STRIPE2011, Rome, 2011 [J. Superconductivity and Novel Magnetism 25, 1243 (2012)].

- (国際会議録(一般発表))
- [18] Hirofumi Sakakibara, Hidetomo Usui, Kazuhiko Kuroki, Ryotaro Arita and Hideo Aoki: Twoorbital view on the origin of the material dependence of T_c in the single-layer cuprates, *Proc. LT* 26, to be published in J. Phys.: Conf. Series.
- [19] Generalization of chiral symmetry for tilted Dirac cones, Proc. Localisation 2011, Pohang, Aug 2011 [Int. J. Modern Phys.: Conf. Series, 11, 145 (2012)].
- [20] Tohru Kawarabayashi, Takahiro Honda, Hideo Aoki and Yasuhiro Hatsugai: Chiral symmetry and fermion doubling in the zero-mode Landau levels of massless Dirac fermions with disorder, *Proc. ICPS 2012*, Zürich, Aug 2012, to be published (arXiv:1208.2307).
- [21] Tohru Kawarabayashi, Yasuhiro Hasugai and Hideo Aoki: Stability of zero-mode Landau levels in bilayer graphene against disorder in the presence of the trigonal warping, *Proc. HMF 2012*, Chamonix, to be published (arXiv:1210.0276).
- [22] P. A. Maksym and H. Aoki: Magnetic field induced rearrangement of the vacuum charge in a graphene quantum dot with a mass gap, *Proc. HMF 2012*, Chamonix, to be published in *J. Phys.: Conference series*.

(編著書)

- [23] 森本高裕、青木秀夫:グラフェンの光学特性、斉木幸 一朗(監修)「グラフェンの機能と応用展望 II」第1 章(CMC 出版、2012)。
- [24] Hideo Aoki and Mildred S. Dresselhaus (ed.): *Physics of Graphene* (Springer-Verlag, to be published).

(国内雑誌)

- [25] 岡隆史、青木秀夫:強相関系の非平衡物理、日本物 理学会誌 67 234 (2012)。
- [26] 青木秀夫: BCS 50 years (書評)、日本物理学会 誌 67 414 (2012)。
- [27] 青木秀夫:物性/素粒子の学際を学部生と楽しめる か、固体物理 **48**, No.4、印刷中。
- <学術発表>

(国際会議)

招待講演・総合報告 (会議録掲載以外)

- [28] Hideo Aoki: Topological and chiral aspects of graphene, Int. Symp. Topological Quantum Phenomena, Nagoya, 20 May 2012.
- [29] Hideo Aoki: Illuminated graphene optical Hall and nonequilibrium photovoltaic Hall effects, Int. Conf on Graphene and its Applications, Loughborough, U.K., 3 June 2012.

- [30] Hideo Aoki: Guidelines for designing new superconducting materials, *LEMSUPER Workshop*, Dresden, 13 Oct 2012.
- 一般発表 (会議録掲載以外)
- [31] H. Sakakibara, K. Suzuki, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita, D.J. Scalapino, H. Aoki: Three-orbital study on the orbital distillation effect in the high Tc cuprates, 25th International Symposium on Superconductivity, Dec 2012, Tokyo.
- [32] H. Sakakibara, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita, H. Aoki: Origin of the lattice-structure dependence of Tc in the cuprates: a two-orbital study, *Materials* and *Mechanisms of Superconductivity*, Washington D.C, USA, 29 Jul- 3 Aug 2012.
- [33] H. Sakakibara, K. Suzuki, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita, D.J. Scalapino, H. Aoki: First principles band structure +FLEX approach to the pressure effect on Tc of the cuprate superconductors, *Conf.* on Computational Physics 2012, Kobe, Oct 2012.
- [34] H. Sakakibara, K. Suzuki, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita, D.J. Scalapino, H. Aoki: Pressure effects on Tc of the cuprates from a multi-orbital control viewpoint, *IUMRS-ICEM 2012*, Yokohama, Sept 2012.
- [35] Kazutaka Nishiguchi, Kazuhiko Kuroki, Ryotaro Arita, Takashi Oka, and Hideo Aoki: Effect of inter-layer pair hopping and single electronhopping on superconductivity in multi-layered high-Tc cuprates, *Materials & Mechanisms of Superconductivity*, Washington, DC, Jul 2012.
- [36] Kazutaka Nishiguchi, Kazuhiko Kuroki, Ryotaro Arita, Takashi Oka, and Hideo Aoki: Effect of inter-layer pair hopping and one-electron hopping on superconductivity in multi-layered high-Tc cuprates, GCOE Int. Symposium on Physical Sciences Frontier, Tokyo, Dec 2012.
- [37] Shintaro Takayoshi, Hideo Aoki and Takashi Oka: Theory of direct laser manipulation in quantum spin systems, *Electronic States and Phases Induced* by *Electric or Optical Impacts*, Paris, Sep 2012.
- [38] Shintaro Takayoshi, Hideo Aoki and Takashi Oka: Photo-induced phase transition in a quantum spin system: Laser induced magnetization and breakdown of the Haldane phase, Int. Symposium on Material Science Opened by Molecular Degree of Freedom, Miyazaki, Dec 2012.
- [39] Shintaro Takayoshi, Hideo Aoki and Takashi Oka: Many-body Floquet theory of Light-induced coherent magnetization dynamics in a Haldane antiferromagnet, QS2C Theory Forum: Int. Symposium on Strongly Correlated Quantum Science, Tokyo, Jan 2013.
- [40] Shintaro Takayoshi, Hideo Aoki and Takashi Oka: Light-induced phase transition in a quantum spin chain — breakdown of the Haldane phase by circularly polarized laser, APS2013 March Meeting, Baltimore, Mar 2013.

- [41] Yuta Murakami, Takashi Oka and Hideo Aoki: Dynamical properties of supersolid states in spin systems, *Int. Conf. on Magnetism 2012*, Busan, Korea, July 2012.
- [42] Yuta Murakami, Takashi Oka and Hideo Aoki: Phase diagram and collective modes in a frustrated dimer-spin system, *Quantum Science on Strong Correlation Theory Forum 2013*, Tokyo, Jan 2013.
- [43] Naoto Tsuji: Dynamical phase transition in strongly correlated fermion systems, Yonsei-Todai Joint Workshop 2013, Tokyo, Feb 2013.
- [44] Naoto Tsuji, Martin Eckstein, and Philipp Werner: Dynamical phase transition and nonequilibrium criticality in the fermionic Hubbard model, QS2C Theory Forum: Int. Symposium on Strongly Correlated Quantum Science, Tokyo, Jan 2013.
- [45] Naoto Tsuji, Martin Eckstein, and Philipp Werner: Dynamical phase transition and nonthermal symmetry-broken states in the Hubbard model, Int. Symposium on Computics: Quantum Simulation and Design (ISC-QSD), Osaka, Oct 2012.

(国内会議)

招待講演

- [46] 青木秀夫:炭素系超伝導の理論(日本物理学会、「相 関電子系の超伝導 — 実験と理論の連携が生み出 す俯瞰」シンポジウム、広島、2013年3月)。
- [47] 青木秀夫:非平衡物理一物性物理とハドロン物理を 結ぶ世界:はじめに(日本物理学会、「非平衡物理 — 物性物理とハドロン物理を結ぶ世界」シンポジウム、 広島、2013年3月)。
- [48] 青木秀夫: Electrons, cold atoms and photons correlation, topological properties and nonequilibrium ("FIRST" 量子情報処理プロジェクト, 湘南, 25 Nov 2012).

一般発表

- [49] 榊原寛史,鈴木雄大,臼井秀知,黒木和彦,有田亮太郎,J. Scalapino,青木秀夫:銅酸化物における圧力効果による軌道純化作用と転移温度の関係(日本物理学会、横浜、2012年9月)。
- [50] 榊原寛史,鈴木雄大,臼井秀知,黒木和彦,有田亮太郎,J. Scalapino,青木秀夫:銅酸化物における軌道 純化作用に対する銅4s軌道の効果、(日本物理学会、 広島、2013年3月)。
- [51] 苅宿俊風、青木秀夫、Phenanthrene 結晶の電子状態 の第一原理計算による解析 (日本物理学会、横浜、2012 年9月)。
- [52] 苅宿俊風、青木秀夫ピセン超伝導体の4バンド有効 模型のFLEXによる解析(物性研研究会「計算物性 物理学の新展開」、2013年1月)。
- [53] 苅宿俊風,青木秀夫ピセン結晶の有効模型の c 軸長 依存性と FLEX 近似による 磁性・超伝導の解析 (日 本物理学会、広島、2013 年 3 月)。

- [54] 苅宿俊風 YV₂Al₂₀ 及び LaV₂Al₂₀ のバンド計算 (第 二回固体中のディラック電子研究会、下呂温泉、2012 年 12 月)。
- [55] P. A. Maksym and Hideo Aoki: Mass gap をもつ グラフェン量子ドットにおける vacuum charge とそ の磁場制御 (日本物理学会、広島、2013 年 3 月)。
- [56] 辻 直人、Martin Eckstein、Philipp Werner、Hubbard 模型における動的相転移と非平衡臨界現象 (第 6回物性科学領域横断研究会、東京、2012 年 11 月)。
- [57] 辻 直人、Martin Eckstein、Philipp Werner、s 波超 伝導体の動的相転移と非平衡臨界現象(日本物理学会、 広島、2013年3月)。
- [58] 村上雄太、岡隆史、青木秀夫、ダイマー・スピン系の超固体相図と集団励起(日本物理学会、横浜、2012 年9月)。
- [59] 村上雄太、岡隆史、青木秀夫、フラストレートした ダイマー・スピン系の相図と集団励起(基研研究会量 子スピン系の物理、京都、2012年11月)。
- [60] 村上雄太、岡隆史、青木秀夫、フラストレートした ダイマー・スピン系における超固体相と集団励起(第 6回物性科学領域横断研究会、東京、2012年11月)。
- [61] 村上雄太、Philipp Werner、辻直人、青木秀夫、ホル スタイン・ハバード・モデルにおける 競合秩序の動 的平均場理論(日本物理学会、広島、2013年3月)。
- [62] 見上敬洋、岡隆史、青木秀夫、ac 電場下における dp 模型の非平衡定常状態の理論 (日本物理学会、広島、 2013 年 3 月)。
- [63] 仮屋夏樹、岡隆史、青木秀夫、キャビティ中の量子 ホール系における超放射転移の理論(日本物理学会、 横浜、2012年9月)。
- [64] 仮屋夏樹、岡隆史、青木秀夫、キャビティ中の多電 子系における超放射転移による自発分極の発生(日本 物理学会、広島、2013年3月)。
- [65] 高吉慎太郎、青木秀夫、岡 隆史量子スピン系における 光誘起相転移の理論 (日本物理学会、横浜、2012 年 9 月)。
- [66] 高吉慎太郎、青木秀夫、岡 隆史、量子スピン系にお ける光誘起相転移現象:磁化誘起と Haldane 相の破 壊(日本物理学会、広島、2013 年 3 月)。
- (セミナー(国外))
- [67] Hideo Aoki: π electron systems graphene and aromatic superconductors (Clarendon Lab, Oxford, 31 May 2012).
- [68] Hideo Aoki: Nonequilibrium phenomena in correlated and topological systems (Technical Univ. Berlin, 16 Oct 2012).
- (セミナー(国内))
- [69] 苅宿俊風、立方晶逆ペロブスカイト物質 Ca₃PbO に おけるディラック電子 (東大駒場物性セミナー、2012 年6月)。

(学位論文)

- [70] Kazutaka Nishiguchi: Theory of high T_c superconductivity in multi-layered cuprates (博士論文、2012 年 12 月)。
- [71] Natsuki Kariya: Theory of superradiant phase transition in condensed matter systems in a microcavity (修士論文, 2013 年 1 月)。
- [72] Yuta Murakami: Theory of competing ordered phases in strongly correlated systems (修士論文、 2013 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:特に、 (1)相転移・臨界現象、

(2) 秩序形成に伴う非平衡現象、

(3)強く相互作用している量子系の秩序形態の特徴、(4)時間的に変動する外場下での量子ダイナミクス、などについて研究を進めている。

協力現象の統計力学に関しては、いろいろな新し いタイプの相転移の発見、その機構解明に努めてい る。24年度は、我々のグループが提案してきた、構 成要素の体積変化によって生じる実効的長距離相互 作用系での統計力学的性質、特に、実効的な長距離 相互作用系であるために生じる特異な熱力学的振る 舞い、そのような系でのドメイン壁の運動など秩序 形成の特異な動的性質について研究を進めた。また、 遍歴電子系での強磁性機構に関して、電子ドーピン グをモデル化した機構を考案しその量子相転移につ いて研究を進めた。

また、Dunkl 演算子を用いたクーロン相互作用系 での多次元ブラウン運動の一般化の数学的定式化に ついても研究を進め、特に、粒子間相互作用が無限 大の極限についての性質の特徴を明らかにした。ま た、Calogero-Moser system との関連についても調 べている。

光と物質の相互作用によって引き起こされる系で の非平衡相転移に関して、量子マスター方程式の定 式化を進め、外場による駆動と散逸過程の競合、あ るいは相乗効果による非平衡相転移を研究した。特 に、駆動力誘起成分の対称性の破れという新しい実 時間量子ダイナミクス現象を発見し、その機構解明 を進めている。また、三角格子反強磁性体での量子 応答(ESR スペクトル)について、ミクロな立場か ら研究を進めた。

さらに、統計力学の基礎として、熱平衡状態がど のように実現されるかに関する問題について研究を 進めた。また、量子力学の基礎性質に関するいくつ かの提言も行っている。

3.2.1 局所格子構造のちがう双安定系での 協力現象の研究

格子の局所的な構造に双安定性がある、スピンク ロスオーバー物質、電荷移動物質、ヤン・テラー系、 マルテンサイト系などでの協力現象の研究を進めて いる。これらの系は、双安定状態間のスイッチを磁 場、光、圧力、温度などのパラメターによって制御 でき、機能材料として注目されている。これらの系 の相転移は、その双安定性を表すイジングモデルで モデル化される。その相図を用いて、平衡状態、準 安定状態がどのように温度の関数として現れるかに ついて系統的な分類に成功し、隠れた相の発見に成 功してきた。さらに、2 ステップの逐次相転移の機 構などもその観点から明らかにしてきている。[19]

これらの系の新しい特徴として、通常のイジング モデルとは異なり、局所状態によって格子構造が異 なることによる格子変形の弾性相互作用が重要になることを明らかにして来た。[3, 6, 14] 特に、弾性相互作用により実効的な長距離相互作用が生じることを発見し、その特徴を調べ、双安定状態間のスイッチの際の臨界核形成が、系の大きさに比例するマクロな性質を持つことなどを明らかにして来た。

24 年度は、2 つの秩序間のドメイン壁の構造や、 その伝搬の特徴を明らかにした。特に、ドメイン壁 の構造が格子自由度のタイムスケールとスピン自由 度のそれとの比によって定性的に変化することを発 見し、その依存性を詳しく調べた。格子自由度の変 化がスピン自由度の変化に比べて遅い場合には、伝 搬するドメイン壁の厚さは系の幅の平方根に比例す るが、その逆の場合は、上で述べたマクロな性質を反 映して系の幅に比例することがわかった。[20, 28, 34]

これまで、弾性相互作用が格子変形自由度を通し て実効的な長距離力相互作用を生じることを調べて きたが、系がハイスピン、ロースピンの交替的な構 造を中間温度状態で示す2ステップ逐次相転移系の モデルである短距離反強磁性相互作用系では、2つ の秩序状態で体積差が生じないため実効的な長距離 力相互作用が現れないことを明らかにし、弾性相互 作用に強磁性、反強磁性の短距離相互作用を加えた 系の統一的な相図を完成した。[39]

長距離相互作用系の統計力学

長距離相互作用のもとでは系の均一化が起こり、 平均場理論が成り立つことが期待される。森は、 れまで長距離相互作用系の統計力学についての研究 を進め、平均場近似の結果が厳密に成り立つための 条件などについて調べて来ている。平成24年度は古 典スピン系のカノニカル分布において平均場理論の 妥当性を調べ、その結果、平均場理論が成立しない パラメータ領域が存在し、そこでは大域的な不均一 性が生じることを厳密に示した。この大域的な不均 一性は長距離相互作用によるものであり、短距離相 互作用系では見られないものである。[12] 近年、冷 却原子系の実験の進歩によって、環境から孤立した 系を調べることが可能となってきた。さらに、冷却 原子系でダイポール間相互作用による長距離相互作 用系も作られており、研究が進められている。その ため、ミクロカノニカル分布や量子系における長距 離相互作用系の統計力学を調べることは重要である。 そこで本年度は、昨年度得られたものと同様の結果 がミクロカノニカル分布においても成り立つことを 示し[8]、さらにこれらの結果を量子スピン系に拡 張した。[9]

さらに、局所格子構造のちがう双安定系では、ハ ミルトニアンとしては短距離系であるにもかかわら ず、実効的な長距離モデルと同様の振る舞いをする ことが指摘してきたが、この系のミクロカノニカル 分布での内部エネルギーと温度の関係(図 3.2.3)な どを調べることで、その特徴を明らかにした。さら に、この系の実効的な長距離相互作用が二体力の和 でよく表すことができることを明らかにした。[12]



図 3.2.3: 弾性相互作用モデルでの内部エネルギーと 温度の関係。実効的長距離相互作用を反映して非単 調な振る舞いが現れる。

保磁力の統計力学機構解明

元素戦略・磁性材料拠点に参加し、保磁力の統計 力学機構解明に向けて研究を進めている。特に、従 来の統計力学の対象とは異なり、焼結と呼ばれる微 小結晶への分割が本質的であることが知られており、 そのような系での磁化の運動について、核形成理論 や磁壁ピニングなどの機構を相互的に考え、未知の 部分が多い集合体全体としての異方性、保磁力につ いて、さらに、微小結晶の集合体の形態やその間の 境界相組成の保磁力への効果などについて理論構築 を目指している。[41, 42]

3.2.2 確率過程

Dunkl 過程

クーロン相互作用系でのブラウン運動の一般化の 数学的定式化に関連して研究を進めている。Dunkl operators と呼ばれる微分差分演算子によって、多次 元ブラウン運動の一般化が定義され、そういった確 率過程が Dunkl processes (DP) と呼ばれ、数学的 な研究対象として盛んに調べられている。[26] この モデルと通常の拡散過程を関係づける intertwining 演算子による多項式の変換に関する一般的な表式を 求め、特に、相互作用が強い極限での振る舞いを明 らかにした。[10] Radial Dunkl processes(RDP) と 呼ばれる対称化された DP に関して、結合定数の値 が大きくなるにつれて A、B型 RDP の経路がエル ミート、ラゲール多項式の零点に比例する値で固定 されることを示し、数値計算を行うことでその様子 を明らかに確認した(図 3.2.4)。[30]

Dunkl 過程と Calogero-Moser モデル

これらの極限の性質に関連する性質が Calogero-Moser system (CMS) で調べられており、粒子間相 互作用の結合定数が無限大の極限 (freezinglimit) で A型 CMS の粒子がエルミート多項式の零点で固定さ れ、B型 CMS の場合では、粒子がラゲール多項式の 零点の平方根で固定されることも知られている。そこ で、Dunkl 過程と Calogero-Moser モデルの関係つい て調べた。これまで、Dunkl operators は Calogero-Moser system (CMS) などの可積分系に応用されて いる。[26] 我々は、DP に diffusion scaling と相似 変換を適用すると CMS が得られることを示した。 [27, 29]



図 3.2.4: (a)A型 RDP の freezing limit。縦線がエ ルミート多項式の零点を意味する。(b)B型 RDP の freezing limit。縦線がラゲール多項式の零点の平方 根を意味する。

3.2.3 量子統計力学の研究

量子系での不確定性関係を反映した新奇な量子状 態に関して、これまで研究を進めてきた。また、こ れまで強く相互作用している系の共鳴スペルトルな どに関する直接数値計算法の開発や、非平衡系での 量子マスター方程式の定式化などを行ってきた。

遍歴電子系における新強磁性体のモデル

24年度は、遍歴電子系における強磁性体のモデル である長岡強磁性の機構の拡張したモデルに関する 研究を進めた。これまで、長岡強磁性はハーフフィ ルドのモット状態から電子を一つを取り除いた系で 考えられてきたが、系の一部分を電子の粒子浴と見 なし、その部分の化学ポテンシャルの制御によって、 実効的な電子密度を変えるドープ機構を考案した。

このモデルに対し、17 サイト以下の格子に対して はランチョス法による大規模対角化法、それ以上の 系に対しては有限サイト密度行列繰り込み群の方法 (DMRG)を用いて、この系における非磁性・磁性転 移に伴うの断熱変化などを研究した。その結果は熱 力学的極限にスムーズに外挿でき、有限の電子密度 領域で強磁性が発生することがわかった。また、こ のモデルは、モット非磁性体、拡張された長岡強磁 性、さらにはある種の近藤格子系を連続的に表すモ デルになっており、それぞれでのスピンの分布や磁 化過程の特徴を明らかにした。[21, 23, 35, 43]



図 3.2.5: 格子の中心部分の電子の化学ポテンシャル の関数としての全スピンと中心サイトの電子密度

量子ダイナミクス

時間変化する外場のもとでの量子ダイナミクスも 重要なテーマであり、昨年度は周期的な駆動力下で の定常状態に関する研究を行った。まず、ランダム 行列によって表される量子カオス系が周期的な駆動 力下でどのような定常状態に移行するかについて調 べた。[2]

光と物質との相互作用による相転移

また、共振器(cavity)内の光子と物質のエネルギー 準位との結合による量子現象に関して研究を進めた。 キャビティ内のスピンあるいは原子間に直接的な相 互作用がない場合でも、光子との結合によってこの 系には興味深い協力現象が現れる。この現象に関し て量子マスター方程式を用いて、多数のスピン(原 子)を含む系が外部からの駆動に対してどのように 応答するか、それが駆動力の強さによってどう変わ るかを調べた。

キャビティ内の原子(スピン)数と光子数の比によ り、いわゆる真空ラビ分裂に代表される量子力学的 結合領域と古典場中の各原子の独立な運動である古 典ラビ振動領域の移り変わりがあることを、エネル ギー準位構造から明らかにし、それぞれの領域での ESR スペクトルや、量子準位間の振動の違いについ て明らかにした。[1, 22]

また、熱力学的極限での駆動外場、散逸環境の下で 達する定常状態での非平衡相転移現象について研究 を進めた。巨視的なスピン(原子)を含む系で起こる 相転移現象として、駆動力と散逸項のバランスが不連 続に変わる非平衡相転移である光双安定性(optical bistability)と呼ばれる現象と、光子・物質の相互作 用によって引き起こされる平衡状態の相転移である Dicke 相転移が知られている。

相互作用、駆動外場ともに強い領域においてどの ような現象が起こるかは知られておらず、その領域 での現象を調べるためには、相互作用の効果を取り 入れた散逸機構の定式化が必要となる。そこで、こ れらの相転移を統一的に理解するため、これまでの 簡便な量子マスター方程式を改め、強い相互作用、か つ強い駆動力のもとでの現象を扱うことのできる量 子マスター方程式を構築した。この系では、光子が 全てのスピンと共通に相互作用するため、分子場近 似が厳密に成り立つことが示せる。その特徴を活か し、散逸環境への緩和の仕方を実際に計算可能な形 に取り入れた理論的な定式化を行った。それを用い て、パラメータ全域での定常状態の相図を求め、強 相間、強励起下での新しい現象を明らかにした。

特に、強相間、強励起領域において、自発的対称 性の破れを伴った非平衡相転移現象が現れることを 発見した。この現象が駆動外場の下での量子力学的 干渉効果として知られている Coherent Destruction of Tunneling という現象に起因することを明らかに した。[15, 17, 31, 38] また、これまで取り扱うこと の難しかった熱浴の有限の相関時間を取り扱うため の方法を考え、その効果が定常状態に及ぼす影響に ついて考察した。[13]

量子混合系の ESR

分子磁性体などにおいて、状態を動的な外場で制 御する際に、磁化の混合状態を引き起こす相互作用 が重要になり、これまで Landau-Zener 過程などに よる特徴などを調べてきた。また、フラストレーショ ンの効果による磁化過程も興味深い問題である。[43] 昨年度は、ジャロチンスキー守谷相互作用など、磁 化の混合状態を引き起こす相互作用が V₁₅ など三角 スピン系での電子スピン共鳴に与える効果について 研究を進め、温度によって ESR シグナルの強度の温 度変化などを詳しく解析した。[4]

3.2.4 統計力学の基礎的研究

長距離相互作用のもとでの統計力学

長距離力のもとでの相転移がとのような条件の下 で、平均場近似によって記述できるかについて明ら



図 3.2.6: 結合、励起の全領域での Dicke モデルの相 図。実線、破線は対称性の破れが現れる領域を示し ている。また黒丸、丸バツは不連続変化が起こる場 所、バツは不規則運動が現れる場所を表している。

かにした。さらに、そのような条件が満たされない 場合、巨視的な不均一状態という新規状態が現れる ことを明らかにした。さらに、長距離相互作用が現実 的に現れる物理系として、格子変形を伴う双安定状 態相転移や、キャビティ光子系などの機構を明らかに した。これらの系では実効的長距離相互作用の存在 にもかかわらず、エネルギーの示量性は満たされて いる。これはもとの系が短距離相互作用によって成 り立っていることに起因していると考えられる。こ れは、いわゆるエネルギーの規格化(Kac 正準化)が 自動的に成り立つ機構が存在していることを示唆し ている。それに対して、通常の短距離系で成り立っ ている加法性は欠如しており、その効果を調べた。 [12, 40, 47]

部分系での平衡状態の実現

統計力学の基礎的性質の一つに部分系でのカノニ カル分布の実現があるが、その実現に関する大規模 数値計算を行い、結合のタイプと緩和の関係や、カ ノニカル分布の実現の具体的な条件について、古典 系、量子の両方での研究を進めた。[5,7]

<報文>

(原著論文)

 S. Miyashita, T. Shirai, T. Mori, H. De Raedt, S. Bertaina, and I. Chiorescu, Photon and spin dependence of the resonance lines shape in the strong coupling regime, J. Phys. B45, 124010(10pp) (2012).

- [2] M. Machida, S. Miyashita, Survival probability and saturation energy in periodically driven quantum chaotic systems, Phys. Lett. A376, 1777-1780(2012).
- [3] C. Enachescu, M. Nishino, S. Miyashita, L. Stoleriu, A. Stancu, Monte Carlo Metropolis study of cluster evolution in spin-crossover solids within the framework of a mechanoelastic model, Phys. Rev. B86, 054114 (2012).
- [4] M. Machida, T. Iitaka and S. Miyashita, ESR intensity and the Dzyaloshinsky-Moriya interaction of the nanoscale molecular magnet V-15, Phys. Rev. B86, 224412 (2012).
- [5] F. Jin, K. Michielsen, M. A. Novotny, S. Miyashita, S. Yuan and H. De Raedt, Quantum decoherence scaling with bath size: Importance of dynamics, connectivity, and randomness, Phys. Rev. A87, 022117 (1-13) (2013).
- [6] A. Slimani, K. Boukheddaden, F. Varret, H. Oubouchou, M. Nishino and S. Miyashita, Microscopic spin-distortion model for switchable molecular solids: Spatiotemporal study of the deformation field and local stress at the thermal spin transition, Phys. Rev. B87, 014111 (2013).
- [7] F. Jin, T. Neuhaus, K. Michielsen, S. Miyashita, M. A. Novotny, M. I. Katsnelson and H. De Raedt, Equilibration and thermalization of classical systems New Journal of Physics15 (2013) 033009 (20pp).
- [8] Takashi Mori, Microcanonical Analysis of Exactness of the mean-field theory in long-range interacting systems, J. Stat. Phys. 147, 1020 (2012).
- [9] Takashi Mori, Equilibrium properties of quantum spin systems with non-additive long-range interactions, Phys. Rev. E86, 021132 (2012).
- [10] S. Andraus, M. Katori, S. Miyashita, Interacting particles on the line and Dunkl intertwining operator of type A: application to the freezing regime, J. Phys. A: Math. Theor. 45, 395201 (2012).
- (国内雑誌)
- [11] 宮下精二、ハイゼンベルク強磁性体理論と量子スピン磁性、数理科学 591 9 月号 pp34-40 サイエンス社
- (学位論文)
- [12] Takashi Mori, Statistical Mechanics and Dynamics in Long-Range Interacting Systems, Doctoral Thesis, The University of Tokyo (2013).
- [13] Tatsuhiko Shirai, Nonequilibrium phase transitions induced by interactions between photon and material in a cavity, Master Thesis, The University of Tokyo (2013).

(著書)

[14] C. Enachescu, M. Nishino, S. Miyashita, Theoretical descriptions of spin-transitions in bulk lattices, in "Spin-Crossover Materials", ed. Malcom A. Halcow, Wiley (2012) 455-474.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [15] Tatsuhiko Shirai, Takashi Mori, and Seiji Miyashita, Novel cooperative phenomena in systems of strong coupled photons and materials in a cavity under an AC external field", "the 10th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, Nanostructured and Molecular Materials (EXCON2012), Groningen, 2012/07/02-06.
- [16] T. Mori and S. Miyashita, Equilibrium and nonequilibrium properties of quantum spin systems with long-range interactions, the 10th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, Nanostructured and Molecular Materials (EXCON2012), Groningen, Netherlands, 2012/07/02-06.
- [17] Tatsuhiko Shirai, Takashi Mori, and Seiji Miyashita, Nonequilibrium phase transition in a cavity system driven by AC external Field, International Workshop on Recent Developments of Studies on Phase Transitions 2012, The University of Tokyo, June 19 2012.
- [18] S. Andraus, M. Katori, S. Miyashita, Dunkl Processes as a Transformation of the Calogero-Moser Models, Harmonic Analysis and Probability, LAREMA, Angers, France, 2012-09-06.
- 招待講演

< Oral Presentation >

- [19] S.Miyashita, Masanori Nishino, Takashi Mori and Taro Nakada, Effects of antiferromagnetic interaction on the elastic model of the spin-crossover materials, International Workshop Phase transition and Dynamical properties of Spin Transition Materials (PDSTM2012), Versailles, France, 2012/5/22-25.
- [20] M. Nishino, S. Miyashita, C. Enachescu, K. Boukheddaden, F. Varret, Macroscopic nucleation and dynamical features caused by spin and lattice degrees of freedom in spin crossover systems, Materials (PDSTM2012), Versailles, France, 2012/5/22-25.
- [21] Seiji Miyashita, Control of The Total Spin -Nagaoka Ferromagnetism and Spin Crossover, 62nd Fujihara seminar on Frontier and Perspectives in Molecule Based Quantum Magnets, Sendai, 2012/5/7-10, Sendai.

- [22] S. Miyashita, Quantum dynamics of independent spin system with cavity photons, International Workshop on Cooperative Quantum Dynamics and Its Control (CQDC '12), 2012/10/29-31.
- [23] S. Miyashita, Mott-ferromagnetic phase transition in an extended Nagaoka system, JAEASynchrotron Radiation Research Symposium "Magnetism in Quantum Beam Science", SPring8, 2013/3/11-13.
- [24] T. Mori, Equilibrium statistical mechanics of spin systems with long-range interactions, International Workshop on Recent Developments of Studies on Phase Transitions, Tokyo, 2012/06/19.
- [25] T. Mori, Statistical physics in long-range interacting systems, Novel Development of Statistical Physics, Tokyo, 2012/12/04.

(国内会議)

一般講演

- [26] S. Andraus, M. Katori, S. Miyashita, Dyson's Brownian Motion Model as a Special Case of Dunkl Processes and Dunkl's Intertwining Operators, The OIST Spring Course on Random Matrix Theory for Complex Systems, 沖縄科学技術大学院 大学, 2012-04-17.
- [27] S. Andraus, M. Katori, S. Miyashita, The Calogero-Moser System with Particle Exchange and Dunkl Processes, 日本物理学会秋季大会, 横浜 国立大学, 2012-09-19.
- [28] 西野正理、宮下精二、弾性的長距離相互作用系にお ける界面成長,京大基礎研究会 非平衡系の物理 湯 川記念館、2012/08/02
- [29] S. Andraus, M. Katori, S. Miyashita, Dunkl Processes: Freezing Behavior and Diffusion-Scaling Transformation into the Calogero-Moser Systems, ランダム作用素のスペクトルと関連する話題, 京都大 学, 2012-12-06.
- [30] S. Andraus, S. Miyashita, Freezing Properties of the Radial Dunkl Process of Type B, 日本物理学会 第68回年次大会, 広島大学, 2013-03-26.
- [31] 白井達彦, 森貴司, 宮下精二, 周期外場によって引き 起こされるキャビティ系での相転移現象, 日本物理 学会 横浜国大, 2012/9/18-21.
- [32] Andraus Sergio, 香取眞理, 宮下精二, The Calogero-Moser System with Particle Exchange and Dunkl Processes, 日本物理学会 横浜国大, 2012/9/18-21.
- [33] 森貴司,宮下精二,Dicke モデルのダイナミクスに対 する平均場的アプローチの基礎付け,日本物理学会 横浜国大,2012/9/18-21.
- [34] 西野正理, 宮下精二, K. Boukheddaden, F. Varret, スピンクロスオーバー系におけるドメイン成長, 日本 物理学会, 横浜国大, 2012/9/18-21.

- [35] 宮下精二, 遍歴磁性体の価数密度制御, 基研研究会 量子スピン系の物理, 京都大学 基礎物理学研究所, 2012/11/12-14.
- [36] 宮下精二,大西弘明, 遍歴強磁性状態とモット状態の間の量子力学的遷移,日本物理学会 広島大学, 2013/3/26-29.
- [37] Andraus Sergio, 宮下精二, Freezing properties of the Radial Dunkl Process of Type B, 日本物理学会 広島大学, 2013/3/26-29.
- [38] 白井達彦, 森貴司, 宮下精二, 周期外場と相互作用に よって引き起こされる相転移現象, 日本物理学会 広 島大学, 2013/3/26-29.
- [39] 西野正理,宮下精二,K. Boukheddaden, F. Varret, スピンクロスオーバー系の臨界現象における短距離相 互作用の効果日本物理学会 広島大学,2013/3/26-29.
- [40] 森貴司, 非加法的な短距離相互作用スピン模型, 日本 物理学会第68回年次大会, 広島大学, 2013/03/26-29.
- [41] 宮下精二「保磁力の統計力学機構解明」元素戦略・磁 性材料研究拠点第一回研究報告会物質・材料研究機構 2012/7/29
- [42] 宮下精二「保磁力の統計力学機構解明」元素戦略・磁 性材料研究拠点第二回研究報告会物質・材料研究機構 2012/12/15

招待講演

- [43] 宮下精二,ナノ磁石の動的スピン状態制御,日本物理 学会(シンポジウム講演) 横浜国大,2012/9/18-21
- (セミナー)
- [44] Seiji Miyashita: Phase transitions of the spincrossover materials with antiferromagnetic interactions, Institut de Physique de Rennes, France 27 February 2013.
- [45] Seiji Miyashita and Hiroaki Onishi: Phase transition between the Mott state and a ferromagnetic state in an extended Nagaoka system, Institut Neel, CNRS, Grenoble, France 18 March 2013.
- [46] 宮下精二,磁気相転移と量子シミュレーション, 阪 大基礎工 6/6 2012.
- [47] 森貴司,加法性を持たない短距離相互作用模型,第5回 基礎物理セミナー合宿,箱根太陽山荘,2012/12/08-10.
- [48] 森貴司, On exactness of the mean-field dynamics, 羽田野研究室セミナー,東大生産研, 2012/12/21.
- [49] 白井達彦, 森貴司, 宮下精二, 周期外場と相互作用に よって引き起される相転移現象, 第5回 基礎物理セ ミナー合宿, 箱根太陽山荘, 2012/12/8-10.
- [50] 白井達彦, Phase transitions due to interaction and AC external field, 羽田野研究室セミナー, 東大生産研, 2012/11/30.

(主催会議)

- [51] Phase transition and Dynamical properties of Spin Transition Materials (PDSTM) 22th - 25th May 2012 : PDSTM 2012 Organized by GEMAC-CNRS, University of Versailles and University of Tokyo.
- [52] International Workshop on Recent Developments of Studies on Phase Transitions 2012, The University of Tokyo, June 19th, 2012.
- [53] International Workshop on Cooperative Quantum Dynamics and Its Control (CQDC'12), Julich Supercomputing Centre, 29-31 October 2012.
- [54] International Workshop Novel Development of Statistical Physics, Koshiba Hall, School of Science, University of Tokyo, 4 December 2012.

3.3 小形研究室

小形研では、強相関電子系(高温超伝導、重い電子)、有機物質、ディラック電子系などを柱に研究している。凝縮系、とくに量子現象が顕著に現れる多 電子系の理論が中心である。手法としては、場の理 論、厳密解、くりこみ群、計算機シミュレーション などを組み合わせて用いている。

3.3.1 高温超伝導の理論

ドープされたモット絶縁体と強相関 d 波超伝導

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面白い研究 の1つである。これを理解するために、2次元正方格 子上のハバードモデルを用いて金属絶縁体転移、お よび相関の強い場合の $d_{x^2-y^2}$ -波超伝導と反強磁性状 態について詳しく調べた。具体的には電子相関を十 分考慮した試行波動関数を仮定し、変分モンテカル 口法によって基底状態を調べた。その結果、高温超 伝導の本質であると考えられる、ドープされたモッ ト絶縁体という概念について明確な描像を得ること ができた。[1, 21, 44]

ハバードモデルで電子相関の強さUを増やしてい くと、ある U_c のところで急激なクロスオーバーが 生じ、弱相関の領域から強相関の領域へ移行するこ とがわかった。弱相関の領域では通常の BCS 超伝導 に近い状態が実現し、凝縮エネルギーは非常に小さ い。これに対して、強相関の領域では $J = 4t^2/U$ を 引力とする超伝導が実現し、凝縮エネルギーは大き い。この強相関領域では、ドープされたモット絶縁 体としての高温超伝導状態が実現していると考えら れる。

さらに、強相関領域での超伝導のドーピング依存 性は、高温超伝導で見られているものと一致する。さ らに波動関数の特徴を調べることによって、2つの 粒子が同時に占有するサイト (doublon) は、穴の開 いたサイト (holon) と束縛状態を作っており (図 3.3.7 参照)、残りの holon が伝導を担っていることがわか る。この場合、反強磁性スピン相関が重要な役割を 果たし、また antinode(π ,0) 付近の電子が超伝導の 安定化に寄与していることも分かった。

さらにこの場合、運動エネルギーに利得が生じる というメカニズムによって超伝導が実現するという 新しい形の超伝導状態であることが確認された(これ を kinetic energy gain という)。これは通常の BCS 理論とは全く逆の状況である。[1, 22]

ストライプ状態

強相関に起因する特殊な形の波動関数として、電 荷密度波と反強磁性の密度波(とくにインコメンシュ レートの波数を持つスピン密度波)および、d波対 称性を持つ超伝導秩序の3者が空間的に波打ちなが ら共存しているストライプ状態と呼ばれるものが可



図 3.3.7: 黒丸が doublon、白丸が holon を表す。右 図は束縛状態を作った絶縁体状態(モット絶縁体) で、左図は束縛状態が重なり合って金属となった状 態。右図の状態に動けるキャリアがドープされた状 態が、高温超伝導の舞台であると考えられる。[1]

能である。実験的にもこのような形での超伝導と反 強磁性の共存という可能性が見出されている。この ストライプ状態が*tJ*モデルにおいて実現するかど うかについて、絶対零度における変分法によって調 べた。とくに超伝導の秩序変数の符号が、空間的に 正負を交替しながら存在するという今まで考えられ て来なかったような特異な状態が安定化する可能性 が示された。このような新しい量子状態が実現する パラメータ領域を明らかにし、またその原因を磁性 不純物を介したジョセフソン接合の理論から議論し た。[2] はこれに関するレビューである。

フラックス状態

高温超伝導体における有限温度の擬ギャップ状態 は、未だに理解が難しい問題である。現在でもいく つかの提案があるが、我々は以前提唱されたフラッ クス状態 (flux state) について、新しい観点からも う一度擬ギャップ状態の候補として詳しく検討する ことにした。これまでは、フラックス状態について 単純な試行波動関数を用いて研究がなされてきたが、 上記の doublon と holon の束縛状態、または自由な holon の状態という観点を加えて研究する必要があ る。また、波動関数に適当な位相をつけることによっ て運動エネルギーを下げる効果も期待される。これ らのことを考慮した変分モンテカルロ法によって、フ ラックス状態の安定性について調べている。[36, 51]

3.3.2 鉄砒素系超伝導体に関する理論

2008年の発見以来、世界的に注目を集めている鉄 砒素系超伝導体に関して、いくつかの角度から超伝 導や特徴のある磁性に関しての理論的研究を行って いる。

鉄系超伝導体における不純物効果の研究

鉄系超伝導体においては、磁気揺らぎによる超伝 導、いわゆる s₊- 状態が実現しているかどうかがひ



図 3.3.8:5 軌道モデルで計算された不純物近傍での 局所状態密度。1から順に、不純物から遠ざかって いく鉄サイト上の局所状態密度を示す。[3]

とつの大きな焦点となっている。これに関して、今 までの我々の理論研究で、非磁性不純物近傍の局所 状態密度の測定が s₊-- 状態の検証に有効であること を示した。

鉄系超伝導体に代表されるような、多軌道超伝導 体における不純物問題について、数値的な手法およ びT-matrix 近似を用いた解析的な手法に基づく研究 を行った。まず鉄系超伝導体の5軌道模型に対する RPA 近似によるギャップ関数の解析結果をもとに 超伝導状態の不純物問題を扱うのに適した有効模型 を構築した。得られた有効模型を用い、Bogoliubovde Gennes 方程式を解き、非磁性不純物近傍での超 伝導秩序変数の空間依存性や、局所状態密度を求め た。その結果、(1) 非磁性不純物近傍の局所状態密度 を測定することによって、いわゆる s^{+-} 状態と s^{++} とを状態を区別することが可能であることを示した。 つまり、非磁性不純物は超伝導ギャップ関数の位相 の情報を引き出すプローブとなりうる。また(2)不 純物ポテンシャルの強さに対する束縛状態の依存性 や、その要因を詳細に調べ、実際に実験結果を解釈 する際に有用となる情報を与えることができた。さ らにT-matrix 近似のもとで、多軌道の場合、かつ異 方的超伝導状態における不純物近傍の束縛状態につ いて解析的に調べ、数値計算で得られた結果が物理 的にどのように理解できるかについて明らかにした。 [19, 42]

以上の解析計算による研究に加え、実験と直接比較可能な数値計算による研究も進展させた。これについては、STMの実験研究者とも協力しつつ、鉄系超伝導体のFeAs面内に導入されたCo不純物近傍の局所状態密度の計算を行い(図3.3.8参照)、超伝導ギャップ関数の構造についての知見を与えることができた。[3]

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られるが、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。電荷の自由度による超伝導のメカニズムについてはレビューとしてまとめた。[7]

鉄-フタロシアニン化合物の局所電子状態の理論

鉄-フタロシアニン (Pc:図 3.3.9) 化合物 TPP[FePc (CN)₂]₂ は、3/4 フィリングの Pc の分子軌道 (π 軌道) が一次元的につながり、同時に鉄の d軌道に S = 1/2 の局在スピンがある系である。この系は伝導電子と局在スピンが相互作用する 1 次元物質として、多彩 な興味深い性質を示す。例えば、この系は低温で巨大な負の磁気抵抗を示す。また、 π 電子による電荷 秩序や d 電子による磁気秩序が現れることも知られ ている。この系に関して以下の二つの研究を行った。

(A) π-d 相互作用の発現機構とその符号の解明

フタロシアニン (Pc) の π 軌道と鉄の d 軌道間の π -d相互作用は、負の磁気抵抗の原因の一つである。 しかし、 π -d相互作用の微視的発現機構は解明され ていなかった。我々は、Pc の π 軌道と鉄の d 軌道を 含んだ有効模型を構築し、 π -d相互作用の発現機構に ついて研究した。その結果、「d 軌道と Pc 分子軌道 間の超交換相互作用」と「d 電子内・分子内でのフン ト結合」によって、反強磁性的な相互作用と強磁性 的な相互作用の両方が生じることを摂動論的な計算 により明らかにした。これらの π -d相互作用のメカ ニズムは、直交した軌道間の相互作用なので、不純 物アンダーソン模型での伝導電子-f 電子間の相互作 用(混成による c-f 相互作用)とは本質的に異なり、 分子の自由度のために生じる新規のメカニズムであ る。[9, 34]

さらに、相互作用の大きさを摂動論的な方法や数 値対角化の方法を用いて見積もった。その結果、現 実的なパラメータの範囲で、 π -d相互作用は強磁性 的にも反強磁性的にもなり得ることがわかった。さ らに、 π -d相互作用の有効模型を導出し、帯磁率の 温度依存性を数値くりこみ群を用いて求めて実験と の比較を行った。その結果、 π -d相互作用が反強磁 性的である場合のみ、実験を説明できることを示し た。[12, 61, 74]

(B) CN 基の超微細構造定数の異常な振る舞い

Fe-Pc 化合物の低温での鉄の d 電子の電子状態を 調べるために、CN 基中の炭素サイト(C)・窒素サイ ト(N) での NMR 測定が最近行われている。その結 果、常磁性状態 (電荷秩序や磁気秩序が起こるより 高温)では、炭素サイトと窒素サイトで、超微細結合 定数の符号が異なることがわかっている。この実験 結果は、分子軌道に基づいた単純な考え方では理解 できない現象であり、その微視的なメカニズムは謎 であった。我々は、この微視的なメカニズムを明ら かにするため、CN 基の分子軌道と C,N の核スピン、 Fe の d 軌道と d 軌道内での多体効果を取り入れた有



図 3.3.9: 鉄-フタロシアニン (Pc)。中央にあるのが 鉄元素で、そのまわりがフタロシアニン。この大き な分子が1次元的に並んだ構造をもつ。

効模型を構築し、摂動論を用いて解析した。解析の 結果、「Feのd軌道とCN基の分子軌道間の超交換 相互作用」と「d軌道内でのフント相互作用」によ り、C,N各々のサイトでスピン密度の符号が異なる というパラメータ領域が現れることが分かった。ス ピン密度の符号は超微細構造定数の符号に直接的に 反映されるので、このパラメータ領域では超微細構 造定数の符号がC,N上で異なり、実験事実をよく説 明できることが分かった。[43]

ベンゼン-ダイアニオン $((C_6H_6)^{2-})$ の LUMO 間 の反強磁性的な相互作用

多くの芳香族炭化水素には、縮退した最低非占有 軌道 (LUMO) がある。このような分子にさらに2つ の電子を加えた時、その2電子は縮退した LUMO を 占有する。その時、2電子間に強磁性的な相互作用 が働くか反強磁性的な相互作用が働くかは自明では ない。ベンゼン (C₆H₆) は2 重縮退をした LUMO を もつ。ベンゼンに2つの電子を加えた時 (ベンゼン-ダイアニオン: (C₆H₆)²⁻)の相互作用が強磁性的か 反強磁性的かは明らかにはなってない。我々は、ベ ンゼンの有効模型である拡張ハバード模型を構築し、 数値対角化を用いてその基底状態の電子状態を調べ た。その結果、現実的なパラメータ領域で、S = 0の基底状態が現れることがわかった。その基底状態 を解析した結果、LUMO 間の相互作用は反強磁性的 になることが分かった。[8]

有機ディラック電子系 α -(BEDT-TTF)₂I₃ におけ る欠陥誘起ゼロエネルギー局在状態

近年、擬2次元分子性導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃ (α -(ET)₂I₃) が質量ゼロのディラック電子系として注目 を集めている。 α -(ET)₂I₃ 中に格子欠陥などが入る と、ディラック電子系に特有の状態が出現する可能性 がある。そこで我々は、欠陥周辺における電子状態を 微視的に調べた。手法として強束縛模型の実空間にお ける対角化を用いた。その結果、単位胞子中のあるサ イト(Aサイト)に欠陥が存在するとき、局在状態が ゼロエネルギー(ディラック点)に現れることを見出 した。さらに、スーパーセル法を用いてAサイトに 欠陥のある場合のスピン帯磁率を求めた。その結果、 フェルミ面付近での状態密度の変調のため、スピン 帯磁率に特徴的な振る舞いが現れることがわかった。 これは、理想的な質量ゼロの2次元ディラック電子系 の場合とは異なっている。[15, 35, 38, 54, 62, 68, 69]

ダイマーモット絶縁体の電荷秩序

我々はこれらの有機モット絶縁体を理解するため には、ダイマーをひとまとまりと考えるだけでは不 十分であると考え、ダイマー内部の2つの分子を考 慮したモデルを調べた。[27,53] 計算には量子モン テカルロ法を用い、ダイマー内のホッピングとダイ マー間のクーロン相互作用を考慮した。その結果、以 下の結論が得られた。クーロン相互作用が大きいと きは、電荷秩序が高温で立つが、小さくなるにつれ て転移温度は低温側にシフトし、ある程度小さくな ると、秩序は現れなくなる。電荷秩序が立つところ で、誘電率が鋭いピークを示す。一方、リラクサー 的なブロードなピークの出現には、他の要因、たと えばダイマー間のホッピングが重要な役割を果たし ているということが示唆される。[53]

異方的三角格子スピン系における時間反転対称性の 破れたスピン液体状態

フラストレーションを持つスピン系では磁気秩序が 発達しにくいため、「スピン液体状態」と呼ばれる特 異な磁気無秩序状態が実現する可能性が指摘されて きた。実際 κ-(BEDT-TTF)₂Cu₂(CN)₃ や EtMe₃Sb [Pd(dmit)₂]₂という有機物質でこの可能性が議論さ れている。等方的な三角格子スピン系の基底状態は、 隣接したスピンが 120 度ずつ傾いた長距離秩序状態 をもつと考えられている。しかし、この状態は正三 角の格子の場合に特異的に実現するものであり、空 間的異方性や長距離相互作用などによって、この磁 気秩序は溶けてスピン液体状態が生じ得る。実際、空 間的異方性が僅かにでもあると、フラストレーショ ンを緩和するために相互作用の異方性が実効的に強 まり、一次元化や正方格子化が生じる可能性がある。 これらのことについてレビューを行った。[77]

3.3.4 ディラック電子系

最近発見された単層グラファイト(グラフェン)や 有機導体 α-(ET)₂I₃、さらに古くから調べられてい



図 3.3.10: ビスマスの分散関係と磁場中のランダウ 準位。(左) $\sigma_{xx}(右)\sigma_{+-}$ の場合の可能なランダウ準位 間遷移。

る物質である Bi (ビスマス) などの一連の物質にお いては、電子の運動が相対論的量子力学におけるディ ラック方程式と全く同じ形式で記述されることが示 されている。こうした固体中のディラック電子は、こ れまでにない新しい伝導現象を生み出しうると予想 され、新たな電子状態として非常に興味が持たれて いる。これら一連の物質群は「ディラック電子系」と 呼ばれ、その特殊な物性が近年注目されている。[20] 我々は興味ある物性を開拓すべく研究を開始した。

ディラック電子によるスピン偏極電流

我々はこれまでに、ビスマスにおけるディラック 電子が生む、特異な輸送現象を理論的に調べており、 バンド間ホール伝導度が特殊な性質を持ち、反磁性 電流と密接な関係を持っていることを見出してきた。 またこのバンド間ホール伝導度は不純物の影響をほ とんど受けず、エネルギー散逸が非常に小さいことが 期待される。本年度も引き続き下記の研究を行った。

ディラック電子系ではバンド間磁場効果が顕著に なると考えられるので、スピン-軌道相互作用が強い ビスマスのディラック電子系を取り上げ、磁気光学 応答を調べた。その結果をもとに、ディラック電子 を用いて完全スピン偏極した磁気光学電流を実現す る新しいメカニズムを提唱した。まず、等方的 Wolff 模型において磁場中 ac 電流相関関数を久保公式を 用いて計算し、ディラック電子特有の選択則を導い た。とくに円偏光を用いれば、スピン分極した最低 ランダウ準位のみに電子を励起することが可能とな り、その結果スピン偏極した電流を発生することが できることがわかった (図 3.3.10 の右図の σ_{+-} の場 合)。さらに、ディラック電子の正確な磁気モーメン トの定義を導出し、これをもとにスピン流相関関数 を計算し、円偏光のスピン偏極度を求めた。これま でスピン偏極度の理論限界は50%であったが、今 回のディラック電子を用いた新しいスピン偏極電流 の発生メカニズムを用いればスピン偏極率を100 %にすることが可能であることを示した。この結果

は、光の制御によりスピン流を生み出すことができ ることを意味し、スピントロニクス分野で新たな展 開を可能とするものである。[5, 26, 58]

ディラック電子のスピンホール効果

ビスマス中で実現するディラック電子は、顕著な スピンホール効果を生み、それが反磁性電流と同じ 表式で与えれることを発見した。スピンホール効果 とは、加えた電場に対して垂直方向にスピン流が発 生する現象であり、スピン軌道相互作用に起因する。 これまでにも様々な系で研究が進められてきたが、非 放射性元素中最大のスピン軌道相互作用を持つビス マスにおけるスピンホール効果は、理論・実験とも にこれまでほとんど調べられていなかった。

我々は久保公式に基づいてディラック電子系のス ピンホール伝導度を計算した。その結果、バンド間 効果が生むスピンホール伝導度の表式と反磁性の表 式とが(係数を除いて)厳密に一致することを見出 した。特に絶縁体領域では、スピンホール伝導度と 反磁性が簡単な関係式($\sigma_{syx} = (3mc^2/2e)\chi$)で結 びつけられていることが分かった。このことは、ビ スマスにおいて顕著なスピンホール効果が観測され ることを予測しただけにとどまらず、磁場によって 発生する反磁性電流と電場によって生まれるスピン ホール効果が双対性(ディラック電子が持つ相対論 的性質に起因している)を持っていることを強く示 唆している。[6, 26, 41, 45, 58, 79]

ディラック電子の超伝導状態における電磁応答

ビスマスのディラック電子を記述する有効モデルとして、軌道とスピンの自由度を持つ4×4の massive なディラックハミルトニアンがある。我々は、この ディラックハミルトニアンをもとに、ディラック電 子の超伝導状態におけるマイスナー効果とスピン流 の応答について調べた。[55, 76]

まずマイスナー効果について、通常の k^2 分散の場合に見られる反磁性項ではなく、バンド間効果を起源とする非自明なマイスナー効果を示すことを発見した。次にスピン流の応答について、超伝導体には静的な電場が入らないため、通常のスピンホール効果を記述する式 $j_i^S = \sigma_{ij}^S E_j$ に代わり、スピン流カーネルを使った表式 $j_i^S = -K_{ij}^S A_j$ を用いてベクトルポテンシャルに対するスピン流の応答を調べた。その結果、静的なベクトルポテンシャルに対しては、スピン流は消失することがわかった。しかしベクトルポテンシャルが有限の周波数を持つときには、超伝導体に電場が侵入することができ、このときは常伝導相と同様にスピンホール効果が起こるという結果を得た。

グラフェンにおける欠陥誘起の近藤効果の理論

最近、イオン照射されたグラフェンにおいて近藤 効果が観測され、注目を集めている。通常、近藤効 果は金属中の磁性不純物によって引き起こされるが、 この実験はグラフェン中の単純な欠陥が近藤効果を



図 3.3.11: グラフェン中の点欠陥とその周りの *sp*² 軌道とπ軌道

引き起こすことを示唆している。この近藤効果のメ カニズムを考え、実験事実(近藤温度のゲート電圧 依存性や通常に比べて大きな負の磁気抵抗)を説明 することができるかどうかについて調べた。まずグ ラフェン中の欠陥周辺での電子状態を考察し、点欠 陥に現れた sp^2 電子の持つ局在モーメントによって 磁性不純物のように振舞うことがわかった。さらに、 この系を記述する微視的モデルを提案し(図 3.3.11)、 数値くりこみ群を用いてその基底状態を解析した。 その結果、このモデルによって実験で得られている ような近藤温度のゲート電圧依存性を説明すること ができることを示した。また、 sp^2 電子と伝導電子(π 電子)間の相互作用が、点欠陥に伴って現れた π 電子由来の局在状態により強められることを明らか にした。[14, 30, 32, 39, 48, 59, 66, 78]

Ca₃PbOにおけるディラック電子の研究

グラフェンやビスマスなどで実現されているディ ラック電子系は、多くの興味深い性質を示すことが 知られている。さらにディラック電子系を持つ新し い物質を発見することは、当該分野における重要課 題のひとつである。

我々は、第一原理電子状態計算を用いて、立方晶逆 ペロブスカイト物質 Ca₃PbO(及びその関連物質)を 新しいディラック電子系として提案した [4]。第一原 理計算によると、Ca₃PbO のディラック電子は、ご く小さい質量項を持ち、3次元的であることがわか る。このとき、ディラック電子の線形分散の中心、す なわちディラック点は、まさにフェルミエネルギー のところに位置している。

さらに、第一原理計算で得られたバンド構造を再 現するタイトバインディングモデルを構成した。得 られたモデルを解析することによって、(1)低エネル ギーの有効ハミルトニアンが確かにディラックハミ ルトニアンになっていること、(2)ディラック電子を 構成するバンドが Pb 6p 軌道と Ca 3d 軌道に由来し ていること、(3)ディラック電子の出現にはそれらの 軌道の対称性が重要な役割を果たしていることなど を明らかにした。このようなディラック電子の起源



図 3.3.12: Ba₃SnO のフェルミエネルギー近傍の分 散関係。DP1 と DP2 が 2 つの Twin Dirac 点を示し ている。

に関する知見は、新しいディラック電子系を探索す るための重要なヒントを与えるものである。

また、上述のタイトバインディングモデルを用い て表面状態の研究も行った。その結果、バルクの状 態とは異なる非自明な表面バンドが出現することが わかった。この表面バンドは2重縮退(スピン縮退) を持たないことが重要であり、この表面状態を用い たスピン制御の可能性など今後の研究が期待される。 [4]

Twin Dirac 電子系の発見

Ca₃PbOの関連物質である Ba₃SnO に対しても、 第一原理計算に基づく電子状態の詳細な解析を行っ た。その結果、非常に興味深い結果を得た。すなわ ち、Ba₃SnO においては 2 つのディラック点がエネ ルギー・運動量空間できわめて近接して現れることを 見出した (図 3.3.12 参照)。我々はこれを Twin Dirac 電子と呼んだ。この特殊な構造のために、ドーピン グなどで化学ポテンシャルを人工的に調節すること ができれば、フェルミ面の形状がトポロジカルな変 化を含んで特異的な変化をすることがわかった。こ のため、たとえば電子の軌道帯磁率が特異な振舞い をすることが実験的に確かめられるはずであるとい うことを提唱した。[18]

3.3.5 重い電子系および近藤効果

ペアホッピング機構による電荷近藤効果の理論

タリウムイオンは1+と3+の形式価数をとり、2+ の価数を飛ばすことが知られている。また、錫イオン や鉛イオンは、2+,4+の価数はとるが3+の価数を飛 ばす。これらと同様な現象はヒ素やビスマスでも確認 されていて、バレンススキッピングと呼ばれている。 この現象を説明するために、原子内機構や原子間機構 など多くのメカニズムが提案されている。また、この 現象はイオン原子上での引力相互作用 (negative-U) とみなすことができる。

最近、タリウムを少量ドープした PbTe において 近藤効果が確認されて注目を集めている。タリウム イオンはバレンススキッピングをする元素なので、タ

3.3. 小形研究室

リウムの電荷の自由度を使った近藤効果(『電荷近藤 効果』)である可能性がある。この電荷近藤効果の起 源を明らかにするため、negative-Uアンダーソン模 型が提案されて電子状態が調べられているが、その 微視的な起源は明らかではない。我々はバレンスス キッピングの起源と電荷近藤効果を説明するために、 不純物イオンと伝導電子間のペアホッピング相互作 用を含んだ拡張アンダーソン模型を提案し、数値く りこみ群を用いて電子状態を解析した。

その結果、温度を下げるにつれて、まず ns⁰ と ns² の縮退した状態 (原子価スキッピング状態と呼ばれて いる) が現われ、さらに低温では電荷近藤効果がおこ り、最終的に電荷近藤-芳田一重項が形成されること が分かった。我々の理論で、これらの現象が統一的 に理解できることを示した。また、模型のパラメー ター空間内で、近藤温度が劇的に小さくなる領域が 存在することも明らかにした。(この成果 [10] は、日 本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の editors' choice に選ばれ た。)[10, 28, 66, 78]

Ru 酸化物の理論

Ru酸化物は豊富な電子状態を有しており、その 起源の解明は凝縮系物理学の重要課題のひとつであ る。電子状態の例として、スピン三重項超伝導、重 い電子、モット絶縁体、遍歴強磁性、電子ネマティッ ク、などが挙げられ、それらはさまざまな物質で実 現する。

この豊富な電子状態の起源を解明するには、Ruの t_{2g} 軌道に由来する軌道自由度と、RuO₆ 八面体ひずみ (つまり、rotation、tilting、flattening)の役割を明 らかにする必要がある。実際、Ca_{2-x}Sr_xRuO₄ では、 Sr₂RuO₄ から Ca 濃度を増加していくと、x < 1.5 で rotation、x < 0.5 で tilting、x < 0.2 で flattening が誘起される。それに伴い、基底状態がスピン三重項 超伝導から電子比熱係数の最大値が 255mJ/mol K² になる重い電子(大きな有効質量をもつフェルミ準 粒子)、さらに磁場下でメタ磁性転移を示す常磁性金 属、反強磁性絶縁体へと移り変わる。これらの多様 な電子状態の起源を解明するために、八面体ひずみ の主要な効果を考慮した有効 t_{2g} 軌道モデルを構築 し、以下の研究を行った。

(A) 量子臨界性と軌道依存する準粒子のくりこみ

 $Ca_{2-x}Sr_xRuO_4$ のx = 0.5近傍における重い電子 的な挙動の起源を明らかにするため、rotationの効 果を取り込んだ有効 t_{2g} 軌道モデルを構築し、局所相 関と空間相関が準粒子のくりこみにどのような影響 を与えるのかを調べた。局所相関の影響はグッヴィ ラー近似を使い [16]、空間相関の影響は乱雑位相近 似(RPA) [17, 23, 31] やゆらぎ交換(FLEX)近似 [49, 63, 70, 72] を使って考慮した。FLEX 近似によ る解析では、RPAで無視していた、量子臨界点近傍 で重要な役割を果たす、ゆらぎのモード間結合の電 子状態への影響も考察した。その結果、以下のこと がわかった。1)局所相関は、全軌道が絶縁体になる モット絶縁体として有効質量を増大する。その主な 寄与は $d_{xz/yz}$ 軌道に由来する。2) 空間相関によって、 強磁性およびその波数まわりのスピンゆらぎによっ て、有効質量がx = 0.5 で最大になる。その主な寄 与は d_{xy} 軌道に由来する。3) 空間相関を考慮すれば、 フント結合の値によらずかつrotationの有無によら ず、 d_{xy} の有効質量の方が $d_{xz/yz}$ 軌道の有効質量よ りも常に大きくなる。これらの結果を実験と比較す ると、Ru酸化物の金属相では、局所相関よりも空間 相関の方がより重要な役割を果たしていると言える。

(B) 多様な電子状態と RuO₆ ひずみの関係

Ru酸化物では、重い電子形成に重要な役割を果た す rotation に加え、tilting も電子状態を議論する上 で重要な役割を果たす。そこで、rotation が有限な 場合に、tilting の電子状態への影響を明らかにする ため、電子・正孔型散乱過程を考慮した FLEX 近似 を使い、いくつかのモデルについて、電荷ゆらぎと スピンゆらぎを調べた。[57, 64, 71, 72] その結果、 1)tilting の大きさによらずに強磁性ゆらぎが支配的 になる。2)tilting の増加により、 $d_{xz/yz}$ 軌道の磁気 的ゆらぎが増強される。3)tilting があっても、 d_{xy} 軌 道の有効質量が $d_{xz/yz}$ 軌道の有効質量よりも優位に 大きいことがわかった。これらの結果は実験と整合 している。

$(C)RuO_6$ ひずみのスピンホール効果への影響

軌道自由度をもつ遷移金属化合物は、巨大なスピ ンホール係数を示す物質の最も良い候補である。さ らに、スピン軌道相互作用が大きくない Sr₂RuO₄ も Pt 並みのスピンホール係数をもつ可能性が理論的に 提唱されている。しかしスピンホール係数はバンド 構造に非常に敏感な量であるため、詳細な研究が必 要である。そこで、 $Ca_{2-x}Sr_{x}RuO_{4}$ におけるスピン ホール効果について、八面体ひずみの効果を考慮し た現実的な強束縛モデルを用いて、久保公式に基づ いて解析を行った [40]。その結果、1) フェルミ海項 (つまりベリー局率項)が主要な場合には、八面体ひ ずみの効果は、各 t_{2g} 軌道の電子の占有数を変える効 果とバンド幅の変化の両方である。2) フェルミ面項 が主要な場合には、八面体ひずみの影響は、各 t_{2a} 軌 道の電子の占有数を変える効果だけである。3)d_{xz/yz} 軌道の占有数が1.4程度になると、スピンホール係 数が Pt と同程度の巨大な値になることがわかった。

3.3.6 磁性体およびスピン軌道相互作用

カイラル磁性体 $CrNb_3S_6$ の有効模型の導出

カイラル磁性体は、最近、そのスピン構造や異常 ホール効果などの点で注目を集めている。伝導体で は、例えば、MnSiやFeGe、CrNb₃S₆など、絶縁体 では、CsCuCl₃などが知られている。これらの物質 の磁性発現機構として、絶縁体では、結晶構造とス ピン-軌道相互作用に由来したジャロシンスキー・守 谷相互作用が、伝導体では、MnSiの電子状態による ものが提案されている。MnSiでは、Mnのd軌道だ けで形成された電子系にスピン-軌道相互作用を導入 することにより、結晶構造に由来した伝導電子間の ジャロシンスキー・守谷的な相互作用が導出されて いる。

CrNb₃S₆も MnSi 同様、伝導体であるが、その電 子状態は MnSi と非常に異なっている。また、帯磁 率から、Crのd電子はほぼ局在しており、低温で は、このdスピンがカイラル磁性を形成することが 分かっている。したがって CrNb3S6 は、f 電子系で 議論されているような、局在電子と遍歴電子が共存 する系であることがわかる。しかしこのようなモデ ルから、ジャロシンスキー・守谷的な相互作用がどの ように現れるかについてはわかっていなかった。そ こで我々は、まず、CrNb₃S₆の電子状態を周期アン ダーソン模型を用いて記述し、それを用いて d 電子 間の RKKY 相互作用を導出した。その時、原子内で のスピン軌道相互作用と結晶の対称性によって、通 常のd電子系では現れない相互作用が現われ、結果 として、この相互作用が、Cr のd 電子間のジャロシ ンスキー・守谷相互作用になることを明らかにした。 [11, 29, 56, 60, 73]

4d³、5d³電子系におけるスピン軌道相互作用の効果

3 つの d 電子をもつ 5 d^3 や 4 d^3 電子系遷移金属酸化 物は、d 軌道のスピン軌道相互作用が大きいために、 近年非常に興味が持たれている。例えば、NaOsO₃ (5 d^3 系)はスレーター転移と呼ばれる新奇の金属絶 縁体転移を示し、SrTcO₃ (4 d^3 系)では、非常に高い 温度 ($T_N \sim 1000K$)で反強磁性体に転移する。一般 に、4d,5d 電子は大きなスピン軌道相互作用をもって いるが、今までの理論ではスピン軌道相互作用の効 果は実効的に小さくなると考えられてきた。しかし、 最近、これらの化合物での磁気モーメントが測定さ れ、今までの理論との矛盾が明らかになってきた。

そこで、我々はd³電子系の遷移金属イオンの電子 状態を調べるため、スピン軌道相互作用を含む有効 模型を構築し、数値対角化を用いてその磁気モーメ ントの大きさを考察した。その結果、スピン軌道相 互作用が大きいときには今までの理論とは異なって、 磁気モーメントが減少することがわかった。この結 果から、4d³や5d³化合物ではスピン軌道相互作用 が電子状態に重要な役割を果たし、特に NaOsO₃や SrTcO₃は、L-S 結合領域と J-J 結合領域の中間に位 置していることを明らかにした。[13, 75]

フラストレーションが強いカゴメ格子系でのスピン 状態

フラストレーションを持つスピン系では磁気秩序 が発達しにくいため、「スピン液体状態」と呼ばれ る特異な磁気無秩序状態が実現する可能性が指摘 されてきた。カゴメ格子系物質 ZnCu₃(OH)₆Cl₂ や Cu₃V₂O₇(OH)₂2H₂O という層状物質でも、低温で この状態が発達している可能性が議論されている。 これらの物質の物性には、スピンカイラリティとい う量が深く関わっているとも言われている。スピン カイラリティは、カゴメ格子や三角格子の三角形上 のスピンの積($K = S_1 \times S_2 \times S_3$)で表わされ、こ れによる秩序や、スピン液体状態への影響が議論されている。この量や磁化率に対し、層内及び層間の 反強磁性相互作用の大きさが与える影響を調べるため、異方性を導入して古典モンテカルロ法による解 析を行なった。その結果、層間の相互作用はいずれ にも影響を与えず、層内の相互作用はベクトルカイ ラリティや磁化率を増強するということが示された。 したがって、層状のカゴメ格子系物質は二次元性が 十分強いと考えられる。[37, 47]

<報文>

(原著論文)

- H. Yokoyama, M. Ogata, Y. Tanaka, K. Kobayashi, and H. Tsuchiura: J. Phys. Soc. Jpn. 82, 014707-1-16 (2013). "Crossover between BCS Superconductor and Doped Mott Insulator of d-wave Pairing State in Two-Dimensional Hubbard Model"
- [2] M. Ogata: Physica C 481, 125-131 (2012). "Stripe states in t-t'-J model from a variational viewpoint"
- [3] H. Yang, Z. Wang, D. Fang, T. Kariyado, G. Chen, M. Ogata, T. Das, A. V. Balatsky, and Hai-Hu Wen: Phys. Rev. B 86, 214512-1-8 (2012). "Unexpected weak spatial variation of local density of states induced by individual Co impurity atoms in Na(Fe_{1-x}Co_x)As crystals revealed by scanning tunneling spectroscopy"
- [4] T. Kariyado and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. 81, 064701-1-11 (2012). "Low-Energy Effective Hamiltonian and the Surface States of Ca₃PbO"
- [5] Y. Fuseya, M. Ogata and H. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. 81, 013704-1-4 (2012). "Spin-Polarization in Magneto-Optical Conductivity of Dirac Electrons"
- [6] Y. Fuseya, M. Ogata and H. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. 81, 093704-1-4 (2012). "Spin-Hall Effect and Diamagnetism of Dirac Electrons"
- [7] A. Ardavan, S. Brown, S. Kagoshima, K. Kanoda, K. Kuroki, H. Mori, M. Ogata, S. Uji, and J. Wosnitza: J. Phys. Soc. Jpn. 81, 011004-1-27 (2012). "Recent Topics of Organic Superconductors"
- [8] H. Matsuura, K. Miyake, and H. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. 81, 095001-1-2 (2012). "Antiferromagnetic Exchange Interaction between Electrons on Degenerate LUMOs in Benzene Dianion"
- [9] H. Matsuura, M. Ogata, K. Miyake, and H. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. 81, 104705-1-8 (2012). "Theory of Mechanism of π-d interaction in Iron-Phthalocyanine"
- [10] H. Matsuura, and K. Miyake: J. Phys. Soc. Jpn. 81, 113705-1-4 (2012). "Theory of Charge Kondo Effect on Pair Hopping Mechanism" (selected as JPSJ editors' choice)
- [11] H. Matsuura, T. Shishidou, and J. Kishine: in preparation. "Derivation of Effective Hamiltonian on Metalic Chiral Magnet"

- [12] H. Matsuura and M. Ogata: in preparation. "Theory of Magnetic Susceptibility in Iron- Phthalocyanine: Numerical Renormalization Group Study"
- [13] H. Matsuura and K. Miyake: in preparation. "Effect of Spin-Orbit Interaction on $(4d)^3$ and $(5d)^3$ -Based Oxides"
- [14] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. 81, 063709-1-4 (2012). "Theory of Defect-Induced Kondo Effect in Graphene: Numerical Renormalization Group Study"
- [15] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: in preparation. "Defect-Induced Zero-Energy Localized State in Massless Dirac Electron System α-(BEDT-TTF)₂I₃"
- [16] N. Arakawa and M. Ogata: Phys. Rev. B 86, 1251261-1-15 (2012). "Origin of the heavy fermion behavior in $Ca_{2-x}Sr_xRuO_4$: Roles of Coulomb interaction and the rotation of RuO_6 octahedra"
- [17] N. Arakawa and M. Ogata: arXiv:1211.1155. "Competition between the spin fluctuations for the d_{xy} orbital around q = (0,0) and $q \sim (\pi,0)$ in $\operatorname{Ca}_{2-x}\operatorname{Sr}_x\operatorname{RuO}_4$ "
- [18] T. Kariyado and M. Ogata: in preparation. "Twin Dirac electrons and diamagnetism in Ba₃SnO"
- (会議抄録)
- [19] M. Ogata and T. Kariyado: to appear in Journal of Physics: Conference Series. "Impurity bound-state as a probe of order-parameter symmetry in ironpnictide superconductors: T-matrix approach"
- [20] H. Fukuyama, Y. Fuseya, M. Ogata, A. Kobayashi, and Y. Suzumura: Proceedings of the International Workshop on Electronic Crystals (ECRYS-2011) (Cargese, 15-27 August 2011), Physica B 407, 1943-1947 (2012). "Dirac electrons in solids"
- [21] H. Yokoyama, S. Tamura, T. Miyagawa, K. Kobayashi, and M. Ogata: Proceedings of the 24th International Symposium on Superconductivity (ISS2011) (Tokyo, Japan, October 24-26, 2011), Physics Procedia 27, 60-63 (2012). "Strongly correlated nature of *d*-wave superconductivity in cuprates"
- [22] H. Yokoyama, S. Tanuma, K. Kobayashi, and M. Ogata: (ArXiv:1211.6175). to appear in Phys. Proc. (2013). "Variational study of conduction in doped Mott insulator in terms of kinetic energy"
- [23] N. Arakawa and M. Ogata: Proceedings of the 19th International Conference on Magnetism with Strongly Correlated Electron Systems (ICM-2012) (Busan, 8-13 July 2012), accepted for publication of J. Korean Phys. Soc.
- [24] T. Kanao and M. Ogata: Proceedings of the 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), (Beijing, China, August 10-17, 2011). J. Phys.: Conf. Ser. 81, 022045-1-4 (2012). "Spatial Modulation Patterns in Two-Dimensional Fulde-Ferrel-Larkin-Ovchinnikov Superconductivity"

[25] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: Proceedings of the 20th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (HMF20), (Chamonix Mont-Blanc, France, July 22-27, 2012). To be published in J. Phys.: Conf. Ser. "Theory of Defect-Induced Kondo Effect in Graphene: Effect of Zeeman Field"

(国内雑誌)

[26] 伏屋雄紀、小形正男、福山秀敏:固体物理 47, no. 5 (2012). "ビスマスにおけるディラック電子の理論"

(学位論文)

[27] 鈴木祥悟: "分極をもつ有機物ダイマーモデルに対す るモンテカルロ計算"(東京大学大学院理学系研究科・ 修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [28] H. Matsuura: The Fourth International Workshop on the Dual Nature of f-Electrons (Himeji, Japan, July 4–6, 2012). "Theory of Charge Kondo Effect on Pair Hopping Mechanism"
- [29] H. Matsuura: The Yonsei-Todai Joint Workshop 2013 (Tokyo, Japan, February 19, 2012) "Derivation of Dzyaloshinskii-Moriya Interaction in Metallic Chiral Magnet CrNb₃S₆"
- [30] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: The 20th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (HMF20), (Chamonix Mont-Blanc, France, July 22–27, 2012) "Theory of Defect-induced Kondo Effect in Graphene: Numerical Renormalization Group Study"
- [31] N. Arakawa and M. Ogata: The 19th International Conference on Magnetism with Strongly Correlated Electron Systems (ICM2012) (Busan, Korea, July 8–13, 2012). "Roles of Quantum Fluctuations in Forming Heavy-Fermions for Ca_{2-x}Sr_xRuO₄"
- [32] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: The 31st International Conference on the Physics of Semiconductor (ICPS2012), (Zurich, Switzerland, July 29–August 3, 2012) "Theory of Defect-induced Kondo Effect in Graphene"
- [33] Y. Fuseya, M. Ogata and H. Fukuyama: Swiss-Japan Workshop 2012 (Wako, RIKEN, September 11–13, 2012) "Spin-Transport Phenomena of Dirac Electrons in Bismuth"
- [34] H. Matsuura: International Symposium on Materials Science Opened by Molecular Degrees of Freedom (MDF2012), (Miyazaki, Japan, December 1– 4, 2012) "Theory of Mechanism of π-d Interaction in Iron-Phthalocyanine"

- [35] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: (MDF2012), (Miyazaki, Japan, December 1– 4, 2012) "Defect-Induced Zero-Energy Localized State in α-(BEDT-TTF)₂I₃"
- [36] H. Yokoyama, S. Tamura, K. Kobayashi, and M. Ogata: 25th International symposium on superconductivity (ISS2012) (Funabori, Tokyo, December 5–7, 2012) "Staggered flux state as normal state for underdoped Hubbard model"
- [37] A. Igarashi and M. Ogata: GCOE International Sumposium on Physical Sciences Frontier (Tokyo, Japan, December 8–9, 2012) "Monte Carlo Simulation of Heisenberg model on the Kagome lattice"
- [38] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: GCOE International Symposium on Physical Sciences Frontier (Tokyo, Japan, December 8–9, 2012) "Defect-Induced Zero-Energy Localized State in α-(BEDT-TTF)₂I₃"
- [39] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: QS²C Theory Forum: International Symposium on "Strongly Correlated Quantum Science" (Tokyo, Japan, January 26–29, 2013). "Theory of Defect-Induced Kondo Effect in Graphene: Role of Defect-Induced Zero-Energy Localized State"
- [40] N. Arakawa: QS²C Theory Forum (Tokyo, Japan, January 26–29, 2013). "Effect of the octahedral-distortions on spin Hall effect in $Ca_{2-x}Sr_xRuO_4$ "

招待講演

- [41] M. Ogata, Y. Fuseya, and H. Fukuyama: 12th Japanese-German Symposium "Emergent Phenomena in Novel Quantum Phases of Condensed Matter" (Shuzenji, Japan, July 14–17, 2012) "Spin Hall effect and large diamagnetism in bismuth"
- [42] M. Ogata and T. Kariyado: Conference of Materials and Mechanisms of Superconductivity 2012 (M2S 2012) (Washington D.C. July 29–August 3, 2012) "Impurity bound-state as a prove of orderparameter symmetry in Iron-Pnictide superconductors"

(国内会議)

一般講演

- [43] 松浦弘泰、小形正男:日本物理学会、横浜国立大学
 2012, 9.18–9.21 (秋季大会) "TPP[FePc(CN)₂]₂の CN 基における超微細構造定数の理論"
- [44] 横山 寿敏、田村駿、小林憲司、小形正男:日本物理 学会、横浜国立大学 2012, 9.18-9.21(秋季大会)" 斥力ハバード模型における弱相関-強相関クロスオー バー"
- [45] 伏屋雄紀、小形正男、福山秀敏:日本物理学会、横浜 国立大学 2012, 9.18–9.21 (秋季大会) "ビスマスに おけるディラック電子のスピンホール効果"
- [46] 藤本行延、松浦弘泰、三宅和正:日本物理学会、横浜 国立大学 2012, 9.18-9.21 (秋季大会) "臨界スピン ゆらぎによるスピン軌道相互作用の増大"

- [47] 五十嵐章大、小形正男:日本物理学会、横浜国立大学
 2012, 9.18–9.21 (秋季大会) "S=1/2 カゴメ格子反強
 磁性体の低エネルギー状態"
- [48] 金尾太郎、松浦弘泰、小形正男:日本物理学会、横浜 国立大 2012, 9.18–9.21 (秋期大会) "グラフェンの欠 陥誘起近藤効果における磁場効果"
- [49] 荒川直也、小形正男:日本物理学会、横浜国立大学 2012, 9.18–9.21 (秋季大会)"軌道自由度をもつ重い 電子 Ca_{2-x}Sr_xRuO₄ におけるゆらぎのモード間結合 の効果"
- [50] 小形正男、伏屋雄紀、福山秀敏:日本物理学会、広島 大学 2013, 3.26-3.29(年次大会)"ビスマスにおけ るスピン(磁気モーメント)ゼーベック効果"
- [51] 横山 寿敏、田村駿、小林憲司、小形正男:日本物理 学会、広島大学 2013, 3.26–3.29(年次大会)"正方格 子における交替フラックス状態の安定性"
- [52] 渡邉 努、横山寿敏、宮川智章、小形正男:日本物理 学会、広島大学 2013, 3.26-3.29(年次大会)"キャリ アドープした三角格子ハバード模型における超伝導 状態の計算"
- [53] 五十嵐章大、小形正男:日本物理学会、広島大学 2013, 3.26-3.29(年次大会)"フラストレーションの強い系 におけるスピン状態"
- [54] 金尾太郎、松浦弘泰、小形正男:日本物理学会、広島 大学 2013, 3.26-3.29(年次大会)"ディラック電子 系 α-(BEDT-TTF)₂I₃における欠陥誘起ゼロエネル ギー局在状態"
- [55] 溝口知成、小形正男:日本物理学会、広島大学 2013, 3.26-3.29(年次大会)"ディラック分散を持つ電子系の超伝導と「スピン」輸送"
- [56] 松浦弘泰、獅子堂達也、岸根順一郎:日本物理学会、 広島大学 2012, 9.18-9.21 (秋季大会) "カイラル磁 性体 CrNb₃S₆ の微視的模型の導出"
- [57] 荒川直也:日本物理学会、広島大学 2013, 3.26–3.29 (年次大会) "Ru 酸化物に置ける RuO₆ 八面体の tilting に関する FLEX 解析"
- [58] 伏屋雄紀,小形正男,福山秀敏:基盤研究A「固体中 のディラック電子」第一回ディラック電子研究会(東 京大学 2012, 7.25–7.26) "ビスマス中ディラック電子 のスピン伝導現象"
- [59] 松浦弘泰、金尾太郎、小形正男: 基盤研究 A 「固体中 のディラック電子」第一回ディラック電子研究会(東 京大学 2012, 7.25-7.26) "ディラック電子系における 近藤効果"
- [60] 松浦弘泰:基盤研究 A 第三回研究会 –カイラル磁性 研究の現状と展望 (青山学院大学 2012, 8.4–8.5) "Cr_{1/3}NbS₂ 化合物の有効模型の構築"
- [61] 松浦弘泰、小形正男:第6回物性科学領域横断研究 会、(東京大学 2012, 11.27–11.28) "鉄ーフタロシア ニン化合物における磁化率の温度依存性の理論"
- [62] 金尾太郎、松浦弘泰、小形正男:第6回物性科学領域横 断研究会、(東京大学 2012, 11.27–11.28) "α-(BEDT-TTF)₂I₃ における欠陥誘起ゼロエネルギー局在状態"

- [63] 荒川直也:第6回物性科学領域横断研究会、(東京大学 2012, 11.27–11.28) "軌道自由度をもつ重い電子 Ca_{2-x}Sr_xRuO₄ におけるゆらぎのモード間結合の効果"
- [64] 荒川直也:第6回物性科学領域横断研究会、(東京大学 2012, 11.27–11.28) "Ru 酸化物に置ける RuO₆ 八面体の tilting に関する FLEX 解析"
- [65] 三宅和正、藤本行延、松浦弘泰:第6回物性科学領域 横断研究会、(東京大学 2012, 11.27–11.28) "臨界ス ピンゆらぎと近藤効果による反対称スピン軌道相互 作用の増大"
- [66] 松浦弘泰:強相関電子系理論の最前線 —若手による オープン・イノベーション—(和歌山、紀伊勝浦、2012, 12.13-12.15) "様々な系における近藤問題の理論的研究:グラフェンの欠陥による近藤効果と電荷近藤効 果"
- [67] 小形正男、伏屋雄紀、福山秀敏:基盤研究A 「固体中 のディラック電子」第二回ディラック電子研究会(下 呂、岐阜 2012, 12.19–12.20)"ビスマスにおけるスピ ンゼーベック効果"
- [68] 金尾太郎、松浦弘泰、小形正男: 基盤研究 A 「固体中 のディラック電子」第二回ディラック電子研究会(下 呂、岐阜 2012, 12.19–12.20) "α-(BEDT-TTF)₂I₃ に 対する不純物効果"
- [69] 金尾太郎、松浦弘泰、小形正男:物性研究所共同利用 スーパーコンピュータ 計算物質科学研究センター・ 元素戦略プロジェクト合同研究会「計算物性物理学 の新展開」(東京大学物性研究所 2013, 1.10-1.11)" ディラック電子系 α-(BEDT-TTF)₂I₃ における欠陥 誘起ゼロエネルギー局在状態"
- [70] 荒川直也:合同研究会「計算物性物理学の新展開」(東 京大学物性研究所 2013, 1.10–1.11) "Ca_{2-x}Sr_xRuO₄ における重い電子に関する FLEX 解析"
- [71] 荒川直也:物性研究所共同利用スーパーコンピュータ 計算物質科学研究センター・元素戦略プロジェクト合 同研究会「計算物性物理学の新展開」(東京大学物性 研究所 2013, 1.10–1.11) "Ru 酸化物に置ける RuO₆ 八面体の tilting に関する FLEX 解析"
- [72] 荒川直也:新学術領域「重い電子系の形成と秩序 化」第4回研究会(東京工業大学、2013, 1.12–1.14) "Ca_{2-x}Sr_xRuO₄における軌道依存する準粒子のく りこみ"
- [73] 松浦弘泰、獅子堂達也、岸根順一郎:第1回東北大学 卓越大学院研究会「金属錯体の固体物性最前線」(東 北大学、2013, 2.4-2.6) "カイラル磁性体 CrNb₃S₆の 微視的模型の導出"
- [74] 小形正男、松浦弘泰:分子自由度が拓く新物質科学、 第7回領域会議、東京大学 2013, 3.1–3.3 "鉄ーフタ ロシアニン化合物での新奇の π-d 相互作用の解明"
- [75] 松浦弘泰:学振研究開発専門委員会:4d、5d 電子系材料 の小研究会 (東京大学、2013, 3.2) "Na_{1-x}Ca_xOsO₃ 系の理論の試み"
- [76] 溝口知成、小形正男:第1回「高温超伝導フォーラム」 キックオフミーティング (広島大学学士会館、2013, 3.25) "ディラック系の超伝導"

招待講演

- [77] 小形正男:日本物理学会、横浜国立大学 2012,9.18-9.21 (秋季大会)領域3、7、8合同チュートリアル講 演"スピン液体の理論"
- [78] 松浦弘泰:電子相関理論の最前線に関する研究会(京都市左京区大原、2012,11.10-11.12) "様々な系における近藤問題の理論的研究:グラフェンの欠陥による近藤効果と電荷近藤効果"
- (セミナー)
- [79] 伏屋雄紀、小形正男、福山秀敏:東京理科大学,第1 回神楽坂・凝縮系理論勉強会(2012.11.23)"ビスマ ス中ディラック電子が生むスピン輸送現象"

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ナノ構造 体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,緩和の遅い熱伝導現象を第一原理に基づ いてシミュレーションするためのモデリング手法の 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・界面の構造・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 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

固体の第一原理電子状態計算にとっての最も重要 な課題のひとつに、高精度計算の実現がある。最もよ く用いられる、密度汎関数法理論(DFT)における局 所密度近似(LDA)や一般化勾配近似(GGA)といっ た簡単な近似には、バンドギャップの評価や強相関 系の記述などにおいて精度上の問題点が存在する一 方で、DFTでは系統的に近似精度を向上させる方法 が明確でない。そこで我々はトランスコリレイティッ ド(TC)法と呼ばれる、DFTの枠組みによらない第 一原理電子状態計算手法の開発を行ってきた。

TC 法における多体波動関数はスレイター行列式と ジャストロウ因子 $F = \exp\left[-\sum_{i < j} u_{ij}\right]$ (u_{ij} は二体 関数)の積として表される。今年度、我々は(i)ジャ ストロウ因子最適化の手法開発を昨年度に引き続き 行った。今年度はジャストロウ関数の長距離部分を 結晶の誘電率を用いて効率的に最適化する手法を開 発し、バンドギャップの大きな絶縁体のバンドギャッ プが大幅に改善されることを確かめた。またジャス トロウ関数の短距離部分の最適化もバルクシリコン に適用し、短距離部分の最適化は(現在の範囲では) バンドギャップの精度にほとんど影響を与えないこ と、また一方で格子定数の精度は改善されることを 確かめた。(ii) 先述のジャストロウ因子最適化と、以 前開発した TC+Configuration Interaction Singles (TCCIS) 法を利用して、固体フッ化リチウムの光吸 収スペクトルを計算した。この物質は極めて強い励 起子束縛エネルギー(1.5eV 程度)を持つ事で有名 だが、鋭い励起子ピーク及び、連続的なスペクトル の形状、ともに精度良く再現されることを確かめた。

ハイブリッド密度汎関数理論に基づく擬ポテンシャ ルの開発

交換相関エネルギー汎関数に LDA や GGA といっ た近似を用いる DFT は、電子相関を取り込みつつも 計算コストが低いという利点がありよく用いられて いるが、一方でバンドギャップや格子定数の予測を誤 るという難点がある。このような難点を克服しうる 次世代の第一原理電子状態計算手法として、LDA や GGA の汎関数とハートリー・フォック (HF) 法の交 換項を混ぜ合わせたハイブリッド汎関数法が注目さ れている。ハイブリッド汎関数法で内殻電子の効果 を表す擬ポテンシャルを作る際には,GGAの一種の PBE とよばれる汎関数が用いられているが、内殻電 子と価電子との相互作用は用いる汎関数によって異 なるため、ハイブリッド汎関数法にはそれに則した 擬ポテンシャルを用いるほうが理論的には整合性が 高い。そこで我々はハイブリッド汎関数法の一種で ある PBE0 に基づく擬ポテンシャルの開発を行った。

PBE0による固体の計算において,異なる手法で 作った擬ポテンシャルを使用したときに,物理量の計 算結果にどの程度の差が生じるのかを調べたところ, Siでは PBE0の擬ポテンシャルの代わりに LDA や Hartree-Fock 法の擬ポテンシャルを用いるとバンド 構造は 0.1eV、格子定数は 1%、体積弾性率は 6%のず れが生じた一方で、PBEの擬ポテンシャルと PBE0 の擬ポテンシャルとで差がほとんど生じないことが 分かった。物質による違いは検討を要するものの,現 時点での結果は、PBE0の計算において PBEの擬ポ テンシャルを用いる妥当性を示すものである。

物質構造探索手法の開発

固体表面への原子・分子の吸着,界面の接合構造, あるいは化学反応の前後における分子の構造などを 取り扱う時,これらの原子系が取り得る(準)安定 構造を探索する問題は,その原子系の対応するポテ ンシャルエネルギー曲面内の極小点探索の問題に帰 着する.しかし,例えば原子数 N の孤立原子系に対 応するポテンシャルエネルギー曲面は(3N-6)次元 の超曲面であり,その大域的な形状を知ることは不 可能である.従って,ポテンシャルエネルギー曲面 上の局所的な情報からそれらの極小点を探索する手 法が必要となる.

最急降下法や共役勾配法のようなポテンシャル面 の勾配を用いる極小点探索手法はその代表的な例で ある.これらの方法を用いれば、系の構造変数 \mathbf{x} に 対してその構造の取るポテンシャルエネルギー $f(\mathbf{x})$ 及びその勾配 $\partial f(\mathbf{x})/\partial \mathbf{x}$ を計算する手段を持ってい れば、ポテンシャル曲面上をエネルギーの低い方向 へと下っていくことでポテンシャルエネルギー曲面 上の極小点へと辿り着くことが出来る.しかしなが ら一般にポテンシャル面上には多数の極小点が存在 する為、このような方法では大体の場合ポテンシャ ル面上のウォーカーは重要な構造、例えば最安定構 造に辿り着く前に多数の極小点のいずれかに捉えら れてしまう. このような困難に対応するアプローチの一つとして ポテンシャル面内のある極小点から別の極小点へと飛 び移るという手法が考えられる.この場合には(準) 安定構造同士の中間状態となる遷移構造,ポテンシャ ル面上の鞍点をどのように見つけるのかということ が問題になる.その一つの指標として極小点と鞍点に おけるポテンシャル面のヘッセ行列 ∂² f(**x**)/∂x_i∂x_j の固有値の符号の違いに着目し,それと結びつくポ テンシャル面の非調和性を鞍点探索の指標として用 いることが提案されている.

そこで我々は効率的な物質構造探索を実現するこ とを目的として、ポテンシャル面の非調和性を探索 の指標として用いる非調和修正ポテンシャル法の提 案、及びプログラム開発を行い、簡単なモデルポテ ンシャルでその有効性を検証した。具体的には元の ポテンシャル面に対して、出発点となる既知の極小 点で頂上を持つような山形の補正項を加えて嵩上げ を行い、嵩上げされた仮想的なポテンシャル面に対 して極小点探索を行うことで元の極小点へと飛び移 る.この時、補正項にポテンシャル面の非調和性の 寄与を取り入れることでより効率的な探索を可能に した. 今後、第一原理計算を用いたより実際的なテ スト計算を行って手法の改良などを目指していく.

Brillouin 領域積分法の改良

結晶における諸々の物理量(全エネルギーや電荷・ スピン密度、フォノンの振動数、誘電関数など)を 数値計算によって得るためには、結晶の並進対称性 に関する量子数(k)についての積分を行う必要があ る。この種の積分は、kが Brillouin 領域を定義域と しているために、しばしば Brillouin 領域積分と呼ば れている。

多くの場合、その被積分関数は階段関数やデルタ 関数を含んでおり、そのことが数値積分を行う上で ネックとなる。すなわち、積分を和で置き換える方 法では高い精度が得られない。

例として全エネルギーに対する一電子軌道からの 寄与 $\int d^3k\theta(\epsilon_{\rm F}-\epsilon_k)\epsilon_k$ を計算する場合を考える。こ の積分を数値的に評価する方法は次のとおりである。 (1)Brillouin 領域を埋め尽くすように四面体で分割 し、(2)各四面体内で $\epsilon_k \epsilon k$ に線形な関数とみなし て積分を解析的に行い、(3)全ての四面体からの寄与 を総和する。従来は(2)において、四面体頂点での値 から内部の関数を線形補間により求めていたが、そ の場合 ϵ_k が凸関数である時には大きな誤差が生じて いた。

我々は線形補間を行う代わりに最小二乗法を用い て ϵ_k を線形な関数でフィットする方法を考案した。 これにより ϵ_k が凸関数であっても高い精度で数値積 分を行うことが可能になった。全エネルギー以外の 量の計算に対しても同様な方法が適用できる。

我々はこの方法を用いて MgB₂ におけるホウ素の 面内振動のエネルギーを計算した。図 3.4.13 に従来 の補間法による結果を破線、我々の方法による結果を 実線で示す。横軸は数値積分を行うための Brillouin 領域の分割数を表しており、分割数を大きくするほ ど精密な計算ができるが、同時に計算コストが増大 するためより少ない分割数で正確な結果を得る(分 割数に対して計算結果が収束する)ことが望まれる。 我々の方法では従来の方法より早く収束に達するこ とができる。



図 3.4.13: MgB₂ におけるホウ素の面内振動の振動数の計 算結果を Brillouin 領域分割数に対してプロットした。破 線が従来の補間法、実線が我々の方法による結果である。 分割数を大きくしていくと、我々の方法では計算結果が分 割数にほとんど依存しなくなる (収束する) が従来の方法 ではなかなか収束しない。

3.4.2 第一原理電子状態計算の応用

焼結磁石材料の界面物理

ネオジム磁石(Nd₂Fe14B 焼結磁石)の保磁力発 現のメカニズムにはまだ未知の部分が多いものの、 焼結磁石材料の微細組織が保磁力発現に重要な役割 を果たしている事は実験的に良く知られているため、 主相ー副相間の微細組織界面における磁気異方性が 主相結晶と比較してどの様に変化するかを明らかに する事は意義深い。Nd サイトの磁気異方性は結晶場 により固定される 4f 電子密度の異方性により支配さ れると考えられるため、まず結晶場の源となる界面 構造を同定する必要がある。2012年度は副相として Nd 酸化物に着目し、主相との界面における安定構造 を理論的に探査し、その電子状態を明らかにする事 を試みた。まず、Nd 酸化物単体を検討したところ、 NdOの場合には、Ndによるfcc格子における6配 位侵入サイトに酸素原子が配置される rocksalt 構造 が4配位のzinc-blende構造よりも安定である一方、 Nd4Oの場合には酸素が4配位サイトに配置される 方が6配位サイトの場合よりも安定となった。さら に主相と酸化物相の界面においては、界面主相側第 ー層のNd原子のd電子密度が主相内部と比べて顕 著に減少する事が分かった。これは、界面第一層を 局所的に酸化する事により、界面における磁化反転 生成核の発生を抑止する事に活用出来る可能性を示 唆している。



図 3.4.14: R₂Fe₁₄B 主相のスピン密度分布。

GaP 固溶体太陽電池材料の物質デザイン

太陽電池材料として高格子ミスマッチ化合物半導体が注目されている。これは、中間バンド半導体とも呼ばれ、光学遷移の可能な中間バンドの存在により複数のバンドギャップ値を活用出来るため、通常の太陽電池材料よりも多数の太陽光スペクトルを活用する事が出来る。一方理論的には、密度汎関数理論(DFT)の一般化密度勾配近似(GGA)はバンドギャップ値を過小評価してしまうため、太陽電池のための材料設計には不十分である。そこで本研究では、DFT-GGA汎関数と非局所Hartree-Fock交換項を断熱結合定理に基づき混合したハイブリッドDFT法により様々なGaP固溶体(完全結晶と異なりGaP固溶体は容易に直接ギャップとなり得る。)の電子状態と光学伝導度を第一原理的に計算し、ドーパントの種類・ドープ量および欠陥構造の影響を考察した。

電子状態はハイブリッド DFT の HSE 汎関数を用 いて計算し、光学伝導度は時間依存摂動論を用いて 求めた。HSE 汎関数は GGA-PBE 汎関数において 過小評価されていたバンドギャップ値を改善するた め、光学伝導度スペクトルが上方にシフトする。ま た、ハイブリッド DFT の計算コストは GW 等の非 占有状態を用いた多体摂動論よりも十分に低く、実 験で想定される格子ミスマッチ半導体におけるドー パント濃度 (0.4-1.8%) を考慮したスーパーセルによ る第一原理構造サンプリングを行う事が可能となっ た。様々なドーパント種を検討した結果、Mg と O の同時ドーピングが生成エネルギーと中間バンド位 置および光学遷移確率の観点から有望である事が分 かった。

熱電材料におけるフォノン伝導特性の解析

日々大量に廃棄される工業廃熱の有効利用のため、 高性能熱電材料への需要が近年高まっている。高い



図 3.4.15: リン化ガリウムにおけるリン空孔と Mg-O 共 ドーパントによる波動関数。



図 3.4.16: I型クラスレートの結晶構造

熱電性能 $ZT = \sigma S^2 T / (\kappa_c + \kappa_\ell)$ を有し、次世代の 熱電変換デバイスへの応用が期待されている物質は 様々あるが、本研究では I 型クラスレート化合物に 注目し、フォノン伝導特性の解析を行った。

I型クラスレートは図 3.4.16 のように sp3 ネット ワークで構成される 12 面体および 14 面体の籠と、 それぞれの籠に内包されたゲスト原子からなる複雑 な構造を持つ。この物質群では、内包されたゲスト 原子が籠内をガラガラと動き回るラットリング振動 により格子熱伝導率 κ_ℓ が低減し、その結果高い ZT を示す事が知られている。しかし、その詳しいメカ ニズムに関する理解はこれまで不十分であった。

ラットリング振動と格子熱伝導率の関連性をミクロ スコピックな視点から理解することを目的とし、当研 究グループではI型クラスレート化合物 Ba₈Ga₁₆Ge₃₀ (BGG)のフォノン伝導特性を第一原理的に解析した。 我々の手法では、まず高精度の第一原理計算を行い 原子間の調和および非調和のばね定数を決定する。 これらのばね定数をボルツマン輸送方程式 (BTE)や 非平衡分子動力学法 (NEMD)と組み合わせることで κ_{ℓ} を見積もる。本手法に基づいて100K での格子熱 伝導率を見積もった結果、BTE と NEMD でそれぞ れ 0.8, 1.4±0.2 W/mK という値を得た。これらは報 告されている測定値 1.1-1.9 W/mK と比べて定量的 に妥当な値である。さらに、ゲスト原子が存在しな いクラスレートモデルを構成し、フォノン伝導特性 の変化を詳しく解析した結果、ゲスト - ホスト相互 作用は主に低エネルギーフォノンの緩和時間 $\tau \ge 1$ 桁以上減少させることを明らかにした。その一方で、 同じくフォノン伝導率に重要なフォノン群速度 vに は大きな変化が見られなかった。また、 τ の減少に よって κ_{ℓ} ($\propto Cv^{2}\tau$)にも1桁以上の減少が見られた。 ラットリング振動の影響をさらに詳しく理解する ため、I型クラスレート Ba₈Ga₁₆Sn₃₀(BGS)におけ るフォノン特性の解析も行っている。BGS では14面 体内のゲスト原子が非中心位置を占める非中心ラッ トリングが観測されており、BGG よりも更に低い κ_{ℓ} を示す。我々は、分子動力学シミュレーションを用 いて、ラットリングの非中心性とフォノン散乱の関 連性を理解することを目指している(図 3.4.17)。



図 3.4.17: 分子動力学シミュレーションのスナップショット。 左の BGG とは異なり、右の BGS ではゲスト原子が 非中心位置を占めている。

チタン酸ストロンチウム (SrTiO₃)の酸素空孔と隠れた不純物水素

チタン酸ストロンチウム (SrTiO₃) は量子常誘電 性と酸素同位体置換による強誘電転移,酸素空孔導 入による金属転移と超伝導転移など、興味深い物性 を示す誘電体である。酸素空孔は理論的にも実験的 にも2価の欠陥 V_O²⁺ であると考えられているが,水 素雰囲気中でアニールすると1価の欠陥 V_O⁺ になる ことが報告されており、その原因は明らかになって いない。我々は不純物水素が酸素空孔の価数変化を 引き起こす可能性を考え、SrTiO3 に酸素空孔を導入 した系の第一原理計算を行って、安定な水素位置と 荷電状態を調べた。その結果、水素ガス雰囲気中で は電子の化学ポテンシャルの広い範囲にわたり酸素 空孔に水素の陰イオン(ヒドリド)が捕獲された欠 陥 H⁺ が安定に存在し、実験で報告された価数変化 を説明できることが明らかとなった。また実現され る条件の範囲は狭いものの、水素原子が2個捕獲さ れた中性欠陥が安定化する可能性も見出された。格 子間位置にある不純物水素は陽イオン(H⁺)状態に なることが知られていることから、今回の結果は、不 純物水素を酸化物へのドーパントとして用いる場合 に酸素空孔まで含めた検討が必要であることを示唆 している。

<報文>

(原著論文)

- 3.4. 常行研究室
- Y. Gohda and S. Tsuneyuki, "Optical conductivity of highly mismatched GaP alloys", Appl. Phys. Lett., **102**, 023901 (2013).
- [2] Y. Ando, Y. Gohda, and S. Tsuneyuki, "Ab initio molecular dynamics study of the Helmholtz layer formed on solid-liquid interfaces and its capacitance", Chem. Phys. Lett. 556, 9 (2013).
- [3] Y. Ando, Y. Gohda, and S. Tsuneyuki, "Dependence of the Schottky barrier on the work function at metal/SiON/SiC(0001) interfaces identified by first-principles calculations", Surf. Sci. 606 1501 (2012).
- [4] Yoshiki Iwazaki, Toshimasa Suzuki, Youichi Mizuno, and Shinji Tsuneyuki, Doping-induced phase transitions in ferroelectric BaTiO₃ from ?rstprinciples calculations, Phys. Rev. B 86, 214103 (2012).

(学位論文)

- [5] (博士論文) 只野央将: "Atomistic study of vibrational and transport properties of phonons with first-principles anharmonic lattice model"(第一原 理非調和格子モデルを用いたフォノン振動・伝導特性 の原子論的研究),東京大学.
- [6] (修士論文)遠藤辰哉:「ポテンシャルエネルギー曲 面の非調和性を用いた物質構造探索手法」,東京大学.

(解説)

- [7] 常行真司:「スパコンで未来社会への競争力を築く一 計算物質科学イニシアティブ(CMSI)について」、工 業材料 2014 年 4 月号
- [8] 合田 義弘:「永久磁石」、東京大学理学系研究科・理 学部ニュース 44, (5) 12 (2013).
- <学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [9] S. Tsuneyuki, 'Computational Materials Science Initiative and Elements Strategic Science in Japan', IUMRS-ICEM2012, Sep. 23-28, 2012 (Yokohama, Japan)
- [10] M. Ochi and S. Tsuneyuki, "Optimization of the Jastrow factor based on pseudo-variance minimization with a similarity-transformed Hamiltonian", MAterial Simulation in Petaflops era (MASP 2012), Kashiwa, Japan, Jul. 12, 2012.
- [11] M. Ochi and S. Tsuneyuki, "A new method to optimize the Jastrow factor using the transcorrelated method and RPA", International Symposium on Computics: Quantum Simulation and Design (ISC-QSD), Osaka, Japan, Oct. 12, 2012.
- [12] M. Ochi and S. Tsuneyuki, "Optimization of the Jastrow factor in the correlated wave function of electrons using the first-principles transcorrelated method for solid-state calculations", Conference on Computational PHysics (CCP2012), Kobe, Japan, Oct. 15, 2012.

- [13] M. Ochi and S. Tsuneyuki, "Optimization of the Jastrow factor by RPA and pseudo-variance minimization using the transcorrelated Hamiltonian for periodic systems", 15th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN-15), Taipei, Taiwan, Nov. 5, 2012.
- [14] M. Ochi and S. Tsuneyuki, "New method for calculating the optical absorption spectrum for solids using the transcorrelated method", March meeting of The American Physical Society, Baltimore, USA, Mar. 19, 2013.
- [15] Mitsuaki Kawamura, Yoshihiro Gohda, and Sinji Tsuneyuki: Development of numerical codes for ab initio prediction of superconducting transition temperature, ISSP-CMSI international symposium of Materiel Simulation in Petaflops era(MASP2012), Kashiwa, Japan, July 12, 2012.
- [16] Mitsuaki Kawamura, Yoshihiro Gohda, and Sinji Tsuneyuki: Ab initio prediction of superconducting transition temperatures based on SCDFT International Symposium on Computics: Quantum Simulation and Design (ISC-QSD), Osaka, Japan, October 12, 2012.
- [17] Mitsuaki Kawamura, Yoshihiro Gohda, and Sinji Tsuneyuki: Ab Initio Prediction of Superconducting TC: with Accurate Calculation of Phonons, 15th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN-15), Institute of Atomic and Molecular Sciences, Taipei, November 6, 2012.
- [18] Mitsuaki Kawamura, Yoshihiro Gohda, and Sinji Tsuneyuki: New Application of Tetrahedron Method for Brillouin-Zone Integrations: Calculations of Phonons in Metal, GCOE International Symposium on Physical Sciences Frontier, Tokyo, Japan, December 8, 2012.
- [19] Y. Gohda and S. Tsuneyuki, "Optical conductivity of GaP alloys studied by hybrid-density functional theory", 2013 APS March Meeting, (Baltimore, USA, Mar. 21, 2013).
- [20] Y. Gohda, "Computational design of nano/energy materials from first principles", The Yonsei-Todai Joint Workshop 2013 (Tokyo, Japan, Feb. 19, 2013).
- [21] Y. Gohda and S. Tsuneyuki, "Ab-Initio Identification of a New Structure of Graphene Induced by GaN Epitaxy", 2012 MRS Fall Meeting, (Boston, USA, Nov. 27, 2012).
- [22] Y. Gohda and S. Tsuneyuki, "New phase of graphene at interfaces with GaN", International Symposium on Computics: Quantum Simulations and Design (ISC-QSD) (Osaka, Japan, Oct. 12, 2012).
- [23] Y. Gohda and S. Tsuneyuki, "Structural phase transition of graphene caused by GaN epitaxy predicted by ab-initio calculations", Graphene

Nanoscience: from Dirac Physics to Applications, (Granada, Spain, Sep. 12, 2012).

- [24] Y. Gohda and S. Tsuneyuki, "First-principles predictions of graphene structure governed by GaN epitaxy", International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS16), (Genova, Italy, Jul. 2, 2012).
- [25] Y. Gohda and S. Tsuneyuki, "Optical Conductivity calculated with Hybrid-Denisty Functional Theory", The 15th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN15), (Taipei, Taiwan, Nov. 06, 2012).
- [26] T. Tadano, Y. Gohda and S. Tsuneyuki: Anharmonic force constants from first-principles molecular dynamics simulations: Applications to lattice thermal conductivity calculations, MASP2012, Chiba, Japan, Jul. 12, 2012.
- [27] T. Tadano, Y. Gohda and S. Tsuneyuki: Atomistic studies on the reduced thermal conductivity of a thermoelectric clathrate Ba₈Ga₁₆Sn₃₀, ISC-QSD, Osaka, Japan, Oct. 12, 2012.
- [28] T. Tadano, Y. Gohda and S. Tsuneyuki: Firstprinciples studies on the reduced thermal conductivity of a clathrate Ba₈Ga₁₆Sn₃₀, CCP2012, Kobe, Japan, Oct. 15, 2012.
- [29] T. Tadano, Y. Gohda and S. Tsuneyuki: Firstprinciples studies on vibrational and transport properties of phonons in thermoelectric clathrates Ba₈Ga₁₆X₃₀(X=Ge, Sn), ASIAN-15, Taipei, Taiwan, Nov. 6, 2012.
- [30] Yoshiki Iwazaki, Youichi Mizuno, and Shinji Tsuneyuki: First-Principles Study of Ferroelectricity of BaTiO₃ under Carrier Electron Doping: The 6th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC-6), Yokohama, Japan, June 26-28, 2012.
- [31] H. Misawa, Y.Gohda, and S.Tsuneyuki: A firstprinciples study of interfaces between Nd2Fe14B grains and a grain boundary in NdFeB sintered magnet, GCOE International Symposium on Physical Sciences Frontier, Tokyo, Japan, Dec. 8, 2012.
- [32] K. Yoshizawa, Y. Iwazaki, Y. Gohda and S. Tsuneyuki: Effects of impurity hydrogen in rutile TiO₂: Density-functional calculation, ISC-QSD, Osaka, Japan, Oct. 12, 2012.
- [33] T. Endo, Y. Gohda, S. Tsuneyuki: Structural exploration by scaled hypersphere search and force inversion, International Symposium on Computics: Quantum Simulation and Design, Osaka, Japan, Oct. 11-13, 2012.
- [34] T. Endo, Y. Gohda, S. Tsuneyuki: Structural exploration Utilizing Anharmonicity of Potential Energy Surfaces, 15th Asian Workshop on FIrst-Principles Electronic Structure Calculations, Taipei, Taiwan, Nov. 5-7, 2012.

招待講演

- [35] S. Tsuneyuki, 'Atomistic Modeling of Materials Based on First-Principles Calculation', The Seventh General Meeting of ACCMS-VO, Nov. 23-25, 2012 (Sendai, Japan).
- [36] S. Tsuneyuki, 'Transcorrelated method: a feasible and self-consistent wave function theory for solids', Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (Asian-15), Nov. 5-7, 2012 (Taipei, Taiwan).
- [37] Y. Gohda, "First-principles interface science: structures and electronic states", Material simulation in petaflops era (MASP2012), (Kashiwa, Japan, Jul. 12, 2012).
- [38] Y. Gohda, "First-principles predictions on properties of nano/energy materials", Collaborative Conference on Materials Research (CCMR2012), (Seoul, Korea, Jun. 27, 2012).

(国内会議)

一般講演

- [39] 越智正之,常行真司:「第一原理トランスコリレイティッド法に基づくジャストロウ因子最適化の新手法」第3回 CMSI研究会~超並列計算が拓く新しい計算物質科学~ 岡崎コンファレンスセンター(岡崎市)2012年12月3日
- [40] 越智正之,常行真司:「トランスコリレイティッド法と 乱雑位相近似に基づく相関波動関数の最適化とその固 体バンド計算への適用」物性研究所共同利用スーパー コンピュータ 計算物質科学研究センター (CCMS)・ 元素戦略プロジェクト合同研究会「計算物性物理学の 新展開」 物性研究所(柏市)2013年1月10日
- [41] 越智正之,常行真司:「RPA とトランスコリレイティッド法に基づく固体のジャストロウ因子の最適化」日本物理学会第68回年次大会 広島大学(東広島市)2013年3月26日
- [42] 山本良幸、合田義弘、常行真司:「hybrid 密度汎関数 理論に基づく擬ポテンシャルの開発」日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学(横浜市)、2012 年 9月19日
- [43] 山本良幸、合田義弘、常行真司:「ハイブリッド密度 汎関数理論に基づく擬ポテンシャルの開発とその応 用」日本物理学会第68回年次大会、広島大学(東広 島市)、2013年3月27日
- [44] 合田 義弘、Z. Torbatian, 見澤 英樹、土浦 宏紀、常 行 真司:「ネオジム磁石主相-酸化物相界面の第一原 理計算」日本金属学会 2013 年度春季大会 東京理科 大学(東京都新宿区) 2013 年 3 月 29 日
- [45] 合田 義弘、常行 真司:「GaN 結晶成長に伴うグラフェンの構造相転移」日本物理学会 2012 年秋季大会 横浜国立大学(横浜市) 2012 年 9 月 19 日
- [46] 合田 義弘、三宅 隆、前園 涼、吉本 芳英、尾崎 泰助、石橋 章司、常行 真司:「新磁石材料探査とその保磁力発現機構の解明」平成24年度「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題中間報告会 イイノカンファレンスセンター (東京都千代田区)2013年3月15日

- [47] 合田 義弘、常行 真司:「GaP 固溶体太陽電池材料の物 質デザイン」物性研究所共同利用スーパーコンピュー タ・計算物質科学研究センター (CCMS)・元素戦略 プロジェクト合同研究会:計算物性物理学の新展開 東京大学(柏市)2013年1月10日
- [48] 合田 義弘、常行 真司:「ハイブリッド DFT による GaP 固溶体の光学伝導度」第3回計算物質科学イニ シアティブ(CMSI)研究会 自然科学研究機構 岡 崎コンファレンスセンター(岡崎市)2012年12月4 日
- [49] 安藤 康伸、合田 義弘、常行 真司:「固液界面の電気 二重層キャパシタンスに関する第一原理計算」日本 物理学会 2012 年秋季大会 横浜国立大学(横浜市) 2012 年 9 月 20 日
- [50] 只野央将,合田義弘,常行真司:「熱電変換材料におけるフォノン伝導特性の第一原理計算」,日本物理学会2012年秋季大会,横浜国立大学(横浜市),2012年9月19日.
- [51] 只野央将,合田義弘,常行真司:「第一原理に基づく I型クラスレート化合物の格子熱伝導解析」,計算物 性物理学の新展開,東京大学(柏市),2013年1月 10日.
- [52] 只野央将,合田義弘,常行真司:「I型クラスレート化 合物におけるフォノン伝導特性の第一原理計算」,日本物理学会第68回年次大会,広島大学(東広島市), 2013年3月26日.
- [53] 岩崎誉志紀、鈴木利昌、水野洋一、常行真司:「第一 原理計算による BaTiO₃の電子誘起相転移現象の解 析」,第 32 回エレクトロセラミックス研究討論会,東 京工業大学, 2012 年 10 月 26-27 日.
- [54] 岩崎誉志紀:「電子ドーピングによる強誘電性の消失 と強誘電性の起源に関する第一原理計算」,平成 24 年度 CMRI 第二回シンポジウム,東北大学金属材 料研究所, 2013 年 1 月 21 日.
- [55] 見澤英樹,合田義弘,土浦宏紀,常行真司:「Nd₂Fe₁₄B 焼結磁石における主相-Nd 酸化物相界面構造の第一 原理計算」,日本物理学会第 年次大会,東広島(広島), 2013 年 3 月 26 日.
- [56] 遠藤辰哉,合田義弘,常行真司:超球面探索法と力場 反転法による構造探索,日本物理学会秋季大会,横 浜(神奈川),2012年9月18?21日.
- [57] 遠藤辰哉,合田義弘,常行真司:ポテンシャル面の 非調和性を用いた物質構造探索,計算材料科学と数 学の協働によるスマート材料デザイン手法の探索ー 階層構造を解析するー,仙台(宮城),2013年3月 13?15日.
- [58] 遠藤辰哉,合田義弘,常行真司:ポテンシャルエネ ルギー曲面の非調和性を用いた物質構造探索,日本 物理学会 年次大会,東広島(広島),2013年3月 26?29日.
- [59] 河村光晶,合田義弘,常行真司:「超伝導密度汎関数 理論による軽元素超伝導体の第一原理計算」,日本物 理学会 秋季大会,横浜(神奈川),2012年9月18日.

招待講演

- [60] 常行真司「大規模計算による計算物質科学の現状と 未来」,第1回 RSC/CMSI 合同セミナー「マルチス ケール構造化学を拓く高エネルギー光科学と計算科 学の戦略的協奏」,2012年9月15日
- [61] 常行真司「計算物質科学イニシアティブ (CMSI)の 概要と材料研究への取り組み」,材料戦略委員会分 野融合研究会(東京),2013年1月29日
- [62] S. Tsuneyuki, 'Recent Development in the Transcorrelated Method for Condensed Matter', GCOE 分野横断研究会 「多体相関の数値解法」(東 京大学), 2013 年 2 月 5 日
- [63] 常行真司「CMSI「計算物質科学イニシアティブ」とは」,第6回放射光連携研究ワークショップ(東京), 2013年2月14日
- [64] 常行真司「クラスレート化合物 BGG, BGS の熱伝 導」, CMSI 産官学連続研究会「熱マネジメント技術 を支える材料シミュレーション」(東京), 2013 年 3 月 12 日
- [65] 常行真司「計算材料科学の現状と課題」,計算材料科学と数学の協働によるスマート材料デザイン手法の探索~階層構造を解析する~(東北大学原子分子材料科学高等研究機構),2013年3月13日
- [66] 常行真司「元素戦略の概要とシンポジウムの主旨」、 日本物理学会第67回年次大会シンポジウム「元素戦略が促進する分野融合と物理」(広島大学)2013年3月26日
- [67] 合田 義弘:「焼結永久磁石材料の異相界面」第3回大 阪大学産業科学研究所共同研究研究会メープル有馬 (神戸市) 2013 年2月11日

(一般向け講演)

- [68] 常行真司「コンピュータ上に『物質』をつくる ス パーコンピュータを用いた物質科学研究入門—」,日 本物理学会市民向け講演会(横浜),2012年9月22日
- [69] 常行真司「科学者という仕事~職業選択の一例として」、日本弦楽指導者協会沖縄大会(宮古市マティダ市民劇場) 2013 年 3 月 30 日

4 物性実験

4.1 藤森研究室

藤森研究室では、角度分解光電子分光 (angle-resolved photoemission spectroscpy: ARPES), 軟 X 線磁気 円二色性 (soft x-ray magnetic circular dichroism: XMCD) 等の高エネルギー分光を用いて強相関電子 系の電子状態の研究を行っている。遷移金属化合物, 磁性半導体などの複雑物質が示す高温超伝導, スピン依存伝導, 金属ー絶縁体転移, 界面新奇物性等の発現機構解明をめざしている。実験室光源を用いた測定の他に、紫外光から X 線に至る高輝度放射光 (高エネルギー加速器研究機構フォトン・ファクトリー(KEK-PF), SPring-8, 広島大放射光, スタンフォード放射光, 台湾放射光) を用い実験を行っている。

4.1.1 高温超伝導

銅酸化物における高温超伝導は、その発見以来 20 年余りにわたって多くの研究が積み重ねられてきた が、今だに機構解明に至っていない、世紀を超えた難 間である。また、反強磁性絶縁体相と超伝導相の間 に出現する「擬ギャップ相」の起源解明に対しても、 超伝導機構解明に匹敵する努力が払われてきた。さ らに、近年発見された鉄系高温超伝導体は複雑な電 子構造を持ち、銅酸化物と共通点を持つ一方で、多 くの相違点を有している。我々は、これらの超伝導 物質における超伝導の発現機構解明や異常な物性の 発現機構解明を目指して、電子状態研究の最も有力 な手段である角度分解光電子分光(ARPES)等を用 いて電子状態を調べている。

鉄系超伝導体の Fe サイト置換によるキャリアードー ピング

鉄系超伝導体の母体は反強磁性金属で、銅酸化物 と同様に、電子またはホールをキャリアーとしてドー プすることによって超伝導が発現する。しかし、Fe サイトの Co 置換など、Fe 原子を他の元素で置換す ることによってキャリアーがドープされ超伝導が発 現する点は、Cu サイトの原子置換が CuO₂ 面に乱れ を導入し超伝導を壊してしまう銅酸化物超伝導体と 全く異なっている。このような、銅酸化物と全く異な る鉄系超伝導体のキャリアードーピング機構を明ら かにするために、我々は母体 BaFe₂As₂ の Fe を Co



図 4.1.1: 角度分解光電子 (ARPES) で観測した鉄系高 温超伝導体 $Ba(Fe_{1-x}Ni_x)_2As_2$ のフェルミ面の断面図。 $Fe \rightarrow Ni$ 置換によって電子的フェルミ面が拡大,ホール的 フェルミ面が収縮している [13]。

置換する他に Ni 置換, Cu 置換した物質の ARPES を測定した(図 4.1.1)。Co \rightarrow Ni \rightarrow Cu と行くにした がって,実際の伝導電子数(フェルミ面の体積)の増 加が,形式的な電子数の増加に比べて徐々に抑えら れる傾向が見られ,同時に超伝導臨界温度 T_c も乱れ の影響で抑えられることがわかった。一方,磁気・構 造転移の温度は伝導電子数によってのみ決まり,乱 れには鈍感なことがわかった [13]。

多層系銅酸化物高温超伝導体の"キンク"構造

高温超伝導機構の解明のためには、クーパー対形成 のための電子間引力を媒介するボソン励起の種類とそ の電子との結合様式を明らかにする必要がある。その ためには、電子とボゾン励起の相互作用により生じる バンド構造の折れ曲がり(キンク構造)を詳しく調べ ることが有効である。我々は、銅酸化物高温超伝導体 のなかでも超伝導臨界温度*T*_cの特に高い多層系超伝 導体(CuO₂面が多数隣接する)Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+δ} のARPESを行いキンク構造の運動量依存性・温度 依存性を詳しく調べ、キンク構造が、電子が光学フォ ノン、音響フォノンを励起して超伝導ギャップ最大の 運動量領域に散乱されることにより生じることを確 かめた[16]。また、CuO₂面間の準粒子トンネルを示 す構造がキンク構造に重なって初めて観測された。

4.1.2 強相関界面・スピントロニクス



図 4.1.2: 強相関金属 SrVO₃の角度分解光電子(ARPES) スペクトル。左下:実験データ。右下:導出した自己エネ ルギーを用いたシミュレーション。左上:自己エネルギー を除いたバンド分散 [8]。

金属-絶縁体転移,巨大磁気抵抗,スピン・電荷・軌道 秩序など多彩な物性を示す遷移金属酸化物,100%ス ピン偏極した電子を取り出せずハーフメタル,半導 体に遷移金属原子をドープした希薄磁性半導体とこ れらの物質の作る極薄膜・界面は,従来のエレクト ロニクスにスピンの自由度を導入した"スピントロ ニクス"の材料として期待されている。これらの物質 の電子状態に対する界面効果,閉じ込め効果,基板 圧力効果を光電子分光を用いて調べ,元素選択的磁 性・局所的磁性をX線磁気円二色性(XMCD)を用 いて調べている。とくに,磁場方向を自由に変えら れるベクトル型超伝導マグネットを用いたXMCD装 置を開発し,KEK-PFの偏光可変アンジュレータ・ ビームラインで極薄膜・界面の磁気異方性の研究を 行っている。

単結晶薄膜の光電子分光測定による広エネルギー範 囲での自己エネルギーの導出

固体中の電子相関効果は、時間的な揺らぎを表す 動的な複素ポテンシャル「自己エネルギー」に集約 される。フェルミ準位近傍の準粒子が感じる比較的 ゆっくりした揺らぎに関しては、ARPESにより自 己エネルギーを導出することがよく行われてきたが、 早い揺らぎに対する(すなわち広いエネルギー範囲 における)自己エネルギーを実験的に求めることは できなかった。我々は、典型的な強相関金属である SrVO3の高品質薄膜についてARPESを測定し、新 しい解析法法によって V 3d バンド全域における自 己エネルギーを導出した(図 4.1.2)[8]。1電子近似 における1本のバンドがコヒーレント・バンドと非 コヒーレント・バンドに分裂するときの、理論的に 予想されたグリーン関数実部の特徴的振る舞いも同

定した。

磁気トンネル結合素子におけるホイスラー合金/MgO 界面のスピン偏極

高性能スピントロニク・デバイスとして注目され ている MgO 単結晶をトンネル障壁とした磁気トン ネル結合素子の性能をさらに向上させるために,強 磁性金属電極として金属 Fe の代わりにハーフメタル (フェルミ準位でのスピン偏極度 100%の強磁性体) であるホイスラー合金を用いたものが提案され開発 が進められている。最近,ホイスラー合金の化学不 定比性を制御することでトンネル磁気抵抗比を向上 できることがわかってきているので,我々は様々な化 学不定比性をもつホイスラー合金 Co₂MnGe と MgO 界面の XMCD を測定し,過剰 Mn よりフェルミ準 位でのスピン偏極度が増すというシナリオに合致す る結果を得た [10]。

<受賞>

- 原野貴幸: International Conference on Heavy Electrons and Novel Quantum Phases (ICHN 2012) (Gyeongju, Korea, July 5-7, 2012) 優秀ポスター賞.
- [2] 堀尾眞史: 11-th A3 Foresight Program Joint Reseach on Novel Properties of Complex Oxides (Chongming Island, China, Nobember 10-13, 2012) 優秀ポスター賞.
- [3] 原野貴幸:A3 Foresight Program "Joint Research on Novel Properties of Complex Oxides" Tokyo Meeting (University of Tokyo, March 14-16, 2013) 優秀 ポスター賞.
- [4] 鈴木博人:理学系研究奨励賞(2013年3月).

<産業財産権の出願・取得>

[5] 古瀬充穂,岡野眞,淵野修一郎,藤森淳,門野利治, 藤平潤一,藤平誠一,内野公,藤平秀幸,磁場発生装 置および磁気分光測定装置,特願 2012-41922,平成 24 年 2 月 28 日.

<報文>

(原著論文)

- [6] V.R. Singh, K. Ishigami, V. K. Verma, G. Shibata, Y. Yamazaki, T. Kataoka, A. Fujimori, F.-H. Chang, D.-J. Huang, H.-J. Lin, C.T. Chen, Y. Yamada, T. Fukumura, and M. Kawasaki: Ferromagnetism of cobalt-doped anatase TiO₂ studied by bulk- and surface-sensitive soft x-ray magnetic circular dichroism, Appl. Phys. Lett. **100**, 242404– 1-5 (2012); arXiv:1206.0339.
- [7] M. Yi, D.H. Lu, R.G. Moore, C.-H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Yoshida, A Fujimori, and Z.-X. Shen: Electronic reconstruction through the structural and magnetic transitions in detwinned NaFeAs, New J. Phys. **14** 073019–1-13 (2012); arXiv:1111.6134.

- [8] S. Aizaki, T. Yoshida, K. Yoshimatsu, M. Takizawa, M. Minohara, S. Ideta, A. Fujimori, K. Gupta, P. Mahadevan, K. Horiba, H. Kumigashira, and M. Oshima: Self-energy on the low- to highenergy electronic structure of correlated metal SrVO₃, Phys. Rev. Lett. **109**, 056401–1-5 (2012); arXiv:1201.4456.
- [9] T. Okane, Y. Takeda, H. Yamagami, A. Fujimori, Y. Matsumoto, N. Kimura, T. Komatsubara, and H. Aoki: Magnetic behavior near the boundary of 4f delocalization in ferromagnetic CeRu₂Ge₂ and paramagnetic CeRu₂Si₂ observed by Ce M_{4,5} XAS and XMCD, Phys. Rev. B 86, 125138–1-11 (2012).
- [10] V.R. Singh, V.K. Verma, K. Ishigami, G. Shibata, T. Kadono, A. Fujimori, D. Asakura and T. Koide, Y. Miura, M. Shirai, G.-f. Li, T. Taira, and M. Yamamoto: Effects of off-stoichiometry on the spin polarization at the $Co_2Mn_{\beta}Ge_{0.38}/MgO$ interfaces: X-ray magnetic circular dichroism study, Phys. Rev. B **86**, 144412–1-6 (2012).
- [11] S.-i. Fujimori, T. Ohkochi, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagami, Y. Haga, E. Yamamoto, and Y. Onuki: Itinerant nature of U 5*f* states in uranium mononitride revealed by angle resolved photoelectron spectroscopy, Phys. Rev. B 86, 235108–1-8 (2012); arXiv:1211.4679.
- [12] E.B. Guedes, M. Abbate, K. Ishigami, A. Fujimori, K. Yoshimatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, F.C. Vicentin, P.T. Fonseca, and R.J.O. Mossanek: Core level and valence band spectroscopy of SrRuO₃: Electron correlation and covalence effects, Phys. Rev. B 86, 235127–1-8 (2013).
- [13] S. Ideta, T. Yoshida, I. Nishi, A. Fujimori, Y. Kotani, K. Ono, Y. Nakashima, S. Yamaichi, T. Sasagawa, M. Nakajima, K. Kihou, Y. Tomioka, C.H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Ito, S. Uchida, and R. Arita: Dependence of carrier doping on the impurity potential in transition-metal-substituted FeAs-based superconductors, Phys. Rev. Lett. 110, 107007–1-5 (2013); arXiv:1205.1889.

(会議抄録)

- [14] M. Furuse, M. Okano, S. Fuchino, A. Uchida, J. Fujihira, S. Fujihira, T. Kadono, A. Fujimori, and T. Koide: Design and fabrication of HTS coils for a vector magnet, *Proceedings of 22nd International Conference on Magnet Technology*; IEEE Trans. Appl. Supercond. **22**, 3900504 (2012).
- [15] T. Kataoka, V. R. Singh, Y. Yamazaki, K. Ishigami, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D. J. Huang, and C. T. Chen, A. Tanaka, D. Karmakar, S.K. Mandal, T. K. Nath, and I. Dasgupta: X-ray absorption spectroscopy and X-ray magnetic circular dichroism studies of transition-metal-codoped ZnO nano-particle, *Proceedings of XAFS Theory Workshop: XAFS Theory and*

Nano-Particles; e-J. Surf. Sci. Nanotech. **10**. 594-598 (2012); arXiv:1208.3257.

[16] S. Ideta, T. Yoshida, M. Hashimoto, A. Fujimori, H. Anzai, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Takashima, K. M. Kojima, and S. Uchida: Effect of electron-phonon coupling in the ARPES spectra of the tri-layer cuprate Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+δ}, J. Phys. Conf. Ser. **428** 012039–1-5 (2013); arXiv:1211.3477.

(綜説,解説,その他)

- [17] A. Fujimori: Search for room-temperature multiferroics: ferroelectric-ferromagnet interfaces, Journal Club for Condensed Matter Physics, http://www.condmatjournalclub.org/?p=1768
- [18] 出田真一郎,吉田鉄平,西一郎,藤森淳,小野寛太, 組頭広志,中島正道,木方邦弘,富岡康秀,李哲虎, 伊豫彰,永崎洋,伊藤利光,中島裕司,松尾明寛,笹 川崇男,内田慎一,有田良太郎:電子ドープ型鉄系超 伝導体 Ba(Fe_{1-x}T_x)₂As₂ (T = Ni, Cu)のFeサイト 置換効果, PF NEWS Vol. 30, No. 2, p. 16 (2012).
- [19] A. Fujimori: Hund's metals: Beyond the Mott-Hubbard U-t physics, Journal Club for Condensed Matter Physics, http://www.condmatjournalclub.org/?p=1973

(編著書)

[20] J. Mizuki, A. Fujimori, Y. Murakami, and M. Kohgi (Eds.): Special Topics "Frontier of Condensed Matter Physics using Synchrotron Radiation", J. Phys. Soc. Jpn. 82, No. 2. (2013).

(学位論文)

- [21] V.K. Verma: X-ray magnetic circular dichroism study of multiferroic and dilute magnetic materials (博士論文).
- [22] 鈴木博人: Photoemission study of impurity effects in iron-based superconductors (修士論文).
- [23] 原野貴幸: X-ray magnetic circular dichroism study of perovskite-type manganese oxide thin films (修 士論文).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [24] A. Fujimori: XMCD study of transition-metal oxide composites with magneto-electric coupling, 5th Workshop for Emergent Materials Research (Pohang, July 6-8, 2012).
- [25] T. Yoshida: Anisotropic superconducting gap in the iron pnictide superconductor $BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$, International Conference on Heavy Electrons and Novel Quantum Phases (ICHN 2012) (Gyeongju, Korea, July 5-7, 2012).

- [26] A. Fujimori; Carrier doping versus impurity effects in transition metal-substituted iron-based superconductors revealed by ARPES, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2012) (Busan, Korea, July 8-13, 2012).
- [27] A. Fujimori: Carrier doping versus impurity effects in Fe pnictide superconductors studied by ARPES, Phase Separation and Superstripes in High Temperature Superconductors and Related Materials (Superstripes 2012) (Erice-Sicily, Italy, July 11-18, 2012).
- [28] T. Yoshida, S. Ideta, H. Suzuki, I. Nishi, A. Fujimori, T. Shimojima, K. Ishizaka, W. Malaeb, S. Shin, Y. Nakashima, H. Anzai, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, H. Kumigashira, K. Ono, S. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima, Y. Matsuda, M. Nakajima, S. Uchida, Y. Tomioka, T. Ito, K. Kihou, C.H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, H. Ikeda, and R. Arita: Anisotropic superconducting gap of the iron-based superconductor studied by angle-resolved photoemission spectroscopy, *ibid*.
- [29] A. Fujimori and T. Kataoka: XAS and XMCD studies of transition-metal-doped oxide nanoparticles and nano-wires, XAFS Theory Workshop: XAFS Theory and Nano-Particles (Chiba University, July18-20, 2012)
- [30] A. Fujimori: Observation of superconducting gap anisotropy in the nodal superconductor BaFe₂(As,P)₂, Second Joint Super-PIRE REIMEI Workshop (Bethesda, USA, August 3-5, 2012).
- [31] A. Fujimori: Electron-phonon coupling in multilayer cuprate superconductor, XXIst International Symposium on the Jahn-Teller Effect (Tsukuba, August 26-31, 2012).
- [32] A. Fujimori: XMCD study of transition-metal oxide composites with magneto-electric coupling, 5th Indo-Japan Conference on New functionalities in Electronic and Magnetic Materials (Bangalore, October 18-20, 2012).
- [33] A. Fujimori: Observation of superconducting gap anisotropies in the electron Fermi surfaces of ironpnictide superconductors, International Symposium on Frontier of Superconductivity Research II: ARPES on Unconventional Superconductors (IOP Beijing, October 26-27, 2012).
- [34] A. Fujimori: Magnetic anisotropy of spintronic materials studied by XMCD, 4th APCTP-IACS Joint Conference on Physics of Novel and Emerging Materials (Pohang, October 29-31, 2012).
- [35] A. Fujimori: Carrier doping versus impurity effects in Fe pnictide superconductors studied by ARPES, 11-th A3 Foresight Program Joint Reseach on Novel Properties of Complex Oxides (Chongming Island, China, Nobember 10-13, 2012).
- [36] T. Yoshida: Anisotropic superconducting gap in the iron pnictide superconductor, *Energy Materials*

Nanotechnology West Meeting (EMN West) (Houston, January 7-10, 2012)

- [37] A. Fujimori: Observation of superconducting gap anisotropies on the Fermi surfaces of Fe-based superconductors, 13th Japan-Korea-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (JKT-13) (Osaka, January 15-17, 2012).
- [38] A. Fujimori: Electronic structure of transitionmetal impurities in iron-based superconductors, A3 Foresight Program "Joint Research on Novel Properties of Complex Oxides" Tokyo Meeting (University of Tokyo, March 14-16, 2013).
- 一般講演
- [39] K. Yoshimatsu, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Yoshida, A. Fujimori, and M. Oshima: Metallic quantum well states of strongly correlated oxides, 8th International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation (INC8) (Tsukuba, May 8-12, 2012).
- [40] J. Fujihira, A. Uchida, K. Watanabe, S. Fujihira, M. Furuse, S. Fuchino, M. Okano, T. Kadono, A. Fujimori, and T. Koide: Development of cryo-cooling system with threeaxial super-high vacuum bores for HTS vector magnet 24th International Cryogenic Engineering Conference-International Cryogenic Materials Conference (ICEC24) (Fukuoka, May 14-18, 2012).
- [41] M. Kobayashi, V. N. Strocov, I. Muneta, T. Schmitt, Y. Takeda, A. Fujimori, S. Ohya, M. Tanaka, L. Patthey, and M. Oshima: Digging up bulk band dispersion behind passivation layer, *Annual Meeting of the Swiss Physical Society* (Zuerich, June 21-22, 2012).
- [42] M. Kobayashi, V. N. Strocov, I. Muneta, T. Schmitt, J. Krempasky, Y. Takeda, A. Fujimori, S. Ohya, M. Tanaka, L. Patthey, and M. Oshima: Impurity band responsible for ferromagnetism in magnetic semiconductor (Ga,Mn)As, *ibid*.
- [43] T. Harano, K. Ishigami, V.K. Verma, G. Shibata, T. Kadono, A. Fujimori, K. Takedam T. Okane, Y. Saito, H. Yamagami, H. Yamada, A. Sawa, M. Kawasaki, Y. Tokura, and A. Tanaka: Ru-doped La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃ thin film as a coercivity tunable material studied by x-ray magnetic circular dichroism, *International Conference* on Heavy Electrons and Novel Quantum Phases (ICHN 2012) (Gyeongju, Korea, July 5-7, 2012).
- [44] H. Suzuki, T. Yoshida, L.C.C. Ambolode II, S. Ideta, A. Fujimori, H. Kumigashira, K. Ono, T. Kobayashi, S. Miyasaka, and S. Tajima: Angle-resolved photoemission study of SrFe₂(As_{0.65}P_{0.35})₂, *ibid.*
- [45] M. Horio, T. Yoshida, H. Suzuki, L.C.C. Ambolode, A. Fujimori, T. Mizokawa, K. Ono, H. Kumigashira, Y. Mori, T. Adachi, and Y.

4.1. 藤森研究室

Koike: Absence of pseudogap in electron-doped Pr_{1.2}La_{0.7}Ce_{0.1}CuO₄ revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy, *ibid*.

- [46] L. C. C. Ambolode II1, M. Horio1, H. Suzuki1, S. Ideta1, T. Yoshida1,3, A. Fujimori1,3, K. Ono2, H. Kumigashira2, L. Liu1, M. Takahashi1, T. Kakeshita1,3, S. Uchida1,3 Angle-resolved and resonance photoemission studies of FeTe, *ibid*.
- [47] T. Yoshida, S. Ideta, A. Fujimori, T. Shimojima, W. Malaeb, S. Shin, Y. Nakashima, H. Anzai, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, H. Kumigashira, K. Ono, S. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima, Y. Matsuda, M. Nakajima, S. Uchida, K. Kihou, C.H. Lee, H. Eisaki, H. Ikeda, and R. Arita: Anisotropy of superconducting gap in the iron pnictide superconductor BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ studied by angle-resolved photoemission spectroscopy, 10th Materials and Mechanisms of Superconductivity Conference (M2S-10) (Washington, July 29-August 3, 2012).
- [48] S. Ideta, T. Yoshida, I. Nishi, A. Fujimori, H. Kotani, M. Kubota, K. Ono, H. Kumigashira, M. Nakajima, K. Kihou, Y. Tomioka, C.H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Ito, Y. Nakashima, M. Matsuo, T. Sasagawa, S. Uchida, and R. Arita: Validity of and deviation from the rigid-band model in the electron-doped compounds Ba(Fe_{1-x}T_x)₂As₂ (T =Co, Ni, Cu, Zn) studied by angle-resolved photoemission spectroscopy, *ibid*.
- [49] T. Shimojima, F. Sakaguchi, K. Ishizaka, Y. Ishida, W. Malaeb, T. Yoshida, S. Ideta, A. Fujimori, T. Kiss, M. Okawa, T. Togashi, C.-T. Chen, S. Watanabe, Y. Nakashima, A. Ino, H. Anzai, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Ohgushi, S. Kasahara, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, M. Nakajima, S. Uchida, K. Kihou, C.H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, A. Chainani, and S. Shin: Orbitalindependent superconducting gaps in optimally doped BaKFe₂As₂ and BaFe₂(As,P)₂, *ibid*.
- [50] M. Furuse, M. Okano, S. Fuchino, A. Uchida, J. Fujihira, S. Fujihira, T. Kadono, A. Fujimori, and T. Koide: An HTS vector magnet for magnetic circular dichroism measurement, *Applied Superconductivity Conference 2012* (Portland, Oregon, October 7-12, 2012).
- [51] J. Fujihira, A. Uchida, S. Fujihira, M. Furuse, M. Okano, S. Fuchino, T. Kadono, A. Fujimori, and T. Koide: Operation of cryo-cooled HTS vector magnet system with three-axial supuer-high vacuum bores, *ibid*.
- [52] H. Suzuki, T. Yoshida, S. Ideta, A. Fujimori, M. Hashimoto, D. H. Lu, Z.-X. Shen, K. Ono, E. Sakai, H. Kumigashira, M. Matsuo, and T. Sasagawa: Electronic structure of Ba(Fe_{1-x}Mn_x)₂As₂ studied by photoemission and x-ray absorption spectroscopy, 11-th A3 Foresight

Program Joint Reseach on Novel Properties of Complex Oxides (Chongming Island, China, Nobember 10-13, 2012).

- [53] T. Yoshida, S. Ideta, I. Nishi, A. Fujimori, T. Shimojima, W. Malaeb, S. Shin, S.K. Mo, Z.-X. Shen, Z, Hussain, Y. Nakashima, H. Anzai, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Kumigashira, K. Ono, S. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima, Y. Matsuda, M. Nakajima, S. Uchida, Y. Tomioka, T. Ito, K. Kihou, C.H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, H. Ikeda, and R. Arita: Orbital character of energy bands and Fermi surfacesdispersions in BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂, *ibid*.
- [54] L.C.C. Ambolode II, M. Horio, H. Suzuki, S. Ideta, T. Yoshida, A. Fujimori1, K. Ono, H. Kumigashira, L. Liu, M. Takahashi, T. Kakeshita, S. Uchida, M. Hashimoto, D. H. Lu, and Z.-X. Shen: Electron correlation in FeTe_{0.6}Se_{0.4}, *ibid*.
- [55] M. Horio, T. Yoshida, H. Suzuki, L.C. Ambolode II, A. Fujimori, D. Ootsuki, T. Mizokawa, K. Ono, H. Kumigashira, H. Anzai, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, Y. Mori, T. Adachi, and Y. Koike: Absence of pseudogap in electron-doped T'-Pr_{1.3-x}La_{0.7}Ce_xCuO₄ (x = 0.10): Possibility of bulk superconductivity at x = 0, *ibid*.
- [56] G. Shibata: Magnetic properties of manganese oxide thin films studied by synchrotron radiation soft x-ray magnetic circular dichroism, G-COE International Symposium on Physical Sciences Frontier (University of Tokyo, December 8-9, 2012).
- [57] G. Shibata, T. Kadono, K. Ishigami, T. Harano, Y. Takahashi, K. Yoshimatsu, A. Fujimori, T. Koide, H. Kumigashira, M. Furuse, S. Fuchino, M. Okano, J. Fujihira, A. Uchida, K. Watanabe, H. Fujihira, and S. Fujihira: Magnetic properties of manganese oxide thin films studied by angle-dependent soft x-ray magnetic circular dichroism, 13th Japan-Korea-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (JKT-13) (Osaka, January 15-17, 2012).
- [58] Y. Takahashi, V.K. Verma, K. Ishigami, G. Shibata, T. Harano, K. Yoshimatsu, T. Kadono, A. Fujimori, A. Tanaka, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, B. Pal, and D. D. Sarma: Direct observation of different magnetic hardness in polycrystalline Sr₂FeMoO₆, *ibid*.
- [59] L.C.C. Ambolode II, M. Horio, H. Suzuki, S. Ideta, T. Yoshida, A. Fujimori, K. Ono, H. Kumigashira, L. Liu, M. Takahashi, T. Kakeshita, and S. Uchida: Doping dependence of the electronic structure of FeTe_{1-x}Se_x studied by resonance photoemission spectroscopy, *Quantum Materials Symposium 2013* (Muju, Korea, January 27-February 02).
- [60] T. Okane, Y. Takeda, K. Yano, H. Yamagami, A. Fujimori, K. Nishimura, Y. Isikawa, and K. Sato: Soft X-ray magnetic circular dichroism study of

Ce_{0.2}Gd_{0.8}Ni, JAEA Synchrotron Radiation Research Symposium "Magnetism in Quantum Beam Science" (SPring-8, March 11-13, 2013).

- [61] M. Horio, T. Yoshida, H. Suzuki, L.C. Ambolode, A. Fujimori, D. Ootsuki, T. Mizokawa, K. Ono, H. Kumigashira, H. Anzai, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, Y. Mori, A Takahashi, T. Adachi, Y. Koike: Absence of pseudogap in the electron-doped cuprate superconductor Pr_{1.3-x}La_{0.7}Ce_xCuO₄(x =0.10): Evolution of the electronic structure by annealing, A3 Foresight Program "Joint Research on Novel Properties of Complex Oxides" Tokyo Meeting (University of Tokyo, March 14-16, 2013).
- [62] H. Suzuki, T. Yoshida, S. Ideta, A. Fujimori, M. Yi, M. Hashimoto, D.H. Lu, Z.-X. Shen, H. Kumigashira, K. Ono, T. Kobayashi, S. Miyasaka, and S. Tajima: ARPES study of SrFe₂(As_{1-x}P_x)₂: Effects of annealing on the superconducting state, *ibid*.
- [63] T. Harano, G. Shibata, K. Ishigami, V.K. Verma, V.R. Singh, Y. Takahashi, T. Kadono, A. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saito, H. Yamagami, H. Yamada, A. Sawa, M. Kawasaki, Y. Tokura, and A. Tanaka: Electronic and magnetic properties of Ru 4d states in the coercivity-tunable material Rudoped La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃, *ibid*.
- [64] Y. Takahashi, V.K. Verma, K. Ishigami, G. Shibata, T. Harano, K. Yoshimatsu, T. Kadono, A. Fujimori, A. Tanaka, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, B. Pal, D.D. Sarma: Direct observation of different magnetic hardness in polycrystalline Sr₂FeMoO₆, *ibid*.
- [65] L. Liu, T. Mikami, M. Takahashi, T. Kakeshita, and S. Uchida: Reversed in-plane resistivity anisotropy in the magnetostructural ordered phase of $\operatorname{Fe}_{1+x}\operatorname{Te}_{1-y}\operatorname{Se}_y$ ($y \leq 0.1$), *ibid*.
- [66] L.C.C. Ambolode II, M. Horio, H. Suzuki, S. Ideta, T. Yoshida, A. Fujimori, K. Ono, H. Kumigashira, L. Liu, M. Takahashi, T. Kakeshita, and S. Uchida: Evolution of the electronic structure of FeTe_{1-x}Se_x, *ibid*.
- [67] D. Wang, J. Xu, Y-Y Xiang, and Q-H Wang: Electronic structure around a vortex core in iron pnictide superconductors, *ibid*.
- [68] S. Ideta, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Hashimoto, D.H. Lu, Z.-X. Shen, M. Nakajima, K. Kihou, Y. Tomioka, C.H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Ito, and S. Uchida: Anisotropy of the superconducting gap in the electron-doped Ba(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂ revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy, *ibid*.

(国内会議)

招待講演

[69] 吉田鉄平: BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂の超伝導ギャップ異方 性,基研研究会「鉄系高温超伝導の物理-スピン・軌 道・格子」(京大基研,2012年6月21-22日).

- [70] 藤森淳:強相関系の光電子分光:次世代放射光・レー ザーへの期待,極限コヒーレント光科学研究センター 発足記念ワークショップ「レーザー・放射光融合研究 領域の開拓」(物性研,2012年11月29-30日).
- [71] 吉田鉄平:鉄系超伝導体,銅酸化物の超伝導ギャップ, 擬ギャップ, CMRC 研究会「ARPES,中性子散乱, µSR を用いた強相関系研究の最近の発展」(物構研, 2012 年 12 月 6-7 日).

一般講演

- [72] 藤森淳: XMCD に反映された磁性薄膜の磁化分布, 新学術領域研究「超低速ミュオン顕微鏡」A03 班第 1回班会議(KEK 東海キャンパス, 2012 年 6 月 22-23 日).
- [73] 吉田鉄平,出田真一郎,西一郎,鈴木博人,藤森淳, 下志万貴博,品田慶,石坂香子,W. Malaeb,辛埴, 中島陽佑,安斎太陽,井野明洋,有田将司,生天目 博文,谷口雅樹,組頭広志,小野寛太,笠原成,寺嶋 孝仁,芝内孝禎,松田祐司,中島正道,内田慎一,富 岡泰秀,伊藤利充,木方邦宏,李哲虎,伊豫彰,永崎 洋,池田浩章,有田亮太郎,S.K. Mo, Z.-X. Shen, Z. Hussain: BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂のバンド軌道対称性, 日本物理学会 2012 秋季大会(横浜国大, 2012 年 9 月 18-21 日).
- [74] 門野利治, V.K. Verma,石上啓介,芝田悟朗,原野 貴幸,高橋文雄,藤森淳, F.-H. Chang, H.-J. Lin, C.T. Chen,関剛斎,高梨弘毅: L1₀規則化を制御し た FePt 薄膜の磁気円二色性,同上.
- [75] V.K. Verma, V.R. Singh, K. Ishigami, G. Shibata, T. Harano, T. Kadono, A. Fujimori, T. Koide, K. Ohgushi, Y. Tokura, and A. Tanaka: Orbital magnetic moments in FeCr₂S₄ studied by x-ray magnetic circular dichroism, *ibid*.
- [76] 出田真一郎,吉田鉄平,鈴木博人,藤森淳,下志万貴 博,石坂香子,W. Malaeb,辛埴,中島陽祐,安斎太 陽,井野明洋,有田将司,生天目博文,谷口雅樹,組 頭広志,小野寛太,笠原成,寺嶋孝仁,芝内孝禎,松 田祐司,中島正道,内田慎一,富岡泰秀,伊藤利充, 木方邦宏,李哲虎,伊豫彰,永崎洋,池田浩章,有田 亮太郎:BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂(x =0.38)の超伝導ギャッ プの異方性,同上.
- [77] 芝田悟朗,石上啓介,原野貴幸,高橋文雄,吉松公 平,門野利治,藤森淳,小出常晴,組頭広志,古瀬充 穂,淵野修一郎,岡野眞,藤平潤一,内田公,渡邊和 訓,藤平誠一,藤平秀幸:ベクトル型超伝導マグネッ トを用いた強磁性薄膜 La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃の角度依存 XMCD,同上.
- [78] L.C.C. Ambolode II, M. Horio, H. Suzuki, S. Ideta, T. Yoshida, A. Fujimori, K. Ono, H. Kumigashira, L. Liu, M. Takahashi, T. Kakeshita, S. Uchida: Angle-resolved photoemission study of FeTe, *ibid*.
- [79] 鈴木博人,吉田鉄平,L.C.C. Ambolode II,出田真 一郎,藤森淳,橋本信,D. Lu, Z.-X. Shen,組頭 広志,小野寛太,小林達也,宮坂茂樹,田島節子: SrFe₂(As_{0.65}P_{0.35})₂の超伝導ギャップ,同上.

- [80] 高橋文雄, V.K.Verma, 芝田悟朗, 原野貴幸, 石上 啓介, 吉松公平, 門野利治, 藤森淳, 小出常晴, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.-J. Huang, C.T. Chen, B. Pal, D.D. Sarma: ダブルペロブスカイト型酸化物 Sr₂FeMoO₆ におけるスピンバルブ効果の X 線磁気 円二色性による検証, 同上.
- [81] 原野貴幸, V.K.Verma, 石上啓介, 芝田悟朗, 高橋 文雄, 吉松公平, 門野利治, 藤森淳, 小出常晴, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.-J. Huang, C.T. Chen, P. Xiang, 山田浩之, 澤彰仁, 田中新: 基板選択により 磁気特性が変化する Ca_{1-x}Ce_xMnO₃ 薄膜の X 線磁 気円二色性, 同上.
- [82] 堀尾眞史,吉田鉄平,鈴木博人,L.C.C. Ambolode II,藤森淳,溝川貴司,小野寛太,組頭広志,森陽 介,足立匡,小池洋二:電子ドープ型高温超伝導体 Pr_{1.3-x}La_{0.7}Ce_xCuO₄における擬ギャップの消失,同 上.
- [83] 園部竜也,下志万貴博,品田慶,出田真一郎,W. Malaeb,石田行章,辛埴,中島正道,富岡泰秀,木 方邦宏,李哲虎,伊豫彰,永崎洋,伊藤利充,内田慎 一,吉田鉄平,藤森淳,笠原成,寺嶋孝仁,芝内孝 禎,松田祐司,石坂香子:BaFe₂(As,P)₂における擬 ギャップ,同上.
- [84] 岡根哲夫,矢野一雄,竹田幸治,山上浩志,藤森淳, 西村克彦,石川義和,佐藤清雄:Ce_xGd_{1-x}Niの軟 X線吸収磁気円二色性測定,同上.
- [85] 安斎太陽,井野明洋,一来健吾,有田将司,生天目 博文,谷口雅樹,藤森淳,Z.-X. Shen,藤田和博,石 角元志,石田茂之,内田慎一:銅酸化物高温超伝導体 Bi2212のキンク構造の波数によるホール濃度依存性, 同上.
- [86] 古瀬充穂,岡野眞,淵野修一郎,内田公,藤平潤一, 藤平誠一,門野利治,藤森淳,小出常晴:Y系導体 を用いたベクトルマグネット,2012年度秋季低温工 学・超電導学会(岩手,2012年11月7-9日).
- [87] 堀尾眞史,吉田鉄平,鈴木博人,Leo Cristobal C. Ambolode □,藤森淳,大槻太毅,溝川貴司,小野 寛太,組頭広志,安斎太陽,有田将司,生天目博文, 谷口雅樹,森陽介,足立匡,小池洋二:電子ドープ 型高温超伝導体 T'-Pr_{1.3-x}La_{0.7}Ce_xCuO₄(x =0.10) における擬ギャップの消失,第6回物性科学領域横断 研究会(武田先端知ビル,2012 年 11 月 27-28 日).
- [88] 芝田悟朗,門野利治,石上啓介,原野貴幸,高橋文雄,吉松公平,藤森淳,小出常晴,組頭広志,古瀬充穂,淵野修一郎,岡野眞,藤平潤一,内田公,渡邊和訓,藤平秀幸,藤平誠一:ベクトル型超伝導マグネットを用いた強磁性薄膜La0.6Sr0.4MnO3の角度依存XMCD,第26回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム(名古屋大,2013年1月12-14日).
- [89] 門野利治,石上啓介,芝田悟朗,原野貴幸,高橋文雄, 吉松公平,藤森淳,小出常晴,組頭広志,古瀬充穂, 淵野修一郎,岡野眞,藤平潤一,内田公,渡邊和訓, 藤平秀幸,藤平誠一:ベクトル型超伝導マグネットを 用いた XMCD 測定装置の開発,同上.
- [90] 和達大樹,吉松公平,組頭広志,尾嶋正治,杉山武 晴,池永英司,藤森淳,高橋圭,川崎雅司,十倉好

紀:硬X線光電子分光で見た SrMoO₃の電子相関の 効果,同上.

- [91] S. Fujimori, T. Ohkochi, I. Kawasaki, A. Yasui, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagami, Y. Haga, E. Yamamoto, and Y. Onuki: Electronic structure of ferromarnetic superconductors studied by ARPES,新学術領域研究「重い電 子系の形成と秩序化」第4回研究会(東工大, 2013 年1月12-14日).
- [92] 芝田悟朗, 門野利治, 石上啓介, 原野貴幸, 高橋文雄, 吉松公平, 藤森淳, 小出常晴, 組頭広志, 古瀬充穂, 淵野修一郎, 岡野眞, 藤平潤一, 内田公, 渡邊和訓, 藤平秀幸, 藤平誠一:強磁性薄膜 La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃ の 角度依存 X 線磁気円二色性および X 線磁気線二色 性,物構研サイエンスフェスタ(つくば, 2013 年 3 月 14-15 日).
- [93] 坂井延寿,玉光雅智,吉松公平,堀場弘司,藤森淳,尾 嶋正治,組頭広志:基板応力による PrNiO₃/LaAlO₃ における電荷不均化の抑制,同上.
- [94] 吉松公平,坂井延寿,小林正起,堀場弘司,吉田鉄平, 藤森淳,尾嶋正治,組頭広志:角度分解光電子分光に よる SrVO₃ 極薄膜の電子状態,同上.
- [95] 吉松公平,和達大樹,原田尚之,高橋文雄,原野貴 幸,芝田悟朗,石上啓介,門野利治,小出常晴,Mikk Lippmaa,藤森淳:CoドープPr_{0.8}Ca_{0.2}MnO₃薄膜 のX線磁気円二色性,同上.
- [96] 吉田鉄平,相崎真一,吉松公平,滝沢優,養原誠人, 出田真一郎,藤森淳,K.Gupta,P.Mahadevan,堀 場弘司,組頭広志,尾嶋正治:低エネルギーおよび高 エネルギー領域における SrVO₃ の自己エネルギー, 日本物理学会第68回年次大会(広島大学,2013年3 月 26-29 日).
- [97] L. C. C. Ambolode II, M. Horio, H. Suzuki, S. Ideta, T. Yoshida, A. Fujimori, K. Ono, H. Kumigashira, L. Liu, M. Takahashi, T. Kakeshita, S. Uchida, M. Hashimoto, D.H. Lu, and Z.-X. Shen: Doping dependence FeTe_{1-x}Se_x studied by angle-resolved and resonance photoemission spectroscopy, 同上.
- [98] 高橋文雄, V. K. Verma,石上啓介,芝田悟朗,原 野貴幸,吉松公平,門野利治,藤森淳,田中新,F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, B. Pal, D.D. Sarma: 軟X線磁気円二色性を用いた Sr₂FeMoO₆ 多結晶の異常な磁気抵抗の機構解明,同 上.
- [99] 芝田悟朗, 門野利治, 石上啓介, 原野貴幸, 高橋文雄, 吉松公平, 藤森淳, 小出常晴, 組頭広志, 古瀬充穂, 淵野修一郎, 岡野眞, 藤平潤一, 内田公, 渡邊和訓, 藤平誠一, 藤平秀幸: 強磁性薄膜 La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃ の 角度依存 X 線磁気円二色性および X 線磁気線二色性, 同上.
- [100] 鈴木博人,吉田鉄平,出田真一郎,芝田悟朗,門野利 治,藤森淳,石上啓介,橋本信,Donghui Lu, Z.-X. Shen,組頭広志,小野寛太,松尾明寛,笹川崇男,小 林義明,佐藤正俊:鉄砒素系超伝導体の電子状態にお ける Mn ドーピングの効果,同上.

- [101] 堀尾眞史,吉田鉄平,鈴木博人,Leo Cristobal C. Ambolode II,藤森淳,大槻太毅,溝川貴司,小野 寛太,組頭広志,安斎太陽,有田将司,生天目博文, 谷口雅樹,森陽介,高橋晶,足立匡,小池洋二:電 子ドープ型高温超伝導体 T'-Pr_{1.3-x}La_{0.7}Ce_xCuO₄ (x = 0.10) における擬ギャップの消失 II,同上.
- [102] L. Liu, T. Mikami, M. Takahashi, T. Kakeshita, S. Uchida: In-plane resistivity anisotropy of iron telluride doped with different transitional metal elements, 同上.
- [103] 追分美代子,大槻太毅,溝川貴司,堀尾眞史,吉田 鉄平,藤森淳,野地尚,小池洋二:K_xFe_{2-y}Se₂のX 線光電子分光,同上.
- [104] 大槻太毅, 溝川貴司, N. L. Saini, 堀尾眞史, 吉田 鉄平, 藤森淳, 安斎太陽, 有田将司, 生天目博文, 谷 口雅樹, 卞舜生, 工藤一貴, 野原実: 角度分解光電子 分光による IrTe2 の電子状態, 同上.
- [105] 園部竜也,下志万貴博,出田真一郎,吉田鉄平,藤 森淳,組頭広志,小野寛太,中島陽佑,安斎太陽,井 野明洋,有田将司,生天目博文,谷口雅樹,中島正道, 内田慎一,富岡泰秀,伊藤利充,木方邦宏,李哲虎, 伊豫彰,永崎洋,笠原成,寺嶋孝仁,芝内孝禎,松田 祐司,石坂香子:BaFe₂(As,P)₂における擬ギャップ 2,同上.
- [106] 山村周玄,松田太一,和達大樹,杉山武晴,池永英 司,藤森淳, R. Sutarto, F. He,組頭広志,松野丈 夫,高木英典:SrIrO₃/SrTiO₃ 超格子薄膜の硬 X 線 光電子分光と軟 X 線吸収分光,同上.
- [107] 藤森伸一,川崎郁斗,保井晃,竹田幸治,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:角度分解光電子分光による URhGe の電子 状態,同上.
- [108] 坂井延寿,玉光雅智,吉松公平,堀場弘司,藤森淳, 尾嶋正治,組頭広志:基板応力による PrNiO₃ 薄膜に おける金属絶縁体転移の抑制,第60回応用物理学会春 季学術講演会(神奈川工科大,2013年3月27-30日).
- セミナー他
- [109] A. Fujimori: Soft x-ray spectroscopies of oxide thin films and interfaces (National Synchrotron Radiation Research Center Colloquium, Hsinchu, April 19, 2012).
4.2 内田研究室

研究室およびその活動の概要。

4.2.1 2012 年度の研究その1

研究1一1

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 酸化物と 2008 年に発見された FeAs 系化合物を対象とし、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。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、

 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/擬ギャ ップ状態における対称性の破れを発見 (Nature (1995)(2008)(201 Science (1999)(2007), Phys. Rev. Lett. (2000)(2001)(2002)(2(響 3) 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) (2008)), Science (2002)(2005)(2007), Phys. Rev. Lett.(2000) (2005)).

 T_c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)(2009), Phys. Rev. Lett.(2002)(2005)).
 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25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 4.2.3: 超伝導体 T_cの上昇の歴史(1973年以降)

4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相

クーパー対形成のメカニズムがわかれば高温超伝 導メカニズムが解明されたとはならない。第1に、 超伝導状態の特徴、a) d 波クーパー対、b) 低超流動 密度(クーパー対密度)、c) 強い2次元性、のどれ もが超伝導を不安定にする要因となること、第2に、 CuO2 面の電子状態そして高温超伝導状態がこれま で考えられていたよりはるかに複雑で、超伝導相と 競合する「擬ギャップ相」と呼ばれる未解明の相の 存在が明らかになったからである。





擬ギャップ相の解明に向けて

この「擬ギャップ相」では、光電子分光、中性子散 乱など様々なスペクトルにエネルギーギャップが観測 されるのでこの名がついた。「ギャップ」は、超伝導 ギャップや電荷密度波 (CDW) ギャップのように、結 晶全体に及ぶ長距離の秩序形成を支えるエネルギー となる。「擬」という言葉には、長距離の秩序形成に 至らず、秩序が局所的(短距離)にしか発達してな いという意味と、ギャップをもつものの基本的には金 属であるという意味合いがある。擬ギャップ状態は、 従来、低ドープ域の、*T*c と「擬ギャップ温度」*T** と の間の温度領域で実現している異常な常伝導状態を 指して使われていた。最近では、超伝導状態におい ても超伝導相との共存が確認された。更には、スピ ングラス相と呼ばれている稀薄ドーピング域、La系 の長距離ストライプ秩序をも包括した呼称となって いる。ストライプ相はLa系における特殊事情により 「擬ギャップ」が形を変えたものである考えられる。 研究室では、研究の焦点を「擬ギャップ相」の解明に あてている。「擬ギャップ相」は、高温超伝導相図の 大部分を覆っており、影のように「超伝導相」につ きまとっている。ドーピング不足で超伝導相形成に 至らないとき、温度を上げてTcで超伝導秩序を壊し たとき、また磁場をかけて、磁束芯の近くの超伝導 秩序を弱めたとき、更には、CuO2 面を3枚以上も つ多層系の内側のCuO2面で、必ず「擬ギャップ相」 が顔を出す。この「擬ギャップ相」の起源と「超伝導 相」とのかかわりを理解しなければ高温超伝導のメ カニズムの解明には至らないであろう。



図 4.2.5: 超伝導相と擬ギャップ相の運動量空間にお ける共存状態と擬ギャップ相の空間構造

ここ数年、STM/STS、ARPES、中性子散乱等の詳 細な実験により、「擬ギャップ相」の電子構造と、超伝 導秩序との共存形態が明らかにしてきた:(1)様々 なスペクトルに、大きさの異なる2つのエネルギー ギャップが超伝導状態で観測される。大きい方 (Δ1) が擬ギャップ、小さい方が (Δ_0) 超伝導ギャップと解 釈される。(2) STM/STS 実験で一時、ナノメート ルスケールで不均一な超伝導状態の観測が報告され、 CuO2 面で超伝導相と「擬ギャップ相」がミクロに相 分離しているのではないかとされた。その後、新た な解析手法の開発により、超伝導相も「擬ギャップ 相」もほぼ均一に CuO2 面上に共存していることが わかってきた。(3)両者はCuO2面で一様に共存し ているが、運動量空間では棲み分けを行っている。 図に示すフェルミ面の中心を含む領域は超伝導ギャッ プが、その外側では擬ギャップが観測される。温度を 上げたり、ドーピング量を減らすと超伝導領域が減 少し、擬ギャップ領域が拡大する。STM/STS では、 前者は準粒子干渉パターンとして、後者は、複雑な 電子密度の濃淡パターンとして観測される。高温超 伝導状態は、「擬ギャップ相」と超伝導相が実空間で 一様に共存し、運動量空間で「相分離」している前 例のない状態と言えるであろう。

対称性の破れ

最近、多くの実験プローブで発見されたのは「擬 ギャップ状態」における対称性の破れである。中性 子散乱のスピン励起や電子輸送現象は、正方4回対 称の CuO2 面内に異方性が現れることを示している。 電子系が自発的に回転対称性を破り、4回対称の格 子の上に、対称性の低い2回対称の電子構造が実現 しているようにみえるのである。 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ に対する STM/STS でも、1-2 nm の領域で、およ そ格子の4倍周期のストライプ状の電子密度の濃淡 が観測される。実際は、Bi系の結晶乱れにより、ス トライプ構造の向きは乱雑になっている。電子液体 状態が方向性をもつに至るということから、擬ギャッ プ状態を「電子液晶」と呼ぶ。スピン偏極中性子散 乱実験では、擬ギャップ状態で CuO2 単位胞内で時 間反転対称性を破る弱い反強磁性磁気秩序の存在が 報告されている。この磁気構造は、電子のスピンに よるものではなく、単位胞内の Cu と O 原子にまた がる電子の軌道運動電流が誘起するものとされる。 空間対称性、あるいは時間反転対称性の破れは、擬 ギャップ状態が超伝導秩序の前駆的なものではなく、 それ自体が超伝導とは別の何らかの秩序を伴った相 であることを強く示唆している。STM/STS の空間 分解能を上げて、擬ギャップ相における電子濃度パ ターンと CuO₂ 面内の原子との相関を見ると、対称 性の破れを引き起こしている原因が浮かび上がって きた。4回対称から2回対称へと対称性を低下させ ているのは、本来等価な CuO₂ 単位胞内の 2 つの酸 素原子、 O_x と O_y 、が電子的に非等価になっている からである。それがどのような非等価性であるのか 未だわからない。しかし、上述の時間反転対称性の 破れを引き起こしていると考えられる電子軌道電流 による反強磁性秩序モデルにおいても、単位胞内の 2つの酸素原子は非等価になっており、対称性の破れ のミクロなメカニズムを解明するヒントを与えてい ると考えられる。



図 4.2.6: 「擬ギャップ相」励起がつくる空間電子密 度変調パターン。明るい部分ほど密度が高い。空間 分解能を上げていくと、黒くマークした銅原子に挟 まれた左右、上下の位置で密度が異なっている。そ こには酸素原子があり、酸素原子が電子的に非等価 になっていることがわかる。

擬ギャップに関する基本的な問題のうち、擬ギャッ プの状態は「相」といえるのか? d 波超伝導相とど のように共存・競合しているのかについては、かな り明らかになってきた。では、高温超伝導メカニズ

ムに関わる問題、高温超伝導にとって必要な存在か、 高いTcの実現に「擬ギャップ相」はどのような寄与 をしているのか、についての理解はどこまで進んで いるのであろうか。La 系で実現しているストライプ 相では超伝導Tcが著しく低下する。この意味では、 ストライプ秩序は超伝導秩序とは明白な競合関係に ある。しかし、ストライプ相でも CuO₂ 面内では超 伝導秩序が高い温度から発達していることがわかっ てきた。ストライプは面内の電子対形成を邪魔して いないが、面間の位相が揃うのを妨げてTcを低下さ せているのであろうと推察できる。同様に、 T_c より 高温の擬ギャップ状態においても、面内に超伝導秩序 が形成されているとすれば理解できる現象が発見さ れている。実際、アンダードープ Bi2212 (T_c=37K) の STM/STS 実験で、CuO₂ 面内の超伝導準粒子の 干渉が T=55K まで観測される。但し、T_c以下の超 伝導状態と比べて、運動量空間において超伝導相の 占める領域は縮小している。擬ギャップ相は電子対 形成を妨げるものではなく、その位相が試料全体で 揃うのを邪魔しているといえるであろう。このこと は、低温超伝導体と違って高温超伝導体では、超伝導 ギャップよりも超流動密度 ρ_s が T_c を支配するパラ メーターになっていることと関連している。銅酸化 物ではρ。が低温超伝導体に比べ1桁以上も小さく なっている。 ρ s は超伝導の位相の硬さを表わす尺 度でもあるので(粒子数とその位相との量子力学的 不確定性関係、 $\Delta N \cdot \Delta \theta \sim 1$ 、に由来する)、 $\rho_s \sigma$ 小さい超伝導体では必然的に位相が軟らかく(位相 ゆらぎが大きく)なり、位相が揃う温度 T_c が低下す る。一方、「擬ギャップ相」の存在が対形成を強固にし ていることを示唆する実験結果を藤森研との共同研 究で得ている。3 層系の $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ ($T_c =$ 110K) に対する ARPES 実験から、3 枚の CuO₂ 面 のうち外側の2枚のCuO2面は正孔が過剰ドープの 状態であるのに対して、内側の1枚では、正孔濃度 が希薄であることがわかった。1層系、2層系なら、 外側の面は超伝導ギャップが縮小した超伝導相とな り、内側は超伝導領域の縮小した擬ギャップ相優勢 の状態となるはずである。実験結果は、外側の面で は、超伝導ギャップの大きさが予想より著しく増大 し、内側の面では、超伝導ギャップ領域が運動量空間 で大幅に拡がっていることを示している。超伝導相 と擬ギャップ相が近接し、強く結合することにより、 これが T_c=100K 超の超伝導実現の要因であると推 測される。

4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現

2008年2月、予想外の物質から8番目の高温超伝 導体が現れた。鉄(Fe)と砒素(As)とを主元素と する化合物である(鉄ニクタイド系化合物と呼ばれ ている)。東工大・細野グループのLaFeAsO_{1-y}F_y という組成での T_c =26Kから始まり、僅か1ヶ月の 間に T_c は56Kにまで跳ね上がったのである。 鋼酸化物の履歴を辿るように、 T_c の上昇はLaを他の 希土類元素(NdあるいはSm)に置換することによ り実現した。その後、いくつかの結晶構造の異なる 鉄ー砒素化合物で超伝導が確認されたが、現在の T_c の最高値は上記の 56K である。多種の結晶構造が存 在し、多様な元素置換が可能であるという意味で、 銅酸化物と共通点をもった物質群が形成されつつあ る。銅酸化物群の共通要素が CuO₂ 面であったのと 同様、この物質群は鉄と砒素がつくる原子層である。

鉄を他の遷移金属元素、コバルトやニッケル、更 には銅、に置き換えた物質は高温超伝導を示さない。 また、砒素をリン(P)に換えても同様である。従っ て、FeAs 層が CuO2 面と同様、高温超伝導の舞台で あり、鉄と砒素の組み合わせが特別な状況を作り出 していると考えられた。しかし、その後、砒素を周 期表の隣の VI 族セレン(Se)に置き換えた FeSe₁₋ (あるいは $Fe_{1+x}Se$)という化合物でも超伝導が観 測され、高圧下ではあるが T_c が 27K まで上昇した。 この高温超伝導体の主舞台は鉄の二次元正方格子ら しいのである。但し、鉄の層は、分極性の高い砒素や セレンの原子層に挟まれていなければならない。銅 酸化物とは異なり、鉄層の電子構造の特徴は、5本 のd軌道のすべてが電気伝導、そして超伝導に関与 していると予想されている。層状の結晶構造と周期 表で同じ周期に位置する鉄と銅という元素が主役で あるという以外、銅酸化物との共通点は見あたらな い。未だ発見後2年にも満たないため、鉄と砒素(セ レン)の組み合わせの何が特殊なのかも見えてきて いない。また、この系の超伝導機構を云々できる段 階ではない。しかし、よく知られているように、鉄 単体を含めて多くの鉄化合物は磁性体である。その 意味で、鉄の化合物の中に高温超伝導体があるとい うのは、銅酸化物のとき以来の驚きといえる。鉄化 合物の高温超伝導発見は、より高いTcの超伝導/室 温超伝導を目指す道が銅酸化物の一本だけではなく、 他の道もあることを示したものと認識されている。



図 4.2.7: Fe 系化合物の結晶構造

精密なエネルギー分解プローブである電子輸送現 象と光学スペクトルから、磁気秩序相、超伝導相の 電子励起、準粒子ダイナミックスの情報を得ること ができる。電子輸送現象から電荷キャリアーを散乱 させる不純物(欠陥)、ボソン励起を考察し、超伝 導*T_c*との相関を見出した。光学スペクトルからは、 磁気秩序(SDW)に伴うエネルギーギャップの性質、 詳細なスペクトルの温度依存性、ドーピング依存性 から鉄系の磁気秩序相における電子相関、軌道自由 度の寄与の重要性が明らかにした。

電子輸送現象

キャリアーを散乱する物は、その系の特徴的な結晶 構造、電子構造あるいはそれぞれの励起状態を反映す るはずである。LnFeAsO_{1-y}(Ln:La, Pr, Ce, Nd)1111 系に対する電気抵抗率、磁気抵抗率の温度依存性、 ドーピング(y) 依存性の測定から、Fe 系の磁気秩 序相、超伝導相を特徴づけるキャリアー散乱を明ら かにした。超伝導ドーピング域の電気抵抗率の温度 依存性(非弾性散乱)、 $\rho \sim T^n$ 、のベキ $n \ge T_c$ が 相関していることを見出した。





図 4.2.8: 様々な鉄系物質の電気抵抗率の温度依存性のベキnとT_cの相関

比較的低い T_c をもつ物質の n は 2 に近く、 T_c が 40 K超の物質の n は 1 に近づく。同じ結晶構造を もつ物質で n が変化することから非弾性散乱体励起 (ボソン) はフォノンではなく磁気(軌道) 励起であ る可能性が高い。 $\rho \sim T$ を示す物質ではキャリアーと ボソンとの結合が強く、キャリアーが激しく散乱さ れていることが磁気抵抗率の大きさからも明らかで あり、高い T_c と密接に関係していることがわかる。

光学スペクトル

Ba(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂単結晶(0≤x≤0.08)を育成し、 面内光学スペクトルを測定した。磁気秩序相での光 学スペクトルは低エネルギー域で2成分に分解でき、 その1成分にギャップが開いていることがわかった。 金属伝導(Drude 項)は、もう1成分が担っている。 このギャップはフェルミ面のネスティングにより開 くSDW ギャップと考えられてきたものであるが、そ の大きさは0.1eV以上と巨大である。このような巨 大なギャップは、SDW ギャップというより強い電子 相関に起因する可能性が高い。また、スペクトルに ギャップを示さない金属成分が残ることは、Feの複 数の3 d 軌道成分が、電気伝導及び光学励起にそれ ぞれ別の役割を担っていることを示唆している。ドー 図 4.2.9: BaFe₂As₂の光学伝導度スペクトルとその 成分分解、磁気構造相転移温度 *T_s*=140K でスペク トルは劇的に変化する。

プされた結晶の面内電気抵抗率の温度依存性も2つ の成分の寄与の変化として説明できる。

4.2.4 *T_c* は上がるか?

高温超伝導の舞台は CuO₂ 面であり、CuO₂ 面は、 La 系であろうと Y 系であろうと殆ど同じなので、 T_c 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_c は、物質に より大きく異なり、各物質の T_c の最大値は 30K から 135K の間に分布している。明らかに、CuO₂ 面の外 の環境が T_c 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_c 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_c を決める因子が CuO₂ 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_c を向上させるための 方策にもつながると考えられる。



図 4.2.10: 1986 年以降に発見された高温超伝導体

*T_c*を向上させるには?

上に述べたことに、 T_c 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、Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} (Bi2212)を挙げると、CuO₂面の電子状態と T_c と に目に見える影響を与えるのは、頂点酸素ブロック (SrOブロック)の乱れである。乱れの主因はSr²⁺の イオン半径が小さいために、Sr サイトにBi³⁺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_c (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(Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+δ}) の T_c を125Kまで向上させることができると予測さ れる。

<報文> (回莱验力

(原著論文)

- "Angle-resolved photoemission study on the superconducting iron-pnictides of BaFe₂(As,P)₂ with low energy photons", T. Shimojima, F. Sakaguchi, K. Ishizaka, Y. Ishida, W. Malaeb, T. Yoshida, S. Ideta, A. Fujimori, T. Kiss, M. Okawa, T. Togashi, C. -T. Chen, S. Watanabe, Y. Nakashima, A. Ino, H. Anzai, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, S. Kasahara, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, M. Nakajima, S. Uchida, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, A. Chainani and S. Shin, Solid State Commun. <u>152</u>, 695-700 (2012).
- [2] "Large elastic anomalies and strong electronlattice coupling in iron-based superconductor Ba(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂", M. Yoshizawa, S. Simayi, K. Sakano, Y. Nakanishi, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, M. Nakajima, and S. Uchida, Solid State Commun. <u>152</u>, 680-687 (2012).
- [3] "Evidence for the Importance of Extended Coulomb interactions and Forward Scattering in Cuprate Superconductors", S. Johnston, I. M. Visik, W. S. Lee, F. Schmitt, S. Uchida, K. Fujita, S. Ishida, N. Nagaosa, Z. -X. Shen, and T. P.

Devereaux, Phys. Rev. Lett. <u>108</u>, 166404 (2012).

- [4] "Three-component electronic structure of the cuprates deviced from spectroscopic-imaging scanning tunneling microscopy ", J. W. Alldredge, K. Fujita, H. Eisaki, S. Uchida, and K. McElroy, Phys. Rev. B.<u>85</u>, 174501 (2012).
- [5] "Picometer registration of zinc impurity states in Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} for phase determination in intra-unit-cell Fourier transform STM", M. H. Hamidian, I. A. Firmo, K. Fujita, S. Mukhopadhyay, J. W. Orenstein, H. Eisaki, S. Uchida, M. J. Lawler, E.-A. Kim, and J. C. Davis, New Journal of Physics <u>14</u>, 053017 (2012).
- [6] "Spectroscopic imaging STM studies of broken electronic symmetries in underdoped cuprates", K. Fujita, A. Mesaros, M. J. Lawler, S. Sachdev, J. Zaanen, H. Eisaki, S. Uchida, E. -A. Kim, and J.C. Davis, Physica B- Condensed Matter <u>407</u>, 1859-1863 (2012).
- [7] " Optical study of the strip-ordered state", S. Tajima and S. Uchida, Physica C <u>481</u>, 55-65 (2012).
- [8] "Abrupt change in the energy gap of superconducting Ba_{1-x}K_xFe₂As₂ single crystals with hole doping", W. Malaeb, T. Shimojima, Y. Ishida, K Okazaki, Y. Ota, K. Kihou, T. Saito, C.H. Lee, S. Ishida, M. Nakajima, S. Uchida, H. Fukazawa, Y. Kohori, A. Iyo, H. Eisaki, C. T. Chen, S. Watanabe, H. Ikeda, and S. Shin, Phys. Rev. B <u>86</u>, 165117 (2012).
- [9] "Growth of BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ single crystals (0 ≤ x ≤ 1) by Ba₂As₃/Ba₂P₃ flux method", M. Naka-jima, S. Uchida, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, and H. Eisaki, J. Phys. Soc. Jpn <u>81</u>, 104740 (2012).
- [10] "Phase competition intrisected superconducting dome", I. M. Visik, M. Hashimoto, R. -H. He, W.-S. Lee, F. Schmitt, D. Lu, R. G. Moore, C. Zhang, W. Meevasana, T. Sasagawa, S. Uchida, K. Fujita, S. Ishida, M. Ishikado, Y. Yoshida, H. Eisaki, Z. Hussain, T. Devereaux, and Z. -X. Shen, Proc. Nat. Acad. Sciences <u>109</u>, 18332-18337 (2012).
- [11] "Effect of Co Doping on the In-Plane Anisotropy in the Optical Spectrum of Underdoped Ba(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂", M. Nakajima, S. Ishida, Y. Tomioka, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, T. Ito, T. Kakeshita, H. Eisaki, and S. Uchida, Phys. Rev. Lett. <u>109</u>, 217003 (2012).
- [12] "Dependence of Carrier Doping on the Impurity Potential in Transition-Metal-Substituted FeAs-Based Superconductors", S. Ideta, T. Yoshida, I. Nishi, A. Fujimori, Y. Kotani, K. Ono, Y. Nakashima, S. Yamaichi, T. Sasagawa, M. Nakajima, K. Kihou, Y. Tomioka, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Ito, S. Uchida, and R. Arita, Phys. Rev. Lett. <u>110</u>, 107007(2013).
- [13] "Effect of Doping on the Magneto structural Ordered Phase of Iron Arsenides: A Comparative

Study of the Resistivity Anisotropy in Doped BaFe₂As₂ with Doping ino Three Different sites", S. Ishida, M. Nakajima, T. Liang, K. Kihou, C.-H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Kakeshita, Y. Tomioka, T. Ito, and S. Uchida, J. Am. Chem. Soc.135, 3158-3163(2013).

(学位論文)

 [14] 三上拓也:鉄系高温超伝導体構造磁気秩序相の面内電 気抵抗率異方性(修士論文)
 <学術講演>

> (国際会議) 招待講演

- [15] S. Uchida, "Road to higher Tc: What did we learn from YBCO", (25 year after YBCO Symposium, April 12, 2012, Hualien, Taiwan).
- [16] S. Uchida, "What is Doping in the Phase Diagram of Iron Pnictides", (The 10th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S), August 02, 2012, Washington, USA).
- [17] S. Uchida, "Electronic Anisotropy in Doped BaFe₂As₂", (Super-PIRE Workshop, August 04, 2012, Bethesuda, USA).
- [18] S. Uchida, "Electronic Anisotropy in Doped BaFe₂As₂: (Intrinsic and Extrinsic Anisotropy", A3, November 12, 2012, Shanghai, China).
- [19] S. Uchida,"Panel Discussions on Future of Superconductivity Research", (Symposium for 25th Anniversary of the Texas Center for Superconductivity, November 19, 2012, Houston, USA).
- [20] S. Uchida, "Overview: Pseudogap in Cuprates", (G-COE Symposium, December 08, 2012, Tokyo, Japan).
- [21] S. Uchida,"Coherence and Incoherence in the Charge Dynamics of Cuprates and Pnictides", (Japan-Korea-Taiwan Workshop, January 16, 2012, Osaka, Japan).
- [22] S. Uchida, "Coherence and Incoherence in the Charge Dynamics of Iron Pnictides", (A3-QMS, January 28, 2013, Muju, Korea).
- [23] S. Uchida, "Doping Control of Electronic Correlations in Iron Pnictides", (A3 Tokyo, March 16, 2013, Tokyo, Japan).

(国内会議) 一般講演

- [24] 木田孝則,石田茂之,中島正道,木方邦宏,伊豫 彰,永崎洋,内田慎一,萩原政幸:鉄系超伝導体 (Ba,K)Fe₂As₂の上部臨界磁場のドーピング依存性 日本物理学会 2012 年秋季大会,(横浜国立大学, 2012 年9月19日).
- [25] 三上拓也,中島正道,石田茂之,木方邦宏,伊豫彰,永 崎洋,劉亮,掛下照久,内田慎一: Ba(Fe_{1-x}Ru_x)₂As₂ の面内電気抵抗率の異方性日本物理学会 2012 年秋季 大会,(横浜国立大学,2012 年 9 月 19 日).

- [26] 下志万貴博, W. Malaeb, 園部竜也,石田行章,木須 孝幸, C.T.Chen,渡部俊太郎,辛埴,大串研也,木 方邦宏,李哲虎,伊豫彰,永崎洋,齊藤拓,深澤英人, 小堀洋,石田茂之,中島正道,内田慎一,石坂香子: 広い温度領域における Ba_{1-x}K_xFe₂As₂の電子状態 観測日本物理学会 2012 年秋季大会,(横浜国立大学, 2012 年 9 月 20 日).
- [27] 出田真一郎,吉田鉄平,鈴木博人,藤森淳,下志万貴 博,石坂香子,Walid Malaeb,辛埴,中島陽祐,安 斎太陽,井野明洋,有田将司,生天目博文,谷口雅樹, 組頭広志,小野寛太,笠原成,寺嶋孝仁,芝内孝禎, 松田祐司,中島正道,内田慎一,富岡泰秀,伊藤利 充,木方邦宏,李哲虎,伊豫彰,永崎洋,池田浩章, 有田亮太郎: BaFe2(As_{1-x}P_x)₂(x = 0.38)の超伝導 ギャップの異方性日本物理学会 2011 年秋季大会,(横 浜国立大学,2012 年 9 月 20 日).
- [28] 吉田鉄平,出田真一郎,西一郎,鈴木博人,藤森淳, 下志万貴博,品田慶,石坂香子,Walid Malaeb,辛 埴,中島陽佑,安斎太陽,井野明洋,有田将司,生天 目博文,谷口雅樹,組頭広志,小野寛太,笠原成,寺 嶋孝仁,芝内孝禎,松田祐司,中島正道,内田慎一, 富岡泰秀,伊藤利充,木方邦宏,李哲虎,伊豫彰,永 崎洋,池田浩章,有田亮太郎,S.K.Mo,Z.X.Shen, Z,Hussain: BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂のバンド軌道対称性 日本物理学会 2012 年秋季大会,(横浜国立大学, 2012 年9月 20 日).
- [29] 園部竜也,下志万貴博,品田慶,出田真一郎,Walid Malaeb,石田行章,辛埴,中島正道,富岡泰秀,木 方邦宏,李哲虎,伊豫彰,永崎洋,伊藤利充,内田慎 一,吉田鉄平,藤森淳,笠原成,寺嶋孝仁,芝内孝 禎,松田祐司,石坂香子: BaFe₂(As,P)₂における擬 ギャップ日本物理学会 2012 年秋季大会,(横浜国立大 学,2012 年 9 月 20 日).
- [30] Leo Cristobal C. Ambolode II, Masafumi Horio, Hakuto Suzuki, Shinichiro Ideta, Teppei Yoshida, Atsushi Fujimori, Kanta Ono, Hiroshi Kumigashira, Liang Liu, Masayoshi Takahashi, Teruhisa Kakeshita, Shinichi Uchida: Angleresolved photoemission study of FeTe 日本物理学 会 2012 年秋季大会,(橫浜国立大学, 2012 年 9 月 20 日).
- [31] 石田茂之,中島正道,木方邦弘,李哲虎,内田慎一, 永崎洋,伊豫彰,竹下直:鉄ヒ素系化合物の輸送現象 と超伝導:日本物理学会 2012 年秋季大会,(横浜国立 大学,2012 年 9 月 20 日).
- [32] 掛下照久,鈴木諒,高橋正圭,劉亮,内田慎一,木方 邦宏,伊豫彰,永崎洋:一次元鉄カルコゲナイド母物 質 BaFe₂Se₃の絶縁体的電子構造:日本物理学会 2012 年秋季大会,(横浜国立大学,2012 年 9 月 20 日).
- [33] 石井梨恵子,古川はづき,A. Cameron,B. Elizabeth, E.M. Forgan, L. M. Debeer-Schmitt,小野督幸,中 島正道,木方邦宏,李哲虎,伊豫彰,永崎洋,内田慎 一,K. Littrell,J. S. White,J. L. Gavilano and M. Zolliker: 中性子小角散乱法で見る BaFe₂(As,P)₂ の磁束格子と磁気相図日本物理学会 2012 年秋季大会, (横浜国立大学,2012 年 9 月 20 日).

- [34] 竹澤遼,坂野幸平, Shalamujiang Simayi,中村光 輝,中西良樹,木方邦宏,李哲虎,伊豫彰,永崎 洋,中島正道,内田慎一,吉澤正人:鉄系超伝導体 Ba(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂における C33 弾性定数の異常な 振る舞い(2)日本物理学会 2012 年秋季大会,(横浜国 立大学,2012 年 9 月 20 日).
- [35] 吉澤正人,竹澤遼,坂野幸平,シャラムジャン・スマイ,中村光輝,中西良樹,木方邦宏,李哲虎,伊豫彰,永崎洋,中島正道,内田慎一:鉄系超伝導体Ba(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂の比熱とグリュンナイゼン定数日本物理学会2012年秋季大会,(横浜国立大学,2012年9月20日).
- [36] L. Liu, T. Mikami, M. Takahashi, T. Kakeshita, S. Uchida: Investigation of anisotropic electronic properties in iron telluride via charge transport and optical spectroscopy 日本物理学会 2012 年秋 季大会,(横浜国立大学, 2012 年 9 月 21 日).
- [37] 村井直樹,増井孝彦,石角元志,石田茂之,永崎洋, 内田慎一,田島節子: CuO₂ 面外乱れを制御した Bi₂Sr₂Ca_{1-x}Y_xCu₂O_{8+δ}(x=0, 0.08)の電子ラマン 散乱日本物理学会 2012 年秋季大会,(横浜国立大学, 2012 年 9 月 21 日).
- [38] 市來健吾,安斎太陽,原豪太郎,中島陽祐,長門真平, 井野明洋,有田将司,生天目博文,谷口雅樹,石田茂 之,石角元志,内田慎一:Bi₂Sr₂Ca_{0.92}Y_{0.08}Cu₂O_{8+δ} の超伝導転移に伴う繰り込み効果の研究 日本物理 学会 2012 年秋季大会,(横浜国立大学,2012 年 9 月 21 日).
- [39] 岩井志帆,椋田秀和,清水直,北岡良雄,石田茂之, 伊豫彰,内田慎一:三層型銅酸化物 Bi2223 単結晶 NMR 測定による Tc 決定因子に関する考察 日本物 理学会 2012 年秋季大会,(横浜国立大学,2012 年 9 月 21 日).
- [40] L. Liu, T. Mikami, M. Takahashi, T. Kakeshita, S. Uchida: In-plane resistivity anisotropy of iron telluride doped with different transitional metal elements 日本物理学会 2013 年春季大会,(広島大学, 2013 年 3 月 26 日).
- [41] L. C. C. Ambolode II, M. Horio, H. Suzuki, S. Ideta, T. Yoshida, C, A. Fujimori, C, K. Ono, H. Kumigashira, L. Liu, M. Takahashi, T. Kakeshita, S. Uchida, M. Hashimoto, D. H. Lu, Z.-X. Shen: Doping dependence FeTe(1-x)Se(x) studied by angle-resolved and resonance photoemission spectroscopy 日本物理学会 2013 年春季大 会,(広島大学, 2013 年 3 月 26 日).
- [42] 園部竜也,下志万貴博,出田真一郎,吉田鉄平,藤森 淳,組頭広志,小野寛太,中島陽佑,安斎太陽,井野 明洋,有田将司,生天目博文,谷口雅樹,中島正道, 内田慎一,富岡泰秀,伊藤利充,木方邦宏,李哲虎, 伊豫彰,永崎洋,笠原成,寺嶋孝仁,芝内孝禎,松田 祐司,石坂香子:BaFe₂(As,P)₂における擬ギャップ 2 日本物理学会 2013 年春季大会,(広島大学,2013 年 3 月 26 日).
- [43] 石井梨恵子,古川はづき,A. Cameron, L. Lemberger, B. Elizabeth, E.M. Forgan, L. M. Debeer-Schmitt,小野督幸,中島正道,木方邦宏,李哲虎,伊

豫彰, 永崎洋, 内田慎一, K. Littrell, J. S. White, J. L. Gavilano, M. Zolliker, R. Cubitt, C. D. Dewhurst: 中性子小角散乱法による BaFe₂(As,P)₂ の 磁束格子の観測 II 日本物理学会 2013 年春季大会, (広島大学, 2013 年 3 月 27 日).

- [44] 安齋太陽, 井野明洋, 市來健吾, 有田将司, 生天目博 文, 谷口雅樹, 石角元志, 藤田和博, 石田茂之, 内田 慎一: 銅酸化物高温超伝導体 Bi2212 の繰り込み効果 の波数およびホール濃度依存性 日本物理学会 2013 年春季大会, (広島大学, 2013 年 3 月 27 日).
- [45] 内田慎一: はじめに日本物理学会 2013 年春季大会, (広島大学, 2013 年 3 月 28 日).
- [46] 藤井千旭,竹澤遼,坂野幸平,シャラムジャン・スマイ,中村光輝,中西良樹,木方邦宏,中島正道,李哲虎,伊豫彰,永崎洋,内田慎一,吉澤正人:超音波測定で観測する鉄系超伝導体 Ba(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂の超伝導と磁気・構造揺らぎ日本物理学会 2013 年春季大会,(広島大学,2013 年 3 月 29 日).

4.3 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として申 東潤と白井 皓寅 が新しくメンバーに加わった。3月には、相谷 昌紀 と福居 直哉が修士課程を修了して相谷が企業に就職 していった。

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、スピン状態・スピン流を 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 をめざしている。最近は、ビスマス系合金結晶に表 れるというトポロジカル表面状態やグラフェン、シ リセン、モノレイヤー超伝導などの研究も行ってい る。このようなナノマテリアルの原子配列構造や原 子層成長の制御・解析、表面電子状態、電子輸送特 性、スピン状態、電子励起など、様々な実験手法を用 いて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

Bi および Bi₂Te₃ エピタキシャル超薄膜の反弱局在 効果・電子電子相互作用効果の測定

BiやBi₂Te₃の低温・磁場中でのバルク伝導測定 では、強いスピン軌道相互作用に起因した量子干渉 効果である反弱局在効果や、クーロン遮蔽が弱まる ことによって生じる電子電子相互作用の多体効果に よって伝導度が特徴的な変化を示すことが報告され ている。一方、Bi(111) と Bi₂Te₃ (111) はそれぞれ Rashba 分裂表面状態、トポロジカル表面状態といっ たスピン分裂表面状態を持っており、これらの状態 はベリー位相 π のために強い反弱局在効果を示すと 言われている。しかし、先行研究の多くは試料の大気 暴露のために表面状態は保護されておらず、表面状 態の寄与は明らかになっていない。本研究では上記 の効果の表面状態の寄与を明らかにする目的で、様々 な膜厚の Bi(111) や Bi₂Te₃(111) エピタキシャル超 薄膜を作成し、超高真空・低温・磁場中での in-situ 伝導測定を行い、反弱局在効果と電子電子相互作用 に特徴的な伝導度の変化を観測し、これらの効果に 関するパラメータの膜厚依存性を調べた。その結果、 Bi(111)の Rashba 分裂表面状態は量子効果への寄与 をほとんど持たず、観測した伝導度依存性は膜内伝導 由来であることを明らかにした。一方、Bi₂Te₃(111) では、3-6QL(1 QL=5 原子層からなる結晶格子の 単位)の薄い膜ではトポロジカル表面伝導由来の量 子効果が大きく、膜厚の増加とともに膜内伝導の量 子効果の寄与が増加していくことがわかった。また、 位相緩和長が膜厚に比例する依存性を示しており、 れは膜内伝導電子が表面状態電子に散乱されて位相 緩和することを示唆している。

FIB 加工時のキャッピング保護膜

当研究室の集束イオンビーム (FIB) 複合型4探針 STM 装置を用いると従来は困難であった in situ で の表面微細加工と電気伝導測定が可能となり、より 多様な表面電子輸送現象をとらえられると期待でき る。しかし、in situ FIB 加工が、不要な損傷を試料 に与えることがあり、とくに表面状態や薄膜に及ぼ す影響は不明であった。我々は、Si(111) 基板上に8 QL 相当の Bi₂Se₃(111) ピタキシャル超薄膜を作成 し、FIBによってさまざまな線幅の細線に加工した。 このとき、セレン層をキャッピングしてから加工した capped 試料と、キャッピング層の無い non-capped 試料を用意した。細線の1次元伝導度は2次元伝導 度と線幅の積で表されるので、線幅-対-1 次元伝導度 をプロットすれば2次元伝導度が傾きとして求まる。 また、2次元伝導度はそれとは独立に微細加工して いないベタ膜領域で直線4探針法を使っても求めら れる。capped 試料では両方の方法で求めた値がほぼ 一致したが、non-capped 試料では細線から求められ る2次元伝導度が直線4探針法での値を下回った(図 4.3.11)。この結果は、FIB 加工中に意図せぬ Ga イ オンビーム照射による損傷が細線に及んでいること を示唆すると同時に、その照射損傷がセレンキャッピ ング層によって軽減されることを意味しており、セ レンキャッピング層が保護膜として有効であること がわかった。



図 4.3.11: セレンキャップ層あり (丸印) と無し (三角 印) で加工した Bi₂Se₃ 細線について、加工後にキャッ プ層を除去したあと測定した 1 次元伝導率と線幅と の関係。

Bi₂Se₃ 超薄膜上に FIB を用いて作成した H 型構造 の非局所抵抗測定

Bi₂Se₃に代表されるトポロジカル絶縁体の表面状態はスピン偏極したディラックコーンを持つ。スピン偏極したバンド構造に電場をかけることでスピン-電流変換がおこる「スピンホール効果」が表れることが予言されている。そこで、Bi₂Se₃(111)エピタキ シャル超薄膜の表面状態に由来するスピンホール効 果を H 型構造 (図 4.3.12 挿入図)の非局所抵抗を室 温で測定することで検出することを試みた。得られ た非局所抵抗をオームの法則に従う伝導に由来する 成分とスピンホール効果に由来する成分の和である と仮定してフィッティングを行った (図 4.3.12)。非局 所抵抗は通常のオームの法則に従う成分のみでほぼ 矛盾なく説明できた。スピンホール効果の定量的な 議論を行うには、より微細な H 型構造での測定や極 低温での実験が必要と思われるので、現在その実験 を準備している。



図 4.3.12: H型構造における非局所抵抗の線幅依存 性。非局所抵抗の電極配置と線幅 w、プローブ間隔 Lの定義は、図中に挿入した FIB-SIM(走査イオン顕 微鏡)像に示す。

Si(110)2×5-Au 表面の1次元伝導

Si(110)2×5-Au 表面超構造は、Au 原子が一定方 向にワイヤ状に並んだ構造を持ち、角度分解光電子 分光からも擬1次元金属的な電子状態を持つことが 知られている。他の擬1次元金属的表面と比べると 原子鎖間の相互作用が弱いため、より1次元性が強 く表れることが期待される。そこで Si(110)2×5-Au において直線4端子法による電気伝導測定を行うと、 端子の間隔を数 10µm 程度以下に狭くすると抵抗値 に異方性が観測され、さらに抵抗値が端子の間隔に 依存する結果が得られた。これは他の擬1次元系の 場合のように異方的な伝導度を持つ2次元系として は理解できないことを意味し、電気伝導に1次元に 近い性質が表れていると思われる。浸透理論により この伝導を理解できると考えられるが、より微小な 探針間隔や温度依存性の測定を行ってメカニズムを 解明する予定である。

4.3.2 表面ナノ構造

シリセン吸着 Ag 超薄膜の量子井戸の研究

六方格子の構造を持つシリコン単原子層であるシ リセンはグラフェンに類似した性質を持つと言われ ている。最近では Ag(111) 単結晶上で成長すること が報告されており、ディラックコーンらしきバンド 分散も観測されている。しかし、Ag 単結晶上は導電 性が高いため、シリセンの輸送特性を直接測定する ことは困難だと思われる。そこで、シリセンに対す る基板の影響を最小化するために、Ag(111) 超薄膜 上のシリセン作製を試みた。シリセンの成長を確認 する方法として電子回折による構造観測と角度分解 光電子分光法 (ARPES) による電子状態の確認を行っ た。先行研究では LEED による観測しかなされてお らず、シリセンの正確な膜厚制御に課題があったが、 RHEED を用いることでシリセンの成長をモニター し膜厚コントロールが可能になった。また、Ag 超薄 膜は電子の膜厚方向の閉じ込めによって生じる量子 井戸状態 (QWS) を有し、薄膜の表面上に他の原子が 吸着することで薄膜/真空の界面の変化が QWS のエ ネルギーシフトが起こることが報告されている。本研 究では Ag(111) 超薄膜上のシリセン成長を RHEED モニターにより制御して2層シリセンを作製し、角 度分解光電子分光法 ARPES で電子状態を測定した。 その結果、Ag 超薄膜の量子井戸状態 (QWS) がシリ セン作製前後でエネルギーシフトしていることが観 測された。そこで、Ag 薄膜の量子井戸状態の膜厚依 存性を調べ、位相シフト量子化則に基づいた面内分 散から、Ag薄膜/真空界面における位相シフトの変 化が QWS のエネルギーシフトを引き起こしていた ことが分かった。以上から、Ag(111) 超薄膜上シリ センの成長をRHEEDモニターとAg薄膜/真空界面 における位相シフトにより確認した。今後はシリセ ンの構造解析を行うために RHEED と LEED から得 られる構造を対応させることが求められる。

多層シリセンのバンド構造測定

Ag(111) 表面上に成長した単原子層のシリセンの バンド分散がディラック電子のような直線的なもの であることが昨年報告された。そこで本研究では単 原子層ではなく二層のシリセンを Ag(111) 表面に作 成し、フランスの放射光施設ソレイユにおいて、角 度分解光電子分光測定でバンド分散を決定した。 層シリセンは理想的なシリセンに対して $\sqrt{3} imes \sqrt{3}$ 構 造をとるため、ディラックコーンがそれに従って折 り返されることが期待される。実際に測定されたバ ンド分散では Γ 点近傍で明確なディラックコーンが 観測された (図 4.3.13)。今後はさらにシリセンの層 数を増やし、ディラックコーンが層数の増加ととも にどのように変化していくかを検証していく。さら に電気伝導測定を行い、その輸送特性を明らかにし ていく。(フランスマルセイユ大学、イタリア CNR との共同研究)



図 4.3.13: 二層シリセンで観測されたディラックコー ン型のバンド分散(左:グレースケール像、右:ス ペクトル線表示)。

ビスマス超薄膜における半金属-半導体転移の検証

ビスマスは、バルク状態はフェルミ面の小さな半 金属であり、それに比べて表面状態はフェルミ面の 大きな金属である。これまで角度分解光電子分光に よって表面状態のバンド構造がよく調べられていた が、バルクバンドに関する報告例はほぼ皆無であっ た。特にフェルミ準位をよぎっているバルクの電子・ ホールバンドが、200 Å 程度の厚さの超薄膜になっ たときには量子閉じ込め効果によってフェルミ面を 横切らなくなる半金属-半導体転移が 1960 年代に理 論的に予言されていたが、はっきりとした実験的な 証拠は見つかっていなかった。そこで本研究ではこ れまでと違って、バルク敏感の低エネルギーの直線 偏光励起光を用いて Bi(111) エピタキシャル超薄膜 (厚さ 100 Å)の角度分解光電子分光測定を行った。 その結果、偏光が s 偏光の場合にバルクのホールバ ンドが明瞭に観測された。そのホールバンドの頂点 はフェルミ準位より 50 meV 下にあり、確かにフェ ルミ準位をよぎっていない。これはバルクバンドが 半導体になったことを示唆しているが、今後膜厚を 変えさらにバルク電子バンドの検出も試み、半金属-半導体転移の確固たる証拠を得たいと考えている。

4.3.3 新しい装置・手法の開発

超高真空低温強磁場下における走査トンネル顕微鏡 の開発

昨年度に引き続いて超高真空(10⁻¹¹ Torr)・極低 温(~2.5 K)下で動作する走査トンネル顕微鏡の開 発を行った。まず、試料面直に8Tの磁場が印加可能 な超伝導磁石を導入した。さらにロックイン増幅器 を用いた回路を導入し、走査トンネル分光イメージ ングができるようになった。これを用いて Ag(111) 表面における分光イメージングを行い、表面での定 在波を観察することに成功した。本装置は伝導現象 における微小領域でのスピン依存のポテンシャルマッ ピングができるように通常のSTM 探針の他に二つ 電極がSTMのピエゾについている。しかしこの部分 が探針ホルダーとの間の摩擦で摩耗し使用不可能に なる事故が発生し、約半年間装置が使用不能になっ た。この問題に対策を施し、材質を変えることで同 じ事故が起きないように設計し直した。来年度は実 際にポテンショメトリ測定ができるように測定回路 を作成し、スピン偏極探針と合わせて研究を進めて いく。

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われ ました。記して感謝いたします。

・日本学術振興会 科研費 基盤研究A「ミリケルビン・ マイクロ4端子プローブ法の開発とモノレイヤー超 伝導の探索」(代表 長谷川修司)

・日本学術振興会 科研費 挑戦的萌芽研究「ナノス ケール伝導用スピンプローブの開発とそれによる表 面ラシュバ系のスピン流の研究」(代表 平原徹) ・日本学術振興会 科研費 若手研究 (A) 「スピン偏 極走査ポテンショメトリ装置の開発と微細加工した 表面ラシュバ系のスピン伝導」(代表 平原徹)

<受賞等>

 [1] 白井皓寅:表面科学技術者資格認定(公益社団法人 日本表面科学会、2012年7月)

<報文>

(原著論文)

- [2] T. Hirahara, N. Fukui, T. Shirasawa, M. Yamada, M. Aitani, H. Miyazaki, M. Matsunami, S. Kimura, T. Takahashi, S. Hasegawa, and K. Kobayashi, Atomic and Electronic Structure of Ultrathin Bi(111) Films Grown on Bi₂ Te₃(111) Substrates: Evidence for a Strain-Induced Topological Phase Transition, Phys. Rev. Lett. **109**, 227401 (Nov, 2012).
- [3] T. Uetake, T. Hirahara, Y. Ueda, N. Nagamura, R. Hobara, and S. Hasegawa, Anisotropic conductivity of the Si(111)4×1-In surface: Transport mechanism determined by the temperature dependence, Phys. Rev. B 86, 035325 (Jul, 2012).
- [4] Y. Fukaya, K. Kubo, T. Hirahara, S. Yamazaki, W. H. Choi, H. W. Yeom, A. Kawasuso, S. Hasegawa, and I. Matsuda, *Atomic and Electronic Structures* of Si(111)-√21 × √21 Superstructure, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **10**, 310 (Jul, 2012).
- [5] M. Yamada, T. Hirahara, S. Hasegawa, H. Mizuno, Y. Miyatake, and T. Nagamura, Surface Electrical Conductivity Measurement System with Micro-Four-Point Probes at Sub-Kelvin Temperature under High Magnetic Field in Ultrahigh Vacuum, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology 10, 400 (Jul, 2012).

[6] P. De Padova, P. Vogt, A. Resta, J. Avila, I. Razado-Colambo, C. Quaresima, C. Ottaviani, B. Olivieri, T. Bruhn, T. Hirahara, T. Shirai, S. Hasagawa, M. C. Asensio, and G. Le Lay, *Evidence of Dirac Fermions in Multilayer Silicene*, Appl. Phys. Lett, in press (2013).

(総説)

```
(国内雑誌)
```

(著書)

- [7] S. Hasegawa, T. Hirahara, Y. Kitaoka, S. Yoshimoto, T. Tono, and T. Ohta, Nanometer-Scale Four-Point Probe Resistance Measurements of Individual Nanowires by Four-Tip STM, pp. 153-165, in Atomic Scale Interconnection Machines, ed. Christian Joachim (Springer 2012).
- [8] S. Hasegawa (分担執筆): Reflection High-Energy Electron Diffraction, pp. 1925-1938, in Characterization of Materials, ed. Elton N. Kaufmann (Wiley 2012).
- [9] 長谷川修司(分担執筆):電子的・電気的特性(第3章)in 表面物性の基礎(現代表面科学シリーズ)
 日本表面科学会編集(共立, Oct 2012).
- [10] S. Hasegawa: "The Image is My Life.", in "In Memory of Akira Tonomura: Physicist and Electron Microscopist" (World Scientific, 2013), in press.

(その他)

[11] 平原徹: "トポロジカル絶縁体"キーワード, 理学部 ニュース 2013 年 3 月号.

(学位論文)

- [12] 福居直哉:集束イオンビーム複合型4探針走査トン ネル顕微鏡装置を用いた薄膜のその場微細加工およ び電気伝導測定(修士論文).
- [13] 相谷昌紀:ビスマス超薄膜およびトポロジカル絶縁体 超薄膜の輸送特性(修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [14] S. Hasegawa: Topological and superconducting surface states, Workshop of DFG- and NOW- Research Units FOR 1700, FOR 1162 and FOM on Physics at the borderline between 1D and 2D, 2013 年2月14日 (Bad Honnef, Germany).
- [15] S. Hasegawa:Surface nanomaterials: Lowdimensional, spin-split, and superconducting, The 2nd International School on Surface Science: Technologies and Measurements on Atomic Scale, 2012年10月6日(Sochi, Russia).
- [16] T. Hirahara: Charge and Spin Transport at Nonmagnetic Surfaces, International Conference of Young Researchers on Advanced Materials (ICYRAM), 2012 年 7 月 3 日 (Singapore)

 [17] T. Hirahara: Comprehensive study of topological phase transitions using ultrathin films, Energy Materials Nanotechnology (EMN) West Meeting, 2013 年1月7日 (Houston, USA).

一般講演

- [18] T. Hirahara, M. Aitani, and S. Hasegawsa: In situ Magnetotransport measurements of ultrathin Bi films on Si(111), Symposium on Surface and Nano Science 2013, 2013 年 1 月 17 日 (蔵王).
- [19] N. Fukui, T. Hirahara, and S. Hasegawa: In Situ Fabrication and Transport Measurements of Surface Nanostructures with a For-tip STM Combined with FIB, International Conference of Young Researchers on Advanced Materials 2012, 2012 年 7 月 3 日 (Singapore).
- [20] M. Aitani, T. Hirahara, and S. Hasegawa: In situ magnetotransport measurements of ultrathin Bi films, The Yonsei-Todai Joint Workshop 2013, 2013 年 2 月 19 日 (東京大学 本郷).
- [21] N. Fukui, T. Hirahara, and S. Hasegawa: Microfabrication of ultrathin films by focused ion beam and in situ electric conduction measurement by 4tip STM, The Yonsei-Todai Joint Workshop 2013, 2013 年 2 月 19 日 (東京大学 本郷).
- The 10th Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surfaces (JRSSS10), 2012 年 9 月 26-28 日 (東京大学,本郷)
 - [22] T. Hirahara and S. Hasegawa: Ultrathin Bi films: Electronic structure and topological properties.
 - [23] M. Yamada, T. Hirahara, R. Hobara, S. Hasegawa: Surface-state superconductivity measured by a UHV sub-kelvin micro-four-point-probe system under high magnetic field.
 - [24] T. Tono, Y. Ueda, T. Hirahara, and S. Hasegawa: Measurements of non-integer dimensional transports in Si(110)-2×5 Au.
 - [25] M. Aitani, T. Hirahara, and S. Hasegawa: Magnetotransport measurements of ultrathin Bi films on Si(111).
 - [26] N. Fukui, T. Hirahara, and S. Hasegawa: The Surface-State Conduction of a Microstructure Fabricated by Focused Ion Beam.
 - [27] T. Shirai, T. Hirahara, and S. Hasegawa: Study of the Quantum-Well States in Ultrathin Ag Films covered with Silicene.

(国内会議)

招待講演

[28] 長谷川修司:多探針測定技術による半導体・ナノワイ ヤの電気計測とロードマップ,学振ナノプローブテク ノロジー167委員会第67回研究会,2012年7月 18日 (NIMS,筑波).

- [29] 長谷川修司: 非磁性物質表面でのスピン分裂とスピン 輸送,第20回 大阪電気通信大学エレクトロニクス基 磁研究所シンポジウム 「スピントロニクスマテリア ルの新しい展開」,2013年1月11日 (大阪電通大 駅 前キャンパス).
- [30] 長谷川修司:物質最表面での新機能の発現,第60回 応用物理学会春季学術講演会シンポジウム「機能性 ナノマテリアルは持続可能社会をいかに支えるか」, 2013年3月27日(神奈川工科大学,本厚木).
- [31] 長谷川修司:物理オリンピックのシステム、日本物理 学会第68回年次大会シンポジウム「物理オリンピッ クと日本の物理教育」、2013年3月28日(広島大学、 東広島).
- [32] 平原徹: 非磁性体超薄膜のスピン偏極表面電子状態, UVSORIII における低エネルギー光電子分光の新展 開, 2012 年 6 月 21 日 (分子科学研究所).
- [33] 平原徹: ビスマスおよびビスマス系化合物超薄膜の実験的研究,科研費基盤研究 A「固体中のディラック電子」第1回研究会,2012年7月25日 (東京大本郷).
- [34] 平原徹: 放射光で拓く表面物質科学の新展開,所長招 聘研究会「2020年の光分子科学を語る」2013年1月
 23日 (分子科学研究所).

一般講演

- [35] 平原徹: ビスマス超薄膜の電子状態-基板の影響とト ポロジカルな物性-, UVSOR シンポジウム, 2012 年 11 月 10 日 (岡崎コンファレンスセンター).
- [36] 東野剛之、上田洋一、平原徹、長谷川修司:Si(110)2×5-Auにおける非整数次元伝導の測定,日本物理学会2012 年秋季大会,2012年9月18日(横浜国立大学).
- [37] 福居直哉、平原徹、長谷川修司:集束イオンビームに よる in situ 微細加工を施した表面の電位伝導特性,日 本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 18 日 (横 浜国立大学).
- [38] 福居直哉、平原徹、長谷川修司:集束イオンビームによるその場表面微細加工と電気伝導測定,第32回表面科学学術講演会,2012年11月20日(東北大学).
- [39] 相谷昌紀、平原徹、長谷川修司: Bi 超薄膜の低温・磁 場中での表面電気伝導測定,第32回表面科学学術講 演会,2012年11月21日(東北大学).
- [40] 白井皓寅、平原徹、長谷川修司:シリセン吸着 Ag 超 薄膜の量子井戸の研究,第 32 回表面科学学術講演会, 2012 年 11 月 21 日 (東北大学).
- [41] 山田学、平原徹、保原例、長谷川修司:表面状態超伝 導の観測,平成24年度東北大学通研プロジェクト研 究会,2012年12月14日(茂庭荘,宮城).
- [42] 相谷昌紀, 平原徹, 長谷川修司:ビスマス超薄膜の超高真空・低温・強磁場中における電気伝導測定, 日本物理学会第68回年次大会, 2013年3月26日(広島大学, 東広島).
- [43] 白井皓寅、平原徹、長谷川修司:シリセン吸着 Ag 超 薄膜の量子井戸の研究,日本物理学会第 68 回年次大 会,2013 年 3 月 27 日 (広島大学,東広島).

(セミナー)

- [44] 平原徹: 非磁性体表面のスピン偏極電子,東京大学理 学部物理学科ランチトーク, 2012年4月27日(東 京大本郷).
- [45] 長谷川修司:多探針走査プローブ顕微鏡によるナノ領 域の電気計測, JEITA (社)電子情報技術産業協会 半 導体部会研究会, 2012 年 7 月 27 日 (JEITA 大手セ ンタービル,東京).
- [46] 長谷川修司:トポロジカル絶縁体とその表面の物性,
 (株) デンソー基礎研究所, 2012 年 8 月 22 日 (デン ソー基礎研, 愛知).

(講義等)

- [48] 長谷川修司: 表面の特性基礎, (公社) 日本表面科学会 第 53 回表面科学基礎講座, 2012 年 7 月 11 日 (山上 会館, 東京大学).
- [49] 長谷川修司: ナノワールドのイメージング, 理学系研 究科共通科目「理学クラスター講義 II」「イメージン グ」, 2012 年 7 月 17 日 (小柴ホール, 東京大学).
- [50] 長谷川修司、平原徹、白井皓寅 (TA)、申東潤 (TA): 物理学実験 I (3年生) 電子回折、2012 年度冬学期 (本郷).
- [51] 長谷川修司:理科教育(教育学部) 2012 年度夏学期 (本郷).
- [52] 長谷川修司:実験データの解析,物理オリンピック日本委員会 IPhO2013 日本代表選手候補者冬合宿,2012年12月24日(八王子セミナーハウス,東京).
- [53] 長谷川修司, 興治文子:実験・実習:大気圧を測ろう, 平成24年度女子中高生夏の学校2012,2012年8月 10日(国立女性教育会館,埼玉).
- [54] 長谷川修司:実験課題レポートの書き方、および大気 圧測定実験物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ、2012年5月20日(秋田県立秋田高等学校、秋田); 2012年12月20日(大阪星光学院、大阪);2013年2月22日(福井県教育研究所、福井);2013年3月16日(栃木県立宇都宮高等学校、栃木).
- [55] 長谷川修司: 模擬授業 at 本郷, 2012 年 11 月 27 日 (栃木県立宇都宮高等学校); 2012 年 11 月 13 日 (群 馬県立前橋高等学校); 2012 年 8 月 9 日 (神奈川県立 湘南高等学校);2012 年 8 月 3 日 (茨城県立土浦第一 高等学校).

4.4 福山研究室

極低温環境では、乱雑な熱擾乱に邪魔されること なく、物質固有の性質を反映した非日常的な現象や 状態が顕わになる。超流動、超伝導、磁気フラスト レーション、量子ホール効果などはその好例である。 当研究室では、量子効果が特に強いヘリウムの液体 や固体などの凝縮系や、グラフェンなどできるだけ純 粋で単純な電子系物質の新奇物性や新現象を実験的 に研究している。ヘリウムは不純物の影響のない超 純粋な実験系であり、単純な構成要素からは想像でき ない複雑で多彩な量子現象を示す。ヘリウム 4(⁴He) とヘリウム 3(³He) はそれぞれまったく同じ原子間相 互作用をもちながら、⁴He はボース統計に従うスピ ン0の中性粒子であり、³Heはフェルミ統計に従うス ピン1/2の中性粒子である。この二つの安定同位体 の存在は、この系の物理をいっそう豊かなものにし ている。そこでは、超固体相や量子スピン液体状態 など物質のまったく新しい量子状態がその姿を現し 始めている。またグラフェンでは、ハニカム格子上を ホッピングする2次元電子系が半整数量子ホール効 果や反局在などの新奇物性を生むが、トポロジーの 制御がエレクトロニクス応用に直結するなど、基礎 研究と応用研究が表裏一体をなすという魅力がある。

4.4.1 2次元の量子凝縮相研究

⁴He や³He を 2 次元空間に閉じ込めたときの液体 や固体は、3次元系より量子性が強く、粒子相関も より広い範囲で制御できる新たな量子多体系である。 この系はいま、3 次元 He 系では見られない新奇な 量子相の宝庫として注目されている。我々は原子ス ケールで平坦なグラファイト表面に物理吸着した He の単原子層で2次元Heを実現し、その物性を90μK の超低温度に至る広い温度範囲で調べている。グラ ファイト表面は多孔体など他の吸着基板に比べて格 段に2次元性に優れている。1~3層目までそれぞれ 独立な単原子層膜として振る舞い、基板からの吸着 ポテンシャルや下地固体層からの周期ポテンシャル の大きさが異なるので、系のバリエーションは豊富 である。冷却には³He-⁴He 希釈冷凍機と銅核スピン の断熱消磁冷却装置を使い、完全な熱平衡下で基底 状態の性質を熱容量、核磁気共鳴 (NMR)、ねじれ振 り子測定から調べている。

2 次元 ³He の自己凝集現象:自然界で最も低密度な 液体の発見

永久ガスと思われた⁴He が 1908 年に 4.2 K(1 気 圧下)で液化された。より小さい原子質量をもち量子 効果の大きい³He は液化しないだろうと予測されて いたが、こちらは 1949 年に 3.2 K で液化することが 分かった。その後、³He の運動を 2 次元空間に閉じ 込めると近接原子数すなわち引力相互作用が減って 量子性が増し、基底状態で気体に止まる唯一の物質 になるだろうとの第一原理計算の結果が複数発表さ れた。吸着単原子層³He に対する過去の実験もこの 予想を支持してきた。

ところが、最近我々は、グラファイト上に³Heを 吸着した第 1~3 層の 3 種類の単原子層 ³He を用意 し、その熱容量を超低温度・超低密度まで注意深く 測定したところ、約 0.6 nm⁻²の臨界密度で液体に 自己凝集することを見出した。今年度 Phys. Rev. Lett. 誌に発表したこの研究成果は、自然界で最も低 密度な液体の発見として国内外で大きな反響を呼ん だ。その理由の一つは、これまでほとんどの理論計 算が自己凝集しないと予測してきたので、もし実験 が正しければ、フェルミ系の多体計算の信頼性に重 大な疑念が生ずるからである。理論の中でも6体ま での小数系の厳密対角化計算は自己凝集するとして おり、多体計算の結果と矛盾しているように見える。 今後、理論の再検討は避けられないであろう。

一方、実験サイドにも検証すべき課題が残ってい る。まず第一に、80 < T < 700 mK の温度範囲にあ ると予想される気液相転移の臨界点を観測すること である。我々の実験では超伝導熱スイッチに亜鉛を 用いたので、80 mK 以上の高温域での熱容量測定が できず、臨界点での熱力学異常を未だ観測していな い。第二に、下地の何らかの自由度を介した未知の 引力が自己凝集を引き起こしていることも完全には 否定できない (広い意味の擬2次元性)。過去に他の グループによって、数原子層の超流動⁴He 薄膜上に 浮かんだ³He 単原子層で我々とよく似た自己凝集現 象が報告されており、これとの関連性も調べる必要 ある。超流動薄膜には第三音波(超流動成分と膜厚の 疎密波)やリップロンとよばれる表面のさざ波の励起 があるので、これらを媒介とした³He 準粒子間の引 力が重要な役割を果たすと考えられている。それら の励起エネルギーは膜厚で制御できるので、自己凝 集だけでなく BCS 転移や2 量体相など多彩な量子相 を単一の系で実現できる可能性もある。その知見は 電子系研究にも有益なものとなるであろう。

現在、臨界点の観測を目指して、これまでより単結 晶子サイズが1桁以上大きい高品質なグラファイト 吸着基板 (後述のZYX基板)を使った50 < T < 700 mK の温度範囲の熱容量測定を準備している。その 次は、³He 単原子層と基板の間に挿入する⁴He 単原 子層を1層ずつ増やして熱容量測定を行い、過去の 実験との整合性を調べる予定である。ちなみに、グ ラファイト上の⁴He は、最初の2層は固体となりそ れより上層は超流動薄膜となる。

ギャップレス量子スピン液体状態の検証実験

"量子スピン液体"は絶対零度でもスピン系が長距離秩序をもたず、各サイトのスピンの期待値もゼロ にとどまる特異な非磁性基底状態で、スピン自由度 の"量子液体"に対応する。この新しい量子状態の実 現には、(i)スピンの量子性が高く、(ii)格子が幾何 学的にフラストレーションをもち、(iii)スピン間の 相互作用 (J)が反強磁性的である、という三つの要 素が必要である。最近、スピン励起にギャップをも たない"ギャップレス"の量子スピン液体の候補物質 がいくつか実験的に見つかり、この分野の研究が大きな拡がりを見せている。

核スピン 1/2 をもつ³He の 2 次元固体は上記 (i) ~(iii)の条件に加え、隣接する4体あるいは6体ま での多体の交換相互作用 (J_P: P は交換の種類に対 応)の競合も加わったフラストレーションの非常に強 い量子スピン系である。具体的には、グラファイト 上吸着2層目の"4/7整合相"とよばれる非常に低密 度の量子固体相でこれが実現していると考えられて いる。4/7相は、1層目の高密度固体Heに対して整 合性のある三角格子構造をもち、粒子数は1層目の 4/7 しかない。1997 年に我々が発表した 4/7 相の核 磁気熱容量測定の結果が、ギャップレス量子スピン液 体状態の最初の報告例である。その熱容量は緩やか なダブルピーク構造をもち、低温極限で温度に比例 する特異な温度依存性をもつ。前者はフラストレー トした低次元量子スピン系の特徴で、後者はスピノ ン凝縮と関係があると考えられている。2000年以降 に続々報告された電子スピン系の候補物質でも、温 度に比例する磁気比熱はギャップレス量子スピン液 体状態の一つのホールマークとなっている。

実験系としての2次元固体³Heのユニークな点は、 格子振動のエネルギースケール (デバイ温度 \approx 10 K) に比べて |J| が3桁も小さいため、スピン自由度の 全温度依存性を観測できることである。もう一つは、 ギャップレス量子スピン液体状態にあるスピン系そ のもののダイナミクスを NMR 法で探ることができ る点である。



図 4.4.14: 様々な下地層の上に形成した³He-4/7 整 合相の磁気比熱。これはギャップレス量子スピン液 体状態が示唆された最初の実験系。横軸は交換相互 作用の大きさで規格化した温度。

今年度は、これまで行ってきた³He または⁴He の 単原子層上の 4/7 相ではなく、より低密度の重水素 化水素 (HD) の 2 分子層上に吸着した ³He-4/7 相 (³He/HD/HD/gr 系) の熱容量測定を開始した。量 子固体では低密度ほど原子間のトンネル交換が激し く $|J_P|$ が大きくなるので、 $C \propto T$ の温度依存性を より広い温度範囲で検証できるはずである。実際、 この系は ³He/³He/gr 系のちょうど 10 倍の $|J_P|$ を もつと仮定して温度を規格化し、測定した磁気比熱 をプロットすると、図 4.4.14 に示すように低温域の $C \propto T$ の依存性や高温域の振る舞いが良く一致する ことが分かった。今後、90 μ K までの低温データを 取得することで、 $C \propto T$ の温度依存性が本当に2桁 近い広い温度範囲で観測されるのか決着がつくであ ろう。図 4.4.14 はもう一つ重要な情報を与えている。 それは、³He/HD/HD/gr 系ではダブルピーク構造が 消え、非常に緩やかなシングルピーク構造に変わっ ていることである。比熱の温度依存性は J_P の高次 項の競合度に敏感なので、低密度になったことで競 合度が変化したものと思われる。

今後はスピンースピン緩和時間 (T₂)の測定を通じ てこの新奇な磁気相のスピンダイナミクスも研究す る予定である。

グラファイト上2層目⁴Heの状態相図の決定

グラファイト上吸着 He の 1~3 層目の三つの単原 子層はそれぞれほぼ独立な 2 次元量子系として振る 舞うが、もっとも興味深いのは 2 層目の単原子層であ る。その理由は、He を 2 次元空間に閉じ込める吸着 ポテンシャルが十分大きくかつ面内の一様性もかな り高いからである。そこでまず、2 層目 ⁴He の状態相 図を正確に決定すべく、従来用いられてきたグラフォ イルとよばれるグラファイト基板に代えて ZYX グ ラファイトを使って、熱容量と蒸気圧測定を行った。 ZYX はグラフォイルの 1/10 の比表面積 (~2 m²/g) しかもたないが、単結晶子サイズ (~100 nm) は 10 倍大きいので、各層間の相転移点を決めるにははる かに優れた基板である。

図 4.4.15 がそのまとめである。図中 (C) は 4/7 相 の局在-非局在転移 ($T \approx 1.4$ K) に伴う熱容量異常 である。この熱容量ピークは、より低密度の流体相や より高密度の不整合固相の熱容量ピークと共存して 観測される密度域 (2 相共存域) が存在するので、低 密度整合固相に対応することはほぼ確実である。こ れを支持するように、蒸気圧 vs. 吸着量データにも 明確なステップ構造が観測された。この実験結果は、 最近の経路積分モンテカルロ計算の結果とは明らか に矛盾しており、理論計算の再検討を強く促すもの である。

従来の実験では気液共存域と一様液体相の相境界 は不明確であったが、本研究でその二つが明確に分離 できた。特に気液共存域では対数発散的な臨界性を もつ明確な熱容量異常を観測したことで(図中(A))、 2層目 4 He が 2 次元液体に自己凝集することを曖昧さ なく示すことができた。観測された臨界密度 4 nm⁻² と臨界温度 0.73 K は、いずれも下地原子層が作る周 期ポテンシャルの効果を無視した第一原理計算や純 粋 2 次元空間の計算と一致する。負符号問題のない ボース粒子系の計算精度はフェルミ粒子系にくらべ てより高いと期待されるので、実験と理論の一致は 合理的である。このように我々は、2 次元空間に閉 じ込めた 4 He が 4 nm⁻²、 3 He が 0.6 nm⁻²の臨界密 度をもつ液体に"液化"することを初めて実験的に明 らかにした。

ー様液体相で観測された T ≈ 0.9 K 付近のなだら かな熱容量異常 (図中 (B)) とその密度依存性は、理 論が予測する 2 次元の超流動転移と関連して非常に



図 4.4.15: グラファイト上 2 層目 ⁴He の状態相図 と、図中 (A)(B)(C) の面密度における熱容量の温度 依存性。

興味深く、現在その解析を進めている。超流動のコ スタリッツーサウレス (KT) 転移自身は後述するね じれ振り子実験の結果を待つ必要があるが、比熱は 2次元超流体中の第三音波、フォノン、ロトン等の 素励起の情報を与えるからである。

一方、吸着第1層目の $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 整合相の安定性に 関しても新しい知見が得られた。まず、グラフォイ ル基板を使った従来の測定に比べて熱容量異常が格 段にシャープになり、ピーク高も2倍になった。3状 態 Potts モデルで説明できる臨界領域もより拡がっ た。これらは ZYX 基板の優位性を如実に示してい る。より重要なことは、この熱容量異常のピーク高 の密度依存性に大きな粒子-ホール非対称性を観測 したことである。これは、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 整合相が低密度 域 (不足粒子領域)では液相と2相共存状態にあり、 高密度域 (過剰粒子領域)では不整合固相との間にド メイン壁構造をとることを強く示唆している。

2次元固体 ⁴He における超固体性の探索

物質が取り得る熱力学的に安定な状態には、気体、 液体、固体、超流動液体の4つある。これらに次ぐ第 5の状態と目されているのが、未発見の"超固体"で ある。超固体状態とは、結晶の周期性(並進対称性の 破れ)と超流動性 (ゲージ対称性の破れ) が共存する まったく新しい物質状態であり、1969年に Andreev と Lifshitz が初めて理論的に予言した。彼らが具体 的に示したモデルは、ボース粒子からなる結晶に絶 対零度でも空格子点が存在してそれが比較的大きな バンド幅をもって結晶中をトンネル運動する場合、空 格子点が低温でボース・アインシュタイン凝縮する というものである。こうした空格子点を"零点空格 子点 (ZPV: zero-point vacancy)" とよぶ。彼らは固 体⁴He がその有力候補であるとした。それ以後、30 年以上にわたって固体⁴Heの超固体性を探る実験が なされたが、結果はすべて否定的だった。こうした 中で、2004年に米国の研究グループが、固体⁴Heの ねじれ振り子実験で200 mK以下に超流動性による と思われる振動周期の減少を報告したことで世界的 な話題となり、理論・実験両面から研究が大きく進 展した。しかし、実験面ではいまだに超固体の確実 な証拠は得られておらず、³He 不純物によるピニン グ効果など転位の量子力学的運動にその機構を求め る意見も多い。

我々は、3次元バルクの固体⁴Heではなく、グラ ファイト上第2層⁴Heの4/7整合相が最も有力な超 固体の候補だと考えている。その理由は、これが下 地層の作る周期ポテンシャルの効果によってようや く局在した非常に低密度の量子固体だからである。3 次元固体に比べて ZPV の生成エネルギーはかなり小 さくバンド幅も相当大きいと期待できる。上記した ように、⁴He-4/7 相の安定性は我々自身の熱力学測 定によって確実視されている(近い将来、X線や中性 子の散乱実験を行うことは必要である)。

今年度は、図 4.4.16 にあるような ZYX 基板を使っ たねじれ振り子試料セルを設計製作し、実際に希釈 冷凍機に搭載した。ねじれ棒を含むセル本体の材料に は、よく用いられるベリリウム銅ではなく、T < 50mK で弾性定数の温度変化が小さいコインシルバー Ag₉₀Cu₁₀(wt%)を採用し、T = 4 K での動作テス トで 1 × 10⁵ の Q 値を得た。



図 4.4.16: 超固体相探索のために製作したねじれ振 り子試料セル (a) と、T = 4 K での空セルの共鳴曲 線 (b)。

4.4.2 グラフェンの電子物性研究

炭素の単原子層シートであるグラフェンは、フェ ルミエネルギー (E_F)近傍でエネルギーバンドが線 形分散をもって1点 (ディラック点)で交わる特異な 電子構造をしている。そのため、伝導を担うこれら π 軌道の電子や正孔が質量ゼロの相対論的ディラッ ク粒子として振る舞い、半整数量子ホール効果など、 半導体へテロ構造で得られる通常の2次元電子系と は質的に異なる物性を示す。また、 sp^2 軌道が面内で ハニカム状に共有結合した結晶構造をもち不純物も ほとんど含まないので、既存の半導体よりも電子移 動度や熱伝導度が高く、面内の機械的強度は極めて 高い一方、面直方向には非常に柔軟である。こうし たさまざまな特性から、グラフェンは次世代の電子 デバイスへの応用が大いに期待されている。ところ が単層グラフェンの場合、バンドギャップをもたな いので高い消光比が期待できないことが応用への障害となっている。

グラフェンがギャップレスのディラック分散をもつ のは、ハニカム格子が近接原子間の電子のホッピン グを同等に扱える bipartite 型であることと、カイラ ル対称性 (単位胞に含まれる A、B2 つの副格子原子 に由来)をもつことにある。そこで我々は、原子ある いは分子をグラフェン上に周期的に吸着させること でカイラル対称性を破り、バンドギャップを誘起でき ると考え、実験的な検証を進めている。

実験は、走査トンネル顕微/分光法 (STM/STS) と 輸送現象の測定を併用している。我々が自作した超低 温走査トンネル顕微鏡 (ULT-STM) は、30 mK の超 低温、13 T の高磁場、 10^{-8} Pa 以下の超高真空とい う多重極限環境下で原子レベルの高い空間分解能と 長時間安定性をもち、エネルギー分解能も 100 μ eV と高い。

グラフェン試料は、母物質であるグラファイトを SiO₂/Si 基板上に劈開剥離して作成する"劈開グラ フェン"と、SiC 基板を加熱処理することで得られ る"SiC グラフェン"(あるいは"エピタキシャルグラ フェン")の2種類を観測方法に応じて使い分けてい る。劈開グラフェン試料は、バックゲートを設けて 電界効果で E_F を操作することが可能で、基板との 相互作用が弱いのでグラフェン固有の性質を調べや すいが、試料サイズは高々数10 μ m 四方と微小であ る。一方、SiC グラフェンは、大表面積の試料が得 られるので STM/STS 実験に向いているが、基板と の相互作用が強いのでグラフェンの電子状態が影響 を受けやすい。

Kr 原子で修飾したグラフェン/グラファイト表面の STM/STS 観測

希ガス原子やアルカリ金属原子の多くは、グラフェ ンのハニカム格子の3つのうち1つの中心 (hollow サイト) に吸着する ($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$) $R30^\circ$ 整合相を形成す ることが知られている。このとき、グラフェン副格 子の同等性が破れ (ケクレ構造)、最近接ホッピング の異方性程度の大きさのエネルギーギャップが生ず ることが期待される。

.れを実証するため、まずグラフェンが多層積層 したグラファイトの表面上に Kr 原子をサブモノレー ヤー密度で吸着した試料について表面構造と表面電 子状態の変化を STM/STS 観測した。図 4.4.17(a) が ULT-STM 装置を使って T = 40 mK で観測した STM 像である。試料は、グラファイト基板の温度 (T = 35~40 K) と真空チャンバー内の Kr のガス分 圧 $(P \approx 1 \times 10^{-4} \text{ Pa})$ を注意深く制御して作成した。 図の左上にはグラファイト炭素原子の一方の副格子 からなる三角格子が観測されており、右下にはグラ ファイトより格子間隔がかなり広くトンネル電流の 振幅も大きい別の三角格子が見える。後者は吸着 Kr 原子の $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$ 構造に対応している。二つ の三角格子の相対的な位置関係から Kr の吸着サイ トはハニカム格子の hollow サイトであることが分か る。これは実空間で初めてそのことを実証したデー

タと思われる。図 4.4.17(a) に見られる Kr の結晶境 界での STM 像の乱れは、STM 探針との相互作用に よって境界付近の Kr 原子が不安定になっているこ とを示す。結晶境界の形状が時間変化する様子も観 測されている。



図 4.4.17: (a) グラファイト表面に吸着した 2 次元 Kr 結晶の STM 像 (T = 40 mK)。Kr 原子はハニカ ム構造の中心に吸着し、($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$) $R30^{\circ}$ 構造をもつ ことが分かる。(b)2 次元 Kr 結晶上 (\odot) と、そこか ら~2 nm 離れたグラファイト基板上 (\bigcirc) で測定し た微分トンネルコンダクタンス。いずれも E_F 近傍 に±150 mV 程度の状態密度の減少が見られる。

続いて、2次元 Kr 結晶上の状態密度を測定したところ、 E_F を中心に ± 150 mVのエネルギー幅にわたって状態密度が大きく減少することが観測された(図 4.4.17(b))。一見エネルギーギャップの形成とも思えるこの状態密度の減少は、清浄グラファイト表面では見られないが、図 4.4.17(a)の Kr 結晶境界から2 nm 程度離れた位置のグラファイト表面では観測される。Kr 吸着によって生じたグラファイト表面の電子状態の変調が Kr 結晶の外にも染み出しているのかも知れないし、探針上に吸着した Kr 原子の影響によるのかも知れない。今後の研究課題である。

この他、個々の Kr 原子の STM 像が試料-探針間 の電位差 (バイアス電圧; U_g) に依存して変化するこ とも分かった。 $U_g = 3$ V のときは円形で、1 V で は楕円形あるいは中心がくびれた楕円形に観測され る。これは、炭素原子の 2p 軌道と Kr 原子の 4p お よび 5s 軌道の混成が E_F 近傍の状態密度に大きな寄 与をもつという理論計算と定性的に一致する。ただ し、 $U_g = +1$ V での Kr 原子の楕円の方向は理論計 算とは異なっている。

SiC グラフェン試料の表面でも同様の STM/STS 実験を試みたが、こちらは吸着 Kr 結晶は観測できな かった。その一方で、表面の凹凸や表面電子状態の 真空への減衰長が Kr 吸着量によって系統的に変化す る様子が観測された。SiC グラフェンの場合、Kr 原 子は表面ではなくグラフェン層間あるいはグラフェ ンと SiC 基板の間に入り込むのかも知れない。ここ で用いた SiC グラフェン試料は、NTT 物性科学基礎 研究所・機能物質科学研究部・低次元構造研究グルー プの日比野浩樹氏より提供いただいた。

Kr 修飾したグラフェンの電気伝導度測定

Kr 吸着によるグラフェンのエネルギーギャップ形成の有無を確認するため、電気伝導度の変化を調べた。伝導度測定に使う劈開グラフェン試料は高々数 + μ m²の表面積しかもたないので、試料セルの中には大表面積 (39 m²)をもつグラフォイルも一緒に収め、T = 110 K で Kr 被覆率を制御しながら、電気伝導度を同時測定した。微小電極の取り付けは、試料表面の清浄度を保つため、通常のフォトリソグラフィー法ではなく、顕微鏡下で溶融インジウムの細線を直接グラフェン表面に描くことで行った。

単層および2層グラフェン試料に対して、Kr吸着 量を変えながら電気抵抗のゲート電圧依存性を測定 したが、これまでのところギャップ形成を示唆するよ うな変化は観測できていない。その理由として、前 節で述べたように、Kr原子がグラフェンと基板の間 に入り込んでしまい表面に整合相を形成していない 可能性や、希ガスの物理吸着では十分な大きさのカ イラル対称性の破れが生じない可能性もある。

今後は、グラフェン試料を多数のマイクロピット をもつ Si 基板上に劈開したり (ピット内では基板な しの宙づり状態)、亜酸化窒素 (N₂O) など大きな永 久双極子モーメントをもつ分子を吸着子として用い て実験を続行する予定である。

酸素分子修飾したグラフェンの伝導度測定

表面吸着子によるグラフェンの物性変化には、バ ンド構造の変調の他に電荷注入や吸着子が散乱体と なる伝導率の変化などもある。そこで、グラフェン に対してホールドープ効果が知られている酸素分子 の影響を調べた。測定方法は以下の通りである。は じめに、室温で一定圧力の酸素ガスを試料セル内に 導入し、その後の劈開グラフェン試料の電気抵抗の ゲート電圧依存性の時間推移を記録する。このとき ゲート電圧は、一定の電圧範囲を一定の速度で常時 掃引した。十分長い時間(60h以上)測定した後、100 °Cに昇温して試料セルを真空引きし、再び酸素ガス を導入して次のステップの時間推移を測定した。

図 4.4.18 に単層 (ML) と 2 層 (BL) グラフェン試 料に対する実験結果を示す。先行研究で知られてい るように、ディラック点電圧の変化すなわちホール ドープ量の変化は非常にゆっくりしており、時間の 冪乗で変化しているようである (図中 (a)(d))。それ に比べて、伝導への散乱体としての寄与を表すディ ラック点の抵抗値 (図中 (b)(e)) や抵抗のゲート電圧 依存性の傾き (図中 (c)(f)) は、ずっと早く反応して いる。興味深いことに後者の変化の方向は単層と2 層で逆で、2層グラフェンでは時間と共に移動度が上 昇するかのような振る舞いを見せる。こうした複雑 な挙動は、酸素分子の吸着だけでなく、表面での拡 散運動や格子欠陥サイト等での化学反応のプロセス が絡み合った結果であろう。化学反応の存在は、100 °Cのベーキングでは回復しない不可逆な変化が一定 量あることからも示唆される。グラフェン表面での 酸素の挙動を詳しく知るには、今後、STM/STS に よる原子スケールでの観測が不可欠である。



図 4.4.18: 単層 (ML:(a)(b)(c))、2 層 (BL:(d)(e)(f)) グラフェンに対して、室温で酸素分子をt = 0で曝 露した後のゲート電圧 (ΔV_g :(a)(d))、ディラック点 における抵抗値 ($R_{\Box \max}$:(b)(e))、抵抗のゲート電圧 依存性の幅 (ΔR :(c)(f))の時間変化。

<報文>

(原著論文)

- D. Sato, K. Naruse, T. Matsui and Hiroshi Fukuyama: Spin-spin Relaxation Time Measurements of 2D ³He on Graphite, Journal of Physics: Conference Series 400, 012066 (2012).
- [2] S. Nakamura, K. Matsui, T. Matsui and Hiroshi Fukuyama: New Heat-Capacity Measurements of the Possible Order-Disorder Transition in the 4/7phase of 2D Helium, Journal of Physics: Conference Series 400, 032061 (2012).
- [3] K. Matsui, S. Nakamura, T. Matsui, H. Fukuyama: Millikelvin LEED apparatus: a feasibility study, International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Journal of Physics: Conference Series 400, 052019 (2012).
- [4] D. Sato, K. Naruse, T. Matsui and Hiroshi Fukuyama: Observation of Self-Binding in Monolayer ³He, Physical Review Letters **109**, 235306 (2012).
- [5] S. Nakamura, K. Matsui, T. Matsui and Hiroshi Fukuyama: Preliminary Heat Capacity and Vapor Pressure Measurements of 2D ⁴He on ZYX Graphite, Journal of Low Temperature Physics (2013), DOI:10.1007/s10909-012-0847-5.

(学位論文)

- [6] 中村 祥子: Quantum Phase Diagram of Twodimensional Helium on Graphite (グラファイト上2 次元ヘリウムの量子相図) (博士論文).
- [7] 中山 和貴:原子・分子吸着によるグラフェンの電子 状態変化の輸送測定による研究 (修士論文).

4. 物性実験

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [8] D. Sato, K. Naruse, T. Matsui, H. Fukuyama: Liquefaction of ³He in Two-dimension, International conference on topological quantum phenomena (TQP2012), (Nagoya, Japan, May 16-20, 2012).
- [9] S. Nakamura, K. Matsui, T. Matsui, H. Fukuyama: Yet-To-Be-Discovered 2D Superfluid ³He, International conference on topological quantum phenomena (TQP2012), (Nagoya, Japan, May 16-20, 2012).
- [10] T. Matsui, H. Takei, H. Fukuyama: STM/S studies of Superconducting Nanoparticles on Graphite, International Conference on Nanoscience + Technology (ICN+T2012), (Paris, France, July 23-27, 2012).
- [11] D. Sato, K. Naruse, T. Matsui, H. Fukuyama: The Temperature Dependence of Heat Capacity in 2D Liquid Puddles of ³He on Grafoil, International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2012), (Lancaster, UK, August 15-21, 2012).
- [12] S. Nakamura, K. Matsui, T. Matsui, H. Fukuyama: Heat Capacity and Vapor Pressure Measurements of 2D ⁴He on ZYX Graphite, International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2012), (Lancaster, UK, August 15-21, 2012).

招待講演

- [13] H. Fukuyama: Possibility of Two-dimensional Supersolidity in Monolayer Helium Four, Supersolid in Nature, (Wako, Japan, June 11, 2012).
- [14] H. Fukuyama: Physics of two-dimensional helium films: Recent studies of monolayer ³He and ⁴He on graphite, International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2012), (Lancaster, UK, August 15-21, 2012).
- [15] H. Fukuyama: Highly Frustrated Nuclear Magnetism in Monolayer Helium Three on Graphite, Exotic Phases of Frustrated Magnets, (Santa Barbara, USA, October, 2012).

(国内会議)

一般講演

- [16] 松井 朋裕、武井 英人、福山 寛: 超伝導ナノ粒子の STM/S 観測、日本物理学会 2012 年秋季大会 (横浜 国立大学、2012 年 9 月 18-21 日).
- [17] 佐藤 大輔、鎌田 雅博、久保田 雄也、松井 朋裕、福山 寛:2次元ヘリウム3のギャップレス・スピン液体状態の熱容量測定、日本物理学会2012年秋季大会 (横浜国立大学、2012年9月18-21日).

- [18] 中村 祥子、松井 幸太、松井 朋裕、福山 寛: ZYX グ ラファイトに吸着した 2 次元ヘリウム 4 流体相の熱 容量測定、日本物理学会 2012 年秋季大会 (横浜国立 大学、2012 年 9 月 18-21 日).
- [19] 松井 朋裕、Jan Raphael Bindel、福山 寛: グラファ イト上に吸着した 2 次元クリプトン固体の STM/S 観測、第4回(平成24年度)東京大学低温センター 研究交流会(東京大学、2013年3月7日).
- [20] 松井 朋裕、Jan Raphael Bindel、福山 寛: グラファ イト上に吸着した 2 次元 Kr 固体の STM 観測、日本 物理学会 第 68 回年次大会 (広島大学、2013 年 3 月 26-29 日).
- [21] 中山 和貴、松井 朋裕、福山 寛:原子分子修飾したグ ラフェンの伝導度測定、日本物理学会 第68回年次大 会(広島大学、2013年3月26-29日).
- [22] 鎌田 雅博、佐藤 大輔、松井 朋裕、福山 寛:2 次元 ヘリウム3のギャップレス・スピン液体状態の熱容量 測定 II、日本物理学会 第68回年次大会(広島大学、 2013年3月26-29日).
- [23] 松井 幸太、中村 祥子、松井 朋裕、福山 寛:2 次元 ³Heの気液相転移に伴う比熱異常の観測にむけて、日本物理学会 第68回年次大会(広島大学、2013年3 月 26-29日).
- [24] 中村 祥子、松井 幸太、松井 朋裕、福山 寛:2次元へ リウム4整合相の融解現象と整合不整合転移、日本 物理学会第68回年次大会(広島大学、2013年3月 26-29日).
- [25] 久保田 雄也、戸田 亮、佐藤 大輔、松井 朋裕、福山 寛:2次元ヘリウム4における超固体性の探索実験、 日本物理学会 第68回年次大会(広島大学、2013年 3月26-29日).

招待講演

- [26] 佐藤 大輔:2次元ヘリウム3研究の最近の進展、日本物理学会2012年秋季大会(横浜国立大学、2012年 9月11-14日).
- [27] 福山 寛:2次元空間に閉じ込めたヘリウムの量子物 性、第11回 低温物質科学研究センター講演会・研究 交流会(京都大学、2013年3月13日).

4.5 岡本 研究室

本研究室では、低次元電子系等における新奇な物 理現象の探索と解明を行っている。³He-⁴He 希釈冷 凍機を用いた 20 mK までの極低温および 15 T まで の強磁場環境において、さまざまな独自技術により 新しい自由度を持たせた研究を行っている。

4.5.1 金属超薄膜の超伝導

最近、関原を中心として、GaAs 絶縁基板の劈開表 面上に形成された金属超薄膜に対する研究を行って いる。劈開表面の平坦さを反映して、PbおよびInに 対して単原子層膜の超伝導が観測されている。絶縁 体基板上に形成された単原子層膜は、完全な2次元 系というだけではなく、空間反転対称性が破れてい るという点からも魅力がある系だと考えている。特 に、重い元素の単原子層膜においては、非対称な閉 じ込めポテンシャルとスピン軌道相互作用との結合 によって、Rashba 効果による大きなスピン分裂が期 待できる。ARPES などによって重い元素の単体表面 や単原子層膜で100 meV オーダーの大きな Rashba 分裂が観測されているが、Rashba 分裂した完全な2 次元系の超伝導研究は行われていなかった。

昨年度行った Pb 単原子層膜に対する研究におい て、2次元面に対して平行に磁場をかけた場合には、 Pauli 限界磁場を大きく上回る磁場に対しても超伝導 転移温度がほとんど変化しないことが明らかになっ た。本年度は、超伝導転移温度の平行磁場依存性を 詳細に測定し、Rashba 分裂した2次元系に対して予 想されている超伝導状態の検証を行った。

Pb 単原子層膜に対する測定

まず、超伝導転移温度のわずかな磁場依存性を正 確に測定するため、市販の RuO₂ 抵抗温度計の磁気 抵抗を³He および⁴He の蒸気圧を用いて業者提供 データを大きく上回る精度で調べた。この較正によ り、超伝導転移温度を 0.2 % の精度で決定できるよ うになった。

Pbの単原子層膜において、超伝導転移温度が磁場の自乗に比例してわずかに減少することが明らかになった。スピン軌道散乱が超伝導臨界磁場を増大させることは良く知られているが、超伝導転移温度の磁場依存性をスピン軌道散乱によって説明しようとした場合、弾性散乱時間 τ と同程度の非常に短いスピン軌道散乱時間 τ_{so} を仮定する必要があり、原子番号の近い Auの薄膜における反局在効果による磁気抵抗効果の実験から見積もられた結果 ($\tau/\tau_{so} = 4 \times 10^{-4}$)と大きく食い違う。

一方、大きな Rashba 分裂を仮定すると実験結果を 定量的に説明することができる。散乱が弱い場合に は、平行磁場下では超伝導秩序変数の大きさが空間 変動する stripe 相と呼ばれる状態が基底状態になる と予想されている。しかし、stripe 相は弾性散乱が強 い場合には不安定であり、代わって、helical 相と呼 ばれる状態が安定になると予想されている。helical 相において、Rashba スピン分裂 Δ_R が $\hbar\tau^{-1}$ と比べ て大きい場合(但し $\hbar\tau^{-1} \gg k_B T_c$)、超伝導転移温 度の平行磁場依存性は、

$$T_c = T_{c0} - \frac{\pi \tau \mu_B^2}{2\hbar k_B} H_{\parallel}^2$$

と書ける。これを実験結果に fit することにより得ら れた弾性散乱時間 r は、常伝導状態での抵抗値から 求めた値と良い一致を示した。

In単原子層膜に対する測定

Rashba 効果の強さによる違いを調べるため、Inの 単原子層膜に対する測定が、関原と三宅により行わ れた。Pauli 限界を大きく越える磁場で超伝導転移が 観測されたものの、超伝導転移温度の磁場依存性は、 Pb 単原子層膜の場合よりもはるかに大きかった。常 伝導抵抗から見積もられる弾性散乱時間は Pb 単原 子層膜の値と同程度であるため、この違いは、In 単 原子層膜の場合、上式の前提である $\Delta_R > \hbar\tau^{-1}$ の 条件が満たされていないためだと考えられる。この ことを考慮して In 単原子層膜における Rashba スピ ン分裂を見積もると数 10 meV になった。

他の超薄膜に対する測定

Pb および In のほかに、Bi、Al、Sn に対しても超 薄膜の作製を試みたが、数原子層の厚さで常伝導抵 抗が非常に大きくなることなどから、単原子層膜の 電気伝導測定には成功していない。これまでに作製 した試料の中で最も薄い0.77 nm の Bi 超薄膜に対し て超伝導転移温度の平行磁場依存性を測定したとこ ろ、Pb 単原子層膜と同様に変化が非常に小さいこと が明らかになった。単原子層膜の場合と異なり、多 サブバンド状態になっていると考えられるため定量 的な議論は困難であるが、この系でも Rashba 相互 作用が重要な役割を担っていると考えている。

4.5.2 強相関2次元電子系

単純なバンド理論では動き回る電子同士に働く力 を考えないが、実際にはクーロン斥力が働いている。 電子の運動エネルギーと比べて相関のエネルギーが 強い電子系は、強相関系と呼ばれ、現代物理学の重 要なキーワードの一つである。半導体2次元系は、磁 場や電子密度などにより相関の強さを自由に変える ことができることなどから、強相関物理の理想的な 舞台の一つとなっており、分数量子ホール効果など 他の系では見られない現象も観測されている。

近年、我々のグループでは都市大白木先生と澤野 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ている。



図 4.5.19: GaAs 劈開面上に形成された金属超薄膜 の超伝導転移温度の平行磁場依存性。(a) Pb 単原子 層膜に対する実験結果。helical 相を仮定すると、弾 性散乱時間は原子密度 9.4 nm⁻² (11.3 nm⁻²)の試 料に対して 2.6 fs (3.2 fs) と求まり、常伝導状態の 抵抗値から求まる値 3.1 fs (3.5 fs) と良い一致を示 した。(b) In 単原子層膜に対する実験結果。比較的 大きな磁場依存性が観測された。In 単原子層膜の場 合、Rashba スピン分裂の強さが $\hbar\tau^{-1} \sim 100$ meV と比べて弱い(数 10 meV 程度) ためだと考えてい る。(c) 厚さ 0.77 nm の Bi 超薄膜に対する実験結果。 単原子層膜ではないため理論との比較は困難である が、この系でも Rashba 相互作用が重要な役割を担っ ていると考えている。

サイクロトロン共鳴の測定

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、ゼロ磁場下でも、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rs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。

一方で、最近では新たな知見を得るために、サイ クロトロン共鳴の測定を行っている。これまで、金 属領域に対して、共鳴吸収線幅から得られるサイク ロトロン緩和時間 $\tau_{CR} = B/(\omega\Delta B)$ が直流極限の電 気抵抗から得られる散乱時間 τ_t と似通った温度依存 性およびスピン偏極率依存性をもつことを明らかに してきた(枡富他 PRL 2011、千葉他 PRB 2012)。 本年度は、Wigner 結晶の形成が期待される絶縁体領 域に研究を拡張するために希釈冷凍機内に構築され た測定系を用いて、須藤らが予備的な測定を行った。 絶縁体領域でのサイクロトロン共鳴の測定には至ら なかったが、電子温度の上昇を極力抑えるために最 小限に絞られたマイクロ波照射に対して、金属領域 での明瞭なサイクロトロン共鳴を観測することがで きた。

高周波電気伝導測定

低周波極限とサイクロトロン共鳴測定が行われた 100 GHz との中間の周波数領域における散乱時間を 系統的に調べるために、0.1 ~ 10 GHz 領域での電気 伝導測定系が花塚により行われた。試料は、Si/SiGe ヘテロ接合を持つウェハの表面にコプレーナ導波路 をパターニングしたものである。表面直下(0.1 μ m) の2次元電子の運動が、伝送損失を引き起こすこと から、入出力の比を取ることにより2次元系の電気 伝導率 σ を導出することができる。

直流電気伝導率が金属的温度依存性 ($\partial\sigma/\partial T < 0$) を示す電子密度 ($V_{BG} = -7.0 V$ のデータ) におい て、高周波電気伝導率においても金属的な温度依存 性が観測された。ただし、温度変化は直流の場合と 比べて弱い。一方、直流電気伝導率が絶縁体的温度依 存性 ($\partial\sigma/\partial T > 0$)を示す電子密度 ($V_{BG} = -8.0 V$ のデータ) においては、5 GHz や8 GHz の周波数に おいて最低温度付近で金属的振る舞いが観測されて いた。金属絶縁体転移点が周波数に依存する可能性 が示唆される。

この他、絶縁体領域において Wigner 結晶のピン 止めに伴う振動モードの探索を 0.1 ~ 10 GHz の周 波数範囲で行った。いくつかの共鳴ピークが観測さ れたが、測定系由来である可能性も否定できず、さ らなる検討が必要である。



図 4.5.20: (a) 中央におかれた Si/SiGe ヘテロ接合を 持つウェハの表面にコプレーナ導波路が形成されて いる。入出力の比は左右の同軸ケーブルを経由して測 定される。測定は、³He 冷凍機中で行われ、通常の4 端子法により直流抵抗も同時に測定される。(b) バッ クゲート電圧 $V_{BG} = -7.0$ V における B = 0 での電 気伝導率の温度依存性。2 K 以下で金属的振る舞い ($\partial\sigma/\partial T < 0$) が観測されている。(c) $V_{BG} = -8.0$ V における B = 0 での電気伝導率の温度依存性。直流 電気伝導率の振る舞いは絶縁体的($\partial\sigma/\partial T > 0$) で あるが、5 GHz や8 GHz の周波数において最低温度 付近で金属的振る舞いが観測されている。

<報文>

(原著論文)

 T. Chiba, R. Masutomi, K. Sawano, Y. Shiraki, T. Okamoto: In-plane magnetic field dependence of cyclotron relaxation time in a Si two-dimensional electron system, Physical Review B 86, 045310 (2012).

(会議抄録)

- [2] R. Masutomi, N. Toriyama, T. Okamoto: Low-Temperature Scanning Tunneling Microscopy and Transport Measurements on Adsorbate-Induced Two-Dimensional Electron Systems, AIP Conference Proceedings (in press).
- [3] R. Masutomi, T. Chiba, K. Sasaki, I. Yasuda, A. Sekine, K. Sawano, Y. Shiraki, T. Okamoto: Temperature, electron density and in-plane magnetic field dependence of cyclotron relaxation time in the two-dimensional metallic phase, Journal of Physics: Conference Series (in press).
- [4] T. Sekihara, R. Masutomi, and T. Okamoto: Magnetic-field-independent superconductivity of ultrathin Pb films on cleaved GaAs surface, Journal of Physics: Conference Series (in press).

(学位論文)

- [5] 須藤香奈美:「希釈冷凍機温度におけるシリコン二次 元電子系でのサイクロトロン共鳴」(修士論文)
- [6] 花塚真大:「強相関二次元系における金属絶縁体転移 付近での高周波伝導測定」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

- 一般講演
- [7] R. Masutomi, T. Chiba, K. Sasaki, I. Yasuda, A. Sekine, K. Sawano, Y. Shiraki and T. Okamoto: Temperature, electron density and in-plane magnetic field dependence of cyclotron relaxation time in the two-dimensional metallic phase, 20th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (Chamonix, France), July 22-27, 2012.
- [8] T.Sekihara, R.Masutomi, and T.Okamoto: Magnetic-field-independent superconductivity of ultrathin Pb films on cleaved GaAs surface, 20th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (Chamonix, France), July 22-27, 2012.
- [9] R. Masutomi, N. Toriyama, T. Okamoto: Low-Temperature Scanning Tunneling Microscopy and Transport Measurements on Adsorbate-Induced Two-Dimensional Electron Systems, 31th International Conference on the Physics of Semiconductors, (Zurich, Switzerland) July 29-August 3, 2012.

- [10] T.Sekihara, R.Masutomi, and T.Okamoto, Anomalously Robust Superconductivity against Parallel Magnetic Field in Ultrathin Pb Films on Cleaved GaAs Surface, GCOE International Symposium on Physical Sciences Frontier (Tokyo, Japan) December 8-9, 2012.
- [11] R. Masutomi: Strongly correlated two-dimensional system and superconductivity in one atomic layer, Yonsei-Todai Symposium, (Tokyo, Japan) February 19, 2013.

(国内会議)

招待講演

[12] T. Sekihara, R. Masutomi, and T. Okamoto: Superconductivity of ultrathin metallic films on cleaved GaAs surfaces, The 10th Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surfaces (Tokyo, Japan) September 26-28, 2012.

一般講演

- [13] 関原貴之、枡富龍一、岡本徹: GaAs 劈開表面上の金 属単原子層膜の超伝導と面内磁場効果、日本物理学会 秋季大会(横浜国立大学)2012年9月18日-21日.
- [14] 関原貴之、三宅貴大、一ノ宮弘樹、枡富龍一、岡本 徹:GaAs 劈開表面における空間反転対称性の破れた 2次元超伝導、第4回低温センター研究交流会(東 京大学小柴ホール)2013年3月7日.
- [15] 関原貴之、三宅貴大、一ノ宮弘樹、枡富龍一、岡本 徹:GaAs 劈開表面における空間反転対称性の破れた 2 次元超伝導、日本物理学会第68会年次大会(広 島大学)2013年3月26日-29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、量子凝縮相の探 求に取り組んでいる。特に、基底状態の特徴を反映 して低エネルギー、テラヘルツ周波数帯に発現する 素励起(マグノン、励起子内部遷移、プラズモン、準 粒子ギャップ、集団モード)に着目し、それをプロー ブとして、広範な物質群を対象に基底状態における 電子相関や多電子系の相転移ダイナミクスを調べる ことを主なテーマとしている。光による物質相制御 の観点から、光励起によって生じる超高速の相転移 現象や、光励起によってのみ発現する、温度や磁場、 圧力といった静的な外場では到達しえない非平衡状 態の研究を行っている。このために、可視光領域か ら低エネルギー、テラヘルツ (THz) 周波数帯にわた る広い光子エネルギー範囲での先端分光技術の開拓 を並行して進めている。本年度は、以下に挙げる研 究を進めた。

4.6.1 半導体高密度電子正孔系

励起子モット転移

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、温度に依存して励起子ガス、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。密度の増加に伴う励起子気体から電子正孔プ ラズマへの移行は、励起子モット転移(正確にはクロ スオーバー)と呼ばれ、電子正孔系の絶縁体金属転移 として長い研究の歴史を持つ。低密度領域ではワニ エ方程式に基づく励起子気体描像、高密度領域の電 子正孔プラズマ相は平均場近似がよく成り立ち、実 験、理論ともによく理解されている。しかし、励起 子モット転移濃度近傍の中間密度領域では、電子相 関の効果を摂動で扱うことは理論的には困難であり、 実験的にも励起子がどのように遮蔽されて金属相に 至るのかは明らかになっていなかった。この問題の 重要性は、ごく最近になって、励起子ボース-アイン シュタイン凝縮 (BEC) から電子正孔 BCS 状態(励 起子絶縁体とも呼ばれる)へのクロスオーバーの観 点から再認識されつつある。我々はこの問題に、テ ラヘルツ分光法という新たな手法で挑んできた。多 くの半導体では、励起子の 1s-2p 準位間遷移のエネ ルギーや、励起子モット転移密度でのプラズマ周波 数がテレヘルツ帯にあることから、この周波数帯の 誘電関数測定から、励起子密度や自由キャリア密度、 励起子遮蔽の様子を定量的に調べることができるか らである。これまで、モデル半導体として Si に注目 し、励起子相関がモット密度を越えても残存するこ とを明らかにした。本年度は、励起子モット転移に 関するより定量的、系統的な測定を進めた。その結 果、クーロン遮蔽に寄与する縦波誘電率関数に、プ ラズモンのピークに加えて励起子内部遷移に付随す るピークが存在し、それがモット密度を越えても残 ることを明らかにした。このことは、従来のクーロ ン遮蔽の議論で用いられる単一プラズモンポール近 似が適当ではないことを示している。また、励起子 のイオン化率を定量的に決定することに成功し、イ オン化率を指標として電子正孔系の相図を決定する ことに成功した (図 4.6.21)。

これらの特徴が励起子モット転移の普遍的な物理 であることを示すためには、様々な物質における励 起子相関を定量的に測定・議論する必要がある。そ こで、Siとは背景誘電率やバンド縮重度のことなる Ge の電子正孔系に対してテラヘルツ分光を行った。 励起光にはGeのギャップエネルギーに適した波長の 光を用いる必要があったため、光パラメトリック増 幅器を整備し、近赤外から中赤外領域の波長をポン プ光とする、光ポンプテラヘルツプローブ分光系を 構築した. バルク Ge の電子正孔系で、各温度・各密 度におけるテラヘルツ帯の複素誘電率を系統的に測 定し、得られたスペクトルに対してドルーデ-ローレ ンツモデルによるフィッティングを行うことで、電子 正孔プラズマと励起子の寄与を成分分解し、励起子 イオン化率を決定した。その結果、低密度領域で質 量作用効果(エントロピー効果)による励起子の不 安定化 (イオン化)、高密度領域でモット転移 (クロ スオーバー)に対応するイオン化率の増大が観測さ れた。いずれの密度領域においても、励起子共鳴エ ネルギー (1s-2p 内部遷移) はほとんど変化せず、さ らにモット転移密度以上でも励起子が残存するこ · L がわかった。以上の結果はSi でも確認され、励起子 の遮蔽効果に対する頑強さは、少なくとも間接遷移 型半導体の準熱平衡状態では普遍的な性質であると 考えられる。

低温強磁場高圧下光ポンプ・テラヘルツプローブ分 光法の開発

低密度領域で近似的にボース粒子とみなせる励起 子は、低温下で励起子 BEC を起こすことが期待さ れている。一方、励起子が高密度になると、上述し たように励起子モット転移によって励起子は構成粒 子である電子と正孔に解離し、電子正孔プラズマへ と移行する。この金属相領域で電子正孔系を十分低 温にすると、励起子絶縁体、或いは電子正孔 BCS 状 態と呼ばれる量子凝縮相が発現することも平均場理 論の範囲では示されているが、実際に半導体電子正 孔系で電子正孔 BCS 状態が安定に存在するかどうか は未解明の問題である。この低温量子凝縮相の実現 を目指して研究を進めている。

準熱平衡状態下で高密度に光励起された電子正孔 系を調べるために、電子正孔対が長い寿命を持つこ とが重要である。この観点から、間接遷移型半導体 Si, Ge を調べている。間接遷移型半導体の問題点は、 伝導帯及び価電子帯の縮重が大きく、縮重がない場 合に比べ同じ電子密度では電子系全体の運動エネル ギーが低下し、相対的に電子正孔液滴の形成を安定 化させる多体の交換相関クーロンエネルギーが優勢 となる。このため間接遷移型半導体の高密度電子正 孔系では、低温になると電子正孔液滴が自発的に形 成されてしまうが、これは量子凝縮相発現にとって



図 4.6.21: Si の光励起電子正孔系における励起子イ オン化率(α)を指標とする温度-密度相図。点線はイ オン化率の等高線。右下の鎖線はデバイ-ヒュッケル 遮蔽から予測される励起子モット転移密度。実線は 乱雑位相近似(RPA)により求まる励起子モット転移 密度。RPAによるモット密度の前後で、イオン化率 が上昇していることがわかるが、その高密度側にイ オン化率が1にはならない領域があり、金属領域で 励起子が存在する様子を表している。

の阻害要因となる。この電子正孔液滴形成を抑制す るために、結晶に一軸性圧力を印加し、バンド縮重 を解消することを試みた。試行錯誤の末、光ポンプ テラヘルツプローブ分光が可能な圧力アンビルセル の開発に成功した。そこで、実際に電子正孔液滴の 形成が抑制されるかどうかを、Si、Ge に対して調べ た。電子正孔液滴の臨界温度は Si が 24 K、Ge が 6 K である。実験は臨界温度より十分低い 1.6 K で 行い、一軸性圧力印加により確かに電子正孔液滴が 抑制することに成功した。Siの場合、大気圧下では 34meVに現れる電子正孔液滴の表面プラズモン共鳴 (SPR)の低エネルギーシフトが観測されたが、これ は電子正孔液滴内部の密度が下がったことを意味し ており、電子正孔液滴の安定化エネルギーが小さく なったことを直接的に示す。その結果、励起子 1S-2P 遷移のピークが低温でも電子正孔液滴に吸収されず に残存することが観測された。Ge の場合は、大気圧 下で 9meV に現れる電子正孔液滴の SPR が観測で きない程度に消失し、励起子を低温かつ高密度に維 持することに成功した。さらに、磁場印加によりス ピン縮重度を解消し、BEC の転移温度の上昇を図る

ため、圧力下の Ge の励起子に対して、磁場効果を 検証した。励起子の束縛エネルギー (4.2 meV) に比 べて、2 T 以上では伝導電子のランダウレベル間の 間隔が大きくなり、自由キャリアのサイクロトロン 運動に電子と正孔のクーロン相互作用が摂動的に加 わった磁気励起子が形成される。磁気励起子内部遷 移と自由キャリアのサイクロトロン共鳴のどちらも テラヘルツ帯にあるため、一軸性圧力下、強磁場下、 高密度光励起下での複素誘電率スペクトル計測から、 圧力磁場下におけれう自由キャリアおよび励起子の 固有エネルギー、密度等の基礎評価を進めた。

4.6.2 有機導体

擬二次元有機導体 θ-(BEDT-TTF)₂CsZn(SCN)₄ のテラヘルツ分光と光・テラヘルツ波誘起相転移の 研究を進めた。この系は、BEDT-TTF 分子2個あ たり1個の正孔が存在するいわゆる1/4フィリング の系である。さらに、二次元三角格子を組んだ ET 分子の、三角形の一つの頂点と残りの二つの頂点の 間の分子間隣接クーロン相互作用がほぼ等しく、電 荷フラストレーションが生じる。このため、1/4フィ リングで通常生じる電荷整列の長距離秩序が発達し ない系として知られ、巨大な非線形伝導現象が観測 されている。このような場合に、光キャリアドーピ ングによって基底状態がどのように変化するのかを 調べることを目的に、基底状態のテラヘルツ分光に よる光学伝導度計測、光誘起電荷秩序融解実験を進 めた。脆く割れやすい薄片状試料の取扱いに苦労し ながらも、初めて電荷秩序ギャップエネルギー近傍 の光学伝導素、誘電率スペクトルを室温から液体へ リウム温度まで決定することに初めて成功した。低 温、電荷秩序相では 3meV 程度の光学伝導度ギャッ プが開いていること、高温金属相での誘電応答から にはドルーデ応答が現れず、不良金属とみなせるこ とを分光学的手法により明らかにした。さらに、低 温相では、光励起により高速に電荷秩序が融解し、3 ps 程度で回復する様子も明らかになった。また、強 いテラヘルツ波により格子を動的に変調し、超伝導 ペアリング相互作用を人為的に制御することを目指 し、11.5 K で超伝導を発現する 擬二次元有機導体 κ-BEDT-TTF₂Cu[N(CN)₂]Br の基礎光学物性計測 を進めた。

4.6.3 2次元時間領域テラヘルツ分光法の開発と超伝導体の超高速光制御

近年非常に強いテラヘルツパルスの発生技術が著 しく進展し、非摂動論領域での光と物質の相互作用 の研究が精力的に進められている。我々はこれまで、 高強度テラヘルツパルス光源の開発に世界に先駆け て成功し、これを用いたテラヘルツ波による物質相 制御の研究を行ってきた。本年度は、種々の物質系で 非線形応答が顕在化する電場強度領域での2次元時 間領域テラヘルツ分光法の開発を進めた。同手法を BCS 超伝導体 NbN に対して適用し、テラヘルツ波



図 4.6.22: 超伝導 NbN において、テラヘルツパルス による瞬時クーパー対破壊によって、超高速に超伝 導一常伝導転移が起きる様子。(a)2 次元テラヘルツ 時間領域分光による、透過テラヘルツ電磁波の位相 一振幅マッピング。縦軸はポンプパルスに対するプ ローブパルスの遅延時間。横軸は、プローブパルス の電場波形を計測する際のサンプリング時間。(b)(a) から求めた、光学伝導度スペクトルの時間発展。ポ ンプパルス照射直後に、BCS ギャップ周波数以下の スペクトル重みが1ピコ秒程度で増加し、超伝導一 常伝導転移が生じる様子を示している。

パルス励起による超伝導-常伝導転移現象を調べた。 図 4.6.22 は通常の時間領域テラヘルツ分光にもう1 つのポンププローブ遅延時間軸を加え、2次元の時 間領域において透過テラヘルツ電磁場の変化を調べ たものである。図はこの時間波形からフーリエ変換 して得られた、光学伝導度スペクトルの時間変化で ある。励起直後に、超伝導ギャップ周波数以下にス ペクトル重みが発生していることがわかる。詳細な 解析から、超伝導相に対して高強度テラヘルツパル スを照射することで、テラヘルツパルスのモノサイ クル時間 (~2 ps) 以内に準安定な非平衡 BCS 状態 が生じることが分かった。これは BCS ギャップを共 鳴的に励起することで、余剰エネルギーを格子系に 与えることなく高密度の準粒子を直接生成したため であると考えられる。これまでに非断熱的な摂動を 加えられた BCS 状態の超高速応答について盛んに理 論研究が進められてきたが、本研究ではテラヘルツ 波によってそれを初めて実現することが可能となっ た。現在は非断熱的励起条件下で生じると予測され ているオーダーパラメーター振動 (ヒッグスモード) や、それを利用したテラヘルツ波によるオーダーパ ラメーターのコヒーレント制御に向けた研究を進め ている。

4.6.4 グラフェンにおける光学量子ホール 効果

グラフェンは炭素原子が蜂の巣格子状に結合した 物質である。グラフェン中の電子は、運動エネルギー が運動量に比例するという特異な性質を持ち、電子

はあたかも質量がゼロであるかのように振る舞う。 のため、グラフェン中の電子を記述する量子力学は、 通常のシュレディンガー方程式ではなく相対論を考 慮したディラック方程式に従う。このことからグラ フェン中の電子はディラック電子と呼ばれ、様々な 特異な現象が現れる。グラフェン中の電子は後方散 乱が禁止され移動度が極めて高くなることから、高 速で動くトランジスタへの応用など、シリコンを凌 駕する次世代の電子素子材料の有力候補として期待 されている。グラフェンが示す興味深い物理現象の 一つに量子ホール効果がある。グラフェンでは、ディ ラック点に付随するベリー位相(π)の存在によって、 半整数の量子ホール効果が現れ、また大きなランタ ウ準位間隔によって、低い磁場や室温でも量子ホール 効果が観測される。近年、グラフェンでこの量子ホー ル効果が光の領域でも生じることが森本らによって 理論的に予測され(T. Morimoto, et al., Phys. Rev. Lett.103, 116803 (2009))、その実証が待たれてい 我々は、SiC 基板上に成長した高均一大面積 た。 のグラフェン (NTT 基礎研日比野浩樹博士、田邉真 一博士による)を用いて、すでに開発を行っていた 高感度テラヘルツ波偏光分光法により、光学領域の ホール効果に相当するファラデー効果を高精度で測 定することに成功した。炭素原子一層のグラフェン でもファラデー効果が観測されたが、磁場を増加さ せると、微細構造定数を単位として階段状に飛び飛 びの値をとることが初めて示された(図 4.6.23)。さ らに、実験結果を、厳密対角化と呼ばれる理論手法 による計算結果(東京大学青木秀夫教授、理研森本 高裕博士による)と比較したところ、階段構造の振 る舞いなどが実験と理論とでよく一致し、観測され た現象が光学量子ホール効果と呼ぶべきものである ことを確認した。半導体の界面の二次元電子系にお ける光学量子ホール効果は当グループにより観測さ れていたが (Y. Ikebe, et al., Phys. Rev. Lett.104, 256802, (2010))、今回はグラフェンでの観測に成功 した。回転角はテラヘルツ波の周波数にほとんど依 存せず、物理定数の値で決まるため、本成果は、ク ラフェンがテラヘルツ波の偏光を超高精度で制御す るアクロマティックな偏光素子に利用できる可能性 を示している。階段構造における回転角の値はディ ラック電子の特徴である半整数量子ホール効果と一 致し、ディラック電子由来の大きなランダウレベル 間隔を反映して、半導体二次元電子系と比較して光 学量子ホール効果が発現する磁場も低いことが確か められた。

4.6.5 時間分解テラヘルツ近接場顕微鏡の 開発

テラヘルツ波を用いた顕微観察は固体物理に限ら ず様々な分野での応用が考えられその需要は大変高 い。しかし、回折限界により制限される空間分解能 が波長と同程度となることを考えると、波長の長い テラヘルツ波は(1 THz = 4 meV = 300 μm)、顕微 観察には通常不向きである。この問題を克服し、相 転移現象における素励起のイメージング、種々の物



図 4.6.23: (上) グラフェンで、量子ホール効果によっ て生じるファラデー回転の模式図。わずか一層の炭素 原子によって光の偏光面が回転する。(下)磁場を増 加させたときに、回転角に現れるプラトー構造。この とき、回転角は微細構造定数を単位とする値をとる (光学量子ホール効果)。実線は厳密対角化計算によ る理論曲線(青木秀夫教授、森本高裕博士による)。

質における光励起過程の時空間ダイナミクスを計測 するために、近接場イメージング法による高空間分 解能測定とポンププローブ分光による時間分解測定 を組み合わせた時間分解テラヘルツ近接場顕微鏡の 開発を行った。近接場顕微鏡の開発では、テラヘル ツ波の回折限界を大きく超える、20µm(波長の1/15) の空間構造を観察することに成功した。現在、さら なる空間分解能の向上と、ポンププローブ分光と組 み合わせた時間分解顕微測定のための装置の開発を 進めている。

<報文>

(原著論文)

- R. Matsunaga and R. Shimano: Nonequilibrium BCS state dynamics induced by intense terahertz pulses in a superconducting NbN film, Phys. Rev. Lett. 109, 187002 (2012).
- [2] T. Suzuki and R. Shimano: Exciton Mott transition in Si revealed by terahertz spectroscopy, Phys. Rev. Lett. **109**, 046402 (2012).

- [3] S. Bordacs, I. Kezsmarki, D. Szaller, L. Demko,
- N. Kida, H. Murakawa, Y. Onose, R. Shimano, T. Room, U. Nagel, S. Miyahara, N. Furukawa, and Y. Tokura: Y. Taguchi, T. Arima, and Y. Tokura: Chirality of matter shows up via spin excitations, Nature Physics 8, 734 (2012).
- [4] Ryo Shimano, Shinichi Watanabe, and Ryusuke Matsunaga: Intense terahertz pulse-induced nonlinear responses in carbon nanotubes, Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves 33, 861 (2012). (invited paper).
- [5] R. Shimano, G. Yumoto, J. Y. Yoo, R. Matsunaga, S. Tanabe, H. Hibino, T. Morimoto, and H. Aokiv: Quantum Faraday and Kerr rotations in graphene, to be published in Nature Communications.

(学位論文)

- [6] 鈴木剛:「テラヘルツ分光法による励起子モット転移 の研究」(博士論文)
- [7] 関ロ文哉:「テラヘルツ分光法による Ge における励 起子モット転移の研究」(修士論文)
- [8] 山崎貴弘: 「電荷秩序絶縁体 θ-(BEDT-TTF)₂CsZn(SCN)₄ のテラヘルツ分光」(修士 論文)

<学術講演>

(国際会議)

- 一般講演
- [9] Ryusuke Matsunaga and Ryo Shimano:Intense Terahertz Pulse-Induced Nonequilibrium BCS State in Superconducting NbN, CLEO:2012 QELS-Fundamental Science (San Jose, USA) San Jose, USA, May 7, 2012.
- [10] Takeshi Suzuki and Ryo Shimano: Evidence of non-vanishing excitonic correlation near the exciton Mott transition in Si revealed by THz time domain spectroscopy, CLEO:2012 QELS-Fundamental Science, San Jose, USA, May 7, 2012.
- [11] Ryusuke Matsunaga and Ryo Shimano:Intense terahertz pulse-induced breaking of BCS superconducting phase in NbN, Low Energy Electrodynamics in Solids (LEES), Napa, Calfornia, July 25, 2012.
- [12] Ryusuke Matsunaga and Ryo Shimano:Two-Dimensional Terahertz Time-Domain Spectroscopy in a Superconducting NbN, International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT) 2012, Todaiji Culture Center, Nara, Japan, Nov.29, 2012.
- [13] F. Sekiguchi, J.Y. Yoo, T. Suzuki, and R. Shimano: Time-resolved observation of photo-excited carriers, exctions, and electron-hole droplet in Ge by terahertz time-domain spectroscopy, International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT) 2012, Todaiji Culture Center, Nara, JAPAN, Nov.29, 2012.

- [14] Jeyoon Yoo, Takeshi Suzuki, Ryo Shimano: Study of photoexcited carriers in Si from picoseconds to milliseconds by terahertz time-domain spectroscopy, International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT) 2012, Todaiji Culture Center, Nara, JAPAN, Nov.29, 2012.
- [15] Ryusuke Matsunaga and Ryo Shimano:Terahertz pulse-induced superconducting-to-normal phase transition in NbN, Yonsei-Todai Workshop, Tokyo, Japan, Feb. 19, 2013.
- [16] J. Y. Yoo, H. Sekiguchi, and R. Shimano: THz spectroscopy of photoexcited e-h system in Ge under the uniaxial stress and strong magnetic field, Yonsei-Todai Workshop, Tokyo, Japan, Feb. 19, 2013.

招待講演

- [17] Ryo Shimano: Terahertz magneto-optics of the integer quantum Hall effect in a GaAs twodimensional electron gas system, The 20th International Conference on "High Magnetic Fields in Semiconductor Physics", HMF-20, Chamonix Mont-Blanc, France, July 23, 2012.
- [18] Ryo Shimano: Exciton Mott transition revealed by Terahertz spectroscopy, 2012 DYCE International Workshop, Kussharo Prince Hotel, Hokkaido, Japan, Aug. 7, 2012.

(国内会議)

一般講演

•2012年日本物理学会秋季大会 (2012年9月17-21日 横浜国立大学)

- [19] 田久保直子,須田理行,山本浩史,加藤礼
 三,井尻吉洋,矢田祐之,岡本博,島野亮:
 κ-(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]X (X=Br, Cl)におけるテラヘルツ時間領域分光
- [20] 井尻吉洋, 矢田祐之, 岡本博, 山本浩史, 田久保直子, 加藤礼三, 島野亮: 可視ポンプ-THz プローブ分光に よる κ型 BEDT-TTF 塩の光誘起相転移の研究
- [21] 松永隆佑,島野亮:2次元テラヘルツ時間領域分光法 による超伝導-常伝導相転移の超高速ダイナミクス
- [22] 関ロ文哉,鈴木剛,島野亮:近赤外光ポンプ-テラヘル ツプローブ分光法による Ge の励起子内部遷移の観測
- [23] 柳済允, 鈴木剛, 島野亮: 高圧低温強磁場下における Siの高密度電子正孔系の光ポンプテラヘルツプロー ブ分光

日本物理学会第68回年次大会(2013年3月26-29日、広島大学)

[24] 湯本郷,柳済允,松永隆佑,田邉真一,日比野浩樹, 森本高裕,青木秀夫,島野亮: SiC 上エピタキシャル グラフェンの量子テラヘルツファラデー回転・カー 回転

- [25] 井尻吉洋,秦大樹,矢田祐之,内田隆介,松井裕太, 宮本辰也,須田理行,山本浩史,田久保直子,加藤礼 三,島野亮,岡本博:近赤外ポンプ-THzプローブ分 光による κ型 BEDT-TTF 塩の光誘起相転移の研究
- [26] 山崎貴弘,松永隆佑,谷口弘三,島野亮:θ-(BEDT-TTF)₂CsZn(SCN)₄のテラヘルツ分光
- [27] 鈴木剛, 島野亮: テラヘルツ分光法による Si におけ る励起子モットクロスオーバーの観測と相図の決定

●その他

- [28] 島野亮:テラヘルツ時間領域分光法による励起子モット転移の研究,科学研究費補助金・新学術領域研究「動的相関光科学」第7回シンポジウム,東京大学浅野キャンパス 武田先端知ビル 2012 年 12 月 27 日
- [29] 松永隆佑、島野亮:高強度テラヘルツ波パルスによる BCS 超伝導状態の超高速制御の研究,第5回 文部科 学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研 究拠点プログラム」シンポジウム科学未来館、東京、 2013年1月11日
- [30] 島野亮: 擬二次元有機導体 θ-(BEDT-TTF)₂CsZn(SCN)₄のテラヘルツ分光,科学研 究費補助金・新学術領域研究「分子自由度が拓く新 物質科学」第7回領域会議東京大学、2013年3月1 日
- [31] 湯本郷: グラフェンにおける量子ファラデー効果・量 子カー効果,第3回低温センター研究交流会・利用者 懇談会,東京大学,2013年3月4日

招待講演

- [32] 島野亮:強相関電子系のテラヘルツ分光~電荷・スピンの集団応答と新規光・テラヘルツ機能~、日本学術振興会「テラヘルツ波科学技術と産業開拓第182委員会」、京都大学 東京オフィス、2012年4月19日
- [33] 島野亮:高強度テラヘルツ波パルスによる固体の電子 相制御,日本分光学会,テラヘルツ分光法の最先端 VI ~ここまできたテラヘルツ時間領域分光~,筑波大学, 2012 年 10 月 25 日
- [34] 島野亮:高強度テラヘルツ波パルスによる固体の非線 形応答と電子相制御、レーザー学会学術講演会第33 回年次大会,姫路商工会議所2013年1月28日
- (セミナー)
- [35] 島野 亮: テラヘルツ電磁波を用いた物性研究-半導体 から強相関電子系まで-,物性若手夏の学校 集中ゼ ミ,岐阜県長良川温泉,2012 年 8 月 8 日

4.7 高木-谷口研究室

固体中の電子多体系が示す新奇な量子電子相の探 索と相形成のメカニズム解明の研究を推進している。 遷移金属酸化物中の伝導や磁性を支配するのは遷移 金属元素のd軌道を占めていた電子である。d軌道 の空間拡がりが小さいが故、電子はクーロン相互作 用により強く相関する。相関電子は、その相互作用 を通じて電子液体・電子液晶と呼ばれる相を形成す る。相関電子では電荷、スピン、軌道(縮退する軌道 のどれを選ぶか)の自由度がしばしば独立に振る舞 うがゆえに、電荷液晶状態、スピン液体状態と言っ た多彩な状態が出現する。高温超伝導現象も相関電 子が示す多彩な顔の一つであり、電子相の融解や相 競合が、超伝導発現の本質であるとされている。

4.7.1 超伝導機構の解明と開拓

新奇な超伝導体の開拓と高温超伝導機構解明の 研究を推進している。これまで銅酸化物超伝導にお いて、高温超伝導が発現する直前に現れる擬ギャップ 相の概念の確立、擬ギャップ相の背景に隠れた電子結 晶状態の発見などに、当研究室は貢献してきた。こ こから超伝導機構に切り込むべく、新しいアプロー チを模索している。これらの研究と並行して新奇な 超伝導体の設計と探索に尽力している。

三元系白金リン化物における新規超伝導

近年、鉄プニクタイド系における高温超伝導体 の発見に触発され、新規超伝導体の探索が盛んに行 われてきている。これに関連して、我々のグループ では三元系白金リン化物において新規超伝導体を発 見した [5]。

超伝導発現に関しては、銅酸化物や鉄プニクタイ ド系に代表されるように、磁気秩序相近傍にあるこ とが、一つの重要な因子であると考えられている。そ の一方、近年の MgB₂ やダイヤモンドにおける超伝 導の発見に伴い、強い電子-フォノン結合を有する 系も新規超伝導体の探索指針として見直されてきて いる。本研究では、アンチペロフスカイト構造をと る $APt_{3}P$ (A = Sr, Ca, La) (図 4.7.24) が超伝導 転移を示し、このうち最も高い転移温度 ($T_C = 8.4$ K)を有する SrPt₃P が、強結合 s 波超伝導体である ことを見出した。

図 4.7.25(b) に SrPt₃P の電子比熱の解析結果を示 す。これを見ると分かるように、電子比熱の温度依 存性において、弱結合極限の BCS モデルからのずれ が観測された。この際、電子-フォノン結合の強さ を表す、超伝導ギャップ Δ_0 と転移温度 T_C の比から なるパラメータは、 $2\Delta_0/k_BT_C \sim 5$ という値を示し た。弱結合極限の BCS モデルでの値 3.52 と比べ観 測された値は大きく、SrPt₃P が強結合超伝導体であ ることを示している。また、ホール抵抗の測定から、 複数のフェルミ面のポケットの存在が示唆されてお り、"low-lying"フォノンとの結合が、SrPt₃P で観測 されたような強結合超伝導実現の鍵になっているの ではないかと考えている。



図 4.7.24: APt₃P のとるアンチペロフスカイト構造



図 4.7.25: SrPt₃Pの (a) 抵抗率,(b) 電子比熱の BCS モデルとの比較

銅酸化物超伝導体における擬ギャップ状態発達過程 の可視化

銅酸化物高温超伝導体では、モット絶縁体がホー ルドーピングにより壊され、超伝導相が発現するこ とが知られている。この超伝導相が出現するホール ドーピング過程では、擬ギャップ状態と呼ばれる、弱 い伝導性を持ち異方的ギャップを有する電子状態が 現れる。本研究では、Ca_{2-x}Na_xCuO₂Cl₂において、 擬ギャップ状態を経て超伝導相へと至る過程を原子ス ケールで可視化することに成功した [2] (図 4.7.26)。 この観察を通して、母体の4回対称を破るように局 在化した、ナノスケールのホールクラスターの出現 を見出した。



図 4.7.26: ホールドーピングに伴う擬ギャップ状態の 発達過程

4.7.2 スピン軌道相互作用誘起の新奇電子 相の開拓

遷移金属酸化物における電子相探索の舞台は、 これまで最も電子相関の強い3d遷移元素からなる 複合酸化物であった。重い5d遷移金属元素を含む酸 化物は軌道の空間的な広がりが大きいために、相関 効果が弱くモット絶縁体(電子固体)状態は生じな いとされてきた。ところが最近、5dIr遷移金属酸化 物でもモット絶縁体状態になる例が次々と見つかり、 大きな謎が投げかけられて来ている。我々はIr複合 酸化物に代表される重い5d遷移金属酸化物を舞台と し、極めて強いスピン軌道相互作用のもとでの電子 相関物理を、スピン軌道半金属 - モット絶縁体転移 の微視的機構の理解を通じて明らかにすることに取 り組んでいる。

スピン軌道モット絶縁体 Sr_2IrO_4 の常磁性相におけ る磁気的ダイナミクス

近年、 $J_{eff} = 1/2 \text{ o} \text{A} \mathcal{C}^{\vee}$ 軌道モット絶縁体と して注目を集めているものに、5d 電子系 $\operatorname{Sr_2IrO_4}$ が ある。最近この系に関して、ACV軌道相互作用の 強い極限で、単純なS = 1/2の二次元量子ハイゼン ベルグモデルで記述出来る可能性があるという、興 味深い提案がなされてきた。一方、強い磁気異方性 が有効ハミルトニアンに入ってくる可能性も考えら れる為、実際の磁気相関がどのようになるべきかは 明らかではなかった。そこで本研究では、 $\operatorname{Sr_2IrO_4}$ の 常磁性相における磁気相関に関して、共鳴 X 線磁気 散乱を用いて知見を得た [6]。図 4.7.27 は層状構造を 持つ $\operatorname{Sr_2IrO_4}$ の面内と面間方向の磁気相関長の温度 依存性を表している。面間方向の磁気相関長の温度 依存性を表している。面間方向の磁気相関長(ξ_c)は 反強磁性転移温度(T_N)以上で急速に減少するのに 対し、面内の磁気相関長(ξ_a)は100格子間隔分に相 当する長い相関長を転移温度以上でも保っているこ とが観測された。これは IrO_2 面内において二次元の 反強磁性的な揺らぎがあることを示唆しており、観 測された相関長の温度依存性は、理論グループによ り提案されている二次元S = 1/2の量子ハイゼンベ ルグモデルで説明出来ることが明らかになった。



図 4.7.27: Sr₂IrO₄の常磁性相における磁気相関長の 温度依存性

$Sr_3Ir_2O_7$ における $J_{eff} = 1/2$ バンド弱強磁性

 $Sr_3Ir_2O_7$ は、ペロフスカイト構造を基本とした Ruddlesden-Popper 構造 $(Sr_{n+1}Ir_nO_{3n+1})$ で捉え るとn = 2の場合に相当し、 $J_{eff} = 1/2$ のスピン軌 道モット絶縁体の Sr_2IrO_4 (n = 1) とバンド半金属 であると指摘されている $SrIrO_3$ ($n = \infty$) の中間に 位置する興味深い系である。本研究では、共鳴 X 線 散乱を通して $Sr_3Ir_2O_7$ の磁気構造に関しての知見を 得た [11]。測定の結果、 Sr_2IrO_4 と同じく $J_{eff} = 1/2$ の電子状態は維持されているが、磁気モーメントの 大きさは Sr_2IrO_4 の 1/5 から 1/6 程度の小さな値に なっていることが分かった。この結果は、 $Sr_3Ir_2O_7$ の電子状態がスピン軌道モット絶縁体というよりは、 バンド磁性体とみなすべきものになっていることを 示唆している。

4.7.3 イオン-電子複合物性の開拓

イオンと電子の両方が密接に関与する複合物性 の開拓に取り組んでいる。具体的には、物質へのイ オンのインターカレーションに伴う物性変化や、イ オン伝導体と電子伝導体間に形成される電気二重層 界面の状態など、これまでほぼイオンの側面からの み研究されてきた対象を、電子物性の観点から捉え 直し、理解することを目指している。

電気二重層電界効果トランジスタを用いたキャリア 誘起超伝導

高温超伝導を示す銅酸化物の電子相図に見られ るように、キャリア量は電子相制御の一つの重要な パラメータとなっている。従来、キャリア量の制御は 化学的な元素置換により行われてきたが、近年、電界 効果トランジスタ(FET)を用いてキャリアドーピ ングを行う手法に注目が集まっている。FET を用い た場合、元素置換を伴わない為、乱れを導入すること なくキャリアドーピングを行うことが可能であると いう利点がある。但し、ゲート絶縁層に酸化物などを 用いた従来の FET ではドーピング出来るキャリア量 が少なく、限られたキャリア密度の範囲内でしか電 子物性制御を行うことが出来なかった。しかし最近、 電解液などのイオン導電性を持つ液体をゲート絶縁 層に用いた場合、液体と物質の界面にナノメートル スケールのキャパシタとみなせる電気二重層が形成 され、数V程度の小さな電圧でも電子相転移を誘起 可能であることが報告され、注目を集めている。本 研究では、イオン液体を用いた電気二重層 FET によ りキャリアドーピングを行い、バンド絶縁体の MoS2 において、絶縁体 - 金属転移の実現、さらに超伝導 相の誘起に成功した(図 4.7.28)。MoS₂ はアルカリ 金属のインターカレーションによるキャリアドープ を通して、バルクでの超伝導発現が報告されている 物質である。今回我々は、最高で $T_C = 9.4 \text{ K}$ とい う、バルクで報告されているよりも高い超伝導転移 温度を観測した。これに関しては、FET により系に 乱れを導入せずにキャリアドーピングが行われたこ とで、バルクとは異なった電子状態が実現されてい るのではないかと推測している [7]。



図 4.7.28: MoS₂ における電気二重層 FET を用いた キャリア誘起超伝導

<報文>

(原著論文)

- Y. Wakisaka, T. Sudayama, K. Takubo, T. Mizokawa, N. L. Saini, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, N. Katayama, M. Nohara, H. Takagi: Photoemission Spectroscopy of Ta₂NiSe₅, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism 25, 1231 (2012).
- [2] Y. Kohsaka, T. Hanaguri, M. Azuma, M. Takano, J. C. Davis, H. Takagi: Visualization of the emergence of the pseudogap state and the evolution to superconductivity in a lightly hole-doped Mott insulator, Nature Physics 8,534 (2012).
- [3] M. Fatih Cetin, P. Lemmens, V. Gnezdilov, D. Wulferding, D. Menzel, T. Takayama, K. Ohashi, H. Takagi: Crossover from coherent to incoherent scattering in spin-orbit dominated Sr₂IrO₄, Physical Review B 85, 195148 (2012).
- [4] T. Hanaguri, K. Kitagawa, K. Matsubayashi, Y. Mazaki, Y. Uwatoko, H. Takagi: Scanning tunneling microscopy/spectroscopy of vortices in LiFeAs, Physical Review B 85, 214505 (2012).
- [5] T. Takayama, K. Kuwano, D. Hirai, Y. Katsura, A. Yamamoto, H. Takagi: Strong Coupling Superconductivity at 8.4 K in an Antiperovskite Phosphide SrPt₃P, Physical Review Letters **108**, 237001(2012).
- [6] S. Fujiyama, H. Ohsumi, T. Komesu, J. Matsuno, B.J. Kim, M. Takata, T. Arima, H. Takagi: Two-Dimensional Heisenberg Behavior of $J_{eff} = 1/2$ Isospins in the Paramagnetic State of the Spin-Orbital Mott Insulator Sr₂IrO₄, Physical Review Letters **108**, 247212 (2012).
- [7] K. Taniguchi, A.Matsumoto, H. Shimotani, H. Takagi: Electric-Field-Induced Superconductivity at 9.4 K in a layered transition metal disulphide MoS₂, Applied Physics Letters **101**, 042603 (2012).
- [8] Y. Nii, N. Abe, K. Taniguchi, T. Arima: Magnetic shape memory effect in orbital-spin-coupled system MnV₂O₄ Applied Physics Letters **100**, 051905 (2012).
- [9] Y. Shimizu, H. Takeda. M. Tanaka, M. Itoh, S. Niitaka, H. Takagi: An orbital-selective spin liquid in a frustrated heavy fermion spinel LiV₂O₄, Nature Communications **3**, 981 (2012).
- [10] J. Chang, N. D-Leyraud, O. C-Choiniere, G. Grissonnanche, F. Laliberte, E. Hassinger, J-Ph. Reid, R. Daou, S. Pyon, T. Takayama, H. Takagi, L. Taillefer: Decrease of upper critical field with underdoping in cuprate superconductors, Nature Physics 8,751 (2012).
- [11] S. Fujiyama, K. Ohashi, H. Ohsumi, K. Sugimoto, T. Takayama, T. Komesu, M. Takata, T. Arima, H. Takagi: Weak antiferromagnetism of $J_{eff}=1/2$ band in bilayer iridate $Sr_3Ir_2O_7$, Physical Review B **86**, 174414 (2012).

- [12] K. Okazaki, Y. Ito, Y. Ota, Y. Kotani, T. Shimojima, T. Kiss, S. Watanabe, C. -T. Chen, S. Niitaka, T. Hanaguri, H. Takagi, A. Chainani, S. Shin: Evidence for a cos(4φ) Modulation of the Superconducting Energy Gap of Optimally Doped FeTe_{0.6}Se_{0.4} Single Crystals Using Laser Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, Physical Review Letters **109**, 237011(2012).
- [13] R. Schuster, S. Pyon, M. Knupfer, M. Azuma, M. Takano, H. Takagi, B. Büchner: Angledependent spectral weight transfer and evidence of a symmetry-broken in-plane charge response in Ca_{1.9}Na_{0.1}CuO₂Cl₂, Physical Review B 86, 245112 (2012).
- [14] A. Chainani, A. Yamamoto, M. Matsunami, R. Eguchi, M. Taguchi, Y. Takata, H. Takagi, S. Shin, Y. Nishino, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa: Quantifying covalency and metallicity in correlated compounds undergoing metal-insulator transitions, Physical Review B 87, 045108 (2013).
- (学位論文)
 - 修士論文
- [15] 田代勇太:熱電変換材料の熱伝導率低減(2012年3 月、東京大学大学院新領域創成科学研究科)
- [16] 深道誉之:固体電解質をゲート絶縁膜とする電界効果 トランジスタの創成(2012年3月、東京大学大学院 新領域創成科学研究科)
- [17] 松本章代: 複合イリジウム酸化物におけるスピン軌道 相互作用物性(2012年3月、東京大学大学院新領域 創成科学研究科)
- [18] 横田泰之: SrIrO₃/SrTiO₃(111) 多層膜における電子 相制御(2012年3月、東京大学大学院新領域創成科 学研究科)
- <学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [19] T. Takayama, D. Hirai, K. Kuwano, H. Takagi: Superconductivity in 4d, 5d Pnictides, The 19th International Conference on Magnetism (Busan, Korea, July, 2012).
- [20] T. Takayama, K. Kuwano, D. Hirai, Y. Katsura, A.Yamamoto, H. Takagi: Strong Coupling Superconductivity in New Antiperovskite Phosphide SrPt₃P, M²S 2012 (Washington DC, USA, July, 2012).
- [21] Y. F. Lu, T. Takayama, A. F. Bangura, H. Takagi: Superconductivity and upper critical field beyond Pauli limit in Ta₂Pd_xS₅, Materials and Mechanism of superconductivity conference (Washington, DC, USA, July, 2012).
- [22] A. Kato, T. Takayama, H. Takagi: Kitaev-Heisenberg magnetism in honeycomb iridates A₂IrO₃(A=Li,Na), ICM 2012 (Busan, Korea, July, 2012).

- [23] A. Matsumoto, T. Takayama, H. Takagi: 2D Heisenberg antiferromagnetism in spin-orbit Mott insulator Sr₂IrO₄, ICM 2012 (Busan, Korea, July, 2012).
- [24] T. Takayama: Superconductivity and Upper Critical Field beyond Pauli Limit in Ta₂Pd_xS₅, Ringberg Workshop on Strongly Correlated Electron Systems (Schloss Ringberg, Germany, November 2012).
- [25] Y. Gu, K. Taniguchi, R. Tajima, S. Nishimura, A. Yamada, H. Takagi: Electrochemical Insertion of Lithium into a New Spinel Oxide LiRh₂O₄, GCOE International Symposium on Physical Sciences Frontier, No. 1-10, (Tokyo, Japan, December , 2012).
- [26] Y. Lu, A. Bangura, T. Takayama, H. Takagi: Violation of Pauli limit in superconducting Ta₂Pd_xS₅, The 13th JKT Symposium in Strongly Correlated Electron Systems, (Osaka, Japan, January, 2013).
- [27] H. Oki, H. Takagi: A New Anode Material for High-performance Energy Device, Innovation of storage device by Interdisciplinary Synergy, (Tokyo, Japan, anuary, 2013).
- 招待講演
- [28] H. Takagi: Emergent Phases of Correlated Electrons in Transition Metal Oxides, Joint Colloquium National Tawain University, (Taipei, Taiwan, April, 2012).
- [29] H. Takagi: YBCO, spin gap, pseudo-gap and Nano-stripe as a hidden order - progress in 25 years, mini-symposium on "25 years after YBCO, what has it done for science and society?", (Hua Lieng, Taiwan, April, 2012).
- [30] H. Takagi: Emergent phases of correlated electrons in transition metal oxides (Colloquium), International Workshop on Itinerant Spin-Orbital Systems: From Magnetic Frustration to novel Superconductivity, (Dresden, Germany, May, 2012).
- [31] T. Takayama: Novel Electronic Phases Produced by Strong Spin-orbit Coupling in Iridates, International Workshop on Itinerant Spin-Orbital Systems (Dresden, Germany, May, 2012).
- [32] H. Takagi: Electronic Phase Change and Entropic Functions in Transition Metal Oxides, Nature Conference on Frontiers in Electronic Materials, (Aachen, Germany, june, 2012).
- [33] H. Takagi: Imaging the emergence of the pseudogap state in a lightly hole-doped Mott insulator Ca_{2-x}Na_xCuO₂Cl₂, International Seminar and Workshop on Quantum Matter from the Nano- to the Macroscale, (Dresden, Germany, June, 2012).
- [34] H. Takagi: A Material Physics View on New Superconductors, Materials and Mechanisms on Superconductivity, (Washington, USA, June, 2012).

- [35] H. Takagi: An overview of quantum spin liquid: from toy of theorists to reality, Innovations in Strongly Correlated Electron Systems: School and Workshop, (Trieste, Italy August, 2012).
- [36] H. Takagi: Discovery of Superconductivity in 4d and 5d transition metal compounds, International Symposium on Physics and Chemistry of Novel Superconductors and Related Materials, (Okayama, Japan, October 2012).
- [37] H. Takagi: Materials overview, Exotic Phase of Frustrated Magnetics, (Santa Barbara, USA, October 2012).
- [38] H. Takagi: Emergent pseudo-gap phase in lightlydoped high-Tc cuprate, Discussion meeting on new functionalities in electronic and magnetic materials, (Bangalore, India, october, 2012).
- [39] T. Takayama: Novel Electronic Phases Produced by Strong Spin-orbit Coupling in 5d Ir Complex Oxides, 4th APCTP-IACS Joint Conference on Physics of Novel and Emerging Materials (Pohang, Korea, October, 2012).
- [40] H. Takagi: Electronic Phase Change and Entropic Functions in Transition Metal Oxides, Summit of Material Science (Material Science Week), (Sendai, Japan, November, 2012).

(国内会議)

一般講演

- [41] 河底秀幸,高山知弘,高木英典:擬ギャップ系物質 Ru₂Sn₃の熱電特性,第九回日本熱電学会学術講演会, 東京工業大学,2012年8月
- [42] 藤山茂樹,高木英典:三角格子 NaYIrO4 の磁性,日本物理学会 2012 年秋季大会,横浜国立大学,2012 年 9月
- [43] 山村周玄,松田太一,和達大樹,杉山武晴,池永英 司,松野丈夫,高木英典:硬X線光電子分光による SrIrO₃/SrTiO₃ 超格子薄膜の電子状態観測,日本物 理学会 2012 年秋季大会,横浜国立大学,2012 年9月
- [44] 幸坂祐生,加納学,高木英典,笹川崇男:層状 Rashba 物質 BiTeI の分光イメージング測定 (III),日本物理 学会 2012 年秋季大会,横浜国立大学,2012 年 9 月
- [45] 武田晃,清水康弘,伊藤正行,新高誠司,高木英典: NMRで見た LiV₂O₄の圧力効果,日本物理学会 2012 年秋季大会,横浜国立大学,2012 年 9 月
- [46] 新高誠司,高木英典: C14型ラーベス相 ARu₂の超 伝導特性,日本物理学会 2012 年秋季大会,横浜国立 大学,2012 年 9 月
- [47] 山崎展樹, Nic Shannon, 高木英典: 非一様な磁性体 への超伝導近接効果, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学, 2013 年 3 月
- [48] 山村周玄,松田太一,和達大樹,杉山武晴,池永英 司,藤森淳, R. Sutarto, F. He,組頭広志,松野丈 夫,高木英典: SrIrO₃/SrTiO₃ 超格子薄膜の硬 X 線 光電子分光と軟 X 線吸収分光,日本物理学会第 68 回 年次大会,広島大学,2013 年 3 月

- [49] 山本文子,竹下直,伊豫彰,高木英典,永崎洋: Hg-1223の高圧下における電気抵抗率ードーピング依存 性,日本物理学会第68回年次大会,広島大学,2013 年3月
- [50] 藤山茂樹,高木英典: NaYIrO4のNMR,日本物理学 会第68回年次大会,広島大学,2013年3月
- [51] 武田晃,清水康弘,伊藤正行,新高誠司,高木英典: LiV₂O₄の高圧 NMR 測定,日本物理学会第 68 回年 次大会,広島大学,2013 年 3 月
- [52] 金井洋貴,石田行章,近藤猛,野原実,高木英典,辛 埴:時間分解光電子分光を用いた 2H-NbSe₂ の緩和 過程の研究,日本物理学会第 68 回年次大会,広島大 学,2013 年 3 月
- [53] 幸坂祐生,加納学,高木英典,笹川崇男: BiTeI における両極性スピン分裂2次元電子ガスの分光イメージング測定,日本物理学会第68回年次大会,広島大学,2013年3月
- [54] 花栗哲郎, 卞舜生, 工藤一貴, 高木英典, 野原実: IrTe2 の STM/STS, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島 大学, 2013 年 3 月
- [55] 溝川貴司,関和弘,金子竜也,鳥山達矢,小西健久, 太田幸則,脇坂祐輝,安斎太陽,有田将司,生天目 博文,谷口雅樹,野原実,片山尚幸,高木英典:擬一 次元的励起子絶縁体 Ta₂NiSe₅ の1粒子励起スペク トル,日本物理学会第68回年次大会,広島大学,2013 年3月
- [56] A. S. Gibbs, A. Yamamoto, D. Hashizume, S. Niitaka, A. P. Mackenzie, H. Takagi: Crystal Growth and Physical Properties of the Quaternary Barium Orthotellurates Ba₂(Ni,Cu,Zn)TeO₆", 日本物理学 会第 68 回年次大会, 広島大学, 2013 年 3 月
- [57] 藤原宏平,堀場弘司,永村直佳,尾嶋正治,高木英典: ユニポーラ型抵抗変化メモリーにおける局所酸化還 元の観測,第60回応用物理学会春季学術講演会,神 奈川工科大学,2013年3月
- [58] 吉野崇史,谷口耕治,谷雲鵬,桂ゆかり,高木英典: ク ラスター化合物 MMo₉Se₁₁ (M=Li, Mg) の二次電 池正極特性,電気化学会創立 80 周年記念大会,東北 大学,2013 年 3 月

5 一般物理理論

5.1 宇宙理論研究室 (須藤・吉田)

宇宙は、微視的スケールから巨視的スケールにわたる多くの物理過程が複雑に絡まりあった物理系であり、具体的な研究テーマは多岐にわたっている。しかしそれらの共通のゴールは、宇宙の誕生から現在、さらには未来に至る進化史を物理学によって記述することである。そのためには、常に学際的かつ分野横断的な活動が本質的である。我々は、ビッグバン宇宙国際研究センターやカブリ数物連携宇宙連携機構はもちろん、国内外の他研究機関とも積極的に共同研究を実行しており、常に開かれた研究室を目指している。現在我々が行っている中心的課題は、宇宙のダークエネルギーとダークマター、太陽系外惑星、第一世代の天体形成の3つである。これらについて簡単に説明を加えておこう。

1916年のアインシュタインによる一般相対論の構築によって始まった自然科学としての宇宙論は、ハッブルによる宇宙膨張の発見(1929年)、ガモフによるビッグバン理論の提案(1946年)、宇宙マイクロ波背景放射の発見(1965年)を通じて、理論と観測の双方からの進展を受け現在の標準宇宙論に至る。多くの観測データを組合わせることで、宇宙の全エネルギー密度の3/4 がダークエネルギー、1/5 がダークマター、残りの約4 パーセントが通常の元素、という結論が得られている。これが宇宙の「標準モデル」である。しかしながら宇宙の主成分の正体が全く理解されていないという驚くべき事実は、宇宙・素粒子物理学のみならず、さらにより広く21世紀科学に対して根源的な謎を突きつけている。

最近の大型望遠鏡や宇宙望遠鏡を用いた深宇宙探 査により、130億年以上も前、つまり宇宙が誕生し てから数億年という早期に存在した銀河やブラック ホールが発見されている。ビッグバンの後文字通り 暗黒となった宇宙にいつ、どのように光り輝く天体 が生まれたのか。宇宙初期の巨大なブラックホール はどのように成長したのだろうか。第一世代の天体 はその後の銀河形成や宇宙の進化に大きな影響を及 ぼすと考えられており、現代天文学のホットトピッ クの一つである。次世代の大型望遠鏡により第一世 代天体の形成や宇宙進化の最初の段階が明らかにな ると期待されている。

第2の地球は存在するか。荒唐無稽にも聞こえか ねないこの疑問に対して、現在の天文学は確実に科 学的に迫りつつある。1995年の初発見以来、太陽系 外惑星はすでに500個以上が発見されている。その 初期に検出された系外惑星のほとんどは木星型(ガ ス)惑星だったが、2009年3月に打ち上げられたケ プラー衛星を始めとする観測手段の進歩で、地球程 度の質量を持つ惑星の発見も検出されるようになっ た。とすればそれら遠方の地球型惑星に生命の兆候 を以下にして見出すか。まさに「第2の地球は存在 するか」という問いに答える日が現実のものとなり つつある。これは、物理学のみならず、天文学、地球 惑星学、生物学などを総動員して取り組むべき、ま さに理学部横断的な研究テーマである。

我々はこのような状況を踏まえつつ、すばる望遠 鏡による広視野深宇宙探査国際共同研究を牽引し、 さらには太陽系外惑星探査の新たな地平を切り開く 研究を展開しつつある。具体的には、ダークエネル ギーの状態方程式の決定、ダークマター分布の進化 と重力レンズ統計、銀河のクラスタリング解析、ミッ シングバリオンの起源と観測的検証、ロシター効果 による主星と系外惑星の自転・公転軸のずれの検出、 地球型惑星系の反射光を用いた表面分布の再構築と バイオマーカーの検出、第一世代星やブラックホー ルの形成進化を研究しつつある。さらに既存の枠に とらわれない独創的なテーマの開拓をも目指してお り、宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測による背景 重力波の検出や、重力波観測を用いた重力理論の検 証、超並列計算機を用いたボルツマンシミュレーショ ンなど、次世代宇宙論を担う新たな研究テーマにも 取り組んでいる。

これらに関しては、研究室ホームページからより 詳細な情報を入手することができる。

5.1.1 観測的宇宙論

CMB の弱い重カレンズ再構築法の導出および宇宙 論への応用

観測される宇宙マイクロ波背景輻射(CMB)の揺 らぎには大規模構造による弱重力レンズ効果の情報が 含まれており、光子の軌跡の曲がり角を情報として取 り出すことで、密度揺らぎなどの重力場を生じるソー スに関して情報を得ることができる。CMBの弱い 重力レンズ効果は、Okamoto & Hu (2003)(OH03) などで示されたアルゴリズムをもとに、CMBの観 測データのみから曲がり角の情報を取り出せる。将 来的には、PolarBear や ACTPol といった角度分解 能が高い地上の CMB 観測において高精度で曲がり 角を再構築できると考えられている。

本研究では、CMB の弱い重力レンズ効果を利用 した宇宙論・物理理論における課題(宇宙加速膨張・ 初期揺らぎの生成機構・ニュートリノ質量など)の 検証を念頭に、得られた CMB マップから重力レン ズ効果を測定する手法を改良してきた。特に、今後 CMB の弱い重力レンズ効果の測定が期待される実 験を想定し、非一様検出器ノイズ、ビームの非等方 性、有限観測領域の影響を取り入れた、より現実的 な場合に応用可能な推定法の開発を行った[11,94]。 また、公開されている温度揺らぎの観測データを用 いて開発した手法を適用し、宇宙論への応用例とし て、特定の宇宙紐のモデルパラメータへの制限を行っ た[66, 67, 95, 96, 97]。

高精度理論テンプレートを用いた SDSS LRG 非 等方クラスタリングの解析

視野 10,000 平方度、赤方偏移 0.5 に渡る大規模 測光・分光サーベイである Sloan Digital Sky Survey (SDSS) により提供されている Luminous Red Galaxy (LRG) は、その広大なサーベイ体積ゆえに 大規模構造を探る上で非常に有意なサンプルである。

分光サーベイにより得られた銀河分布は赤方偏移 歪みを受けており、そのクラスタリングは非等方性 を帯びる。この非等方性の強さは構造成長と密接に 関係している。また、クラスタリングの非等方性は、 銀河の距離を測定された見込み角・赤方偏移から共 同距離に変換する際に、仮定した宇宙論パラメータ と真の宇宙論パラメータが異なることによっても引 き起こされる。したがって、分光サーベイにより得 られた銀河のクラスタリングに刻まれた非等方性を 精密に解析することで構造成長と宇宙膨張を同時に 測定すること、すなわち、重力理論の検証が可能と なる。

我々は、BAO スケールに渡り N 体シミュレーショ ンと 1% 以下の精度で一致する、高精度理論テンプ レートを用いて SDSS LRG 非等方クラスタリング の解析を行った。この解析により、構造成長と宇宙 膨張を同時に測定し、宇宙の標準模型である ΛCDM モデルとの整合を示した。[56, 99]

N 体シミュレーションを用いた Sloan Digital Sky Survey Luminous Red Galaxy 非等方クラスタ リングの再現

SDSS LRG は比較的古くに形成された楕円銀河で あると考えられており、重力束縛系(ハロー)の重 心と1対1に対応するとされてきた。しかし、近年 の弱重力レンズを用いた研究などによりハローの重 心よりもむしろハロー中のさらに局所的な重力束縛 系(サブハロー)との対応が良いことが指摘されて いる。両者の違いは特に赤方偏移歪みの効果に大き く現れる。したがって、LRG の3次元分布を解析す るにあたり、ハロー・サブハローと銀河の対応を調 べることは非常に重要である。

我々のグループでは、N体シミュレーションのハ ロー・サブハローカタログを用いて、BAOスケール での SDSS LRG クラスタリングに刻まれた非等方 性を定量的に再現することに成功した。

また、このサブハローカタログから SDSS LRG が 速度構造および局所スケールでのクラスタリングの 性質が異なる2種類のサブハローと対応しているこ とを示し、さらに、そのうち大きな速度分散を持つ サテライトサブハローが 20-30% 含まれることを指 摘した。[56, 98, 99]

弱重カレンズモルフォロジー統計

近年、大規模銀河観測計画が国内外で推進されて いる。日本では、すばる望遠鏡の広視野撮像カメラ Hyper Suprime-Cam を用いた 1400 平方度の超広視 野銀河撮像観測が来年度より開始される見込みであ り、同様の広視野観測計画は世界中で複数予定され ている。これらの計画の主要科学目的は重力レンズ 解析である。重力レンズ現象とは、遠方ソース天体の 像が、観測者とソース天体の間に位置する重力源に よってゆがめられる一般相対論的な効果である。 般に重力レンズによる像のゆがみはわずかであるが、 ゆがみの統計的な性質を精査することで、視線方向 に位置する暗黒物質の質量密度分布を再構築するこ とができる。暗黒物質の空間的な質量分布は、それ 自身の性質を反映していることはもちろんであるが、 現在の加速膨張の原因と考えられている暗黒エネル ギーの性質や、極初期宇宙におけるインフレーショ ン現象のダイナミクスとも関係していることが知ら れている。つまり、重力レンズ現象の精密解析は、こ れまでの観測結果では明らかにされなかった事項に ついて非常に重要な示唆を与えることができる。こ れこそが、将来観測において重力レンズ解析が主要 科学目的に位置づけられている理由である。

我々は、重力レンズ解析によって再構築される二 次元質量密度場 (convergence field) に関する統計解 析と、その結果得られると期待される宇宙論的な制 限についての研究を行った。Convergence field のも つ統計的な性質は、重力による非線形成長により強 い非ガウス性を示すため、従来よく用いられてきた 2点角度相関関数だけでは、convergence field のも つ宇宙論的な情報を完全に引き出すことはできない。 そこで我々は、convergence field のもつ宇宙論的な 情報をより効率的に捉えるために、ミンコフスキー 汎関数という形態学に関する統計量に注目した。ミ ンコフスキー汎関数は、2次元場に対しては、一点 分布 (V_0) 、等高線の長さ (V_1) 、等高線の曲率 (V_2) の 3つで定義され、非ガウス性を引き出す有用な統計 量である。この研究では、高解像度の宇宙論的 N 体 シミュレーションを利用することで、非線形な重力進 化を考慮した convergence マップを作成した。作成 した convergence マップに対してミンコフスキー汎 関数を計測し、convergence field のもつ宇宙論的な 情報がミンコフスキー汎関数を通じてどのように明 らかにできるかを示した。結果的に、すばる Hyper Suprime-Cam による将来広視野観測では、ミンコフ スキー汎関数を通じて、暗黒エネルギーの性質だけ でなく、初期宇宙のダイナミクス起源の原始非ガウ ス性にも制限をつけられることがわかった。この結 果は、従来よく用いられてきた重力レンズによる2 点角度相関関数による制限より強い宇宙論的な制限 であり、他の宇宙論的な将来観測による予言と相補 的である。[12, 68, 100, 101, 102]

弱重カレンズによる暗黒物質ハローの検出

Convergence field と視線方向に位置する孤立した 銀河団クラスの大質量天体の関係についての研究を 行った。重力レンズ解析によって得られた convergence field から大質量天体を同定する際には、通常 convergence field のピークを指標にする。ノイズレ ベルより十分に大きいピークは、10¹⁴-10¹⁵太陽質 量程度の大質量天体と関係していることが先行研究 により知られていた。この研究では、多数の高解像 度シミュレーションを利用することで、convergence のピークが、大質量天体のどのような性質を反映し ているかを調査した。この研究により、convergence ピークはこれまで考えられていたより比較的内部の 質量構造に感度をもっており、大質量天体の楕円率 とその向きにより、convergence ピークでの大質量 天体同定には系統誤差が生じることが明らかになっ た。この系統誤差は三軸不等質量密度モデルによる 理論モデルによって予言でき、理論モデルとシミュ レーション結果が整合的であることを示した。[13]

弱非線形領域における質量パワースペクトルの高速 摂動計算法

摂動論にもとづく宇宙大規模構造の非線形重力進 化の理論計算は、バリオン音響振動などの将来観測に 対して高精度の理論テンプレートを提供しうる重要な 手法であり、近年、適用範囲を広げるため、くりこみ の手法などを用いて摂動の高次補正を計算する手法が 開発されている。前年度に我々は、Γ-展開と呼ばれる 摂動展開にもとづき、劇的な時間短縮を可能とする高 速計算手法を開発した。本年度は、この手法にもとづ き、汎用性の高い摂動計算ツールを開発、RegPT と いう名前でコードを一般公開した。質量パワースペク トルの非線形重力進化を従来より広い適用範囲で高速 に計算できるため(23秒)、今後は宇宙論データ解析 への応用が期待される。[16, 76, 77, 78, 79, 103, 131]

弱非線形領域における赤方偏移パワースペクトル・ 相関関数の高次摂動計算

分光サーベイから得られる銀河分布のクラスタリ ングパターンは、"赤方偏移ゆがみ"と呼ばれる効 果で非等方性を帯びることが知られている。この非 等方性の強さは密度ゆらぎの成長率に比例しており、 パワースペクトル・二点相関関数からその強さを測 定することで宇宙論的スケールでの重力理論の検証 が可能になる。ただし、赤方偏移ゆがみそのものの もつ非線形性により、高い精度で密度ゆらぎの成長 率を測定するためには、パワースペクトル・二点相 関関数の理論テンプレートに非線形効果を適切に考 慮する必要がある。本研究では、以前に我々が開発 した赤方偏移ゆがみの理論モデルに、Γ-展開にもと づく摂動計算を適用、高次の摂動補正まで取り入れ てパワースペクトルと相関関数を計算した。N 体シ ミュレーションとの比較も行い、精度のよい理論計 算ができることを示した。[14,69,78,79,104,131]

非線形質量パワースペクトルに対するフィッティン グ公式の改良

宇宙大規模構造の重力非線形性は小スケールに行 くにつれ強くなり、摂動論的取り扱いが難しくなる。 そのため、質量パワースペクトルを小スケールまで精 度よく求めるためには、高解像度のN体シミュレ ションに頼る必要がある。近年では、多数のシミュ レーションを試行することで、宇宙論パラメーター の依存性まで考慮したパワースペクトルのフィッティ ング公式なるものが作られ、広く宇宙論研究で用い られている。ただし、フィッティング公式の精度と 適用範囲はシミュレーションの解像度で決まるため、 得られた公式の信頼性は最新のシミュレーションで 常にチェックする必要がある。本研究では、最新の高 解像度シミュレーションをもとに、これまで広く使 われてきた Smith et al.(2003) のフィッティング公式 の精度を検証、その公式を改良することで、従来よ り高い精度でかつ、より広いダイナミックレンジで パワースペクトル計算ができることを示した。[15]

ベクトルゆらぎの作る弱重カレンズ効果と宇宙ひも の検出可能性

銀河撮像サーベイや宇宙マイクロ波背景放射の観 測にもとづく弱重力レンズ効果の精密測定は、精密 宇宙論の重要な観測的手法として注目されており、日 本のすばる望遠鏡を用いた SuMIRe プロジェクトを はじめ、世界各国でさまざまな観測プロジェクトが 推進中である。本来、弱重力レンズ効果は、宇宙大 規模構造の密度ゆらぎが作るスカラー型の計量ゆら ぎに起因すると考えられているが、本研究では、ベ クトル型の計量ゆらぎが存在した場合に作られる弱 重力レンズ効果の理論的な定式化を進め、重力レン ズ場の空間相関にスカラー型ゆらぎでは作られない 新しいモード (B-モード、カールモード) が現れる ことを示した。宇宙初期の相転移で作られる宇宙ひ もがあると、ベクトル型の計量ゆらぎが作られるた め、弱重力レンズ効果の新しいモードを精密測定す ることで宇宙ひもの検出が可能となる。将来の観測 プロジェクトにおける検出可能性を考察した結果、組 み替え確率の小さな宇宙ひもに対して弱重力レンズ 効果の観測は高い感度を有していることがわかった。 [17, 103]

重力系のボルツマンシミュレーション

従来の構造形成シミュレーションは物質分布を N 個の質点で離散的に表現し、質点間の重力相互作用 を追うという N 体計算の手法をとるものがほとんど である。本来は、膨大な数の微視的な素粒子から成 るダークマターの密度進化を追う場合などには、無 衝突ボルツマン方程式と重力のポアソン方程式を結 合させて解けばよいはずである。これは6次元位相 空間上での積分を伴うために困難であったが、最近 のコンピューターの能力の向上により、現実的な設 定で空間3次元のボルツマンシミュレーションが可能となった。我々はプラズマ物理学で使われる PFC 法に基づく計算スキームを開発し、移流問題、ラン ダウ減衰、キング球衝突の計算などを行い、計算精 度を確かめた。また、運動量空間での連続的な分布 関数の進化を明らかにした [35]

遠方サブミリ波銀河の形成シミュレーション

宇宙論的流体シミュレーションを用いて高赤方偏 移でのサブミリ波銀河の分布を明らかにした。個々 の銀河の星形成史、金属量、星質量から SED を計算 し、サブミリ波帯で模擬観測を行い、ソースカウン トや2点相関関数を計算した。これまでに、同モデ ルで水素輝線銀河については赤方偏移3での光度関 数や空間分布などを再現することは確認済みである。 本研究では、ASTE 望遠鏡などによりこれまでに得 られた観測結果と比べ、1.1 ミリ帯で非常によい一 致を得た。また、光円錐上の銀河カタログを作成し、 サブミリ波帯で0.1 mJy 以上の銀河は赤方偏移6以 上にも多数存在し、ALMAで40分角視野のサーベ イを行えば10個以上検出可能であると結論した。そ のような銀河は典型的に1兆太陽質量程度のダーク ハローの中心部に存在する[36]。

始原ガス雲形成過程での輻射と流体速度の影響

高赤方偏移ではガスとダークマターは空間分布も 速度も異なるため、相対速度や輻射輸送効果を陽に 取り入れないと分子ガス雲形成時期やガス雲の形態 を正しく求めることができない。我々は3次元のシ ミュレーションを用い、輻射冷却の方向依存性や化 学反応率の不定性、さらに流体速度の影響を詳細に 調べた[37]。等方性を仮定した近似では、水素分子 輝線に対しては実効的な光学的厚みを5倍程度誤っ て見積もる場合があり、一般にガス雲の重力崩壊を 速めてしまうことが分かった。次に、宇宙初期のバ リオン振動に起因する、ダークマターに対する超音 速流がある場合には、小さなハローのガス分率が大 幅に低下し、分子ガス雲形成が阻害される、あるい は数千万年程度遅れることを明らかにした[38]。

非熱的なウィーノ暗黒物質が構造形成に与える影響

LHC (Large Hadron Collider) 実験において AT-LAS 及び CMS の両解析チームがヒッグス粒子と思 われる質量 ~ 125 GeV の新粒子の発見を報告した。 これを受けて、超対称模型としてゲージーノの質量 はアノマリー伝達型、ゲージーノ以外の超対称粒子 の質量は重力伝達型で与えられるシナリオが考えら れている。この模型では多くの場合ウィーノが暗黒 物質になるが、LHC 実験及び将来の間接探査で検出 可能なウィーノについては熱的な残存量は無視でき る程度でしかない。よって、ウィーノ暗黒物質のほ とんどはグラヴィティーノのような長寿命粒子の崩 壊によって作られる。崩壊の際にウィーノ暗黒物質 は大きな運動量をもつが、その後の背景プラズマと の相互作用によって運動量を失っていく。我々 [20] はボルツマン方程式を数値的に解き、現在において もウィーノ暗黒物質のかなりの量が非熱的な速度を 持っている事を示した。

重力伝達型超対称模型における暗黒物質及びバリオ ン数共生成

従来のアフレック・ダイン機構による暗黒物質及び バリオン数共生成においては、Q-ボール崩壊に寄与 する過程としてスクォークの崩壊のみを考慮してい たため、暗黒物質の質量は O(1) GeV だと考えられ ていた。我々[21] は Q-ボール崩壊に対してスクォー クの対消滅が支配的な寄与をすることを指摘し、暗 黒物質の質量が O(100) GeV になりうる事を示した。

温かい暗黒物質モデル及び崩壊する荷電重粒子モデ ルにおける銀河ハロー形成

近年の高解像度 N 体計算により、冷たい暗黒物質 を仮定した標準的な宇宙論では我々の局所銀河群中 に観測されている衛生銀河の数を説明できない事(衛 生銀河問題)が報告されている。これを受けて、そ の解決策となる温かい暗黒物質のモデルが素粒子論 から提案されている。我々 [22, 81, 108] は温かい暗 黒物質の構造形成に対する影響が、温かい暗黒物質 が全暗黒物質中に占める割合と物質輻射等密度時の ジーンズスケールで特徴づけられる事を示した。我々 はさらに崩壊する荷電重粒子モデルも取り上げ、実 際に大規模 N 体計算を実行することで、寿命が1年 程度の荷電重粒子モデルは温かい暗黒物質と同様に 衛生銀河問題の解決となることを示した。

シミュレーション銀河団の質量推定における静水圧 平衡の正当性

銀河団のX線観測における質量推定において、通 常、銀河団ガスが静水圧平衡の状態にあると仮定す るが、この正当性はよくわかっていない。今回は、高 精度の宇宙論的シミュレーションから取り出した銀 河団を解析することで、静水圧平衡の正当性を検証 した。まず、銀河団ガスが従うオイラー方程式の各 項を質量に換算し、それらの全質量に対する割合を 評価した。その結果、圧力勾配項、すなわち静水圧 平衡の仮定の下で得られる質量は全質量よりも平均 的に15%程度小さいことがわかった。最大で30%程 度のずれが起こる場合もある。さらに重要な点とし て、このずれは主に銀河団ガスの加速度に起因する しとを示した。過去の研究において、手法の差異の ため、静水圧平衡の破れの原因については様々な主 張があったが、今回の研究はシミュレーション中のガ スが従う方程式に忠実な解析手法をとっており、ま
た、ガスの加速度は過去の研究において無視されて いたため、その重要性を定量的に示した点で重要で ある。[7,61]

シミュレーションによる 2 次元観測量から得た銀河 団質量へのバイアス

シミュレーションの3次元データの解析によって 研究静水圧平衡によって得られた銀河団の質量は真 の質量から平均的15%、最大30%程度ずれることが わかったが、実際の観測においては2次元の観測量 からガスの密度と温度を推定し、それから質量を構 築しなければならない。この過程において質量にさ らなるバイアスが生じる可能性がある。今回は、シ ミュレーションデータから擬似的な観測量を作り、球 対称のガス密度および温度プロファイルを仮定した 上で、疑似観測量を再現するようなガス密度および 温度をフィッティングによって得た。この結果、銀河 団の外側のサブストラクチャーによって密度が過大 評価され、それに伴って温度が過小評価されること がわかった。これによって、質量は外側で本質的な 静水圧平衡の破れによるものよりもさらに 10%程度 過小評価される。結果的に銀河団の質量は外側で最 大40%過小評価される可能性がある。近年すざくや Chandra などの衛星によって銀河団の外側の観測が 始まっているため、その際のガスに関する物理量や 質量の推定における注意を促すものである。[61]

原始揺らぎの非ガウス性の存在下での暗黒物質ハロー のクラスタリング

宇宙の原始揺らぎの非ガウス性は、揺らぎを創っ た機構を峻別する上で重要な指標である。通常、原 始揺らぎはインフレーション期に創成されたと考え るので、この指標はインフレーションの物理を探る 上で役立つと期待できる。これまで、非ガウス初期 揺らぎに基づく構造形成論は、最も単純な単一の場 の2次の局所結合型で表される場について主に議論 されてきた。我々は、宇宙論的N体シミュレーショ ン及び簡単な解析的模型を用いて、複数の自由度と、 任意の次数の結合を持った原始揺らぎの場合へ拡張 を行った。従来の模型では、物質が重力的に束縛し てできるハローの空間分布に「距離依存バイアス」 と呼ばれる非自明な効果が現れることが分かってい たが、我々はこの特徴が非線形結合の次数に依らな いこと、また、多自由度を持つ場の場合にはバイア ス関数の形状が影響されることを示した。このこと を用いれば、将来観測から模型に依らずに宇宙の初 期条件の自由度の数を探れる可能性が拓ける。また、 異なる時刻、異なる種族の銀河の観測を組み合わせ ることで、原理的に非線形結合の形に制限が付くこ とを示した。[4]

N体シミュレーションを用いた繰り込みバイアスモ デルの検証

宇宙の大規模構造を記述する上で、物質の質量密 度分布と観測された銀河の数密度分布の関係をバイ アスと呼び、目下最大の不定性はここにある。我々 は過去数年間、宇宙の密度揺らぎの進化を精密に解 析し、宇宙論的N体シミュレーションから測定され た物質の2点相関関数をパーセントレベルで再現で きる精密な解析模型の開発に取り組んできた。我々 は、この結果と最近提案された「繰り込み」バイアス 模型を組み合わせた定式化を行い、N体シミュレー ションから同定された暗黒物質ハローの自己相関関 数を現在の観測の統計誤差以内の精度で再現するこ とに成功した。また、将来の銀河サーベイと弱重力 レンズサーベイの組み合わせからバイアスの不定性 を低減することを念頭に、ハロー - 物質の相互相関 関数も同時に考慮した場合、我々の模型は、先の自 己相関関数と併せて整合的に説明することが可能で あることを示した。[5]

弱重カレンズサーベイにおける共分散行列の非ガウ ス性の重要性と、その宇宙論パラメタへの伝播

弱重力レンズサーベイのデータを解析する際、測 定されたスペクトルの精密な模型が必要なのはもち ろんだが、その統計誤差についても正しく理解して いる必要がいる。一般に、n 点統計量の共分散行列 を計算するためには 2n 点までの統計量が必要とな るため、これを解析的に導出するのは解析に用いる 統計量より困難となる。我々はN体シミュレーショ ンから作成した 1,000 個もの独立な模擬重力レンズ マップを用いることでパワースペクトル及びバイス ペクトルの共分散行列を数値的に導出し、その非ガ ウス成分の取扱いを誤った場合、如何に宇宙論パラ メタの制限を誤ってしまうかを調査した。我々は、非 ガウス誤差を無視した場合、これら2つのスペクト ルから得られるトータルの signal-to-noise ratio は典 型的な将来観測の場合に2から3倍に過大評価して しまうこと、及び、標準的な6パラメタ宇宙模型の 場合、1パラメタあたりの不定性を15%程度見誤っ てしまうことを示した。この数値は、全天に迫る広 域をサーベイする、将来の衛星観測の計画の場合に 非常に重要になり得る。[6]

銀河系ダスト減光地図のスタック解析による銀河遠 赤外放射の検出

あらゆる銀河系外天文観測は、我々の銀河系前景 成分を通してなされるため、正確な銀河系ダスト地 図による減光補正が重要となる。現在最も広く用い られている減光地図は、Schlegel et al. (1998:SFD) による SFD 地図である。しかし、この減光地図に は特に減光量の小さい領域において系統誤差が含ま れていることが、Yahata et al. (2007) による SDSS 銀河カタログの個数面密度測定によって示されてい た。さらに Yahata et al. (2007) では、系統誤差の 原因は SDSS 銀河自身の遠赤外放射がその原因であ ると提案されている。

我々は本研究において、SDSS 銀河を中心として SFD 地図をスタックすることにより、SFD 地図中に 含まれた SDSS 銀河の遠赤外放射を直接検出した。 この結果は、Yahata et al. (2007) によって提案さ れた上記の仮説の正当性を観測的に示すものである。 さらにこのスタック解析によって、SFD 地図を統計 的に補正する手法や、個々では検出限界以下の微弱 な銀河遠赤外放射、およびその可視光度との相関な どの統計量を探る手法が得られると期待される。[27] [73] [112] [113]

重カレンズを用いた暗黒物質モデルの制限

未だその正体がわからないダークマターの性質を 宇宙論的観測から明らかにすることは非常に重要な 課題である。宇宙論の標準モデルではダークマター は速度分散の小さいコールドダークマターだとされ、 大スケールにおいて観測を非常に良く説明する。 方で小スケールにおいては、観測される密度ゆらぎ が標準モデルの予言に比べ小さいという問題がある。 速度分散の大きいウォームダークマターはある特徴 的スケール以下の密度ゆらぎを減衰させるため、 の性質により理論と観測の不一致が説明される可能 性がある。このようにダークマターが本当にコール ドなのかは未だ決着していない問題である。 ダークマターの速度分散(とそれに対応する質量)に 対する新たな制限を得るために、我々はダークマター サブハロー質量関数という従来とは異なる統計量に着 目した。この統計量はすばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam(HSC)を用いた重力レンズ観測によって正確な 測定が可能である。重力レンズを用いることで直接 的に系の力学的質量を推定でき、従来の手法に比べ 理論的不定性が少ないことにサブハロー質量関数を 用いる強みがある。我々は観測と比較しダークマター の質量に対する制限を得るために、コールドダーク マターと3つのウォームダークマターモデルそれぞ れに対してN体シミュレーションによるサブハロー 質量関数の理論予言を行った。さらに、HSC による 観測を想定した統計的誤差の評価を行い、実際の観 測によってダークマターの質量に対する新たな制限 が期待できることを示した。[59]

5.1.2 星形成

第一世代星の超新星爆発に起因する低金属量星形成

第一世代星は典型的に大質量(太陽質量の数十から数百倍)であったと考えられている。ガス雲中に 金属(ヘリウムより重い元素、ガスの放射冷却率に 大きく寄与する)が存在しなかったため、ガスが十分 冷却されないためである。一方、現在の星は典型的 に太陽質量以下である。星の典型的な質量の遷移が いつどのようにして起きたか。この問題は宇宙の構 造形成を知る上で重要である。大質量星は、紫外線 放射により銀河間物質の電離、星形成の抑制を引き 起こすことで構造形成に影響を与える一方、低質量 (太陽質量以下)星はその効果が小さいためである。

本研究では、金属量が星の質量に与える影響について調べた。特に、低金属量の星間ガス中で大質量 星が超新星爆発を起こすことによって星が形成され る過程を数値的に追った。まず、超新星爆発による衝 撃波で星周ガスが球殻状に圧縮される。その領域が 重力的に不安定になるとガスがジーンズ質量程度に 分裂し、それぞれの分裂片が重力収縮を始める。さ らに分裂片は、ダスト(金属原子が凝縮した固体微 粒子で、より冷却に寄与する)による急激な冷却に より不安定になり、さらに分裂が進むことがわかっ た。分裂片の最終的な質量は太陽質量の百分の一か ら十分の一であり、この後のガス降着により、低質 量星が形成されることが示唆された。[18, 57, 70]

低金属量星形成ガス雲中のダスト成長と、ガス雲の 熱的進化に与える影響

低金属量(太陽の金属量の十万分の一程度)の星 間ガス中において低質量の星が形成されるためには、 ダスト冷却が重要な役割を担うと考えられる。した がって、初期宇宙における星形成を考える際は、ダ スト量を正しく見積もる必要がある。初期宇宙にお いて、ダストは主に超新星によって供給されるが、超 新星ではダストを破壊する作用も働く。ダスト破壊 の大きい超新星によって金属・ダスト汚染を受けた ガス雲中では、ガスの冷却が不十分であり、大質量 の星が形成される可能性がある。

しかし、ガスの重力収縮に伴って密度が上昇する と、ダストがガス相の金属原子を取り込むこと(ダ スト成長)が示唆されている。本研究では、ダスト の成長を考慮し、星形成ガス雲の進化に与える影響 を求めた。その結果、ダスト破壊の大きいモデルで も、最終的にダストは十分成長し、冷却に寄与する ことが分かった。[19, 70, 80, 105, 106, 107, 117]

初期宇宙での超急速ガス降着による超大質量星形成

最近の観測によると z > 6の宇宙で 10⁹ M_{\odot} 以上の超巨大ブラックホール (SMBH) がすでに形成されている。これはビッグバンから 1Gyr 以下しか経過しておらず、これほど短時間に SMBH がどうやって形成されたのか問題になっている。これを説明するのに、初代星形成のある特殊な状況下でかなり大質量の BH が直接形成されるシナリオが最近活発に議論されている。例えば、非常に強い紫外光にさらされたダークハロー中では水素分子が形成されず、Ly α 放射冷却により温度約8千度を維持したままガス 雲が収縮する。その結果、~10⁵ M_{\odot} の超大質量星が形成され、一般相対論的不安定により BH に重力崩壊するというシナリオである。

このとき 0.1 M_☉/yr もの超大降着率で原始星が成 長すると考えられているが、こうした極端に大きな 降着率下で星がどのように進化するか知られていな かった。そこで、初めて星の構造を数値的に解いて 調べたところ、星は質量の増加とともに膨張を続け、 超巨星 (半径 10³ R_{\odot} 以上)として成長するという新 しい描像が見えてきた [32]。この間、星半径は星質 量の1/2 乗に比例して増加し、降着率が 0.01 M_{\odot} /yr 以上であれば降着率の依存性は殆どない。この"supergiant protostar"の進化段階は星の有効温度がお よそ 5000K と低く星の UV 光度は非常に小さい。こ のためガス降着流に対するフィードバックは弱く、実 際に超大質量星が形成され得ることを初めて示した。 また、計算結果をもちいた脈動不安定解析も行い、 こうした星は脈動による質量放出を経験するものの、 ガス降着率が非常に急速なため星の質量増加は妨げ られないことを示した [33]。

5.1.3 系外惑星

惑星光の自転・公転による時間変動を利用した惑星 表面 2 次元マッピング

将来直接撮像によって系外地球型惑星の詳細を知 ろうとする上で、点源としての地球の測光・分光学 的特徴からどこまで情報を得られるかは重要な試金 石である。私たちは、惑星表面が非一様な場合に反 射光が自転・公転によって時間変動することに注目 し、これを逆に解くことで表面を再構築する方法論 をまとめた。また、その方法論を地球の反射光のシ ミュレーションに適用して現実的な実現可能性を調 べた。前年度までの研究で、軌道傾斜角が0で惑星 のフェーズが一定の場合についてはうまく逆解きが できることが分かった。本年度は、軌道傾斜角が0で ない場合でも、雲の散乱による非等方性の影響が強 いデータを使わないことで妥当なマッピングができ ることを示した。また、軌道傾斜角や自転軸方向を 様々に変えて地球のライトカーブをシミュレーショ ンし、自転軸方向の推定可能性を系統的に調べた。地 球の場合かそれ以上に大きな場合は、比較的良く推 定できることが分かった。[8]

地球の近赤外線スペクトルに見られる分子吸収線の 時間変動とその解釈

EPOXIによって宇宙空間から観測された地球の近 赤外分光データを用いて、点源としての地球のスペ クトルに見られる酸素・二酸化炭素・水の吸収線等 価幅の時間変化を調べた。これらは連続成分とは異 なるふるまいを示すことが分かったが、このふるま いは雲が不透明として簡単化したモデルで再現でき ることが確かめられた。逆に、分子吸収線の時間変 化から雲被覆の非一様性の情報が得られることにな る。また、酸素や二酸化炭素と水蒸気の吸収線変動 パターンが異なることに注目し、水蒸気分布の非一 様性の検証可能性、またそれが水循環について与え る示唆について議論した。[10]

複数惑星系に対する初のロシター効果の検出と惑星 同士の食の発見

昨年度に引き続きトランジット惑星系のロシター 効果の観測を行ったが、今回新たな試みとして、惑星 が複数トランジットする系に対して初めてロシタ・ 効果の測定を実施した。複数トランジット惑星系にお いて星の自転軸と惑星の公転軸を推定する事は、複 数惑星系の角運動量がどのように進化してきたかを 議論する貴重な機会を与える。今年度の研究では、ケ プラー宇宙望遠鏡が発見した惑星系候補天体 KOI-94 に対してロシター効果の観測を実施し、結果として 木星型惑星 KOI-94.01 の公転軸と中心星の自転軸が 約10°の範囲内でよく揃っている事を示した。これ は複数惑星系に対する初のロシター効果の検出であ る。さらに我々はロシター効果の観測を計画してい るうちに、ケプラー宇宙望遠鏡の公開しているアー カイブ測光データの中で、「惑星同士の食」という極 めて珍しい天体現象を発見した。これは2つの惑星 が同士のトランジットをし,その最中に惑星同士が 光球面上で重なり合うという現象である。この現象 自体非常に珍しいものであるが、この「惑星同士の 食」の測光データのパターンの測光解析から2つの 惑星の公転軸が非常によく揃っている事も突き止め た。この結果と上記ロシター効果の観測結果と合わ せて, KOI-94 という複数惑星系では星の自転角運動 量と惑星の公転角運動量の方向がよく揃っている事 が明らかとなった。[24, 25, 26]

ケプラー測光を用いたトランジット惑星を持つ星の 自転傾斜角測定

ケプラー宇宙望遠鏡が発見した惑星系候補天体に 対しすばる望遠鏡を用いて分光観測を行い、星の基 本的なパラメータ(星の有効温度・表面重力・半径 など)を決定した。一方ケプラー望遠鏡で得られた 測光観測データを詳細に解析し、惑星候補を持つ星 の自転周期を見積もった。これらの情報(すばる望遠鏡での分光観測とケプラー望遠鏡による測光観測) を組み合わせて、星の自転軸傾斜角という量を推定 した。惑星の軌道公転軸が我々の視線方向に対して ほぼ垂直であるトランジット惑星系では、星の自転 軸傾斜角は星の自転軸と惑星の公転軸の関係につい て示唆を与える。昨年度は試験的な試みとして約1 5天体を観測・解析したが、今年度はこれを拡張し さらに追加で約15天体を観測・解析した。解析で は射影自転速度の推定等においてより詳細なモデル を用いるなど、解析面でも改良を加えた。全部で約 30天体を解析したが、その結果として約5天体に ついては星の自転軸と惑星の公転軸が優位にずれて いる可能性があるという示唆が得られた。[23]

KOI-94系における惑星食の研究

KOI-94 系は、NASA のケプラー宇宙望遠鏡によっ て発見された複数トランジット系であり、周期 3.7 日、 10.4日、22.3日、54.3日をもつ4つの惑星候補天体 を有する。この系は、複数惑星系の形成を理解する うえで極めて重要な役割を果たすことが期待されて いるが、同時に "planet-planet eclipse" とよばれる 非常にまれな現象(2つの天体が同時に恒星面上を横 切り、かつその途中で視線方向から見て重なりあう) がはじめて観測された系としても知られている。 のような現象が、惑星の軌道進化の過程について重 要な示唆を与える量である惑星の軌道傾斜角の決定 において有用であることは既に指摘されていたもの の、実際の観測例を欠いていたこともあり、その物 理的なモデル化や重力多体問題としての効果にまで 踏み込んだ解析はこれまでなされていなかった。そ こで我々は、まず planet-planet eclipse の解析的な モデルを構築し、食によって生じる増光の形状から 2惑星の軌道傾斜角が一意に復元できることを示し た。さらに惑星どうしが及ぼし合う摂動によるトラ ンジット時刻の一定周期からのずれ (transit timing variation) をN体計算を用いて解析することで、系の 力学的なパラメータについての制限を与えた。最後に これらの結果をふまえ、次回の planet-planet eclipse の発生時刻について多体問題の効果まで含めた予測 を行った。[111]

<受賞>

- [1] 細川隆史、日本天文学会研究奨励賞、日本天文学会、 2013年3月21日
- [2] 松原隆彦、第17回林忠四郎賞 「統計的摂動解析理 論に基づく観測的宇宙論の開拓」、日本天文学会、2 013年3月21日
- [3] 平野照幸、平成24年度東京大学大学院理学系研究科研究奨励賞(博士課程)「惑星移動機構解明に向けたトランジット惑星系の軌道傾斜角測定」、2013年3月25日

<報文>

(原著論文)

- [4] Takahiro Nishimichi: "Scale Dependence of the Halo Bias in General Local-Type Non-Gaussian Models I: Analytical Predictions and Consistency Relations", Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 08 (2012) 037
- [5] Atsushi Nishizawa, Masahiro Takada & Takahiro Nishimichi: "Perturbation theory for nonlinear halo power spectrum: the renormalized bias and halo bias", arXiv:1212.4025
- [6] Masanori Sato & Takahiro Nishimichi: "Impact of the non-Gaussian covariance of the weak lensing power spectrum and bispectrum on cosmological parameter estimation", arXiv:1301.3588
- [7] Daichi Suto, Hajime Kawahara, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, Yasushi Suto & Renyue Cen: "Validity of Hydrostatic Equilibrium in Galaxy Clusters from Cosmological Hydrodynamical Simulations" The Astrophysical Journal, **767** (2013) 79

- [8] Y. Fujii & H. Kawahara: "Mapping Earth-analogs from Photometric Variability: Spin-Orbit Tomography for Planets in Inclined Orbits", The Astrophysical Journal, **755** (2012) 101
- [9] H. Kawahara, T. Matsuo, M. Takami, Y. Fujii, T. Kotani, N. Murakami, M. Tamura, & O. Guyon: "Can Ground-based Telescopes Detect The Oxygen 1.27 Micron Absorption Feature as a Biomarker in Exoplanets ?", The Astrophysical Journal, **758** (2012) 13
- [10] Y. Fujii, E. L. Turner, & Y. Suto: "Variability of Water and Oxygen Absorption Bands in the Disk-Integrated Spectra of the Earth", The Astrophysical Journal, **765** (2013) 76
- [11] Toshiya Namikawa, Duncan Hanson & Ryuichi Takahashi "Bias-hardened CMB lensing" Monthly Notice of Royal Astronomical Society, (2013)
- [12] Masato Shirasaki, Naoki Yoshida, Takashi Hamana & Takahiro Nishimichi: "Probing Primordial Non-Gaussianity with Weak-lensing Minkowski Functionals", The Astrophysical Journal, **760** (2012) 45
- [13] Takashi Hamana, Masamune Oguri, Masato Shirasaki & Masanori Sato: "Scatter and bias in weak lensing selected clusters", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, (2012) 425 (3) 2287-2298
- [14] Atsushi Taruya, Takahiro Nishimichi & Francis Bernardeau: "Precision modeling of redshift-space distortions from a multipoint propagator expansion", Physical Review D, 87, (2013) 083509
- [15] Ryuichi Takahashi, Masanori Sato, Takahiro Nishimichi, Atsushi Taruya & Masamune Oguri: "Revising the Halofit Model for the Nonlinear Matter Power Spectrum", The Astrophysical Journal, **761**, (2012) 152
- [16] Atsushi Taruya, Francis Bernardeau, Takahiro Nishimichi & Sandrine Codis: "Direct and fast calculation of regularized cosmological power spectrum at two-loop order", Physical Review D, 86 (2012) 103528
- [17] Daisuke Yamauchi, Toshiya Namikawa & Atsushi Taruya: "Weak lensing generated by vector perturbations and detectability of cosmic strings", Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 10 (2012) 030
- [18] Gen Chiaki, Naoki Yoshida, & Tetsu Kitayama: "Low-mass Star Formation Triggered by Early Supernova Explosions", The Astrophysical Journal, **762** (2013) 50
- [19] Gen Chiaki, Takaya Nozawa, & Naoki Yoshida: "Growth of Dust Grains in a Low-metallicity Gas and Its Effect on the Cloud Fragmentation", The Astrophysical Journal, **765** (2013) L3

- [20] Ibe Masahiro, Kamada Ayuki, & Matsumoto Shigeki.: "Imprints of non thermal Wino dark matter on small-scale structure", Physical Review D, 87 (2013) 063511
- [21] Kamada Ayuki, Kawasaki Masahiro, & Yamada Masaki: "Opening the window to the cogenesis with Affleck-Dine mechanism in gravity mediation" Physics Letters B, **719** (2013)
- [22] Kamada, Ayuki, Yoshida, Naoki, Kohri, Kazunori, & Takahashi, Tomo "Structure of dark matter halos in warm dark matter models and in models with long-lived charged massive particles" Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (2013)
- [23] Teruyuki Hirano, Roberto Sanchis-Ojeda, Yoichi Takeda, Norio Narita, Joshua N. Winn, Atsushi Taruya, & Yasushi Suto, "Measurements of Stellar Inclinations for Kepler Planet Candidates", The Astrophysical Journal, **756** (2012) 66
- [24] Simon Albrecht, Joshua N. Winn, John Asher Johnson, Andrew W. Howard, Geoffrey W. Marcy, Paul Butler R., Pamela Arriagada, Jeffrey D. Crane, Stephen A. Shectman, Ian B. Thompson, Teruyuki Hirano, Gaspar Bakos, & Joel D. Hartman, "Obliquities of Hot Jupiter Host Stars: Evidence for Tidal Interactions and Primordial Misalignments", The Astrophysical Journal, **757** (2012) 18
- [25] Teruyuki Hirano, Norio Narita, Bun'ei Sato, Yasuhiro H. Takahashi, Kento Masuda, Yoichi Takeda, Wako Aoki, Motohide Tamura, & Yasushi Suto, "Planet-Planet Eclipse and the Rossiter-McLaughlin Effect of a Multiple Transiting System: Joint Analysis of the Subaru Spectroscopy and the Kepler Photometry", The Astrophysical Journal Letters, **759** (2012) L36
- [26] Norio Narita, Yasuhiro H. Takahashi, Masayuki Kuzuhara, Teruyuki Hirano, et al., "A Common Proper Motion Stellar Companion to HAT-P-7", Publications of the Astronomical Society of Japan, 64 (2012) L7
- [27] Toshiya Kashiwagi, Kazuhiro Yahata & Yasushi Suto: "Detection of Far Infrared Emission from Galaxies and Quasars in the Galactic Extinction Map by Stacking Analysis", Publication of the Astronomical Society of Japan, 65 (2013) in press (arXiv:1212.0307)
- [28] Kenkichi Yamada, Tetsu Kitayama, Shigehisa Takakuwa, Daisuke Iono, Takahiro Tsutsumi, Kotaro Kohno, Motokazu Takizawa, Kohji Yoshikawa, Takuya Akahori, Eiichiro Komatsu, Yasushi Suto, Hiroshi Matsuo, & Ryohei Kawabe; "Imaging Simulations of the Sunyaev-Zel'dovich Effect for ALMA", Publication of Astronomical Society of Japan, 64(2012)102
- [29] den Herder et al. "ORIGIN: Metal Creation and Evolution from the Cosmic Dawn", Experimental Astronomy 34 (2012) 519–549

- [30] Masahiro Takada, Richard Ellis, Hiroaki Aihara, Nobuo Arimoto, Kevin Bundy, Masashi Chiba, Judith Cohen, Olivier Dore, Jenny E. Greene, James Gunn, Timothy Heckman, Chris Hirata, Paul Ho, Jean-Paul Kneib, Olivier Le Fevre, Hitoshi Murayama, Tohru Nagao, Masami Ouchi, Michael Seiffert, John Silverman, Laerte Sodre Jr, David Spergel, Michael A. Strauss, Hajime Sugai, Yasushi Suto, Hideki Takami, Rosemary Wyse, the PFS Team; "Extragalactic Science and Cosmology with the Subaru Prime Focus Spectrograph (PFS)", Publication of Astronomical Society of Japan (2012) in press (arXiv:1206.0737)
- [31] Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida, Kazuyuki Omukai & Harold W. Yorke: "Protostellar Feedback and Final Mass of the Second-generation Primordial Stars" The Astrophysical Journal, 760 (2012) 37L
- [32] Takashi Hosokawa, Kazuyuki Omukai & Harold W. Yorke: "Rapidly Accreting Supergiant Protostars: Embryos of Supermassive Black Holes?" The Astrophysical Journal, **756** (2012) 93
- [33] Kohei Inayoshi, Takashi Hosokawa & Kazuyuki Omukai: "Pulsational instability of supergiant protostars: do they grow supermassive by accretion?" MNRAS, (2013), in press
- [34] Masahiro N. Machida & Takashi Hosokawa: "Evolution of protostellar outflow around low-mass protostar" MNRAS, 431 (2013) 1719
- [35] Kohji Yoshikawa, Naoki Yoshida, & Masayuki Umemura: "Direct Integration of the Collisionless Boltzmann Equation in Six-Dimensional Phase-Space", The Astrophysical Journal, **762** (2013) 116
- [36] Ikko Shimizu, Naoki Yoshida, & Takashi Okamoto: "Submillimetre Galaxies in Cosmological Hydrodynamic Simulations" Monthly Notices of the Royal Astronomical Societty, **427** (2012) 2866
- [37] Shingo Hirano & Naoki Yoshida: "Radiative Cooling Implementations in Simulations of Primordial Star Formation", The Astrophysical Journal, **763** (2013) 52
- [38] Smadar Naoz, Naoki Yoshida, & Nickolay Y. Gnedin: "Simulations of Early Baryonic Structure Formation with Stream Velocity II", The Astrophysical Journal, **763** (2013) 27
- [39] Marco Valdes, Carmelo Evoli, Andrej Mesinger, Andrea Ferrara & Naoki Yoshida: "The Nature of Dark Matter from High-Redshift HI 21cm Signal", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **429** (2013) 1705

(国内雑誌)

- [40] 須藤靖"主役はダーク"毎日新聞社本の時間2012 年4月号~2013年3月号
- [41] 須藤 靖"右下がりの時代をいきのびる"、パリティ 27(2012) 5 月号, pp.52–55.

- [42] 須藤 靖 "ハッブルかルメートルか:宇宙膨張発見史を めぐる謎"、日本物理学会誌 67 (2012) 5 月号 pp.311-316.
- [43] 須藤 靖 理学エッセイ第1回 "朝永振一郎の博士号は どこから?"、東京大学理学系研究科・理学部ニュー ス 2012 年5月号44巻1号, p.9.
- [44] 須藤 靖 "注文の多い雑文 その十九: 宇宙人の見る地 球"、東京大学出版会 UP 476(2012)6 月号, pp.28-37.
- [45] 須藤 靖 "注文の多い雑文 その二十: 対称性の自発的 破れ"、東京大学出版会 UP 479(2012)9 月号, pp.47-53.
- [46] 須藤 靖 "東大受験生へのメッセージ:物理"、東京大 学新聞 2012 年 9 月 13 日
- [47] 須藤靖"注文の多い雑文 その二十一: 不ケータイと いう不見識"、東京大学出版会 UP 482(2012)12 月 号, pp.27-36.
- [48] 須藤 靖 "注文の多い雑文 その二十二: 0×無限大≠ 0"、東京大学出版会 UP 485(2013)3 月号, pp.29– 36.
- [49] 須藤 靖"坪野公夫教授を送る"、東京大学理学系研究 科・理学部ニュース 2013 年 3 月号 44 巻 6 号, p7.
- [50] 平野照幸・須藤 靖 "太陽系外複数惑星系における惑 星同士の食の発見"、東京大学理学系研究科・理学部 ニュース 2013 年 3 月号 44 巻 6 号, p12.
- [51] 須藤靖朝日新聞asahi.com webronza 科学・環境 論説2012年4月6日、4月18日、5月5日、5月 26日、6月23日、7月11日、7月16日、7月27 日、9月1日、9月13日、10月17日、10月30日、 11月27日、12月13日、12月25日、2013年1月 23日、3月27日
- [52] 須藤靖読売新聞 書評 2013 年1月6日、1月20日、2月3日、2月10日、2月24日、3月3日、3月17日
- [53] 吉田直紀: "宇宙の構造形成", パリティ, Vol. 27, 10
- (学位論文)
- [54] Yuka Fujii: "Exploring the Landscape of Habitable Exoplanets via Their Disk-integrated Colors and Spectra: Indications for Future Direct Imaging Observations" (博士論文)
- [55] Toshiya Namikawa: "Toward a precise measurement of weak lensing signals through CMB experiments and galaxy imaging surveys: A theoretical development and its cosmological implications" (博 士論文)
- [56] Akira Oka: "Modeling Redshift-Space Clustering of the SDSS Luminous Red Galaxies with Cosmological N-body Simulations: Implications for a Test of Gravity" (修士論文)
- [57] Gen Chiaki: "Supernova Explosions in the Early Universe" (修士論文)
- [58] Teruyuki Hirano: "Measurements of Spin-Orbit Angles for Transiting Systems: Toward an Understanding of the Migration History of Exoplanets" (博士論文)

- [59] Takuma Kurokawa: "Probing the nature of dark matter by gravitational lensing observations" (修 士論文)
- [60] Yuxin Xue: "The Formation and Evolution of Hot-Jupiter: Planet-Planet Scattering Followed by Tidal Dissipation" (修士論文)
- [61] Daichi Suto: "Validity of Hydrostatic Equilibrium in Mass Estimates of Simulated Galaxy Clusters" (修士論文)

(著書)

- [62] 須藤 靖: "主役はダーク"、毎日新聞社 (2013 年 3 月 刊行、293 ページ)
- [63] 谷口義明監修: "新天文学事典", ブルーバックス (2013 年3月刊行)(第7章 吉田直紀担当)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [64] Takahiro Nishimichi: "Clustering of Biased Tracers in Redshift Space"; Perturbative approaches to redshift space distortions, (Zurich, July 2012)
- [65] Yuka Fujii: "Probing the Humidity of Earthlike Exoplanets"; IAU General Assembly (Beijing, 8/27-8/31, 2012)
- [66] Toshiya Namikawa: "Lensing reconstruction from current CMB data and constraining non-scalar metric perturbations with lensing curl", KEK-CPWS-AIU2012 (KEK, Nov 9, 2012)
- [67] Toshiya Namikawa: "An Improved Method for CMB Lensing Reconstruction and Its Cosmological Applications", RESCEU symposium on general relativity and gravitation: JGRG 22, (Tokyo, Nov 14, 2012)
- [68] Masato Shirasaki: "Cosmological test with WL Minkowski Functionals"; TIFR Winter School and Symposium on Astronomical Surveys (Mumbai, India, 12/21, 2012)
- [69] Atsushi Taruya: "Baryon acoustic oscillations in 2D: Effect of higher-order corrections"; Perturbative approaches to redshift space distortions @ University of Zurich (Zurich, 7/11-7/13, 2012)
- [70] Gen Chiaki, Naoki Yoshida, Tetsu Kitayama, Takaya Nozawa: "The low-mass star formation triggered by the early supernova explosions"; the Low-Metallicity ISM (Göttingen, Oct 8–12, 2012)
- [71] Teruyuki Hirano: "Measurements of spin-orbit angles and implications of planetary migration scenarios"; Transiting Planets in the House of the Sun: A Workshop on M Dwarf Stars and Their Planets (Maui, USA, 6/3-6, 2012)
- [72] Teruyuki Hirano, "Detection and Characterization of Transiting Systems with Smaller Exoplanets"; IAU Symposium 293: Formation, Detection, and Characterization of Extrasolar Habitable Planets, (北京, 中国, 8/27-31, 2012)

[73] Toshiya Kashiwagi, Kazuhiro Yahata & Yasushi Suto: "Detection of Far Infrared Emission from Galaxies and Quasars in the Galactic Extinction Map by Stacking Analysis"; GCOE International Symposium on Physical Sciences Frontier (Tokyo, 12/8-9, 2012)

招待講演

- [74] Takahiro Nishimichi: "Scale Dependence of the Halo Bias in General Local-Type Non-Gaussian Models"; WKYC 2012 Conference, (Daejeon, June 2012)
- [75] Toshiya Namikawa: "Recent progress and future prospects of CMB lensing", 3rd Int. Workshop on Dark Matter, Dark Energy and Matter-antimatter Asymmetry, NCTS & LeCosPA, (Taiwan, Dec 29, 2012)
- [76] Atsushi Taruya: "Precision Power Spectrum Calculations for Large Scale Observations"; 17th Rencontres Itzykson - Heart of Darkness: Dark Energy and Modified Gravity @ IPhT (Saclay, 6/18-6/20, 2012)
- [77] Atsushi Taruya: "Fast power spectrum calculation from regularized perturbation theory in weakly nonlinear regime"; WKYC2012 @ KASI (Daejeon, 6/25-6/27, 2012)
- [78] Atsushi Taruya: "Precision calculations for cosmological power spectrum in real and redshift spaces"; The 5th KIAS Workshop on Cosmology and Structure Formation @ KIAS (Soul, 10/29-11/4, 2012)
- [79] Atsushi Taruya: "Precision power spectrum calculation for large-scale structure in real and redshift spaces"; KEK-CPGS-AIU2012 (Accelerators In the Universe 2012) Axion Cosmophysics @ KEK (Tsukuba, 11/6-11/9, 2012)
- [80] Gen Chiaki, Takaya Nozawa, Naoki Yoshida: "Growth of dust grains in a low-metallicity gas and its effect on the cloud fragmentation"; invited talk at INAF, (Rome, May 7, 2012)
- [81] Ayuki Kamada: "Structure Formation in Warm Dark Matter Models"; Workshop Meudon CIAS 2012 WARM DARK MATTER AND GALAXY FORMATION IN AGREEMENT WITH OBSER-VATIONS (CIAS Observatoire de Paris, Chateau de Meudon, Meudon campus, Jun. 6, 2012)
- [82] Teruyuki Hirano, "Measurements of Spin-orbit Angles for Multiple Systems: Sky-projected and Lineof-sight"; Exoplanets in Multi-body Systems in the Kepler Era, (Aspen, USA, 2/9-15, 2013)
- [83] Yasushi Suto: "Detection of Far Infrared Emission from SDSS Galaxies in the SFD Galactic Extinction Map", and "Summary Talk" at 5th KIAS workshop on cosmology and structure formation, (KIAS, Seoul, Korea, October 29-November 2, 2012)

- [84] Naoki Yoshida: "Physics of primordial star formation"; The physics of star formation (Trieste, Italy, October 2012)
- [85] Naoki Yoshida: "Star formation in a lowmetallicity gas"; The low-metallicity ISM (Goettingen, Germany, October 2012)
- [86] Naoki Yoshida: "Three-body chemistry in the early universe"; The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (Fukuoka, Japan, August 2013)
- [87] Naoki Yoshida: "Primordial star formation"; 39th COSPAR General Assembly (Mysore, India, July 2012)
- [88] Naoki Yoshida: "Hunting for the first stars"; GRB in the era of rapid follow-up (Liverpool, UK, June 2012)
- [89] Naoki Yoshida: "Physics of primordial star formation"; The First Stars IV (Kyoto, Japan, May 2012)
- (国内会議)

一般講演

- [90] 西道 啓博、樽家 篤史: "N体シミュレーションによるサブハローの赤方偏移歪みの精密測定"; 天文学会, (大分大学, 9/20, 2012)
- [91] 西道 啓博: "原始揺らぎの非ガウス性がハローバイ アスに及ぼす影響"; RESCEU 観測的宇宙論ワーク ショップ, (東京大学, 11/28, 2012)
- [92] 細川 隆史、大向 一行、Harold W. Yorke: "超大 降着率下での原始星形成: supergiant protostar"; 天文学会 (大分大学、9/20, 2012)
- [93] 藤井 友香: "吸収線の変動で探る地球型惑星の表層環境"; 天文学会春季年会(埼玉大学, 3/20-3/24, 2013)
- [94] 並河 俊弥、Duncan Hanson、高橋 龍一: "不完全 マップからの CMB の弱い重カレンズの再構築法の開 発"、日本物理学会 2012 年秋季大会 (京都産業大学、 9/14, 2012)
- [95] 並河 俊弥: "CMB の弱い重力レンズ再構築法の開発 と宇宙論への応用"、すばる HSC サーベイによるサ イエンス (国立天文台三鷹キャンパス、9/27, 2012)
- [96] 並河 俊弥: "CMB の弱い重力レンズ精密測定に向け た測定手法の開発と宇宙論への応用"、RESCEU 観 測的宇宙論ワークショップ (東京大学本郷キャンパス、 11/27, 2012)
- [97] 並河 俊弥: "CMB の弱い重力レンズ精密測定に向け た測定手法の開発と宇宙論への応用"、第25回理論 懇シンポジウム (つくば国際会議場、12/23, 2012)
- [98] 岡アキラ: "N 体シミュレーションを用いた SDSS LRG バイアスモデルの構築";RESCEU 観測的宇宙 論ワークショップ (東京大学, 11/28/2012)
- [99] 岡アキラ: "N 体シミュレーションを用いた SDSS LRG 非等方クラスタリングの再現とロバストな重力 理論の検証"; 天文学会(埼玉大学, 3/22/2013)

- [100] 白崎正人,吉田直紀,浜名崇: "cosmic shear データ 解析におけるマスク領域の影響"日本天文学会 (大分 大学, 9/20, 2012)
- [101] 白崎正人: "Cosmological Constraints from Weak Lensing Minkowski Functionals" すばる HSC サー ベイによるサイエンス (国立天文台, 9/28, 2012)
- [102] 白崎正人: "重力レンズミンコフスキー汎関数を使った宇宙論的テスト" RESCEU 観測的宇宙論ワークショップ (東京大学, 11/29, 2012)
- [103] 樽家 篤史: "Cosmological studies with SuMIRe"; 「第 12 回 宇宙における時空・物質・構造の進化」研 究会/RESCEU サマースクール (裏磐梯, 7/24-7/27, 2012)
- [104] 樽家 篤史: "パワースペクトルおよび相関関数にお ける赤方偏移ゆがみの高次効果"; 天文学会秋の年会 (大分大学, 9/20, 2012)
- [105] 千秋 元、野沢貴也、吉田直紀: "ダスト成長を考慮した低金属量ガス雲の進化"; Grain Formation Workshop (CPS, Nov 28–30, 2012)
- [106] 千秋 元、野沢貴也、吉田直紀: "Evolution of lowmetallicity collapsing gas clouds considering the growth of dust grains"; 星形成ワークショップ (国 立天文台, Dec 10-12, 2012)
- [107] 千秋 元、野沢貴也、吉田直紀: "Growth of dust grains in low-metallicity collapsing clouds"; ALMA 時代の宇宙構造形成理論研究会 (北海道大学, Jan 26– 28, 2013)
- [108] 鎌田 歩樹: "温かい暗黒物質及び崩壊する荷電重粒 子における銀河ハロー形成"; 日本天文学会秋季大会 (大分大学, 9/20, 2012)
- [109] 平野 照幸, Guillaume Hébrard, 佐藤 文衛, 成田 憲 保, 樽家 篤史, 須藤 靖: "トランジット惑星系のロシ ター効果: HARPS 型分光器の場合のモデル化"; 日 本天文学会 2012 年秋季年会, (大分大学, 9/20, 2012)
- [110] 平野 照幸,成田 憲保,佐藤 文衛,高橋 安大,増田 賢人,竹田 洋一,青木 和光,田村 元秀,須藤 靖: "ト ランジット惑星系のロシター効果:HARPS 型分光器 の場合のモデル化";日本天文学会 2013 年春季年会, (埼玉大学, 3/23, 2013)
- [111] 増田 賢人, 平野 照幸, 樽家 篤史, 長沢 真樹子, 須藤 靖: "KOI-94 系における惑星食の解析"; 日本天文学 会 2013 年春季年会(埼玉大学, 3/20-3/23, 2013)
- [112] 柏木俊哉、須藤靖: "スタック解析による銀河系減光 地図中の系外銀河起源遠赤外放射の検出";日本天文 学会 2012 年秋季年会 (大分大学, 9/19-9/21, 2012)
- [113] 柏木俊哉、須藤靖: "SDSS 銀河のスタック解析によ る遠赤外放射の統計的定量化";日本天文学会 2013 年 春季年会(大分大学,9/19-9/21,2013)
- [114] 吉田 直紀: "ボルツマン方程式の積分"; RESCEU/DENET サマースクール (福島県裏 磐梯, 7/24, 2012)
- [115] Yuxin Xue:"Numerical study of spin-orbit misalignment and realignment"; 日本天文学会 2013 年 春季年会(埼玉大学, 3/20-3/23, 2013)

招待講演

- [116] 樽家 篤史: "宇宙大規模構造と非ガウス性"; 物理学 会年次大会 (広島大学, 3/27, 2013)
- [117] 千秋 元、野沢貴也、吉田直紀: "Low-mass star formation triggered by early supernova explosions and growth of dust grains"; (ISAS/JAXA, Dec 25, 2012)
- [118] 平野 照幸: "Measurements of Stellar Inclinations for Transiting Exoplanets: New Data and New Approach"; 第 8 回「太陽系外惑星大研究会」, (熱海, 4/18, 2012)
- [119] 平野 照幸: "高分散分光を用いた惑星探査の現状と 将来計画"; トランジット観測によるスーパーアース の大気組成と起源の解明, (岡山, 9/26, 2012)
- [120] 平野 照幸: "太陽系外惑星の観測による惑星系進化の 解明"; 複合的アプローチで探る宇宙の化学進化,(伊 豆高原, 10/27, 2012)
- [121] 細川 隆史: "初期宇宙での大質量星形成";
 第 25 回理論懇シンポジウム (つくばエポカル, 12/22, 2012)
- [122] 吉田 直紀: "天体宇宙物理分野"; 第 25 回 理論懇 シンポジウム (茨城県エポカルつくば, 12/22, 2012)
- (セミナー)
- [123] 西道 啓博: "一般的な局所型非ガウス性を持つ原始 揺らぎの宇宙の大規模構造への影響";宇宙物理学理 論グループセミナー,(東京工業大学,5/15,2012)
- [124] 西道 啓博: "宇宙の大規模構造を巡る最近の理論的 進展"; 宇宙物理学教室理論雑誌会, (京都大学, 12/11, 2012)
- [125] Yuka Fujii: "Exploring the Landscape of Habitable Exoplanets via Their Disk-integrated Colors and Spectra: Indications for Future Direct Imaging Observations"; American Museum of Natural History (New York City, USA, Nov 7, 2012)
- [126] Yuka Fujii: "Exploring the Landscape of Habitable Exoplanets via Their Disk-integrated Colors and Spectra: Indications for Future Direct Imaging Observations"; Center for Astrophysics (Cambridge, USA, Nov 19, 2012)
- [127] Yuka Fujii: "Exploring the Landscape of Habitable Exoplanets via Their Disk-integrated Colors and Spectra: Indications for Future Direct Imaging Observations"; Penn State University (State College, USA, Nov 30, 2012)
- [128] Toshiya Namikawa: "Weak lensing of CMB and cosmic shear as a probe of non-scalar perturbations" Canadian Institute for Theoretical Astrophysics, (Toronto, Canada, Dec 14, 2012)
- [129] Toshiya Namikawa: "Toward a precise measurement of weak lensing signals with CMB and galaxy observations: A theoretical development and its cosmological implications" McGill University, (Montreal, Canada, Dec 6, 2012)

- [130] 並河 俊弥: "CMB の弱い重力レンズを用いた観測 的宇宙論" KEK (筑波, 4/27, 2012)
- [131] Atsushi Taruya: "Gravitational-wave backgrounds from ground- and space-based interferometers"; ACP セミナー (カブリ数物連携宇宙研究機構, 5/15, 2012)
- [132] 樽家 篤史: "宇宙大規模構造の精密理論計算:現状 と課題";宇宙物理学研究室アストロセミナー (広島 大学, 12/21, 2012)
- [133] 須藤靖: "ペイル・ブルー・ドットの色を解読する"、 愛媛大学理学部物理学教室セミナー (2012 年 8 月 8 日)
- [134] 須藤靖: "Deciphering colors of a pale blue dot"、
 宇宙線研究所コロキウム (2012年11月8日)
- [135] 細川 隆史: "初代星の質量降着進化と最終質量";
 (青山学院大学, 11/9, 2012)
- [136] Naoki Yoshida: "Observational Cosmology" Kavli IPMU Colloquium (Kashiwa, Japan, July 25, 2012)
- [137] Naoki Yoshida: "Numerical cosmology for widefield surveys" IoA Colloquium, University of Tokyo (Mitaka, October 4, 2012)
- [138] Naoki Yoshida: "Direct integration of the collisionles Boltzmann equation" Harvard ITC colloquium (Cambridge, USA, February 28, 2013)

(講演)

- [139] 平野 照幸: "トランジット惑星の分光観測と成果"; アジア総研大冬の学校 (国立天文台三鷹, 12/4, 2012)
- [140] 須藤靖: "天文学という文学"、第3回東京大学総合 図書館ブックトーク (2012年5月24日)
- [141] 須藤靖:"ダークエネルギーの謎にどう挑むか"、講 演会「次世代望遠鏡で見る宇宙」(学術情報センター 一橋講堂、2012年10月8日)
- [142] 須藤靖: "天文学者という選択: invaluable ¿ valuable"水戸啓明高校講演 (2012 年 10 月 26 日)
- [143] 須藤靖:"ペイル・ブルー・ドットの本当の色"、講 演会「現代科学の最先端」第八回高知工科大学環境理 工学群(2012年11月26日)
- [144] 須藤靖: "暗黒宇宙を見て、世界の摂理を知る"、タイムドーム明石 講演会、中央区立郷土天文館 (2013年3月10日)
- [145] 吉田 直紀: "きんかんにっしょく"; 幼稚園児向け講 演会 (柏市松葉幼稚園, 5/19, 2012)
- [146] 吉田 直紀: "宇宙が光で満たされるまで"; 七夕講演 会 (多摩六都プラネタリウム, 7/7, 2012)
- [147] 吉田 直紀: "宇宙はどこまで分かったのか"; 数理の 翼 夏季セミナー (川崎市青少年の家, 8/7, 2012)
- [148] 吉田 直紀: "宇宙は謎で満たされている"; ナガセ 大 学学部研究会 (東京国際フォーラム, 8/21, 2012)
- [149] 吉田 直紀: "宇宙はどこまで分かったのか"; 柏市幼稚 園協会研修会 (さわやかちば県民プラザ, 8/24, 2012)
- [150] 西道 啓博: "加速宇宙の謎に挑む"; 知の講座 第4 回, (流山市生涯学習センター, 10/21, 2012)

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である。量子情報を用いると 古典情報とはクラスの違う情報処理が可能となるた め、古典情報処理の限界を超えるブレークスルーの 候補として注目を集めている。

今年度は、村尾美緒准教授、Peter Turner 助教、 博士課程大学院生の中田芳史氏、杉山太香典氏、仲 山将順氏、若桑江友里氏、修士課程大学院生の秋笛清 石氏、加藤晃太郎氏、中郷孝祐氏、宮崎慈生氏、およ び日本学術振興会外国人研究員の Michal Hajdušek 博士、Fabian Furrer 博士のメンバーで、測定ベース 量子計算、量子計算ネットワーク符号化、量子アル ゴリズム、量子測定(トモグラフィ)、様々な量子計算 のモデルの特徴づけ、量子暗号、量子光学系におけ る量子情報処理、量子制御に関する研究を行い、多 角的な視点から量子情報の理論的研究を進めた。

5.2.1 測定ベース量子計算

測定ベース量子計算は、リソースとなる多粒子の エンタングル状態に対して、個別の粒子への量子測 定を行うことで、ユニタリ演算を実装する量子計算 のモデルである。このモデルにおいては、量子計算 を行うために使われる非局所的なリソースはエンタ ングル状態のみであり、リソース状態のエンタング ルメントの解析によって、量子計算における非局所 性の果たす役割を調べることができる。

熱平衡状態を用いた測定ベース量子計算

量子計算の実現には、非理想的な状況下で不可避 に生じるエラーに対する頑強性を高めることが必要 である。特に、熱励起に起因する熱的エラーは大き なエラー源となる。我々は、熱的エラーの影響下に ある量子状態を記述する有限温度の熱平衡状態をリ ソースとして用いても、測定ベース量子計算が実行 できるようなシステムの研究を行なった。

そして、相互作用クラスターハミルトニアンという相転移現象を示す新しいハミルトニアンを導入することで、このハミルトニアンの有限温度の熱平衡状態をリソースとして用いた測定ベース量子計算の実行可能性を示すことに成功した。すなわち、二次元格子上の相互作用クラスターハミルトニアン系では、相転移温度以下の長距離相関が量子計算の熱的エラー頑強性を著しく向上させることを確認し、三次元格子系では、系の臨界温度よりも低い温度であれば全ての熱的エラーを訂正可能な量子誤り訂正符号が存在することを厳密に示した。この結果は、より高い温度での量子計算を可能にしただけでなく、多体系で現れる協力現象が量子計算においても有益であることを示しており、多体物理学と量子情報の関

係をより緊密に結びつける結果となっている。本研 究は大阪大学基礎工学科特別研究員藤井啓祐氏、京 都大学大学院情報学研究科助教大関真之氏との共同 研究である。[3] [担当:中田、村尾]

グラフ理論を用いた多体エンタングルメントの解析

多体エンタングルメントの定量化は量子情報科学 において基礎的な課題の一つであるが、非常に計算 量的に困難な問題であることが知られている。グラ フ状態は、測定ベース量子計算のリソースとして用 いられるエンタングル状態の一つであり、量子誤り 訂正の符号化においても重要な役割を担う純粋状態 である。我々は、グラフ理論を用いたグラフ状態の 多体エンタングルメント測度の定式化を行なった。

そして、対応するグラフの局所クリフォード同値類 における最小の最大独立集合のサイズによってグラ フ状態が特徴付けられることを示し、与えられたグ ラフ状態に最も近い分離可能状態を従来の方法に比 べて効率良く探索する方法を発見した。特にあるク ラスのグラフ状態においては、効率的に多体距離的 エンタングルメント測度を評価できる。また、異なる エンタングルメント測度間の関係を見出したことに より、ある種の雑音がグラフ状態のエンタングルメン トに与える影響に関する知見を得ることができ、こ の方法は、グラフ状態を更に一般化した weighted グ ラフ状態のエンタングルメントの定量化に対しても 応用可能であることを示した。[4] [担当: Hajdušek、 村尾]

測定ベース量子計算における並列性と因果性の解析

入力・出力の指定されたグラフで記述されるグラ フ状態をリソースとして用いた測定ベース量子計算 において、測定のパラメータによらず何らかのユニ タリ演算を実装するためには、因果関係に注意して 量子ビットの測定順序を慎重に選ぶ必要がある。グ ラフ上で因果関係を記述する causal flow や、その一 般化である gflow と呼ばれる順序構造が、測定ベー ス量子計算における測定の順序構造に対応し、さら に、gflow を用いると causal flow を用いる場合より 量子計算の深さを下げて並列性を高めることができ る場合があることが知られている。

我々はこの順序構造に着目し、causal flow を持つ グラフによって実装されるユニタリ演算を量子回路 モデルに書き換える方法をgflow を持つグラフへと 一般化することに成功した。Causal flow に対する方 法をgflow に対して単純に応用すると、グラフ上の 向き付閉道が量子回路上での非因果的なループ構造 に対応し、非因果的な不整合が出現してしまう。こ のようなループ構造を持つ量子回路は一般的には定 義されないが、グラフ上の向き付閉道が互いに打ち 消し合う構造を持っていると、ループ構造も打ち消 し合って時間順序のうまく定義された量子回路が残 ることを示した。さらに、向き付閉道が相殺すると グラフ上にgflow が存在することが示された。[担当: 宮崎、Hajdušek、村尾]

5.2.2 量子計算ネットワーク符号化

ネットワーク符号化は、限られた通信容量や通信 方向が決まっているネットワークにおいて効率的な通 信を達成するための符号化方法である。我々は、ネッ トワーク符号化の手法を、量子通信のみならず量子 計算も含んだ形での分散型量子情報処理を実装する 量子計算ネットワーク符号化として発展させるため の研究を進めてきた。今年度は、量子通信は各通信 路で1量子ビットに制限されるが、各ノード間での 古典通信は自由に許すという設定において量子計算 ネットワーク符号化の研究を進めた。また、量子計 算ネットワーク符号化の特別な場合として、入力と 出力のノードが一致している場合において、ブロッ ク符号化によって分散型量子計算を効率良く実装す る方法を解析した。

梯子型通信路におけるユニタリ演算の実装可能性

L-梯子型通信路は、2組の入力ノードと出力ノードを結ぶ2本の通信路をとその通信路間のL本の架橋となる通信路によって構成される2入力・2出力のネットワーク通信路である。我々は、L-梯子型通信路においてKraus-Cirac数がLとなる2量子ビットユニタリ演算を、確率1で正確に実装するプロトコルを発見した。さらに、多者間分離可能演算を用いた状態間の変換不可能性を解析するツールを開発することによって、Kraus-Cirac数がL+1となる2量子ビットユニタリ演算の実装はL-梯子型通信路においては不可能であることを示した。これらの結果、L-梯子型通信路において実装可能な2量子ビットユニタリ演算のKraus-Cirac数が架橋通信路の数 Lに一対一に対応することが証明された。[担当:秋笛、村尾]

マルチキャスト量子ネットワーク符号化方法

量子ユニバーサルクローン化と受信端子における 入力次元に依存しないエンタングルリソースを用い ることで、一般の量子ネットワーク上で、同型のグラ フで表現された古典ネットワーク上での古典マルチ キャストネットワーク符号を元にした、マルチキャス ト量子ネットワーク符号の構成法を完成させた。本 研究は、NTTコミュニケーション科学基礎研究所の 尾張正樹博士および加藤豪博士との共同研究であり、 提案したプロトコルは現在特許出願中である。[担当: 村尾]

二体ユニタリ演算の LOCC 実装における資源圧縮

入力と出力ノードが一致している場合において、2 つの異なる入力ノード間に十分な大きさのエンタン グル状態をあらかじめ共有していれば、それを利用 することでLOCC(局所操作と古典通信)によって 確率1で2つの入力ノードにある入力に対して、非局 所的なユニタリ演算を実装できることが知られている。必要なエンタングルメントの大きさは、実装する ユニタリ演算の非局所性を表す指標である Schmidt rank よりも小さくすることはできないことが知られ ているが、Schmidt rank は一般にユニタリ演算の entangling power よりも大きい。

我々は、nペアの入力量子系に同じユニタリ演算 をまとめてかけることで、ブロック符号化により1 ペアあたりに必要なエンタングルメント資源の大き さを全体として Schmidt rank よりも小さくできる かどうかを考察した。 $n \to \infty$ の極限でゲートフィデ リティが1に収束するという条件にすれば、エンタ ングルメント資源の消費量を entangling power まで 減らせることが期待される。我々は、この問題が量 子シャノン理論でよく知られている quantum state merging というプロトコルとよく似た問題に帰着で きることを示した。[担当:若桑、Furrer、村尾]

5.2.3 量子アルゴリズム

位相ランダム状態生成アルゴリズム

位相ランダム状態アンサンブルは、与えられた基 底で状態を展開した際の複素係数の位相のみがラン ダムに分布するような状態アンサンブルであり、時 間に依存しないハミルトニアン動力学で時間発展す る状態の典型的な性質を解析を可能とする。今年度 は、位相ランダム状態アンサンブルを量子情報処理 へ応用することを目的とし、特に実験的実装を念頭 に、実装が比較的容易な対角量子ゲートのみを使用 した量子回路(位相ランダム回路)による位相ラン ダム状態アンサンブル生成方法の解析を行った。

そして、位相ランダム状態アンサンブルのt次までの統計的性質を再現するt-designを、対角量子ゲートのみで生成する量子アルゴリズムを構築し、この場合には、log₂t+1個の量子ビットに同時に作用する対角量子ゲートが必要十分であること示した。更に、tが小さい領域であれば、位相ランダム回路と古典的操作によって、量子状態のランダムサンプリングである、一様ランダム状態アンサンブルのt-designを十分よい精度で近似できること、そして、特に実用的に重要となる一様ランダム状態アンサンブルの2-designは、位相ランダム回路と古典的操作によって厳密に生成可能であることを示した。この方法は、従来知られてた一様ランダム状態アンサンブルの2-designの生成方法に比べ実験での実装が極めて容易である。[担当:中田、村尾]

エネルギー固有状態への射影測定アルゴリズム

エネルギーに対応する演算子であるハミルトニア ンは、量子系の時間発展を決定する演算子であり、エ ネルギーの測定は物理的に大きな意味を持っている。 特に系のエネルギー固有状態への射影測定は、量子 系の度量衡学、熱平衡化、各種の揺らぎの定理の実 験的な確認を実現するために重要である。しかし、未 知のハミルトニアン系に対してエネルギー固有状態 への射影測定を実装する方法は、系を構成する粒子 の数に対して指数関数的に時間がかかるプロセスト モグラフィーを用いた方法しか知られていなかった。 我々は、新たに二つの量子アルゴリズムを提案す ることで、既知のハミルトニアン系に対してのみ適 応可能であった、Shor の位相推定アルゴリズムに基 づくエネルギー固有状態への射影測定の実装方法を、 未知のハミルトニアン系へも適用することに成功し た。第一のアルゴリズムは、未知のハミルトニアン 系に対する制御化された時間発展を近似的に実装す る量子アルゴリズムであり、この量子アルゴリズム は、動的デカップリング効果を用いている。第二のア ルゴリズムは、ユニタリ演算の制御化を行なわずに 系に作用するユニタリ演算子のトレースを求め、さ らにランダム行列理論を用いることでエネルギー固 有値を求める量子アルゴリズムで、DQC1と呼ばれ るクラスの量子アルゴリズムである。この第二の量 子アルゴリズムは、制御化された時間発展の近似精 度の確認にも使われる。これらの二つの量子アルゴ リズムはいずれも、補助量子ビットの初期状態とし て完全混合状態を用いることが特徴である。本研究 はシンガポール国立大学の添田彬仁博士との共同研 究である。[担当:仲山、村尾]

高次詳細釣り合いを満たす熱平衡化アルゴリズム

熱平衡状態 (カノニカル状態) は統計力学の基盤的 な概念であると共に、ハミルトニアンをコスト関数 として選ぶと、そのハミルトニアンの熱平衡状態は 最適化問題の解を一定の確率で与えることができる ため、計算機科学的な資源であると考えることもで きる。熱平衡化は詳細釣り合いを満たすダイナミク スによって実現されるが、系が準安定状態を多く持 つために熱平衡化が難しい系が存在することが知ら れている。準安定状態が現れる理由は、ダイナミク スの局所性にある。そこで我々は、局所性を回避しつ つ詳細釣り合いを満たすことができる新しい量子ア ルゴリズムを開発した。この量子アルゴリズムは自 然界の熱平衡化よりも速い熱平衡化が期待でき、か つ、熱平衡化のための既存の量子アルゴリズムであ る量子メトロポリス法などで用いられる複雑な量子 計算を必要としないという利点を持っている。[担当: 仲山、村尾]

5.2.4 量子測定(トモグラフィ)

量子計算の動作確認には、必要とされる量子状態 が正しく用意されていること、量子状態の操作が正 しく実行されていることの実験的な証明が必要とな る。実験による量子情報処理の妥当性証明に使用さ れる手法のひとつに量子トモグラフィがある。量子 トモグラフィとは、用意した量子状態や量子操作を 実験データから推定する手法の総称であり、量子情 報処理実験において重要な役割を担っている。

有限回測定における推定精度の定量的な評価

量子トモグラフィ実験の推定精度を評価するため には、推定誤差の大きさを正確に評価することが必 要となるが、既存の量子トモグラフィ理論には、測 定器系の情報完全性と測定回数の十分性という、実 験的に達成困難な2条件が仮定されているという問 題がある。我々は、現在のトモグラフィ実験でよく ある測定器系の情報完全性のみを仮定した設定、即 ち、情報完全な測定器系を用いて有限回測定を行う 場合の推定誤差の振る舞いを理論的に解析した。具 体的には、任意の有限次元量子系に対する量子状態 トモグラフィを考え、期待損失と誤差確率という2 つの尺度で推定誤差の評価を行った。

期待損失とは、真の状態と推定した状態の平均的 な大きさのことで、エラーバーを拡張した概念であ る。多くの場合、期待損失は測定データ数に反比例 して減少することが知られていた。我々は新しい推 定方法を提案し、系が任意の有限次元の場合に、こ の反比例の係数の上限を導出した。この上限を用い ることにより、期待損失の上限を評価することが可 能となった。

一方、誤差確率とは、推定した状態が真の状態か ら大きく外れてしまう確率のことで、量子暗号や量 子通信分野で用いられる誤差の尺度である。多くの 場合、誤差確率は測定データ数に対して指数関数的 に減少することが知られていた。我々は、新しい推 定方法を提案し、系が任意の有限次元の場合にこの 減少率の下限と係数の上限を導出した。この下限と 上限を用いることにより、誤差確率の上限を評価す ることが可能となった。[担当: 杉山、Turner、村尾]

5.2.5 様々な量子計算モデルの特徴づけ

量子断熱計算を用いた順序規定されない操作の実装

量子回路モデルにおいては、時間的に順序づけら れた基本ゲート列の積として量子計算が記述され、 回路内にループを含んだり、時間を逆方向に進むこ とは禁止されている。しかし、量子力学の公理にお いて時間の流れという概念は明確に定義されておら ず、上記の制約を超えるような操作を考えることも 可能である。本研究では、そのような操作の一つと して考えられる「時間順序の重ね合わせされた操作」 について考察し、量子断熱計算モデルを用いること によって実装が可能であることを発見した。

我々はまず、量子断熱計算モデルの拡張である量 子断熱ゲートテレポーテーションモデルを用いるこ とにより、より大きいヒルベルト空間を用いること で逐次的なユニタリ演算の積を並列化できることを 示した。この並列化された量子断熱計算モデルにお いては、ハミルトニアンの最終形によってユニタリ 演算の順序を制御することが出来る。さらに、この ユニタリー演算の順序づけを入力状態に応じて重ね 合わせするモデルを考えることにより、「時間順序の 重ね合わせされた操作」が実装可能であることを示 した。[担当:中郷、仲山、Hajdušek、村尾]

Non-Abelian エニオンを用いた量子情報処理

トポロジカル量子計算モデルでは、系のトポロジ カルな性質のみに依存する自由度に量子情報を符号 化することにより、量子計算において不可避的に発 生するエラーを抑えることができる。2次元系のト ポロジカル相に存在が予想されている準粒子である non-Abelian エニオンを用いて計算を行うモデルで は、2+1 次元中の braid で表現される、隣り合う準 粒子の位置の交換によってユニタリ演算が実装され る。我々は braiding のみでユニバーサルな量子計算 を実装できる、 $\nu = 12/5$ の分数量子ホール効果に対 応する Fibonacci エニオンモデルに対して解析を行 なった。

そして、ある特定のクラスのbraidで表される1量 子ビットユニタリ演算は、ユニタリ演算に依存しな い普遍的な方法で制御ユニタリ演算化が可能である こと、また、同じ特定のクラスのbraidを用いて任意 の1量子ビットユニタリ演算を任意の精度で実行出 来ることを示した。さらに、複数のnon-Abelianエ ニオンを異なる場所に配置した場合の遠隔量子情報 処理の具体例として、量子テレポーテーション、局 所操作による状態識別性の解析を行った。[担当:加 藤、Furrer、村尾]

5.2.6 量子暗号

量子メモリがある場合の連続変数の不確定性関係

エントロピー的な不確定性関係は 複数の測定に より生じた結果の統計的な不確定性を評価する良い 基準を与える。近年、エントロピー的不確定性関係 から生じる不等式を量子メモリのある系に拡張する ことによって、不確定性原理と被測定状態-メモリ間 のエンタングルメントとの相互関係が明らかになっ た。このため、拡張されたエントロピー的不確定性 関係の不等式は量子情報、特に量子暗号の分野にお いて有用なツールとなる。我々は拡張された不等式 を連続変数の系に適用する研究を行った。

連続変数系では量子メモリは無限次元を含む任意 のサイズをとりうる。我々はこのような一般的な設定 における条件付き von Neumann エントロピー、条 件付き smooth min エントロピー、条件付き smooth max エントロピーを定義し、拡張された不確定性関 係の不等式がこれらの量で表わされることを示した。 また、特に位置演算子と運動量演算子について、エ ントロピー的な不確定性関係を具体的に求めた。さ らに、新たに定義した連続変数系での種々のエント ロピーが、それぞれに対応する離散系でのエントロ ピーによって近似できることを明らかにし、我々の 定義が離散系の自然な拡張になっていることを示し た。本研究はチューリッヒ工科大学の M. Berta 氏、 V. Scholz 博士、M. Christandle 教授とシンガポー ル国立大学の M. Tomamichel 博士との共同研究であ る。[担当: Furrer]

二者間量子暗号プロトコルにおけるリソース

量子力学は情報論的に安全な量子鍵配送の実装を 可能にするが、一方で、無条件安全性を持たない二 者間の量子暗号プロトコルの原型として、ビットコ ミットメントや紛失送信プロトコルが知られている。 これらのプロトコルは、安全な量子暗号プロトコル の可能性と不可能性の境界を探る際の重要な手がか りとなっており、そのままでは安全でない量子暗号 プロトコルに、どのようなリソースを足せば与えら れた失敗確率を超えて安全なプロトコルが実現でき るかを解析することによって、量子暗号プロトコル への理解を進める研究が行なわれている。

我々は具体的なプロトコルや暗号論的な複雑さに 依存しない形でこの問題を解く理論的枠組みを構築 した。また、与えられたリソースがどの程度暗号プロ トコルの安全性を向上させるかを評価するため、失 敗確率の下限の評価に着目した。そして、最も単純 な2者間のコインフリッププロトコルに対して、失 敗確率の下限を求める問題を非凸な最適化問題に帰 着させ、解くことに成功した。その結果、リソース となる2量子ビット状態のエンタングルメントは失 敗確率の下限の向上には寄与しないことが分かった。 本研究は、シンガポール国立大学の S. Wehner 教授 とパリ・ディドロ大学の I. Kerenidis 教授との共同 研究である。[担当: Furrer]

5.2.7 量子光学系における量子情報処理

量子状態圧縮の実験的実証

同じ状態にあることが保証されている N 個の量子 ビットからなる量子状態は、Schur-Weyl 変換によっ て、log(N+1) 個の量子ビットメモリーに圧縮して 保存することが可能である。我々は、量子光学系に おいて3量子ビットの状態を2量子ビットの状態に 圧縮できることを実験的に実証した。3量子ビット の状態のうち、一つの光子の偏光自由度と経路の自 由度に2量子ビット分の状態を符号化し、もう一つ の光子の偏光自由度に1量子ビット分の状態を符号 化する。これらの3つの自由度の間に適切な操作を 行なうと、3量子ビット分の状態に関する情報を最 初の光子の2量子ビット分の自由度に圧縮すること こつ目の光子は不要となる。我々は、残し ができ、_ た光子に様々な測定を行うことによってこの量子状 態圧縮を分析し、元の3量子ビット系が示す統計に 従うことを示した。本研究はトロント大学の A. M. Steinberg 教授、L.A. Rozama 氏、D. Mahler 氏、A. Hayat 博士との共同研究である。[担当: Turner]

量子光学系での *t*-design の実装

ー様ランダムユニタリ演算子のt-designは、量子 状態を推定する際などに最適な量子測定の探索に重 要な役割を果たすことが知られている。例えば、対

称情報完全 POVM と Mutually unbiased basis は 2design であり、離散変数系においては量子トモグラ フィと量子状態トモグラフィにおける最適測定を与え る。我々は、量子光学系において 1-design と 2-design に対応するユニタリ演算子のアンサンブルを構築す る方法を発見した。干渉計内のモードの総光子数が tの状態の散乱振幅はユニタリ演算の要素のt次の多 項式で表すことができるため、各tに対応する実験 での完全な測定により、多項式をすべて求めること が可能となる。我々は、t = 1, 2, 3の実験を行なうこ とによって、「生成した t-design 集合は t 光子実験の 一様分布を与えるが、t+1光子実験の一様分布を与 えない」という理論的な予言と一致する結果を得た。 このことは、t 光子実験では、個数分解測定が可能で あっても、一様ランダムユニタリ演算子アンサンブ ルと t-design との区別ができないことを示す。本研 究はブリストル大学の J.C.F. Matthews 博士との共 |同研究である。[担当: Turner]

5.2.8 量子制御

相互作用系におけるエンタングルメント制御

量子ビットを実現する物理系としてスピン系を用 いる場合には、スピン間に自然に働く Heisenberg 相 互作用によって2つのスピンが不可避にエンタング ルしてしまうため、量子ビットがデコヒーレンスの 影響を受けやすい。このような望まないスピン間の エンタングルメントが引き起こすデコヒーレンスは、 量子情報処理を実現するために克服すべき課題の-つであるが、相互作用の on/off を完全に制御するこ とは簡単ではないため、対策が難しかった。我々は、 初期状態を適切に選び、各スピンに適当な局所磁場 をかけることによって、相互作用による2スピン間 のエンタングルメント量の変化を実効的にキャンセ ルする方法を発見した。各スピンにかける磁場は相 互作用と同強度の定磁場でよいため、相互作用の制 御に比べると制御が著しく容易であり、この手法は 実験の観点から実用的である。本研究は、国立情報 学研究所根本教授との共同研究である。[担当:中田、 Turner、村尾]

<受賞>

 [1] 杉山太香典、研究奨励賞(博士)、東京大学大学院理 学系研究科、2013年3月25日

<報文>

(原著論文)

- [2] Y. Nakata, P. S. Turner and M. Murao, Phaserandom states: ensembles of states with fixed amplitudes and uniformly distributed phases in a fixed basis, Phys. Rev. A 86, 012301 (2012)
- [3] K. Fujii, Y. Nakata, M. Ohzeki and M. Murao, Measurement-Based Quantum Computation on Symmetry Breaking Thermal States, Phys. Rev. Lett. 110, 120502 (2013).

- [4] M. Hajdušek and M. Murao, Direct evaluation of pure graph state entanglement, New J. Phys. 15, 013039 (2013)
- [5] D. Markham, J. Anders, M. Hajdušek and V. Vedral, *Topological features of good resources for measurement-based quantum computation*, Math. Struc. Comp. Sci. 23, 441 (2013)
- [6] E. Wakakuwa and M. Murao, The chain rule implies Tsirelson's bound: an approach from generalized mutual information, New J. of Phys. 14, 113037 (2012)
- [7] T. Sugiyama, P. S. Turner, M. Murao, Adaptive experimental design for one-qubit state estimation with finite data based on a statistical update criterion, Phys. Rev. A (2012)
- [8] T. Sugiyama, P. S. Turner, and M. Murao, Effect of non-negativity on estimation errors in one-qubit state tomography with finite data, New J. Phys. 14, 085005 (2012)
- [9] A. Soeda and M. Murao, Comparing globalness of bipartite unitary operations acting on quantum information: delocalization power, entanglement cost, and entangling power, Math. Struct. Comp. Science 23, 454 (2013).
- [10] J. Hide, Y. Nakata, M. Murao, Entanglement and the Interplay between Staggered Fields and Couplings, Phys. Rev. A 85, 042303, (2012)
- [11] R. Blume-Kohout and P. S. Turner, *The curious non-existence of Gaussian 2-designs*, to appear in Comm. Math. Phys., arXiv:1110.1042
- [12] M. Banks and M. Murao, *The only women in Town*, Physics World 25 (June), 11, Institute of Physics (2012)
- (特許)
- [13] 日本国内特許(取得)・カナダ特許(取得)・US 特許 (取得)、日本特許番号 5105408 (P5105408), Canadian Patent number 2672046・US Patent number 8189779、発明等の名称(量子プログラム秘匿化装置 及び量子プログラム秘匿化方法/Quantum program concealment apparatus has secret key generator that generates quantum secret key by performing inverse computation of quantum gate matrix with respect to predetermined state of quantum bit space)、国内特許出願日(2007年5月23日出 願)、PCT 特許出願日(2009年2月24日)、出願人 (JST)、発明者(村尾美緒、田中雄)、PCT 特許、特 許登録(日本:2012年10月12日、カナダ: 2012年 5月22日、US: 2012年5月29日)
- [14] 国内特許(出願)、出願番号(特願 2013-069470)、発明等の名称(マルチキャスト量子ネットワーク符号化 方法)、出願日(2013年3月28日)、特許出願人(日本電信電話株式会社、国立大学法人東京大学)、発明者(尾張正樹、加藤豪、村尾美緒)

(学位論文)

- [15] 中田芳史、Analysis of many-body Hamiltonian systems in quantum information、博士論文
- [16] 杉山太香典、Finite sample analysis in quantum estimation、博士論文
- [17] 秋笛清石、Network coding for quantum computation、修士論文

<学術講演>

(国際会議)

一般講演 (selected)

- [18] Y. Nakata, P. S. Turner, M. Murao, *Entanglement of phase-random states*, QCMC2012, Vienna, Austria, July 2012.
- [19] Y. Nakata, P. S. Turner, M. Murao, Phaserandom states and their approximate generation by quantum circuits, QISM2012, Innsbruck, Austria, September 2012.
- [20] Y. Nakata, K. Fujii, M. Ohzeki, M. Murao, Measurement-Based Quantum Com-putation on Symmetry Breaking Thermal States on a 2D square lattice, Quantum Information via Statistical Mechanics, Kyoto, Japan, January 2013
- [21] T. Sugiyama, P. S. Turner, M. Murao, Improvement of Estimation Preciseness via Adaptive Quantum Estimation Schemes, The 2nd Institute of Mathematical Statistics Asia Pacific Rim Meeting, Tsukuba, Japan, July 2012
- [22] T. Sugiyama, P. S. Turner, M. Murao, Evaluation of estimation errors in one-qubit state tomography and their improvement via adaptive design of experiments, AQIS2012, Suzhou, China, August 2012
- [23] T. Sugiyama, P. S. Turner, M. Murao, Understanding boundary effects in quantum state tomography -one qubit case, QCMC2012, Vienna, Austria, August 2012
- [24] S. Nakayama, A. Soeda, M. Murao, No-go theorem for universally constructing exact controlledunitary operation of unknown hamiltonian dynamics, AQIS2012, Suzhou, China, August 2012
- [25] S. Nakayama, M. Murao, A higher order thermalization algorithm, QISM2012, Innsbruck, Austria, September 2012
- [26] S. Nakayama, A. Soeda, M. Murao, An algorithm for implementing quantum measurement of energy, JFLI Meeting on Quantum Information and Computation, Paris, France, March 2013 QCMC2012, Vienna, Austria, July 2012.
- [27] E. Wakakuwa, M. Murao, Chain rule implies Tsirelson's bound, QCMC2012, Vienna, Austria, July 2012
- [28] E. Wakakuwa, M. Murao, Chain rule implies Tsirelson's bound, QIP2013, Beijing, China, January 2013

- [29] S. Akibue, M. Murao, Implementability of twoqubit unitary operations over the butterfly network with free classical communication, QCMC2012, Vienna, Austria, August 2012
- [30] M. Hajdušek, M. Murao, Direct evaluation of entanglement in graph states, QCMC2012, Vienna, Austria, July 2012
- [31] M. Hajdušek, M. Murao, Quantifying entanglement in arbitrary pure graph states, AQIS2012, Suzhou, China, August 2012
- [32] M. Hajdušek, M. Murao, Direct evaluation of pure graph state entanglement, QIP2013, Beijing, China, January 2013
- [33] A. Soeda, Y. Kinjo, P.S. Turner, M. Murao, Implementing controlled-unitary operations over the butterfly network, QCMC2012, Vienna, Austria, August 2012

招待講演

- [34] M. Murao, Universal construction of controlledunitary gate for unknown Hamiltonian dynamics, The International Workshop on Cooperative Quantum Dynamics and Its Control, Jülich, Germany, October 2012
- [35] P. Turner, From optimal tomography to mimicking randomness: quantum t-designs, the Workshop on Mathematical Methods of Quantum Tomography, Fields Institute, Toronto, Canada, February 2013

(国内会議)

一般講演 (selected)

- [36] 中田芳史, Peter S. Turner, 村尾美緒, 位相ランダ ム状態アンサンブルとその近似的生成法, 第 26 回量 子情報技術研究会、福井, 2012 年 5 月
- [37] 杉山太香典, Peter S. Turner, 村尾美緒, パラメタ制 約モデルとしての量子状態推定-1量子ビット系の場 合一、2012年度統計関連学会連合大会, 北海道, 2012 年9月
- [38] 杉山太香典, Peter S. Turner, 村尾美緒, 測定回数が 有限の場合の1量子ビット状態トモグラフィにおける パラメタ制約の影響、日本物理学会 2012 年秋季大会, 神奈川, 2012 年 9 月
- [39] 杉山太香典, Peter S. Turner、村尾美緒, 量子推定に おける推定誤差の有限データ解析、日本物理学会第 68回年次大会, 広島, 2013年3月
- [40] 仲山将順, 添田彬仁, 村尾美緒 Dynamical Decoupling および量子 Zeno 効果を用いたユニタリーゲー トのコントロール化の普遍的実装、第26回量子情報 技術研究会, 福井, 2012 年 5 月
- [41] 仲山将順, 添田彬仁, 村尾美緒, 量子コンピューターを 用いた複雑系ハミルトニアンのスペクトル密度解析、 日本物理学会第68回年次大会, 広島, 2013年3月
- [42] M. Hajdusek, M. Murao, Direct evaluation of pure graph state entanglement, 第 27 回量子情報技術研 究会, 横浜, 2012 年 11 月

5.3 上田研究室

近年のナノサイエンスの発展により、原子や分子、 光子を量子1個の単位で精密に制御・観測をするこ とが可能になってきた。当研究室では、このような 高い制御性を有する系での量子多体問題、ナノ・ス ケールの熱力学、統計力学の基本原理などの解明を 目指して理論研究を行っている。

5.3.1 冷却原子気体

クラスター展開法によるボース系およびフェルミ系 の超流動相転移の研究

冷却フェルミ原子気体のBCS-BECクロスオーバー が実験的に実現され、近年、超流動転移に伴う熱力 学量の振舞が詳細に調べられている。この系は特に 散乱長の発散するユニタリ極限付近において強相関 量子多体系となるため、この系の超流動転移をクロ スオーバー全体に渡って正しく記述する平均場理論 は知られていない。本研究では、この系の相転移を 解析するために、クラスター展開に基づく新しい方 法を提案した。我々は Lee-Yang のクラスター展開 法を一般化し、ボース系およびフェルミ系の超流動 の発現の判定条件である、密度行列の非対格長距離 秩序の発現を記述する方法を明らかにした。我々の 形式は一様系のみならず、トラップポテンシャルの ある冷却原子系でも使える一般的なものである。こ の研究は Physical Review A 誌に掲載された [5]。

スピノル・ボース気体の有限温度相図

内部自由度(スピン)をもった Bose-Einstein 凝縮 体(BEC)においては、スピンに依存する相互作用と 一次、二次ゼーマン効果の競合により様々な相が現 れる。それらの相はスピン空間内において異なった 対称性を持ち、また一般に異なる磁化を持つ。我々 は Hartree-Fock 平均場理論をスピノル系へ拡張する ことによって、有限温度の効果によって相境界や磁 化がいかに変化するかを数値的および解析的に調べ た。凝縮する原子と凝縮しない原子との間のコヒー レント衝突のため、系の凝縮成分が磁化を持つなら ば、非凝縮成分も磁化を持つことになる。先行研究 でしばしば無視されていた非凝縮成分内の非対角コ ヒーレンスが相境界を大きく変えることがわかった。 この研究は Physical Review A 誌に掲載された [6]。

スピノル BEC 中の渦コア構造のトポロジカルな分類

一般に自発的に対称性が破れた系においては、秩 序変数空間(秩序変数が縮退した空間)の第1ホモ トピー群を計算すれば量子渦を系統的に分類するこ とが可能である。しかし厳密に言えば、この分類は 渦コアから十分遠方でのみ成り立つため、渦コア近 傍においては理論のさらなる拡張が必要である。我々は「拡張された秩序変数空間」を定義することによりスピノル BEC における系統的な渦コア構造の分類法を構築した。渦コア構造をトポロジーで分類することの利点は、数値計算をすることなく渦コア構造を予想し、さらに数値計算で見落としてしまっている状態も含め全ての渦コア状態を網羅することが可能となる点である。我々はこの手法をスピン1 BEC に適用し、スピン1 BEC の渦コア構造には異なる磁化の状態が同心円上に現れ、それぞれの同心円に沿った磁化状態には、局在したトポロジカル不変量が存在することを発見した。この研究は Physical Review A 誌に掲載された [7]。

回転二成分ボース気体における量子ホール状態

高速回転する冷却原子気体においては、量子ホー ル系に似た非圧縮性状態が出現することが理論的に 議論されている。スカラー・ボース気体の場合、基底 状態が Read-Rezavi 波動関数と高いオーバーラップ を持つことが示され、非可換統計に従う準粒子の観測 が期待される系として興味を持たれている。我々は、 原子が二つの内部状態を持つ二成分ボース気体にお ける量子ホール状態を厳密対角化法により解析した。 この系では、成分間相互作用を増加させるに従って、 二成分が混成した非自明な量子ホール状態が現れる ことが期待される。解析の結果、(i) Read-Rezavi 状 態の二成分系への拡張である非可換スピン・シング レット状態が形成されること、(ii) 成分内・成分間 の相互作用の比を変えることで異なった量子ホール 状態間の相転移が起きることを示した。この研究は Physical Review A 誌に掲載された [11]。

人エスピン・軌道相互作用のもとでの BEC の分類

強いスピン・軌道相互作用をする(擬)スピン1/2, 1,2のスピノル BEC の基底状態を対称性に基づ いて分類する方法を開発した。SO(2)スピン・空間 回転対称性から離散対称性へと対称性の破れが起こ ると、光格子ポテンシャルが存在しなくても系は自 発的に格子構造を発現することが見出された。例え ば、擬スピン1/2の系では2種類のカゴメ格子が現 れる。また、スピンが2のBECでは1軸と2軸の ネマティック相が交互に並んで格子を組むことが見 出された。擬スピン1/2の系では、平均場状態は時 間反転対称性を常に破るが、多体的な基底状態では 時間反転対称な基底状態が存在することが示される。 この状態は分裂した凝縮体と呼ばれ、原子数が小さ な凝縮体で実現されるものと期待される。この研究 は Physical Review A 誌に掲載された [12]。

連続・離散スケーリング領域をつなぐ新しい三体束 縛状態

2 種類の Fermion からなる 3 粒子系では、2 つ の3粒子束縛状態の存在が知られていた。2種類の Fermion の質量比が大きい場合、Efimov 状態が現れ、 離散スケーリング則を示す。一方質量比が小さい場 合、連続スケーリング則を満たすKartavtsev-Malykh 状態という3粒子束縛状態が存在することが知られ ていた。質量比を変化させた際に連続スケーリング 則・離散スケーリング則の間をどのように移行する かを理解するため、我々は、質量比や粒子間相互作 用の強さを変化させながら3粒子問題を解いた。そ の結果、連続・離散いずれのスケーリング則も満た さない新しい3粒子束縛状態を発見し、Crossover 状 態と命名した。この Crossover 状態を介することで、 連続スケーリング・離散スケーリングの間の移行が 可能になることが分かった。また相互作用の強さ・質 量比を変化させた際に、どの領域にそれぞれの3粒 子束縛状態が存在するか系統的に調べた。その結果、 広いパラメータ領域に Crossover 状態が存在するこ とがわかった。この研究は Physical Review A 誌に 掲載された [14]。

スピノル BEC の流体力学的記述

スピノル BEC の平均場ダイナミクスを記述する 方法の一つに、スピン密度やカレントといった観測 量のみを変数として用いる流体力学的記述法がある。 近年スピン1 BEC のスピンテクスチャを非破壊的 に観測する実験技術が確立され、この流体力学的な 記述法は盛んに研究がされている。我々は、スピン 1 BEC について、スピンの偏極状態の時間的・空間 的な変化に関わらず成り立つ一般的な流体力学方程 式を導出した。得られた方程式群は、粒子密度、ス ピン密度、磁気四重極子 (ネマティックテンソル)密 度、カレントを変数とする閉じた方程式であり、粒 子密度、スピン密度、ネマティックテンソル密度の 連続の方程式と、渦度の方程式からなる。これらの うち渦度の方程式は、広義の Mermin-Ho 関係式と いえる。また、スピン1 BEC の流体力学的方程式 は多成分 Gross-Pitaevskii 方程式と等価であること を示すことができ、フォノンやマグノンの低エネル ギー励起モードを再現することができる。この研究 は Physical Review A 誌に掲載された [15]。

スピノル BEC の Beliaev 理論

内部自由度を持たないBECについては、基底状 態のエネルギーや圧力、音速など様々な物理量を、 平均場理論およびその最低次量子補正の範囲内で解 析的に計算することができる。最近の実験および量 子 Monte-Carlo シミュレーションにより、この最低 次量子補正は、冷却原子気体での相互作用スケール における平均場理論からのずれを適切に記述するこ とが示された。我々はこの理論を拡張し、スピノル BEC の物理量に対する最低次量子補正を与えるスピ ノル Beliaev 理論を構築した。スピノル BEC の励起 モードの中には、線形分散関係をもつ密度波(フォ ノン)に加えて二次的分散関係をもつスピン波(マ グノン)が現れる。量子補正のもと、密度揺らぎに よってマグノンの有効質量が増加することが示され た。つまり、マグノンの運動は他の粒子との相互作 用によって阻害される。さらにマグノンの有効質量 の増加率は異なる二つの相に対して等しいこともわ かった。スピノル波束を利用することで、このよう なマグノンの有効質量の増加や量子揺らぎの効果を 実験的に検出することができると期待される。この 研究は Annals of Physics 誌に掲載された [16]。

5.3.2 量子論および統計力学と情報理論の 融合

Bethe 仮設解を用いた孤立量子系の熱平衡化現象の 研究

孤立量子系における熱平衡化機構として eigenstate thermalization hypothesis (ETH) および typicality が提案されているが、それらの相対的な重要性は議 論されていなかった。その理由は、ハミルトニアン の厳密対角化に要する数値計算コストのために ETH の有限サイズスケーリング解析を行うことが不可能 だったからである。本研究では Bethe 仮説法を用い てこの数値計算コストを大幅に軽減し、ETH の有 限サイズスケーリング解析に成功した。その結果、 typicality が熱平衡化に対し ETH より大きな寄与を することが分かった。この研究は Physical Review E 誌に掲載された [17]。

<受賞>

- E. Yukawa: Poster Award, International Conference on Topological Quantum Phenomena, Nagoya, Japan, 2012.5.16-20.
- [2] 遠藤晋平:日本物理学会秋季大会第1回領域1学生 プレゼンテーション賞(2012年9月).
- [3] 渡辺優:第7回日本物理学会若手奨励賞(日本物理学会、2013年3月).
- [4] 古川俊輔:第7回日本物理学会若手奨励賞(日本物理 学会、2013年3月).

<報文>

(原著論文)

- [5] N. Sakumichi, N. Kawakami, and M. Ueda: Criteria of off-diagonal long-range order in Bose and Fermi systems based on the Lee-Yang cluster expansion method, Phys. Rev.A 85, 043601(1)-043601(19) (2012).
- [6] Y. Kawaguchi, N. T. Phuc, and P. B. Blackie: Finite-temperature phase diagram of a spin-1 Bose gas, Phys. Rev. A 85, 053611(1)-053611(11) (2012).

- [7] S. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda: Topological classification of vortex-core structures of spin-1 Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. A 86, 023612(1)-023612(14) (2012).
- [8] Y. Kawaguchi and M. Ueda: Spinor Bose-Einstein Condensates, Phys. Rep. 520, 253-381 (2012).
- [9] S. Watabe, Y. Kato, and Y. Ohashi: Excitation transport through a domain wall in a Bose-Einstein condensate, Phys. Rev. A 86, 023622(1)-023622(9) (2012).
- [10] S. Furukawa, M. Sato, S. Onoda, and A. Furusaki: Ground-state phase diagram of a spin-1/2 frustrated ferromagnetic XXZ chain: Haldane dimer phase and gapped/gapless chiral phases, Phys. Rev. B 86, 094417(1)-094417(19) (2012).
- [11] S. Furukawa and M. Ueda: Quantum Hall states in rapidly rotating two-component Bose gases, Phys. Rev. A 86, 031604(1)-031604(4)(R) (2012).
- [12] Z. F. Xu, Y. Kawaguchi, L. You, and M. Ueda: Symmetry classification of spin-orbitcoupled spinor Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. A 86, 033628(1)-033628(8) (2012).
- [13] T. Sagawa and M. Ueda: Fluctuation theorem with information exchange: Role of correlations in stochastic thermodynamics, Phys. Rev. Lett. 109, 180602(1)-180602(5) (2012).
- [14] S. Endo, P. Naidon, and M. Ueda: Crossover trimers connecting continuous and discrete scaling regimes, Phys. Rev. A 86, 062703(1)-062703(14) (2012).
- [15] E. Yukawa and M. Ueda: Hydrodynamic description of spin-1 Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. A 86, 063614(1)-063614(11) (2012).
- [16] N. T. Phuc, Y. Kawaguchi and M. Ueda: Beliaev theory of spinor Bose-Einstein condensates, Ann. Phys. 328, 158-219 (2013).
- [17] T. N. Ikeda, Y. Watanabe, and M. Ueda: Finitesize scaling analysis of the eigenstate thermalization hypothesis in a one-dimensional interacting Bose gas, Phys. Rev. E 87, 012125(1)-012125(5) (2013).
- (国内雑誌)
- [18] 池田達彦, 渡辺優, 上田正仁: 孤立量子系でミクロカノ ニカル分布が適用出来るための十分条件とその数値的 検証,素粒子論研究 Vol. 13, No. 1, 299-310 (2012).
- (学位論文)
- [19] Shingo Kobayashi: Theoretical Study on Topological Phenomena in Ultracold Atomic Gases (博士 論文).
- [20] Ken Funo: Theoretical Study on Thermodynamic Work Gain from Entanglement (修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [21] N. Sakumichi, N. Kawakami and M. Ueda: Lee-Yang cluster expansion study of the superfluid transition of an ultracold Fermi gas, International Conference on Frontiers of Cold Atoms and Related Topics, Hong Kong, China, 2012.5.14-17.
- [22] Z. F. Xu, Symmetry classification of spin-orbit coupled spinor Bose-Einstein condensates, International Conference on Frontiers of Cold Atoms and Related Topics, Hong Kong, 2012.5.14-5.17.
- [23] S. Furukawa and M. Ueda: Quantum Hall states in two-component Bose gases under rapid rotation, International Conference on Topological Quantum Phenomena, Nagoya, Japan, 2012.5.16-20.
- [24] S. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda: Topological classification of vortexcore structures in spinor BECs, International Conference on Topological Quantum Phenomena, Nagoya, Japan, 2012.5.16-20.
- [25] S. Endo, P. Naidon, and M. Ueda: Crossover between universal trimers and Efimov trimer, Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics (DAMOP), Anaheim, US, 2012.6.4-8.
- [26] N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, M. Ueda: Beliaev theory of spinor Bose-Einstein condensates, International conference on topological quantum phenomena, Nagoya, Japan, 2012.5.16-5.20.
- [27] K. Funo, Y. Watanabe and M. Ueda: Quantum Maxwell demon, International Workshop : Physics of information, information in physics, and the demon, Institute for Molecular Science, Aichi, 2012.6.27-29.
- [28] T. N. Ikeda, Y. Watanabe, and M. Ueda: Sufficient conditions and their verifications for the applicability of the microcanonical ensemble in isolated quantum systems, International Workshop : Physics of information, information in physics, and the demon, Institute for Molecular Science, Aichi, 2012.6.27-29.
- [29] N. Sakumichi: Lee-Yang cluster expansion study of BCS - BEC crossover, The Fourth Todai-Riken Meeting on ultra-cold atoms and QCD, RIKEN, Wako, Japan, 2012.7.20.
- [30] S. Endo, P. Naidon, and M. Ueda: Crossover trimers connecting continuous and discrete scaling regimes, The 23rd International Conference on Atomic Physics ICAP 2012, Ecole Polytechnique, France, 2012.7.23-27.
- [31] N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, M. Ueda: Beliaev theory of spinor Bose-Einstein condensates, International conference on atomic physics (ICAP 23), Paris, France, 2012.7.23-7.27.

- [32] S. Endo: Crossover trimers connecting continuous and discrete scaling regimes, The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Fukuoka, Japan, 2012.8.20-25.
- [33] N. Sakumichi, Y. Matsuzawa, Y. Suzuki and M. Ueda: Primitivity of the two-particle cluster function with a zero-range attractive s-wave interaction, The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Fukuoka, Japan, 2012.8.20-25.
- [34] S. Endo: Crossover trimers connecting continuous and discrete scaling regimes, Workshop on fewbody calculation of cold-atomic physics, RIKEN, Japan, 2012.8.27-31.
- [35] S. Endo and M. Ueda: Induced Interaction between heavy Fermi polarons, International workshop on ultracold Group II atoms, NICT, Japan, 2012.10.10-12.
- [36] N. Sakumichi, Y. Nishida, and M. Ueda: Lee-Yang cluster expansion approach to BCS-BEC crossover, The 72nd Okazaki Conference on "Ultimate Control of Coherence", Aichi, Japan, 2013.1.8-10.
- [37] S. Furukawa and M. Ueda: Quantum Hall states in rapidly rotating two-component Bose gases, QS²C Theory Forum: International Symposium on "Strongly Correlated Quantum Science", University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2013.1.26-29.
- [38] T. N. Ikeda, Y. Watanabe, and M. Ueda: Finitesize scaling of the Eigenstate Thermalization Hypothesis in Lieb-Liniger model, QS²C Theory Forum: International Symposium on "Strongly Correlated Quantum Science", University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2013.1.26-29.
- [39] N. Sakumichi, Y. Nishida, and M. Ueda: Lee-Yang cluster expansion approach to BCS-BEC crossover, QS²C Theory Forum: International Symposium on "Strongly Correlated Quantum Science", University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2013.1.26-29.
- [40] S. Watabe, and Y. Ohashi: Green's function formalisms of a condensed Bose system meeting the Nepomnyashchii identity, QS²C Theory Forum: International Symposium on "Strongly Correlated Quantum Science", University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2013.1.26-29.
- [41] S. Watabe: Green's function formalisms of a condensed Bose system meeting the Nepomnyashchii identity, FINESS-2013: Finite-Temperature Non-Equilibrium Superfluid Systems, Queenstown, New Zealand, 2013.2.16-20.
- [42] S. Furukawa and M. Ueda: Quantum Hall states in rapidly rotating two-component Bose gases, American Physical Society March Meeting 2013, Baltimore, US, 2013.3.18-22.

招待講演

- [43] M. Ueda: Topological Aspects in Ultracold Atoms, New Directions in Ultracold Atomic Systems, Aspen, USA, 2012.1.8-14.
- [44] M. Ueda: Three Universal Trimers: Efimov, Kartavtsev-Malykh, and Crossover Trimer, International Conference on Frontiers of Cold Atoms and Related Topics, Hong Kong, China, 2012.5.14-17.
- [45] M. Ueda: Topological Aspects in Ultracold Atomic Gases, International Conference on Topological Quantum Phenomena, Nagoya, Japan, 2012.5.16-20.
- [46] Z. F. Xu: Symmetry classification of spinorbit coupled spinor Bose-Einstein condensates, The 5th International Symposium on Cold Atom Physics (ISCAP-V), Three Gorges Yichang, China, 2012.6.23-27.
- [47] M. Ueda: Three Universal Trimers in Ultracold Atoms, Workshop on Quantum Simulations with Ultracold Atoms, Trieste, Italy, 2012.7.16-20.
- [48] S. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda: Topological classification of vortex-core structures in spinor BECs, 21st International Laser Physics Workshop, Calgary, Canada, 2012.7.23-27.
- [49] N. Sakumichi, N. Kawakami and M. Ueda: Criteria of off-diagonal long-range order in Bose and Fermi systems based on the Lee-Yang cluster expansion method, 21st International Laser Physics Workshop, Calgary, Canada, 2012.7.23-27.
- [50] M. Ueda: Three Universal Trimers in Ultracold Atoms, The 23rd International Conference on Atomic Physics, Palaiseau, France, 2012.7.23-27.
- [51] M. Ueda: Information Thermodynamics, Dynamics and Thermodynamics in Isolated Quantum Systems, Santa Barbara, USA, 2012.8.20-24.
- [52] M. Ueda: Maxwell's Demon and Information Thermodynamics, XXVth Marian Smoluchowski Symposium on Statistical Physics: Fluctuation Relations in Nonequilibrium Regime, Krakow, Poland, 2012.9.10-13.
- [53] M. Ueda: Topological Excitations in Ultracold Atoms (keynote speech), Quantum Technologies Conference III, Warsaw, Poland, 2012.9.9-15.
- [54] M. Ueda: Three Universal Trimers in Ultracold Atom, Correlations and Coherence at Different Scales, Ustron, Poland, 2012.9.13-18.
- [55] M. Ueda: Information Thermodynamics and Fluctuation Theorem, The 2013 Berkeley Mini Statistical Mechanics Meeting, Berkeley, USA, 2013.1.11-13.
- [56] M. Ueda: Information Thermodynamics and Fluctuation Theorem, Pushing the Boundaries with Cold Atoms, Stockholm, Sweden, 2013.2.6.

(国内会議)

一般講演

- [57] 川口由紀: スピノール BEC の流体力学的記述、新学 術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロ ジカル量子現象」第8回集中連携研究会 冷却原子気 体とトポロジー、東京大学、2012.6.4-5.
- [58] 小林伸吾、小林未知数、川口由紀、新田宗土、上田正 仁: 拡張されたホモトピー理論によるトポロジカル励 起の分類、新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系に おけるトポロジカル量子現象」第8回集中連携研究会 冷却原子気体とトポロジー、東京大学、2012.6.4-5.
- [59] Z. F. Xu: Symmetry classification of spin-orbit coupled spinor Bose-Einstein condensates、新学術 領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジ カル量子現象」第8回集中連携研究会 冷却原子気体 とトポロジー、東京大学、2012.6.4-5.
- [60] 古川俊輔:回転二成分ボース気体における量子ホール 状態、新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけ るトポロジカル量子現象」第8回集中連携研究会冷 却原子気体とトポロジー、東京大学、2012.6.4-5.
- [61] N. T. Phuc: 内部自由度を持ったボース凝縮体の Beliaev 理論、新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系 におけるトポロジカル量子現象」第8回集中連携研究 会 冷却原子気体とトポロジー、東京大学、2012.6.4-5.
- [62] 遠藤晋平、上田正仁: インバランス Fermi 系におけ るポーラロン間の有効相互作用、日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学、2012.9.18-21.
- [63] 作道直幸、川上則雄、上田正仁: Perron-Frobenius の定理を用いた冷却 Fermi 気体の超流動転移の解 析、日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学、 2012.9.18-21.
- [64] N. T. Phuc、川口由紀、上田正仁: Beliaev theory of spinor Bose-Einstein condensates、2012年日本 物理学会秋季大会、横浜国立大学、2012.09.18-09.21.
- [65] 古川俊輔、上田正仁:高速回転する二成分ボース気体 における量子ホール状態、日本物理学会 2012 年秋季 大会、横浜国立大学、2012.9.18-21.
- [66] 古川俊輔、佐藤正寛、小野田繁樹、古崎昭: スピン 1/2 フラストレート強磁性鎖におけるハルデン・ダイ マー相とベクトル・カイラル相の競合、日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学、2012.9.18-21.
- [67] 渡部昌平、大橋洋士:相互作用する有限温度ボース気体の多体効果その2、日本物理学会2012年秋季大会、横浜国立大学、2012.9.18-21.
- [68] S. Endo: Physical Origin of the Universal Threebody Parameter in Atomic Efimov Physics、第 2 回 John L. Hall 先生 若手研究者との集い、東京大 学、2012.10.8.
- [69] 布能謙、渡辺優、上田正仁: Thermodynamic work gain from entanglement using Maxwell's demon、 第 27 回量子情報技術研究会 (QIT27)、慶応大学、 2012.11.27-11.28.
- [70] 古川俊輔、上田正仁:高速回転する二成分ボース気体 における量子ホール状態、第6回物性科学領域横断 研究会、東京大学、2012.11.27-28.

- [71] 渡部 昌平, 大橋 洋士: Nepomnyashchii identity を 満たす Bose 系の Green 関数、第6回物性科学領域 横断研究会、東京大学、2012.11.27-28.
- [72] 池田達彦, Anatoli Polkovnikov, 上田正仁: 孤立量子 系の操作後の対角エントロピーに 含まれる普遍的な 量子補正、日本物理学会第 68 回 (2013 年) 年次大会、 広島大学、2013.3.26-29.
- [73] 遠藤晋平,上田正仁: インバランス Fermi 系におけるポーラロンのダイナミクス、日本物理学会第68回 (2013年)年次大会、広島大学、2013.3.26-29.
- [74] 小林伸吾、N. Tarantino、上田正仁:トポロジカル励 起共存系における不変量の遷移、日本物理学会第68 回(2013年)年次大会、広島大学、2013.3.26-29.
- [75] 作道直幸、西田祐介、上田正仁: Lee-Yang のクラス ター展開法に基づく BCS-BEC クロスオーバー理論、 日本物理学会第68回(2013年)年次大会、広島大学、 2013.3.26-29.
- [76] N. T. Phuc、川口由紀、上田正仁: First-order quantum phase transition in Bose gases、2012年日本物 理学会年次大会、広島大学、2013.03.26-09.29.
- [77] 布能謙、渡辺優、上田正仁: エンタングルメントからの熱力学的仕事のゲイン、日本物理学会第68回 (2013年)年次大会、広島大学、2013.3.26-29.

招待講演

- [78] 上田正仁: マックスウェルの悪魔と情報熱力学、公開 フォーラムー光科学の新しい可能性に挑戦するー、東 京、2012.8.6.
- [79] 古川俊輔:量子臨界系におけるエンタングルメント・ エントロピー、日本物理学会 2012 年秋季大会 シン ポジウム講演、横浜国立大学、2012.9.18-21.
- [80] 古川俊輔:量子多体系におけるエンタングルメント・エントロピーの研究、日本物理学会第68回(2013年)年次大会若手奨励賞受賞講演、広島大学、2013.3.26-29.
- (セミナー等)
- [81] 作道直幸: Lee-Yang の量子クラスター展開法を用 いた非対角長距離秩序の判定条件、理化学研究所、 2012.04.17.
- [82] S. Furukawa: Spin wave excitations and microscopic model for multiferroic BiFeO₃, Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Korea, 2012.4.30.
- [83] 小林伸吾: Classification of vortex-core structures of spinor BECs、理研セミナー、理化学研究所、 2012.5.8.
- [84] 古川俊輔: 高速回転する二成分ボース気体における量子ホール状態、東京工業大学物性物理学専攻、2012.6.8.
- [85] S. Watabe: Many-body Effect on an Interacting Bose Gas, Summer School on Quantum Many-Body Physics of Ultra-Cold Atoms and Molecules, ICTP, Italy, 2012,7,2-13.

- [86] 池田達彦,渡辺優,上田正仁:孤立量子系においてミクロカノニカル分布が適用出来るための十分条件とその検証,京都大学基礎物理学研究所,2012.7.31.
- [87] S. Endo: Universal physics of three-particle systems in ultracold atoms, Queens University, Belfastm, UK, 2012.7.31.
- [88] 遠藤晋平: 冷却 Fermi 系におけるポーラロン間の有 効相互作用、第 57 回物性若手夏の学校、ぎふ長良川 温泉 ホテルパーク、2012.8.6-10.
- [89] 遠藤晋平: Crossover trimers connecting continuous and discrete scaling regimes、第 57 回物性若手夏の 学校、ぎふ長良川温泉 ホテルパーク、2012.8.6-10.
- [90] 作道直幸:量子クラスター展開法を用いたユニタリー 気体の研究、量子情報処理プロジェクト夏期研修会 2012~量子情報未来テーマ開拓研究会~、沖縄・宮 古島ホテルブリーズベイマリーナ、2012.8.8-18.
- [91] E. Yukawa and M. Ueda: Hydrodynamic Equations of Spin-1 Bose-Einstein Condensates, 量子情 報処理プロジェクト夏期研修会 2012~量子情報未来 テーマ開拓研究会~、沖縄・宮古島ホテルブリーズベ イマリーナ、2012.8.8-18.
- [92] 遠藤晋平: Universal 領域における3粒子束縛状態の物 理とその分類~冷却原子気体における少数多体系研究 の進展~、東京理科大学神楽坂キャンパス、2012.9.5.
- [93] T. N. Ikeda: Finite-size scaling analysis of ETH in Lieb-Liniger gas and related studies, University of Massachusetts Boston, Sep. 28, 2012.9.28.
- [94] T. N. Ikeda: Foundation of quantum statistical mechanics and eigenstate thermalization hypothesis, Boston University, 2012.10.3.
- [95] 古川俊輔: Quantum Hall states in rapidly rotating two-component Bose gases、理研セミナー、理化学 研究所、2012.11.5.
- [96] 小林伸吾: Abe homotopy classification and the topological influence、永長研究室セミナー、東京大 学、2012.11.8.
- [97] 遠藤晋平: 冷却原子気体における Few-body, Many-body Physics、東京理科大学野田キャンパス、 2012.11.9.
- [98] 小林伸吾: Abe homotopy group and topological influence in multiple topological excitation systems、理論インフォーマルセミナー、物性研究所、 2012.11.19.
- [99] 池田 達彦: 対角エントロピー変化に含まれる普遍的 な量子補正と熱力学第二法則、第5回基礎物理セミ ナー合宿、箱根太陽山荘、2012.12.8-12.10.
- [100] 遠藤晋平: 少数多体系の理論的手法、第5回基礎物 理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2012.12.8-12.10.
- [101] 倉持 結: 光子数計数とホモダイン検波の同時測定過 程の解析、第5回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽 山荘、2012.12.8-12.10.
- [102] 作道直幸:量子クラスター展開法による BCS-BEC クロスオーバーの研究、第5回基礎物理セミナー合 宿、箱根太陽山荘、2012.12.8-12.10.

- [103] 布能謙、渡辺優、上田正仁: エンタングルメントからの熱力学的仕事のゲイン、第5回基礎物理セミナー 合宿、箱根太陽山荘、2012.12.8-12.10.
- [104] 古川俊輔: 高速回転する二成分ボース気体における 量子ホール状態、第5回基礎物理セミナー合宿、箱 根太陽山荘、2012.12.8-12.10.
- [105] 渡部 昌平: Green 関数論から見るボース・アイン シュタイン凝縮体の基本的性質、第5回基礎物理セ ミナー合宿、箱根太陽山荘、2012.12.8-12.10.
- [106] N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, M. Ueda: Beliaev theory of spinor Bose-Einstein condensates, Berge Englert group's seminar, Center for Quantum Technology, National University of Singapore, Singapore, 2013.1.9.
- [107] 作道直幸: BCS-BEC クロスオーバーとユニタリー フェルミ気体、核物理×物性セミナー、千葉工業大 学、2013.1.12.
- [108] 古川俊輔: エンタングルメント・エントロピーと共 形場理論、第 27 回数理物理・物性基礎論セミナー、 学習院大学、2013.2.16.
- [109] T. N. Ikeda: The second law of pure state thermodynamics, University of Heidelberg, Germany, 2013.3.5.
- [110] M. Ueda: Symmetry Breaking and Topological Excitations in Bose-Einstein Condensates, Zurich Physics Colloquium, Zurich, Switzerland, 2013.3.6.
- [111] N. Sakumichi: Criteria of Off-Diagonal Long-Range Order in Bose and Fermi Systems Based on the Lee-Yang Cluster Expansion Method, SOLL Seminar, Melbourne, Australia, 2013.3.8.
- [112] 遠藤晋平: Universal 領域における 3 粒子束縛状態 の物理とその分類、九州大学、2013.3.22.

6 一般物理実験

6.1 牧島研究室+中澤研究室

6.1.1 宇宙X線の発見50年

2012 年度は、V. Hess による宇宙線の発見の100 周年 [42] であると同時に、R. Giacconi (2002 年に小 柴名誉教授と同時にノーベル物理学賞を受賞) らが宇 宙X線を発見してから、50 周年にも当たる [40, 68]。 このため 国際的 [48, 53, 54, 55, 56, 62, 61] にも、国 内でも [66, 67, 68, 116]、さまざまな記念シンポジウ ムや講演会が開催された。

6.1.2 科学衛星の運用と稼働状況 [111]

○ 宇宙X線衛星「すざく」

2005 年 7 月 10 日に打ち上げられた宇宙X線衛星 「すざく」は、観測の7年目に入った。放射線損傷に より太陽電池の出力が、徐々に低下しつつあるが、 搭載されたX線 CCD カメラ (XIS; X-ray Imaging Spectrometer) と硬X線検出器 (HXD; Hard X-ray Detector) は、順調に稼働を続けている。我々は本年 度も、衛星および HXD の運用を支援し、搭載装置 の較正を続行し [4]、観測データの解析を進めた。

○ 国際宇宙ステーション搭載 MAXI

2009 年夏に国際宇宙ステーション日本実験棟「き ぼう」の曝露部に搭載された全天X線監視装置 MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) は、理研、JAXA、 東工大、青学大、日大、京大、中央大、宮崎大などに より、少くとも 2014 年度末まで運用が続けられる。 牧島は引き続き、理研・基幹研究所に所属する MAXI チームのチームリーダーを非常勤で兼務した。東大 物理学教室は、MAXI に直接に参加してはいないが、 「すざく」と MAXI の相補性を活かすべく、両者の 連携を支援している [69]。

◦ 後継機 ASTRO-H

「すざく」後継機 ASTRO-Hは、2015 年度に打ち上げが設定され、現在その開発と建造が進んでいる。§6.1.8 に詳しく述べるように、我々はそれに全面的に参加している。

6.1.3 質量降着するブラックホール

ブラックホール (BH) に物質が吸い込まれる際は、 静止質量エネルギーの~10% が外界に放射される。



 \boxtimes 6.1.1: *Suzaku* spectra of Cyg X-1 in the High/Soft state. Dark and light gray indicate the data when the 5–10 keV intensity is higher and lower than the average, respectively. Black shows their difference.

降着物質は、~ 0.01 keV から~ 100 MeV まで、広 範囲なエネルギーをもつことができ、その放射は光 子エネルギーにして5桁以上にもわたる。

○ 恒星質量ブラックホール

「はくちょう座 X-1」(Cyg X-1)は、1970年代半 ばに小田稔らの観測にもとづき、ブラックホールと して認定された最初の天体で、質量降着する恒星質 量 BH の代表格である。鳥井、牧島らは理研の山田 らと協力することで、今年度は3編の論文を出版す ることができ[13, 14, 15]、結果の一部を、理研主導/ 東大副主導で、新聞記者発表した[121]。

ソフト状態では Cyg X-1 の放射の大部分は、円盤 からの多温度黒体放射で説明できるが、硬 X 線まで 伸びるハードテールの起源は不明である。そこで鳥 井らは「すざく」で Cyg X-1 のソフト状態を観測 したデータを用い、5-10 keV 以上で強度が平均以上 の時と、それ以下の時のスペクトルを求めたところ、 両者の差分スペクトルは、元のスペクトルと形が 5 keV 以上でほぼ一致した (図 6.1.1)。よって差分成分 は、ハードテール自身である可能性が高く、それは 円盤放射が非熱的な電子雲によりコンプトン化され たモデルで、再現できた [54, 74, 87]。

○ 巨大ブラックホールと活動銀河核

銀河の中心にある巨大 BH にガスが降着すると、 活動銀河核 (AGN)となる。AGN では円盤放射が、 星間吸収の強い真空紫外領域に来るため、複雑なス ペクトル成分を切り分けることが難しい。この手詰 まり状態を打開すべく野田らは、「すざく」で得た広 帯域のスペクトルを、変動を手掛かりに成分分解す る、C3PO (Count Court Correlation with Positive Offset)と呼ぶ手法を開発した。その結果、謎だった 「軟 X 線超過現象」が、コンプトンコロナの非一様 性に起因することを立証した [9, 115]。野田らはこの 方法を NGC 3516 の 3-45 keV の広帯域放射に適 用し、図 6.1.2 のように、遠方の中性ガスによる反 射成分 (鉄の蛍光輝線を伴う)を時間変動のみから 抽出することにも成功し [53, 59, 83, 110]、さらにこ

6.1. 牧島研究室+中澤研究室

のバンドで、硬く吸収された形をもち、変動の遅い、 新しい成分を発見した [63, 92]。その正体の究明は、 ASTRO-H (§6.1.8)の重要な研究テーマである。

野田らは、NGC 3516 を 2013 年度に6回にわけ、 合計 300 ksec にわたり「すざく」で観測する提案を 行い、採択された。さらに東大天文センターなどの 協力を得て、名寄市「ピリカ」、東大木曽シュミット、 東工大 MITSuME、西はりま「なゆた」、広島「か なた」など中口径の可視光望遠鏡を総動員し、「すざ く」と同時観測を行う計画も立ち上がった。

2011年11-12月、代表的なセイファート銀河であ るNGC 4515が大増光し、「すざく」で緊急観測さ れた。表らがそのデータを、2006年の静穏期と比較 しつつ解析した結果、連続成分は4倍に増光したが、 鉄輝線や反射成分の強度は、3割程度の増加にすぎ ないことがわかった。よってこれらの2次成分は、中 心BHから遠く離れた領域で発生していると考えら れる。明るい時のスペクトルには、相対論的に広がっ た鉄輝線が確認されたが、その等価幅は遠方でのも のの半分程度で、発生源となる円盤の内縁半径も、重 力半径の > 14倍であることが判明した [84, 102]。



 \boxtimes 6.1.2: $\nu F\nu$ spectra of the Syefert galaxy NGC 3516, obtained with *Suzaku*. The variable (light gray) and invariant (black) components, derived with the novel C3PO method, were described successfully and simultaneously with the total spectrum (dark gray).

○ ULX 天体

近傍銀河に見られる ULX 天体 (Ultra-Liminous Xray Sources) は、恒星質量 BH と巨大 BH の間を結ぶ、 「中質量 BH」の候補として注目される (Makishima + 2000)。小林らは宇宙研の磯部と協力し、典型的な ULX 天体 Holmberg IX X-1 の「すざく」データを解 析した。その結果、柔い円盤放射と、円盤光子が低 温 (~3 keV) で濃密 (光学的厚み~10) なコロナで コンプトン化された硬い成分との和で、0.5–10 keV のスペクトルを説明できた。また図 6.1.3 のように、 光度が上がるとコンプトン成分の傾きが急になるこ とを発見した [64, 75, 96]。こうした「低温で濃密な コンプトン大気」は、広く見られる概念である可能 性があり、ASTRO-H の良い観測指針となると期待 される [50]。こうした議論により小林は、ASTRO-H Summer School のポスター銀賞を獲得した [1]。



 \boxtimes 6.1.3: The luminosity dependence of the Comptonized spectral slope of the ULX object Holmberg XI X-1, observed with *Suzaku* on two occasions. Filled circles indicate the data in 2012 April, while open circles those in 2012 October. On both occasions, the source exhibited intra-day variations.

6.1.4 中性子星の研究 [48, 49, 65, 67, 89]

中性子星 (NS) は、原子核物理学と密接に関係す る。それらの磁場は $B = 10^{8-15}$ G という広範囲に分 布し、核物質の性質を反映する重要な現象である。牧 島は NS の磁場が、中性子の核磁気モーメント整列に よる強磁性の発現であると提唱している (Makishima +1999) [38, 48, 49, 65, 66, 67, 68, 111, 116]。我々は ASTRO-H (§6.1.8) への継承を念頭に、様々な磁場 強度をもつ NS を、「すざく」により研究している。

○磁場の弱い中性子星

弱磁場 ($B < 10^9$ G) の NS が低質量の恒星と連星 系をなすものを、LMXB (Low-Mass X-ray Binary) と呼ぶ。降着流の挙動は BH の場合に似るが、NS の 硬い表面が存在することで、BH との違いが生じる。

櫻井らは昨年に続き、トランジェントLMXBの代 表例 Aql X-1 の「すざく」データを解析し [6]、中性 子星表面からの黒体放射の半径が、光度とともに変 化することを発見した [56, 70, 71]。光度が高いソフ ト状態では、光学的に厚く幾何学的に薄い標準降着 円盤が接する、NSの赤道面付近から、黒体放射が放 射される。光度が下がりハード状態になると、円盤 は光学的に薄く幾何学的に厚い高温コロナ流へと遷 移し、NS 表面にほぼ等方的に降着するが、光度がよ り下がると放射領域は小さくなる。このときのスペ クトルを図 6.1.4 に示す。これは弱い磁気圏が頭をも たげ、降着流が南北の磁極に絞られる結果と解釈さ れ、X線のパルス検出が期待される。

2012 年 11 月に来日した学振外国人特別研究員の Zhang Zhongli (張仲莉) は、LMXB のコロナの形 状を測定すべく、周期的ディップ現象を示す LMXB (円盤を横から見ている)を研究している。その典型 例である 4U 1916-053 から「すざく」が得た 0.5-50



 \boxtimes 6.1.4: A Suzaku spectrum of Aql X-1 in the hard state. The soft X-ray hump can be identified with optically-thick thermal emission from the NS surface, while the hard continuum can be interpreted as its Comptonization.

keV スペクトル (図 6.1.5) は、LMXB のソフト状態 のモデルにおいて、円盤成分と NS 表面成分をとも に強くコンプトン化することで再現できた。これは コロナが円盤に沿って扁平に広がることを示唆する。

同様な例として櫻井らは、MAXI が発見した新天体 MAXI J0556-332 の性質を知るべく、理研の杉崎らと協力して、米国 RXTE のデータを解析した。その結果、やはり強いコンプトン効果を確認した [94]。この天体も円盤をかなり横から見ていると考えられるので、4U 1916-053 の結果と整合する。

鳥井らは、「すざく」で得られた GS1826-238 の データを解析した。「ぎんが」衛星により 1988 年に 発見されたこの LMXB は、常にハード状態にある。 「すざく」の広帯域スペクトルは、2 種類の光学的に 厚い放射が、同一の電子雲でコンプトン化されたとし て説明できた [95]。よってこの天体は 4U 1916-053 と同様な状況にあるか、この天体の光度がエディン トン光度の 5-10%であることから、ハード状態とソ フト状態の中間的な状態にあるのかもしれない。

○ X線パルサーとサイクロトロン共鳴吸収構造

 $B \sim 10^{12}$ G の強磁場 NS に、連星の相手の星から ガスが降着すると、降着型X線パルサーとなる。それ らのX線スペクトル中には、しばしば電子サイクロ トロン共鳴に基づく構造 (CRSF) が現れ、磁場計測 の切り札となる。埼玉大などと協力した 4U 1626-67 の研究では、通常は吸収線となる CRSF が、特定の パルス位相で、輝線に転じる兆候を見出した [18]。

MAXI により 2012 年 11 月、Be 型主星をもつ再 帰パルサー GRO J1008-57 のX線増光が検知され、 「すざく」で緊急観測された。笹野らは理研の山本 や三原とともにそのデータを解析し、~ 80 keV に CRSF を発見した (図 6.1.5)。得られた磁場 7×10¹² G は、この方法で測定された値の最高記録である。

浅い 0.6 秒のパルスと周期的ディップを示す X 線源 4U 1822-37 は従来、LMXB と考えられてきた。「す ざく」データを解析した笹野らは、そのスペクトル (図 6.1.5) が弱磁場 NS (4U 1916-053 など)のものと は異なり、X線パルサー (GRO J1008-57 など)の ものと似ることに気づき、さらに~30 keV に CRSF の兆候を発見した。よって 4U 1822-37 は、強磁場 NS と低質量星が連星をなす希少例の可能性が高い。



⊠ 6.1.5: Suzaku $\nu F\nu$ spectra of the magnetar 4U 0142+61, and four accreting NS binaries. 4U 1916−053 is a dipping LMXB, GRO J1008−57 is a recurrent transient Be-binary pulsar, 4U 0114+65 is a long-period pulsar, and 4U 1822−37 is a dipping binary consisting of a low-mass star and a possibly strongly magnetized NS.

◦ 超長周期パルサーと SFXT 天体

ー群のX線パルサーは数百~1 万秒の長いパルス 周期をもち、激しく変動する。その例として笹野ら が解析中の 4U 0114+65 (自転周期~1×10⁴ sec) のスペクトルは、図 6.1.5 のように、X線パルサー (GRO J1008-57 や 4U 1822-37) のものに比べ高 エネルギーでの折れ曲がりが弱く、> 40 keV で再 上昇する兆候を示す [79]。このようなスペクトルは、 SFXT (Supergiant Fast X-ray Transient) と呼ばれ る硬X線天体にも共通に見られ [60]、その解釈は今 後の魅力的な課題である。これら NS は通常のX線 パルサーより強い、 $B ~ 10^{13}$ G の磁場をもつ可能 性があり、磁気半径が大きいために自転周期が遅く、 磁気面に蓄えられた大量の物質が間欠的に NS へと 落下することで、激しい変動が生じると想像される。

○ マグネター天体

銀河系やマゼラン雲にある 20 個ほどのX線源は、 10^{14-15} G の超強磁場をエネルギー源としてX線を 放射する特殊な NS、「マグネター」と考えられる。 図 6.1.5 の 4U 0142+61 のように、マグネターはど れも硬軟 2 成分から成る特異なスペクトルを示すこ と、老齢な天体ほど硬成分の強度が下がるが、その 傾きは硬くなることなどが、「すざく」の観測で明ら かにになった [47, 65]。

我々は理研の岩橋、榎戸らと協力し、マグネター 1E 1547-54の静穏時の「すざく」データを解析した結果、HXD 装置でハード成分が検出され、ハード成分とソフト成分の光度比は、2009年1月の活動期に測定された値と大きく違わないことが検証された[12,77]。また早大の中川らと協力し、活動期の

6.1. 牧島研究室+中澤研究室

1E 1547-54 の弱いバーストから、定常放射と同様 なハードテールを検出し [29]、バーストと定常放射 の類似性を強化できた。

今年度は理研の榎戸らと協力し、「すざく」HXD で観測した 4U 0142+61 の 8.7 秒の硬 X 線パルスを 調べたところ、1.5 時間の周期でその位相が、±0.7 秒ほど前後に動く効果を発見した [97]。これは NS の 自由歳差運動の結果と解釈でき、内部に $B \sim 10^{16}$ G のトロイダル磁場が存在する結果、NS の慣性モーメ ントが磁気軸回りではそれに直交する軸回りに比べ、 ~ 1.6×10^{-4} だけ小さいと考えると説明できる。

6.1.5 超新星残骸および中心天体の研究 [89]

超新星残骸 (SNR) は、重い星の進化の終点とし て、重元素の合成とその星間空間への還元の現場と して、宇宙での衝撃波やそれい伴うプラズマ加熱の 例として、また宇宙線など非熱的粒子の加速源とし て、重要である。SNR に付随する NS の有無も、未 解決の部分が多い。我々はビッグバンセンターの平 賀、理研の勝田らと協力し、中野、村上らを中心に、 「すざく」による SNR の研究を進めた。ASTRO-H 衛星 (§6.1.8) は、優れた軟 X 線のエネルギー分解能 や、硬 X 線での撮像能力を活かし、これらの成果を 継承し飛躍的に発展させると期待される。

CTB109 と中心マグネター 1E 2259+586

中野らは 2011 年 12 月に得た、CTB109 の「すざ く」XIS データを解析した。この SNR は特異な半月形 (図 6.1.6 上)をもち、中心にマグネター1E2259+586 を擁す。スペクトル (図 6.1.6 下) は熱的で、顕著な 輝線を示し、温度 0.28 keV と 0.65 keV の 2 温度プ ラズマ放射で再現できた。重元素アバンダンスはほ ぼ太陽組成で、電離非平衡の兆候は弱く、爆発エネ ルギーは ~ $10^{51} \text{ erg s}^{-1}$ 、年齢は 2-3 万年と推定さ れた [55]。このように CTB109 は、重力崩壊型 SNR として典型的で、マグネターを生んだ手掛かりとな る特異性は乏しい。ただし半月形の右縁では、吸収 の増加を伴わずX線輝度が急減しており、謎であっ た。中野らは「すざく」データを調べた結果、輝度 がほぼ一様な部分と、その半分の部分の存在に気づ き、膨張する SNR シェルが巨大分子雲に衝突し、向 こう側のシェルが分子雲の背後に回り込むと、輝度 が半分になるとして、謎を解決した [80]。

残る問題は、CTB109の推定年齢が1E2259+586 の特性年齢(23万年)より、大幅に若いことだった。 中野らは、磁場の減衰を考え再計算すると、マグネ ターの特性年齢はずっと若くなり、この問題が解決で きると論じた[55]。これは、マグネターが真の磁気駆 動NSであることを支持し、マグネターが従来の理解 より若いこと、それらの誕生率はきわめて高く、むし ろ~10¹² Gの磁場をもつNSより、マグネターの方 が多く誕生する可能性まで示唆する[55,65,67,47]。 我々はこの可能性を検証する一環として、磁気活動 を終えつつあるマグネターの末裔を探査すべく、「あ すか」銀河面サーベイで検出された暗い未同定X線 源のうち4例を「すざく」で観測した。

 \circ G330.2+1.0



 \boxtimes 6.1.6: (top) A mosaic X-ray image of the SNR, CTB109, obtained with Suzaku in four pointings. The magnetar 1E 2259+586 is seen at the center. (bottom) An X-ray spectrum of CTB109, with rich emission lines from ionized heavy elements.

この SNR は不完全なシェルをもち、「あすか」に より、非熱的X線が強いことが知られていた。「すざ く」によるデータを解析した村上らは、シェル南西 部のX線で明るい部分は、光子指数 ~ 2.2 の非熱的 スペクトル (おそらくシンクロトロン放射)を示す ことを確認し、中心よりやや東側の明るいスポット からは図 6.1.7 のように、熱的X線放射を検出した [82]。膨張する SNR シェルの運動エネルギーが、プ ラズマ加熱と粒子加速にどう分岐するかは、大きな 謎であり、ASTRO-H で大きく理解が進むと期待さ れる [51]。こうした視点により村上は、ASTRO-H Summer School のポスター銀賞を獲得した [2]。

G330.2+1.0 の中心には、X線の点源が存在する (パルスは未発見)。村上らはそのスペクトルが、マ グネター (図 6.1.5 の 4U 0142+61 など)の軟X線成 分と似ることを見出した [98]。強いトロイダル磁場 と弱い双曲子磁場をもつ、マグネターかもしれない。

6.1.6 銀河面と銀河中心のX線放射の研究

我々の銀河面には、広がった「銀河面X線放射」 (GRXE) が分布し、そのスペクトルには強いFe、S、 Si などの電離輝線が見られる。熱的プラズマ放射と



 \boxtimes 6.1.7: Spectra of the SNR G330.2+1.0, obtained from a south-west rim (upper/thicker data points) and an eastern bright spot (lower/thinner points), with nonthermal and thermal properties, respectively.

して解釈できるが、その発生源は 1980 年代から謎 で、SNR の集まり、暗い点源の集合、ディフューズ な高温プラズマの分布などの説が並立していた。湯 浅らは「すざく」で観測した GRXEのスペクトルが、 質量降着する白色矮星連星と、より柔らかい熱的放 射(おそらく星のコロナやフレア)の和で再現でき ることを示した [21]。その博士学位論文は、Springer Theses として単行本として出版された [44]。

こうして GRXE の正体は点源でほぼ決着したが、 銀河中心から~1°以内には、GRXEと酷似した性 質をもち、かつ表面輝度が1桁以上も高い、「銀河中 心X線放射」(GCXE)が広がる。内山らは「すざく」 の大規模観測データより、このGCXEがGRXEと は明確に異なることを示す、次の2つの事実を発見 した [10, 45, 81]。まず、どちらのX線スペクトルも、 温度の異なるプラズマ2成分からの熱放射の和で説 明できるが、2成分の温度差が、銀河面より中心領 域で、有意に大きかった。さらに京大や国立天文台の 研究者とも協力し、X線スペクトルに見られる電離 鉄輝線の放射率を、近赤外線での星の数密度で割っ たところ、銀河面に比べて中心領域はその比が、2倍 以上も大きかった。このことから、GCXE の方は点 源の集合のみでは説明できず、超巨大ブラックホー ルのジェットと結びついた [11]、真にディフューズ な高温プラズマが存在する可能性が高い。この謎は ASTRO-H (§6.1.8) で解かれると期待している。

6.1.7 銀河団の研究

銀河団は、暗黒物質、X線を放射する高温プラズ マ (ICM=Intra Cluster Medium)、および数十〜数 百のメンバー銀河から成る、宇宙最大の自己重力系 で、その研究は宇宙論に大きな意義を持つ。我々は、 中澤、学振外国人特別研究員の Gu Liyi (顧力意)、 および西田を中心に、銀河団の研究を進めた。

○ 銀河団の宇宙論的進化の新しい描像

我々は独創的な、銀河団の磁気流体的描像 (Makishima +2001) を追求している。それは、「ICM 中を 運動するさい、銀河団のメンバー銀河たちは抵抗を 受け、形態を渦巻きから楕円へと変化させつつ中心に 落下し、そのさい解放する力学的エネルギーが ICM の放射冷却を止め、粒子加速を駆動する」という壮大 な筋書きで、銀河団に関する多くの謎を一挙に解決 する可能性を秘めている。それを証明すべく Gu を 中心に、奈良高専の稲田らと協力し、近傍 (z ~ 0.1) から遠方 (z~0.9) までの 34 個の銀河団に対して、 可視光でのメンバー銀河の空間分布を、X線で求め た高温プラズマの空間分布と比較する作業を続けた。 その結果、図 6.1.8 に示すように、遠方の(若い)銀 河団ではプラズマの周辺部まで銀河が分布するのに 対し、近い(老齢の)系では、プラズマの中心部に銀 河が集中することを、世界で初めて明らかにするこ とに成功した。結果は論文に出版するとともに [28]、 成果を国際学会 [32, 57, 58] や国内学会・セミナー [85, 114, 118] で広く公表した。

この結果は、銀河が ICM と相互作用することで、 宇宙年齢かけてポテンシャル中心に落下してきたこ とを意味し、その相互作用により、銀河で作られた 重元素が、いかにして銀河間空間に運ばれたことも 説明できる。その相互作用の現場を明らかにすべく、 Guらは、国立天文台の八木、阪大の藤田、広島大の 吉田らと協力し、「おとめ座」銀河団で渦巻き銀河か らガスがはぎ取られる現場を、「すばる」望遠鏡など で探査しつつある [100]。さらに ASTRO-H を用い、 大きな視線速度をもつメンバーの周囲で、ICM のX 線放射がドップラーシフトを示すことを検出できれ ば、決定的な証拠となろう。



 \boxtimes 6.1.8: Circularly integrated galaxy light profiles of clusters of galaxies, normalized to circularly integrated mass of their X-ray emitting plasmas. Results on 34 clusters have been averaged into three subgroups with different redshifts z; low (z = 0.11 - 0.22), medium (0.22 - 0.45), and high (0.45 - 0.9).

○ 銀河団の周辺部および非熱的放射

銀河団の周辺部分も宇宙論の実験室として重要で ある。中澤らは昨年度に続き、首都大の大橋、東京理 科大の佐藤や松下、宇宙研の川原田らと協力し、「す ざく」を用いた衝突銀河団と銀河団周辺部の研究を 進めた。Abell 1835 では [26]、ICM の温度勾配や密 度プロファイルの測定から、ICM が静水圧平衡にあ るとして求めた重力場の形状は、弱重力レンズで求めた結果と一致せず、Hydra-A銀河団でも同様な兆候が見られた[7]。いずれも銀河団周辺部でICMに、 乱流、バルク運動、非熱的粒子と磁場など、未知の 圧力が隠されていることを示しており、その解明に は ASTRO-Hの観測が鍵となる。

銀河団はそのスケールの大きさから、超高エネル ギー宇宙線の加速源の候補と見なされている。そこ で中澤らは、山形大の滝沢、SLONの赤松、京都大 学の戸谷、真喜屋らと協力し、銀河団における粒子 加速の手掛かりとなる、非熱的な電波やX線放射を 研究している。Abell 3376 [5]、Abell 3667 [3, 61] な どで、ICM 中の衝撃波と電波放射の関連を調べた。 また衝突中の大規模構造に存在する Abell 1555 や Abell 1558 のX線観測を初めて行ない、熱的放射を 検出するとともに、非熱的放射の上限を得た [8]。

6.1.8 ASTRO-H衛星計画

○ ASTRO-H 衛星とその搭載装置 [36]

ASTRO-H衛星は、米国 NASA および欧州 ESA などとの国際協力を含め、オールジャパンの体制て 開発が進められている、次世代の宇宙 X 線衛星で、 「すざく」の後継機となる。機上には、1-10 keV 域 でX線エネルギーを数 eV の精度で測定する X 線マ イクロカロリーメータ、5-80 keV で集光できる2台 のスーパーミラー硬X線望遠鏡 (HXT)、その焦点面 に置かれる硬 X 線イメジャー (HXI)、1 台の軟X線 望遠鏡とその焦点面に置かれる広視野の X 線 CCD、 60-600 keV で働く軟ガンマ線検出器 (SGD) が搭載 される。これらの協力により、ASTRO-H は広帯域、 高感度、高精度での分光観測を得意とし、高エネル ギー宇宙物理学に大きな貢献を行なう。

ASTRO-Hは長さ14m、重さ2.7tと日本最大の 科学衛星で、HIIA ロケットにより打ち上げられる。 当初は2014年初め(2013年度末)の打ち上げを予定 していたが、東日本大震災により、JAXA つくば宇 宙センターの試験設備に甚大な被害が及んだことな どのため、打ち上げは2015年度に再設定された。

我々は、JAXA ほか国内の大学研究機関、スタン フォード大、フランス CNES などと共同し、中澤およ び内山を中心に研究室の総力を挙げて、HXI と SGD の開発に参加している。2012 年度は、最終試作品を 用いて設計の検証とともに、製造ラインの確立を行っ た。実際に製造をすることで、いくつかの課題が発 見され、この解決に当たった。既に衛星搭載品の製 造は一部が始まっており、残る課題の解決に当たっ ている。

◦ HXI ≿ SGD [33, 34, 72, 86, 90, 91, 103]

HXI は図 6.1.9 の伸展尾部に搭載され、5-70 keV の帯域を 9 分角の視野と 1.7 分角の角分解能で撮像 しつつ、個々のX線のエネルギーを分解能 1.5 keV という高精度で分光する。BGO 結晶シンチレータを 用いたアクティブシールドにより低バックグラウン ド環境を実現し、その中に 4 段の両面シリコンスト リップ検出器と 1 段の両面 CdTe ストリップ検出器

 \boxtimes 6.1.9: Drawing of the *ASTRO-H* satellite, to be launched in 2014. The overall length is 14 m, and the weight is 2.7 t. Also plotted are cross sectional views of the HXI (right: 40 cm tall) and SGD (left: 50 cm tall). Two identical units of each instrument are mounted.

を重ねたイメジャーを搭載する。HXTとHXIの組 み合わせは、従来より2桁よい感度を実現する。

SGD は図 6.1.9 のように、3×2 台の「コンプト ンカメラ」と、それらをとり囲む 25×2 個の BGO 結晶シンチレータで構成される。コンプトンカメラ は、半導体パッド検出器 (シリコンおよび CdTe)を 40 層重ね、その中で光子をコンプトン散乱させ、エ ネルギーと運動量の保存から入射方向を推定するも ので、60-600 keV の帯域で動作し、数度の角度分解 能を持つ。視野を絞った井戸型 BGO アクティブシー ルドの内側に置くことで、バックグラウンドを除去 し、「すざく」HXD より感度を1 桁上げる。

● HXI および SGD の機構開発 [108]

我々は、HXI および SGD 検出器部の機構開発で、 中心的な役割を担っている。中澤らは昨年に続き、炭 素繊維強化プラスチックを用いた、HXI および SGD のハウジング構造の試験を進め、フライト品の製造 に着手した。また SGD センサー部の試作品の最終振 動試験をつくば宇宙センターにて実施した(図 6.1.10 上)。2012 年 5 月の最初の試験では、ラジエータの 強度不足が発覚したため改良を加え、2013 年 3-4 月 の試験で最終的な強度確認がなされた。内山、中野、 小林、村上らは、HXI センサー部の試作品を実際に 組み上げ、熱歪みがアクティブシールドの BGO 結晶 に悪影響を与えないことを検証した(図 6.1.10 下)。

○ HXI および SGD の熱設計 [109]

HXIとSGDは、主検出部にSiやCdTe、アクティ ブシールド部にはAPDなど、多くの半導体素子を 用いるため、検出器の全体を -20℃程度まで放射冷 却する必要がある。しかし両装置ともかなりの内部 発熱をもち、加えてどちらも衛星構体の外に搭載せ





⊠ 6.1.10: (*Top*) SGD-S EM housing vibration tests at Tukuba/JAXA. (*Bottom*) HXI-S EM thermal distortion test at ISAS/JAXA.

ざるをえず(図 6.1.9)、そのため直射日光や地球赤外 線を浴び、日陰では酷寒の宇宙空間を見ることにな る。対流のない宇宙空間で、所期の低温を達成しつ つ、軌道周回や姿勢変更に伴う温度変動を抑えるに は、両装置ともに慎重な熱設計が求められる。

これまでの開発で単体としての基本設計を確認した 上で、2011 年度は衛星全体の熱バランス試験 (Thermal Test Model: TTM 試験) に参加した。特に SGD については、三菱重工との作業分担により、野田を 中心に、東大側が TTM 用のダミー供試体の設計と 製造を行い、。熱数学モデルも独自に開発するなど大 きな貢献を行った。この結果、SGD センサー部の影 響を含めて、衛星全体の熱設計の妥当性を検証する ことができた。



⊠ 6.1.11: Set-up at MHI Komaki factory for measuring the flight model BGO units.

アクティブシールド部の開発 [43, 104, 105, 107]

HXIやSGDの検出感度を究極に左右するものが、 アクティブシールドの性能である。これは主検出部 を複数のBGOシンチレータで隙間なく囲み、その 発光をアバランシェフォトダイオード (APD)で個々 に読み出し、禁止信号を生成することで達成される。 高品位BGO結晶は、ESAの協力により、ロシア無 機化学研究所から、スペアを含めて全数が供給され、 優れた発光特性が確認された。

内山、笹野、西田、中野らを中心に、HXI/SGD 双 方の感度向上の鍵を握る BGO シールドの開発を進 め、特に納品された BGO シンチレータの系統的な 評価を通じて、衛星搭載品の最終仕様を決め、結晶 を選定した。笹野らは、APD と BGO の接着方法を 確立すべく、さまざまな実験室実験を行い、また内 山、西田、笹野らは、三菱重工での製造後に受け入 れ検査をする工程を確立し(図 6.1.11)、その予行演 習を実施した。

鳥井、村上、笹野らは、広島大、早大などと協力 し、アクティブシールドの信号処理部 (APMU)の 開発と試験を行ってきた(図 6.1.12)。FPGAのロ ジック回路も、鳥井他が中心となって開発した大学 側バージョンと、三菱重工が開発したバージョンを、 それぞれ利用しつつ設計検証を進めている。その結 果、BGOの単体測定で利用してきた標準的な実験室 測定系と遜色のないエネルギー閾値が達成されるこ とを確認し、衛星搭載品の開発にめどを付けること に成功した。現在、アナログ部分の最終調整を行い、 最終的な FPGA ロジックを詰めている。



 \boxtimes 6.1.12: A circuit board for the HXI/SGD active shield read-out system.

● HXI 主検出部(イメジャー)の開発 [39]

小林、中野らは JAXA と協力し、HXI 主検出部 (イメジャー) に用いる、両面 Si ストリップ検出器 (DSSD) の開発を行なってきた。DSSD は N 側にも P 側にも、250 µm 間隔で設けられた幅 150µm のス トリップ列 128 本をもつ。

今年度は宇宙研において、HXIカメラ単体での熱 真空試験を実施した。宇宙研の萩野、佐藤とともに、 中野、小林、村上が参加し、放電が起きないこと、お よび対流がない中での検出器の熱伝導設計が予定通 りになされいることを初めて確認した。

中野、小林らは、萩野、佐藤および、名大の望遠鏡 のチームと共同で、SPring-8の長尺ビームラインに おいて、初めて硬X線望遠鏡(HXT)のフライト品 とHXIを組み合わせた測定を実施した。ビームライ ン側で30 keVのラインX線を生成し、これをHXT を通じて、HXI-DSSDに結像することで、光学系と 検出器系を組み合わせた実験を地上で実施できたこ とには大きな意義がある。これを元に、HXT-HXIシ ステムとしての有効面積の評価や、検出器レスポン スの評価を進めている。



 \boxtimes 6.1.13: Tests at SPring-8 (right), where a Hard Xray Telescope (left bottom) was combined with DSSD for the HXI (left top).

● HXI および SGD の後段データ処理部の開発–

HXI、SGDともに、検出器で得られたデータは、 各々の CPU 処理部に送られて機上ソフトで処理さ れた上で、地上に送られる。このデータはさらに地 上ソフトで処理して、クイックルック (QL)と呼ば れるリアルタイム監視システムや、解析ソフトウェ アに入力される。櫻井は、宇宙研の小高、湯浅とと もに、こうした後段処理回路の開発をほぼ一手に引 き受けて実施している。昨年に開発した FPGA を駆 使した検出器シミュレータなどを用い、詳細な試験 を実施するとともに、地上系ソフトの開発を自ら実 施している。こうした試験により、現在までにソフ トウェアの検証はある程度実施され、FPGA 周りの 不具合の修正を実施中である。



 \boxtimes 6.1.14: Digital electronics and command/telemetry software on test.

<受賞>

- 小林翔悟、ASTRO-H International Summer School Poster Silver Medal (京都 2012 年 8 月 21 日)
- [2] 村上浩章、ASTRO-H International Summer School Poster Silver Medal (京都 2012 年 8 月 21 日)

<報文>

(原著論文 (Refereed))

[3] Akamatsu H., de Plaa. J., Kaastra, J., Ishisaki, Y., Ohashi T., Kawaharada M. & Nakazawa K.: "Properties of the Intracluster Medium of Abell 3667 Observed with Suzaku XIS", *Publ. Astron.* Soc. Japan **64**, 49 (2012)

- [4] Yamada, S., Uchiyama,H., Dotani,T., Tsujimoto,M., Katsuda,S., Makishima,K., Takahashi,H., Noda,H., Torii,S., Sakurai,S., Enoto,T. et al. : "Data-Oriented Diagnostics of Pileup Effects on the Suzaku XIS", *Publ. Astron. Soc. Japan* 64, Article No.53 (2012)
- [5] Akamatsu, H., Takizawa, M., Nakazawa, K., Fukazawa, Y., Ishisaki, Y. & Ohashi, T.: "X-Ray View of the Shock Front in the Merging Cluster Abell 3376 with Suzaku", *Publ. Astron. Soc. Japan* 64, Article No.67 (2012)
- [6] Sakurai, S., Yamada, S., Torii, S., Noda, H., Nakazawa, K., Makishima, K., Takahashi, H.: "Accretion Geometry of the Low-Mass X-ray Binary Aquila X-1 in the Soft and Hard States", *Publ. Astron. Soc. Japan* 64, Article No.72 (2012)
- [7] Sato, T., Sasaki, T., Matsushita, K., Sakuma, E., Sato, K., Fujita, Y., Okabe, N., Fukazawa, Y., Ichikawa, K., Kawaharada, M., Nakazawa, K. et al.: "Suzaku Observations of the Hydra A Cluster out to the Virial Radius", *Publ. Astron. Soc. Japan* 64, Article No.95 (2012)
- [8] Makiya, R., Totani, T. & Nakazawa, K.: "Suzaku Observations of Abell 1555 and Abell 1558: Searching for Non-Thermal Emission from Large-Scale Structure Formation", *Publ. Astron. Soc. Japan* 64, Article No.113 (2012)
- [9] Noda, H., Makishima, K., Nakazawa, K., Uchiyama, H., Yamada, S. & Sakurai, S.: "The Nature of Stable Soft X-Ray Emissions in Several Types of Active Galactic Nuclei Observed by Suzaku", *Publ. Astron. Soc. Japan* 65, Article No.4 (2013)
- [10] Uchiyama., H., Nobukawa, M., Tsuru, T. G. & Koyama, K.: "K-Shell Line Distribution of Heavy Elements along the Galactic Plane Observed with Suzaku", *Publ. Astron. Soc. Japan 65*, Article No.19 (2013)
- [11] Ryu, G. S., Nobukawa, M., Nakashima, S., Tsuru, T. G., Koyama, K. & Uchiyama, H.: "X-ray Echo from the Sagittarius C Complex and 500-year Activity History of Sagittarius A*", Publ. Astron. Soc. Japan 65, Article No.33 (2013)
- [12] Iwahashi, T., Enoto, T., Yamada, S., Nishioka, H., Nakazawa, K., Tamagawa, T. & Makishima, K.: "Suzaku Follow-Up Observation of the Activated Magnetar 1E 1547.0-5408", *Publ. Astron.* Soc. Japan 65, in press (2013)
- [13] Yamada, S., Makishima, K., Done, C., Torii, S., Noda, H. & Sakurai, S.: "Evidence for a Cool Disk and Inhomogeneous Coronae from Wide-band Temporal Spectroscopy of Cyg X-1 with Suzaku", *Publ. Astron. Soc. Japan* 65, in press (2013)

- [14] Yamada, S., Torii, S., Mineshige, S., Ueda, Y., Kubota, A., Gandhi, P., Done, C., Noda, H., Yoshikawa, A. & Makishima, K.: "Highly Ionized Fe-K Absorption Line from Cygnus X-1 in the High/Soft State Observed with Suzaku", *Publ. Astron. Soc. Japan* 65, in press (2013)
- [15] Yamada, S., Negoro, H., Torii, S., Noda, H., Mineshige, S. & Makishima, K.: "Rapid Spectral Changes of Cyg X-1 in the Low/Hard State with Suzaku", *Publ. Astron. Soc.J apan* 65, in press (2013)
- [16] Kouzu, T., Tashiro, M. S., Terada, Y., Yamada, S., Bamba, A., Enoto, T., Mori, K., Fukazawa, Y. & Makishima, K.: "Spectral Variation of the Hard X-ray Emission from the Crab Nebula with the Suzaku Hard X-ray Detector", *Publ. Astron.* Soc. Japan 65, in press (2013)
- [17] Fujinaga, T., Mori, K., Bamba, A., Kimura, S., Dotani, T., Ozaki, M., Matsuta, K., Puhlhofer, G., Uchiyama, H., Hiraga, J. S., Matsumoto, H. & Terada, Y.: "An X-ray counterpart of HESS J1427-608 discovered with Suzaku", *Publ. Astron.* Soc. Japan 65, in press (2013)
- [18] Iwakiri, W. B., Terada, Y., Mihara, T., Angelini, L., Tashiro, M. S., Enoto, T., Yamada, S., Makishima, K., Nakajima, M. & Yoshida, A.: "Possible Detection of an Emission Cyclotron Resonance Scattering Feature from the Accretion-powered Pulsar 4U 1626-67", Astrophys. J. 751, article id. 35 (2012)
- [19] Maragutti, R. and 43 co-authors, including Makishima, K., Murakami, T., Ohno, M., Takahashi, T., Tashiro, M. & Terada, Y.: "Inverse Compton X-Ray Emission from Supernovae with Compact Progenitors: Application to SN2011fe", Astrophys. J. 751, article id. 134 (2012)
- [20] Tamura, M., Kubota, A., Yamada, S., Done, C., Kolehmainen, M., Ueda, Y. & Torii, S.: "The truncated disk from Suzaku data of GX 339-4 in the extremely comptonized very high state", Astrophys. J. 753, article id. 65 (2012)
- [21] Yuasa, T., Makishima, K. & Nakazawa, K.: "Broadband Spectral Analysis of the Galactic Ridge X-Ray Emission", Astrophys. J. 753, article id. 129 (2012)
- [22] Rea, N., Israel, G. L., (9 co-authors), Enoto, T., (9 co-authors), Makishima, K., (9 co-authors): "A New Low Magnetic Field Magnetar: The 2011 Outburst of Swift J1822.3-1606", Astrophys. J. 754, article id. 27 (2012)
- [23] Ackermann, M. and 144 co-authors, including Okumura, A., Kamae, T. & Makishima, K.: "Gamma-Ray Observations of the Orion Molecular Clouds with the Fermi Large Area Telescope", *Astrophys. J.* **756**, article id. 4 (2012)
- [24] Yusef-Zadeh, F., Hewitt, J. W., Wardle, M., Tatischeff, V., Roberts, D. A., Cotton, W., Uchiyama,

H., Nobukawa, M., Tsuru, T. G., Heinke, C., Royster, M.: "Interacting Cosmic Rays with Molecular Clouds: A Bremsstrahlung Origin of Diffuse High-energy Emission from the Inner $2^{\circ} \times 1^{\circ}$ of the Galactic Center", *Astrophys. J.* **762**, article id 1 (2013)

- [25] Caballero, I., Pottschmidt, K., (15 co-aurors), Makishima, K., Enoto, T., Iwakiri, W. & Terada, Y.: "A Double-peaked Outburst of A 0535+26 Observed with *INTEGRAL*, *RXTE*, and *Suzaku*", *Astrophys. J. Lett.* **764**, article id. 23 (2013)
- [26] Ichikawa, K., Matsushita, Ky., Okabe, N., Sato, K., Zhang, Y.-Y., Finoguenov, A., Fujita, Y., Fukazawa, Y., Kawaharada, M., Nakazawa, K., (5 co-authors): "Suzaku Observations of the Outskirts of A1835: Deviation from Hydrostatic Equilibrium", Astrophys. J. 766, article id. 90 (2013)
- [27] Odaka, Hi., Khangulyan, D., Tanaka, Y., Watanabe, S., Takahashi, T. & Makishima, K.: "Shortterm Variability of X-Rays from Accreting Neutron Star Vela X-1. I. Suzaku Observations", Astrophys. J. 767, article id. 70 (2013)
- [28] Gu, L., Gandhi, P., Inada, N., Kawaharada, M/. Kodama, T., Konami, S., Nakazawa, K., Shimasaku, K., Xu, H. & Makishima, K.: "Probing of the Interactions Between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters from z = 0.1 to 0.9", Astrophys. J. 767, article id. 157 (2013)
- [29] Enoto, T., Nakagawa, Y. E., Sakamoto, T. & Makishima, K.: "Spectral comparison of weak short bursts to the persistent X-rays from the magnetar 1E 1547.0-5408 in its 2009 outburst", Mon. Not. Roy. Astr. Soc. 427, 2824 (2012)
- [30] Tsuchiya, H., Hibino, K., Kawata, K., Hotta, N., Tateyama, N., Ohnishi, M., Takita, M., Chen, D., Huang, J., Miyasaka, M., Kondo, I., Takahashi, E., Shimoda, S., Yamada, Y., Lu, H., Zhang, J. L., Yu, X. X., Tan, Y. H., Nie, S. M., Munakata, K., Enoto, T. & Makishima, K. "Observation of thundercloud-related gamma rays and neutrons in Tibet", *Phys. Rev. D* 85, id. 092006 (2012)
- [31] Sasano, M., Nishioka, H., Okuyama S., Nakazawa K., Makishima K., Yamada S., Yuasa T., Kataoka J., Fukazawa Y., Hanabata Y. & Hayashi K.: "Geometry dependence of the light collection efficiency of BGO crystal scintillators read out by Avalanche Photo Diodes" *Nuc. Ins. Meth. A.*, in press (2013)
- [32] Gu, L., Gandhi, P., Inada, N., Kawaharada, M., Kodama, T., Konami, S., Nakazawa, K., Shimasaku, K., Xu, H., & Makishima, K.: "Search for Galaxy-ICM Interaction in Rich Clusters of Galaxies, 2013", Astron. Nachrichten, in press (2013)

(会議抄録)

• proc SPIE: Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray, 8443 (2012)

- [33] Kokubun M., Nakazawa K., Enoto T., Fukazawa Y., Kataoka J., Kawaharada M., Laurent P., Lebrun F., Limousin O, Makishima K., Mizuno T., Mori K., Nakamori T., Odaka H., Ohno M., Ohta M., Sato G., Sato R., Tajima H., Takahashi H., Takahashi T., Tanaka T., Terada Y., Uchiyama H., Uchiyama Y., Watanabe S., Yatsu Y., & Yuasa T. : "The Hard X-ray Imager (HXI) for the ASTRO-H mission", id 25
- [34] Watanabe S., Tajima H., Fukazawa Y., Blandford R., Enoto T., Kataoka J., Kawaharada M., Kokubun M., Laurent P., Lebrun F., Limousin O., Madejski G., Makishima K., Mizuno T., Nakamori T., Nakazawa K., Mori K., Odaka H., Ohno M., Ohta M., Sato G., Sato R., Takeda S., Takahashi H., Takahashi T., Tanaka T., Tashiro M., Terada Y., Uchiyama H., Uchiyama Y., Yamada S., Yatsu Y., Yonetoku D., &Yuasa T. : "Soft gamma-ray detector for the ASTRO-H Mission", id 26
- [35] Hagino K., Odaka H., Sato G., Watanabe S., Takeda S., Kokubun M., Fukuyama T., Saito S., Sato T., Ichinohe Yuto., Takahashi T., Nakano T., Nakazawa K., Makishima K., Tajima H., Tanaka T., Ishibashi K., Miyazawa T., Sakai M., Sakanobe K., Kato H., Takizawa S., & Uesugi K. : "Imaging and spectral performance of CdTe double-sided strip detectors for the hard x-ray imager onboard ASTRO-H", id 55
- [36] Takahashi T., et al. : "The ASTRO-H X-ray Observatory", proc SPIE: Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray, 8443, id 1Z
- [37] Nakazawa K., Takahashi T., Ichinohe Y., Takeda S., Tajima H., Kamae T., Kokubun M., Takashima T., Tashiro M., Tamagawa T., Terada Y., Nomachi M., Fukazawa Y., Makishima K., Mizuno T., Mitani T., Yoshimitsu T., & Watanabe S. : "Concept of a small satellite for sub-MeV and MeV all sky survey: the CAST mission", id 0E
- その他の収録
- [38] Makishima, K.: "What are being discovered by the forefront cosmic X-ray observations?", Proc. The 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG11), AIP Conf. Proc. Vol. 1484, pp.161-168 (refereed; 2012)
- [39] Hagino K., Nakano T., Sato G., Takeda S., Odaka H., Watanabe S., Nakazawa K., Kokubun M., Takahashi T., and the HXI/SGD Team: "The Si/CdTe semiconductor detector for hard X-ray imager (HXI) onboard ASTRO-H", proc: HIGH ENERGY GAMMA-RAY ASTRONOMY: 5th International Meeting on High Energy Gamma-Ray Astronomy, 1505, 809-812 (2012)

 [40] 牧島一夫、高橋忠幸:「今年で宇宙 X 線も発見 50 年」 (日本物理学会誌、2012 年 12 月号、p.854)

- [41] 牧島一夫:「理科教育:18歳からの物理、高エネルギー 天体物理学」(パリティ、2013 年 2 月号)
- [42] P. Carlson 原著、牧島一夫 (訳):「宇宙線の一世紀」 (パリティ、2013 年 2 月号)

(学位論文)

[43] 西田瑛量:「宇宙 X 線衛星 ASTRO-H に搭載する BGO アクティブシールドの製作手順とその検証」、修士学 位論文

(著書)

[44] Yuasa, Takayuki: "Suzaku Studies of White Dwarf Stars and the Galactic X-ray Background Emission" (Springer, 2013 April). Springer Theses シ リーズ、物理学分野で、日本から第1期3件の1つと して。

<学術講演>

(国際会議招待講演)

- [45] Uchiyama, H.: "Line Emissions of Highly Ionized Elements from the Center and Plane of Milky Way", Galactic center mini-workshop 2012 at Mitaka (三鷹 国立天文台 2012 年 5 月 11 日)
- [46] Makishima, K.: "How to Maximize the ASTRO-H Science: Seven Recipes" The 8th ASTRO-H Science Working Group Meeting (Cambridge, UK: 2012 July 9–11)
- [47] Makishima, K.: "New Insight into Magnetar Evolution – 10 Current Issues with Magnetars", Current Understanding and Future Study of Magnetars: Research Strategy in the ASTRO-H era (Rikkyo University, 2012 September 1)
- [48] Makishima, K.:" From Sco X-1 to Magnetars: Past, Present, and Future of X-ray Studies of Neutron Stars", X-ray Astronomy: Toward the Next 50 Years (Milano, 2012 October 1–5)
- [49] Makishima, K.: "Physics and Astrophysics of Compact Stars", Quarks to Universe in Computational Science (Nara, 2012 December 13–16)

(国際会議一般講演/ポスター)

- •ASTRO-H International Summer School 2012 (京都, 2012 年 8 月 21 日, poster)
- [50] Kobayashi, S.: "Study of Holmberg IX X-1 with ASTRO-H HXI "
- [51] Murakami, H: "Simulations of non-thermal supernova remnant G330.2+1.0"
- [52] Uchiyama, H.: "Resonance Scattering as a New Probe for the Galactic Center X-ray Emission"
- •X-ray Astronomy: Toward the Next 50 Years (Milano, 2012 October 1–5)

⁽和文記事)

- [53] Noda, H., Makishima, K., Nakazawa, K. & Yamada, S., "Model-Independent Decomposition of Broad-Band Suzaku spectra of AGNs into Primary Coninua and Secondary Components" (oral)
- [54] Torii, S., Yamada, S., Makishima, K., & Nakazawa,
 K.: "Observing Spectral Variations in the Soft State of Cyg X-1 with Suzaku" (poster)
- [55] Nakano, T., Makishima, K., Nakazawa, K., Uchiyama, H. & Enoto, T.: "Solving Age Discrepancy between Magnetars and Associated Supernova Remnants" (oral)
- [56] Sakurai, S., Nakazawa, K., Makishima, K., Yamada, S. & Matsuoka, M.: "Luminosity-Dependent Changes in the Accretion Geometry in Aquila X-1" (poster)
- その他の国際会議
- [57] Gu, L., Inada, N., Konami, S., Kodama, T., Nakazawa, K., Kawaharada, M., & Makishima, K.: "Search for Galaxy-ICM Interaction in Rich Clusters of Galaxies", *Galaxy Clusters as Giant Cosmic Laboratories* (ESAC, Madrid; 2012 May 23)
- [58] Gu, L., Inada, N., Konami, S., Kodama, T., Nakazawa, K., Kawaharada, M., & Makishima, K.: "Search for Galaxy-ICM Interaction in Rich Clusters of Galaxies", 220th American Astronomical Society Meeting (Anchorage; 2012 June 10–14)
- [59] Noda, H., Makishima, K., Yamada, S., Nakazawa, K. & Uchiyama, H.: "A novel picture for the central engine of Seyfert galaxies: multi-zone Comptonization corona near the central black hole", *The* 39th COSPAR Scientific Assembly (Mysore, India; 2012 July 14–22; oral)
- [60] Sasano, M., Enoto, T., Makishima, K., Yamada, S., Nakazawa, K. & Yuasa, T.: "A Comparative Study of SFXTs and Long-Period Pulsars", *The* 39th COSPAR Scientific Assembly (Mysore, India; 2012 July 14–22; oral)
- [61] Sarazin, C., Finoguenov, A., Wik, D., Clarke, T. E., Johnston-Hollit, M., Nakazawa, K. & Ricker, P. 'The Merger Shock in Abell 3667 and the Origin of the Radio Relic", *Half a Century of X-ray Astronomy* (Mykonos Isl., Greece; 2012 Sept.17-21)
- [62] Yamada, S., Makishima, K., Done, C., Noda, H., Torii, S. & Sakurai, S.: "Inhomogeneous coronae and a stable disk of Cyg X-1 revealed with Suzaku", Half a Century of X-ray Astronomy (Mykonos Island, Greece; 2012 September 17-21)
- [63] Noda, H.: "The Origin of Soft and Hard X-ray Excesses in Active Galactic Nuclei" Super Massive Black Holes in the Universe: The Era of the HSC Surveys (Ehime; 2012 December 17–20; poster)
- [64] Kobayashi, S., Makishima, K., Nakazawa, K., Noda, H. &Isobe, N.: "Study of accretion states with y-parameter variations in the ultra luminous

X-ray source Holmberg IX X-1" Spectral/timing properties of accreting objects: from X-ray binaries to AGN (ESAC, Madrid: 2013 April 3)

(国内会議/招待講演)

- [65] 牧島一夫:「中性子星およびマグネータの観測の現状」、 ハドロン物質の諸相(京大基研、2012年8月30日~ 9月1日)
- [66] 牧島一夫:「宇宙 X 線観測の 50 年~50 years of cosmic X-ray observations」、日本物理学会・秋季分科 会(2012年9月12、京都産業大学)、12pSE-1
- [67] 牧島一夫:「X線観測から中性子星に迫る~宇宙X線 50年の歴史を絡めて」、新学術領域研究「実験と観測 で解き明かす中性子星の核物質」キックオフシンポジ ウム(理化学研究所、2012年10月26日~27日)
- [68] 牧島一夫:「宇宙 X 線の 50 年:(1)」、理研シンポジ ウム「宇宙線の発見から 100 年、X線天体の発見か ら 50 年」(理化学研究所、 2012 年 11 月 27 日)
- [69] 牧島一夫:「なぜ宇宙に出るのか~その動機と方法~」、 理研シンポジウム「きぼう」に夢を乗せて(2)(理 化学研究所、2013年3月7日)
- [70] 高橋弘充、桜井壮希:「LMXBの High/Soft 状態に おける変動とその物理的な描像」、コンパクト星連星 の多様性と進化(理化学研究所、2013年3月13日)

(国内会議/一般講演)

- 日本物理学会・秋季分科会(2012年9月11~14日、 京都産業大学)
- [71] 櫻井壮希,中澤知洋,牧島一夫,山田真也,松岡勝, 高橋弘充:「『すざく』で解明された弱磁場中性子星 Aql X-1 における降着流の幾何」、14aSP-2
- [72] 深沢泰司,田島宏康,渡辺伸,内山秀樹,内山泰伸, 榎戸輝揚,太田方之,大野雅功,小高裕和,片岡淳, 川原田円,国分紀秀,佐藤悟朗,佐藤理江,高橋忠 幸,高橋弘充,武田伸一郎,田代信,田中孝明,寺田 幸功,中澤知洋,中森健之,Roger Blandford,牧島 一夫ほか SGD チーム:「ASTRO-H 衛星搭載軟ガン マ線検出器の開発状況」、14aSP-9
- [73] 安東正樹ほか (中澤知洋を含む):「スペース重力波アン テナ DECIGO 計画 (38): DECIGO/DPF」, 11pSN3
- 日本天文学会・秋季年会(2012年9月19日~21日、 大分大学)
- [74] 鳥井 俊輔、牧島 一夫、中澤 知洋、山田 真也:「『す ざく』で観る Cyg X-1 のソフト状態におけるスペク トルの時間変動」、 J07a
- [75] 小林翔悟、牧島一夫、中澤知洋、野田博文 (東大 理)、 磯部直樹:「『すざく』衛星による ULX 天体 HOLM-BERG IX X-1 の観測」、J09a
- [76] 神頭知美、寺田幸功、田代信、山田真也、馬場彩、榎 戸輝揚、森浩二、深沢泰司、田中康之、湯浅孝行、柴 田晋平、牧島一夫:「『すざく』衛星搭載 HXD による Crab の変動追跡 (3)」、J35a

- [77] 岩橋孝典、榎戸輝揚、山田真也、西岡博之、玉川 徹、 牧島一夫:「アウトバーストから1年半経過したマグ ネター 1E 1547.0-5408 の『すざく』衛星による追観 測」、J37a
- [78] 中川友進、山岡和貴、牧島一夫、榎戸輝揚、三原建 弘、杉崎 睦、坂本貴紀、吉田篤正、Poshak Gandhi、 田代 信 、森井幹雄、Kevin Hurley:「『すざく』衛星 による活動期の AXP, 4U0142+614 の観測的研究」、 J47a
- [79] 笹野 理、中澤知洋、牧島一夫、山本堂之、榎戸輝揚、山 田真也:「『すざく』による長周期パルサー4U0114+65 の研究」、J52a
- [80] 中野俊男、牧島一夫、中澤知洋、内山 秀樹、平賀順子、 金田英宏:「『すざく』衛星による超新星残骸 CTB109 の広範囲観測」、 K19a
- [81] 安井一樹、長田哲也、義川達人、西山正吾、IRSF グ ループ、内山秀樹、小山勝二、鶴剛、信川正順、松本 浩典:「銀河系中心の近赤外線観測による星分布とX 線分布の比較」、Q09a
- [82] 村上浩章、牧島一夫、中澤知洋、内山秀樹:「超新星 残骸 G330.2+1.0 における電子の加速限界の推定と 熱的成分の探査」、Q34a
- [83] 野田博文、牧島一夫、山田真也、中澤知洋:「X 線時 間変動のみから抽出する AGN 反射スペクトル:『す ざく』の結果」、S38a
- [84] 表尚平、牧島一夫、中澤知洋、野田博文、平木一至、 深沢泰司、高橋弘充、大野雅功、吉川瑛文、山田真 也、玉川徹:「『すざく』による明るいセイファート銀 河 NGC 4151 の鉄吸収線の研究」、S39a
- [85] Gu, L., Inada, N., Konami, S., Kodama, T., Nakazawa, K., Kawaharada, M., & Makishima, K. "Investigation of Interactions Between ICM and Cluster Galaxies III", T04a
- [86] 中澤知洋、国分紀秀、川原田 円、佐藤悟朗、牧島一夫、 内山秀樹、ほか ASTRO-H HXI チーム:「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI)の現状:FM 設計」、W15a
- 第13回宇宙科学シンポジウム (宇宙科学研究所、2013 年1月7~8日; ポスター)
- [87] 鳥井 俊輔、野田 博文、表 尚平、小林 翔悟、中澤 知 洋、牧島 一夫:「『すざく』によるブラックホール降 着流の包括的研究」
- [88] 中島真也、劉周強、信川正順、内山秀樹、鶴剛、小山 勝二:「すざく衛星で見る銀河系中心の高エネルギー 現象」、
- [89] 笹野 理、桜井壮希、中野俊男、村上浩章、牧島一夫
 :「『すざく』による中性子星と SNR の研究」
- [90] 国分紀秀ほか HXI チーム:「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI)の開発」
- [91] 渡辺 伸ほか ASTRO-H SGD チーム: 「ASTRO-H 軟ガンマ線検出器 (SGD)」
- 日本天文学会・春季年会(2013年3月20日~23日、 埼玉大学)

- [92] 野田博文、牧島一夫、山田真也、中澤知洋:「時間変動から分解する巨大ブラックホール近傍からの複数の一次X線放射」、B23a
- [93] Zhang, Z.: "LMXB populations in galaxy outskirts: evidence for natal neutron star kicks", J01a
- [94] 櫻井壮希、中澤知洋、牧島一夫、杉崎睦、松岡勝:「低 質量 X 線連星 MAXI J0556-332 の X 線スペクトル の時間変動とその放射モデル」、J31c
- [95] 鳥井俊輔、牧島一夫、山岡和貴、山田真也: 「『すざ く』による低質量中性子星連星 GS1826-238 の観測」、 J35a
- [96] 小林翔悟、中澤知洋、野田博文、牧島一夫、磯部直 樹:「『すざく』による ULX 天体 Holmberg IX X-1 の観測 (2)」、J60a
- [97] 牧島一夫、榎戸輝揚:「マグネター 4U 0142+61 にお ける自由歳差運動の徴候」、J72a
- [98] 村上 浩章, 内山 秀樹, 中澤 知洋, 牧島 一夫:「『すざ く』衛星による超新星残骸 G330.2+1.0 の中心天体 の観測」、J73a
- [99] 内山秀樹, 村上浩章, 中澤和洋, 牧島一夫「『すざく』 による銀河中心超新星残骸 Sgr A East からの高階電 離 Mn · Cr Kα 輝線の発見」、K03b
- [100] Gu, L., Yagi, M., Yoshida, M., Nakazawa, K., & Makishima, K.: "X-ray View of the Ha/HI Tails in the Virgo Cluster", Q12a
- [101] 鶴剛、劉周強、信川正順、中島真也、小山勝二、内 山秀樹: 「『宇宙X線トモグラフィ』を用いた天の川 銀河中心領域の巨大分子雲の三次元位置と SgrA*の 過去の活動性の解明」、Q15a
- [102] 表尚平、中澤知洋、野田博文、牧島一夫、平木一至、 深沢泰司、高橋弘充、大野雅功、吉川瑛文、山田真也、 玉川徹:「『すざく』によるセイファート銀河 NGC 4151 の明暗状態の比較」、S09a
- [103] 中澤 知洋、国分 紀秀、川原田 円、佐藤 悟朗、牧島 一夫、内山 秀樹、ほか HXI チーム:「ASTRO-H 衛 星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI)の現状: EM 試験性 能と FM 製造」, W54a
- [104] 西田瑛量,牧島一夫,中澤知洋,内山秀樹,笹野理、 村上浩章ほか:「ASTRO-H衛星搭載装置のアクティ ブシールド用 BGO 試験の現状 (2)」、W65b
- [105]後藤国広、松岡正之、徳田伸矢、高橋弘充、大野雅 功、深沢泰司、湯浅孝行、佐藤悟朗、渡辺伸、国分紀 秀、高橋忠幸、鳥井俊輔、中澤知洋、齋藤龍彦、中森 健之、片岡淳、田島宏康ほか:「ASTRO-H衛星搭載 BGO アクティブシールドの信号処理におけるデジタ ルフィルタの改良」、W64b
- 日本物理学会・春季大会(2013年3月26~29日、広島大学
- [106] 水野恒史ほか(内山秀樹、中澤知洋、牧島一夫を含む):「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器の開発 (2012 年度後半)」、27pBE-5
- [107] 徳田伸矢、後藤国広、大野雅功、高橋弘充、深沢泰司、鳥井俊輔、笹野理、齋藤龍彦、渡辺伸、山岡和

貴、湯浅孝行、国分紀秀、米徳大輔、中澤知洋、牧島 一夫、田島宏康ほか: 「次期 X 線衛星 ASTRO-H 搭 載 BGO シールド部の信号処理ファームウェアの動作 検証」、 27pBE-6

- [108] 木村太輔,田邉利明,水野恒史,深沢泰司,田島宏 康,牧島一夫,中澤知洋,高橋忠幸,太田方之,他 HXI/SGD チーム:「衛星搭載軟ガンマ線検出器用高 精細金属コリメータの性能評価(2)」、27pBE-9
- [109] 太田方之,野田博文,中澤知洋ほか:「X 線衛星 ASTRO-H 搭載 軟ガンマ線検出器の熱設計検証試 験」、27pBE-11
- その他の国内研究集会
- [110] 野田 博文:「X 線時間変動を用いた AGN 一次コンプ トン成分および反射スペクトルの抽出と新解釈」、松 山ブラックホールワークショップ 2012 ~ASTRO-H 衛星で目指すブラックホール研究の新展開~(愛媛大 学、2012 年 6 月 20 日~23 日)
- [111] 牧島一夫:「『すざく』から ASTRO-H へ」、ビッグ バンセンター第 12 回サマースクール (裏磐梯国民休 暇村、2011 年 7 月 24~26 日)
- [112] 内山秀樹:「X線天文公開 FITS データの紹介とその 教材としての利用の可能性」、平成 24 年度天体画像 教育利用ワークショップ(仙台市天文台 2013 年 1 月 13 日)
- [113] 中澤知洋ほか CAST WG:「高感度ガンマ線望遠鏡 CAST」、第3回小型科学衛星シンポジウム(宇宙科 学研究所、2013年3月7-8日)

(セミナー、談話会、集中講義)

- [114] Gu, L., Inada, N., Konami, S., Kodama, T., Nakazawa, K., Kawaharada, M. & Makishima, K.: "Evolution of Galaxy Light and ICM Distributions in Galaxy Clusters", Department of Physics Colloquium, University of Alabama (2012 June 20)
- [115] 野田 博文: 「X 線観測で明らかにする AGN セント ラルエンジンの新描像」、東北大学天文学専攻談話会 (2012 年 5 月 7 日)
- [116] 牧島一夫:「すざく」から ASTRO-H ~~X線天文 学の 50 年」、国立天文台談話会 (2012 年 11 月 2 日)
- [117] 牧島一夫:「コンパクト天体のX線物理学」奈良女 子大学理学部物理学科□大学院集中講義 (2012 年 11 月 21 日~24 日)
- [118] Gu, L., Gandhi, P., Inada, N., Kawaharada, M., Kodama, T., Konami, S., Nakazawa, K., Shimasaku, K., Xu, H. & Makishima, K.: Interaction Between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters, Tamagawa Lab seminar, RIKEN (2013 March 14)
- (一般向け講演、新聞記者発表)
- [119] 牧島一夫:「天の川にひそむ多くの謎」、ビッグバン宇 宙国際センター 2012 七夕講演会(小柴ホール、2012 年7月5日)
- [120] 牧島一夫:「宇宙空間から宇宙を見る」、日本天文学 会公開講演会(埼玉大学、2013年3月24日)

[121] 山田真也、嶺重 慎、根來 均、牧島一夫:新聞記者 発表「ブラックホールに落ち込む最後の1/100 秒の 解明へ~ ガスが最後に放つ高エネルギーX線を初め て捉えた! ~」、(理化学研究所、京都大学、日本大 学、東京大学:2013年4月14日)

6.2 高瀬研究室

高瀬研究室では、主に柏キャンパスの TST-2 装置 を用い、核融合発電の実現を目標に、「トカマク」と 呼ばれるトーラス型プラズマの研究を行っている。特 に磁場によるプラズマ閉じ込め効率の指標である β (= プラズマ圧力/磁場圧力)を高くとれる球状トカ マク(ST)方式による核融合炉の経済性向上を目指 している。TST-2のプラズマ大半径、小半径はおよ そ 0.38 m, 0.25 m であり、最大プラズマ電流、最 大磁場はおよそ 120 kA, 0.3 T である。トカマクプ ラズマを閉じ込め、維持するには、プラズマを加熱 しつつ、プラズマ中に電流(I_p)を駆動する必要が ある。電流駆動の有力な方法として高周波(RF)波 動を使う方法があり、当研究室の主要研究テーマと なっている。2012 年度には、新たに開発したグリル 型アンテナを用いて電流駆動実験を行い、プラズマ 周辺部での RF 磁場測定により、電流駆動に適した 低域混成波(LHW)が励起されていることを確認し た。また、プラズマ電流の局所測定や RF 電場測定 の研究開発を行ったほか、トムソン散乱計測の改良 により,誘導生成プラズマでは,電子温度の非等方 性が見られないことと、 プラズマ電流に起因すると 考えられる散乱スペクトルのシフトを見出した。ト カマクプラズマ中の輸送は乱流による寄与が支配的 であり、その理解はプラズマ閉じ込めの高性能化に 不可欠なので、静電プローブを用い、周辺プラズマ における乱流の基礎研究を行っている。

6.2.1 TST-2 実験

RF プラズマ立ち上げ実験

TST-2 では,ST の発展に重要な,LHW による 非誘導プラズマ生成・立上げ実験が行われている。 2012 年度には、コムラインアンテナに代わって導入 された誘導体充填型導波管列アンテナ(通称グリル アンテナ)を用いた実験を開始した。電流駆動効率 ($\eta_{CD} \equiv \bar{n}_e I_P R/P_{RF}$)は、グリルアンテナとコムラ インアンテナの場合共に I_p の上昇に対して正の相関 があり、同様の値をとることが確認された。現時点 では $\eta_{CD} \sim 10^{16} \text{ Am}^{-2} \text{W}^{-1}$ と低効率だが、 I_p を上 昇させることで効率が改善されると期待される。

高周波磁気プローブ (RFMP) を5つ十字に並べ た5ch-RFMP (図 6.2.16)を用いて LHW の波数 計測を行った。RFMP はスリット付きの金属で遮蔽 されており,計測する磁場の方向を選択できる。プ ラズマ中に $|k_{\parallel}| = 50 \text{ m}^{-1}$ の LHW を励起した際 に計測された LHW の波数は $|k_{\parallel}| = 7.3 \pm 0.5 \text{ m}^{-1}$, $|k_{\perp}| = 13 \pm 1.2 \text{ m}^{-1}$ であり,LHW の分散関係を満 たすことが示された。計測された波数がアンテナが 励起した波数に比べて小さいのは,高い波数の波は プラズマ中で効率よく吸収されるためプラズマ周辺 部では観測されず,低い波数へと変換された吸収さ れにくい波が観測されたからと考えられる。



図 6.2.15: 電流駆動効率のグリルアンテナとコムラ インアンテナを用いた場合の比較。いずれの場合も プラズマ電流の上昇に伴い効率は上昇する。



図 6.2.16: 5ch-RFMP。各 RFMP 間の距離は 30 mm。径方向に移動可能で、中心軸回りに回転可 能である。

TST-2における LHW のプラズマ中心部への伝搬 には 0.3 T 程度の磁場が必要であり,そのためこの 磁場で有効な予備電離ができる 8.2 GHz の電子サイ クロトロン波を使ったプラズマ立ち上げ実験を行っ た。5本の鉛直経路および 4本の水平経路に沿って, 50 GHz のマイクロ波干渉計を用いて測定した線積 分密度より電子密度分布の再構成を行ったところ, 8.2 GHz を用いて立ち上げたプラズマの中心密度は 8.0×10^{17} m⁻³ で, 2.45 GHz を用いて立ち上げた場合 の約 4 倍であった。また、平衡解析によると 8.2 GHz を用いて立ち上げたプラズマでは、プラズマ断面が D 型になっており, 2.45 GHz を用いて立ち上げたプ ラズマとは異なっていた。

静電プローブによる乱流データ測定

プラズマ粒子間の2体衝突過程だけでは説明でき ない輸送過程である異常輸送は、プラズマ中の電磁 的な揺らぎにより引き起こされ、乱流輸送とも呼ば れる。これはプラズマの閉じ込め性能を悪化させる 原因となるため、乱流輸送の物理解明は核融合プラ ズマ研究の最重要課題の一つである。プラズマ乱流 現象は異なったスケールの渦間の相互作用に加え,荷 電粒子が磁場と相互作用することで様々な固有振動 が発生し、揺らぎが引き起こされており、どの固有 振動に基づく揺らぎかによって渦間の相互作用の度 合いや、それによって引き起こされる輸送特性が異 なる。また、ミクロの乱流構造により、ゾーナルフ ローや MHD 揺動といった大域的乱流構造が生成さ れ,乱流輸送に影響を与えることが知られており,そ のメカニズムの解明が急務とされている。トカマク プラズマ周辺部では,異常輸送の原因とされる乱流 の計測に静電プロープがよく用いられる。TST-2に おいて静電プローブを用い、プラズマの境界近傍の 広範な領域で測定を行った結果, プラズマ内の広範 囲において10kHzにパワースペクトルのピークを持 つコヒーレントな MHD 揺動を観測した。また、同 一磁力線上での相関が MHD 揺動と同期して時間変 化しており、静電揺動が MHD 揺動より低い周波数 でモジュレートされていることを観測している。ま た,新たなプラズマ乱流計測手段として,静電プロー ブ,マッハプローブ,三軸磁気プローブを搭載したプ ローブを制作し、プラズマの流速、静電ポテンシャ ル,密度及び磁場の揺動の分布を計測し,磁場揺動 とプラズマ密度搖動に相関があることを確認した。 さらにプラズマ輸送、マクスウェルストレスの評価 を行った結果,両者共に MHD 揺動の寄与が支配的 であり、磁場揺動はポロイダル方向の揺動、プラズ マ流速はトロイダル方向の流速が支配的であること がわかった (図 6.2.17)。



図 6.2.17: トロイダル流速の径方向分布。

200 MHz 波動の静電プローブによる計測

静電プローブは電子やイオンを直接受けることが できるため、LHW のような電子とイオンの運動が関 与する波動を直接計測することが原理的に可能であ る。TST-2 では 200 MHz の LHW を用いているが, これは静電プローブが通常使用される周波数帯の上 限より1桁程度大きい。静電プローブによる測定で は電極からの信号を同軸ケーブルなどで計測器に伝 送するが、200 MHz 程度の高周波になると信号を担 う高周波電流がケーブルのキャパシタンスによって 真空容器に短絡されてしまう。この場合, 短絡された 高周波電流によって測定対象の波動のエネルギーが 持ち去られるため,波動が乱され,測定された信号が プローブ電極近傍の波動を正しく反映していること が保証できなくなる可能性がある。そこで図 6.2.18 のように大きな抵抗を電極の直後に配置し、高周波 においてケーブルのキャパシタンスによりショート されることを防ぎ、プラズマ中の LHW による浮遊 電位振動を正しく測定する静電プローブの開発を進 めている。なお 200 MHz 帯以上の高周波に対しては シースの応答も明らかでないため、まずはこのよう な高周波帯においてシースモデルの検証を行い、得 られた知見をもとに最終的にはプローブユニットを アレイ状に配置して、LHW の波数を計測すること を計画している。



図 6.2.18: (a) 概念図, (b) 等価回路, (c) チップ抵抗 と金属シールド, (d) プローブユニット。

マイクロ波干渉計による電子密度分布計測

プラズマ中の波動伝播は電子密度分布に影響され るので、電子密度分布の計測は重要である。TST-2 において、LHW を励起するグリルアンテナを用い て立ち上げたプラズマの電子密度分布を知るために、 50 GHz のマイクロ波干渉計で鉛直方向および水平 方向の複数経路に沿った線積分密度を測定し、電子 密度分布の推定を行った。また、電子密度のプラズ マ電流、トロイダル磁場、初期充填ガス圧に対する 依存性を調べたところ、トロイダル磁場強度には明 確な依存性は見られなかったが、プラズマ電流と初 期充填ガス圧に関しては $n_{\rm e} \propto I_{\rm p}^{0.6} P_{\rm fill}^{0.5}$ という依存性 を持つことがわかった。
ロゴスキープローブによる局所プラズマ電流計測

プラズマ電流分布を計測するため、電流計測用の ロゴスキーコイルを2つ、磁場計測用のピックアッ プコイルを2つ、静電プローブを5つ搭載したロゴ スキープローブの開発を行い、ロゴスキーコイルの 小型化(外径9.5 mm、内径5 mm、300巻)とロゴ スキーコイルに受かる外部磁場の影響を取り除くこ とに成功した。ロゴスキーコイルはトロイダル磁場 とポロイダル磁場に対して感度を持っていたため、2 つのロゴスキーコイルの間にピックアップコイルを 置き、ロゴスキーコイルに受かるトロイダル磁場と ポロイダル磁場の影響を推定することで外部磁場の 影響を取り除き、局所電流の計測に成功した。ロゴ スキーコイルで計測した電流密度(750 kA/m²)は、 平衡計算で求めた電流密度(790 kA/m²)とほぼ一 致した。



図 6.2.19: 局所的電流密度計測結果と平衡計算結果の比較。

トムソン散乱によるプラズマ電流密度計測

核融合プラズマの電子温度 (T_e) ・電子密度 (n_e) 測定手法として最も信頼性の高いトムソン散乱計測 の先進的応用として、プラズマ中の電流密度 (j_e) 計 測の開発が行われている。TST-2では測定に用いる レーザー光がプラズマ中を1往復し、往路・復路に 対応する2つの信号を得るダブルパストムソン散乱 を用いている。このうち復路の信号のみがプラズマ 電流の影響を受けることを利用して、復路の信号を 電流密度の測定に, 往路の信号を計測の確からしさ の検定に用いる。本手法の実現可能性の検討として, ランダムなポアソンノイズを仮定したモンテカルロ シミュレーションを行った結果,電子温度 50 eV 程 度、全プラズマ電流100 kA 程度のプラズマを測定し た場合,既存の計測器では電流密度の測定誤差(1σ) が50% 程度となることが分かった。現在,精度を 14% まで向上させるよう設計した計測器を製作中で ある。電流密度計測の信頼性を示す最も効果的な方 法は、プラズマ中の電流を反転した場合に測定され た電流密度が絶対値は一致し符号が反転するのを確 認することである。既存の計測器で複数回の電流反 転実験を行った結果、全プラズマ電流が100kA程度 のプラズマにおいて平均して300kA/m²程度の電流 密度がプラズマ電流の反転に対応し、符号が逆転し て測定された。測定された電流密度の符号は推定と 一致しており、測定は電流密度の情報を捉えている と考えられる。

マルチパストムソン散乱計測の開発

RF 波動により生成された低密度プラズマではトム ソン散乱計測は困難である。この問題を解消すべく, 1回の測定でレーザーがプラズマ中を数回往復するマ ルチパス配位のトムソン散乱計測の開発を行ってい る。ポッケルスセルと反射型偏光子を用い、偏光を 高速制御することでミラー間にレーザーパルスを閉 じ込める。トムソン散乱計測に用いる Nd:YAG レー ザーは高出力なので、マルチパス光学系の設計には 光学素子のレーザー耐力を考慮する必要がある。散 乱光は凹面鏡を用いて光ファイバーに集光するので、 測定位置におけるビーム径も考慮しなければならな い。これらの条件を満足させるため、往復ごとの各 光学素子、測定位置におけるビーム径をシミュレー ションから求めた。シミュレーションの結果、レー ザー光の拡がり角やビームウェイストを, 光学素子 を用いてチューニングする必要があることがわかっ た。そのほか,ビーム伝搬ファクター M² を加味し たレンズ前後のビーム伝搬が理論と実測で一致して ことを確認した。また,マルチパスを行う上で いるこ 必要となるポッケルスセルや MOSFET の動作確認 を行った。今後は、レーザーパワーを落とし、マルチ パス光学系で実際にレーザーパルスを往復させ、マ ルチパス計測が可能であることを確認した後、高出 カレーザーでマルチパス計測を行う予定である。

6.2.2 共同研究

QUEST におけるトムソン散乱計測

8.2 GHz のマイクロ波によるプラズマの非誘導電 流立ち上げ・定常維持実験が行われている九州大学の 球状トカマク装置 QUEST 用のトムソン散乱計測の 開発を行っている。非誘導立ち上げプラズマは密度 が低いため、トムソン散乱計測は難しいが、QUEST では数秒の長時間放電を行っているので、レーザー が10 Hz で繰り返し撃てることを利用し、散乱光を 重ね合わせて電子温度の算出を行っている。密度較 正にはラマン散乱を用い、相対値ではあるが密度分 布計測を行っている。現在、空間 6 点の同時計測が 可能である。

LHD における反射計による波動計測

マイクロ波反射計は、プラズマ中で反射したマイ クロ波の位相を計測し、微小な電子密度変動を測定 できる装置である。原理的にはプラズマ中の高周波 波動を検出することがでるが、波動電場の定量的な 測定は難しく、研究開発が必要である。核融合科学 研究所のLHD ヘリカル装置において、イオンサイク ロトロン周波数帯(ICRF)の速波励起アンテナ近傍 の波動電場を測定するため、新たにマイクロ波反射 計を設計・製作・設置し、波動測定を行った。測定対 象は周波数38.47 MHzの少数イオン加熱で維持され たLHD プラズマである。反射計で測定された密度 揺動のRF 成分は、0.01 %のオーダーであり、分散 関係を用いて波動電場の大きさに変換される。その 結果、波動電場(磁気面上で磁場に垂直な成分)は 測定位置が密度の低いプラズマの外側に移るにつれ 大きくなることがわかった。

LHW の数値シミュレーション

米国マサチューセッツ工科大学プラズマ科学核融 合センターとの共同研究として, TORLH 全波解析 コードを用いた TST-2 における LHW による電流駆 動のシミュレーションを行った。特に前年度、速波 進行波励起用アンテナ(コムラインアンテナ)を用 いた LHW 電流駆動実験で得られた X 線スペクトル とシミュレーションで予想される X 線スペクトルの 定量的な比較を行うことを目的とした。シミュレー ションは TORLH により計算される波動の伝播・吸 収と、フォッカープランクコード CQL3D により計算 される速度分布関数の変形が無矛盾な結果を与える よう繰り返し計算がおこなわれる。実験で用いた条 件でシミュレーションを行い、変形された速度分布 関数を計算し,現在この結果を用いて実験で用いた 視線に沿った X 線スペクトルを計算する準備を進め ている。TST-2のプラズマパラメータでは励起され た LHW の吸収が弱いため、波動の回折・干渉効果 を正確に取り扱える全波解析コードを用いたシミュ レーションが適していると考えられていたが、実際 光線追跡コード GENRAY を用いた計算を行ったと ころ、なめらかな速度分布関数を得ることが難しい ことがわかった。

JT-60SAにおける電流駆動シナリオの検討

日本原子力研究開発機構との共同研究として、プラ ズマ輸送解析統合コード TOPICS を用いた JT-60SA トカマクにおけるセンターソレノイド (CS) 磁束の 消費を最小限に抑えたプラズマ立ち上げシナリオの 検討を行った。この研究は JT-60SA の大目標の一つ である,デモ炉における CS の使用を最小限に抑えた プラズマ電流立ち上げシナリオの開発に資すること を目標としている。初期プラズマ生成後のプラズマ 電流が低い段階で CS による誘導駆動電流がゼロの状 態を達成し,その状態を保ったままプラズマ電流を 立ち上げることを目指した。どのような密度・温度分 布を仮定すれば十分な自発電流割合が達成され,上 述のシナリオを実現できるかを明らかにし、2.1 MA までのプラズマ電流立ち上げを計算し、JT-60SA で 予定されている加熱入力パワーの範囲内で、必要と される温度・密度分布を得るために、極端に高い閉 じ込め性能が要求されるわけではないことが確かめ られた。この放電において、プラズマ電流の8割程 度を担う自発電流は、主に内部輸送障壁のある規格 化小半径 $\rho = 0.55$ 付近において流れているため、プ ラズマ中心部では電流ホールという状態が形成され、 強い負磁気シアを持つことがわかった。

新型 LHW アンテナの開発

日米科学技術協力協定のもと、米国 General Atomics 社との共同研究として、新たな LHW 進行波励起 アンテナの開発を行っている(図 6.2.20)。このアン テナは 13 個の家型断面をもつ導体で構成され、端の 導体のみに給電する。他の導体には隣の導体からの 静電誘導により位相のずれた電位が誘起され、プラ ズマ中に静電進行波を励起する。電場の向きはトロ イダル方向であり、LHW の励起に適している。各銅 体間の位相差は、 $N_{\parallel} = 5 \sim 6$ の波を励起するよう 調整されている。200 MHz において反射は入射に対 し-25 dB,透過は-1 dB であった。



図 6.2.20: 新型 LHW アンテナ

<受賞>

 若月琢馬、第9回 核融合エネルギー連合講演会 若手優秀発表賞、プラズマ・核融合学会、2012 年6 月29日。

<報文>

(原著論文)

[2] H Tojo, A Ejiri, J Hiratsuka, T Yamaguchi, Y Takase, K Itami and T Hatae: Demonstration of

6.2. 高瀬研究室

in-situ relative calibration method for a Thomson scattering diagnostic on TST-2, Journal of Instrumentation 7 (2012) P04005.

- [3] M. Ishiguro, K. Hanada, H. Liu, H. Zushi, K. Nakamura, A. Fujisawa, H. Idei, Y. Nagashima, M. Hasegawa, S. Tashima, Y. Takase, Y. Kishimoto, O. Mitarai, S. Kawasaki, H. Nakashima and A. Higashijima: Non-inductive current start-up assisted by energetic electrons in Q-shu University experiment with steady-state spherical tokamak, Phys. Plasmas 19 (2012) 062508.
- [4] T. Tokuzawa, A. Ejiri, K. Kawahata, K. Tanaka, I. Yamada, M. Yoshinuma, K. Ida, and C. Suzuki: Microwave Doppler reflectometer system in LHD, Rev. Sci. Instrum. 83 (2012) 10E322.
- [5] J. Hiratsuka, A. Ejiri, M. Hasegawa, Y. Nagashima, Y. Takase, H. Tojo, T. Yamaguchi, T. Ambo, H. Furui, T. Hashimoto, H. Kakuda, K. Kato, T. Oosako, T. Sakamoto, R. Shino, T. Shinya, M. Sonehara, T. Wakatsuki and O. Watanabe: Off-Axis Temperature Anisotropy Measurement by Double-Pass Thomson Scattering Diagnostic System on TST-2, Plasma Fusion Res. 7 (2012) 2402092.
- [6] M. Sonehara, Y. Nagashima, Y. Takase, A. Ejiri, T. Yamaguchi, T. Ambo, H. Kakuda, J. Hiratsuka, T. Sakamoto, R. Shino, T. Wakatsuki and O. Watanabe: Fluctuation Measurement Across the Broad Range of the Low-field Side Edge Plasmas in the TST-2 Spherical Tokamak, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials. **132** (2012) 499.
- [7] K. Hanada, H. Zushi, H. Idei, K. Nakamura, M. Ishiguro, S. Tashima, E. Kalinnikova, M. Sakamoto, M. Hasegawa, A. Fujisawa, K. Sato, N. Yoshida, H. Watanabe, K. Tokunaga, Y. Nagashima, A. Higashijima, S. Kawasaki, H. Nakashima, H. Liu, O. Mitarai, T. Maekawa, A. Fukuyama, Y. Takase and J. Qian: QUEST Experiments Towards Steady State Operation of Spherical Tokamaks, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials. **132** (2012) 490.
- [8] T. Wakatsuki, A. Ejiri, H. Kakuda, Y. Takase, T. Ambo, H. Furui, T. Hashimoto, J. Hiratsuka, H. Kasahara, K. Kato, R. Kumazawa, Y. Nagashima, K. Saito, T. Sakamoto, T. Seki, F. Shimpo, R. Shino, T. Shinya, M. Sonehara, O. Watanabe, T. Yamaguchi and C. P. Moeller: X-ray Measurements during Plasma Current Start-up Experiments using the Lower Hybrid Wave on the TST-2 Spherical Tokamak, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials. **132** (2012) 485.
- [9] S. Kamio, K. Yamasaki, K. Takemura, Q. H. Cao, T. G. Watanabe, H. Itagaki, T. Tsutsui, K. Ishiguchi, R. Imazawa, T. Yamada, C. Z. Cheng, M. Inomoto, Y. Takase and Y. Ono: Development

of Multi-channel Doppler Spectroscopic Measurement System Using 8x8 Multianode Photomultiplier Tube Assembly, Rev. Sci. Instrum. **83** (2012) 083103.

- [10] S. Kamio, K. Yamasaki, K. Takemura, Q. H. Cao, T. G. Watanabe, H. Itagaki, T. Tsutsui, K. Ishiguchi, R. Imazawa, T. Yamada, C. Z. Cheng, M. Inomoto, Y. Takase, Y. Ono: Electron Acceleration by Magnetic Reconnection During Spherical Tokamak Merging Experiment, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials. **133** (2013) 166.
- [11] T. Yamaguchi, A. Ejiri, J. Hiratsuka, M. Hasegawa, Y. Nagashima, K. Narihara, Y. Takase, H. Zushi and the QUEST group: Electron Temperature Measurement on QUEST Spherical Tokamak by Thomson Scattering System, Plasma Fusion Res. 8 (2013) 1302001.

(国内雑誌)

- [12] M. Yoshida, G. Giruzzi, Y. Kamada, Y. Takase, T. Suzuki, K. Nagasaki, G. Matsunaga, M. Furukawa, K. Tanaka, K. Shinohara, M. Osakabe, H. Urano, T. Morisaki, T. Nakano, M. Sakamoto, S. Sakurai, A. Sagara, N. Hayashi, A. Fukuyama: JT-60SA リサーチプラン, プラズマ・核融合学会誌(研究最前線)J. Plasma Fusion Res. 88 (2012) 650.
- [13] T. Maekawa, Y. Takase, K. Hanada, N. Yoshida, M. Nagata, Y. Ono, M. Inomoto, Y. Nagashima, Y. Nagayama: 球状トカマク研究の進展 -核融合エネルギー開発に向けて-,プラズマ・核融合学会誌(小 特集) J. Plasma Fusion Res. 88 (2012) 706.

- [14] 加藤邦彦: TST-2 における非誘導立ち上げプラズマの電子密度のパラメータ依存性及び電子密度分布計 測,(修士論文)
- [15] 新屋貴浩: Wave Measurements by RF Magnetic Probes during Lower Hybrid Wave Experiments on TST-2, (修士論文)
- [16] 橋本貴博: Measurement of toroidal and poloidal flow on the TST-2 spherical tokamak, (修士論文)
- [17] 古井宏和: Development of a current profile diagnostic for a spherical tokamak plasma, (修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

[18] J. Hiratsuka, A. Ejiri, M. Hasegawa, Y. Nagashima, Y. Takase, H. Togashi, H. Tojo, T. Yamaguchi, H. Furui, T. Hashimoto, H. Kakuda, K. Kato, A. Nakanishi, T. Oosako, Y. Shimada, T. shinya, M. Sonehara, and T. Wakatsuki: Development of An Advenced Thomson Scattering System on TST-2 Spherical Tokamak, Japan-Korea Seminar 2012 for Plasma Diagnostics, Jeju, Korea, Aug. 23-25, 2012.

⁽学位論文)

- [19] M. Sonehara, et al.,: Measurements of turbulent structure of edge plasma in the TST-2 spherical tokamak, Japan-Korea Seminar 2012 for Plasma Diagnostics, Jeju, Korea, Aug. 23-25, 2012.
- [20] Y. Takase, A. Ejiri, H. Kakuda, T. Oosako, T. Shinya, T. Wakatsuki, O. Watanabe, T. Ambo, H. Furui, T. Hashimoto, J. Hiratsuka, H. Kasahara, K. Kato, R. Kumazawa, C. Moeller, T. Mutoh1, A. Nakanishi, Y. Nagashima, K. Saito, T. Sakamoto, T. Seki, M. Sonehara, R. Shino, H. Togashi, T. Yamaguchi: Non-inductive Plasma Initiation and Plasma Current Ramp-up on the TST-2 Spherical Tokamak, 24th IAEA Fusion Energy Conference San Diego Oct. 8-13, 2012.
- [21] T. Wakatsuki, A. Ejiri, Y. Takase, H. Furui, T. Hsahimoto, J. Hiratsuka, H. Kakuda, K. Kato, A. Nkanishi, T. Oosako, T. Shinya, M. Sonehara, H. Togashi, T. Yamaguchi, H. Kasahara, R. Kumazawa, K. Saito, T. Seki, F. Shimpo, Y. Nagashima: Plasma Start-up Experiments Using the Lower Hybrid Wave Excited by a Dielectric Loaded Waveguide Array Antenna on the TST-2 Spherical Tokamak, 54th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics Providence, Oct. 29-Nov. 2, 2012.
- [22] Y. Nagashima, Y. Takase, M. Sonehara, T. Oosako: Observation of nonlinear phenomena of edge fluctuations in the TST-2 spherical tokamak, 54th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics Providence, Oct. 29-Nov. 2, 2012.
- [23] S.G. Baek, R.R. Parker, S. Shiraiwa, G. Wallace, D. Brunner, I. Faust, A. Hubbard, B. LaBombard, M. Porkolab, J. Terry, C. Lau, Y. Takase: Measurements of lower-hybrid frequency spectra at the high-field and low-field side using probes in Alcator C-Mod, 54th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics Providence, Oct. 29-Nov. 2, 2012.
- [24] Y.-K.M. Peng, Y. Takase, B. Lloyd: World spherical torus (ST) research as coordinated by the IEA ST Implementing Agreement (IA), 54th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics Providence, Oct. 29-Nov. 2, 2012.
- [25] S. Masamune, A. Sanpei, S. Nakaki, K. Deguchi, K. Nishimura, H. Tanaka, H. Himura, A. Ejiri, N. Mizuguchi, K. Kawahata, D.J. Den Hartog, R. Paccagnella: Progress in low-aspect-ratio RFP research in RELAX, 54th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics Providence, Oct. 29-Nov. 2, 2012.
- [26] H. Tojo, T. Hatae, T. Sakuma, T. Hamano, K. Itami, A. Ejiri, J. Hiratsuka, T. Yamaguchi, Y. Takase: Development of a Thomson scattering diagnostic design for JT-60SA, The 9th Australia-Japan workshop on plasma diagnostics, Naka, Japan, Dec. 3-6, 2012.

- [27] J. Hiratsuka, A. Ejiri, M. Hasegawa, Y. Nagashima, Y. Takase, H. Togashi, H. Tojo, T. Yamaguchi, H. Furui, T. Hashimoto, H. Kakuda, K. Kato, A. Nakanishi, T. Oosako, T. Shinya, M. Sonehara, and T. Wakatsuki: Double-pass Thomson scattering system on TST-2 spherical tokamak, The 9th Australia-Japan workshop on plasma diagnostics, Naka, Japan, Dec.3-6, 2012.
- [28] J. Hiratsuka, A. Ejiri, Y. Takase, H. Togashi, T. Yamaguchi, H. Furui, T. Hashimoto, H. Kakuda, K. Kato, A. Nakanishi, T. Oosako, T. Shinya, M. Sonehara, and T. Wakatsuki: Development of An Advenced Thomson Scattering System on TST-2 Spherical Tokamak, GCOE International Symposium on Physical Sciences Frontier, Hongo, Tokyo, Japan, Dec. 8-9, 2012.
- [29] H. Kakuda, Y. Nagashima, Y. Takase, A. Ejiri, M. Sonehara, H. Furui, T. Hashimoto, K. Kato, J. Hiratsuka, A. Nakanishi, T. Oosako, T. Sakamoto, T. Shin 'ya, H. Togashi, T. Wakatsuki, T. Yamaguchi: Floating Potential Measurement of RF Start-up Plasmas on the TST-2 Spherical Tokamak, GCOE International Symposium on Physical Sciences Frontier, Hongo, Tokyo, Japan, Dec. 8-9, 2012.
- [30] T. Wakatsuki, et al.: Development of An Advenced Thomson Scattering System on TST-2 Spherical Tokamak, GCOE International Symposium on Physical Sciences Frontier, Hongo, Tokyo, Japan, Dec. 8-9, 2012.
- [31] T. Wakatsuki, et al.,: Experimental results using a new dielectric loaded waveguide array antenna on TST-2, Workshops on Physics and Technology of RF Heating of Fusion Plasmas 2012, Nara, Japan, Dec. 11-15, 2012.
- [32] T. Shinya, Y. Takase, A. Ejiri, T. Oosako, T. Wakatsuki, T. Yamaguchi, H. Kakuda, J.Hiratsuka, T. Sakamoto, M. Sonehara, H. Furui, K. Kato, T. Hashimoto, A. Nakanishi, H. Togashi, T. Yamada, Y. Nagashima, O. Watanabe: Wave Measurements during Lower Hybrid Wave Injection using Radio Frequency Magnetic Probes on TST-2, Workshops on Physics and Technology of RF Heating of Fusion Plasmas 2012, Nara, Japan, Dec. 11-15, 2012.
- [33] C. P. Moeller, Y. Takase: A Lower Hybrid Traveling Wave Antenna, Workshops on Physics and Technology of RF Heating of Fusion Plasmas 2012, Nara, Japan, Dec. 11-15, 2012.
- [34] J. Hiratsuka, A. Ejiri, M. Hasegawa, Y. Nagashima, Y. Takase, H. Togashi, H. Tojo, T. Yamaguchi, H. Furui, T. Hashimoto, H. Kakuda, K. Kato, A. Nakanishi, T. Oosako, T. Shinya, M. Sonehara, and T. Wakatsuki: Study of Electron Distribution Function Asymmetry by Thomson Scattering on TST-2, The First A3 Foresight Workshop on Spherical Torus, Seoul, Korea, Jan. 14-16, 2013.

- [35] T. Wakatsuki, A. Ejiri, T. Shinya, Y. Takase, H. Furui, T. Hashimoto, J. Hiratsuka, H. Kakuda, H. Kasahara, K. Kato, Y. Nagashima, T. Oosako, K. Saito, T. Seki, F. Shimpo, M. Sonehara, T. Yamaguchi: Lower Hybrid Current Drive Experiment on TST-2, The First A3 Foresight Workshop on Spherical Torus, Seoul, Korea, Jan. 14-16, 2013.
- [36] Y. Takase: LH Antenna and Diagnostic Development on TST-2, Workshop on RF Startup and Sustainment, Kasuga, Feb. 26–Mar. 1, 2013.

招待講演

- [37] Y. Takase: TST-2: present status and future plan, The First A3 Foresight Workshop on Spherical Torus, Seoul, Korea, Jan. 14–16, 2013.
- [38] Y. Takase: Plasma Start-up by LHW on TST-2, Workshop on RF Startup and Sustainment, Kasuga, Feb. 26–Mar. 1, 2013.

(国内会議)

一般講演

- [39] 新屋貴浩、高瀬雄一、江尻晶、大迫琢也、山口隆史、 角田英俊、平塚淳一、若月琢馬、曽根原正晃、加藤 邦彦、橋本貴博、古井宏和、島田陽介、富樫央、中西 綾香、永島芳彦: TST-2 における低域混成波を用い た実験でのピックアップコイルによる波動計測,第9 回核融合エネルギー連合講演会、神戸、2012 年 6 月 28-29 日
- [40] 若月琢馬、高瀬雄一、江尻晶、安保貴憲、大迫琢也、 角田英俊、笠原寛、加藤邦彦: TST-2 球状トカマク における誘電体充填型導波管列アンテナを用いた低 域混成波によるプラズマ立ち上げ実験,第9回核融合 エネルギー連合講演会、神戸、2012 年 6 月 28-29 日
- [41] 角田英俊、永島芳彦、曽根原正晃、古井宏和、高瀬雄 一、江尻晶,、若月琢馬、渡邉理、大迫琢也、安保貴 憲、加藤邦彦、坂本拓也、篠遼太、島田陽介、新屋貴 浩、富樫央、中西綾香、橋本貴博、平塚淳一、山口隆 史: TST-2 球状トカマクにおける 200MHz 帯周波数 の高周波を用いた立ち上げプラズマの浮遊電位計測, 第9回核融合エネルギー連合講演会、神戸、2012 年 6月 28-29 日
- [42] 徳沢季彦、角屋豊、谷正彦、萩行正憲、江尻晶、川端 一男:ミリ波ーテラヘルツ波を用いた核融合炉心プ ラズマ計測,第9回核融合エネルギー連合講演会、神 戸、2012年6月28-29日
- [43] 冨樫央他:マルチパストムソン散乱計測における光学 系と実現可能性の検討及び基礎実験、プラズマ若手夏 の学校、蔵王、2012 年 8 月 20-23 日
- [44] 江尻晶:研究者のワークライフバランス (WLG)WG、 大規模アンケート調査のフォローアップWG:第2 回大規模アンケートの再解析に見る RPD 支持層,第 10 カイ男女共同参画学協会連絡会シンポジウム、西 新橋、2012年10月7日
- [45] 若月琢馬、鈴木隆博、井手俊介、林信彦、高瀬雄一: プラズマ輸送コード TOPICS を用いた JT-60SA に

おけるセンターソレノイドを用いたないプラズマ立 ち上げシナリオ解析, プラズマ・核融合学会第 29 回 年会、春日、2012 年 11 月 27-30 日

- [46] 古井宏和、永島芳彦、高瀬雄一、江尻晶、角田英俊、 曽根原正晃、大迫琢也、加藤邦彦、新屋貴浩、冨樫 央、中西綾香、橋本貴博、平塚淳一、山口隆史、若月 琢馬: TST-2 におけるプラズマ電流分布計測用の小 型ロゴスキープローブ開発, プラズマ・核融合学会第 29 回年会、春日、2012 年 11 月 27-30 日
- [47] 曽根原正晃、永島芳彦、江尻晶、高瀬雄一、古井宏 和、角田英俊、大迫琢也、山口隆史、若月琢馬、平塚 淳一、加藤邦彦、新屋貴浩、橋本貴博、冨樫央、中西 綾香: TST-2 球状トカマク装置におけるプラズマ周 辺部乱流構造の計測, プラズマ・核融合学会第 29 回 年会、春日、2012 年 11 月 27-30 日
- [48] 田中裕之、政宗貞夫、三瓶明希夫、出口和明、中本聖也、 西村香苗、比村治彦、江尻晶、川端一男、秋山毅志、 D.J. DenHartog、小口治久: X-ray measurements during non-inductive plasma current start-up experiments using lower hybrid waves on the TST-2 spherical tokamak, RELAX プラズマのパラメータ 領域、プラズマ・核融合学会第 29 回年会、春日、2012 年 11 月 27-30 日
- [49] 東條寛、波多江仰紀、佐久間猛、濱野隆、伊丹潔、江 尻晶、平塚淳一、山口隆史、高瀬雄一: JT-60SA に おけるトムソン散乱計測の開発, NIFS 一般共同研究 「磁場閉じ込め及び慣性閉じ込め核融合プラズマ診断 の新展開」核融合エネルギーフォーラムプラズマ物 理クラスター計測サブクラスター 合同会合、土岐、 2013 年1月 9-10 日
- [50] 江尻晶、徳沢季彦: LHD における反射計を用いた波動計測, NIFS 一般共同研究「磁場閉じ込め及び慣性閉じ込め核融合プラズマ診断の新展開」核融合エネルギーフォーラムプラズマ物理クラスター計測サブクラスター 合同会合、土岐、2013 年1月9-10 日
- [51] 江尻晶、徳沢季彦: LHD におけるマイクロ波反射計 を用いた波動測定,第2回 ICRF 加熱研究会「ICRF 加熱装置の高性能化と将来応用」、土岐、2013年2月 20日
- [52] 曽根原正晃、永島芳彦、江尻晶、高瀬雄一、古井宏 和、角田英俊、大迫琢也、山口隆史、若月琢馬、平塚 淳一、加藤邦彦、新屋貴浩、橋本貴博、冨樫央、中西 綾香: TST-2 球状トカマク装置におけるフロー及び プラズマ乱流構造計測,第16回若手科学者によるプ ラズマ研究会、那珂、2013年3月4-6日
- [53] 古井宏和、永島芳彦、高瀬雄一、江尻晶、角田英俊、 曽根原正晃、大迫琢也、加藤邦彦、新屋貴浩、冨樫 央、中西綾香、橋本貴博、平塚淳一、山口隆史、若月 琢馬: TST-2 における小型ロゴスキープローブを用 いた局所プラズマ電流の計測, ST 研究会「マイクロ 波駆動核融合」討論会、土岐、2013 年 3 月 6 日
- [54] 江尻晶、高瀬雄一、大迫琢也、山口隆史、角田英俊、 平塚淳一、若月琢馬、曽根原正晃、加藤邦彦、新屋 貴浩、橋本貴博、古井宏和、冨樫央、中西綾香:最近 のTST-2実験,ST研究会「マイクロ波駆動核融合」 討論会、土岐、2013年3月6日

- [55] 江尻晶、徳沢季彦: LHD におけるマイクロ波反射計 を用いた波動計測,光・ミリ波・マイクロ波を用いた 計測技術・解析モデルの開発とその応用に関する研究 集会、春日、2013 年 3 月 11-12 日
- [56] 江尻晶,徳沢季彦、斎藤健二、関哲夫、笠原寛史、武 藤敬、熊澤隆平、山田一博、高瀬雄一: LHD におけ るマイクロ波反射計を用いた波動測定,日本物理学会 第68回年次大会(広島) 2013 年 3 月 26-29 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。2010年にスタート した大型低温重力波検出器 KAGRA の建設は順調に 進んでおり、トンネルの掘削、全長 6km におよぶ真 空パイプの建造、低温ミラーを収納するクライオス タットの製作等が先行して行われている。KAGRA の2017年からの本格的重力波観測開始への期待が高 まっている。また、徐々にではあるが、宇宙空間重 力波アンテナ DECIGO 計画の基礎開発も行われて いる。地上浮上型重力波検出器 TOBA についてはセ ンサーの技術開発が進んだ。同時に、われわれは重 力波研究以外にも関連するいくつかの研究テーマを 追求している。低温(4K)シリコン光共振器を用い た超高安定レーザー光源の開発は世界的にもユニー クな研究である。片道光速の異方性検出や微小距離 における重力法則の検証は基礎物理として重要であ る。また、量子光学の手法を用いた光学実験は重力 波検出器の高感度化を実現する可能性を秘めている。 2013年3月をもって坪野研究室は幕を閉じること になった。1987年に東京大学理学部に坪野研究室が 発足して以来、本研究室は26年にわたり重力波研 究の中核拠点として機能してきた。大学院生として 研究室に在籍した学生のうち、修士課程修了者は38

名、そのうち博士学位取得者は14名にのぼる。博士 課程修了者の多くは重力波研究分野およびその周辺 分野に残り、現在は各分野で主導的な役割を果たし ている。今後は安東正樹准教授が研究室を引き継ぐ ことになった。残ったスタッフ、学生と一緒になって さらに重力波研究を大きく展開していくことが期待 される。

6.3.1 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA

KAGRA (かぐら) は岐阜県神岡の地下サイトに一 辺3kmのL 字型巨大レーザー干渉計を建設し、宇宙 からの重力波を検出しようとするプロジェクトであ る (図 6.3.21)。2010 年 10 月よりプロジェクトがス



図 6.3.21: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の概念図。

タートし、2011年1月28日には、それまでLCGT と呼ばれていたプロジェクト名にKAGRAという愛 称がつけられた。現在、装置の建設は順調に進んで おり、2015年には常温での運転が、2017年からは 低温での重力波観測が可能になる予定である。これ によって世界初の重力波検出をめざしている。当研 究室では、主干渉計光学系の設計などの主要部分の 役割を担っており、それに関連した研究開発が進め られている[1, 16, 17, 18, 19]。

光学系のレイアウト設計

KAGRA では多数の鏡を km オーダーの長い間隔 で分散配置する。その際、光学的なレイアウトには、 入射角度やビームスポット位置等に対して、満たさ なければならない拘束条件が多数ある。また実際に 干渉計を動作させる際に、必要な光を取り出し易く すると共に、不要な光を適切にダンプし、散乱光雑 音が生じないように処理する必要がある。これらの レイアウト最適化作業を効率良く行うため、麻生は、 ガウシアンビームの光線追跡ソフトを作成した。こ れによって、従来は手動で行なっていたレイアウト パラメーターの最適化が自動化され、鏡の仕様変更 等に対して柔軟かつ迅速に最適レイアウトのアップ デートができるようになった。このソフトを用いて、 KAGRA の光学レイアウトが決定された [30, 35]。

アラインメント制御

レーザー干渉計を高感度な重力波検出器として用 いるには、干渉計を構成する鏡の位置と姿勢を高精 度に制御する必要がある。KAGRAでは従来型の干 渉計に比べて5枚鏡を増やし、RSEと呼ばれる構成 を採用することで感度を向上させているが、一方で、 制御すべき自由度が大幅に増加する。これにより各 自由度の変位信号の分離・対角化が格段に困難にな る。また、高出力レーザーを入射光として用いるた め、干渉計の片腕のFabry-Perot 共振器内を往復す るレーザーパワーは400kWにも及ぶ。そのため、共 振器を構成する鏡の傾きに対してレーザー輻射圧ト ルクがそれを拡大させる方向に働き、角度不安定性 が自発的に生じてしまうという問題がある。

我々はアラインメント制御系をシミュレートする ためのソフトを開発し、これを用いて KAGRA の干 渉計パラメータの最終決定を行った。特に腕共振器 を構成する鏡の曲率と、2 つのリサイクリング共振 器の鏡の曲率はアラインメント制御系を大きく左右 するため、KAGRA の目標感度達成に重要である。 腕共振器の鏡の曲率は輻射圧による角度不安定性が 小さくなるよう選んだ。また、リサイクリング共振 器の鏡の曲率は重力波信号を汚す高次モードと呼ば れる光を抑制しつつ、アラインメント信号の分離が しやすいように選択した。こうして決定した鏡の曲 率を元に、現在鏡の製作が行われている。

また、鏡の懸架系の3次元剛体シミュレーション の結果と合わせ、角度制御系の設計を行った。これ により鏡を冷やすためのサファイアファイバーの共振が干渉計の感度を悪化させることがわかった。現在は東京大学宇宙線研究所と協力し、鏡の懸架系を見直すとともに、懸架系自体の制御モデルの構築を行なっている [13]。

パラメトリック不安定性

光学系のパラメータ設計の際に考慮するべき問題 として「パラメトリック不安定性」という問題があ る。当研究室ではこの不安定性の起こる条件の適用範 囲を先行研究から拡張し、任意の光学系について適用 可能なものとした。また、この結果を実際にKAGRA およびヨーロッパの第3世代重力波望遠鏡ETに対し て適用し、これらの干渉計の光学設計においてパラ メトリック不安定性のリスクを評価した(図6.3.22)。 今年度は以上の結果を投稿論文としてまとめ、公表 する予定である[10, 44]。



図 6.3.22: KAGRA においてパラメトリック不安定 性を評価した結果。

サファイアの低温物性に関する研究

大型レーザー干渉計型重力波検出器 KAGRA で は、干渉計を構成する鏡をサファイアのロッドで懸 架する。このサファイアロッドは鏡を引っかけるため にロッドの端が太い特殊な形状をしており、ロッドの 表面を研磨することができないことが分かっている。 KAGRA の懸架に使用するサファイアロッドは鏡か らの入熱を冷凍機に送るために高い熱伝導率を持つ 必要があるが、径の細いロッドの熱伝導率は表面状 態によって変化することが知られており、現在作成 可能であるサファイアロッドの熱伝導率が KAGRA の要求する熱伝導率を満たしているかどうかは非常 に重要な問題である。そこで、坪野研究室ではサファ イアロッドの低温での熱伝導率測定を行った。

2012年度は過去に熱伝導率が測定されたことのあるサファイアロッドのサンプルを用いて、熱伝導率 測定のセットアップを構成し熱伝導率の測定ができることの確認を行った。また、そのサンプルに関して 暫定的ではあるが熱伝導率の値をおよそ 10 K - 40 K の範囲で測定した [11]。

PD の感度一様性測定装置の開発

Photo Detector (PD) は干渉計の信号を電気信号 に変える重要な要素である。一般に、PDに入射する レーザービームには微小ながら位置揺らぎ(ジッタ) が存在する。そのため、PD 表面上でのビーム照射位 置が常に変動している。PD 表面に感度の不均一性 が存在すると、このビームジッタが PD 出力の変動 として現れ、雑音となる。坪野研究室ではこれまで、 制御されたビームジッタを持つビームを PD に照射 し、その照射位置をスキャンすることで、PD表面の 感度非一様性を測定する装置を開発してきた。これ によって、そもそも非一様性の低い PD を選別する と共に、PD 表面で比較的一様性の高い部分にビーム を当てることで、ビームジッタ起因の雑音を低減す ることができる。特に今年度は、二方向に異なる周 波数でビームジッタを加えることで、同時測定を行 い、高速な一様性測定が可能な装置を開発した。今 後、KAGRA で使われる PD をこの装置で選別して いく予定である。

6.3.2 宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO

DECIGO は基線長 1000km のファブリペロー型 レーザー干渉計を宇宙空間に建設するという野心的 な計画である。これは、主に10Hz以上で感度のあ る地上レーザー干渉計と、0.1 Hz 以下で感度のある NGO(LISA の後継計画) のような大型宇宙レーザー 干渉計の中間にある周波数帯をターゲットとする検 出器である。DECIGO は巨大ブラックホールの合体 や、初期宇宙からの重力波などの観測を目指してい る。DECIGO は極めて技術的要求が高い計画である ため、数段階の技術実証実験を経てその実現を目指 す。本研究室ではこれまでに世界初の宇宙空間重力 波検出器である SWIM_µ を打ち上げ、そのデータ解 析を行っている。また、DECIGO Pathfinder (DPF) と呼ばれる DECIGO の技術実証衛星の開発にも参 加しており、主に干渉計モジュールの構造設計を行っ ている [2, 5, 14, 20]。

超小型宇宙重力波検出器 SWIM_{$\mu\nu$}

SWIM_{µν} は、JAXA の打ち上げた小型実証衛星 1型 (SDS-1) に搭載された超小型重力波検出器モ ジュールである。この内部には、長さ 50 mm 程度 のねじれ型重力波アンテナ (TOBA) が格納されて いる。SDS-1 衛星のスピンによって「回転 TOBA」 という新しいタイプの重力波検出器が実現されるた め、回収したデータにより低周波宇宙背景重力波の 探査を実施した。SWIM_{µν} は小型の実証機器であり 重力波感度が良いわけではなかったが、DPF のため の技術の一部を軌道上実証できたといえる [6]。

6.3.3 ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA

ねじれ振り子型重力波検出器 (Torsion-bar Antenna, TOBA) は地上で低周波重力波を観測するた めの検出器である。現在、神岡で KAGRA という 3kmの腕を持つ干渉計型重力波検出器が建設されて いるが、こういった地上の干渉計型重力波検出器は 共振周波数と地面振動の影響で10Hz以下に感度を 持つことができない。また、干渉計を宇宙に打ち上げ て低周波重力波を探査するための DECIGO 計画の 提案されているが、その実現にはまだしばらく時間 がかかる見込みである。そこで地上で低周波重力波 探査ができる検出器として TOBA が提案された。3 れは棒をワイヤーや超伝導ピン止め効果によって浮 上させたもので、回転の共振周波数が数 mHz となり これ以上の重力波に対して感度を持つ。現在、坪野研 究室にワイヤー懸架タイプと超伝導磁気浮上タイプ のプロトタイプ検出器が開発され、いずれも 0.1 Hz 付近で重力波に対する感度が10-8から10-9Hz-1/2 程度であり、この周波数帯では世界最高感度となっ ている。今後は雑音を低減させ、より良い感度での 観測運転を目指す[15,21]。

Phase-II TOBA の設計

現在までに、TOBA 第1号機によって原理検証・観 測が行われてきたが、今後は感度向上の為、技術検証 や大型化が必要となる。そこで、Phase-II TOBA と して、低温技術・防振技術を盛り込んだ中型 TOBA のコンセプトデザイン決定を行った(図 6.3.23)。



図 6.3.23: Phase-II TOBA のコンセプトデザイン。

本研究で検証する技術は、TOBA だけでなく KA-GRA などの他の重力波検出器にも応用可能なもので あり、コラボレーションが期待できる。また、重力 波観測においてもテストマスの水平方向の回転だけ でなく、垂直方向の回転もモニターする事で、双方 向からやってくる重力波を観測する新たな解析手法 も採用する予定である。

今後、このコンセプトに基づいて具体的な設計・ システム構築を行う [4, 45]。

6.3.4 低温光共振器を用いた超高安定化レー ザー光源の開発

レーザー周波数の安定化は、重力波検出器のみな らず、光格子時計や超高精度分光等の精密計測にお いて重要な役割を果たす。一般に周波数安定化には 高安定な光共振器を用意し、レーザーをその共振点 にロックすることで達成される。しかし、この共振 器の長さ安定度は、構成分子の熱的振動によって生 じる熱雑音によって制限される。そこで当研究室で は、低温において高い機械的 Q 値を持つ単結晶シリ コン製の光共振器を用いて、熱雑音を低減した超高 安定化レーザーの開発を行なっている。この研究は、 工学部香取研究室と共同で進めており、完成した際 には、香取研の光格子時計用プローブレーザーとし て活用する予定である。本研究の目指す 10⁻¹⁷ レベ ルの安定度を持つプローブレーザーを使えば、100秒 程度の短期積分で10⁻¹⁸の安定度に到達可能な超高 性能光周波数標準を実現可能である[3]。

光学系開発

本研究に使用する光共振器は、単結晶シリコン製 のミラーをやはり単結晶シリコン製のスペーサーに オプティカルコンタクトすることで製作される。 の際、様々なテクニカル雑音の影響を避けるため、鏡 には極めて低い光学損失が要求される。一方で、熱 雑音を低減するためには鏡上でのビームスポットサ イズをできるだけ大きくする必要がある。そこで、 我々の光共振器では、鏡の曲率半径を3mと大きな 値に設定した。しかし、このような大曲率半径の曲 面と、オプティカルコンタクトのための平面研磨部 分を同一面内に作成するのは困難である。当初、磁 気流体研磨によるミラー製作を試みたが、必要な表 面粗さを達成することができなかった。そこで、従来 からあるオスカー研磨法を応用した鏡面研磨が可能 であるか、光学部品メーカーにテストを依頼し、そ の結果、我々の要求値を満たす鏡面の製作を行うこ とができた。現在、この鏡基板に誘電体多層膜コー ティングを行ったものの評価実験を進めている。ま この共振器に光を導入し、レーザーをロックす た、こ るための真空対応光学系を構築し、ロックが可能で あることを確認した [22, 37, 42]。

光共振器の防振

目的の周波数安定度を獲得する為には、地面や冷 凍機による振動によって共振器長が弾性変形するの を防がなければならない。この為に必要となるのが防 振台である。そこで我々は、ヘキサポッドと呼ばれる 6本脚の台を使用する。6本の脚にはそれぞれピエゾ 素子が組み込まれており、小型のseismometer(速度 計)でモニターした振動をピエゾ素子にフィードバッ クして脚の長さを調節する事で、全自由度の振動を 抑える。これにより、1 Hz において 10⁻⁸ [m/√Hz] (東京の地面振動レベルの約1/10)の振動レベルまで 防振する事を目標とする。

現在までに装置の組み立て及び1自由度制御に成 功しているが、現状ではまだ防振比が足りない状況 にある。今後、フォトセンサーを用いたサブ制御ルー プを組み込むことで防振比・帯域を向上させる予定 である [25, 31]。

光共振器の低温化

低温光共振器ではスペーサーや鏡、コーティング の熱雑音を低減させるために極低温まで共振器を冷 却する。また、熱膨張による共振器長変動を小さく するために温度安定化も行う必要がある。

2012 年度は 2011 年度に納品された冷凍機および クライオスタットの性能評価、光共振器の冷却試験、 極低温化での光共振器の温度安定度測定を行った。冷 凍機およびクライオスタットの性能評価としては到 達真空度、到達温度、熱負荷に対する温度上昇を測 定し、当初の要求を満たすことの確認ができた。光 共振器の冷却試験では共振器の温度が 5.2 K まで冷 却可能であることが確認でき、当初の予定であった 18 K でのオペレーションよりも低い温度でのオペ レーションも可能であることがわかった。極低温で の光共振器の温度安定度測定では現在の温度安定度 が 400 nK/√Hz 以下であることを見積もることがで きた。

今後は、温度安定度を向上するための温度安定化 や、低温化でのレーザーの光共振器へのロックおよ びロックした状態でのレーザーの周波数安定度の評 価などを行っていく [8, 28, 33]。

6.3.5 極小距離領域における重力法則検証

4つの相互作用すべてを統一しようとしている超 弦理論において、時空は通常の4次元座標以外にも 複数の余剰次元座標も用いて記述されるとしている。 この理論によって、重力相互作用はほかの相互作用 と異なり余剰次元空間にも伝播するため、古典的な 逆二乗則は微小距離において破れている可能性があ ると指摘されている。

当研究室ではかつて重力波検出器として用いられ ていた共振型振動子を用いてその検証実験を試みて いる。この検出器は高いQ値と低い共振周波数をも っため、高いS/N比で重力信号を検出することがで き、先行研究よりも高精度での重力法則の検証が行 うことができると期待される。

2012年度はデータの一部を取得し、8~10mmの領域で先行研究と同程度の精度の検証に成功した。本年度は引き続き残りのデータの取得を行い0.1~10mmの幅広い領域で先行研究よりも高い精度での検証結果を得たいと考えている[7, 27, 32]。

6.3.6 空間等方性の研究

量子重力理論の研究や宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)の観測から、わずかにLorentz不変性が破れ ている可能性が示唆されている。特に光子のLorentz 不変性の破れは特殊相対論の否定する光速の異方性 に通じ、我々の宇宙観を左右する極めて重要な問題 であるため、世界中で光速の異方性探査が行われて いる。しかし、これまでの多くの実験はMichelson-Morleyの実験と同じように往復光速の異方性探査と なっており、片道光速の異方性への上限値は往復光 速に比べて4桁大きいものとなっていた。そこで、 我々は片道光速の異方性に着目し、研究を行なって いる。片道光速の異方性とは、一方向に進む光の速 さの、行き帰りの差である。

これまで異方性探査実験では、光共振器の鏡像反 転対称性のため、往復光速の異方性しか測定するこ とはできなかった。そこで、光リング共振器の光路 の一部に媒質を入れて屈折率を変え、非対称性を持 たせることで片道光速の異方性を測定可能にした。 片道光速の異方性が存在すると、この光リング共振 器の時計回りの共振周波数と反時計回りの共振周波 数に差が生じる。この差をダブルパスという光学系 構成により測定することを考案した。ダブルパス構 成では一度光共振器に共振した光を逆回りに再入射 する。これにより測定が高精度な null 測定となる。 また、両回りの共振周波数は共振器の水平や温度の 変動に伴って同相で変化するため、共振周波数の差 を測定する本手法は高い同相雑音除去により環境変 動に極めて強い。これまでの光共振器を用いた異方 性探査実験では高レベル防振装置や高真空環境が必 須であったが、本実験ではその必要がなく、優れて いる。

今年度は昨年度に制作した装置を改良を行い、8 月より長期測定を開始した。本異方性探査では光リ ング共振器を回転させているが、この回転に伴って レーザーの偏波面が変化してしまう影響への対策と、 回転台の水平度出しが主な改良点である。また、長 期測定を可能にするためリモート制御環境を整えた。 現在も長期測定を続けており、約220日分、約83万 回転分の異方性信号データを得ている。このデータ を用いて解析を行ったところ、有意な異方性は見つ からず、片道光速の異方性へ10-14のオーダーの上 限値をつけた。特に拡張標準理論の枠組みで解析を 行い、光子の Lorentz 不変性の破れパラメータのう ち、奇パリティ成分に10-14オーダー、スカラー成 分に 10-10 オーダーでの上限値をつけた。これらは これまで他の実験で得られていたものを1桁以上更 新するものであり、我々の知る限り世界で最も厳し い上限値である [29, 34, 43, 46]。

6.3.7 巨視的振動子の量子測定

近年、光の圧力(量子輻射圧揺らぎ)と巨視的機 械振動子が結合した光共振器(機械光学系)におけ る巨視的量子現象に関心が集まっており様々な理論 予測が発表されている。例えば振動子間の巨視的エ ンタングル状態の生成など、機械光学系は巨視的量 子現象を観測する新たな実験系となる可能性を秘め ている。

しかし、巨視的な系における輻射圧揺らぎの観測 は未だなされていない。困難さの原因は二つあり、一 つは振動子の質量が重いこと、もう一つは光軸変動 と輻射圧力が結合し共振器が不安定となる(Siddles-Sigg の不安定性)ために、光共振器に十分な光量を 溜められない事にある。そこで我々は、エアロゲル と呼ばれる超低密度な物質を基材として利用した鏡 を開発し、輻射圧雑音の影響を観測に特化した装置 の開発を目指した。現在のところ誘電体多層膜の残 留応力が問題となっているため、金コーティングを 施した鏡の開発を行った。また、Siddles-Sigg の不安 定性を解消する実験構成として三角共振器を利用し た自発的に安定な検出装置を提案し、その原理検証 に成功した [9, 12, 26]。

<報文>

(原著論文)

- Y. Aso, K. Somiya and O. Miyakawa, Class. Quantum Gravity 29, 124008 (2012).
- [2] M. Ando, DECIGO Pathfinder, International Journal of Modern Physics D 22 1341002 (2013).

(会議抄録)

- [3] H. Katori, et al, Prospects for frequency comparison of Sr and Hg optical lattice clocks toward 10⁻¹⁸ uncertainties, Frequency Control Symposium (FCS), IEEE International pp. 1-6 (2012).
- [4] Ayaka Shoda et al, Search for a Stochastic Gravitational-wave Background with Torsion-bar Antennas, J. Phys.: Conf. Ser. 363 012017 (2012).

(国内雑誌)

- [5] 瀬戸直樹,八木絢外,安東正樹,宇宙レーザー干渉計 が切り拓く重力波天文学,日本物理学会誌 68 (2013) 38.
- (学位論文)
- [6] 穀山渉: Spaceborne Rotating Torsion-Bar Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observations, 博士論文 (2013).
- [7] 柴田和憲: サブミリメートル領域での重力法則の検証 による余剰次元探査,修士論文 (2013).
- [8] 牛場崇文: 低温シリコン光共振器を用いた高安定化光 源の開発,修士論文 (2013).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

[9] Nobuyuki Matsumoto, Yuta Michimura, Kenshi Okada, Yoichi Aso, and Kimio Tsubono: Towards the macroscopic quantum phenomena, GCOE International Symposium on Physical Sciences Frontier, GCOE (Dec. 2012, Japan).

- [10] K. Shibata et al, Parametric Instabilities in KA-GRA and ET, the ELITES 1st meeting (Nov. 2012).
- [11] T. Ushiba, Measurement of the thermal conductivity of sapphire fibers, ELiTES meeting (Oct. 2012).
- [12] Nobuyuki Matsumoto, Yuta Michimura, Yoichi Aso, and Kimio Tsubono: Interferometer as a New Field of a Quantum Physics- the Macroscopic Quantum System - , ELiTES Thermal Noise Workshop (Aug. 2012, Germany).
- [13] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: BS Thermal Lensing in KAGRA, ELITES Thermal Noise Workshop (Aug. 2012, Germany).

招待講演

- [14] Masaki Ando, DECIGO, Gravitational Waves: New Frontier (Jan. 16-18, 2013, Seoul National University, Korea)
- [15] Masaki Ando, TOBA: Torsion-Bar Antenna, Gravitational Waves: New Frontier (Jan. 16-18, 2013, Seoul National University, Korea)
- [16] Masaki Ando, Gravity and Gravitational-Wave Physics, Global COE Symposium 'Development of Emergent New Fields' (Feb. 13, 2013, Kyoto University, Kyoto).
- [17] Y. Aso, Keeping an Interferometer at the Optimal Operating Point, The 3rd Japan-Korea Workshop on KAGRA (December 2012, Sogan University, Seoul).
- [18] Masaki Ando, Stray-Light Control in Interferometers, The 3rd Japan-Korea Workshop on KAGRA (December 21-22, 2012, Sogang University, Seoul).
- [19] Y. Aso, A new way to see through the universe: Gravitational Wave Astronomy, Japan Germany Frontier of Science (JGFoS) symposium, Hotel Steigenberger Sanssouci (October 2012, Potsdam, Germany).
- [20] M. Ando, Space Gravitational-wave observatory: DECIGO, The Fifth International ASTROD Symposium (July 12, 2012, Raman Research Institute, India).
- [21] M. Ando, TOBA: Torsion-Bar Antenna, GWADW2012 (May 17, 2012, Hawaii, USA).

ポスター

[22] N. Ohmae, Y. Aso, A. Shoda, T. Ushiba, M. Takamoto, and H. Katori: Stable lasers toward 10⁻¹⁷ stability with cryogenic cavity and 1-m-long cavity, 5th International Conference on Untracold Group II Atoms, (2012年10月, NICT Japan).

(国内会議)

一般講演

[23] 坪野公夫,時空のさざ波-重力波を求めて,物理学教 室最終講義 (2013 年 3 月、東京大学、本郷).

- [24] 坪野公夫,波多野智,池上健,鈴木敏一,麻生洋一,大前宣昭,平松成範,正田亜八香,牛場崇文,柴田和憲, 三橋秀人,稲場肇,渡部謙一,洪鋒雷,低温光共振器を 用いた超高安定光源の開発 V,日本物理学会 2013 年 年次大会 (2013 年 3 月、広島大学、広島).
- [25] 正田亜八香,麻生洋一,大塚茂巳,大前宣昭,牛場 崇文,平松成範,坪野公夫,超高安定化光源のため の Hexapod 型能動防振装置の開発 II,日本物理学会 2013 年春季大会,27aBE-2 (2013 年 3 月,広島大学)
- [26] 松本伸之、道村唯太、麻生洋一、坪野公夫:三角共振 器を用いた量子輻射圧揺らぎ観測実験,日本物理学会 第68回年次大会(2013年3月、広島大学)
- [27] 柴田和憲,牛場崇文,大塚茂巳,八幡和志,平松成範, 麻生洋一,坪野公夫,共振型振動子を用いたサブミリ メートル領域における重力法則の検証(7),日本物理 学会2013年年次大会(2013年3月、広島大学).
- [28] 牛場崇文,渡辺篤史,麻生洋一,平松成範,大塚茂巳, 大前宣昭,正田亜八香,坪野公夫,低温光共振器に向 けた低温システムの開発 II,日本物理学会 2013 年春 季大会 (2013 年 3 月、広島大学、広島).
- [29] 道村唯太,松本伸之,大前宣昭,麻生洋一,穀山渉,安東 正樹,坪野公夫:光リング共振器を用いた片道光速の 異方性探査 III,日本物理学会第68回年次大会(2013 年3月,広島大学)
- [30] 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 山元一広, 道村唯太, 柴田和憲, 辰巳大輔, 阿久津智忠, 我妻一博, 西田恵里 奈, 陳タン, 安東正樹, 新井宏二, 和泉究, 山本博章, KAGRA Collaboration, 重力波検出器 KAGRA の 主干渉計開発 II, 日本物理学会第 68 回年次大会 (2013 年 3 月, 広島大学)
- [31] 正田亜八香,麻生洋一,大塚茂巳,大前宣昭,牛場 崇文,平松成範,坪野公夫,超高安定化光源のための Hexapod型能動防振装置の開発,日本物理学会2012 年秋季大会(2012年9月,京都産業大学).
- [32] 柴田和憲,牛場崇文,大塚茂巳,平松成範,麻生洋一, 坪野公夫,共振型振動子を用いたサブミリメートル領 域における重力法則の検証(6),日本物理学会2012年 秋季大会(2012年9月,京都産業大学).
- [33] 牛場崇文,正田亜八香,大前宣昭,平松成範,大塚茂巳, 麻生洋一,鈴木敏一,坪野公夫,低温光共振器に向け た低温システムの開発,日本物理学会2012年秋季大 会(2012年9月,京都産業大学).
- [34] 道村唯太,大前宣昭,麻生洋一,穀山渉,安東正樹,坪 野公夫:光リング共振器を用いた片道光速の異方性探 査 II,日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月, 京都産業大学).
- [35] 麻生洋一,宗宮健太郎,宮川治,山元一広,道村唯太, 柴田和憲,辰巳大輔,阿久津智忠,我妻一博,西田恵里 奈,陳タン,安東正樹,新井宏二,和泉究,山本博章, LCGT Collaboration,重力波検出器 KAGRA の主 干渉計開発,日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9月,京都産業大学).
- [36] 坪野公夫,波多野智,池上健,鈴木敏一,麻生洋一,大前宣昭,平松成範,正田亜八香,牛場崇文,柴田和憲, 三橋秀人,稲場肇,渡部謙一,洪鋒雷,低温光共振器を 用いた超高安定光源の開発 IV,日本物理学会 2012 年 秋季大会 (2012 年 9 月、京都産業大学).

- [37] 大前 宣昭, 麻生 洋一, 坪野 公夫, 正田 亜八香, 牛場 崇文, 平松 成範, 波多野 智, 三橋 秀人, 香取 秀俊: 低 温光共振器を用いた時計用周波数安定化レーザーの開 発 II, 日本物理学会 2012 年秋季大会, (2012 年 9 月, 横浜国立大学).
- [38] 坪野公夫, 重力波プロジェクト報告 KA-GRA,DECIGO,DPF, RESCEU 夏の学校 (2012 年 7月、裏磐梯休暇村、福島).
- [39] 坪野公夫、スタートした KAGRA 計画、ビッグバンセンター研究交流会 (2012年6月、東京大学、本郷).

招待講演

- [40] 安東 正樹, 重力波望遠鏡が拓く新しい天文学, 京都大 学基礎物理学研究所 談話会 (2013 年 3 月 8 日, 京都 大学)
- [41] 安東 正樹, 重力波望遠鏡 かぐら (KAGRA) が拓く新 しい天文学, 国立天文台談話会 (2012 年 7 月 6 日, 国 立天文台 三鷹).
- [42] 大前 宣昭,山中一宏, P. Thoumany, B. Christensen, 高本 将男,金田 有史,正田 亜八香,牛場 崇文,麻生 洋一,香取秀俊:より高性能は光格子時計の実現に向 けて(水銀光格子時計,低温光共振器の開発),電気 学会第7回精密周波数の発生と高精度分配のための次 世代回路技術調査専門委員会(2012年6月,NICT).

(セミナー)

- [43] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, and Kimio Tsubono: Search for Anisotropy in the One-Way Speed of Light Using an Optical Ring Cavity, Forum for Prof. John L. Hall and young research careers (Oct. 2012, Japan).
- [44] K. Shibata, Parametric Instability, the ELiTES thermal noise workshop, (Aug. 2012).
- [45] Ayaka Shoda, "Torsion-bar antenna for lowfrequency gravitational-wave detection, Caltech-JPL Association for Gravitational Wave Research Seminar (2012).
- [46] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, and Kimio Tsubono: Search for Anisotropy in the One-Way Speed of Light Using an Optical Ring Cavity, LIGO Seminar (July 2012, USA).

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おけ る法則を探索・解明することを目指し、実験・理論 両面から研究を行っている。研究対象は大きく分け て、大自由度を持ち熱ゆらぎが無視できるマクロな 非平衡系、熱ゆらぎと非平衡ゆらぎが競合するミク ロな非平衡系、そして非平衡性が本質的役割を果た す実例としての生命現象を取り扱う。

非平衡系においては外部からエネルギーや物質が 絶えず流入・流出することにより、自発的な秩序や乱 れが生じることが知られている。これらは一般に自 己組織化現象と呼ばれ、流体現象などにおいてその 存在が知られていたが、力学系の分岐理論やアトラ クターの概念、カオスなどの理解の進展により、流体 系に限らず、より広範な物理現象を含む大きなクラ スとしての非線形力学系が持つ一般的性質として学 問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、液晶やコロイドなどのソフトマター 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自己組織現 象の動力学は共通した特徴を持っており、系の詳細 によらず統一的に記述し扱うことが可能である。以 上に加えて最近では、微小な系におけるゆらぎの統 計則や、系の記憶と制御に伴う情報量の寄与を含め た非平衡熱統計力学に関しても著しい進展が見られ、 1分子計測技術やナノテクノロジーの発展とも相まっ て、非平衡系におけるゆらぎの理解が飛躍的に進み つつある。さらに近年、細胞や分子モーター、異方 性を利用して自己推進する粒子など、エネルギーを 消費して自発的運動を示す物体、いわゆるアクティ ブマターが非平衡特有の物理現象として大いに注目 を集めており、当研究室では実験・理論の両面から アクティブマター特有の物理法則の探索とより広範 な非平衡系の枠組みとの融合に取り組んでいる。

こうした研究の行き着く先として、非平衡状態に ある系に適用可能な一般的な熱統計力学的枠組みの 構築を模索している。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 れる自然現象の宝庫でもある。こうした非平衡系の 個性と普遍性の理解に向け、我々は典型的な非平衡 系と思われる実験系を選び、非平衡度を制御し上げ ていった時に見られる新たな現象を詳細に観測する という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た研究を行っている。

6.4.1 巨視的非平衡系の物理

成長する界面ゆらぎの普遍性

日常生活で散見し、産業的にも重要な「何らかの 表面・界面の成長過程」はスケール不変な非平衡現 象として、基礎物理学としても極めて重要な位置づ けにある。近年、その最も基本的な普遍クラスであ

る Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) クラスに関して、ゆ らぎ分布の厳密解やサブクラスへの分離が明らかに なるなど、数理物理を中心に大きな進展が見られて いる。当研究室では、ネマチック液晶に高電場を印 加することで発生する位相欠陥乱流の成長過程(図 6.4.24) に注目し、それが理論的に予言された普遍 ゆらぎ分布を示すことのほか、界面形状によって異 なるサブクラスへ分離するという実験証拠も提示し \hbar [2, 11, 32, 40, 53, 80, 82, 86, 88, 91, 92, 93, 94, 96,98]。また、昨年度に引き続き理論では取り扱え ない様々な物理量について精密な実験結果を報告し [2, 11, 40, 53, 86, 88, 92, 93, 98]、数値計算によって その普遍性を検証した[1,53] ほか、平面界面サブクラ スと定常界面サブクラスの間のクロスオーバー現象を 数値的・実験的に発見し、それを記述する普遍スケー リング関数を提示した [58]。また、界面成長だけでな く液晶の乱流間相転移にも着目し、臨界現象の普遍 クラスと対称性の関係を調べている [32, 91, 94, 96]。



図 6.4.24: 液晶位相欠陥乱流の界面成長

液晶のトポロジカル欠陥乱流

これまでの我々の研究により、液晶における乱流-乱流転移が、トポロジカル欠陥の周囲への浸透また は消滅によって特徴づけられる吸収状態への転移で あることが明らかとなった。またこれは、Directed Percolation (DP) 転移を始めて実証した実験として 現在は認識されるに至っている。しかし、Y. Pomeau が約30年前に提案した「乱流-層流転移における時 空間欠性は DP である」との予想は、開放系の流れ における層流-乱流転移に関してはいまだに検証され ていない。ごく最近、パイプ流における層流-乱流転 移に関して、DP 転移を示唆する実験が報告されて いるが、システムサイズが十分でないため、DPの 可能性を示したにとどまっている。そのため、まず は DP 転移であることが明確である液晶乱流におい て、横方向のシアがある場合、DP がどのように変更 を受けるのか、あるいは受けないのかを明らかにす る必要がある。そこで、本研究では、マイクロ流路 を用いて、液晶対流に横方向の流れを加え、シアに よる影響を調べる実験を行った。その結果、臨界ク エンチの実験では、シアのあるなしに関わらず、DP の臨界指数は変化しないとの実験結果を得た。一方、 DP の臨界点を与える臨界電圧はシア流が大きくな るほど減少し、速度の2乗で減少することを見出し

た(図 6.4.25)。このことは、DP 臨界現象を電圧と シアの大きさの 2 つのパラメータ空間で調べること が可能であることを意味しており、今後、様々な実 験の可能性が考えられる [16, 43, 45, 51]。



図 6.4.25: 液晶位相欠陥乱流における DP 転移の 2 パラメータ相図

低レイノルズ数流体の可逆不可逆転移とレオロジー

ミクロでは可逆な方程式に支配されるが、マクロ では一般に可逆でないような、可逆から不可逆への 移り変わりは物理学の重要な問題の1つである。近 年、低レイノルズ数流体に非ブラウン粒子をいれ、 周期的せん断を加えた懸濁液系で、粒子の軌道につ いて可逆不可逆の転移が報告された。この転移では、 粒子の不可逆運動を反映した平均自乗変位と系の複 素粘性率の弾性項η"が、どちらも秩序パラメータと して機能することが経験的に知られている。

まず、我々は弾性項 η"を秩序パラメータとして、 この転移の臨界現象について実験をした。ランダム な初期粒子分布から始め、定常状態に入るまでの緩 和過程における η"の振る舞いから、転移点や緩和過 程の臨界指数を評価した [14]。次に、転移にともなっ て弾性が生じる機構について議論した [69, 31]。可逆 不可逆転移の鍵となる粒子同士の衝突に着目し、衝 突によって増大する応力とそれにより生じるフォー スダイポールの分布を結びつける表式を平均場的な 取り扱いから得た。この表式から、衝突由来の応力 の増大は、平均自乗変位を用いた秩序パラメーター と同じ時間変化を示すことが示唆された。

垂直加振下の濃厚懸濁液における局在構造

我々は垂直加振下のポテトスターチ懸濁液の界面 において、初期に界面に開けた穴が自発的に分裂を 始め、分裂と消滅を繰り返しながら穴が界面全体に 分布していく replicating hole を発見した。同様の局 在構造として F.Merkt らによりコーンスターチ懸濁 液で安定な穴が発見されていたが、分裂する穴との 関連性は分かっておらず、同一の懸濁液でこの両方 の局在構造を観察することはできていなかった。我々 は懸濁液中の紛体の粒径分布と、分散媒の表面張力 を変えることで、安定な穴が分裂する穴へと分岐す ることが分かった。このことから、粉体粒子間に働く 毛管力が穴の形状を安定化させているという事が示 唆されている。また、我々は反応拡散系での spot 解 に対して提唱されている変形と重心運動についての モデル方程式を使うことで、穴の基本的なダイナミ クスを説明できることを示した [15, 50, 57, 64, 89]。 このことは、全く異なる系である垂直加振された懸 濁液と反応拡散系での局在構造が同じ枠組みで理解 できる可能性を示唆している。

回転二重円筒系での粉粒体の自発的分離パターン

大きさや形の異なる複数の種類の粉粒体を容器に 入れ、機械的刺激によって擾乱を与えた際に誘起さ れる分離現象 (segregation)の時空間ダイナミクスに ついて実験と理論の両面から研究を行った。

水平に置いた円筒容器に大きさや形の異なる2種 類の粒子を部分的に充填して回転させると、粒子が 縞々の状態にバンドを形成して分離する現象が観察 されている。そのバンドは、時間の経過に伴い、衝 突・結合していき、相分離の緩和現象として理解で きることが知られている。一方、容器にほぼ完全に 粒子を充填させた場合には、粒子は円筒容器内で定 常的に対流を起こし、分離したバンドが生成されて は、一方向にほぼ定速で進行する進行波となること が分かった。円筒容器を二重円筒にして同様の実験 を行った結果、複数のバンドが同時に振動する現象を 発見した (図 6.4.26)。充填率と回転速度を変えるこ とで、一重円筒同様のバンドの進行波から振動解へ の分岐現象が起こることも明らかになった。さらに、 内部の分離構造を観察してみると、二重円筒で実験 を行った場合でも、一重円筒の高充填の場合と同様 の3層構造が観察されたことから、高充填率での定 常的なバンドの生成・消滅を伴うダイナミクスにおい て、円筒容器全体の対流にこの三層構造が非常に重 要な役割を果たしているものと考えられる [63, 60]。



図 6.4.26: 振動するバンド

沸騰熱伝達の特異的な効率上昇とその統計的性質

沸騰熱伝達は自由対流による熱輸送に加え、相変 化による潜熱を伴うため、高い熱伝達効率を有する ことが知られている。このため、沸騰による熱の伝

達はヒートパイプなどの熱交換器に利用され、小型 電子機器の冷却から航空宇宙分野と幅広いスケール で実装されている。また、原子力発電所などの大規模 発電機関においても沸騰現象が利用されているため、 同現象の産業上の重要性は論を待たない。しかしな がら、沸騰現象はその複雑さから、基礎科学の立場 での研究対象としては敬遠されてきた。そこで我々 は、非平衡物理分野で長年研究されてきた熱対流系 を気液二相状態に拡張した実験系を作成し、沸騰現 象の詳細を調べた。主たる実験結果としては、系に 流れる熱流が一定の場合でも、沸騰による熱の伝達 効率が最大で50%程度増加する現象が測定された。 また、そのときの加熱面温度分布は極小値を持つ非 自明な構造をとることが分かった。次に、その著し い熱伝達効率の上昇の持続時間の統計的な性質を調 べたところ、持続時間の確率分布関数は冪的に減衰 することが分かった [19, 22, 28]。

6.4.2 小さな非平衡系の物理

自己駆動する非対称粒子の複合体の運動

ポリスチレン粒子の半球を金属でコートした非対称な粒子(Janus 粒子)に水中で交流電場を加える と、自己駆動することが知られている。交流電場の 周波数を変えていくと、約30kHzを境に、粒子がど ちらの半球を前にして駆動するかが反転することが 実験的に報告されていた。また、高周波領域では、 Janus 粒子間に引力相互作用が働き、粒子同士がくっ ついて複合体を形成すること観察されていた。

それらの複合体のうち、我々は Janus 粒子が鎖状 に繋がった複合体に着目し(図 6.4.27)、その運動を 解析した。この鎖状構造体は、全体として自己駆動 しながらも、くねくねと折れ曲がりながら進んでい く。そこで、後ろの粒子がどれくらいの遅れをもっ て前の粒子に追随していくかを評価し、その遅延時 間が電場の2乗に反比例することを明らかにした。 また、遅延時間と駆動速度の関係を評価することで、 鎖状構造全体が曲率を保ったまま進むドリフト現象 が生じていることも明らかにした [24, 30, 74]。



図 6.4.27: Janus 粒子の鎖状構造

自走粒子の集団運動

鰯やムクドリなどの自発的に運動する粒子の集団 において、規則だった群れ運動が知られている。この ような群れ運動は近くにいる個体同士の相互作用に よって生じる。Vicsekらの報告など非常に単純な相 互作用だけで群れ運動が起こることが明らかになっ てきており、群れ運動の中に普遍的性質があるもの と期待されている。

我々は自走粒子の集団運動に関する議論の第一歩 として、表面張力によって自発運動する液滴を用い、 一粒子の自発運動に関して研究を行った。その結果、 自発的に生じる化学波によって運動が生じることを 明らかにした [9, 12]。また、表面張力場と流体場の カップルによって系に非対称性がなくても運動が生 じ得ることを明らかにした [3, 6]。

次に我々は多粒子モデルを用いて運動に履歴がある 自走粒子の集団運動に関して研究を行った。その結果、 運動の相関時間が十分長い時に粒子が渦状に並び、そ の渦が格子状に並ぶことを明らかにした[77,84]。ま た、粒子間の相互作用はネマチック相互作用しかな いものの、相関時間が短い時に粒子が一方向に揃っ た相が表れることを明らかにした。我々は更に上記 の数理モデルの連続場記述を得、運動の相関時間が 十分長い時に粒子同士に実効的に短距離の引力と長 距離の斥力が働くため渦の格子模様が生じることを 明らかにした [8,23,29,59,72]。

コレステリック液晶における温度勾配による thermomechanical coupling としての Lehmann 効果

コレステリック液晶は、そのカイラリティにより thermo-mechanical coupling が可能であり、温度勾 配により、テクスチャーが回転することが知られて いる(Lehmann 効果)。しかし、カップリングの係数 (Lehmann 係数)が「ミクロな分子のカイラリティ」 に依存するのか、「マクロならせん構造のカイラリ ティ」に依存するかについては議論が分かれている。 そこで我々は、この議論に答えを出すためコレス テリック液晶の等方相-液晶相の二相共存状態におけ る Lehmann 効果に注目した。まず、先行研究で報告 されている水平配向セルにおけるストライプ型の液 滴の回転の観察[図 6.4.28(a)]を再現することができ た [62, 25, 33]。一方、垂直配向セルにおいては、新た なタイプの液滴の回転 [同 (b,c)]を発見した。これら の液滴はカイラリティの反転により回転方向も反転



図 6.4.28: Lehmann 効果による液滴の回転

することを確認し、二相共存状態において Lehmann 効果は「マクロならせん構造」に起因することを示 唆する結果を得た [76]。

ミクロな系における情報熱機関の実現

熱力学の第2法則によれば、等温環境から正の仕 事を取り出し続ける熱機関は存在しない。しかし系 の状態を測定し、結果に応じた操作を行うことで、従 来の第2法則を超えて仕事を取り出せることが理論 的に知られている。我々は水中のコロイド粒子を光ピ ンセットによって捕捉し、その位置に応じたフィード バック制御を行うことで、等温環境からであっても正 の仕事を取り出せることを実験的に示した[17,55]。 次に、フィードバック操作の有用性と取り出した仕 事に関する等式(一般化Jarzynski等式)の両辺を 独立な実験によって測定し、これらが統計誤差の範 囲内で一致することを実証した[13, 26, 75]。

粗視化により隠れるエントロピー生成

断熱消去に代表されるように、多変数の発展を記 述する基礎方程式からいくつかの変数が消去され、 粗視化されたモデルが得られる場面は、流体方程式 の導出、化学反応系の現象論など、広く統計力学に 現れる。我々は、ゆらぐ世界の非平衡熱力学を記述 する確率過程モデルにおいて、元のモデルと粗視化 されたモデルとの間で、不可逆エントロピー生成の 値に差が生じる場合があることに着目した。この、 粗視化により「隠れる」エントロピー生成が有限に 存在する場合には、熱力学第二法則の階層に依存し ない定式化ができないなどの問題が生じるため、現 実の微小系の実験においても注意が払われる必要が ある。

我々は、モデルの変数についてのいくつかの条件の もとで、この隠れたエントロピー生成 Ξ が普遍的な等 式 $\langle e^{-\Xi} \rangle = 1$ を満たすことを示した [66, 20, 27, 70]。 ここで () はアンサンブル平均である。この等式は、 ゆらぎの定理の積分系と呼ばれるものに似た形式を しており、それらの場合と同様に直ちに (E) > 0 が 成り立つ。これは粗視化に伴ってエントロピー生成 の平均値は減る、ということを示しているが、より 一般的な枠組みでこの定理の意味を考えると、可逆 過程から不可逆過程が導出される場合など、一般に はこの不等式が破れる重要な例が存在する。具体的 な力学系モデルにより、本不等式が破れる場合には 前述の定理(1)の成立条件も破れているという点を 確認した。本結果は古典ハミルトン系の粗視化にお ける時間の矢の発生について、新しい示唆を与えて いる [34, 70]。

非平衡状態におけるゆらぎのエネルギー論

微小な系において見られる熱ゆらぎは、系と環境 とのあいだで起こる自発的な熱のやりとりによって 引き起こされる。ゆらぎのエネルギー論と呼ばれる 枠組みは、やりとりされた熱を系の従う確率的なダ イナミクスから定量する方法を与えるものであり、熱 を直接測定することが難しい微小系の実験において 系の熱力学的性質を議論するためには必要不可欠な 役割を果たす。

我々は、着目するスケールに応じて系のダイナミ クスが異なる方法で記述される場合について、異な る記述に対応するゆらぎのエネルギー論がどのよう に整合するかを調べた。既にその整合性が確立され ている平衡状態の場合とは異なり、系が非平衡状態 に駆動されているときにはゆらぎのエネルギー論に おける熱力学第二法則がスケールに依存した形をと りうることを具体的なモデルで見出した [54, 67, 21]。 また、系が非平衡状態にある場合でも、定常状態熱 力学として提案されているいくつかの第二法則的な 関係式はスケールに依存しないことを Markov 性を もつ一般の確率過程で示した [67, 21, 35, 73]。これ らの結果は、熱力学の意味での熱とゆらぎのエネル ギー論における熱との関係を考える上でも重要な示 唆を含んでいる [35]。

部分系における情報と熱力学の関係

熱浴およびコロイド粒子系や分子モーターなどの 小さい系が複数存在する場合、一般に個々の部分系 においては熱力学第二法則が成り立たないようにみ える(断熱系とみなせないので、エントロピー生成 は必ずしも増大しない)。しかしながら、Maxwell のデーモンのような単純なフィードバック制御中で は、情報量を含んだ熱力学第二法則のような式が成 り立つ(エントロピー生成は情報量によって制限さ れる)。この情報量とエントロピー生成に関する研究 は近年数多くなされており、我々はこの文脈でブラ ウン粒子における「ゆらぎ」と情報量の関係を指摘 し、温度の制限や熱力学第三法則を情報論的に論じた [10, 18, 56, 90]。しかしながら現在に至るまで、どの ような場合でも成り立つような情報量とエントロピー 生成に関する一般論は明らかになっていなかった。

そこで我々は、フィードバック制御に限らない相 互作用し合う複雑な過程で、熱力学第二法則や非平 衡関係式がいかに拡張されるかについて考察をした。 複雑な相互作用がある系をグラフ表現(ベイジアン ネットワーク)で数学的に記述することによって、情 報量を含んだ新たな熱力学第二法則と非平衡関係式 を導出した [65, 49, 68, 99, 100, 103]。

6.4.3 生命現象の物理

細胞の力学

細胞レベルの生命現象は、生物学のみならず物理 学にとっても魅力的な研究対象である。我々は典型 的な細胞生物学的現象である運動・分裂を対象とし て、その力学的性質の解明を進めている。 本年度は前年度に引き続き、細胞が力場に及ぼす 力場の定量的な解析を進めた。Traction Force Microscopy の空間解像度を改良することで、運動する 細胞の力場の微細な構造を検出した。さらに検出し た力場の局在と細胞の形態変化との関係を調べた。 それらの結果をもとに、簡単な仮定に基づいて細胞 内で力を生成している細胞骨格の張力分布を議論し た [95, 97, 101, 102]。合わせて分裂する細胞が基盤 に及ぼす力場を定量的に測定した(図 6.4.29)。得ら れた測定結果を解析して、力場の非対称性と分裂軸 との関係を明らかにした[5]。これは真核細胞が分裂 時に生成する力場を定量した初めての報告である。



図 6.4.29: 細胞分裂の際の力場の時空間変化

<受賞>

<報文>

(原著論文)

- K. A. Takeuchi: Statistics of circular interface fluctuations in an off-lattice Eden model, J. Stat. Mech., 2012, P05007 (2012).
- [2] K. A. Takeuchi and M. Sano: Evidence for Geometry-Dependent Universal Fluctuations of the Kardar-Parisi-Zhang Interfaces in Liquid-Crystal Turbulence, J. Stat. Phys., 147, 853-890 (2012).
- [3] N. Yoshinaga, K. H. Nagai, Y. Sumino, H. Kitahata: Drift instability in the motion of a fluid droplet with a chemically reactive surface driven by Marangoni flow, Phys. Rev. E, 86, 016108 (2012).
- [4] H. Ebata and M. Sano: Heaps in the fluid film induced by slip/non-slip switching boundary condition, EPL, 100, 14001 (2012).
- [5] H. Tanimoto, and M. Sano: Dynamics of Traction Stress Field during Cell Division, Phys. Rev. Lett., 109, 248110 (2012).
- [6] K. H. Nagai, F. Takabatake, Y. Sumino, H. Kitahata, M. Ichikawa, N. Yoshinaga: Rotational motion of a droplet induced by interfacial tension, Phys. Rev. E, 87, 013009 (2013).
- [7] K. A. Takeuchi and H. Chaté: Collective Lyapunov modes, J. Phys. A: Math. Theor. (in press).

6.4. 佐野研究室

(会議抄録)

- [8] 永井健:記憶を持つ自走粒子集団の渦格子形成に関する数理モデル,京都大学数理解析研究所講究録, 1808,73-77,2012年.
- [9] H. Kitahata, N. Yoshinaga, K. H. Nagai, Y. Sumino: Spontaneous Motion of a Belousov-Zhabotinsky Reaction Droplet Coupled with a Spiral Wave, Chem. Lett., 41, 1052-1054 (2012).
- [10] 伊藤創祐:フィードバックによる冷却と情報熱力学, 素粒子論研究・電子版, 13, 2012 年.
- [11] 竹内一将:界面成長模型としての ASEP: 普遍ゆらぎ とその実験検証,第18回交通流のシミュレーション シンポジウム 論文集,1-4,2012年.

(国内雑誌)

[12] 北畑裕之,義永那津人,永井健,住野豊:パターン形 成と結合した液滴の自発運動,日本物理学会誌,67, 385-389,2012年.

(学位論文)

- [13] Yuta Hirayama: Verification of the Generalized Jarzynski Equality by Utilizing Optical Tweezers, Master thesis, Mar. 2013.
- [14] 乙村浩太郎:低レイノルズ非ブラウン粒子懸濁液の吸 収状態転移と粘弾性に関する研究,修士論文,2013 年3月.
- [15] Hiroyuki Ebata: Localized structures in vertically vibrated complex fluids (垂直に加振された複雑流体 における局在構造), PhD thesis, Mar. 2013.
- [16] 黒田真史:液晶トポロジカル欠陥の乱流ダイナミクス (Turbulent Dynamics of Topological Defects in Liquid Crystals),博士論文,2013年3月.
- (著書)
- <学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [17] Y. Hirayama and M. Sano: Experimental realization of Szilard's engine, "kT log 2" '12 Cuenca Quantum fluctuations and Information, May 24-26, 2012, Cuenca, Spain.
- [18] S. Ito and M. Sano: A lower bound of the fluctuation response relation violation under feedback controls, A workshop on non-equilibrium fluctuation-response relations, June 5-8, 2012, Isola del Gilio, Italy.
- [19] Y. Mastui and M. Sano: Boiling Heat transfer Characteristics on the Two-Phase Rayleigh-Benard Convection under the Constant Heat Flow, GCOE International Symposium on Physical Sciences Frontier, Dec. 8-9, 2012, The University of Tokyo, Japan.

- [20] K. Kawaguchi and Y. Nakayama: Integral Fluctuation Theorem for Hidden Entropy Production, 4th YSM-SPIP in Sendai/Prologue Series IV of FSPIP, Dec. 14-16, 2012, Tohoku University, Japan.
- [21] Y. Nakayama and K. Kawaguchi: Excess Entropy Production Viewed at Different Scales, 4th YSM-SPIP in Sendai/Prologue Series IV of FSPIP, Dec. 14-16, 2012, Tohoku University, Japan.
- [22] Y. Mastui and M. Sano: Boiling heat transfer characteristics on the two-phase Rayleigh Benard convection, "Self-organization and Emergent Dynamics in Active Soft Matter", Feb. 18-20, 2013, Kyoto University, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Japan.
- [23] K. H. Nagai: Continuum Description of Vortex Lattice Formation of Self-Propelled Particle, "Selforganization and Emergent Dynamics in Active Soft Matter", Feb. 18-20, 2013, Kyoto University, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Japan.
- [24] D. Nishiguchi and M. Sano: Motions and Correlations of Snake-like Structures formed by Janus Particles, "Self-organization and Emergent Dynamics in Active Soft Matter", Feb. 18-20, 2013, Kyoto University, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Japan.
- [25] T. Yamamoto and M. Sano: Lehmann effect in cholesteric droplets under temperature gradient, "Self-organization and Emergent Dynamics in Active Soft Matter", Feb. 18-20, 2013, Kyoto University, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Japan.
- [26] Y. Hirayama and M. Sano: Extracting Work from an Isothermal Cycle: Experimental Verification of the Generalized Jarzynski Equality, The University of Tokyo - Korea University The 2nd Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 28 - Mar. 3, 2013, Seoul, Korea.
- [27] K. Kawaguchi and Y. Nakayama: Integral Fluctuation Theorem for Hidden Entropy Production, The University of Tokyo - Korea University The 2nd Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 28 -Mar. 3, 2013, Seoul, Korea.
- [28] Y. Mastui and M. Sano: Heat Transfer Characteristics on Nucleate Boiling in Two-Phase Rayleigh Benard Convection, The University of Tokyo - Korea University The 2nd Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 28 - Mar. 3, 2013, Seoul, Korea.
- [29] K. H. Nagai: Vortex lattice formation of selfpropelled particles through steric interaction, The University of Tokyo - Korea University The 2nd Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 28 - Mar. 3, 2013, Seoul, Korea.
- [30] D. Nishiguchi and M. Sano: Self-Propelling Motions of Asymmetrical Colloidal Particles induced by AC electric field, The University of Tokyo
 Korea University The 2nd Joint Workshop on

Bio-Soft Matter, Feb. 28 - Mar. 3, 2013, Seoul, Korea.

- [31] K. Otomura and M. Sano: The Shear Stress Increase by Interaction-Induced Forces in a Non-Brownian Suspension, The University of Tokyo -Korea University The 2nd Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 28 - Mar. 3, 2013, Seoul, Korea.
- [32] K. A. Takeuchi: Exploring universal scaling laws out of equilibrium with turbulent liquid crystal, The University of Tokyo - Korea University The 2nd Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 28 -Mar. 3, 2013, Seoul, Korea.
- [33] T. Yamamoto and M. Sano: The Observation of Lehmann Rotation of Cholesteric Droplets under Temperature Gradient as an Effect of Thermomechanical Coupling, The University of Tokyo -Korea University The 2nd Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 28 - Mar. 3, 2013, Seoul, Korea.
- [34] K. Kawaguchi and Y. Nakayama: Integral Fluctuation Theorem for Hidden Entropy Production, "Stochastic Thermodynamics", Mar. 4-15, 2013, Nordic Institute for Theoretical Physics, Sweden.
- [35] Y. Nakayama and K. Kawaguchi: What is Heat?, "Stochastic Thermodynamics", Mar. 4-15, 2013, Nordic Institute for Theoretical Physics, Sweden.

招待講演

- [36] M. Sano: Fluctuating Dynamics of Active Colloids, CECAM International Workshop "Emergent Dynamics in Driven Colloids", April 26-28, 2012, Lausanne, Switzerland.
- [37] M. Sano: Fluctuating Dynamics of Active Colloids, 10th International Symposium on Electrokinetics, May 20-24, 2012, Tsukuba, Japan.
- [38] M. Sano: Measuring and Controlling Out of Equilibrium Fluctuations, "Nonequilibrium Statistical Physics of Complex Systems", July 3-6, 2012, KIAS, Seoul, Korea.
- [39] M. Sano: Active Colloids as a Testing Ground for Nonequilibrium Order and Nonequilibrium Fluctuations, Japanese-German-French Workshop "Physics of Active Soft Matter", Sep. 24-25, 2012, Heidelberg, Germany.
- [40] K. A. Takeuchi: Experimental realization of KPZclass interfaces: what were done and need to be done?, BIRS Workshop "Integrable systems, growth processes and KPZ universality", Sep. 24-25, 2012, Banff, Canada.
- [41] M. Sano: Active Matter as a New Concept Bridging a Gap between Physical and Biological Systems, Self-driven and Non-equilibrium Systems Workshop, Oct. 26-28, National Chi Nan University, Taiwan.
- [42] M. Sano: Nonequilibrium Fluctuation and Dynamics of Active Colloids, Julich Soft Matter Days 2012, Nov. 13-16, 2012, Bad Honnef, Germany.

- [43] M. Sano: Directed Percolation and Transition to Turbulence in Sheared Liquid Crystals, 108th Statistical Mechanics Conference, Dec. 16-18, 2012, Rutgers University, U.S.A.
- [44] M. Sano: Experiments on Self-propelled Soft Matter - Cell Migration as an Active Soft Matter -, Special symposium on "Physics of non-linear, nonequilibrium, and non-conventional matter: From polymers to active soft matter", Feb. 17, 2013, Kyoto, Japan.
- [45] M. Sano: Electrohydrodynamic Instabilities for studying Nonequilibrium Pattern and Phase transition, A Symposium in the Honor of Shoichi Kai "Spatio-temporal Organization in Non-equilibrium Systems", Feb. 23, 2013, Fukuoka, Japan.
- [46] M. Sano: How Do Cells Crawl: A Simple Force-Velocity Relationship Revealed by Multipole Analysis of Traction Force Dynamics, The University of Tokyo - Korea University The 2nd Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 28 - Mar. 3, 2013, Seoul, Korea.

(国内会議)

一般講演

- [47] 江端宏之:ファラデー波に駆動された液滴の自己推進 運動,先端研究拠点形成事業 ハーフタイムミーティ ング 「界面駆動の自己推進粒子に関するミニワーク ショップ」, 2012 年 4 月 21 日,京都大学.
- [48] 竹内一将: Lyapunov ベクトル解析,「力学系とその周 辺分野の研究」,2012 年 7 月 9-13 日,京都大学 数 理解析研究所.
- [49] 伊藤創祐,沙川貴大:繰り返しフィードバックでの二 つの系の相互情報量,基研研究会 2012「非平衡系の 物理 -その普遍的理解を目指して」,2012年8月1-4 日,京都大学 基礎物理学研究所.
- [50] 江端宏之、佐野雅己:懸濁液界面における穴の形状の分岐について、基研研究会 2012「非平衡系の物理 ーその普遍的理解を目指して」、2012 年 8 月 1-4 日、 京都大学 基礎物理学研究所.
- [51] 黒田雅史:流れの中のトポロジカル欠陥乱流,基研研 究会 2012 「非平衡系の物理 -その普遍的理解を目 指して」,2012 年 8 月 1-4 日,京都大学 基礎物理学 研究所.
- [52] 川口喬吾: 揺動応答関係の別表式と Entropy/Frenesy 対応,基研研究会 2012 「非平衡系の物理 - その普 遍的理解を目指して」, 2012 年 8 月 1-4 日,京都大 学 基礎物理学研究所.
- [53] 竹内一将:液晶乱流が示す KPZ 界面成長の特異な時間相関,基研研究会 2012 「非平衡系の物理 その普遍的理解を目指して」,2012 年 8 月 1-4 日,京都大学 基礎物理学研究所.
- [54] 中山洋平,川口香吾:"断熱消去"により現れる非平 衡熱力学第2法則,基研研究会2012「非平衡系の物 理-その普遍的理解を目指して」,2012年8月1-4 日,京都大学基礎物理学研究所.

- [55] 平山雄大,佐野雅己:等温環境から仕事を取り出す情報熱機関の実現,基研研究会2012「非平衡系の物理 ーその普遍的理解を目指して」,2012年8月1-4日, 京都大学基礎物理学研究所.
- [56] 伊藤創祐,佐野雅己:フィードバック制御による冷却 と熱力学第三法則,日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 18-21 日,横浜国立大学.
- [57] 江端宏之: 懸濁液界面における孤立パターンの分岐に ついて,日本物理学会 2012 年秋季大会,2012 年 9 月 18-21 日,横浜国立大学.
- [58] 竹内一将: KPZ クラス普遍ゆらぎのクロスオーバー: 成長界面から定常界面へ、日本物理学会 2012 年秋季 大会、2012 年 9 月 18-21 日、横浜国立大学.
- [59] 永井健:履歴を持った自走粒子の集団運動の連続場 記述,日本物理学会 2012 年秋季大会,2012 年 9 月 18-21 日,横浜国立大学.
- [60] 稲垣紫緒,江端宏之,吉川研一:回転する二重円筒系 での粉粒体の自発的分離の時空間パターン,第11回 関東ソフトマター研究会,2012年10月20日,東京 大学物性研究所.
- [61] 江端宏之:ファラデー波に駆動された自己推進粒子, 第11回関東ソフトマター研究会,2012年10月20日,東京大学物性研究所.
- [62] 山本尚貴,佐野雅己:コレステリック液晶の液滴状態 における Lehmann 効果,第11回関東ソフトマター 研究会,2012年10月20日,東京大学物性研究所.
- [63] 稲垣紫緒,江端宏之,吉川研一:回転する二重円筒系 での粉粒体の自発的分離の時空間パターン,「摩擦、レ オロジー、地震の新展開 -異なる階層と舞台をつ なぐ-」,2012年11月6-8日,京都大学 基礎物理 学研究所.
- [64] 江端宏之, 佐野雅己: 懸濁液界面における孤立パターンの粒径依存性について,「摩擦、レオロジー、地震の新展開 -異なる階層と舞台をつなぐー」, 2012年11月 6-8 日, 京都大学 基礎物理学研究所.
- [65] 伊藤創祐,沙川貴大:ネットワーク上の情報熱力学, 森肇先生記念研究集会 - 非線形・非平衡系の統計力 学-,2012年11月23日,九州大学応用力学研究所.
- [66] 川口喬吾,中山洋平:粗視化により隠れるエントロ ピー生成と非平衡関係式,森肇先生記念研究集会 -非線形・非平衡系の統計力学-,2012年11月23日, 九州大学応用力学研究所.
- [67] 中山洋平,川口喬吾:縮約にともなう物理量の変化と 非平衡熱力学第二法則,森肇先生記念研究集会 - 非 線形・非平衡系の統計力学-,2012年11月23日,九 州大学応用力学研究所.
- [68] 伊藤創祐,沙川貴大:ネットワーク上の情報熱力学, 日本物理学会 2013 年年次大会, 2013 年 3 月 26-29 日,広島大学.
- [69] 乙村浩太郎,佐野雅己:非ブラウン粒子懸濁液の可逆 不可逆転移とレオロジー,日本物理学会 2013 年年次 大会,2013 年 3 月 26-29 日,広島大学.
- [70] 川口喬吾,中山洋平:粗視化により隠れるエントロ ピー生成の満たす等式,日本物理学会2013年年次大 会,2013年3月26-29日,広島大学.

- [71] 竹内一将, Hugues Chaté:集団挙動 Lyapunov モード, 日本物理学会 2013 年年次大会, 2013 年 3 月 26-29日, 広島大学.
- [72] 永井健:回転運動する自走粒子集団が形作る格子パターン,日本物理学会2013年年次大会,2013年3月26-29日,広島大学.
- [73] 中山洋平,川口喬吾:隠れたエントロピー生成の影響を受けない非平衡熱力学第二法則,日本物理学会2013 年年次大会,2013 年 3 月 26-29 日,広島大学.
- [74] 西口大貴,佐野雅己:交流電場によるコロイド粒子の 運動と揺らぎ,日本物理学会2013年年次大会,2013
 年3月26-29日,広島大学.
- [75] 平山雄大,佐野雅己:光ピンセットを用いた一般化 Jarzynski 等式の検証実験,日本物理学会 2013 年年 次大会,2013 年 3 月 26-29 日,広島大学.
- [76] 山本尚貴,佐野雅己:コレステリック液晶の液滴状態 における Lehmann 効果,日本物理学会 2013 年年次 大会,2013 年 3 月 26-29 日,広島大学.

招待講演

- [77] 永井健,住野豊:記憶を持った自走粒子集団の秩序形成,分子ロボティクス研究会4月定例会,2012年4月27日,名古屋大学.
- [78] 佐野雅己: Active Colloids: Nonequilibrium Dynamics and Fluctuation, 基研研究会 2012 「非平衡系の 物理 -その普遍的理解を目指して」, 2012 年 8 月 1-4 日,京都大学 基礎物理学研究所.
- [79] 佐野雅己:マックスウェルの悪魔と情報・エネルギー 変換, FIRST Quantum Information Processing Project, Summer School, 2012 年 8 月 8-10 日,宮 古島.
- [80] 竹内一将:界面成長とランダム行列の不思議な関係 ~目で見る非平衡普遍法則~,第57回物性若手夏 の学校,2012年8月8-9日,岐阜.
- [81] 佐野雅己:光による高分子とコロイドの輸送・集積・ 分離とその原理,第11回未踏科学サマー道場,一材 料科学・生命科学を変革するソフトマテリアル、その 研究の最前線-,2012年8月16-18日,湘南国際村 センター.
- [82] 竹内一将:界面成長とランダム行列,日本物理学会 2012 年秋季大会,2012 年 9 月 18-21 日,横浜国立 大学.
- [83] 佐野雅己:液晶乱流中のトポロジカル欠陥ダイナミ クス,日本物理学会 2012 年秋季大会、シンポジウム 「量子流体で拓かれる新しい物理」、2012 年 9 月 18-21 日,横浜国立大学.
- [84] 永井健,住野豊,大岩和弘:ダイニンに駆動されたマ イクロチューブによる巨大渦の格子形成,第50回日 本生物物理学会年会,2012年9月22-24日,名古屋 大学.
- [85] 竹内一将:大自由度力学系の有効次元と示量性 ~Lyapunov 解析によるアプローチ~,力学系の作る集団 ダイナミクス -保存系・散逸系の枠組みを越えて-, 2012 年 9 月 26-28 日,京都大学 基礎物理学研究所.

- [86] 竹内一将:界面成長の普遍ゆらぎ:「目で見る」ラン ダム行列理論の統計則,第17回久保記念シンポジウム「ゆらぎのなかの構造」,2012年10月6日,東京学士会館.
- [87] 佐野雅己:アクティヌマター:ミクロとマクロをつな ぐ非平衡系の新たな視点,第51回玉城記念公開学術 講演会「物質と情報のはざまで-非平衡・情報・アク ティブマター-」,2012年11月28日,京都大学.
- [88] 竹内一将:界面成長模型としての ASEP: 普遍ゆらぎ とその実験検証,第18回 交通流のシミュレーション シンポジウム,2012年12月13-14日,名古屋大学.

(セミナー)

- [89] 江端宏之,佐野雅己:垂直加振下の懸濁液界面における分裂する穴の形状の分岐,千葉大学 櫻井・北畑研究室 セミナー,2012 年4月16日.
- [90] S. Ito: The relation between information and lower bound to a temperature of a Brownian particle, 京 都大学 基礎物理学研究所 物性セミナー, 2012 年 4 月 18 日.
- [91] K. A. Takeuchi: active interfaces: speculative bridge from liquid-crystal turbulence to competing biological populations, Wakamoto Laboratory Seminar, Apr. 18, 2012, The University of Tokyo, Center for Complex Systems Biology, Japan.
- [92] K. A. Takeuchi: Fluctuations universelles des interfaces croissantes: évidence expérimentale et connexion à la théorie des matrices aléatoires, Groupe de travail "processus tochastiques, systèmes hors d'équilibre", Apr. 26, 2012, CEA-Saclay, France.
- [93] K. A. Takeuchi: Universal fluctuations of growing interfaces: experimental evidence and connection to random matrix theory, seminar of Laboratoire PMCN, May 11, 2012, Université Lyon 1, France.
- [94] 竹内一将:液晶の"量子渦"乱流が見せる非平衡臨界現象の普遍性,大阪市立大学素励起物理学研究室セミナー,2012年6月4日.
- [95] H. Tanimoto: A simple force-motion relationship of migrating cells, Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, June 14, 2012, Germany.
- [96] K. A. Takeuchi: Liquid-crystal turbulence unveils universality out of equilibrium, Overture of FSPIP2013, June 19, 2012, The University of Tokyo, Japan.
- [97] H. Tanimoto: A simple force-motion relationship of migrating cells, Physics of Complex Systems, Heidelberg University, July 12, 2012, Germany.
- [98] 竹内一将:ゆらぐ界面成長の普遍法則と「目で見る」 ランダム行列理論の統計則,京都駅前セミナー ~非 線形現象の数理を考える~,2012年7月13日,キャ ンパスプラザ京都.
- [99] 伊藤創祐,沙川貴大:ネットワーク上の情報熱力学, 東京大学 佐野研究室セミナー,2012 年 8 月 30 日.

- [100] 伊藤創祐,沙川貴大:ネットワーク上の情報熱力学, 広島大学 NLPM コロキウム, 2012 年 10 月 26 日.
- [101] H. Tanimoto: A simple force-motion relationship of migrating cells, biophysique de l'ENS, Dec. 10, 2012, France.
- [102] H. Tanimoto: A simple force-motion relationship of migrating cells, ESPCI Gulliver seminar, Dec. 17, 2012, France.
- [103] 伊藤創祐:ネットワーク上の情報熱力学,京都大学 基礎物理学研究所物性セミナー,2013年3月4日.

(他学科講義)

- [104] 佐野雅己, 数理生物学, 理学部生物情報学科, 2012 年夏学期.
- [105] 佐野雅己:不安定性を正しく理解する:秩序と乱れを 生み出す自己組織化のメカニズム,東京大学 EMP 講 義,2012 年 5 月 26 日,東京大学伊藤学術センター.
- [106] 佐野雅己:不安定性をてなづける:秩序と乱れを生み出す自己組織化のメカニズム,2012年11月24日, 東京大学 EMP 講義,東京大学伊藤学術センター.

6.5 山本研究室

6.5.1 はじめに

【星・惑星系形成】恒星および惑星系の形成は、宇宙 における最も基本的な構造形成過程の1つであり、観 測・理論両面から活発な研究が行われている。また、 我々の太陽系の起源、生命の起源に直結するテーマ でもある。本研究室では、星・惑星系形成とそこで の物質進化を、電波観測(主にミリ波、サブミリ波、 テラヘルツ波観測)によって研究している。

新しい星は、星間ガスが自己重力で収縮して形成 される。星間ガスの集まり(星間雲)の中で最も密 度が高いものが星間分子雲で、新しい恒星と惑星系 が形成される現場である。星間分子雲の主成分は水 素分子であるが、様々な原子・分子も僅かに存在し ている。これまでの研究で、それらの組成は星間分 子雲の物理進化の歴史を克明に記憶していることが わかってきた。即ち、微量分子の組成から、現在の 物理状態だけでなく、「過去」を辿ることができる。 本研究室では、このような独創的視点を軸に、星・惑 星系形成過程を多面的に研究している。

【なぜ電波か】星間分子雲の温度はおよそ10K程度 である。この「宇宙の中でも最も低温の天体」は、最 もエネルギーの低い電磁波である「電波」のみを放 射する。しかも、電波は光などに比べて星間物質に よる吸収散乱を受けにくく、透過力が高い。そのた め、星間分子雲の奥深くで起こる星形成の核心部分 を見通すことができる。また、電波領域には原子・分 子のスペクトル線が多数存在し、それらの観測で星 間分子雲の運動や分子組成がわかる。

【動き出した ALMA (アルマ)】 我々は国内外の大型 電波望遠鏡を駆使して、星・惑星系形成領域の観測を展 開しているが、感度、分解能ともに十分ではない。そ れを解決するのが ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) である。 ALMA は、チリ の標高 5000 m のアタカマ高原に作られる 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 干渉計で、日本、北米、欧州による共同建設が進ん でいる。2011 年 10 月から部分運用が始まっており、 我々のグループでも初期成果が出つつある。 ALMA は既存装置よりも 2 桁高い感度と解像度を実現し、 星・惑星系形成の理解を一挙に進展させるであろう。

【テラヘルツ帯観測の開拓】テラヘルツ帯は電波と赤 外線との中間にあたり、観測的研究がまだ十分に進 んでいない波長域である。そこには C⁺, N⁺ などの 原子スペクトル線の他、CH, H₂D⁺, HD⁺ などの基 本的分子のスペクトル線がある。それらの観測によ り、星・惑星系形成における物質進化の根幹を捉え ることができる。世界的には 2009 年に打ち上げら れた Herschel 衛星によりテラヘルツ帯観測が進めら れた。本研究室では、それとは相補的に、チリに設 置されている ASTE 10 m 望遠鏡による高分解能観 測を目指しており、2011 年度には、これまでに開発 してきたテラヘルツ帯受信機を搭載して試験観測を 行った。本研究室は、1998 年から 2005 年まで、富 士山頂に口径 1.2 m のサブミリ波望遠鏡を設置、運 用した実績がある。この経験を発展させて、テラへ ルツ分子観測を展開していきたい。

6.5.2 星形成の観測研究

原始星円盤から原始惑星系円盤への物質進化の 理解は、近年急速に進みつつある。その重要な結果 の一つは、低質量星近傍の分子組成が天体ごとに顕 著に違うことがわかった点である。その一つの典型 は、HCOOCH₃などの大型飽和有機分子が原始星 近傍の 100 AU 程度の領域に豊富に見られる天体 で、ホットコリノ天体と呼ばれる(へびつかい座の IRAS16293-2422 など)。もう一つの典型は、炭素 鎖分子が異常に豊富な天体(おうし座のL1527、お おかみ座の IRAS15398-3359) で、WCCC (Warm Carbon-Chain Chemistry) 天体と呼ばれる。WCCC 天体では、原始星近傍で CH4 が星間塵から蒸発し、 それが原料となって炭素鎖分子が爆発的に形成され ている。ホットコリノ天体とは対照的に、WCCC 天 体では大型飽和有機分子は検出されない。このよう な分子組成の違いの原因は、母体となる分子雲の収 縮時間の違いによると考えられ、星形成研究におい ても注目され始めている。さらに、分子組成の違い の惑星系への伝播についても大きな興味がもたれ始 めている。本研究室では、低質量星形領域を中心に、 電波観測による幅広い研究を進めている。

星間分子雲から惑星系への物質進化



 \boxtimes 6.5.30: A schematic illustration of our goal

【L1527 のラインサーベイ】おうし座の L1527(d = 137 pc) は WCCC を示す低質量原始星である。我々はその分子組成の全貌を明らかにするため、野辺山45 m 望遠鏡を用いてラインサーベイ観測を行ってきた。これまでに79—116 GHz の周波数範囲の観測を完了し、L1527 の化学組成の全貌を明らかにした。この天体では種々の炭素鎖分子が豊富に存在することが改めて確認された。なかでも c-C₃H₂ は非常に

豊富で、その¹³C同位体種を2種類とも検出できた。 さらに、重水素置換体 c-C₃HD とともに2重水素置 換体 c-C₃D₂の検出にも成功し、c-C₃HD/c-C₃H₂比 が 0.07、c-C₃D₂/c-C₃H₂比が 0.002 と求められた。 異常な重水素濃縮は起こっておらず、c-C₃H₂が豊富 にあるために検出できたものと見られる。また、関 連分子であるシクロプロペノン (c-C₃H₂O) も検出で きた。この分子はこれまで銀河中心方向で検出され ていたが、近傍分子雲での検出は初めてである。そ の検出は、L1527 が新星間分子の探査の新しい対象 天体となり得ることを意味している。

【ALMA による L1527 の高分解能観測】 ALMA の 部分運用 (Cycle 0) で L1527 の観測を行った。1.2 mm 帯、0.8 mm帯の分子スペクトル線の強度分布を0.7 秒角程度の分解能で調べた。その結果、CCH, c-C₃H₂ などの炭素鎖分子は、原始星から半径140 AU 程度の ところで最も豊富となり、中心部分で減少している 様子が捉えられた。ドップラー効果の解析から、これ らの分子が回転しながら原始星円盤に落ち込んでい る様子が明瞭に捉えられた。また、c-C₃H₂の高励起 スペクトル線はそれより内側からも観測された。こ のことは、炭素鎖分子が原始星円盤にまでもたらさ れていることを意味している。一方、SOやCH₃OH は原始星円盤のみに存在する。このように、原始星 円盤の形成に伴って、化学組成が劇的に変化する様 子が捉えられた。CH3OHのスペクトル線は非常に 微弱であることから、中心部分においてもその存在 量は多くないと予想される。WCCC 天体でホットコ リノに特有の飽和有機分子が少ないことが、原始星 近傍においても確認された。



 \boxtimes 6.5.31: The CCH emission (contours) superposed on the continuum emission (gray scale) observed toward L1527 with ALMA

【Serpens SMM4 のラインサーベイ】Hot Corino の化学組成の全貌を明らかにする目的で、我々はHot Corino 天体である Serpens SMM4 のラインサーベ イ観測を推進している。2011 年度の ASTE による 345 GHz の観測に加え、3 mm 帯での補足観測を野 辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて実施した。ASTE 観測 で検出した分子に加え、新たに HC₃N、CH₃CCH、 C_4H 、HNCO、SiOを検出した。重水素化物やHCO⁺の同位体種のスペクトルの線幅は、CH₃OHやH₂COの線幅と比較して狭いなど、分子による線幅の違いが見られた。一般に線幅が狭い分子の方が回転温度が低い傾向が見られる。これは、存在する領域が分子ごとに違うことを示唆している。



 \boxtimes 6.5.32: Spectral line survey in the 345 GHz band toward the low-mass protostar, Serpens SMM4, with ASTE

【L1157 B1 における衝撃波化学】2008 年から 2011 年にかけて、野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて低質量 星形成領域 L1157 mm 周辺の衝撃波領域、L1157 B1 におけるラインサーベイを行った。そこで検出され た分子について柱密度を計算するとともに、他の星 形成領域と比較のため、どの星形成領域でも多量に 存在する CH₃OH を基準に規格化した存在量比を求 めた。その結果、HCOOH、HCOOCH₃、CH₃CHO などの複雑な有機分子は、低質量星形成領域である IRAS 16293-2422 では L1157 B1 よりも存在比が高 く、大質量星形成領域の Sgr B2 や Orion KL では L1157 B1 と同等程度かより少ない存在比となる傾向 が見られた。一方、SOやSO2のような比較的単純 な分子では大質量星形成領域でも L1157 B1 より存 在比が高いものが見られた。L1157 B1 の衝撃波を引 き起こした双極分子流の力学的年齢は 1.8 × 10⁴ yr 程度と見積もられている。HCOOH や、HCOOCH₃ などの複雑な有機分子は、L1157 B1 の双極分子流の 力学的年齢内では気相反応で生成できないため、以 前に星間塵上で生成していたものが衝撃波によって 蒸発し、観測されたと考えられる。一方、SO など の単純な分子は、星間塵から前駆物質が蒸発した後、 104 yr 程度の時間で、気相中で十分な量を生成する ことが可能である。このような生成過程の違いのた め、分子ごとの存在比の違いが現れると考えられる。

【低質量星形成領域の重水素濃縮】原始星形成に伴う 重水素濃縮の変化を確立する目的で、低質量原始星 形成領域 L1551, IRAS16293-2422 に対して重水素濃 縮度分布を調べた。L1551 では原始星方向で DCO+ の重水素濃縮度が減少している一方で、DNC の重 水素濃縮度は周辺と変わらないことがわかった。同 時に観測した N₂H⁺ と比較することで、DCO⁺ の 重水素濃縮度に対しては原始星近傍の高温領域では 周囲の低温領域 (エンベロープ) と比較して重水素濃 縮度が有意に減少していること、また、DNC の重水 素濃縮度は変化していないことを定量的に示すこと ができた。原始星が形成されて温度が上昇すると重 水素濃縮が解消されると考えられるが、この解消速 度がイオンに比べて中性分子が遅いためと考えられ る。中性分子の重水素濃縮度が原始星形成直後の状 態を保持していれば、その観測を通して原始星形成 直前の物理状態についての知見が得られることにな る。一方, IRAS16293-2422 ではこのような明確な 差異は見られなかった。それは、周囲の低温のエン ベロープの影響によるものと考えられ、その寄与を 除くことが星形成に伴う重水素濃縮度の変化を調べ る上で不可欠と考えられる.

【星なしコアにおける CH₃OH の起源】CH₃OH は 星間分子雲における基本的な有機分子であり、一般 に星間塵上で生成され星形成活動に伴う温度上昇に よって気相中に蒸発してくると考えられている。し かし、TMC-1 (~10 K) のような蒸発温度に達して いない低温分子雲においても相当量の CH₃OH が検 出されており、その生成機構については未だ議論が 続いている。我々は、野辺山 45 m 電波望遠鏡を用 いて TMC-1(CP) の周辺 150"四方のマッピング観 測を行った。CH3OHの詳細な分布を調べたところ、 高密度ガスをトレースすると考えられている C³⁴S と 反相関している部分があることを見出した。その分 布は分子雲全体をトレースする C¹⁸O の分布とむし ろ類似している。低温下での CH₃OH の脱離機構と しては、宇宙線によって生じる紫外線による光脱離 の効果が考えられる。その場合、星間塵からの脱離 量は密度によらず一定となるため、CH₃OH は空間 的に広く分布することが期待され、観測と矛盾しな い。本研究により、低温分子雲においても、星間塵 の化学組成が気相中の化学組成に影響を与えている 可能性が改めて確認された。

【重水素化分子の精密観測】宇宙における重水素の存 在比が D/H~10⁻⁵ であるのに対し、低温の星間分 子雲中では、重水素は分子に数%の割合にまで濃縮さ れる。この濃縮度は、星間分子雲の進化とともに増加 していくため、星形成前の星間分子雲の進化段階の 指標としてよく用いられる。従って、代表的な星間分 子雲について、種々の分子の重水素濃縮度を正確に求 めておくことは基本的重要性を持つ。そのような動機 から、野辺山 45 m 電波望遠鏡に搭載した 70GHz 帯 の受信機を用いて、おうし座の L1527、TMC-1、お おかみ座の IRAS15398-3359、Lupus-1A、 へびつか い座の IRAS16293-2422 に対し、基本的分子 (HCN, HNC, HCO⁺, C₂H, HN⁺₂)の重水素化物のスペクト ル線の観測を行った。高い速度分解能で観測をした ことにより、HN¹³C, DNC でスペクトル線の超微細 構造を明瞭に分離して観測できた。この超微細構造 を利用し、分子の励起温度を求めると、両者の励起 温度が異なる可能性があることがわかった。その原 因はまだ不明だが、重水素濃縮度の正確な評価にお いて解決すべき課題である。

【HCL2領域におけるCHの分布】おうし座のHeiles Cloud 2 (HCL2)領域におけるCHスペクトル線(波 長9 cm)の観測をEffelsberg 100 m 望遠鏡を用い

て行った。HCL2 領域は炭素鎖分子が豊富な星なし コア TMC-1 や、WCCC 天体 L1527 を含む分子雲で ある。そのような特徴的な化学組成を生じる環境効 果を特定するため、HCL2領域全体の形成過程に着 目して CH の観測を行った。この領域は、全体とし てはリング状の構造をしているが、炭素原子 (C) は 南東側に、CO分子は北西側に偏って分布している。 これは炭素原子から CO 分子への化学進化に対応し ており、北西側から分子雲形成が進んできているこ とが指摘されている。本観測で、CH の分布は、炭 素原子と CO 分子の分布をつなぐように分布してい ることが確かめられた。CH は炭素原子から CO を 生成する際の中間体なので、この分布は上記の化学 進化の考え方を支持する。さらに、CH のスペクト ルは線幅の細いコア成分と線幅の太いエンベロープ 成分からなり、分子雲形成に伴ってエンベロープ成 分が消失することもわかった。このように CH のス ペクトル線は、分子雲形成の物理・化学過程を研究 する上で有用なプローブであることが示された。

【HCL2 領域における OH 吸収線の解析】 HCL2 の 東にある希薄な星間雲に対して、Effelsberg 100 m 望遠鏡を用いて OH の基底状態遷移の観測を行った。 この遷移は 1612 MHz, 1665 MHz, 1667 MHz, 1720 MHzの4本の超微細構造線からなり、それらのうち 1612 MHz の遷移が宇宙背景放射に対する吸収線と して観測された。吸収線を説明するため、OH 分子 の統計平衡計算を行ったところ、吸収を起こしてい る雲の運動温度は50K程度であることが示された。 また、1612 MHz 遷移は 40 K 程度以上で吸収線、40 K 程度以下で輝線となることがわかり、良い温度計 となり得ることもわかった。一方、HCL2本体につ いても4点で観測したところ、1612 MHz 遷移のス ペクトルはいずれも輝線と吸収線の2つの成分が混 在していた。このことは、HCL2 は温かいガスと冷 たいガスの2層構造になっている可能性を示唆する。

6.5.3 系外銀河の化学組成

巨大分子雲 (GMC) は銀河スケールと個々の星形 成を繋ぐ中間階層であり、その形成と進化が近年注 目を集めている。個々の GMC の環境・履歴とそこで 起こる星形成の規模・形態との関連を確立すること は、銀河における星形成史を理解する第一歩である。 その手段の1つとして、銀河系内の星形成領域で使 われてきた化学進化の手法がある。GMC の化学組成 は GMC の存在する環境や進化段階に応じて変化す ると考えられるため、化学組成から GMC の過去の 履歴を推定できる。今後本格的に稼働する ALMA で は、近傍銀河において CO 以外の様々な分子が容易 に検出されることが期待され、個々の GMC の分子 組成を調べることができる。化学進化の手法とこれ までの運動学的な視点と組み合わせることで、GMC の形成・進化に迫りたい。

【M51 の渦状腕に対するラインサーベイ】近傍の円 盤銀河 M51 の渦状腕に対して、3 mm および 2 mm

帯のラインサーベイ観測を IRAM 30 m 電波望遠鏡 を用いて実施した。前年度に観測した位置 (P1) の南 側に隣接する点 (P2) を新たに観測し、16 輝線、11 種 類の分子を検出した。この2点の分子組成を比較し たところ、ほとんど違いが見られなかった。一方で、 P1はP2と比較して星形成率と星形成効率はそれぞ れ2倍と1.5倍高く星形成活動が活発である。CSと HNCOから求めた回転温度は10K以下と低温であ ることから、検出した分子は主に星形成活動の影響 をあまり受けていない分子雲中に存在していると考 えられる。CO に次いで存在量が高い CH₃OH は星 間塵上で生成される分子で、気相で検出されるため には星間塵から蒸発してこなければならない。P1と P2でCH₃OHの存在量に違いがないことから、星形 成活動が蒸発機構である可能性は低く、分子雲同士 の衝突による衝撃波などの別の機構が働いていると 考えられる。

【M83の棒状構造における化学組成】M83は銀河系 近傍の棒渦巻銀河である。棒状構造の付随する分子ガ スの化学組成を調べるために、野辺山 45 m 電波望遠 鏡を用いて、10種類の分子について観測を実施した。 観測の結果、HCN、HCO⁺、CS、CH₃OH、C¹⁸O、 ¹³COを検出した。非軸対称な重力ポテンシャルを持 つ棒状構造では、内部のガスの軌道が円運動から大 きく逸脱する。その結果、分子雲同士の衝突頻度が 上昇し衝撃波が卓越すると考えられており、衝撃波 のプローブとなる分子の組成が高くなると予想され る。しかし、M51の渦状腕と M83の棒状構造では 衝撃波プローブである CH₃OH の組成には違いは見 られなかった。一方で、CSの組成は棒状構造で4倍 高く、M51の渦状腕との違いもあることを示唆して いる。この違いが銀河の個性なのか銀河の構造の違 いによるものか区別するために、今後は M83 の渦状 腕においても同様な観測を計画している。

6.5.4 テラヘルツ帯観測技術の開拓

テラヘルツ帯における観測を行うためには、そこ 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 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。そこで、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行って いる。HEB ミクサ素子は電磁波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)がある。我々は、主に NbTiN や NbN 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。

【HEB ミクサのゲインバンド幅測定】我々の製作し た HEB ミクサは世界最高の低雑音を達成している。 1.5 THz での受信機雑音温度は 490 K であり、これ は量子雑音の約7倍に相当する。しかし、一方で我々 の受信機は中間周波数帯域を 1.0-1.2 GHz と狭い周 波数帯に取っており、観測上の制限が大きく、特に 線幅の大きい天体の観測が困難である。従って、中 間周波数帯域の拡張が1つの大きな開発課題である。 そのためには、一般に超伝導マイクロブリッジを3 nm 程度まで薄くする(格子冷却)方策が取られる。 しかし、我々の装置では8 nm 以上の薄膜化は困難 であるため、マイクロブリッジの長さを短くして帯 域の拡張を図った (拡散冷却)。すると、予想通り利 得帯域はブリッジの長さに依存しており、HEB ミク サ中の電子温度にも依存していることが示された(図 4)。 また、この測定から得られた NbTiN 薄膜中で の電子の拡散係数を用いて電子の冷却タイムスケー ルを求めると、拡散冷却が格子冷却の約2倍の効率 で働いていることがわかった。この結果から、現在 0.15 μm であるブリッジ長を 0.1 μm まで短縮でき れば約3GHzまで中間周波数帯域を伸ばせることが わかり、それに向けた開発研究が進行中である。



 \boxtimes 6.5.33: Measured IF bandwidths for different microbridge lengths of the HEB mixer

【ワイドバンド導波管ミクサの設計】我々が開発を進めている THz 帯の電波観測を目指した導波管型超 伝導 HEB ミクサ受信機は、現在、望遠鏡への搭載・ 試験観測を行う段階にまで到達している。今後の科 学観測における効率化の観点から、受信周波数帯域 の広帯域化を目指した受信機の設計を行った。超伝 導 HEB ミクサ素子は導波管内部にマウントされて いる。導波管を用いた電磁波とミクサ素子の結合方 式の場合、導波管内の電磁場のモードの制限から観 測周波数帯域は比帯域にして 30 %程度しか取れない ということが一般に言われてきた。しかし、電磁界 シミュレーションを用いて導波管内のアンテナ・フィ ルタ回路等の形状を最適化することで、比帯域が 60 %近い受信機を設計できることがわかった。これは テラヘルツ帯の地上からの電波観測においては、0.9 THz の大気の窓と 1.3/1.5 THz の大気の窓を一つの 受信機でカバーできるようになることを意味してい る。このような設計の受信機を作成・運用することに より、効率のよい天体観測が可能になる。また、将 来の ALMA の拡張計画においても応用できると考 えられる。

【2012 年度の ASTE 望遠鏡への搭載実験】2011 年 度の初めての THz 受信機 ASTE 望遠鏡搭載実験の 成功と課題を踏まえ、次の2点で受信機の改良を行っ た。第1は局部発振信号の安定化である。局部発振 器は受信機デュワーの側面に光学台を介して取り付 けられ、信号は準光学的にデュワー内に導かれてい るため、デュワー全体の機械的振動の影響が避けら れない。そこで、局部発振器を取り付ける光学台を より剛性の高いものに変更し、振動による局部発振 信号の強度変化をある程度抑圧した。第2は完全リ モート観測の実現である。2011年度の受信機では、 光学台やバイアス源の調整が手動であったため、局 部発振信号の周波数を変更する度に直接望遠鏡下部 の受信機室に入って調整する必要があった。T今回、 光学台とバイアス電源をリモート対応のものに変更 し、GPIB 制御で山麓施設からの制御・観測を可能 にした。これらの改良を行い、今年度もこの THz 受 信機を ASTE 望遠鏡に搭載した。受信機は予定通り 動作し、0.9 THz 帯での R-Sky 測定まで順調に進ん だが、望遠鏡施設のトラブルにより観測はキャンセ ルせざるを得なかった。翌年度に科学観測に再挑戦 する計画である。

【ASTE 用 IF システムの改良】本研究室で開発した THz 帯超伝導 HEB 受信機からの中間周波数信号(IF 信号)を ASTE 望遠鏡に備わっている伝送系統に入力する際、出力信号を増幅・周波数変換する必要がある。今回、中間周波数を 0.8-1.3 GHz に変えるために、IF システムを改良した。フラットな特性や、高地での運用に耐える発熱対策と操作性の良さに留意し、市販のフィルタ、アンプ、アップコンバータを用いて設計・製作した。実験室で評価した上でASTE 望遠鏡に取りつけ、正しい動作が確認できた。

【準光学型 THz 帯 HEB ミクサの開発】ツインス ロットアンテナを集積した準光学型の 1.9THz 帯超 伝導 NbTiN HEB ミクサ素子の開発を行った。本年 は、高周波電磁界シミュレータ HFSS を用いてアン テナ構造の微修正/最適化を行った。また、(1)素子 のヒステリシスなどを有する電流・電圧(IV)特性か ら、製作された細線の構造・状態を予測・理解するた めの1~2次元モデルや、(2)バイアス電圧や局部発 振波による励起、インピーダンス整合、細線サイズ、 抵抗-温度特性、臨界温度、といった各種パラメータ からゲイン特性を再現するモデルの構築を進めた。 これらは HEB 素子の設計や製作プロセスの再現性 の改善、動作点の最適化などに利用していく。さら に、今回あらたに TEM 撮像を実施し、HEB 素子の 各層の厚みの精度や再現性、超伝導細線部/電極間に おけるエッチング領域の断面・表面の構造や再付着 の状態なども詳しく調べた。この撮像の結果をもと に、ICP 装置によるエッチングプロセスの条件・環 境の見直しを進めた。この研究は大阪府立大学の前 澤裕之氏との共同研究である。

<受賞>

- 坂井南美、日本天文学会研究奨励賞、日本天文学会、 2013年3月21日。
- [2] 柴田大輝、Best Poster Award, New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory, 2012 年 12 月 7 日。

<報文>

(原著論文)

- [3] N. Sakai, C. Ceccarelli, S. Bottinelli, T. Sakai, and S. Yamamoto, "Distribution of CH₃OH in NGC1333 IRAS4B", Astrophys. J. 754, 70 (8 pp)(2012).
- [4] N. Sakai, Y. Shirley, T. Sakai, T. Hirota, Y. Watanabe, and S. Yamamoto, "Tentative Detection of Deuterated Methane toward the Low-Mass Protostar IRAS 04368+2557 in L1527", Astrophys. J. 758, L4 (4 pp) (2012).
- [5] N. Sakai, H. Maezawa, T. Sakai, K.M. Menten, and S. Yamamoto, "CH Radio Emission from Heiles Cloud 2 As a Tracer of Molecular Cloud Evolution ", Astron. Astrophys. 546, A103 (8 pp) (2012).
- [6] T. Yamaguchi, S. Takano, Y. Watanabe, N. Sakai, T. Sakai, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, N. Hirano, S. Takakuwa, Y. Aikawa, H. Nomura, and S. Yamamoto, "The 3 mm Spectral Line Survey toward the Lynds 1157 B1 Shocked Region. I. Data", Publ. Astron. Soc. Japan 64, 105 (45 pp) (2012).

(学位論文)

- [7] 椎野竜哉、"Development of a Low Noise HEB Mixer Receiver for Spectroscopic Observations in the THz Band" (博士論文)
- [8] 相馬達也、「テラヘルツ帯超伝導 HEB ミクサ受信機の超広帯域化」 (修士論文)
- [9] 徳留智矢、「太陽型原始星 L1527 における「暖かい炭 素鎖化学」の探求」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] Y. Watanabe, K. Sorai, N. Sakai, S. Yamamoto, "Spectral Line Survey toward Spiral Arm in Nearby Galaxy M51", Workshop on Interstellar Matter 2012, Sapporo, Japan, October, 2012.
- [11] Y. Watanabe, K. Sorai, N. Sakai, S. Yamamoto, "Spectral Line Survey toward GMCs in M51", Astrochemistry in the ALMA era, Copenhagen, Denmark, January, 2013.

- [12] T. Shiino, R. Furuya, T. Soma, T. Sakai, Y. Watanabe, N.Sakai, L. Jiang, O. Ohguchi, H. Maezawa, T. Yamakura, Y. Irimajiri, and S. Yamamoto, "The 0.9 and 1.3 THz Superconducting HEB Mixer Receiver for the ASTE 10 m Telescope", The 23rd International Symposium on Space Terahertz Technology, C-43, Tokyo, Japan, 4 April 2012.
- [13] T. Soma, N. Sakai, Y. Watanabe and S. Yamamoto, "Abundant CH3OH in the Cold Starless Core TMC-1", Workshop on Interstellar Matter 2012, Sapporo, Japan, October, 2012.
 [New Trends in Radio Astronomy in the

ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory, Hakone, Japan, December, 2012]

- [14] Y. Watanabe, N. Sakai, J. Lindberg, J. Jorgensen, S. Bisschop, and S. Yamamoto, "The 0.8 mm Spectral Line Survey toward Low-Mass Protostellar Cores with ASTE" (P056)
- [15] T. Shiino, R. Furuya, T. Soma, T. Sakai, Y. Watanabe, N.Sakai, L. Jiang, O. Ohguchi, H. Maezawa, T. Yamakura, and S. Yamamoto, "The 0.9 and 1.3 THz Superconducting HEB Mixer Receiver for the ASTE 10 m Telescope" (P101)
- [16] T. Yamaguchi, S. Takano, N. Sakai, Y. Watanabe, S. Yamamoto, and NRO Line Survey Team Members, "The Shock Chemistry in Low-Mass Star-Forming Regions" (P040)
- [17] D. Shibata, N. Sakai, Y. Watanabe, T. Hirota, S. Yamamoto, "Deuterium Fractionation in Low-Mass Star Forming Regions" (P059)
- [18] T. Soma, N. Sakai, Y. Watanabe, S. Yamamoto, "Abundant CH₃OH in the Starless Core TMC-1" (P055)
- T. Tokudome, N. Sakai, T. Sakai, S. Takano, S. Yamamoto and NRO Line Survey Team Members,
 "Nobeyama 45 m Telescope Legacy Project: Line Survey of L1527" (P058)
- [20] Y. Nishimura, N. Sakai, Y. Watanabe, T. Sakai, T. Hirota, S. Yamamoto, "Observations of Deuterated Species toward Low-Mass Prestellar and Protostellar Cores" (P051)
- [21] H. Inokuma, N. Sakai, H. Maezawa, K.M. Menten, and S. Yamamoto, "Statistical Equilibrium Calculations of OH: Interpretation of the 1612 MHz Absorption Line in HCL2" (P054).

招待講演

- [22] S. Yamamoto, N. Sakai, and Y. Watanabe, "Chemical Diversity in Low-Mass Star Forming Regions", Astrochemistry in the ALMA era, Copenhagen, Denmark, January, 2013.
- [23] S. Yamamoto, N. Sakai, and Y. Watanabe "Chemical Diagnostics of the Early Phase of Star Formation", EPOS2012, Lingberg Castle, Germany, July, 2012.

[24] N. Sakai, "Chemical Diversity of Low-Mass Star-Forming Cores: Class 0 to Class I", New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory, Hakone, Japan, December, 2012.

(国内会議)

```
一般講演
```

【日本天文学会 2011 年秋季年会、大分大学、2012 年 9 月】

- [25] 山口貴弘、高野秀路、坂井南美、山本智、「The Shock Chemistry of the EHV Outflow from L1448C(N)」, P119a
- [26] 柴田大輝,坂井南美,渡邉祥正,廣田朋也,山本智, 「低質量原始星形成に伴う重水素濃縮度変化」,P117a
- [27] 徳留智矢、坂井南美、酒井剛、高野秀路、山本智、NRO ラインサーベイプロジェクトメンバー、「L1527 にお けるスペクトル線サーベイ (3)」, P118a
- [28] 西村優里、坂井南美、渡邉祥正、酒井剛、廣田朋也、 山本智、「星なしコア TMC-1、Lupus-1A における 重水素濃縮度」、P301c
- [29] 猪熊宏士、坂井南美、前澤裕之、Karl Menten、山本 智、「統計平衡計算による OH 分子の基底状態遷移の 解析」,Q45c
 【日本天文学会 2012 年春季年会、埼玉大学、2013 年 3 月】
- [30] 坂井南美、Yancy Shirley、廣田朋也、酒井剛、山本 智、「Tentative Detection of Deuterated Methane toward Low-Mass Protostar IRAS 04368*2557 in L1527」, P14a
- [31] 渡邉祥正、坂井南美、徂徠和夫、山本智、「Spectral Line Survey toward GMCs in M51」、R21a
- [32] 椎野竜哉、古屋隆太、相馬達也、酒井剛、渡邊祥正、 坂井南美、大口脩、Jiang Ling、前澤裕之、山本智、 「1.5 THz 帯拡散冷却型 NbTiN HEB ミクサの開発」
- [33] 相馬達也、坂井南美、渡邉祥正、山本智、「Abundant CH3OH in the Cold Starless Core TMC-1」、 P15a
- [34] 西村優里、坂井南美、渡邉祥正、酒井剛、廣田朋也、 山本智、「Systematic differences of excitation temperatures between DNC and HN¹³C」、P216a

招待講演

[35] 山本智、椎野竜哉、相馬達也、古屋隆太、渡邊祥正、酒井剛、西村優里、坂井南美、大口脩、Ling Jiang、前澤裕之、「テラヘルツ・ヘテロダインセンシングによる星間化学」、日本応用物理学会春季学術講演会、神奈川工科大学、2013年3月、28p-G10-4

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)高次の非線形光学過程(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、(3)アト秒領域の現象の観測とその解明、(4) 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。 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。以下に、研究内容の経緯とともに、今年度 の研究成果の概要を述べる。

6.6.1 レーザー光を用いた分子配向制御技 術の進展

本研究室では、レーザー光を用いた気体分子の配 向制御技術の開発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、I2 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。

分子の配向制御については、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。本研究室では、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、分子 の回転周期 T_{rot} 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))。最近、ピーク強度付近で急 峻に遮断されるパルスをプラズマシャッターと呼ばれ る手法を用いて整形する技術を開発し、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 (A. Goban *et al.*, Phys. Rev. Lett. 101, 013001 (2008))。

一方、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。

最近、この手法に基づいて、2波長レーザー電場を 用いて OCS 分子を配向制御することにも初めて成功 した (K. Oda et al., Phys. Rev. Lett. 104, 213901 (2010))。さらに、C₆H₅I分子を用い、本手法の汎用 性の実証も行った。一方、Even-Lavie valve を用い ても、OCS や C₆H₅I 分子の配向度は、0.01 のオー ダーであり、劇的な配向度の増大を図ることは困難 であることが明らかになった。この困難は、回転量 子状態が Boltzmann 分布している thermal ensemble では、いわゆる right way に向く状態と wrong way に向く状態が混在していることに起因している。本 研究室では、配向した分子試料を用いた分子内電子 の立体ダイナミクス (electronic stereodynamics in molecules) に関する研究の推進を目指しており、配 向度の高い分子試料の生成が不可欠である。そこで、 初期回転量子状態を選別した試料に対し、静電場と レーザー電場を併用する手法や非共鳴2波長レーザー 電場を用いる手法により高い配向度の実現を目指す こととした。そして、主として対称コマ分子の状態 選別に適した六極集東器 (hexapole focuser) と主と して非対称コマ分子の状態選別に適した分子偏向器 (molecular deflector) を組み込んだ実験装置の立ち 上げを行った。今後は、回転量子状態を選別した試 料を用い、静電場とレーザー電場を併用する手法や 2波長レーザー電場のみを用いる全光学的な手法に より、分子配向度の向上を実現した上で、配向した 分子試料を用いた分子内電子の立体ダイナミクス研 究の確立を目指す。

昨年度までに、初期回転量子状態を選別した非対称コマ分子 (C₆H₅I)を試料とし、静電場とレーザー 電場を併用する手法を用いて世界最高水準の高い配 向度を達成することに成功していた。今年度は、プラ ズマシャッター技術を導入し、初期回転量子状態を選 別した分子のレーザー電場のない条件下での1次元 的配向制御に世界で初めて成功した。プラズマシャッ

ターで整形したナノ秒パルスの立下りは、約150fs であった。配列度を $\langle \cos^2 \theta_{2D} \rangle$ (θ_{2D} はレーザー光の 偏光方向と分子軸 (ここではC-I 軸) のなす角 θ の2 次元検出器面への射影)で評価すると、レーザー電場 を遮断後に、10 ps 程度高い配列度を維持できること が明らかとなった。一方、観測されるフラグメント イオンのうち、検出器面の上側に観測されるものの 割合 $N_{\rm up}/N_{\rm total}$ を配向度の指標とすると、レーザー 電場を遮断後に、20 ps 程度高い配向度を維持でき ることが明らかとなった。10-20 ps の時間スケール は、フェムト秒レーザーパルスを用いた分子内電子 の立体ダイナミクス研究への応用を考慮すると十分 に長い時間スケールと言える。レーザー電場を遮断 後の配列度や配向度の時間発展は、レーザーのピー ク強度が高いほど dephasing が早まる様子が確認で きた。これは、高いレーザー強度のときほど高い回転 励起状態まで分布するためと考えられる。これらの 観測と並行して、配列度や配向度のピーク強度依存 性を測定した。配列度についてはレーザー強度の増 大とともに単調に増加する傾向が確認できたが、配 向度は1×10¹¹ W/cm² 付近で一度極大値を取った 後、減少傾向を示し、3×10¹¹ W/cm² 付近から再 び増大する様子が確認できた。一度極大値を取った 後に減少傾向を示すのは、試料として用いた C₆H₅I 分子にとって立ち上がり6nsが純粋に断熱的な応答 を保証するほど十分に長くないことを示していると 考えられる。また、3 × 10¹¹ W/cm² 付近から再び 増大傾向を示すのはいわゆるボリューム効果、即ち プローブされる相互作用領域にある分子が感じる平 均的な強度が極大値を取る値に近づいたためと解釈 するのが自然であろう。

今後は、静電場と楕円偏光したレーザー電場の併 用により、レーザー電場の遮断直後にレーザー電場 の存在しない条件下で世界初の3次元的な配向状態 の実現を目指す。さらに、上述したナノ秒非共鳴2 波長レーザー電場を用いる全光学的な配向制御手法 にプラズマシャッター技術を適用することにより、静 電場も存在しない完全にフィールドフリーな条件下 での配向制御の実現を目指す。直線偏光した2波長 レーザー電場の偏光方向を平行にすれば1次元的な 配向制御が可能であり、偏光方向を交差させること により3次元的な配向制御が可能である。2波長レー ザー電場としては、ナノ秒 Nd:YAG レーザーの基本 波 (波長 $\lambda = 1064$ nm) とその第 2 高調波 ($\lambda = 532$ nm)を使用する予定である。2波長レーザー電場に 対するプラズマシャッター技術の実現可能性は、全 光学的分子配向制御の原理実証実験 (K. Oda et al., Phys. Rev. Lett. 104, 213901 (2010)) と並行して 進めていたが、予め2波長を発生させてエチレング リコールジェットシートに入射すると第2高調波の 高い光子エネルギーのためエチレングリコールの絶 縁破壊が起こりやすく、より高いパルスエネルギー を利用できるようにすることが課題であった。その 後、基本波のみをプラズマシャッターで急峻に遮断 するように整形した後で第2高調波を発生させるこ とにより、基本波、及び第2高調波共により高いパ ルスエネルギーを利用する技術を開発済みである。

6.6.2 搬送波包絡位相を制御したフェムト 秒パルスを用いた原子分子中からの 高次高調波発生

近年の超短パルスレーザー技術の進歩により、レー ザー電場の包絡線のピークに対する振動電場の位相 (搬送波包絡位相、Carrier-Envelope Phase: CEP) の固定された数サイクルパルスの発生が可能となり、 高次高調波発生を始めとする光の1周期以内で起こ る現象の CEP 依存性を直接的に調べることも可能 になってきた。昨年度は、CEP の制御された数サイ クルパルスを用いた実験に先立って、CEP の制御さ れたパルス幅 $\tau \sim 25 \text{ fs}$ のレーザー光を希ガス原子 や配列した分子に集光照射して観測される高次高調 波スペクトルを解析することにより高調波発生過程 に関する新たな知見を得ることができた。具体的に は、高調波スペクトルをフーリエ変換して解析した 結果、チャープしてスペクトルが広がった隣り合う奇 数次高調波の同じ周波数成分が発生する時間差 ΔT が高調波次数とともに減少していることが初めて明 らかになった。また、分子を試料とした場合に観測 される干渉パターンの visibility は、alignment ある いは anti-alignment 状態にあるときの方がランダム 状態にあるどきよりも高くなることが明らかになっ た。このことは、アト秒パルス列の発生において、 分子配列がその制御パラメータになることを示唆し ている。さらに、N $_2$ 分子を用いた場合の方が、 CO_2 分子を用いた場合よりも干渉パターンが明瞭である ことも明らかになった。この性質は、N₂ 分子の最高 被占分子軌道 (Highest Occupied Molecular Orbital: HOMO) $i \sigma_q$ の対称性をもつのに対し、CO₂分子の それが π_aの対称性をもつことに起因していると考え られる (Sakemi *et al.*, Phys. Rev. A **85**, 051801(R) $(2012))_{\circ}$

昨年度、CEPの制御されたサブ7fsパルスを用い た実験を行うために、真空チェンバー中に設置した凹 面鏡でフェムト秒パルスを集光できる高次高調波発 生装置を立ち上げた。サブ7fsパルスは、フェムト秒 Ti:sapphire レーザー増幅システムから得られる 25 fs パルスを Ne を充填したホローコアファイバーに通 すことにより、伝搬に伴う自己位相変調効果でスペ クトルを広帯域化した後に、チャープミラー8枚(即 ち、8 bounces) で分散補償して圧縮することにより 発生させる。さらに、数メートルに及ぶ空気中の伝 搬や高調波発生装置の入射窓を通過する際の群速度 分散によるパルスの広がりを高調波発生装置付近に 設置した別のチャープミラー8枚(即ち、8 bounces) で分散補償して使用した。高調波発生用のサブ7 fs パルスのパルス幅と位相は、同じく高調波発生装置 付近で SPIDER (spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction) 法により測定し た。その結果、サブ7fsパルスを得るためには、フェ ムト秒 Ti:sapphire レーザー増幅システムのコンプ レッサー内の回折格子、チャープミラーの入射角や ウェッジ板の挿入量などの微妙な調整が必要である だけでなく、データ取得のために長時間同じパルス 幅や強度を維持することは極めて困難であることが 分かった。このため、当面の実験では比較的容易に

得られ、かつ長時間同じパルス幅や強度を維持しや すいサブ 10 fs パルスを用いて実験を進めることに した。

今年度は、非断熱的に配列した N2 分子や CO2 分 子を試料とし、CEP を制御したサブ 10 fs パルスを 基本波とする高次高調波発生実験を行いプラトーか らカットオフに近い領域に CEP の相対値に依存し て移動する干渉縞を観測することに成功した。高調 波スペクトルをフーリエ解析した結果、通常の奇数 次高調波成分に加え、いわゆるロングトラジェクト リーとショートトラジェクトリーの寄与からなるこ とを初めて明らかにすることに成功した。観測され た干渉編は、ロングトラジェクトリーとショートト ラジェクトリーからの周波数チャープした成分間の 干渉と解釈できる。さらに、配列した分子軸に対し、 基本波の偏光方向が平行なときと垂直なときで、現 状では断定するには至らないものの、高調波の位相 に違いがある可能性があることが分かった。本手法 で解析できる位相シフトは、HOMO-1やHOMO-2 の寄与に加え、従来の手法では評価できない電子波 束の平面波からのずれやクーロン電場の影響などを 受けている可能性があることを考察した。

6.6.3 分子イメージング法の高度化のため の位相スペクトル観測装置の開発

配列・配向した分子試料から発生する高次高調波 の観測に基づく分子イメージング法の高度化のため に、従来の強度スペクトルに加え、位相スペクトル も観測する装置を新たに開発した。位相スペクトル の観測は高調波によって希ガス中から発生する光電 子の運動量を、時間差を付けて照射する基本波で変 調した信号の観測に基づいている。今回、高調波の 位相スペクトルの観測では初めて情報量のより豊富 な2次元光電子画像化法を採用した。既に Ne 中か ら発生する光電子の角度分布の観測に成功している。 今後、実験条件を最適化し、最も高度で洗練された 分子イメージング法の確立を目指す。

6.6.4 配列した分子中から発生する第3高 調波の偏光特性

近年、配列した分子中から発生する高次高調波を 観測することにより、分子軌道に関する情報を抽出 する研究が大変注目されている。Itataniらは、非断 熱的に配列させた N₂ 分子を用い、分子の配列方向 に対し様々な方向に偏光したプローブ光を照射して 発生する高調波のスペクトルを観測し、Fourier slice theorem に基づいて、N₂ 分子の分子軌道を再構成し て見せた (J. Itatani *et al.*, Nature (London) **432**, 867 (2004))。本研究室では先に、配列した分子中か らの高次高調波発生実験において、特に CO₂ 分子を 試料とした場合、再結合過程における電子のド・ブ ロイ波の量子干渉効果を世界で初めて観測すること に成功した (T. Kanai *et al.*, Nature (London) **435**, 470 (2005))。観測された効果は、詳細な量子力学的 計算でも再現されているが、直感的な描像として、 CO_2 分子のHOMOの対称性 (π_g)を決めている両端 のO原子近傍からトンネルイオン化した電子波束が 再結合時に破壊的な干渉を起こす2中心干渉効果で 説明できる。本成果は、一分子中で光の一周期以内 で起こる電子のド・ブロイ波の量子干渉効果という 基礎物理学的な興味に加え、この量子干渉効果を用 いることにより分子構造 (核間距離)を1フェムト秒 オーダーの極限的短時間精度で決定できることから 当該分野で大変注目された。

最近 Morishita らは、時間依存 Schrödinger 方程式 を数値的に解くことによって得られる正確な再衝突 電子波束を用いることにより、高次高調波スペクト ルから原子や分子の構造に関する情報を抽出できる 可能性を指摘した (T. Morishita et al., Phys. Rev. Lett. 100, 013903 (2008))。すなわち、高調波スペ クトル S(ω) を運動エネルギーの関数である再衝突 電子波束 W(E) とイオン化の逆過程である光放射再 結合断面積 $\sigma(\omega)$ を用いて $S(\omega) = W(E)\sigma(\omega)$ のよ うに表すことができ、高調波スペクトル $\dot{S}(\omega)$ を実験 で観測し、数値計算から求められた正確な再衝突電 子波束 W(E)を用いることにより原子や分子の構造 を反映した再結合断面積 $\sigma(\omega)$ を評価できると期待さ れる。ここで注意すべきことは、電子波束が再衝突 して (特にカットオフに近い) 高調波を発生するとき は、レーザー電場強度がほぼゼロになっており、外 部電場がないときの再衝突断面積 $\sigma(\omega)$ を評価できる ことである。このアプローチに従って、本研究室で は電気通信大学量子・物質工学科の梅垣俊仁博士、森 下亨博士、渡辺信一博士、および、カンザス州立大 学物理学科の Anh-Thu Le 博士との共同研究におい て、希ガス原子 Ar、Kr、Xe 中からの高次高調波ス ペクトルを観測し、正確な再衝突電子波束 W(E)を 用いて再結合断面積 $\sigma(\omega)$ を評価するとともに、理論 計算から求められた $\sigma(\omega)$ と比較することによりその 妥当性を検証した (S. Minemoto et al., Phys. Rev. A 78,061402(R)(2008))。上記の考え方をさらに発 展させることにより、原子分子に関するいわゆる完 全実験の目的である全ての双極子行列要素の振幅と 位相を決めることも可能になると期待される。直線 分子については、配列した分子から発生する高次高 調波の偏光特性を調べることにより、必要な情報を 得ることができると考えられる。しかし、高次高調 波発生実験は真空中で行う必要があり、偏光特性な どの評価は一般に困難である。一方、波長800 nmパ ルスによる第3高調波 (~267 nm) 発生は空気中で行 うことができ、ポラライザーなどの光学素子が利用 できるため、偏光特性の評価も比較的容易である。

そこで一昨年度より、配列した N₂、O₂、CO₂分子 から発生する第3高調波の偏光状態が、分子の配列 とともにどの様に変化するかを調べてきた。中心波 長 800 nm、パルス幅 100 fs の Ti:sapphire レーザー 光をマイケルソン干渉計に入れ、ポンプ光とプロー ブ光に分けた。マイケルソン干渉計のプローブ光の 経路にはステップ幅 40 nm で動く光学台を設置し、 2 つの光の間に任意の時間差を付けられるようにし た。さらに、プローブ光側には 1/2 波長板を入れて おき、プローブ光の偏光方向を自由に変えることが

できるようにした。マイケルソン干渉計内で時間差 を付けて再び同一光軸上に戻ったレーザー光をガス セルに入射した。まずポンプ光がガスセル中の分子 を配列させ、その後にプローブ光を配列した分子に 入射して第3高調波を発生させた。このとき、分子 が配列しているときは、高調波発生の配列依存性に 加え、配列した分子がもつ複屈折性のために、方向 によっては位相整合条件を満たし、強い第3 高調波 を観測することができた。気体分子は一度配列した のちにほぼランダムな状態となり、第3高調波の強 度は減少するが、分子の回転運動にしたがって1/4 周期ごとに再び配列するため、この周期で第3高調 波の強度も再び増大する。ポンプ光とプローブ光の 間の遅延時間を分子の1回転周期程度まで変えなが ら、分光器と CCD カメラを用いて発生させた第3高 調波のスペクトルを観測した。このとき、観測する スペクトルは、偏光ビームスプリッターで特定の偏 光方向成分だけを取り出して観測できるようにした。

昨年度までに、プローブ光の楕円率の増加、即ち、 最初の直線偏光状態(楕円率0、楕円偏光の長軸の水 平方向からの傾き角である orientation angle が0度) に対する垂直成分の増加に伴い、第3高調波の垂直 成分が急速に増加し円偏光状態に近づいた後、長軸 と短軸の方向が入れ替わる、即ち orientation angle が急速に約90度となることを確認した。さらに、こ の変化の様子は分子種によって異なり、O2やCO2 では、プローブ光の楕円率が 0.1-0.2 程度の小さい 値で起こるのに対し、N2や希ガスのArでは0.2-0.3 程度で起こることなどを確認した。昨年度までは、 フェムト秒レーザー光源として、増幅段をランプ励 起の Nd:YAG レーザーの第2 高調波で励起するシ ステムを用いていたため、出力光のエネルギー揺ら ぎが避けられず、非線形光学効果である第3高調波 の特性評価、特に基本波の出力の状態に敏感に応答 する偏光状態の精密で信頼性の高い評価を困難なも のとしていた。今年度は、フェムト秒レーザー光源 を、増幅段も半導体レーザー励起 Nd:YLF レーザー の第2高調波で励起する全固体フェムト秒レーザー 増幅システム (中心波長 800 nm、パルス幅 50 fs) に 更新したことにより、昨年度までよりも偏光状態の 精密で信頼性の高い評価が可能になった。今年度は、 まず新たに導入された全固体フェムト秒レーザー増 幅システムを用い、昨年度までに観測された現象の 再現性の確認を行った。プローブ光の楕円率の関数 として、第3高調波の垂直成分の増加の仕方を調べ たところ、上述したとおり、CO2 とO2の増加率は N2、Ar、Heの増加率よりも大きく、より詳細には、 CO₂>O₂>N₂>Ar>Heの関係があることが初めて明 らかになった。同様に、プローブ光の楕円率の関数 として、第3高調波の orientation angle の変化の仕 方(約90度に近づく速さ)を調べたところ、CO2と O_2 の変化率は N_2 、Ar、Heの変化率よりも大きく、 より詳細には、CO₂>O₂>N₂>Ar>Heの関係がある ことも初めて明らかになった。さらに、プローブ光 の楕円偏光の直交する2成分間の相対位相差(遅延 角) δ_0 の関数として第3高調波のそれ δ_{TH} を評価し たところ、興味深い結果が得られた。Arや Heのよ うな希ガスの場合、 δ_{TH} は δ_0 によらずほぼ一定で あった。一方、分子の場合は分子種によって挙動が 異なり、 $O_2 \approx CO_2$ の場合、 δ_0 が大きくなるにした がって δ_{TH} が小さくなるのに対し、 N_2 の場合には、 δ_0 が大きくなるにしたがって δ_{TH} が大きくなること を初めて見出した。これらの一連の知見は、配列し た分子中から発生する第3高調波の偏光特性が分子 種の軌道の対称性や大きさ(核間距離)、及び分極率 の大きさと異方性などによって決まることを示唆し ており、第3高調波の偏光特性の実験的評価を理論 計算と比較検討することができれば、全く新しい分 子イメージング手法として発展する可能性を持つと 期待される。

6.6.5 配列した分子中から発生する第3高 調波の偏光特性の時間発展の評価

上述した配列した分子中から発生する第3高調波 の偏光特性の観測は時間分解されておらず、時間的 に積分された偏光特性が評価されている。しかし、プ ローブ光との相互作用領域において、複屈折性をも つ配列分子の配列状態は一様ではないことから、第 3 高調波の偏光状態は時々刻々変化する時間依存偏光 パルスとなっている可能性がある。超短パルスレー ザー技術の進歩により、Ti:sapphire レーザー増幅シ ステムからの出力である中心波長 800 nm の近赤外 領域での時間依存偏光パルスの発生と制御技術は本 研究室でも既に開発済みであるが、紫外領域の時間 依存偏光パルスの生成と制御技術は未開拓の課題で ある。第3高調波の偏光状態を時間分解して調べる ことは、配列した分子中からの第3高調波の発生メ カニズムのより詳細な理解に繋がるであろうし、偏 光状態の時間分解が一層困難な高次高調波の偏光状 態を推察するための手掛かりが得られる可能性もあ る。また、レーザー電場のベクトルとして性質を最 大限生かすことのできる時間依存偏光パルスの発生 と制御手法の波長域の拡大は工学的にも意義深い。 そこで、本年度より配列した分子中から発生した第 3 高調波の時間依存偏光特性を評価するため、偏光 分解干渉法の開発に着手した。この測定により、分 子種に固有の分極率や超分極率、さらに分子座標系 におけるそれらの空間的な成分を評価できると期待 される。

今年度は、偏光分解干渉計を開発し、その性能評価を行った。偏光分解干渉法は、信号光(配列した分子から発生する第3高調波)と適当な時間だけ遅延させた参照光(信号光と同程度のバンド幅が必要)を同軸上にして分光器に入射し、スペクトル上に現れる干渉信号から信号光の位相を取り出す方法である。ここで、分光器の直前に偏光ビームスプリッターを設置して鉛直あるいは水平成分のみを観測し、各成分間の位相を比較すれば時間に依存した偏光状態を評価できる。参照光用の第3高調波は、 β -BaB₂O₄結晶 2 枚を用いた一般的な手法で発生させた。結晶の角度を調整し、位相整合をスペクトルが広がるように最適化したところ、図 6.6.34 (a)、及び(b)に示すように、信号光スペクトルのほぼ全領域で干渉信号を観測することに成功した。

予備実験として、非断熱的に配列した窒素分子を



⊠ 6.6.34: (a) Interference spectrum (solid line) between the horizontal polarization component of the third harmonic generated from aligned N₂ molecules and that of the reference third harmonic generated in β-BaB₂O₄ crystals and the extracted relative phase (dotted line) between the two third harmonics. (b) The same as in (a) but for the vertical polarization component. Note that the interference spectrum is magnified by 20 times. (c) Evaluated temporal evolutions of the third harmonic (solid line) generated from aligned N₂ molecules and its ellipticity (dotted line).

媒質とし、発生した第3高調波の偏光状態を調べた (図 6.6.34)。基本波として、水平方向に (ほぼ) 直線 偏光したフェムト秒パルス (中心波長 ~ 800 nm、パ ルス幅~50 fs)を用い、窒素分子 (0.2 気圧) は水平 方向に配列している。水平成分の干渉信号と抽出し た位相を図 6.6.34 (a) に、鉛直成分を 6.6.34(b) に示 す。水平成分は信号光の強度が強いため、干渉信号 自体をスペクトル上で確認するのは難しいが、ノイ ズやDC 成分を除去することにより、再現性良く位 相を抽出することができた。また、鉛直成分については、基本波に僅かに残っている鉛直成分が第3高 調波発生時に位相整合効果などで増幅され、有意な 信号として観測されていると考えられる。これらの 位相情報から第3高調波の時間波形、および時間に 依存した偏光状態を評価した (図 6.6.34(c))。自己位 相変調効果によってパルス幅が広がっているが、楕 円率はパルスの中心部分ではほぼ0であり、直線偏 光に近いことが分かる。

一方、現在のところ、位相の測定中に5分あたり π/2 程度のドリフトが見られ、上記の結果をランダ ムに配列した分子と定量的に比較することはできて いない。今後、干渉計の更なる安定化を図り、位相 の揺らぎを現在の1/5程度以下に抑える予定である。 これにより、第3高調波発生の楕円率依存性や配列依 存性などの定量的な議論が可能になると期待される。

6.6.6 その他

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 樋口嵩君、中前秀一君(夏学期)、及び、玉井敬一君、 原田了君(冬学期)の活躍によるものである。

なお、今年度の研究活動のうち項目1~4は、科 学研究費補助金の特別推進研究「配向制御技術で拓く 分子の新しい量子相の物理学」(課題番号21000003、 研究代表者:酒井広文)に加え、文部科学省「光・量 子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発 最先端 の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログ ラム」、及び、「最先端研究基盤事業 コヒーレント 光科学研究基盤の整備」からの支援も受けて行われ た。また項目5は、主として科学研究費補助金の基 盤研究(C)「配列した分子試料を用いた紫外パルス 光源の高能化」(課題番号24560041、研究代表者:峰 本紳一郎)の支援を受けて行われた。ここに記して謝 意を表する。

```
<報文>
```

(原著論文)

- Yusuke Sakemi, Kosaku Kato, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Characteristics of high-order harmonics generated from atoms and alignjed molecules with carrier-envelope-phasestabilized 25-fs pulses," Physical Review A 85, 051801(R) (4 pages) (2012). Selected for Virtual Journal of Ultrafast Science Vol. 11, Iss. 6 (2012).
- <学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [2] Hirofumi Sakai, "Laser-field-free orientation of state-selected molecules," 10th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, Taipei, Taiwan, October 27th, 2012.
- [3] Hirofumi Sakai, "Laser-field-free alignment and orientation of state-selected asymmetric top molecules," to be presented at the International Symposium on (e, 2e), Double Photoionization and Related Topics & the 17th International Symposium on Polarization and Correlation in Electronic and Atomic Collisions, Hefei, China, August, 2013.
- [4] Shinichirou Minemoto, "Characteristics of highorder harmonics generated from atoms and aligned molecules with carrier-envelope-phase-stabilized femtosecond pulses," The Yonsei-Todai Joint Workshop 2013, Tokyo, February 19th, 2013.

- [5] Shinichirou Minemoto, "Imaging atomic and molecular orbitals with high-order harmonic spectroscopy," Fundamentals and applications of laser filaments, IMS mini-International Symposium, Okazaki Conference Center, Okazaki, April 6th, 2013.
- [6] Yusuke Sakemi, "High-order harmonic generation from aligned molecules with carrier-envelopephase-stabilized femtosecond pulses," to be presented at the International Symposium on (e, 2e), Double Photoionization and Related Topics & the 17th International Symposium on Polarization and Correlation in Electronic and Atomic Collisions, Hefei, China, August, 2013.
- 一般講演
- [7] Ryo Yamashiro, Yusuke Sakemi, Shinichirou Minemoto, Tomoya Mizuno, Akira Yagishita, and Hirofumi Sakai, "Development of a multicoincidence velocity-map imaging spectrometer for use in the studies on electronic stereodynamics in molecules," 28th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Kasuga, Fukuoka, Japan, June 7th, 2012.
- [8] Hirofumi Sakai, "Laser-field-free orientation of state-selected asymmetric top molecules," Presented as a Hot Topic in STEREODYNAMICS 2012 (XIVth edition), Paris, France, October 22nd, 2012.
- [9] Yusuke Sakemi, Shinichirou Minemoto, Kosaku Kato, and Hirofumi Sakai, "High-order harmonics generated from aligned molecules with carrierenvelope-phase-stabilized 10-fs pulses," to be presented at 4th International Conference on Attosecond Physics (ATTO2013), Paris, France, July (2013).
- (国内会議)

一般講演

- [10] 樋口嵩、中前秀一、渡部源太郎、峰本紳一郎、酒井広 文、「配列分子から発生する第三高調波の楕円率依存 性」、2012 年 (平成 24 年) 秋季第 73 回応用物理学会 学術講演会、愛媛大学城北地区、2012 年 9 月 13 日.
- [11] 文堤會、武井大祐、峰本紳一郎、酒井広文、「状態選別した分子のレーザー電場のない状況下での配向制 御」、2012年(平成24年)秋季第73回応用物理学会 学術講演会、愛媛大学城北地区、2012年9月13日.
- [12] 武井大祐、文堤會、峰本紳一郎、酒井広文、「量子状態を選別した非対称コマ分子の配向制御」、第5回文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」シンポジウム、日本科学未来館、2013年1月11日.
- [13] 文堤會、武井大祐、峰本紳一郎、酒井広文、「量子状態を選別した非対称コマ分子のレーザー電場のない条件下での配向制御」、レーザー学会学術講演会第33回年次大会、姫路商工会議所、2013年1月29日.

- [14] 酒見悠介、峰本紳一郎、加藤康作、酒井広文、「搬送 波包絡位相を制御した数サイクルパルスによる配列 した分子中からの高次高調波発生」、レーザー学会学 術講演会第 33 回年次大会、姫路商工会議所、2013 年 1月 29 日.
- [15] 文堤會、武井大祐、峰本紳一郎、酒井広文、「回転量 子状態を選別した非対称コマ分子のレーザー電場のな い状況下での配向制御」、日本物理学会第68回年次大 会、広島大学東広島キャンパス、2013年3月27日.
- [16] 武井大祐、文堤會、峰本紳一郎、酒井広文、「回転量 子状態を選別した気体分子のレーザー電場のない状 況下での配向制御」、2013年(平成25年)第60回応 用物理学会春季学術講演会、神奈川工科大学、2013 年3月27日.
- [17] 中川桂、峰本紳一郎、酒井広文、「配列分子から発生 する高次高調波の楕円率依存性」、2013年(平成25 年)第60回応用物理学会春季学術講演会、神奈川工 科大学、2013年3月27日.
- [18] 酒見悠介、加藤康作、峰本紳一郎、酒井広文、「数サ イクルパルスによる配列した分子からの高次高調波発 生の CEP 依存性」、2013 年 (平成 25 年) 第 60 回応 用物理学会春季学術講演会、神奈川工科大学、2013 年 3 月 27 日.

セミナー

- [19] Hirofumi Sakai, "Toward (laser-)field-free orientation of state-selected molecules," National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, June 20th, 2012.
- [20] Hirofumi Sakai, "Toward (laser-)field-free orientation of state-selected molecules," National Taiwan University, Taipei, Taiwan, June 21st, 2012.
- [21] Hirofumi Sakai, "Laser-field-free alignment and orientation of state-selected asymmetric top molecules," to be presented at University of Aarhus, Aarhus, Denmark, September, 2013.
- [22] Hirofumi Sakai, "Laser-field-free alignment and orientation of state-selected asymmetric top molecules," to be presented at Center for Free Electron Laser Science (CFEL), Hamburg, Germany, September, 2013.
- [23] 峰本紳一郎、"Molecular deflector and hexapole focuser: rotational state selection and its application to molecular alignment and orientation techniques," 理化学研究所、和光市、2012 年 9 月 27 日.

6.7 五神研究室

本研究室では、光と物質の物理学の新たな局面を 探ることを狙い研究を進めている。具体的には、冷 却原子系、半導体、反強磁性体といった幅広い物質 系を対象として、光によって物質系を精緻に制御し、 そこに生じる多体量子現象の探求と特異な光学現象 を追求している。特に、半導体の電子正孔系の基底状 態の探索として、長年の懸案である複合ボース粒子 である励起子のボースアインシュタイン凝縮 (BEC) 相について、低温高密度かつ準熱平衡条件下での定 量的な実験を進めている。最近サブケルビン領域で 3次元ポテンシャル中にトラップした励起子ガスの BEC 転移の特徴を捉えることに成功した。さらに、 より安定な凝縮体の形成のため励起子ガスのさらな る低温化の実験を進め、これまでに報告された中で、 最低温度の励起子気体を生成することに成功した。 また、微細加工技術を駆使して物質系の対称性を制 御し、新たな光学機能を引き出す研究を進めている。 キラル対称性をもつ人工ナノ構造、3回対称性をも つ系における角運動量保存則、ベクトル光波制御な どに着目した研究を進めている。物理学教室におけ る活動と工学系研究科附属光量子科学研究センター の活動を密接に連携させてすすめている。この連携 のもとで、高強度パルス光によるコヒーレント軟 X 線を用いた新たな分光計測手法の開拓と実証、角度 分解レーザー光電子分光法の開発、フェルミオン冷 却原子系の実験が本格的に始動した。昨年度に引き 続き、文部科学省、最先端研 究基盤事業「コヒーレ ント光科学研究基盤の整備」プログラムのもとで、 理化学研究所との共同で高輝度高繰り返しの新型コ ヒーレント光源("フォトンリング"施設)の開発に 取り組んでいる。本年度に進めた研究を以下に示す。

6.7.1 物質系の巨視的量子現象の探索

希釈冷凍機を用いた励起子 Bose-Einstein 凝縮転 移の系統観測

半導体において光励起して形成される伝導電子と その抜け穴である正孔は、クーロン引力によって水 素原子様の東縛状態が安定に存在することが知られ ており、これを励起子と呼ぶ。励起子はフェルミ粒子 の対であることから、低温高密度領域において BEC 相を形成することが期待されてきた。励起子が格子 と熱平衡になり十分に低温状態となるためには、寿 命が非常に長いことが要求されるため、我々はスピ ン禁制励起子である亜酸化銅 (Cu₂O) における 1s パ ラ励起子に着目してきた。しかし寿命が長いことの 代償として、従来の実験手法である発光スペクトル 観測による励起子の温度や密度の評価が難しい。そ こで我々はこれまでに、水素原子様の Lyman 遷移を 励起子についても観測することで、パラ励起子の密 度や温度を正確に評価する手法を独自に開拓してき た。

世界各地での長年の研究にもかかわらず、BECの 確証は得られなかった。その原因は、光励起強度を増

して高い励起子密度を実現したときに、十分な励起 子寿命を維持できるか不明であったことによる。そ こで上記の分光法(励起子 Lyman 分光法)を用い て、生成した単位時間あたりのパラ励起子密度に対 して蓄積された密度を評価した。その結果、励起子 間の2体の衝突による励起子の消失の頻度が極めて 高く、超流動ヘリウム温度 (2 K) において BEC 転移 が期待される励起子密度 (10¹⁷ cm⁻³) に到達するの は困難であることが判明した。従って、BEC を実現 するためには励起子間の散乱頻度を下げるべくより 低密度な領域で BEC の条件を実現する必要がある。 そこで我々はヘリウム3冷凍機を使用し、励起子を サブケルビンの温度領域まで冷却することで、10¹⁶ cm⁻³程度の転移密度を実現し、BEC 転移を観測す ることを試みた。不均一歪を印加することでトラッ プしたパラ励起子は 0.8 K という低温に到達してい ることを空間分解スペクトルから確認し、この温度 で BEC 転移に必要である 10⁹ 個程度のパラ励起子 を蓄積した。その結果、理想 Bose 粒子の BEC 転移 条件を満たすときに励起子ガスの高温成分が閾値的 に増大することを見出した。数値計算との比較の結 果、上記のような非弾性散乱が強く起こる系におい ては、BEC 転移が生じたと仮定すると、基底状態を 多数の粒子が占有して局所的に密度が上昇し、励起 子を爆発的にトラップ中央からはじき出す(緩和爆 発)ことが分かっている。

この実験においては、全励起子に体する凝縮体の 割合は最大で1%と推測される。より凝縮体を顕在 化させるためには、励起子間散乱を軽減するためさ らに転移密度を下げる必要がある。そこで、無冷媒 希釈冷凍機を用いて励起子をさらに冷却するセット アップを構築した。光学窓を通じた熱輻射の流入を 極力遮断し、冷凍機のベース温度として 38 mK を達 成した。このような100 mK以下の極低温環境下で レーザーによる励起子生成と捕獲、微弱な発光の空 間分解イメージングといった実験手法を開発してき た。不均一歪の大きさや勾配を変化させ、様々な深 さ・勾配のトラップポンテンシャルを形成したとこ ろ、100 mK を下回る世界最低温度の励起子系を実現 したこと、および低密度極限における励起子温度が 異なることを発見した。そこで印加された応力の関 数として系統的に整理したところ、応力が大きいほ ど到達温度が低下することが分かった(図 6.7.35)。 励起子-音響フォノン相互作用による励起子の冷却ダ イナミクスをボルツマン方程式に基づく数値計算と の比較により、応力印加による励起子 TA フォノン 相互作用の活性化が冷却機構に重要な役割を果たし ていることを明らかにした [26, 53]。さらに、急峻な トラップポテンシャルの設定においては、ヘリウム3 冷凍機による実験と同様に、BEC 転移条件を満たす 際に緩和爆発現象が生じることを再現した。凝縮体 の割合を飛躍的に増すために、トラップポテンシャ ルを緩める実験、及び凝縮体そのものを直接観測す る分光法の構築を進めている。



図 6.7.35: 希釈冷凍機を用いて冷却した亜酸化銅中にト ラップされた、低密度な極低温パラ励起子の典型的な発光 スペクトル。印加された応力を増すに従ってパラ励起子の 温度が系統的に低下し、100 mK に到達する。

極低温原子気体を用いた強相関多体系の研究

中性子星の地殻領域は原子核の格子中を超流動 状態の中性子が自由に動き回っている環境にあり、こ のような中性子物質の状態方程式が星の半径を与え、 熱力学特性が中性子星の冷却曲線に影響を与える。 つまり中性子星の地殻領域の物性解明は、固体物理-原子核物理-天体物理が分野横断的に挑む研究テーマ になっている。極低温原子気体と中性子物質では温 度にして16桁の差があるが、それぞれのフェルミエ ネルギーで規格した無次元量で比較してみると驚く ことに冷却原子で実現できる BCS 領域にあること がわかる。よって冷却フェルミ原子系で同じ相互作 用領域を実現し状態方程式を決定する事は、中性子 星の謎を解くヒントを与える。冷却フェルミ原子の 状態方程式はトラップされている粒子の密度分布に 情報が集約されている。よって如何に冷却原子の密 度分布を高精度に測定できるかが本研究の要となる。 そこで本年度は高 NA 顕微鏡対物レンズを冷却原子 がトラップされている真空ガラスセル近傍に配置し、 光トラップ中の冷却原子を 1µm の空間分解能で冷却 原子を撮影できるようになった。これによりデータ 収集システムは整った。次に状態方程式決定には精 度の高い温度評価法が必要である。そこで任意の相 互作用領域でフェルミ粒子系の温度評価を行うため、 フェルミ粒子である⁶Li原子と温度計として用いる ボース粒子である⁷Liの同時レーザー冷却を行った。 結果として⁶LI、⁷Li 共に光トラップに閉じ込める十 分な原子数、温度、密度が同時レーザー冷却で得ら れた。現在光トラップ中で蒸発冷却を行っている段階 であり、超流動転移が確認され次第クロスオーバー 全域に渡る状態方程式 (EOS) の測定を遂行する。

6.7.2 非自明な光学現象の探索とその応用

擬2次元構造における旋光性発現のメカニズム解明 と第二次高調波発生

可視光領域とくらべて偏光制御素子が十分でない THz 領域において、人工構造による偏光制御法の開 拓は重要である。これまでのリソグラフィー等で作 製された金属薄膜の人工構造は、その応答を動的に

変化させることは困難である。我々は Si 基板上の金 属キラル格子に対して光励起を行うことで、光励起 キャリアの効果によって THz 領域において旋光性を 発現させ、THz 偏光変調を実現した。この効果の時 間ダイナミクスを詳細に調べるために、低繰り返し の光励起と高繰り返しの THz 検出を組み合わせた計 測法の開発を進めた。この方法により、通常の単一 の繰り返し周波数の光パルスを用いた、光学遅延に よるポンププローブ分光法では困難なナノ秒から数 秒までの広い時間スケールのダイナミクスを THz 領 域で周波数分解しつつ検出することが可能になった。 その結果、キラル格子に対する光励起で生じるキラ リティーの起源が Si 基板内のキラル形状のキャリア 分布であり、緩和メカニズムがキャリア寿命だけで なくキャリア拡散による分布の均一化にもよる、と いうことを明確に示した [3]。 一方我々は、光領域でも、二次元人工キラルナノ

一方我々は、光領域でも、二次元人工キラルナノ 構造において巨大な旋光性が発現することを見出し ており、旋光性増大に向けたメカニズム解明は重要 な課題の一つである。我々は、一つ一つのキラルナ ノ構造が連結されたキラルナノネット構造において、 巨大旋光性の発現する波長が、表面プラズモン共鳴 波長に非常に良く一致することを実証した[6]。キラ ルナノネット構造では表面プラズモンモードがよい 基本モードで、なおかつその共鳴効果によって旋光 性が増大することを示しており、二次元人工キラル ナノ構造に新たな設計指針を与えるものである。

これと並行して、三回回転対称場中での角運動量 保存則に着目し、二次の非線形光学過程における特 異な偏光選択則について考察した。その結果をもと に、三回対称の人エナノ周期構造体を設計・製作し、 円偏光ビームによる第二高調波発生(SHG)素子とし て機能することを実証した[51]。この構造において、 基本波にコリニアでなおかつ円偏光のヘリシティー が逆になった SHG が許容となることが明確に示さ れた。

ねじれ偏光パルス励起によるベクトル任意波形テラ ヘルツ発生法の開発

我々は、時空間パルス波形整形技術を用いて実現 したパルス内で偏光状態が時間軸上で変化する「ね じれ偏光パルス」を用いて、物質中の分極・磁化の 振動を自在に制御し、任意のテラヘルツ波形整形を 可能にする手法の開発を進めている。ねじれ偏光パ ルスの場合は、周波数空間における左右円偏光の変 調を自在に設計することが可能であるため、誘導ラ マン過程の制御の自由度を飛躍的に向上させるこ が可能であることを我々は見出した。ここで重要に なるのが、ねじれ偏光パルスの設計指針である。非 線形光学過程である誘導ラマン過程を活用するため には、光パルスを構成する角周波数成分の偏光状態 を独立に制御するのではなく、異なる周波数成分間 の相関を考慮することが必須である。我々は、こ ーの 相関を記述するシンプルなパラメータとして、包絡 関数を表す「時間依存するストークスパラーメータ」 の捻れに着目し、素励起あたりの角運動量が±2ħと なる回転モードを選択的に制御できることを理論的



図 6.7.36: ねじれ偏光パルス励起によるベクトル任意波 形テラヘルツ発生実験の模式図と、観測されたテラヘルツ 波形

に示すことに成功した [7, 23]。

この設計指針に従って波形整形を施したねじれ偏光 パルスを用いて、三回回転対称結晶で差周波を発生 させることにより、広帯域の右(左)円偏光THzパル ス、中心周波数調整可能な狭帯域円偏光THzパル ス、チャープ制御された円偏光THzパルスなど、偏 光、帯域、中心周波数等を自在に制御できるTHz 波 発生が可能であることを実験で示すことに成功した (図 6.7.36)[24,52]。これは、物質内部におけるTHz 領域の様々な振動モードを自在に制御することが可 能な技術であり、時空間パルス波形整形技術の強力 なアプリケーションの一つであるとともに、制御素 子が未だ不十分なTHz 領域において、放射される THz 波の帯域や偏光を自在に制御できるため、THz の光源としても画期的なものであると言える。

非線形光学結晶を用いたテラヘルツベクトルビーム の発生とその応用

シリンドリカルベクトビームモード (CV モード) とは中心軸対称な偏光分布を持つ光の空間モードで あり、THz 波領域で実現されれば、タイトフォーカ スによる THz イメージングの分解能向上や、縦方向 THz 電場パルスによる物性制御など THz テクノロ ジーに新たな展開をもたらすことが期待される。我々 は、三回回転対称性を有する非線形光学結晶からの テラヘルツ放射は、入射光の偏光をの回転させると、 放射される THz 波の強度は変わらずに偏光の向きが -2o変化するという特徴を有することを発見してい る。この特徴的な偏光依存性を利用して、結晶の向き が適切に選択された複数枚の GaP(111) 結晶を組み 合わせたものを THz 発生用結晶として用いることに より、ビーム内で軸対称な偏光分布を有するベクト ルビームを THz 領域において発生させることに成功 した [4]。近年開発されたテラヘルツカメラを用いて ビーム内での偏光分布をリアルタイムに観測し、な おかつ二次元 EO サンプリング法を用いて面内及び 面直方向の電場分布を直接検出することにより、ベ クトルビームとそれに伴う縦電場発生が実現してい ることを確認した。今回開発した手法は、これまで に報告されている THz 領域におけるベクトルビーム 発生法に比べて、偏光制御性、帯域、強度などの多 くの点で優位性がある。

さらに、このような THz ベクトルビームは、THz



図 6.7.37: ラディアル THz ビームの金属ワイヤー結合実 験の模式図と、ワイヤー伝搬後の軸対称 THz 電場波形の 検出結果。

導波路として理想的な特性を示す金属ワイヤーと高 い効率で結合することが指摘されている。我々は、上 記のような方法で発生した自由空間を伝搬する THz ベクトルビームが、60%を超える高い効率で金属ワ イヤーに結合可能であることを、実験的に示すこと に初めて成功した (図 6.7.37)[57]。

6.7.3 新規コヒーレント光源開発と新しい 分光手法開拓

真空紫外コヒーレント光源開発とその応用

近年レーザー角度分解光電子分光の分解能が向上 し、狭線幅で高繰り返しのコヒーレントな真空紫外光 源の開発が求められている。そこで、パルス幅 10 ps、 繰り返し周波数 73 MHz のチタンサファイアモード 同期レーザーを基本波光源として、高効率四倍波発 生による 6 eV 光源の開発を行った(図 6.7.38)。受動 共振器内に BiBO 結晶を挿入し、共振器入射ミラー の反射率の最適化を行うことで 70%程度の高変換効 率の第二高調波発生を実現した。これにより得られ た強い二倍波をシングルパスで BBO 結晶に絞り込 むことで 23 mW(中心波長 210 nm)の四倍波発生に 成功している [5]。さらに、この十分なパルス強度を 活用して、パルス列の繰り返し周波数を飛躍的に上 昇させ、角度分解光電子分光における積算時間を短 縮する試みを進めている。

また、飛行時間型角度分解電子分析器において測 定時間を短縮し、高いエネルギー分解能を実現でき る最適な光源として、ピコ秒モード同期チタンサファ イアレーザーに基づく周波数可変な6 eV 光源の開発 を行った。

一方、繰り返し周波数1kHzのフェムト秒チタン サファイア再生増幅器の出力を、真空容器内で適切 な焦点距離でネオンガスに絞り込み、真空紫外分光 器を用いて約130 eVまでの高次高調波発生を確認 した。さらに、このような真空紫外波長域で適用可 能な干渉計とポンププローブ分光系を構築し、固体 系に対する近赤外光励起の下で時間領域分光の実証 を進めた。




図 6.7.38: 高輝度、パルス幅 10 ps、繰り返し周波数 73 MHz の 5.9 eV 光源を実現するセットアップ。1 W 弱の 平均パワーの入力に対して、受動共振器を使用しインピー ダンス整合条件を満たすことで、70%程の第二高調波発生 の変換効率実現している。高平均パワーの第二高調波を非 線形結晶に絞り込み、十分な輝度の第四高調波を実現した [5]。

コヒーレント光科学研究基盤の整備

文部科学省による「最先端研究基盤事業」の一つ として実施されている"コヒーレント光科学研究基盤 の整備(H22年度~H25年度)"として、最先端のレー ザー技術をベースとした強力かつ高安定なコヒーレ ント光を発生する光源装置の開発整備がスタートし た。本事業は東京大学と理化学研究所との連携の下 に、高強度高安定高繰り返し極超短パルス光源およ びテラヘルツから軟 X 線までの幅広い領域において 高精度同期可能な高強度高繰り返し光源("フォトン リング"施設)の開発を進めることを目的とするもの である。同時に、軟 X 線領域顕微画像計測装置、次 世代レーザー光電子分光装置、テラヘルツイメージ ング装置等の、新規光源の特性を引き出す計測装置 を整備する。 また、高度利用のための基盤技術の開 拓を進め、テラヘルツイメージングの臨床医療応用 や、電子励起過程の直接観察による太陽電池発電プ ロセスの解明など、新規光源の応用利用の推進を目 指す。本事業は、工学系研究科附属光量子科学研究 センターが中心になっているが、理学系研究科、工 学系研究科、物性研究所に所属する本学の多数の教 員の参加協力のもとで進められている。

< Fellow 選出>

- 五神真: 2012 Fellow of American Physical Society, Division of Laser Science 2012 年 12 月
- [2] 五神真: 2013 Fellow of Optical Society of America, 2012 年 12 月

<受賞>

- [3] 今井亮: 第 32 回応用物理学会講演奨励賞, 2012 年 5 月
- [4] 樋口卓也:第4回低温センター研究交流会 ベストポ スター・アワード,東京大学,2013年3月

<報文>

(原著論文)

- [5] K. Yoshioka and M. Kuwata-Gonokami: Relaxation explsion of a quantum degenerate exciton gas in Cu₂O, New Journal of Physics, 14, 055024 (2012).
- [6] N. Takemura, J. Omachi and M. Kuwata-Gonokami: Fast periodic modulations in the photon correlation of single-mode vertical-cavity surface-emitting lasers, Phys. Rev. A, 85, 053811 (2012).
- [7] N. Kanda, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami: Dynamics of photo-induced terahertz optical activity in metal chiral gratings, Opt. Lett., 37, 3510 (2012).
- [8] R. Imai, N. Kanda, T. Higuchi, Z. Zheng, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami: Terahertz vector beam generation using segmented nonlinear optical crystals with threefold rotational symmetry, Opt. Exp., 20, 21896 (2012).
- [9] J. Omachi, K. Yoshioka, and M. Kuwata-Gonokami: High-power, narrow-band, high-repetition-rate, 5.9 eV coherent light source using passive optical cavity for laser-based angle-resolved photoelectron spectroscopy, Opt. Exp., 20, 23542 (2012).
- [10] K. Konishi, B. Bai, Y. Toya, Jari Turunen, Y. Svirko, and M. Kuwata-Gonokami: Surface-plasmon enhanced optical activity in twodimensional metal chiral networks, Opt. Lett., 37, 4446 (2012).
- [11] T. Higuchi, H. Tamaru, and M. Kuwata-Gonokami: Selection rules for angular momentum transfer via impulsive stimulated Raman scattering, Phys. Rev. A, 87, 013808 (2012).
- [12] A. Lebreton, I. Abram, N. Takemura, M. Kuwata-Gonokami, I. Robert-Philip, and A. Beveratos: Stochastically sustained population oscillations in high-nanolasers, New J. Phys., 15, 033039 (2013).

[13] 小西邦昭、五神真:「半導体プロセスを用いた小型円 偏光発光素子の開発」、レーザー加工学会誌、Vol.19、 No.1、P68-70 (2012).

(修士論文)

[14] 富樫庸平: ⁶Li 極低温ユニタリガスの実現と温度評価、
 (2013 年 3 月、東京大学大学院理学系研究科)

(修士論文)

[15] 永久保裕紀:高次高調波を用いた二重スリット干渉計による位相敏感計測法の開発、(2013年3月、東京大学大学院理学系研究科)

⁽国内雑誌)

⁽著書)

[16] K. Peiponen, A. Zeitler, M. Kuwata-Gonokami (Eds.), "Terahertz Spectroscopy and Imaging (Springer Series in Optical Sciences" Springer (2012)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [17] M. Kuwata-Gonokami: Search for exciton BEC phase in a bulk semiconductor crystal, STAR3: The 3rd Shanghai Tokyo Advanced Research Symposium on Ultrafast Intense Laser Science, (Odawara, Japan), May, 2012.
- [18] M. Kuwata-Gonokami: Bose-Einstein condensation transition of paraexcitons in a potential trap at sub-Kelvin temperatures, EXCON 2012 (The 10th International Coference on Excitonic Processes in Condensed Matter, Nanostructured and Molecular Materials), (Groningen, Netherlands), July, 2012.
- [19] M. Kuwata-Gonokami: Fundamental symmetries and polarization control, 3rd International Workshop NPO 2012 (Nanocarbon Photonics and Optoelectronics), (Finland), Aug., 2012.
- [20] M. Kuwata-Gonokami: BEC Transition of Paraexcitons in a Cu₂O Crystal, Condensed Matter Physics Colloquium in University of Science and Technology of China, (Hefei, Chaina), Aug., 2012.
- [21] M. Kuwata-Gonokami: Search for exciton BEC in a bulk crystal, ICSCE (The 6th International Conference on Spontaneous Coherence in Ezcitonic Systems), (California, U.S.A), Aug., 2012.
- [22] K. Konishi, M. Kuwata-Gonokami: Photo-induced ultrafast magnetization dynamics of self-assembled bimetallic nanoparticles, SPIE photonics west (Ultradast phenomena and nanophotonics XVII), (San Francisco, U.S.A), Feb., 2013.

- [23] T. Higuchi, H. Tamaru, and M. Kuwata-Gonokami: Coherent Transfer of Angular Momentum through Impulsive Stimulated Raman Scattering: the Role of Envelope Helicity, Ultrafast Phenomena 2012, Lausanne, (Switzerland), July, 2012.
- [24] M. Sato, N. Kanda, T. Higuchi, T. Suzuki1, K. Konishi, K. Yoshioka, K. Misawa, M. Kuwata-Gonokami: Broadband Circulrly-Polarized THz Pulse Generation by Optical Rectification of Vector-Field Shaped Pulses, Ultrafast Phenomena 2012, Lausanne, (Switzerland), July, 2012.
- [25] K. Konishi, K. Ikemiya, E. Fujii, T. Kogure, T. Hasegawa and M. Kuwata-Gonokami: Broadband Circulrly-Polarized THz Pulse Generation by Optical Rectification of Vector-Field Shaped Pulses, Ultrafast Phenomena 2012, Lausanne, (Switzerland), July, 2012.

- [26] K. Yoshioka: Production of ultracold paraexcitons in Cu₂O for a stable BEC, DYCE International Workshop at Kussharo, (Kussharo), Aug. 2012.
- [27] K. Konishi, R Imai, N. Kanda, and M. Kuwata-Gonokami: Terahertz Vector Beam Generation Using Segmented Nonlinear Optical Crystals with Three-Fold Rotational Symmetry, The International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), (Wollongong, Austraria), Sep. 2012.

一般講演 (ポスター)

- [28] K. Yoshioka: Production of ultracold paraexcitons in Cu₂O for a stable BEC, DYCE International Workshop at Kussharo, (Kussharo), Aug. 2012.
- [29] K. Konishi: Second harmonic generation in planar periodic metal nanostructures with threefold rotational symmetry, DYCE International Workshop at Kussharo, (Kussharo), Aug. 2012.
- [30] T. Higuchi: Optical control of antiferromagnetic domains in MnF₂, DYCE International Workshop at Kussharo, (Kussharo), Aug. 2012.
- [31] N. Kanda, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami: Terahertz optical activity by photo-carriers with chiral pattern, The International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), (Wollongong, Austraria), Sep. 2012
- [32] T. Kan, A. Isozaki, N. Kanda, N. Nemoto, K. Konishi, M. Kuwata-Gonokami, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, Spiral Metamaterial For Tunable Circular Dichroism, The 26th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '13), (Taipei, Taiwan), Jan. 2013

国際会議主催

- [33] M. Kuwata-Gonokami: 1st DYCE-Asia "Dynamically-correlated electrons and blueviolet light generating materials and devices", (Koshiba Hall), Aug., 2012.
- [34] M. Kuwata-Gonokami: DYCE International Workshop at Kussharo, (Kussharo), Aug., 2012.

- [35] 五神真:レーザー光科学研究の将来展望,物性研究所 附属極限コヒーレント光科学研究センター発足記念 式典、東京大学物性研究所,2012年10月
- [36] 五神真:先端光・量子科学技術による物質光科学の 展開,極限コヒーレント光科学研究センター発足記念 ワークショップ「レーザー・放射光融合研究領域の開 拓」、東京大学物性研究所, 2012 年 11 月
- [37] 五神真:光量子科学の展開,第5回文部科学省「最先 端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログ ラム」シンポジウム,日本科学未来館,2013年1月

一般講演(口頭)

⁽国内会議)

招待講演

- [38] 五神真:光と物質の科学の展開,日本学術会議シンポジウム「物性物理学・一般物理学の未来を語る」,日本学術会議,2013年1月
- [39] 五神真:フォトンサイエンス・リーディング大学院の 取り組み,文部科学省博士課程教育リーディングプロ グラム プログラムフォーラム東京コンファレンスセ ンター・有明,2013 年 3 月

一般講演

- [40] 今井亮,神田夏輝,鄭渚,小西邦昭,五神真:講演奨 励賞受賞記念講演「高強度 THz ベクトルビームの発 生と2次元検出」応用物理学会 2012 年秋季大会,松 山大学,2012 年9月
- [41] 五神真:半導体の新しい光機能を求めて応用物理学会
 2012 年秋季大会,松山大学,2012 年 9 月
- [42] 根本夏紀,神田夏輝,小西邦昭,五神真:水晶板積層構 造による広帯域テラヘルツ偏光素子の開発応用物理 学会 2012 年秋季大会,松山大学,2012 年 9 月
- [43] K. Konishi, E. Fujii, T. Kogure, T. Hasegawa and M. Kuwata-Gonokami : Self-Assembly and magneto-optical properties of noble metalferromagnetic metal hybrid nanoparticles 応用物 理学会 2012 年秋季大会, 松山大学, 2012 年 9 月
- [44] Li Jia, 樋口卓也,神田夏輝,小西邦昭, Sergey G. Tikhodeev、五神真: 共振器構造を用いたテラヘルツ 磁気双極子放射の制御応用物理学会 2012 年秋季大会, 松山大学, 2012 年 9 月
- [45] 吉岡孝高, 五神真:量子カスケードレーザーを用いた 亜酸化銅パラ励起子の密度と温度の精密観測日本物 理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学, 2012 年9月
- [46] 樋口卓也, 五神真: MnF2 反強磁性ドメインの光によ る制御日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学, 2012 年 9 月
- [47] 森田悠介,吉岡孝高,五神真:希釈冷凍機を用いた亜酸化銅励起子のBEC転移の系統的観測2日本物理学会2012年秋季大会,横浜国立大学,2012年9月
- [48] 根本夏紀,神田夏輝,今井亮,小西邦昭,五神真:高強 度テラヘルツベクトルビーム生成に向けた広帯域テ ラヘルツ波長板の開発日本物理学会2012年秋季大会, 横浜国立大学,2012年9月
- [49] 根本夏紀,神田夏輝,今井亮,小西邦昭,五神真:高強 度テラヘルツベクトルビーム生成に向けた広帯域テ ラヘルツ波長板の開発日本物理学会2012年秋季大会, 横浜国立大学,2012年9月
- [50] 富樫康平, 堀越宗一, 五神真:⁶Li-⁷Li 混合系における 量子凝縮相の実現日本物理学会 2012 年秋季大会, 横 浜国立大学, 2012 年 9 月
- [51] 小西邦昭, 樋口卓也, 石井俊太郎, Jakob Larsson, Jia LiA, 五神真:三回回転対称金属周期構造を用いた第 二次高調波発生日本物理学会第68回年次大会, 広島 大学, 2013年3月
- [52] 佐藤正明, 樋口卓也, 神田夏輝, 小西邦昭, 吉岡孝高, 鈴木隆行, 三沢和彦, 五神真: THz パルスの時間領域 電場ベクトル波形整形日本物理学会第68回年次大会, 広島大学, 2013年3月

- [53] 吉岡孝高, 森田悠介, 福岡健太, 五神真: 応力印加に起 因するサブ 100mK の励起子温度の実現日本物理学会 第 68 回年次大会, 広島大学, 2013 年 3 月
- [54] 挾間優治, 中暢子, 五神真, 田中耕一郎: ダイヤモンド における多励起子系の相図日本物理学会第68回年次 大会, 広島大学, 2013年3月
- [55] 小西邦昭, 倉科晴次, 佐々木得人, 小田直樹, 五神真: テラヘルツカメラの高感度化と分光感度特性の評価 第60回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大 学, 2013年3月
- [56] 大間知潤子,吉岡孝高,五神真:高分解能レーザー光 電子分光のための共振器増強を用いた高強度高繰り 返し狭線幅 5.9 eV 光源の開発第 60 回応用物理学会 春季学術講演会,神奈川工科大学,2013 年 3 月
- [57] Zhu Zheng, Natsuki Kanda, Kuniaki Konishi, Makoto Kuwata-Gonokami: Efficient coupling of propagating broadband terahertz radial beams to metal wires Univ 第 60 回応用物理学会春季学術講 演会, 神奈川工科大学, 2013 年 3 月
- [58] イランル アマニ, 鍋川康夫, 五神真, 緑川克美: 10 MHz 高平均出力リングレーザー装置の開発第 60 回 応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 2013 年 3 月

(セミナー等)

- [59] 佐藤正明,神田夏輝,樋口卓也,鈴木隆行,小西邦昭, 吉岡孝高,三沢和彦,五神真:ベクトル整形光パル ス励起による広帯域チューナブル THz パルスの発生 (招待)第4回超高速光エレクトロニクス研究会「新 レーザー光源とその応用」,慶応大学学,2012年6月
- [60] 五神真: 極低温励起子気体のボース・アインシュタイ ン凝縮転移, DYCE 公開フォーラム-光科学の新し い可能性に挑戦する-, 小柴ホール, 2012(会議主催)
- [61] 五神 真:人エキラル構造を用いた光波制御先端光量 子科学アライアンスセミナー プログラム「人工ナ ノ構造の光物性の基礎と光・物質制御への展開」,慶 應大学,2013 月

7 生物物理

7.1 能瀬研究室

脳・神経系は多数の神経細胞がシナプスという構 造を介して連絡した複雑な回路である。このなかを 神経インパルスが伝わることが、脳機能の基本であ ると考えられているが、その実体はほとんど謎のま まである。一体、どのような回路の中を、どのよう にインパルスが伝わることにより高度な情報処理が可能になるのか?また、複雑な神経回路が正確に形 成されるための設計図は私達の遺伝子にどのように 記述されているのか?当研究室では、ショウジョウ バエの神経系をモデルとし、これらの問題に迫って いる。これまでに、バイオイメージングや遺伝子操 作を用いて軸索やシナプスを可視化することにより, 神経の配線が形成される仕組みを明らかにしてきた。 現在、この研究を回路レベルに発展させ、複数の神 経配線からなる機能的な神経回路が、どのようにし て構築され、機能するのかを調べる研究を進めてい る。特に、近年急速に発達した光技術と遺伝子工学 とを組み合わせた手法を用いて、神経細胞の活動を 可視化・操作する実験を行なっている。また、この ような実験に理論的考察を加えることにより、神経 回路の動作原理を探る研究も開始した。配線パター ンの分かっているモデル神経回路において、個々の 神経細胞の活動をリアルタイムに追跡することによ り、神経回路の情報処理の仕組みを明らかにするこ とが私達の夢である。

7.1.1 運動パターン生成の基盤となる神経 細胞の同定と機能解析

神経ネットワーク内の個々の介在神経細胞が互い に神経活動を介して相互作用することで回路全体と して統合された時空間的活動パターンが生成される。 しかし、介在神経細胞に関する知見は、運動神経細 胞や感覚神経細胞に比して著しく少ない。昨年度我々 は、ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動制御を担う 介在神経細胞(PMSIと命名した)の同定に成功し、 詳細な機能解析を進めた。その結果、各体節に存在 する PMSI がそれぞれ運動神経細胞を抑制的に支配 し、ぜん動運動が伝播する速さを制御する重要な介 在神経細胞であることを見出した。本年度我々は、回 路内で生起するこの神経活動の集団現象を構成的に 理解するために、運動パターン生成に関与する介在 神経細胞群の遺伝学的同定をさらに進めている。

ぜん動運動制御に関わる新規介在神経細胞群 L59 神 経細胞群の機能解析(板倉由季、高坂洋史、能瀬聡直)

ぜん動運動は、体の尾端から頭端へと各体節の筋 が順番に収縮することで体を前進させる運動である。 ショウジョウバエ幼虫の中枢神経系は脳と腹部神経 節から成り、各体節の筋を神経支配する運動神経細 胞の細胞体は、腹部神経節内の前後方向の対応する 神経分節に位置する。よってぜん動運動の際の運動 神経細胞の活動を可視化すると、腹部神経節内を尾 端から頭端へと伝播する波状の活動パターンが観察 される。しかしこの波状の活動パターンはどのよう にして生成されるのか、腹部神経節内に存在する未 同定の介在神経細胞群によって生成されるというこ と以外、ほとんど分かっていなかった。

前年度の研究により、L59神経細胞群という一群 の細胞の活動を亢進または抑制すると、ぜん動運動 に異常が生じることがわかった。また、神経活動の 可視化により、L59神経細胞群のうち腹部神経節の 複数の神経分節に一対ずつ存在する特定の介在神経 細胞(R1と命名)が、ぜん動運動の際、運動神経細 胞と類似の波状の活動パターンを、運動神経細胞に 遅れて示すことがわかった。本年度はL59神経細胞 群からさらにもう一種類、こちらも複数の神経分節 に一対ずつ存在する介在神経細胞、R2を同定した。 R2の活動パターンはR1とは異なり、各神経分節の R2 が同時に活動する。次に R1,R2 の神経活動につ いてさらに詳細な実験・解析を行った。特に、ぜん動 運動との時間的相関を調べる目的で、Bar 陽性運動 神経細胞 (BMs) という一群の運動神経細胞と L59 神 経細胞群の活動を同時に可視化した。その結果、R1 はぜん動運動の際に同じ神経分節の BMs に遅れて活 動するが、これは1つ頭側の神経分節の BMs の活動 のタイミングに近いことがわかった。一方、各神経分 節の R2 はぜん動運動の開始に近いタイミングで各 体節において同時に活動することがわかった。また、 解剖学的解析により、R1,R2 がどちらも同じ神経分 節にある運動神経細胞に対し抑制性入力を行うこと を示唆する結果を得た。これらの結果から、R1,R2 はそれぞれぜん動運動の際に運動神経細胞に対し独 自のパターンで抑制を行うことで機能を果たすと考 えられる。現在、単一のR1またはR2の神経活動を 亢進し、ぜん動運動への影響を観察するという実験 を進めている。そのことにより R1,R2 のより詳細な 機能を解明できると考えている。

ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動を制御する興奮 性介在神経細胞の探索(長谷川恵理、能瀬聡直)

複雑な脳機能の発現は、複数の神経回路が適切な 時空間パターンで活性化されることで達成される。 本研究では、ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動を モデルとして、運動神経細胞のリズミカルな活動パ ターンの生成機構を解明することで、複雑な神経回 路の活動パターンが統合的に生成される機構を明ら かにしようと試みている。幼虫がぜん動運動を行う 際には運動神経細胞が尾端から頭端に向かって順に 活動し、それに伴って筋収縮が尾端から頭端に向かっ て伝播する。運動神経細胞の活動は腹部神経節内に 存在する介在神経細胞群によって制御されていると 考えられているが、それらを構成する具体的な神経 細胞はほとんど明らかにされていない。本研究では 特に、運動神経細胞を活性化する興奮性神経細胞に 注目している。

ショウジョウバエの運動神経細胞を活性化する興 奮性神経細胞はコリン作動性であると考えられてい る。コリン作動性神経細胞はアセチルコリン合成酵 素 ChAT (コリンアセチルトランスフェラーゼ)を発 現する。ショウジョウバエでは、特定の細胞で特定の 遺伝子を発現させるために Gal4/UAS システムが用 いられており、ごく一部の神経細胞で発現する Gal4 系統を得ることが不可欠である。そこで、ChAT 陽 性細胞の一部で発現する Gal4 系統を 10 種類程度作 製した。作製した Gal4 系統の一つ (Cha12-Gal4) を 用いてカルシウムイメージングを行ったところ、各 体節に存在して、ぜん動運動と同時に尾端から頭端 に向けて順に活動する神経細胞群が観察された。ま た、前端から後端にかけて長く伸びた神経突起にお いて、ぜん動運動と同期した活動も観察された。よっ て、Cha12-Gal4陽性神経細胞の中にはぜん動運動と 相関のある2種類の神経細胞が存在すると考えられ る。また、Cha12-Gal4を用いて、光照射により強制 的に神経活動を亢進できる ChR2 を発現させたとこ ろ、全身が一度に収縮した。よって Cha12-Gal4 陽 性神経細胞の中には筋収縮を活性化する神経細胞が 含まれていると考えられる。これら2種類の神経細 胞が本当にぜん動運動を制御しているのか、お互い の活動のタイミングや運動神経細胞との結合様式な どを明らかにすることで確認する予定である。リズ ミカルなぜん動運動が生成される仕組みの一端を明 らかにできると考えている。

ショウジョウバエ幼虫の腹部神経節に存在する PDF 陽性神経細胞をモデルとした運動機能を制御する神 経回路の機能解析(森竜太、高坂洋史、能瀬聡直)

本研究では、ショウジョウバエ幼虫の腹部神経節を モデルとして運動機能を制御する神経回路の機能解析 を試みた。腹部神経節は主に運動を司る領域であり、 哺乳類の脊髄に相当する器官である。PDF(pigment dispersing factor)とは18個のアミノ酸から構成さ れる神経ペプチドであり、ショウジョウバエにおい ては、脳に存在するPDF陽性神経細胞が概日リズム の機能維持に関与していることが分かっている。腹 部神経節尾端にもPDF陽性神経細胞が存在するが、 その機能は不明な点が多い。そこで本研究では腹部 神経節尾端に存在する PDF 陽性神経細胞に着目し て、その機能の解析を試みた。

当研究室の先行研究で、PDF 陽性神経細胞及び PDF 受容体発現細胞の活動計測によって、各々数十 秒周期の振動的な活動が観測されていた。本研究で は、組織特異的に任意のタンパク質を発現させるこ とができる遺伝学的手法である GAL4-UAS システ ムを利用して、免疫組織化学染色法による形態学的

解析及びカルシウムイメージング法を用いた活動計 測を行い、神経配線パターンや PDF 陽性神経細胞に 対する PDF 受容体発現細胞・RN2 神経細胞・運動 神経細胞の活動の相関関係を調べた。免疫組織化学 染色法による形態解析の結果、腹部神経節尾端にお いて、A8神経分節とA9神経分節の領域に各々3個 程度、計6個前後の PDF 陽性神経細胞の細胞体が 確認された。また、そのさらに約 20µm 後方に PDF 受容体の発現を示唆する細胞(pdfrB-Gal4 細胞)が 確認された。次に、カルシウム感受性蛍光タンパク 質である GCaMP3 を用いてカルシウムイメージン グによる神経細胞の活動計測を行った。PDF 陽性神 経細胞と pdfrB-Gal4 細胞の同時カルシウムイメー ジングを行い、活動の相関を調べた結果、それぞれ 30~60 秒程度のインターバルを持つ周期的な活動が 観測されたが、pdfrB-Gal4 細胞は殆ど活動しない期 間もあり、これらの活動に明確な連動性は認められ なかった。また、腹部神経節外側部の運動神経細胞 (bar-Gal4 陽性細胞) と PDF 陽性神経細胞の同時カ ルシウムイメージングを行った結果、運動神経細胞が 活動的になるときには、PDF 陽性神経細胞も同時に 活動的になり、活動の相関が認められた。また、RN2 神経細胞のカルシウムイメージングも行ったが、今 回の測定では活動が認められなかった。

現在、PDF 神経細胞と活動相関性がある神経細胞 を特定するため、PDF 陽性神経細胞と広範囲の神経 細胞の同時カルシウムイメージングを計画しており、 より広範な蛍光強度変化のダイナミックレンジを持 っGCaMP5を PDF 陽性神経細胞特異的に発現する 系統を作成中である。また光遺伝学を組み合わせた 実験も計画しており、光遺伝学によって神経細胞を 強制的に活動させたときに関連する神経細胞がどの ように応答するのかを解析することでこれらの回路 構造を明らかにしたいと考えている。

運動回路におけるペプチド性神経細胞、およびGABA 受容体発現神経細胞の機能の解析(坂佳祐、増山郁、 能瀬聡直)

本研究では、神経ペプチド陽性細胞と GABA 受容 体陽性細胞の行動における役割の解析を試みた。脳 から腹部神経節へと投射する神経細胞(Descending neuron)でかつ神経ペプチド陽性神経細胞に着目し、 異なる神経ペプチドを発現する細胞の活動を操作し た際の幼虫の行動を解析した。その結果、DSK と Hugin と呼ばれる神経ペプチド陽性細胞を標識する DSK-Gal4 と Hugin-Gal4 の 2 つの Gal4 系統の活動 を操作した際に特徴的な行動異常が誘起されること を見い出した。DSK-Gal4 は活性化すると体を左右 に湾曲させる Bending を誘導し、体を回転させる rolling ができなくなる現象が見出された。DSK-gal4 は Descending neuron とそれ以外の脳の細胞を標識 する。どちらの細胞群が観察された行動異常に関与す るのかを調べるため、DSK-Gal4 と同じ脳の細胞を 標識するが、Descending neuron は含まない Dilp2gal4陽性細胞を活性化した。その結果、DSK-gal4を 活性化した際に見られた行動変異は観察されなかっ た。これらの結果は DSK 陽性の Descending neuron がこれらの行動異常に関与することを示唆している。 一方、Hugin-Gal4 細胞の活動を活性化または抑制し た場合は、前進運動の頻度が減少し Bending の頻度 が上昇した。

GABA 受容体陽性細胞の行動における役割を解析 する目的で、GABA receptor-Gal4系統を用いて同様 に行動解析を行った。その結果、腹部神経節の尾端部 分の細胞を標識する、GABABR1-Gal4とGABABR3-Gal4 細胞の操作によって特徴的な行動異常が見られ た。GABABR1-Gal4 細胞を活性化した場合、Bending の頻度の上昇や、頭部を持ち上げる Rearing と いう行動が引き起こされた。逆に抑制した場合は前 進運動の頻度が減少することが明らかになった。こ れらの細胞の活動と筋収縮の時間的相関をカルシウ ムセンサーの GCaMP を用いて解析したところ、体 壁の尾端部分の筋収縮と同期した活動が見出された。 さらに幼虫を解剖した状態で活性化すると尾端部分 の筋収縮が誘導された。GABABR3-Gal4 細胞の神 経活動を活性化させると、幼虫は前進運動の開始の 際に尾端をリズミカルに持ち上げた。神経活動を抑 制すると、幼虫は尾端付近の筋肉を弛緩させながら 運動した。これらの結果から現在尾端の筋収縮と細 胞の活動に関連があると考え、GCaMP を用いて神 経活動と筋収縮の同期性を解析している。

7.1.2 神経回路の活動ダイナミクス

神経回路は時空間的な活動パターンを生成するこ とで機能を生みだす。その活動ダイナミクスを解析 する上で、膜電位を直接測定する電気生理学は強力 な方法である。それに加えて、近年の光計測技術の 発達により、多数の神経細胞の活動の様子を同時に とらえることができるようになった。また、光生理 学の発展により、神経細胞の活動を光照射によって 局所的・一過的に制御できるようになった。我々は これらの技術をショウジョウバエ幼虫の中枢神経系 に適用することによって、神経回路の動的特性の解 明を目指している。

局所的神経刺激と多細胞活動測定の同時適用による 運動回路作動機構の解明(松永光幸、高坂洋史、能 瀬聡直)

運動回路内の特定のニューロン群を刺激したときに、その下流のニューロン群の時空間的な発火パターンに与える影響を解析することで、神経回路内の情報の時空間的伝播過程が明らかにでき、運動回路の動作原理に迫れると考えられる。そこで本研究においては、まず運動神経細胞(以下 MNs)に光感受性イオンチャンネル ChR2 とカルシウムプローブ GCaMP3 を共に発現することで、一過的かつ局所的な光刺激による活動亢進と Ca²⁺ イメージング法による活動 測定を同時に行う実験系を構築し、性能を評価した。 局所的かつ一過的な Ar レーザ光刺激により、ChR2 を励起し、その結果引き起こされた MNs の活動上昇 を GCaMP3 による Ca^{2+} イメージング法で検出で きた。すなわち、神経細胞群の局所的かつ一過的な活 動亢進と活動測定を同時に行うことが可能となった。

MNs は筋肉収縮を制御するだけでなく、中枢神経 系へもシナプスを介した神経伝達を直接行なってい ることがいくつかの神経系で示唆されているが、そ の機能の詳細は明らかとなっていない。MNs の活動 が中枢神経系に至る経路は2つ考えられ、1つは前 述した中枢神経系への直接の神経伝達であり、もう 1つは MNs の活動が筋収縮を引き起こし、それが感 覚神経細胞によって検知され中枢神経系へフィード バックする経路である。本研究では、MNs から中枢 神経系へ直接伝えられる神経伝達の可能性を調べる ために、感覚フィードバックを抑制した状態におい て、MNsの活動を一過的に亢進することで、MNsか ら中枢神経系へ過剰に神経伝達が起こりうるように した。その際の MNs の活動を測定することで、MNs が中枢神経系へ伝達する神経シグナルの効果を調べ られると考えた。そこで、運動神経細胞の活動が尾 側から頭側にかけて伝播する間に、MNs の活動を一 過的かつ局所的に亢進したときの伝播波の伝播速度 変化を解析した。本実験から、MNs の一過的かつ局 所的な活動亢進によって、伝播波の伝播時間が局所 的に遅れることがわかった。また、この効果は活動 亢進部位と反対側の神経分節においても得られたこ とから、MNs の亢進は対応する神経分節内に効果を 与え、両側の活動の伝播時間を長くしていることが 示唆された。一方、活動亢進後、前方へ進行した伝 播波の伝播時間は対照群と比較して有意差は見られ なかったことから、この効果は神経分節内で閉じて いることが示唆された。このことから、運動神経細 胞が中枢神経内で構成する機能的結合の一端が明ら かになった。

電気生理学と光遺伝学を組み合わせた幼虫運動回路 の解析(高木俊輔、高坂洋史、能瀬聡直)

神経活動の実態は細胞膜を一過的に通過する電流、 それに伴う電位の変化である。これら重要なパラメー タを測定する方法にパッチクランプ法がある。パッ チクランプ法は、微小なガラス電極の先端を細胞表 面に密着させることで、微小ガラス電極を介して細 胞内の電位や細胞膜を通過する電流を測定する手法 である。我々はパッチクランプ法を用い、生体内で の運動ニューロンの活動パターンを測定した。また、 パッチクランプ法に光遺伝学を組み合わせ、光によっ て特定のニューロン集団の活動をコントロールしな がら、単一のニューロンの電気的活動を測定する系 を導入し、ニューロン同士のつながりを調べている。 我々は特に、PMSI と名付けた当研究室で同定した 介在ニューロンに注目し、PMSI の活動を光で亢進 させた際の、運動ニューロンの活動を調べた。先行 研究により、PMSI は運動ニューロンと密接な接着 をし、運動ニューロンの上流で抑制性に機能してい ることが示唆されていた。今回、我々は PMSI が運 動ニューロンに抑制性のシグナルを入力している直 接的な証拠を得るため、PMSI に Channel rhodopsin 2(ChR2) を発現させた幼虫を用い、光によるコント ロール下で運動ニューロンにパッチクランプを行い、 電気記録を取得した。ChR2は青色光感受性の陽イ オンチャネルなので、ChR2を発現する細胞に青色 光照射を行うことによって、陽イオンが細胞内に流 入させ、神経活動を亢進することができる。実験の 結果、PMSI の活動亢進によって、運動ニューロン のスパイク発火率が激減することを見出した。また、 記録と共に細胞内に色素を注入し、細胞の形態の確 認も行った。この染色によって、記録したニューロ ンがどのタイプの運動ニューロンなのかが同定でき ることを確認した。これによって、運動ニューロン のタイプによる PMSI からの抑制入力の違いを調べ ることも可能となった。今後は研究室内で解析して いる他の介在ニューロンにこの系を適用し、運動回 路内で働く多くの介在ニューロンの機能を解明する ことを目指している。

ショウジョウバエの中枢神経系の4 D カルシウムイ メージング(ユンヨンテク、高坂洋史、能瀬聡直)

神経細胞間の相互作用を調べるためには、神経細 胞集団すべての活動の情報が必要となる。従来の顕 微鏡技術では一つの平面における画像をとることし かできなかった。しかし、神経回路は3次元空間に分 布している。そのため、一つの平面のデータからは神 経回路の全体の情報を同時に得ることは難しい。そ れを克服するため、圧電素子を用いて撮影する平面 を高速で変化させることにより、カルシウムイメー ジングを4D(4次元 = 3次元空間+時間)で行 い、神経回路内の活動パターンをより網羅的に測定 する系の開発を進めた。

4 D カルシウムイメージングの実験系を試してみ るため、ショウジョウバエの幼虫の腹部神経節の中 で特に運動神経細胞の活動パターンを観測した。ま ず、幼虫がぜん動運動を起こす際に、背側の筋肉を 支配する運動神経細胞(dorsal MNs)の活動パター ンを観測した。その中には RP2という運動神経細胞 があるが、その細胞は1つ前側の神経分節内の大部 分の運動神経細胞と同じ神経に axon を伸ばしてい ることがすでに分かっている。dorsal MNsの活動パ ターンを観測した結果、期待通りに RP2 細胞は前側 の神経分節の運動神経細胞群と同じタイミングで発 火していることが分かった。

次にdorsal MNs と中側部の筋肉を支配する lateral MNs の活動パターンを比較した。先行研究において、筋肉の収縮を直接観測する方法を用い、同じ体節内の dorsal muscle と lateral muscle の収縮のタイミングに1体節分のずれがあることが示されている。そこで我々は、運動神経細胞の発火にも同様のパターンが見られるかどうかを解析した。dorsal MNs と lateral MNs の発火タイミングを観測した結果、実際にほぼ1体節分のずれがあることが明らかになった。以上の実験より4Dカルシウムイメージングの実験系が正常に働いていることが確認できた。また、現在の実験系が、運動神経細胞の発火パターンを調べるのに十分な時間分解能を備えていることがわかった。

神経活動ダイナミクスの集団現象解析を可能にする 光応答性プローブ発現系統の開発(高須悦子、高坂 洋史、能瀬聡直)

神経回路の活動ダイナミクスを解析するために、 特定の神経細胞集団の活動の測定や制御は不可欠な 技術である。従来広く使われていた電気生理学的な 手法では、複数の神経細胞群の活動の測定、制御は 容易ではなかった。ところが近年、神経細胞の活動を 反映して蛍光特性が変化するタンパク質や、光励起 による立体構造変化によって細胞への電流量を操作 できるタンパク質の開発が進み、神経回路の活動ダ イナミクスを解析する技術が飛躍的に発達した。当 研究室では、この技術をショウジョウバエの運動回 路の解析に適用するために、種々の光応答性プロー ブを発現する系統の作成を進めた。

神経活動に伴い細胞内 Ca²⁺ 濃度が大きく変動す ることを利用すると神経活動を Ca²⁺ イオン濃度変 化としてとらえることができる。これまで GCaMP シリーズと呼ばれる Ca²⁺ 応答性蛍光タンパク質が 広く用いられている。これに対し、蛍光の波長特性 や蛍光強度の変動幅が改良された GECO シリーズと 呼ばれる Ca²⁺ 応答性蛍光タンパク質が新たに開発 された。そこで、我々はこのプローブをショウジョ ウバエの神経回路で用いるために、これらのプロー ブをコードした遺伝子を発現させるためのトランス ジェニック系統を作成し、神経回路内で発現させる ことに成功した。

神経活動の制御に関して、神経活動を亢進させる ものと抑制させるものがある。亢進させるものとし て、チャンネルロドプシンという光感受性陽イオン チャンネルがあるが、これについて様々な改良が進 み、より大電流を流すタイプ、応答が速いタイプ、定 常的に電流を流せるタイプが開発された。抑制させ るものとして、アーキロドプシンやハロロドプシン があるが、これらについても改良され、弱い光強度 にも応答するタイプや細胞膜への局在性を上げたも のがある。そこで我々は、これらの一連の改良版の タンパク質について、ショウジョウバエで発現でき るトランスジェニック系統を作成し、発現を確認し 性能を評価した。

これらのプローブを効果的に使うことにより、神 経回路のダイナミクスを高精細に追及することが可 能になると期待できる。

7.1.3 回路構造と神経機能の発生機構

複数の神経細胞がシナプスを介して順々につながっ ていくと、神経回路ネットワークができあがる。神 経回路が正常に機能するためには、回路構造の適切 な発達が必要であるが、その細胞・分子機構に関し ては不明な点が多い。我々は、ショウジョウバエ胚・ 幼虫のぜん動運動成熟過程をモデルとして、神経回 路構造の発達、及び回路機能の成熟過程の研究を進 めている。

GABA 作動性神経細胞の活動による運動回路成熟 過程の解析(伏木彬、高坂洋史、能瀬聡直)

神経回路が成熟する過程には、自発的な細胞発火 または環境からの感覚刺激に応じて神経細胞間の接 続を再構成する時期がある。この回路成熟過程にお いて、神経細胞間の結合は活動依存的に組織化され、 可塑的に変化する。動物の歩行や遊泳といった定型 的な運動を制御する神経回路網も、初期の神経細胞 間の自発活動を通じて中枢パターン生成器(CPG: Central Pattern Generator)と呼ばれる律動的な神 経回路が作り出されると考えられている。しかし、そ の発生過程については不明なところが多い。

哺乳類の脊髄神経回路網において、発生初期のGABA 作動性神経細胞の活動が神経回路の編成に重要であ ることが分かっている。そこで、ショウジョウバエ のぜん動運動の系においても、GABA 作動性神経細 胞の活動が運動回路の形成過程に必要であるかを検 討した。

ショウジョウバエの GABA 作動性神経細胞は多数 存在する。この中で運動を制御する可能性のあるも のを特定するため、ぜん動運動が成熟している時期 (三齢幼虫期) に GABA 作動性神経細胞の活動を観 察した。まず特定の神経細胞群で遺伝子発現を誘導 できる十数種の系統について、抗 GABA 免疫染色を 用いて、GABA 陽性の神経細胞で遺伝子発現を誘導 する系統をいくつか特定した。その後、それらの系統 に蛍光カルシウムセンサー (G-CaMP) を発現させ、 カルシウムイメージングを行ったところ、ぜん動運動 の波に沿って強く活動する細胞群を同定した。またこ の細胞群に光感受性タンパク質(Channelrhodopsin-2) を発現させ、光刺激により亢進させたところ、幼 虫の腹部のみが動かなくなる表現型を示した。 の GABA 作動性神経細胞は、腹部神経節において運 動神経細胞の樹状突起が存在する腹側の領域に樹状 突起を伸ばしており、前シナプス終末は各体節の側 部に局在していた。GRASP (GFP Reconstitution Across Synaptic Partners)を用いて、運動神経細胞 にシナプスを形成しているかどうかを調べたが、シ グナルは観察されず、この細胞群は運動神経細胞以 外の他の種類の細胞とシナプスを形成していること が示唆された。

次にGABA 作動性神経細胞の活動が運動回路の発 達に与える影響を調べた。shibire^{ts} タンパク質をこ の細胞群に発現させ、三齢幼虫期のみ活動を抑制させ ると、目立った行動の異常は見られなかった。しかし この細胞群に破傷風毒素軽鎖(Tetanus Toxin Light Chain)を発現させ、シナプス伝達を不可逆的に阻 害すると、幼虫に顕著な運動障害が見られた。これ は、着目しているGABA 作動性神経細胞は運動回路 の機能発達において主要な役割を担っていることを 示唆する。これまでの研究経過より胚発生後期に運 動パターンの著しい変化が見られることが分かって いることから、今後は特定の時期における回路の形 成過程について詳細に調べる予定である。

運動パラメータの自動抽出アルゴリズムの開発と制 御遺伝子大規模検索への応用(寺西功一、高坂洋史、 能瀬聡直)

動物の運動において、運動速度の調節は、生命活動 を維持するうえで重要な役割を果たしている。しか し、中枢神経回路網による速度の制御については不 明な点が多い。本研究はショウジョウバエ幼虫のぜん 動運動の運動出力パターン、及びその制御回路に注 目して、速度制御機構の解析を行った。研究室の先行 研究でこれまでに、PMSIs (period-positive median segmental interneurons) と呼ばれる介在神経細胞が、 運動の速度制御に関与していることを明らかにして いる。しかし、運動の速度制御におけるこの介在神 経細胞の遺伝学的・発生学的側面についてはよく分 かっていない。そこで本研究では、PMSIsの機能制 御の詳細な分子機構を探るため、RNAi 法を用いて、 機能発現を担う転写関連因子を同定し、運動に与え る影響を解析した。

従来、運動の速さを測定する方法として、ぜん動 運動の波の伝播にかかる時間を手動で計測していた が、本研究では大規模検索を可能とするため、ぜん 動運動の計測方法の自動化を試みた。自動定量化手 法の立ち上げに当たり、下記の2つの幼虫の形の動 的な特徴に着目した。(1) ぜん動運動中の幼虫を背面 から見たとき、幼虫の面積および面積変化量は一定 の周期で変化する。(2)この時の面積および面積変化 量の時系列変化は、幼虫のぜん動運動中の筋収縮の 伝播時間と対応する。これら2つの点から、本研究 では画像解析ソフトウェア ImageJ と数値計算ソフト ウェア MATLAB を組み合わせて、自動定量化プロ グラムを作成した。そして、この自動定量化プログラ ムを用いて 213 種類の転写関連因子の機能を PMSIs において阻害したときの運動に与える影響を解析し た。機能の阻害には RNAi 法と呼ばれる遺伝子機能 阻害法を用いた。その結果、PMSIsの機能発現を担 う新たな転写関連因子をいくつか同定した。さらに、 これらの転写関連因子の阻害が PMSIs の神経突起の 形態やシナプスに与える効果を調べ、PMSIs のシナ プスの構成に影響を与えるものを見出した。

カルシウムイメージングを用いた胚期における運動 回路の発達機構の解析(川崎達平、二木佐和子、能 瀬聡直)

神経系は多数の神経細胞が互いに繋がった神経回 路網によって作り上げられている。神経回路の発達機 構を調べることはいわば神経回路の設計図を調べる ことであり、その回路の動作機構を明らかにするの に重要であると思われる。今年度、我々はショウジョ ウバエの胚を解剖してカルシウムセンサーGCaMP を用いた*Ca²⁺*イメージングを行うことで、神経回路 の活動パターンが発達する様子を観察した。まず、主 に運動神経細胞でセンサーの発現を誘導できるOK6-Gal4系統を用いてイメージングを行なった。その結 果腹部神経節において、初めは散発的に活動してい た運動神経細胞が徐々に同時に活動している部分を 広げていき、尾側から頭側にかけて伝播する Wave 状の活動へと発達していく様子を観察することがで きた。また、運動回路の発達初期において特徴的な 活動を示すいくつかの神経細胞群を見出した。

また、運動神経細胞以外で、運動回路の発達に関 連していると思われる何種類かの神経細胞群につい て*Ca²⁺ イメージングを*行い、胚期における活動の 様子を可視化した。その結果、GABA 受容体陽性細 胞やいくつかの介在神経細胞についても胚期後期に おける特徴的な活動を観察することができた。

今後は、さらに多くの種類の神経細胞の Ca²⁺ イ メージングを行ない、より詳細な胚期における神経 活動の発達の様子を解析する予定である。また、遺伝 子欠失変異体の利用や神経伝達阻害遺伝子 shibire^{ts} などを用いた神経活動の操作によって、運動回路に おける神経活動の発達機構の解明を目指す。

7.1.4 運動パターン生成の統合制御

運動パターン生成回路は、適切な場面において適 切に駆動される必要がある。我々は、ショウジョウ バエ幼虫の行動を定量的に解析することにより、適 切な行動を引き起こす神経回路機構の解析を進めて いる。

ショウジョウバエの方向転換行動を制御する神経回 路機構(奥沢暁子、高坂洋史、能瀬聡直)

動物の行動を複雑化させる機構として、定型的な 動作の可変的な組み合わせがあげられる。適切な運 動要素の組み合わせを形作る神経回路機構を明らか にすることは、動物の行動を神経回路レベルで明ら かにするために重要である。本年度はショウジョウバ エ幼虫を用いて、従来注目されてこなかった方向転 換行動を構成する運動要素についての詳細な解析を 行った。方向転換行動を人工的に誘起する実験系を 構築し、構成運動要素を詳細に検討した結果、方向転 換行動は、3つの動作要素、Bending、Retreating、 Rearing で成り立つことが明らかになった。さらに、 -回の方向転換行動に含まれる動作要素の総数の定 量によって、動作要素の組み合わせに幅広い変動が 存在することが判明した。これらのことから、方向 転換行動が複数の動作要素が可変的に組み合わされ た行動であることを示した。

次に、この方向転換行動の動作要素の選択を制御 する神経回路機構としてセロトニン作動性神経細胞 に着目した。セロトニン作動性神経細胞の神経伝達 を抑制すると Rearing の頻度が特異的に上昇したこ とから、セロトニン作動性神経細胞は、Rearing のみ を選択的に抑制することを見出した。またセロトニ ン受容体作動薬を投与すると Rearing の発生が減少 したことから、セロトニンによる神経伝達が Rearing 頻度を調節することが明らかとなった。

次に、ショウジョウバエゲノムに存在する4種類 のセロトニン受容体それぞれを発現した神経細胞の 神経伝達抑制により、セロトニンを介した方向転換 制御がセロトニン受容体 5-HT1BDro によって伝達 されることを特定した。更に神経形態の観察により、 一部の 5-HT1BDro 細胞が神経ペプチドロイコキニ ン陽性であることを見出した。このロイコキニン作 動性細胞の神経伝達抑制によって、ロイコキニン陽 性神経細胞の活動が Rearing 発生率の調節に必要で あることが示唆された。

セロトニン-ロイコキニン系がRearingを抑制する ことで行動の適切な組み合わせ選択を実現させてい ることは、特定の運動要素の生成を抑制する機構が ショウジョウバエ幼虫の行動選択に寄与しているこ とを示している。本研究によって、運動パターンの 選択に関わる神経回路が同定され、その制御機構に ついての新たな知見が得られた。

<報文>

(原著論文)

- Fukui, A., Inaki, M., Tonoe, G., Hamatani, H., Homma, M., Morimoto, T., Aburatani, H. and Nose, A.: Lola regulates glutamate receptor expression at the Drosophila neuromuscular junction. Biol. Open, 1, 362-375 (2012).
- (総説)
- [2] Kohsaka, H., Okusawa, S., Itakura, Y., Fushiki, A. and Nose, A.: Development of larval motor circuits in Drosophila. Dev. Growth Diff., 54, 408-419 (2012).
- [3] Nose, A.: Generation of neuromuscular specificity in Drosophila: novel mechanisms revealed by new technologies. Front. Mol. Neurosci., 5, 62 (2012).

(学位論文)

- [4] 奥沢暁子:ショウジョウバエ幼虫の方向転換行動パ ターンを制御する神経回路の同定と機能解析(博士 論文)
- [5] 板倉由季: Identification and functional analyses of interneurons in the neural network that regulates the peristaltic locomotion of Drosophila larvae (博 士論文、新領域創成科学研究科)
- [6] 高木俊輔:ショウジョウバエ幼虫の周期的運動を構築 するニューロン間のネットワークの解明(修士論文)
- [7] 松永光幸:局所的神経刺激と多細胞活動測定の同時適用による運動回路作動機構の解明(修士論文、新領域 創成科学研究科)
- [8] 寺西功一:運動パラメータの自動抽出アルゴリズムの開発と制御遺伝子大規模検索への応用(修士論文、 新領域創成科学研究科)

(著書)

[9] 高坂洋史、能瀬聡直:ショウジョウバエを用いたオプトジェネティクス「オプトジェネティクス ー光工学と遺伝学による行動制御技術の最前線」NTS(分担執筆)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] Kohsaka, H., Takagi, S. and Nose, A. : Speed control of larval peristalsis by segmentally-arrayed local inhibitory interneurons. NEUROFLY 2012 14th European Drosophila Neurobiology Conference. 2012.9.3-7, Padua, Italy
- [11] Okusawa, S., Kohsaka, H. and Nose, A. : Functional analysis of serotonergic neurons in larval locomotion. NEUROFLY 2012 14th European Drosophila Neurobiology Conference. 2012.9.3-7, Padua, Italy
- [12] Itakura, Y., Kohsaka, H. and Nose, A. : Identification of interneurons that regulate larval crawling by activation of motoneurons in Drosophila. NEU-ROFLY 2012 14th European Drosophila Neurobiology Conference. 2012.9.3-7, Padua, Italy
- [13] Kohsaka, H., Takasu, E. and Nose, A. : Genetic search for interneurons that interact with PMSIs, a group of larval premotor inhibitory interneurons. Janelia Farm Conference: Behavioral Neurogenetics of Drosophila Larva. 2012.9.30-10.3 Janelia Farm Research Campus, USA
- [14] Fushiki, A., Kohsaka, H. and Nose, A. : Role of sensory experience in functional development of Drosophila motor circuits. Janelia Farm Conference: Behavioral Neurogenetics of Drosophila Larva. 2012.9.30-10.3 Janelia Farm Research Campus, USA
- [15] Okusawa, S., Kohsaka, H. and Nose, A.: Functional analysis of serotonergic neurons in larval locomotion. GCOE International Symposium on Physical Sciences Frontier, 2012.12.8-9 Tokyo, Japan
- [16] Itakura, Y., Kohsaka, H. and Nose, A.: Identification and functional analyses of interneurons in the neural network that regulates the peristaltic locomotion of Drosophila larvae. GCOE International Symposium on Physical Sciences Frontier, 2012.12.8-9 Tokyo, Japan
- [17] Itakura, Y., Kohsaka, H. and Nose, A.: Identification and functional analyses of interneurons in the neural network that regulates the peristaltic locomotion of Drosophila larvae. International Symposium on "Sensory Systems and Neural Circuits" 2013.2.11-12 Tokyo, Japan
- [18] Fushiki, A., Kohsaka, H. and Nose, A.: Identification and functional analysis of a class of local GABAergic interneurons in the Drosophila larval motor circuit. International Symposium on "Sensory Systems and Neural Circuits" 2013.2.11-12 Tokyo, Japan

- [19] Itakura, Y., Kohsaka, H. and Nose, A.: Identification and functional analyses of interneurons in the neural network that regulates the peristaltic locomotion of Drosophila larvae. The University of Tokyo - Korea University The 2nd Joint Workshop on Bio-Soft Matter 2013.2.28-3.3 Seoul, Korea
- [20] Fushiki, A., Kohsaka, H. and Nose, A.: Identification and functional analysis of a class of local GABAergic interneurons in the Drosophila larval motor circuit. The University of Tokyo - Korea University The 2nd Joint Workshop on Bio-Soft Matter 2013.2.28-3.3 Seoul, Korea
- [21] Yoon, Y., Kohsaka, H. and Nose, A.: 4D calcium imaging of central neurons in Drosophila larvae. The University of Tokyo - Korea University The 2nd Joint Workshop on Bio-Soft Matter 2013.2.28-3.3 Seoul, Korea

招待講演

- [22] Nose, A.: Optogenetic dissection of motor circuits that regulate larval locomotion in Drosophila、「メ ゾ神経回路」第1回公開国際シンポジウム、2012.7.7、 東京
- [23] Nose, A.: Imaging and Manipulating Motor Circuit Activity, Developmental Neurobiology Course 2012, 2012.7.27, Okinawa
- [24] Nose, A.: Optogenetic dissection of motor circuits that regulate larval peristalsis in Drosophila, "Behavioral Neurogenetics of Drosophila Larva" meeting at Janelia Farm, 2012.10.1, USA
- [25] Nose, A.: Optogenetic dissection of the neural circuits that regulate rhythmic movement in Drosophila larvae, Symposium on Sensory Systems and Neural Circuits, 2013.2.12, Tokyo

(国内会議)

一般講演

- [26] Kohsaka, H., Takagi, S. and Nose, A.: Speed control of larval locomotion by segmentally-arrayed local inhibitory interneurons、包括脳ネットワーク 夏のワークショップ、2012.7.24-27、仙台
- [27] Hasegawa, E. Kaido, M. Takayama, R. Tabata, T. and Sato M: Brain-specific-homeobox is required for the specification of neuronal types in the optic lobe, 包括脳ネットワーク 夏のワークショップ、 2012.7.24-27、仙台
- [28] 増山郁、能瀬聡直:ショウジョウバエ幼虫を用いた異なる神経細胞の機能操作の行動への影響の解析、包括脳ネットワーク 夏のワークショップ、2012.7.24-27、 仙台
- [29] Itakura, Y. Kohsaka, H. and Nose, A.: Identification of interneurons that regulate larval crawling by activation of motoneurons in Drosophila, 第 35 回日本神経科学大会、2012.9.18-21 名古屋

- [30] Koichi Teranishi, Hiroshi Kohsaka and Akinao Nose: RNAi-based screening for transcription factors in interneurons for speed control of larval locomotion, Japanese Drosophila Research Conference 2012, 2012.10.13-15、東京
- [31] 高坂洋史、能瀬聡直:時空間パターンを生み出すメゾ 回路の作動原理の解明、新学術領域研究「メゾスコ ピック神経回路から探る脳の情報処理基盤」領域会 議、2012.11.7-8、熱海
- [32] Takagi, S. Kohsaka, H. Kazama, H. Nose, A.: Optogenetics and electrophysiological dissection of Drosophila neural networks that regulate larval locomotion, 日本分子生物学会年会、2012.12.11-14、 福岡
- [33] Matsunaga T., Inada K., Kohsaka H., Nose A.: Functional Analysis of Motor Neuronal Signals in the Central Nervous System in Drosophila Larval Locomotion, 第 35 回日本分子生物学会、2012.12.11-14、福岡
- [34] Fushiki, A. Kohsaka, H., and Nose, A.: Identification and functional analysis of a class of local GABAergic interneurons in the Drosophila larval motor circuit, GCOE「未来を拓く物理科学結集教育 研究拠点」 第9回 RA キャンプ、2013.2.20-22、静岡

招待講演

- [35] 能瀬聡直:光生理学を用いたショウジョウバエ運動回路の機能解剖、「大脳新皮質構築」「メゾ神経回路」合同ワークショップ、2012.7.25、仙台
- [36] 能瀬聡直、高坂洋史、高木俊輔: Optogenetic dissection of motor circuits in Drosophila larvae、「第 35 回日本神経科学大会」シンポジウム、 2012.9.18、名 古屋
- [37] 高坂洋史:無脊椎動物のCPG、生理学研究所研究会 第6回 Motor Control 研究会、2012.6.21-23、岡崎
- [38] 高坂洋史:ショウジョウバエ幼虫の運動制御回路、 身体性認知科学と実世界応用に関する若手研究会、 2012.8.7、本郷(工学部)

(講義等)

- [39] 高坂洋史:神経活動の可視化と光操作によるショウ ジョウバエ幼虫運動制御回路の解析、東京大学大学院 教育学研究科 発達脳科学特論、2012.7.23、本郷
- [40] 能瀬聡直:名古屋大学環境医学研究所基盤医学特論集 中講義、2013.2.15、名古屋
- (セミナー)
- [41] 高坂洋史:可視光線と遺伝学で調べる運動制御神経回路、東京大学理学部物理学教室 金曜ランチトーク、2012.7.6、本郷

7.2 樋口研究室

今年度は、精製分子としてダイニンのスーパー ファミリーの発現と精製をめざした。現在のところ 発現のみ確かめられた。細胞研究として、筋肉に焦 点を当て、ダイニン分子局在の研究が行われ、いく つかの興味ある結果が得られた。マウス研究におい ては、非侵襲イメージングを確立し、好中球やがん 細胞のイメージングを行った。最後に、骨格筋内に おける、種々の細胞のイメージングを準備を行った。

7.2.1 研究の背景と目的

細胞内分子機能の理解は、過去15年間の蛍光蛋白 質観察と分子生物学の進展によって劇的に深まった. しかしながら、分子生物学や蛍光蛋白質は個々の分 子を観察するのではないため、分子反応や機能を直 接的に理解することはできない.一方,組換蛍光蛋白 質の登場とほぼ時を同じくして分子機能を直接的に 観察する1分子ナノ精度の計測が登場した.この方 法の登場によって、精製された実験系においてモー ター蛋白質などの1分子運動, ATP 加水分解反応, 分子内構造変化などが明らかにされた. さらに近年 蛍光性ナノ粒子(CdSeやダイヤモンド)の登場によ り、高輝度で長時間の蛍光観察が可能となり、細胞 内の分子位置を正確に測定できるようになった. こ の粒子を利用して、マウス内でも1分子の位置を追 跡できるようになった. しかしながら, これらの技 術, すなわち蛍光蛋白質, 分子生物学, 1分子計測, 蛍光性ナノ粒子を組み合わせて,細胞内の分子反応 を観察する研究はほとんどない. そこで本研究では, これらの近年の技術革新を取り入れ、さらに新しい 方法を開発して,細胞内のナノメートル領域の分子 や小器官の反応を1分子・1粒子レベルで高精度測 定を行う.

7.2.2 マウス骨格筋構造の in vivo イメージングの開発

骨格筋は生体内の器官の中でも極めて高次の組 織的構造を有し、その主要な構築物である筋収縮装 置はおびただしい量のタンパク質の複合体により成 り立っている。我々は、運動分子ダイニンに着目し て、筋肉内のダイニン分子の運動の観察を行った。筋 肉内では微小管は微小管の平行方向と垂直方法に縦 横に走行している。ダイニンはこの微小管に結合す る事ができるが、運動を行わないという奇妙な"運 動"であった。この奇妙な運動の停止が何時起こる かを決めるために、筋管細胞の内のダイニンの運動 を観察したところ、一般の細胞に比べて非常に遅い ことが明らかとなった。現在運動の停止の原因を明 らかにすべく、様々なタンパク質を筋肉に発現させ ている。

7.2.3 ヒトダイニン分子機能の網羅的解明 に向けた研究

ダイニンは細胞輸送・細胞分裂・鞭毛運動に本質 的な役割をもつモータータンパク質である。ダイニ ン分子は非常に巨大なために(約500kDa)その組 換え体発現はそれまで困難であったが2004年に細胞 性粘菌及び酵母由来の細胞質ダイニン1の組換え体 の発現・精製に成功して以降、ダイニン分子の研究 は急速に進展している。たとえば、ダイニンの組換 え体により大量発現やアミノ酸変位導入が容易にな り、これまで不可能だった実験が可能になった。他 のダイニンについても同様なことが言え、組換え体 の発現系確立は研究を進展させる上で必須であるが, 細胞質ダイニン1以外のダイニンの組換え体の発現 系は確立されていない。現在のところ特定の軸糸ダ イニン及び細胞質ダイニン2の臓器からの単離法さ え確立しておらず、これらのダイニン分子がどのよ うな運動機能を持つのかといった基本的なことさえ 全くわかっていない。そこで、世界に先駆けて細胞 質ダイニン2及び軸糸ダイニン組換え体精製系を確 立し、ヒトダイニンスーパーファミリーの網羅的機 能解析を行なった。3種類のヒト由来のダイニンに ついての分子特性の解明に着手し、発現することが 確かめられた。

7.2.4 非侵襲 in vivo がん細胞・白血球の イメージング

これまでの in vivo イメージングでは, 腫瘍部を切 開して、癌腫瘍表面近くを観察できた。しかしなが ら、切開をすると、出血や免疫細胞の活性化などが 起こり、生きたままの姿を観察する事は困難である。 そこで、非侵襲で観察できる装置システムの改良と 観察法の工夫をおこなった。明るくするため、倍率を 下げ、レーザーの集光度を上げた。血量が見えるよ うに、青い光の透過像を得られるようにした。観察 法として、約200 µ mの厚さしかない耳をえらび、 蛍光を発する毛の脱毛をした。がん細胞をラベルす るために Herceptin-量子ドット複合体を尾静脈注射 た。細胞膜に結合した量子ドットの観察に成功した。 また、白血球の中でも運動能が高い好中球やマクロ ファージに結合した多粒子化量子ドットを結合する ことで、血管中の好中球をより鮮明に量子ドットを 観察する事ができた。また、耳に刺激剤を塗りクロ ファージを誘発したところ、貪食した量子ドットの 詰まった小胞の運動を観察する事ができ、小胞の位 置を 50nm 精度で追跡することができた。(図 7.2.1) また、細胞運動を観察でき、仮足が急速に伸びたの ち、細胞体が仮足の方法に動き出した。好中球が生 体内を動くメカニズムが解ってきた。



図 7.2.1: 非侵襲下で観察されたマクロファージ内に 貪食された量子ドットの位置の解析結果

7.2.5 非侵襲がん細胞の観察

そこで、マウスの耳殻の厚さが 150~200 μmと 薄く皮下組織層が非常に少ないことに着目し、耳に がん腫瘍を形成し非侵襲下でがん細胞を観察を試み た。耳殻に乳がん組織を形成する実験モデル(マウ ス)の開発を試みたところ、耳殻での腫瘍形成に成 功した。さらに、このがんモデルマウスを用い、乳 がん細胞に特異的に付着するように処理した蛍光量 子ドット(QD)と当研究室で開発した共焦点顕微鏡 を用い、リアルタイムで、かつ非侵襲下で乳がん細 胞膜上の QDを観察することに成功した。本技術 は in vivo における腫瘍細胞特性を解明と、がん治療 のための医療応用としての基盤技術につなげていけ るものと考えている。

7.2.6 筋肉内分子観察の試み

骨格筋の収縮はこれまでにも非常に多く行われて いるが、筋細胞内のタンパク質を標的としてマウス

内で高輝度・高精細に観察するということはほとん ど例がない。固定条件下での局在はこれまでのも非 常に多くの報告があるが、live imagingの研究は未だ 途上である。さらに骨格筋内では主にアクトミオシ ン系が注目されてきたが、筋繊維再生時の細胞骨格 再構成や微小管系輸送はきわめて重要であるにも関 わらずその可視化はほとんど実施されていない。本 研究ではこれをマウス内で可視化することを第一目 標とした。 本研究では遺伝子導入における汎用性と 損傷の回避からリポフェクションを中心とした効率 的な筋繊維内遺伝子発現の方法を開発し、これを用 いて生体内筋繊維のダイナミックな構造を観察する。 筋繊維細胞内動態としては1) α-actinin;筋繊維にお いて特徴的な横紋構造の可視化、2)tubulin;微小管 配置の可視化、3)IC2;細胞質ダイニン中間鎖による 細胞質ダイニンの可視化、4)SNX5, Rab7, GLUT4 等の細胞内輸送ベシクルの可視化、を標的とする。筋 繊維内における微小管系輸送の全貌は殆ど明らかで はなく、また生体筋繊維での live imaging は殆ど例 がない。そこで、本研究では筋収縮時ではなく、定 常な状態での筋繊維内での輸送動態を可視化するこ とを第一段階目の課題とした。定常な状態はほぼ自 然長と考えられる状態、過伸展、および過屈曲状態 での観察である。これは観察時のみならず、観察前 の飼育時に下肢の固定を行い長期間の過伸展、過屈 曲状態に置いたものも対象とする。過伸展や過屈曲 により筋繊維中のサルコメアの数が変化することが 先行研究により示されているが、そのような変化を 与えるための微小管系輸送の変化については言及さ れていない。本研究ではそのような筋肉の状態の変 化に伴う微小管系の動的変化を可視化した。

<報文>

(原著論文)

- Jinha A., Ait-Haddou R., Kaya M. and Herzog W. Response to Letter to the Editor regarding Jinha et al. A task-specific validation of homogeneous nonlinear optimization approaches Journal of Theoretical Biology 306, 145. (2012)
- [2] Arslam Y. Z., Jinha A., Kaya M. and Herzog W. Prediction of muscle forces using static optimization for different contractile conditions. Journal of Mechanics in Medicine and Biology 13, 1350022-1-13. (2013)

(国際雑誌)

[3] Y Toyoshima and H. Higuchi "Motile and Enzymatic properties of native dynein molecules" in Handbook of Dynein. K. Hirose and LA Amos ed. (2012)

(国内雑誌)

- [4] 樋口秀男、権田幸祐 「量子ドットを用いたがん細胞 の単一分子イメージング」 分担執筆 NTS 出版 バ イオマテリアル (2012)
- [5] 茅元司, 樋口秀男 ビジュアルレビュー:筋肉の巧み な収縮メカニズム.感染・炎症・免疫 42-2, 28-35. (2012)

[6] 樋口秀男、神原丈敏 「歩行型分子モーター、ダイニ ン」 パリティ (2013)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [7] Kenji Kikushima, Sayaka Kita, and Hideo Higuchi:Non-invasive in vivo imaging of vesicle movements of neutrophil in the mouse ear using quantum dots. 34th Naito conference Sapporo (2012.10)
- [8] Sayaka Kita, Kenji Kikushima, Hideo Higuchi: Noninvasive in vivo imaging of Tumor cells in mouse Auricles. The 4th Taiwan-Japan Symposium on Nanomedicine, Academia Sinca, Taipei(2013.1)
- [9] Taketoshi Kambara, Yoshiaki Tani, Motoshi Kaya, Tomohiro Shima, and Hideo Higuchi. The mechanomhemical cycle of human cytoplasmic dynein under external force. 14th International Alpbach Workshop on Molecular Motors. Albach Austria (2013.3)

招待講演

- [10] Kaya, M. Force generation mechanism of single skeletal myosin molecules in myofilaments. The 50th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Nagoya University (2012.9)
- [11] Kikushima k. A non-invasive method for the in vivo tracking of high-speed vesicle transport in mouse neutrophils. 6th International Symposium of Nanomedicine Tottori (2012.11)
- [12] Higuchi H., Kikushima K., and Kita S. Single molecule biophysics toward in vivo. The 4th Taiwan-Japan Symposium on Nanomedicine. Taipei (2013.1)
- [13] Higuchi H., Kikushima K., and Kita S. Single molecule biophysics toward in vivo. 2nd Tokyo U-Korea U Joint Symposium. Soul, Korea (2013.3)
- [14] Higuchi H and T. Nomura. "Understanding of hierarchy in muscle contraction." The international Symposium on multi-scale muscle mechanics. Session Moderator. Yokohama (2013.3)
- [15] Kaya, M. Molecular level on muscle contraction. The international Symposium on multi-scale muscle mechanics. Session Moderator. Yokohama (2013.3)

(国内会議)

一般講演

[16] 小林琢也、茅元司、樋口秀男「マウス骨格筋 in vivo イメージングによるサルコメア構造と微小管系の可 視化」ナノ学会第 10 回大会, 大阪 (2012.6)

- [17] 菊島健児, 喜多清, 樋口秀男 「量子ドットを用いたマ ウス耳内における白血球内小胞運動の非侵襲イメージ ング」 ナノ学会 第10回大会, 大阪 (2012. 6)
- [18] 喜多清, 菊島健児, 樋口秀男: In vivo imaging of single molecules in cancer cells of xenograft model under noninvasive condition. 第 71 回日本癌学会学術総会, 札幌
- [19] 菊島健児, 喜多清, 樋口秀男: Non-invasive in vivo imaging of vesicle movement in neutrophils in mouse ear. 第 50 回日本生物物理学会年会, 名古 屋 (2012.9)
- [20] 小林琢也、茅元司、樋口秀男「骨格筋形成過程における細胞質ダイニンの分布変化」生物物理学会名古屋大学 (2012.9)
- [21] 神原丈敏、谷芳明、茅元司、島知弘、樋口秀男「外部 負荷存在下でのヒト細胞質ダイニンのメカノケミカル サイクル」第50回日本生物物理学会年会 (2012.
 9)
- [22] Kenji Kikushima, Sayaka Kita, and Hideo Higuchi : Non-invasive in vivo tracking of high speed vesicle transport in mouse neutrophil, 第 41 回日本免疫学 会学術集会 神戸国際会議場 (2012.12)
- [23] 小林琢也、茅元司、樋口秀男 「マウス骨格筋形成過 程における細胞質ダイニンの挙動」 2013 年生体運 動研究合同班会議 広島大学(2013.1)
- [24] 三上貴司、樋口秀男「光の運動量変化に基づく細胞内 小胞に働く力の測定」
 2013 年生体運動研究合同班 会議
 広島大学
 (2013. 1)

招待講演

- [25] 神原丈敏、谷芳明、茅元司、島知弘、樋口秀男「外部 負荷存在下でのヒト細胞質ダイニンのメカノケミカル サイクル」分子モーター討論会、東京大学(2012.6)
- [26] 茅元司: Mechanism of muscular activities revealed by single molecule measurements. 理研セミナー 理 化学研究所 和光市 (2012.12)

<その他>

(受賞)

[27] 菊島健児 「量子ドットを用いたマウス耳介内における白血球内小胞運動の非侵襲イメージング」ナノ学会 若手優秀発表賞 (2012.6)

8 技術部門

(大塚、佐伯、八幡、柏葉、南野、*南城、*阿部)

* 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。技術部門の担当 教員(福山、長谷川、岡本)とで月に1度の物理技術 室ミーティングを行った。また、試作室担当の地惑 専攻教員のゲラー、化学専攻教員の長谷川および化 学専攻技術専門職員の川島も加え試作室ミーティン グを5回行った。

8.1 実験装置試作室 (大塚、柏葉、 南城、阿部)

利用状況

2012 年 4 月から 2013 年 3 月までの、実験装置試 作室の主な利用状況は以下の通りである。

- 内部製作件数 (440 件)
- 設計及び部品等の問い合わせ (外注を含む)
- 外注発注 (121 件)
- 他教室から作業依頼及び問い合わせ 主な依頼者(五月祭、素粒子センター、地球惑 星科学 並木研、船森研、市村技術職員、日屋 根准教授、吉川研、生物科学 寺島研、化学 長谷川研、畑中研、山内研、岩崎研、スペクト ル化学研究センター、地殻化学実験施設、超高 速強光子場科学研究センター、分析化学無機化 学実験)

工作実習

物理、地球惑星科学及び化学の大学院1年生を対 象として、7月2日から7月13日まで下記の内容で 工作講習会を行った。

- 参加人員:23名(物理19名、化学3名、地惑1 名)
- 実習内容

1. 測定器 (ノギス)の使い方

- 2. ねじの種類
- 3. シャーリング (切断機) の使用方法
- 4. 図面の読み方
- ハイトゲージ、ケガキ、ポンチ、ボール 盤、タップの使い方

その他

ワイヤ放電加工機の立ち上げと依頼図面のデータ 処理設備の立ち上げ

8.2 学生実験(佐伯、八幡、南野)

8.2.1 物理学実験 I、II

グループ編成、スケジューリング(佐伯)

8.2.2 物理学実験 I

- エレクトロニクス I(八幡)
 3年生夏学期の物理学実験 Iの「エレクトロニクス I」を技術指導した。
 この教材に FPGA の導入を検討し、学生アルバイトを募ってのテスト実験を行った。
 この結果を反映し、解説書の改定を行った。
- 計算機実験(南野)
 3年生夏学期の物理学実験Iの「計算機実験」の技術指導をした。

8.2.3 物理学実験 II

- 生物物理学(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。
 蛍光顕微鏡を導入し、実験内容の改訂を行った。
- ブラウン運動(八幡)
 3年生冬学期の物理学実験 II の「ブラウン運動」を技術指導した。

8.2.4 物理学実験機器更新 (八幡)

- 真空技術 安全対策に協力した。また、将来的なテーマ検 討として、ドライポンプセット、高精度な質量 分析器、ペニング真空計を導入した。
- エレクトロニクス I FPGA 教材を開発した。

8.3 IT 関連業務(南野)

- 専攻サーバ運用管理(ウェブ、メール、教務データベースサーバ) サーバ保守管理の外部委託を大幅に削減し、運用の透明化を図った。 メールサーバーの更新のために仮想サーバ上で新システムの準備を始めた。
 専攻ウェブサイトの管理を行うと共に、レイアウト等を変更することでより情報が得やすいサイトになるよう工夫した。
- 専攻内ネットワークシステムの運用管理
- 理学部情報システムチーム業務
 講義等のビデオ撮影及び、研究者ビデオなどの
 コンテンツ編集
 男女共同参画アンケートフォームの作成および
 集計・分析
- ヘルプデスク業務
 日常業務上でのトラブル対応及び、月例の教授
 会でのヘルプデスク
- IT 機器の管理及びサポート 遠隔講義等でのテレビ会議システムのユーザサ ポート 遠隔会議・講義のための TV 会議システムの 新規導入やプロジェクターの新技術導入と機器 更新

8.4 安全衛生(八幡)

- 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(物 理学専攻関連のみ)
- 理学系研究科・理学部環境安全管理室員特に理 学系安全マニュアルの更新に参加した。
- 高圧ガス貯蔵庫理学部1号館管理者
 1号館高圧ガス貯蔵庫巡視を行った。(年4回)
 高圧ガスボンベの新規保管について、環境安全本部との調整を行った。
- ガス検知器の定期点検と新規設置を行った。
- 理学系防災連絡会に参加
 防災訓練小WGのメンバーとして防災訓練の計
 画、実施や、緊急地震速報の導入などの防災対策を実施した。

8.5 全学技術研修(佐伯、南野、八 幡、吉田(地惑専攻))

東京大学の教室系技術職員を対象として、9月11 日から9月13日まで、下記の内容でエレクトロニク ス研修を行った。

- 参加人数 7名
- 実習内容 講義 マルチメータキットの組立実習 照度計の製作実習

8.6 各種委員会等

- 総合技術本部 技術職員研修企画委員会 (佐伯)
- 寒剤管理連絡担当者 (八幡)
- 大学院理学系研究科 技術委員会 (佐伯)
- 理学系研究科・理学部技術部 運営委員会(佐伯)
 広報担当として、技術部ホームページの作成と 更新を行っている。
- 理学系寒剤管理委員会(八幡)
 理学系液体窒素タンクの供給設備に液面、内圧の遠隔・自動監視装置を追加導入した。
- 1号館自衛消防検討委員(八幡)
- 自衛消防中核要員(八幡)
- 理学系研究科・理学部 技術シンポジウム実行 委員(柏葉)

<報文>

 [1] 平成24年度技術報告集(東京大学大学院理学系研究 科・理学部技術部、2013年3月).

<学術講演>

- [2] 佐伯喜美子、南野真容子、吉田英人、八幡和志: 全学 技術研修の実施報告 ーエレクトロニクス研修一、第 27 回理学系研究科・理学部 技術シンポジウム (東京 大学、2012 年 9 月).
- [3] 八幡和志: FPGA 教材の開発 ―機器開発とテスト実験―、第27回理学系研究科・理学部技術シンポジウム (東京大学、2012年9月).
- [4] 吉田和行、八幡和志:理学系液体窒素タンクの運用と 設備更新、第27回理学系研究科・理学部技術シンポ ジウム(東京大学、2012年9月).
- [5] 佐伯喜美子: GFP を用いた学生実験の検討、第24 回生物学技術研究会(岡崎コンファレンスセンター、 2013年2月).

- [6] 佐伯喜美子: 生物物理学生実験への蛍光顕微鏡の導入、平成 24 年度 愛媛大学総合技術研究会 (愛媛大学、2013 年 3 月).
- [7] 八幡和志:物理学実験への FPGA 教材導入、日本物 理学会第68回年次大会(広島大学、2012年3月).

Π

Summary of group activities in 2011

1 Theoretical Nuclear Physics Group

Subjects: Structure and reactions of unstable nuclei, Monte Carlo Shell Model, Molecular Orbit Method, Mean Field Calculations, Quantum Chaos

Member: Takaharu Otsuka and Takashi Abe

In the Nuclear Structure group (T. Otsuka and T. Abe), quantum many-body problems for atomic nuclei, issues on nuclear forces and their combinations are studied theoretically from many angles. The subjects studied include

(i) structure of unstable exotic nuclei,

(ii) shell model calculations including Monte Carlo Shell Model,

(iii) collective properties and Interacting Boson Model,

(iv) reactions between heavy nuclei,

(v) other topics such as Bose-Einstein condensation, quantum chaos, etc.

The structure of unstable nuclei is the major focus of our interests, with current intense interest on novel relations between the evolution of nuclear shell structure and characteristic features of nuclear forces, for example, tensor force, three-body force, etc. Phenomena due to this evolution include the disappearance of conventional magic numbers and appearance of new ones. We have published pioneering papers on the shell evolution in recent years. The tensor force effect has been clarified [1] with various actual applications including nuclear shapes [2], while striking effect of three-body force has been shown [1] for the first time. This effect in Ca isotopes is discussed in [3].

The structure of such unstable nuclei has been calculated by Monte Carlo Shell Model, for instance to Be isotopes [4] and also by conventional shell model. Their applications have been made in collaborations with experimentalists internationally spread, e.g., [5, 6, 7, 8].

The Monte Carlo Shell Model has been improved with further developments, for example, a new extrapolation method [9]. Thus, the advanced version of Monte Carlo Shell Model has been established [10, 11, 12], which makes our practice on the K computer possible.

The mean-field based formulation of the Interacting Boson Model is a new original approach being developed, and a long-standing problem on strongly deformed nuclei has been solved [13]. This approach is so general and powerful that its applications are being spread very fast in big collaborations, for instance, the nature of triaxial deformation has been clarified [14, 15, 16].

We are studying on time-dependent phenomena like fusion and multi-nucleon transfer reactions in heavyion collisions.

References

- For a brief review, T. Otsuka, "Exotic nuclei and nuclear forces", in Proc. of the 152nd Nobel Symposium on Physics with Radioactive Beams, Phys. Scr. T152, 014007, (2013).
- [2] Y. Utsuno, T. Otsuka, B.A. Brown, M. Honma, T. Mizusaki and N. Shimizu, "Shape transitions in exotic Si and S isotopes and tensor-force-driven Jahn-Teller effect", Phys. Rev. C 86 051301(R), (2012).
- J.D. Holt, T. Otsuka, A. Schwenk and T. Suzuki, "Three-body forces and shell structure in calcium isotopes", J. Phys. G39, 085111, (2012).
- [4] L. Liu, T. Otsuka, N. Shimizu, Y. Utsuno and R. Roth, "No-core Monte Carlo shell model calculation for ¹⁰Be and ¹²Be low-lying spectra", Phys. Rev. C 86, 014302, (2012).
- [5] S. Schwertel et al., "One-neutron knockout from Sc51-55", Euro. Phys. J. A 48, 191, (2012).
- [6] D.K. Sharp et al., "Neutron single-particle strength outside the N=50 core", Phys. Rev. C 87, 014312, (2012).
- [7] E. Ganioglu et al., "High-resolution study of Gamow-Teller transitions in the Ti-47(He-3, t)V-47 reaction", Phys. Rev. C 87, 014321, (2012).
- [8] J.P. Schiffer et al., "Valence nucleon populations in the Ni isotope", Phys. Rev. C 87, 034306, (2012).

- [9] N. Shimizu, Y. Utsuno, T. Mizusaki, M. Honma, Y. Tsunoda and T. Otsuka, "Variational procedure for nuclear shell-model calculations and energy-variance extrapolation", Phys. Rev. C 85, 054301, (2012).
- [10] T. Abe, P. Maris, T. Otsuka, N. Shimizu, Y. Utsuno and J.P. Vary, "Benchmarks of the full configuration interaction, Monte Carlo shell model and no-core full configuration methods", Phys. Rev. C 86, 054301, (2012).
- [11] N. Shimizu, T. Abe, Y. Tsunoda, Y. Utsuno, T. Yoshida, T. Mizusaki, M. Honma and T. Otsuka, "New generation of the Monte Carlo shell model for the K computer era", Prog. Theor. Exp. Phys. 2012(1), 01A205, (2012).
- [12] Y. Utsuno, N. Shimizu, T. Otsuka and T. Abe, "Efficient computation of Hamiltonian matrix elements between non-orthogonal Slater determinants", Comp. Phys. Comm. 184, 102, (2013).
- [13] For a quick review, T. Otsuka, "Interacting boson model and nucleons", Proc. of Beauty in Physics, Theory and Experiment in honor of Francesco Iachello on the occasion of his 70th birthday, AIP Conf. Proc. 1488, 445, (2012).
- [14] K. Nomura, N. Shimizu, D. Vretenar, T. Niksic and T. Otsuka," Robust Regularity in gamma-Soft Nuclei and Its Microscopic Realization", Phys. Rev. Lett. 108, 132501, (2012).
- [15] J. Kotila, K. Nomura, L. Guo, N. Shimizu and T. Otsuka, "Shape phase transitions in the interacting boson model: Phenomenological versus microscopic descriptions", Phys. Rev. C 85, 054309, (2012).
- [16] M. Alders et al., "Evidence for a Smooth Onset of Deformation in the Neutron-Rich Kr Isotopes", Phys. Rev. Lett. 108, 062701, (2012).

2 Theoretical Particle and High Energy Physics Group

Research Subjects: The Unification of Elementary Particles & Fundamental Interactions

Members: Takeo Moroi, Koichi Hamaguchi, Yutaka Matsuo, Yuji Tachikawa

The main research interests at our group are in string/M theory and high energy particle physics phenomenology. In the field of high energy phenomenology, supersymmetric unified theories are extensively studied and cosmological problems are also investigated. In the field of string/M theory, fundamental properties of branes in M-theory are intensively studied. Various supersymmetric dualities are also being pursued.

We list the main subjects of our researches below.

- 1. High Energy Phenomenology
 - 1.1 SUSY models [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]
 - 1.2 Resonant leptogenesis in $U(1)_{B-L}$ model [12]
 - 1.3 Observing null radiation zone at the LHC [13]
 - 1.4 Higher dimensional derivative interaction of the Higgs fields [14]
 - 1.5 CP violations [15, 16]
 - 1.6 Top forward–backward asymmetry [17]
 - 1.7 Heavy photon models [18]
 - 1.8 Cosmology in PQ models [19]
 - 1.9 A solution to the moduli problem [20, 21, 22]
 - 1.10 Primordial gravitational waves as probes of the early Universe [23, 24]

1.11 Isocurvature perturbation in dark radiation [25]

- 1.12 Inflation models in supergravity [26, 27, 28, 29]
- 1.13 Scalar dynamics in thermal bath [30, 31]

1.14 130GeV gamma-ray line from decaying dark matter [32]

1.15 Gravitino problem [33]

1.16 Phenomenology via gauge/gravity duality [34]

- 2. Superstring Theory
 - 2.1 Study of M-theory [35, 36]
 - 2.2 Relations among 4d superconformal index, 5D SYM and 2D q-YM [37, 38, 39, 40]
 - 2.3 Study of 4d supersymmetric gauge theory [41, 42]
 - 2.4 AdS/CFT corrrespondence and integrable system [43]

References

- "Enhanced Higgs Mass in a Gaugino Mediation Model without the Polonyi Problem," T. Moroi, T. T. Yanagida and N. Yokozaki, Phys. Lett. B 719, 148 (2013).
- [2] M. Ibe and R. Sato, "A 125 GeV Higgs Boson Mass and Gravitino Dark Matter in R-invariant Direct Gauge Mediation" Phys. Lett. B 717, 197 (2012).
- [3] T. Kitahara, "Vacuum Stability Constraints on the Enhancement of the $h \to \gamma \gamma$ rate in the MSSM," JHEP **1211**, 021 (2012) [arXiv:1208.4792 [hep-ph]].
- [4] R. Sato, K. Tobioka and N. Yokozaki, "Enhanced Diphoton Signal of the Higgs Boson and the Muon g 2 in Gauge Mediation Models" Phys. Lett. B **716**, 441 (2012).
- [5] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto and N. Yokozaki, "Higgs mass, muon g-2, and LHC prospects in gauge mediation models with vector-like matters," Phys. Rev. D 85, 095012 (2012) [arXiv:1112.5653 [hep-ph]].
- [6] M. Endo, K. Hamaguchi, K. Ishikawa, S. Iwamoto and N. Yokozaki, "Gauge Mediation Models with Vectorlike Matters at the LHC," JHEP 1301, 181 (2013) [arXiv:1212.3935 [hep-ph]].
- [7] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto, K. Nakayama and N. Yokozaki, "Higgs mass and muon anomalous magnetic moment in the U(1) extended MSSM," Phys. Rev. D 85, 095006 (2012) [arXiv:1112.6412 [hep-ph]].
- [8] M. Ibe, S. Matsumoto and R. Sato, "Mass Splitting between Charged and Neutral Winos at Two-Loop Level," Phys. Lett. B 721, 252 (2013).
- [9] R. Sato, S. Shirai and K. Tobioka, "Gluino Decay as a Probe of High Scale Supersymmetry Breaking," JHEP 1211, 041 (2012).
- [10] K. Hamaguchi, K. Nakayama and N. Yokozaki, "A Solution to the mu/Bmu Problem in Gauge Mediation with Hidden Gauge Symmetry," JHEP 1208, 006 (2012) [arXiv:1111.1601 [hep-ph]].
- [11] S. Kanemura, T. Shindou and T. Yamada, "A light Higgs scenario based on the TeV-scale supersymmetric strong dynamics," Phys. Rev. D 86 (2012) 055023 [arXiv:1206.1002 [hep-ph]].
- [12] N. Okada, Y. Orikasa and T. Yamada, "Minimal Flavor Violation in the Minimal $U(1)_{B-L}$ Model and Resonant Leptogenesis," Phys. Rev. D 86 (2012) 076003 [arXiv:1207.1510 [hep-ph]].
- [13] K. Hagiwara and T. Yamada, "Null radiation zone at the LHC," Phys. Rev. D 87 (2013) 014021 [arXiv:1210.0973 [hep-ph]].
- [14] Y. Kikuta and Y. Yamamoto, "Perturbative unitarity of Higgs derivative interactions," arXiv:1210.5674 [hep-ph].
- [15] J. Hisano, K. Tsumura, and M. J. S. Yang, "QCD Corrections to Neutron Electric Dipole Moment from Dimension-six Four-Quark Operators", Phys.Lett. B713, 473 (2012), arXiv:1205.2212.
- [16] M. Endo, and T. Yoshinaga, "Mass Insertion Formula for Chargino Contribution to $\Delta B = 1$ Wilson Coefficients and its Application to CP Asymmetries of $B \to K\pi$," Prog. Theor. Phys. **128** (2012) 1251-1268.
- [17] M. Endo and S. Iwamoto, "Comment on the CMS search for charge-asymmetric production of W' boson in ttbar + jet events," Phys. Lett. B 718, 1070 (2013) [arXiv:1207.5900 [hep-ex]].
- [18] M. Endo, K. Hamaguchi and G. Mishima, "Constraints on Hidden Photon Models from Electron g-2 and Hydrogen Spectroscopy," Phys. Rev. D 86, 095029 (2012).
- [19] T. Moroi and M. Takimoto, "Thermal Effects on Saxion in Supersymmetric Model with Peccei-Quinn Symmetry," Phys. Lett. B 718, 105 (2012).
- [20] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, "Cosmological Moduli Problem in Low Cutoff Theory," Phys. Rev. D 86, 043507 (2012) [arXiv:1112.0418 [hep-ph]].

- [21] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, "Gravity mediation without a Polonyi problem," Phys. Lett. B 714, 256 (2012) [arXiv:1203.2085 [hep-ph]].
- [22] M. Kawasaki, N. Kitajima and K. Nakayama, "Revisiting the Cosmological Coherent Oscillation," Phys. Rev. D 87, 023513 (2013) [arXiv:1112.2818 [hep-ph]].
- [23] R. Jinno, T. Moroi and K. Nakayama, "Imprints of Cosmic Phase Transition in Inflationary Gravitational Waves," Phys. Lett. B 713, 129 (2012) [arXiv:1112.0084 [hep-ph]].
- [24] R. Jinno, T. Moroi and K. Nakayama, "Probing dark radiation with inflationary gravitational waves," Phys. Rev. D 86, 123502 (2012) [arXiv:1208.0184 [astro-ph.CO]].
- [25] E. Kawakami, M. Kawasaki, K. Miyamoto, K. Nakayama and T. Sekiguchi, "Non-Gaussian isocurvature perturbations in dark radiation," JCAP 1207, 037 (2012) [arXiv:1202.4890 [astro-ph.CO]].
- [26] K. Nakayama and F. Takahashi, "PeV-scale Supersymmetry from New Inflation," JCAP 1205, 035 (2012) [arXiv:1203.0323 [hep-ph]].
- [27] K. Nakayama and F. Takahashi, "Alchemical Inflation: inflaton turns into Higgs," JCAP 1211, 007 (2012) [arXiv:1206.3191 [hep-ph]].
- [28] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, "Eluding the Gravitino Overproduction in Inflaton Decay," Phys. Lett. B 718, 526 (2012) [arXiv:1209.2583 [hep-ph]].
- [29] M. Kawasaki, N. Kitajima and K. Nakayama, "Smooth hybrid inflation in a supersymmetric axion model," Phys. Rev. D 87, 035010 (2013) [arXiv:1211.6516 [hep-ph]].
- [30] K. Mukaida and K. Nakayama, "Dynamics of oscillating scalar field in thermal environment," JCAP 1301, 017 (2013) [arXiv:1208.3399 [hep-ph]].
- [31] K. Mukaida and K. Nakayama, "Dissipative Effects on Reheating after Inflation," JCAP 1303, 002 (2013) [arXiv:1212.4985 [hep-ph]].
- [32] M. Endo, K. Hamaguchi, S. P. Liew, K. Mukaida and K. Nakayama, "Axino dark matter with R-parity violation and 130 GeV gamma-ray line," Phys. Lett. B 721, pp. 111 (2013) [arXiv:1301.7536 [hep-ph]].
- [33] M. Endo, K. Hamaguchi and T. Terada, "Scalar Decay into Gravitinos in the Presence of D-term SUSY Breaking," Phys. Rev. D 86 (2012) 083543 [arXiv:1208.4432 [hep-ph]].
- [34] R. Nishio, T. Watari, T. T. Yanagida and K. Yonekura, "Naive Dimensional Analysis in Holography," Phys. Rev. D 86, 016010 (2012) [arXiv:1205.2949 [hep-ph]].
- [35] P. -M. Ho and Y. Matsuo, "Note on non-Abelian two-form gauge fields," JHEP 1209, 075 (2012) [arXiv:1206.5643 [hep-th]].
- [36] O. Chacaltana, J. Distler and Y. Tachikawa, "Nilpotent orbits and codimension-two defects of 6d N=(2,0) theories," Int. Jour. Mod. Phys. A 28 1340006 (2013) [arXiv:1203.2930 [hep-th]].
- [37] Y. Tachikawa, "4d partition function on S^1xS^3 and 2d Yang-Mills with nonzero area," PTEP **2013**, 013B01 (2013) [arXiv:1207.3497 [hep-th]].
- [38] T. Kawano and N. Matsumiya, "5D SYM on 3D Sphere and 2D YM," Phys. Lett. B 716, 450 (2012) [arXiv:1206.5966 [hep-th]].
- [39] Y. Fukuda, T. Kawano and N. Matsumiya, "5D SYM and 2D q-Deformed YM," Nucl. Phys. B 869, 493 (2013) [arXiv:1210.2855 [hep-th]].
- [40] N. Mekareeya, J. Song and Y. Tachikawa, "2d TQFT structure of the superconformal indices with outerautomorphism twists," JHEP 1303 (2013) 171 [arXiv:1212.0545 [hep-th]].
- [41] S. Kanno, Y. Matsuo and H. Zhang, "Virasoro constraint for Nekrasov instanton partition function," JHEP 1210, 097 (2012) [arXiv:1207.5658 [hep-th]].
- [42] P. C. Argyres, K. Maruyoshi and Y. Tachikawa, "Quantum Higgs branches of isolated N=2 superconformal field theories," JHEP 1210, 054 (2012) [arXiv:1206.4700 [hep-th]].
- [43] I. Kostov and Y. Matsuo, "Inner products of Bethe states as partial domain wall partition functions," JHEP 1210, 168 (2012) [arXiv:1207.2562 [hep-th]].

3 Hayano Group

Research Subjects: Precision spectroscopy of exotic atoms and nuclei

Member: Ryugo S. Hayano and Takatoshi Suzuki

1) Antimatter study at CERN's antiproton decelerator

 \bar{p} -nucleus annihilation cross section at ultra-low energies At high energies, it is known that the \bar{p} -nucleus annihilation cross sections scale as $\sigma_{\rm ann} \propto A^{2/3}$ where A is the nuclear mass number. On the other hand, at very low energies where the wave length of antiproton 's de Broglie wave is longer than the diameters of target nuclei, this scaling is expected to be violated, but no such measurements have been done due to the lack of ultra-low-energy antiproton beams. Using a radio-frequency quadrupole decelerator ("inverse" linac), we have started the $\sigma_{\rm ann}$ measurements at 130 keV. In 2012, we carried out the measurement using carbon, palladium, and platinum target, and observed the antiproton annihilation in the targets for the first time at this low energy region. We are now analyzing the data we took in 2012 to determine the absolute values of the antiproton-nucleus annihilation cross sections.

2) Laser spectroscopy of radioactive francium isotopes at the ISOLDE facility at CERN

Laser spectroscopy is a crucial tool for studying properties of nuclear ground states. At the ISODLE facility at CERN, the new CRIS collaboration of Manchester, Leuven, Birmingham, Orsay, Max Planck Institute of Quantum Optics, and Tokyo has proposed to measure the isotope shifts and hyperfine structures of francium isotopes by Collinear Resonant Ionization Spectroscopy (CRIS). The CRIS method may provide evidence of the anomalous structure in neutron deficient francium isotopes.

In 2012, we succeeded in measuring ²⁰⁷Fr and ²¹¹Fr. We used a nanosecond titanium-sapphire laser developed by the ASACUSA experiment at CERN. A new pump laser was constructed so that the output power was ten times higher than last year. In order to measure isotopes with low yields, however, we needed to improve the detection efficiency.

3) Precision X-ray spectroscopy of kaonic atoms

The X-ray spectroscopy of kaonic atoms is a complementary tool to study kaon-nucleon/nucleus interaction. The advent of a new type of high-resolution X-ray detector, SDD, its combination with high-intensity beamline provides clean kaon beam and various trackers/counters technique, enable us to study kaonic atoms with unprecedented precision.

X-ray spectroscopy of kaonic atoms at $DA\Phi NE$ In fiscal year 2012, we finished the data analyses of all the measurements carried out during the beam time of SIDDHARTA experiment in the fiscal year 2009. The results include mainly the following two parts.

One comes from the simultaneous analysis of the deuterium target data and carefully selected hydrogen target data set. We determined the absolute yields of kaonic hydrogen 2p-1s transition X-rays and all K- series X-rays. Meanwhile, based on the same analysis, we estimated an upper limit for the yield of 2p-1s transition X-rays of kaonic deuterium, for reference of future measurement. Moreover, we obtained the most reliable evaluation of the kaonic hydrogen 2p width due to nuclear absorption from a comparison of the kaonic hydrogen X-ray yields to the Extended Standard Cascade Model calculation.

The other part of the results is about the widths of the 2p states of kaonic helium-3 and helium-4 atoms. In contrary to the early experiments in the 1970's and 1980's, the SIDDHARTA experiment concludes smaller widths of such states, which are in consistency with theoretical speculations of about 1-2 eV. Within the precision of our experiment, we did not find isotope-dependence of the strong-interaction shift and width of the 2p states of kaonic helium atoms.

X-ray spectroscopy of kaonic helium at J-PARC The J-PARC E17, which is to be carried out at K1.8BR beamline in the J-PARC hadron experimental facility, will measure X-rays from kaonic helium 3 and kaonic helium 4 to determine the strong interaction shifts in their 2p level. They would impose strong constraint on \bar{K} -nucleus interaction. In fiscal year 2012, as a part of E15 experiment described in the followings, we made progress on K1.8BR beam line tuning, stable liquid-helium3 target operation, and the commissioning of a cylindrical detector system, which will be used for the reaction vertex reconstruction.

4) Study of kaonic nuclei

Search for K^-pp and K^-pn deeply-bound kaonic states at J-PARC The J-PARC E15 adopts ${}^{3}\text{He}(K^-,N)$ reaction to search for $\bar{K}NN$. E15 is a kinematically complete experiment in which all reaction products are detected exclusively for $K^-pp \to \Lambda p$ decay mode, and it aims to provide decisive information on the nature of the simplest antikaonic nucleus. In the fiscal year 2012, detector systems for forward scattered neutron and protons were constructed to complete our setup. In the engineering runs performed in June and December, we have confirmed the designed performance for all the systems including the beam-line apparatus, the ${}^{3}\text{He}$ target, the cylindrical detector system and newly installed forward counters. Then, we have started 1st-stage physics data taking in March 2013, which will be completed before the summer shutdown.

5) Precision spectroscopy of pionic atoms

- Pionic atoms via $(d, {}^{3}\text{He})$ reaction We are planning a precise pionic-atom spectroscopy experiment with BigRIPS at RIBF, RIKEN. The goal is to study 1s and 2s pionic states in ${}^{121}\text{Sn}$ by the ${}^{122}\text{Sn}(d, {}^{3}\text{He})$ reaction. The measurement will help us better understand the strong interaction between the pion and the nucleus, which leads to quantitative evaluation of the magnitude of the quark condensate at the normal nuclear density. In 2011, we analyzed the result of a pilot experiment performed in 2010 and made the position spectrum of ${}^{3}\text{He}$. Some clear peaks appeared in the spectrum, which indicate the first observation of ${}^{121}\text{Sn}$ pionic atom in the world. In 2012, we performed machine study at RIBF to measure acceptance and dispersion of our optics precisely. With the result of this machine study, we could apply the precise energy calibration to the position spectrum, and transform it into the binding-energy spectrum. In 2013, we will finalize the analysis and prepare for a main experiment, which will be performed in the end of the fiscal year.
- Feasibility study of pionic atom spectroscopy with inverse kinematics As described above, the pionic atom can be a probe of the quark condensate at the normal nuclear density. To access density dependence of the quark condensate, we are now planning the pionic atom spectroscopy with unstable nuclei (HI) using inverse kinematics, $d(\text{HI}, {}^{3}\text{He})$. The pionic atom spectroscopy with unstable nuclei such as neutron-rich nuclei makes it possible for us to study quark condensate at different nuclear densities from normal nuclear density due to the neutron skin effect on the pion distribution. We examined an experimental setup which consists of a pure deuterium (1 atm) active target of TPC (Time Projection Chamber) and a full energy detector. Applying magnetic field in the TPC, we can observe ³He emitted near the forward 0 degree. In this method, a typical yield of 1s pionic states is estimated to be 1×10^{3} /day assuming the incident beam intensity of 10^{7} /s, and the Q value resolution is estimated to be about 500 keV (FWHM), which indicates the experiment is sufficiently feasible.

6) Study of η' mesic nuclei

We are planning the missing-mass spectroscopy of η' mesic nuclei at GSI to study in-medium properties of η' meson. We will employ 2.5 GeV proton beam and create η' meson in carbon nuclei by the ${}^{12}C(p,d)$ reaction. Then, the energy of the η' mesic nuclei will be derived by measuring the momentum of the ejectile deuterons with a spectrometer.

In 2012, we developed and tested an aerogel Cherenkov detector for the rejection of expected proton background. In the test experiment, we achieved background rejection capability larger than 99.5 %, which is sufficient for the main experiment. We will continue preparation of other detectors and spectrometer optics in 2013.

7) Study of muonium production targets

Ultra-slow polarized muon beam whose energy of $0.5\sim30$ keV is anticipated as a new "microscope for magnetism" for the investigation of the surface magnetism. The ultra slow muon beamline was established in the RIKEN RAL muon facility. In this site, $15\sim20$ /s ultra-slow muons can be generated while initial

muon beam intensity reaches to 1.3×10^6 /s. In order to increase the intensity of the ultra-slow muons, improvements of the escaping efficiency of the muoniums from the degrader, muonium formation target (3 %), and laser ionization (~ 10^{-5}) are needed. We searched a muonium production target by using μ SR method. As a result, silica-aerogel had the muonium production efficiency comparable to that of silica powder (Cab-O-Sil EH-5) which had been known as the best muonium production target.

We tested silica-aerogel as a muonium emitter. The silica-aerogel is aggregate of small globules of silicon dioxide and it has a large surface area as well as silica particle layer. We carried out a measurement of muonium emission from silica-aerogel in TRIUMF muon beamline in 2011. In this year, we analyzed the obtained data.

4 Sakurai Group

Research Subjects: Nuclear structure and dynamics of exotic nuclei, Origin of elements in universe

Member: Hiroyoshi Sakurai, Megumi Niikura

Exotic nuclei located far from the stability line are new objectives for nuclear many-body problems. Our laboratory explores exotic structures and dynamics in the nuclei that have never been investigated before, such as those with largely imbalanced proton and neutron numbers, hence to discover new phenomena and exotic properties in unstable nuclei. Our experimental programs utilize fast radioactive isotope (RI) beams available at the RI Beam Factory (RIBF), RIKEN. The RIBF is a world-top leading facility where RI beam intensities are the highest in the world. We maximize RIBF utilization to access nuclei very far from the stability line as well as to exploit new types of experiments and new methods of spectroscopy via new ideas and detector developments.

β -delayed γ -ray spectroscopy at EURICA campaign

A β -decay experiment of neutron-rich nuclei around ⁷⁸Ni has been performed as part of EURICA campaign at the RIBF at RIKEN in the end of 2012. The experiment aimed at exploring new isomers, half-lives, and β -decay spectroscopy of nuclei in the vicinity of the doubly-magic ⁷⁸Ni. Several new half-lives in this region have been measured for the first time. The new half-lives together with data from literature allowed for a systematic study and comparison between different global models and theoretical calculations. Those outputs will largely extend our knowledge about nuclear structure towards neutron drip-line.

Development of He-3 neutron detector for measurement of β -delayed neutron emission

Rapid neutron-capture process (r-process) in the universe at the extreme condition such as supernovae is known as a process of nucleosynthesis for atomic nuclei heavier than iron. However the path of the r-process is poorly known, since this process goes on the neutron-rich nuclei far from the β -stability and there are limited experimental data available. Especially, some nuclei have probability of β -delayed neutron emission, which changes the path of r-process. Hence the emission probability of β delayed neutron (P_n) must be determined experimentally.

We are now developing the neutron detector array using He-3 proportional counter. He-3 has a large absorption cross-section for the thermal neutron and is used as a converter gas by the nuclear reaction; ${}^{3}\text{He} + n \rightarrow t + p$. Therefore neutron detector based on He-3 tubes has a large detection efficiency and no cross-talk effect by the scattered neutron. This year we tested basic properties of He-3 tubes using paraffin moderator with different shapes and geometrical configurations. The obtained detection efficiency is well reproduced by the simulation using the Monte Carlo N-Particle (MCNP) code.

Development of a new γ -ray detector for in-beam spectroscopy

In-beam γ -ray spectroscopy at RIBF aims at expanding our knowledge of the structures and dynamics of exotic nuclei. In this method, a high-granular scintillator array is placed around the secondary target to detect de-excitation γ -rays emitted from nuclei after the secondary reaction.

We are now developing a new generation γ -ray detector array with very high granularity called SHOGUN (Scintillator based High-resOlution Gamma-ray spectrometer for Unstable Nuclei). SHOGUN consists of approximately 1000 LaBr₃(Ce) scintillators. It has not only high efficiency but also high energy and timing resolution. In this year we tested basic properties of several LaBr₃(Ce) scintillators with different shapes. We also start measuring the timing resolution and the detection efficiency to find the best way to measure lifetimes of exited state of exotic nuclei.

5 Komamiya Group

Research Subjects: (1) Preparation for an accelerator and an experiment for the International linear e^+e^- collider ILC; (2) Higgs boson and supersymmetric particle searches with the ATLAS detector at the LHC *pp* collider; (3) Experiment for studying gravitational quantum effects and searching for new medium range force using ultra-cold neutron beam; (4) Study on possibility to investigate the EPR paradox using charmonia decays.

Member: Sachio Komamiya, Yoshio Kamiya, Daniel Jeans, Go Ichikawa

We, particle physicists, are entering an exciting period in which new paradigm of the field will be opened on the TeV energy scale by the new discovery of a Higgs Boson at LHC. The details of the observed Higgs Boson and other new particles will be studied in a cleaner environment of e^+e^- collisions at the International Linear Collider ILC.

1) 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. The technical design was completed in the end of 2012. Since then, ILC design and hardware development are passed to the Linear Collider Collaboration (LCC) lead by Lyn Evans. The oversight body of LCC is called LCB (Linear Collider Board) whose chair is Komamiya. We are working on ILC accelerator related hardware development, especially on the final focus system. We are developing the Shintake beam size monitor at the ATF2, which is a test accelerator system for ILC located in KEK. The Shintake beam size monitor is able to measure O(10)[nm] beam size, by using a high power laser interferometer. Also we have been studying possible physics scenario and the large detector concept (ILD) for an experiment at ILC. Since 2012 autumn, a new postdoctoral fellow who is expert on the silicon electro-magnetic calorimeter joined from UK. We establish a group to work on calorimeters for ILC detector.

2) Experiment for studying quantum bound states due to the earth's gravitational potential to study the equivalent theorem in the quantum level and searching for new short-range force using ultra-cold neutron (UCN) beam: A detector to measure gravitational bound states of UCNs is developed. We decided to use CCD's for the position measurement of the UCN's. The CCD is going to be covered by a ^{10}B layer to convert neutron to charged nuclear fragments. The UCNs are going through a neutron guide of 100 [μ] height and their density is modulated in height as forming bound states within the guide due to the earth's gravity. In 2008 we tested our neutron detector at ILL Grenoble. In 2009 we started the test experiment at ILL. We significantly improved our detector system and performed the experiment in 2011, and the analysis was completed in 2012. The observed modulations in the vertical distribution of UCNs due to the quantization is in good agreement with the prediction by quantum mechanism using the Wigner function. This is the first observation of gravitationally bound states of UCNs with submicron spacial resolution.

3) ATLAS experiment at LHC: The epoch of new paradigm for particle physics is going to open with the experiments at LHC. In July 2012, a Higgs Boson was discovered by the ATLAS and CMS experiments

at LHC. We call this as "2012 July Revolution". Our students have been working on data analysis on search for a Higgs Boson in the very important decay mode of $H \rightarrow \gamma \gamma$. Also other student searched for supersymmetric partners of third generation quarks with the missing transverse energy and with b-quark signal. These results are already published in journals.

4) One of our graduate student was worked out on possibility to study the EPR paradox using decays J/ψ , η_c , or $\chi_{c0} \to \Lambda \bar{\Lambda} \to p \pi^- \bar{p} \pi^+$. The results was submitted in journal.

6 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.

An R and D study is ongoing for a compact mobile anti-electron neutrino detector with plastic scintillators 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 building 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).

We built a segmented antineutrino detector made of plastic scintillators called PANDA, Plastic Anti-Neutrino Detector Array. Last year, a 360-kg prototype called PANDA36 was deployed for two months at Ohi Power Station in Fukui, Japan. It was installed on a van, transported to the site, and held in the van outside of the reactor building during the measurement. We observed a two-sigma difference in neutrino-like event rate before and after the shutdown of the reactor. This is the world's first aboveground antineutrino detection of a nuclear reactor. A larger prototype PANDA64 of 640 kg mass is now ready and under the test running in the university campus with a newly installed 24-cm thick water shield surrounding it. It should be capable of ON/OFF detection of Ohi reactor with three-sigma accuracy within two days with its larger detector mass and better background rejection power.

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, aka Sumico.

An experiment is being performed using a dedicated detector piggybacked on Sumico to search for hidden sector photons kinetically mixing with the ordinary photons. The detector consists of a cylindrical vacuum chamber with a photon sensor in it. The existence of the hidden sector photons and other hidden sector particles is predicted by extensions of the Standard Model, notably the ones based on string theory. The hidden sector photon is expected to come from the direction of the sun. It would be produced in the solar core or in the space by oscillation of the ordinary photon, and can transmute into the photon again in a long vacuum chamber in the laboratory. A photon sensor in the chamber would readily detects the ordinary photon. We published the result of the world's first solar hidden sector photon search experiment with this solar hidden sector photon telescope. We are now preparing an extended-size detector with reduced background events and less systematic effects.

7 Aihara & Yokoyama Group

Research Subjects: Study of CP-Violation and Search for Physics Beyond the Standard Model in the B Meson and the τ Lepton Systems (Belle & Belle II), Dark Energy Survey at Subaru Telescope (Hyper Suprime-cam), Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment (T2K), R&D for the Next Generation Neutrino and Nucleon Decay Experiment (Hyper-Kamiokande), Measurement of Neutrino-nucleus Interactions (SciBooNE), and R&D for New Generation Photodetectors.

Members: H. Aihara, M. Yokoyama, Y. Onuki, and D. Epifanov

1. Search for new physics at KEK *B*-factory: Belle experiment

One of the major research activities in our group has been a study of CP-violation and a search for physics beyond the Standard Model in the *B* meson and the τ lepton systems using the KEK *B*-factory (KEKB). This past year, we continued a study of Michel parameters of the τ lepton, which is sensitive to physics beyond the Standard Model. Using ~ 900 million $\tau^+\tau^-$ pairs recorded with the Belle detector, we intend to significantly improve the precision of measurement over previous measurements.

2. Physics at luminosity frontier: Belle II experiment

The SuperKEKB project started in 2010. The upgraded accelerator, SuperKEKB, will have 40 times more luminosity than KEKB. The Belle detector is also being upgraded as Belle II detector with cuttingedge technology. One of key elements for the success of Belle II will be its Silicon Vertex Detector (SVD) to precisely measure the decay points of B mesons. Our group is responsible for the construction of outer layers of Belle II SVD. This year we established the assembly procedure of Belle II SVD ladders. The R&D for the upgrade of the Belle II electromagnetic calorimeter was also carried out.

3. Study of Dark Energy with Subaru telescope: Hyper Suprime-Cam

As an observational cosmology project, we are involved in building a 1.2 Giga pixel CCD camera (Hyper Suprime-Cam) to be mounted on the prime focus of the Subaru telescope. With this wide-field camera, we plan to conduct extensive wide-filed 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. This year, the camera was mounted on the Subaru telescope at Hawaii and the commissioning was started.

4. Study of neutrino oscillation with accelerator neutrino beam: T2K experiment

T2K is a long baseline neutrino experiment using J-PARC accelerator complex and Super-Kamiokande, 295 km away. The main goal of T2K is the observation of muon neutrino to electron neutrino ($\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$) flavor transition and a measurement of the third neutrino mixing angle θ_{13} , which is related to the feasibility of *CP* asymmetry measurement in the lepton sector. Based on the data taken before the summer 2012, we reported an evidence for the electron neutrino appearance from a muon neutrino beam.

5. Next generation large water Cherenkov detector: Hyper-Kamiokande project

In order to pursue the study of properties of neutrino beyond T2K, we have been designing the next generation water Cherenkov detector, Hyper-Kamiokande (Hyper-K). One of the main goals of Hyper-K is the search for CP violation in leptonic sector using accelerator neutrino and anti-neutrino beams. The sensitivity to CP violating phase is studied with full simulation by our group. It is shown that with Hyper-K and J-PARC accelerator, CP violation can be observed after five years of experiment for a large part of possible parameter space.

As a candidate of photosensor for Hyper-K, we have been developing hybrid photodetector (HPD) combining a large-format phototube technology and avalanche diode as photo-electron multiplier. We are going to evaluate the performance of HPD as photosensor for a water Cherenkov detector using a 200-ton water tank at Kamioka. This year, we have calibrated ten 8-inch HPD's.

8 Asai Group

Research Subjects: (1) Particle Physics with the energy frontier accelerators (LHC) (2) Physics analysis in the ATLAS experiment at the LHC: (Higgs, SUSY and Extra-dimension) (3) Particles Physics without accelerator using high intensity of Photon (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 and Supersymmetry.
 - Higgs: Discovery of Higgs Boson
 - SUSY: We have excluded the light SUSY particles (gluino and squark) whose masses are lighter than 1.0 and 1.6TeV, respectively.
- (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:
 - Precise measurement Search HFS of the positronium.
 - Developing high power (>500W) stable sub THz RF source
 - Axion searches using Spring 8
 - $-~\gamma\gamma$ scatter Using FEL Xray.

9 Aoki Group

Subject: Theoretical condensed-matter physics

Members: Hideo Aoki, Takashi Oka (- May 2012), Naoto Tsuji (Oct 2012-)

Our main interests are many-body and topological effects in electron systems, i.e., **superconductivity**, **magnetism and topological phenomena**, for which we envisage a **materials design for correlated electron systems** and novel **non-equilibrium** phenomena should be realised. Studies in the 2012 academic year include:

• Superconductivity[1]

- High-Tc cuprates: material- and pressure-dependence [2]
- Multi-layer high-Tc cuprates [3]
- Organic and carbon-based superconductors [4,5]
- Superconductivity induced in non-equilibrium:

Dynamical repulsion-attraction conversion in intense ac fields [6]

• Topological systems

- Spin Hall effect in the iron-based superconductors [7]
- Graphene quantum Hall system and the chiral symmetry [8-10]
- Optica (THz) quantum Hall effect in the 2D electron gas and in graphene [11]
- Graphene quantum dot [12]
- Fractional quantum Hall effect in oxides [13]
- Zeolite-templated carbon [14]

• Non-equilibrium phenomena

- Dielectric breakdown of Mott insulators[15]
- Dynamical phase transitions in correlated electron systems
- Dicke transition in solids placed in an optical cavity
- Nonequilibrium quantum spin systems[16]

[1] Hideo Aoki, J. Superconductivity and Novel Magnetism 25, 1243 (2012).

[2] H. Sakakibara, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **85**, 064501 (2012) (Editor's Suggestion); H. Sakakibara *et al*, *Phys. Rev. B* **86**, 134520 (2012).

[3] K. Nishiguchi, K. Kazuhiko, R. Arita, T. Oka, and H. Aoki, arXiv:1212.6320.

[4] Takashi Kambe et al, Phys. Rev. B 86, 214507 (2012) (Editors' Suggestion).

- [5] Q. Xin et al, Phys. Rev. Lett. 108, 226401 (2012).
- [6] N. Tsuji, T. Oka, H. Aoki and P. Werner, *Phys. Rev. B* 85, 155124 (2012).

[7] S. Pandey, H. Kontani, D.S. Hirashima, R. Arita and H. Aoki, *Phys. Rev. B* 86, 060507(R) (2012).

[8] T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai, T. Morimoto and H. Aoki, Phys. Rev. B 85, 165410 (2012).

[9] T. Morimoto and H. Aoki, *Phys. Rev. B* 85, 165445 (2012).

[10] Y. Hatsugai, T. Morimoto, T. Kawarabayashi, Y. Hamamoto and H. Aoki, New J. Phys. 15, 035023 (2013).

[11] R. Shimano, G. Yumoto, J. Y. Yoo, R. Matsunaga, S. Tanabe, H. Hibino, T. Morimoto and H. Aoki, *Nature Commun.*, to be published.

[12] P.A. Maksym and H. Aoki, arXiv:1211.5552.

[13] D. Maryenko, J. Falson, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Onoda, H. Aoki and M. Kawasaki, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 186803 (2012).

[14] Takashi Koretsune, Ryotaro Arita and Hideo Aoki, Phys. Rev. B 86, 125207 (2012).

[15] Takashi Oka, *Phys. Rev. B* 86, 075148 (2012).

[16] Shintaro Takayoshi, Hideo Aoki and Takashi Oka, in quantum magnets, arXiv:1302.4460.

10 Miyashita Group

Research Subjects: Statistical Mechanics, Phase Transitions, Quantum Spin systems,

Quantum Dynamics, Non-equilibrium Phenomena

Member: Seiji Miyashita and Takashi Mori

Cooperative Phenomena and Phase Transition

Phase transitions and critical phenomena are important main subjects of the statistical mechanics. We have studied various types of ordering phenomena of systems with large fluctuation. In the last year, we studied the following topics of phase transitions.

Phase transitions of systems with bistable states which have different local lattice structures

The lattice distortion due to difference of local structures of the lattice causes an effective long range interaction among spin states, and realizes a phase transition of the mean-field universality class. The long range interaction prefers a uniform configuration and thus the systems keep homogeneous configuration

even near the critical temperature. However, when the systems change between the two states in the open boundary condition, the systems show inhomogeneous structures.

We have pointed out that the dynamics of these systems has peculiar properties. For example the domains which appear in switching processes are proportional to the system sizes, which we call macroscopic nucleation. These new properties of ordering processes in systems with bistable states which have different local lattice strictures was summarized in the review book. [3, 6, 14]

In the last year, we studied size dependence of shape and dynamics of the domain wall in detail. In the short-range model, the width of the domain wall is proportionally to the square of the system size. However, in the present model, the dependence of the width on the size changes with the relative time scale of the dynamics of the lattice degrees of freedom and the spin degrees of freedom. If the spin dynamics is faster than the lattice dynamics, the width of the domain wall is proportional to \sqrt{L} while it is proportional to L in the opposite case, where L the width of the system parallel to the domain wall.[20, 28, 34]

We also studied the effect of size difference of HS and LS in the antiferromagnetic interacting systems which have been studied for models of two-step phase transitions of the spin-crossover systems. We found that in the antiferromagnetic systems the order parameter is of the staggered structure, and thus the size difference does not affect essentially. We obtained detail phase diagram of the elastic model with the ferromagnetic and antiferromagnetic short-range interaction.[19, 39]

Phase transitions in long-range interacting systems

It has been known that the long-range interaction causes the phase transition to be the mean-filed type where the system has a uniform configuration. However, we have pointed out that in some conditions the uniform structure becomes unstable, and given the conditions in details. We showed that the same properties hold in microcanonical ensemble, [8] and also extended the studies to the quantum systems. [9] Moreover, we have shown that the long-range interacting systems can be realized in realistic systems as mentioned above, and we estimated the effective long-range interaction in those systems and peculiar properties, e.g. non-monotonic dependence of the internal energy on the temperature as shown in Fig. 3.2.3.[12]

Statistical mechanics on the coercive field

We join the project of the Elements Strategy Initiative Center for Magnetic Materials, we started studies to increase the coercive field. It has been known that the real magnets consist of assembly of small pieces of micro crystals, which has not yet been studied in statistical mechanics. We will combine the nucleation theory and also theory of domain wall pinning, and develop the theory framework on this problem. [41, 42]

Stochastic process

Generalization of many particle Brownian motion has been proposed by using a differential-difference operator so-called Dunkl operator. We have studied expression of a general form of the transformation by the intertwining operator. [26] We studied the asymptotic behavior in the strong interaction limit. [10] We have found that the particles are fixed on the freezing points which are given by the zero points of the Hermit polynomials in the case of the A-type systems and those of Lagel polynomials for the B-type. [30]

Moreover, we showed the relationship between the Dunkl system and the Calgero-Moser system by using the so-called diffusion scaling. We also studied how the distribution changes to the limiting form by numerical calculations as shown in Fig. 3.2.4.[27, 29]

Quantum Statistical Mechanics

Cooperative phenomena in quantum systems are also important subject in our group. In quantum systems, they show interesting non-classical behavior both in static and dynamical properties. In the last year, we studied an itinerant ferromagnetism in an extended Nagaoka system (Hubbard model) where the electron density is controlled by the chemical potential. We study the change of the total spin as a function of the chemical potential and also on the on-site repulsion interaction. This model shows various magnetic properties, e.g., the Mott singlet, Nagaoka ferromagnetism, and a kind of lattice-Kondo system. In Fig. 3.2.5 we depicted the chemical potential dependence of the total spin. The nature of spin correlation functions of the states was obtained. The model proposes new types of molecular magnets. [21, 23, 35, 35, 43]

Quantum dynamics

Quantum dynamics under time dependent field is also important subject in our group. In particular, in the last year, we studied properties of quantum systems in periodically driven systems. We study the survival probability and saturation energy of the stationary state of a system in driven quantum chaotic system.[2]

We also have studied hybridization of a system with discrete energy structure (spins or atoms) in the cavity and the cavity photon. We studied how the nature of the response changes as a function of the ratio

between the number of spins and the number of photons in the cavity by a direct numerical study. The system moves from the low photon region where we observe the vacuum-field Rabi splitting to the high photon region where the Rabi oscillation in the classical electromagnetic field takes place.[1, 22]

We also studied phase transitions in the cases with strong interaction between spins and photons. When the interaction becomes strong, the ground state of the system exhibits a phase transition and photon and polarization appear spontaneously which is called Dicke transition. Beside this transition, it is known that the system exhibits a nonequilibrium phase transition under driving force, which is called optical bistability. We studied cooperative phenomena in the region with strong driving force and strong coupling. In order to study such a region we need take into account the effects of interaction into the dissipation mechanism. We have developed a new master equation in the thermodynamic limit by making use of the property that the photon interacts with all the spin uniformly and the mean-field treatment becomes exact in the thermodynamic limit. We depict a phase diagram of the system in the coordinate of the strength of the driving force ξ and the strength of the interaction g (Fig. 3.2.6). Moreover we found that the rotating-wave approximation causes a significant difference in this region.[13, 15, 17] In the Dicke model, we found a new type of phase where driven photon shows the symmetry breaking phenomena in the region. We propose a mechanism of this symmetry breaking by making use of the concept of coherent destruction of tunneling. [31, 38] We also investigate the effect of the memory effect of the bath system on the formulation of the master equation. [13]

We have also studied the magnetization dynamics by making use of Landau-Zener mechanism.[43] In the systems where the magnetization is not a good quantum number, e.g. the system with Dzyaloshinsky-Moriya interaction, interesting quantum responses takes place. We studied properties of the ESR spectrum of antiferromagnetic Heisenberg model with the DM interaction.[4]

Fundamental properties of Statistical mechanism

As we have mentioned, there are many realistic systems which exhibit effective long-range interactions, e.g., the spin-crossover system and the cavity system. In general the fundamental conditions of the thermodynamics, e.g., extensivity and additivity may not be satisfied. We have studied properties of those systems, and we pointed out that the extensivity is effectively satisfied, but the additivity is violated. The violation causes various peculiar properties.[12, 47, 40]

How the canonical distribution is realized in pure dynamical systems is also an interesting problem. We have studied this problem in both classical and quantum system by using large-scale numerical studies. [5, 7]

11 Ogata Group

Research Subjects: Condensed Matter Theory

Member: Masao Ogata, Hiroyasu Matsuura

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, organic conductors, unconventional superconductivity, and Dirac electron systems in solids. The followings are the current topics in our group.

- High- T_c superconductivity High- T_c superconductivity as a doped Mott insulator studied in the Hubbard model.[1] Stripe states in the t-J model.[2]
- New superconductor: Iron-pnictide Effects of nonmagnetic impurities in iron-pnictide superconductors as a probe of order parameter.[4,12]
- Organic conductors [8] Modeling and magnetism in one-dimensional Fe-phthalocyanine compounds.[9] Zero-energy localized state induced by impurity in Dirac electron system of organic conductor.
- Dirac electron systems in solids [5] Spin-polarized currents in Dirac fermion systems.[6] Spin Hall effects in bismuth.[7]

Microscopic theory on defect-induced Kondo effects in graphen.[10] Electronic states in a new Dirac system: Ca₃PbO.[3]

- Theories on heavy fermion systems and Kondo effect Charge Kondo effect due to pair-hopping mechanism.[11] Theory of Ru oxides: heavy fermion behavior and spin Hall effect.[13]
- Magnetic materials and spin-orbit interaction Effective model for chiral magnet, CrNb₃S₆. Spin-orbit interaction in 4d³ and 5d³ electron systems.

[1] H. Yokoyama, M. Ogata, Y. Tanaka, K. Kobayashi, and H. Tsuchiura: J. Phys. Soc. Jpn. 82, 014707-1-16 (2013). "Crossover between BCS Superconductor and Doped Mott Insulator of d-wave Pairing State in Two-Dimensional Hubbard Model"

[2] M. Ogata: Physica C 481, 125-131 (2012). "Stripe states in t-t'-J model from a variational viewpoint"

[3] T. Kariyado and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. 81, 064701-1-11 (2012). "Low-Energy Effective Hamiltonian and the Surface States of Ca_3PbO "

[4] H. Yang, Z. Wang, D. Fang, T. Kariyado, G. Chen, M. Ogata, T. Das, A. V. Balatsky, and Hai-Hu Wen: Phys. Rev. B 86, 214512-1-8 (2012).

[5] H. Fukuyama, Y. Fuseya, M. Ogata, A. Kobayashi, and Y. Suzumura: Physica B 407, 1943-1947 (2012).

[6] Y. Fuseya, M. Ogata and H. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. 81, 013704-1-4 (2012).

[7] Y. Fuseya, M. Ogata and H. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. 81, 093704-1-4 (2012). "Spin-Hall Effect and Diamagnetism of Dirac Electrons"

[8] A. Ardavan, S. Brown, S. Kagoshima, K. Kanoda, K. Kuroki, H. Mori, M. Ogata, S. Uji, and J. Wosnitza: J. Phys. Soc. Jpn. 81, 011004-1-27 (2012). "Recent Topics of Organic Superconductors"

[9] H. Matsuura, M. Ogata, K. Miyake, and H. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. 81, 104705-1-8 (2012). "Theory of Mechanism of π -d interaction in Iron-Phthalocyanine"

[10] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 063709-1-4 (2012). "Theory of Defect-induced Kondo Effect in Graphene: Numerical Renormalization Group Study"

[11] H. Matsuura, and K. Miyake: J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 113705-1-4 (2012). "Theory of Charge Kondo Effect on Pair Hopping Mechanism

[12] M. Ogata and T. Kariyado: to appear in Journal of Physics: Conference Series. "Impurity bound-state as a probe of order-parameter symmetry in iron-pnictide superconductors: *T*-matrix approach"

[13] N. Arakawa and M. Ogata: Phys. Rev. B 86, 1251261-1-15 (2012).

12 Tsuneyuki Group

Research Subjects: Theoretical Condensed-matter physics

Member: Shinji Tsuneyuki and Yoshihiro Gohda

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 beyond the limitation of classical MD and DFT for study of electronic, structural and dynamical properties of materials.

The transcorrelated (TC) method is a wavefunction-based approach to correlated electrons in solids, which we are trying to establish for an alternative of the density functional theory for years. In FY2012, we optimized the Jastrow function, which represents electron correlation explicitly, to get much improved band gap for large-band-gap insulators.

We are also developing a modeling method to simulate thermal transport in materials and nano-structures from first principles. With the method, we realized quantitative simulation of thermal conductivity of crystalline silicon and its mode analysis. We also clarified importance of rattling motion of encapsulated ions in a clathrate compound.

In summary, our research subjects in FY2012 were as follows:

- New methods of first-principles calculation of material properties
 - First-principles wavefunction theory for solids based on the transcorrelated method
 - Generalized anharmonic lattice model of crystals for investigating thermal conductivity
 - Density functional theory for superconductors
 - A new efficient method to find potential energy minima in configuration space
 - An efficient algorithm for Brillouin-zone integral
- Applications of first-principles calculation
 - Interfaces in Nd₂Fe₁₄B sintered magnet
 - Material design of GaP solid solution for solar battery
 - Lattice thermal properties of thermoelectric materials

13 Fujimori Group

Research Subjects: Spectroscopy of Strongly Correlated Systems

Member: Atsushi Fujimori and Kozo Okazaki

We study the electronic structure of strongly correlated systems using high-energy spectroscopic techniques such as angle-resolved photoemission spectroscopy and soft x-ray magnetic circular dichroism using synchrotron radiation. We investigate mechanisms of high-temperature superconductivity [1], metalinsulator transitions, giant magnetoresistance, carrier-induced ferromagentism, spin/charge/orbital ordering in strongly correalted systems such as transition-metal oxides [2], magnetic semiconductors, and their interfaces and nano-structures [3].

[1] S. Ideta, T. Yoshida, I. Nishi, A. Fujimori, Y. Kotani, K. Ono, Y. Nakashima, S. Yamaichi, T. Sasagawa, M. Nakajima, K. Kihou, Y. Tomioka, C.H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Ito, S. Uchida, and R. Arita: Dependence of carrier doping on the impurity potential in transition-metal-substituted FeAs-based superconductors, Phys. Rev. Lett. **110**, 107007–1-5 (2013).

[2] S. Aizaki, T. Yoshida, K. Yoshimatsu, M. Takizawa, M. Minohara, S. Ideta, A. Fujimori, K. Gupta, P. Mahadevan, K. Horiba, H. Kumigashira, and M. Oshima: Self-energy on the low- to high-energy electronic structure of correlated metal SrVO₃, Phys. Rev. Lett. **109**, 056401–1-5 (2012).

[3] V.R. Singh, V.K. Verma, K. Ishigami, G. Shibata, T. Kadono, A. Fujimori, D. Asakura and T. Koide, Y. Miura, M. Shirai, G.-f. Li, T. Taira, and M. Yamamoto: Effects of off-stoichiometry on the spin polarization at the $Co_2Mn_\beta Ge_{0.38}/MgO$ interfaces: X-ray magnetic circular dichroism study, Phys. Rev. B **86**, 144412–1-6 (2012)..

14 Uchida Group

Research Subjects: High- T_c superconductivity

Member:Uchida Shin-ichi (professor), Kakeshita Teruhisa. (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 CuO₄ 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, μ 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 \Box gpseudogap \Box h in the normal state which has the same d-wave symmetry as the superconducting gap does. We employed c-axis optical spectrum of Yba₂Cu₃O_{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_2 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.

15 Hasegawa Group

Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics

Members: Shuji HASEGAWA and Toru HIRAHARA

Surfaces of materials are platforms of our research where rich physics is expected due to the lowdimensionality and symmetry breakdown. (1) Electronic/spin/mass transports, (2) atomic/electronic structures, (3) phase transitions, (4) electronic excitations, (5) spin states and magnetism, and (6) epitaxial growths of coherent atomic/molecular layers/wires on semiconductor surfaces, topological surfaces, and nano-scale phases such as surface superstructures and ultra-thin films. We use various kinds of ultrahigh vacuum experimental techniques such as electron diffraction, scanning electron microscopy, scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy, *in-situ* four-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-four-point probes, and surface mageto-optical Kerr effect measurements. Main results in this year are as follows.

(1) Surface electronic transport: Control of surface electronic states and their conductivity of topological insulators by using FIB patterning techniques. Spin Hall effect, effects due to anti-weak localization and electron-electron interaction at strong spin-orbit coupling material surfaces. Anisotropic transport on a quasi-one-dimensional metallic surface.

(2) Surface phases, ultra-thin films, and phase transitions: Silicene, semi-metal-to-semiconductor transition in Bi ultrathin films, 2D topological materials. Topological phase transition. Order-disorder phase transition, charge-density-wave transition, Mott transition on various metal-induced surface super-structures of Si. Quantum-well state in ultra-thin metal films. Rashba effect in surface state and hybridization with quantum-well states in thin films.

(3) Surface magnetism: Monolayer ferromagnetic surfaces. Diluted magnetic surface states. Kondo effect and RKKY interaction in surface states.

(4) Construction of new apparatuses: Low-temperature strong-magnetic-field scanning tunneling microscope and scanning tunneling potentiometery. Micro-four-point probes apparatus at mK under strong magnetic field.

T. Hirahara, N. Fukui, T. Shirasawa, M. Yamada, M. Aitani, H. Miyazaki, M. Matsunami, S. Kimura, T. Takahashi, S. Hasegawa, and K. Kobayashi, Atomic and Electronic Structure of Ultrathin Bi(111) Films Grown

on $Bi_2 Te_3(111)$ Substrates: Evidence for a Strain-Induced Topological Phase Transition, Phys. Rev. Lett. **109**, 227401 (Nov, 2012).

- [2] T. Uetake, T. Hirahara, Y. Ueda, N. Nagamura, R. Hobara, and S. Hasegawa, Anisotropic conductivity of the Si(111)4 × 1-In surface: Transport mechanism determined by the temperature dependence, Phys. Rev. B 86, 035325 (Jul, 2012).
- [3] Y. Fukaya, K. Kubo, T. Hirahara, S. Yamazaki, W. H. Choi, H. W. Yeom, A. Kawasuso, S. Hasegawa, and I. Matsuda, Atomic and Electronic Structures of Si(111)-√21 × √21 Superstructure, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology 10, 310 (Jul, 2012).
- [4] M. Yamada, T. Hirahara, S. Hasegawa, H. Mizuno, Y. Miyatake, and T. Nagamura, Surface Electrical Conductivity Measurement System with Micro-Four-Point Probes at Sub-Kelvin Temperature under High Magnetic Field in Ultrahigh Vacuum, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology 10, 400 (Jul, 2012).
- [5] P. De Padova, P. Vogt, A. Resta, J. Avila, I. Razado-Colambo, C. Quaresima, C. Ottaviani, B. Olivieri, T. Bruhn, T. Hirahara, T. Shirai, S. Hasagawa, M. C. Asensio, and G. Le Lay, *Evidence of Dirac Fermions in Multilayer Silicene*, Appl. Phys. Lett, in press (2013).
- [6] S. Hasegawa, T. Hirahara, Y. Kitaoka, S. Yoshimoto, T. Tono, and T. Ohta, Nanometer-Scale Four-Point Probe Resistance Measurements of Individual Nanowires by Four-Tip STM, pp. 153-165, in Atomic Scale Interconnection Machines, ed. Christian Joachim (Springer, 2012).
- S. Hasegawa: Reflection High-Energy Electron Diffraction, pp. 1925-1938, in Characterization of Materials, ed. Elton N. Kaufmann (Wiley, 2012).
- [8] S. Hasegawa: "The Image is My Life.", in Memory of Akira Tonomura: Physicist and Electron Microscopist (World Scientific, 2013), in press.

16 Fukuyama Group

Research Subjects: Low Temperature Physics (Experimental):

- Quantum fluids and solids with strong correlations and frustration,
- Scanning tunneling microscopy and spectroscopy of two dimensional electron systems in graphene.

Member: Hiroshi Fukuyama, Tomohiro Matsui

Our current interests are (i) quantum phases with strong correlations and frustration in two dimensional (2D) helium three (³He) and four (⁴He), (ii) novel phenomena related to graphene, monatomic sheet of carbon atoms. We are investigating these phenomena at ultra-low temperatures down to 50 μ K, using various experimental techniques such as NMR, calorimetry, tortional oscillator, scanning tunneling microscopy and spectroscopy (STM/S), and transport measurement, *etc*.

1. Ground-state of two dimensional ³He:

It is an interesting open question to ask whether the critical point, i.e., the gas-liquid transition, exists in strictly 2D ³He. The previous quantum many-body calculations predict interestingly that ³He does not have the critical point but ⁴He does in pure 2D case. We have measured low-temperature heat capacities (*C*) of the first three atomic layers of ³He adsorbed on a graphite surface to elucidate if the ground state of each layer is gas or liquid phase. The elucidation is based on the fact that the coefficient (γ) of *T*-linear term in $C_{(T)}$ in degenerated fermion system is determined by the surface area over which the fermions spread and the quasi-particle effective mass. We found that there is the critical point for every layer and ³He atoms form 2D paddles at low densities ($\rho < 1.5 \text{ nm}^{-2}$). It should be noted that even the first layer, where the confinement potential from the substrate is stronger, does have the critical point, too. Moreover, the density of the 2D paddle is comparable with that in second and third layers. Therefore, we can conclude that the ground state of 2D ³He is the liquid phase, and that the interaction between ³He atoms in 2D is attractive in average. Though graphite is an ideal substrate for adsorbing atoms, it contains some inhomogeneous regions unavoidably, which affects the physical properties of adsorbed systems. However, the amount of the inhomogeneous regions had not been well evaluated and the areal density had not been precise enough. In our experiments, we succeeded to evaluate the amount as ~ 5 % of the total surface area, in our substrate, through the analysis of the heat capacities of the first layer ³He on graphite by clearly demonstrate that the measured heat capacities can be decomposed into the one of the two dimensional ³He and of the amouphous ³He on graphite.

2. The 4/7 phase of second layer ⁴He on graphite:

We have prepared a new sample cell for high-precision heat capacity measurements of the possible order-disorder transition around T = 1 K using a ZYX exfoliated graphite substrate which has much larger micro-crystalline size than the previous one. With this set-up, the heat capacities and the vapor pressures are measured for the first and second layers of ⁴He.

For the first layer ⁴He, a peak structure is observed in the temperature dependence of the heat capacity at the areal density of $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ commensurate phase more clearly than that observed on the other substrate.

For the second layer ⁴He, the gradual change of the peak in the heat capacity is observed, which suggest the growth of two dimensional phase from fluid, commensurate solid and then incommensurate solid. In addition, a clear evidence of the 4/7 phase is observed in the density dependence of the vapor pressure as a sub-step at the density. It can also be confirmed that the 4/7 phase is occured before the promotion of the third layer from the density dependence of the isosteric heat. Our experimental results clearly show the existence of the 4/7 commensurate phase which had been denied in Path Integral Monte Carlo simulations.

The 4/7 phase is a 2D solid which is stabilized by the substrate potential with a quite low areal density. Therefore, it is a strongly quantum solid where nearest atoms are always exchanging each other. In such quantum crystals, a super-solid state can be expected which shows superfluidity keeping its crystalline structure. This year, we have started a measurement to find this novel super-solid state with a tortional oscillator.

3. Towards bandgap tuning in functionalized graphene:

Graphene, a single layer of graphite, has attracted considerable attention owing to its remarkable electronic and structual properties and its possible applications in many emerging fields such as graphenebased electronic devices. The charge carriers in graphene behave like massless Dirac fermions, and graphene shows ballistic charge transport, turning it into an ideal material for circuit fablication. However, graphene lackes a band gap around the Fermi level, which is essential for controlling the conductivity by electronic means. One of the routes to open a band gap is the adsorption of atoms. An energy gap is observed in Kekulé-type structure on graphene, and such structure is expected to be induced by adsorbing atoms on the hollow sites of graphene honeycomb lattice in a $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ commensurate strucure since the nearest-neighbor hopping amplitudes would acquire alternating values. Based on this idea, we are studying band gap formation by adsorbing Kr atoms on graphene by measuring the local density of states with STM/S and transport properties.

4. STM/S studies of 2D Kr solid on graphite:

Electronic properties of submonolayer Kr solid prepared on graphite surfaces are studied with our home-built STM system. Such a cryo-crystal is prepared by controlling the temperature (around 40 K) of graphite substrate and the partial pressure of Kr (around 10^{-5} Pa) in a ultra-high vacuum chamber, and then transferred into microscope which has already been cooled down below 2 K. The STM/S measurement is then performed at T = 40 mK.

The boundary of the 2D Kr solid on graphite substrate is observed in this mearuement. Detail analysis of the atomic structure, one can conclude for the first time that the Kr atom sits on the hollow site of graphite and occupy one of three honeycomb lattice to form $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^{\circ}$ structure. The shape of a Kr atom is observed differently in topograph images depending on the bias voltage between the

sample and the STM tip. Namely, it is rounded at high voltage above 2 eV, while it is elliptic at ± 1 eV. The direction of the ellipse is different between +1 eV and -1 eV. Such electronic properties are qualitatively consistent with a theoretical calculation which considers the hybridization of 2p state of carbon and 4p and 5s states of Kr atom. Only the direction of the ellipse at +1 eV is different from the calculation.

The differential tunnel conductance on the Kr solid suggests that there is a deep suppression of the local density of states (LDOS) of ± 150 meV around the fermi energy, which is consistent with the prediction of band gap opening by adsorbing atoms in a $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^{\circ}$ manner on graphene. The fact that the similar LODS is observed on graphite substrate ~ 2 nm away from the Kr solid suggests, such electronic property is oozed out into the substrate. However, because similar LDOS had also been observed on an incommensurate Kr solid, it may not be related to the modified LDOS of graphite surface but a characteristic property of 2D Kr solid regardless of the substrate.

17 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 and the application of scanning probe microscopy techniques.

In 2012, we have performed not only magnetotransport measurements on two-dimensional electron systems formed at the cleaved surfaces of p-InAs but also observations of the surface morphology of the adsorbate atoms, which induced the 2DES at the surfaces of narrow band-gap semiconductors, with use of a scanning tunneling microscopy. The electron density of the 2DESs is compared to the atomic density of the isolated Ag adatoms on InAs surfaces.

2. Superconductivity of ultrathin films on cleaved GaAs surfaces:

Two dimensional (2D) superconductivity was studied by magnetotransport measurements on singleatomic-layer Pb films on a cleaved GaAs(110) surface. The superconducting transition temperature shows only a weak dependence on the parallel magnetic field up to 14 T, which is higher than the Pauli paramagnetic limit. Furthermore, the perpendicular magnetic field dependence of the sheet resistance is almost independent of the presence of the parallel field component. These results are explained in terms of an inhomogeneous superconducting state predicted for 2D metals with a large Rashba spin splitting.

3. Strongly correlated two dimensional systems: Cyclotron resonance measurements were extended to the dilution refrigerator temperature range. We also measured high frequency (0.1-10 GHz) conductivity both for metallic and insulating phases of a Si/SiGe 2DES.

18 Shimano Group

Research Subjects: Optical and Terahertz Spectroscopy of Condensed Matter

Member: Ryo Shimano and Ryusuke Matsunaga

We study light-matter interactions and many body quantum correlations in solids. In order to investigate the role of electron and/or spin correlations in the excited states as well as the ground states, we focus on the low energy electromagnetic responses, in particular in the 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 in semiconductors: We have investigated the exciton Mott transition in Si and Ge by optical pump and terahertz probe experiments. The robustness of excitons previously observed in Si was also confirmed in Ge, as manifested by the non-vanishing 1s-2p transition of excitons above the Mott density. The inonization ratio of excitons, which is defiend as the ratio of unbound e-h pairs density to the total e-h pairs density, is determined by the Drude-Lorentz fitting of the complex diectlic function of photoexcited e-h system in the terahertz frequency range. The phase diagram of e-h system in Si was determined for the first time in terms of exciton ionization ratio in a wide range of temperature and density.
- 2. Development of 2-dimensional THz time-domain spectroscopy and its application to superconductors: By using an intense THz light source generated by optical rectification of femtosecond laser pulses in a LiNbO₃ crystal, we have developed a 2-dimensional THz time-domain spectroscopy scheme and applied it to a BCS superconductors, NbN, in order to study the non-equilibrium dynamics of BCS state. The ultrafast dynamics of BCS states in a quasi-adiabatic excitation regime are elucidated. To observe the Higgs-amplitude mode which is expected to appear in the nonadiabatic excitation condition, we systematically evaluated the parameters such as the BCS gap energy, the pump pulse width.
- 3. Observation of quantum Faraday effect in graphene: Graphene is a monolayer sheet of carbon atoms tightly bound in a form of honeycomb lattice. Electrons in graphene behave as if they are massless. They move on the two-dimensional sheet of graphene in a velocity about c/300 with c the speed of light and do not scatter in the backward direction. Because of these exotic properties, graphene is expected as a promising material for next-generation high speed electronic devices. Graphene also offers a unique arena to study the fundamental physics in condensed matter. A striking example is the half-integer quantum Hall effect(QHE), which arises from the existence of non-zero Berry phase associated with the Dirac cone. We have succeeded in observing the quantum magneto-optical Faraday and Kerr effects in the terahertz regime, namely the optical QHE. With increasing the magnetic field, the rotation angle exhibits plateau structures at the quantum Hall steps at which the rotarion angles are determined by the fine-structure constant. This observation would open a new functionality of graphene in optoelectronic applications such as ultra-accurate and achromatic terahertz polarization rotator.

References

- R. Matsunaga and R. Shimano: Nonequilibrium BCS state dynamics induced by intense terahertz pulses in a superconducting NbN film, Phys. Rev. Lett. 109, 187002 (2012).
- T. Suzuki and R. Shimano: Exciton Mott transition in Si revealed by terahertz spectroscopy, Phys. Rev. Lett. 109, 046402 (2012).
- [3] S. Bordacs, I. Kezsmarki, D. Szaller, L. Demko, N. Kida, H. Murakawa, Y. Onose, R. Shimano, T. Room, U. Nagel, S. Miyahara, N. Furukawa, and Y. Tokura: Y. Taguchi, T. Arima, and Y. Tokura: Chirality of matter shows up via spin excitations, Nature Physics 8, 734 (2012).
- [4] R. Shimano, G. Yumoto, J. Y. Yoo, R. Matsunaga, S. Tanabe, H. Hibino, T. Morimoto, and H. Aokiv: Quantum Faraday and Kerr rotations in graphene, to be published in Nature Communications, 2013.

19 Takagi Group & Taniguchi Group

Research Subjects: Physics of Correlated Electron Systems

Member: Hidenori Takagi, Kouji Taniguchi

We study the properties of correlated electron systems, such as superconductivity, magnetism, spin-orbitinteraction-induced Mott transition, thermoelectric power. The summary of our research in this year is as following.

- 1. Strong Coupling Superconductivity in an Antiperovskite Phosphide: We have found that a family of ternary platinum phosphides APt_3P (A= Ca, Sr, La), which crystallize in an antiperovskitebased structure, show superconductivity at low temperatures and the highest critical temperature $T_C = 8.4$ K was observed for SrPt₃P. The analysis of specific heat C(T) for SrPt₃P shows clear evidence for very strong coupling s-wave superconductivity with a large ratio between superconducting gap Δ_0 and T_C , $2\Delta_0/k_BT_c \sim 5$, and the presence of low-energy phonons. The presence of multiple Fermi surface pockets was inferred from the nonlinear magnetic field dependence of Hall resistivity, which we argue might play a role in realizing the strong coupling of charge carriers with the low-lying phonons.
- 2. Visualization of the emergence of the pseudogap state and the evolution to superconductivity in a lightly hole-doped Mott insulator: Superconductivity emerges from the cuprate antiferromagnetic Mott state with hole doping. At higher doping levels, the "pseudogap", a weakly conducting state with an anisotropic energy gap appears. However, a direct visualization of the emergence of these phenomena with increasing hole density has never been achieved. We have succeeded in obtaining atomic-scale image of electronic structure evolution from the weak insulator through the emergence of the pseudogap to the superconducting state in $Ca_{2-x}Na_xCuO_2Cl_2$. At slightly higher hole density, nanoscale regions exhibiting pseudogap spectra and 180° rotational (C_{2v}) symmetry form unidirectional clusters within the C_{4v} -symmetric matrix. Thus, hole doping proceeds by the appearance of nanoscale clusters of localized holes within which the broken-symmetry pseudogap state is stabilized.
- 3. Two-Dimensional Heisenberg Behavior of $J_{eff} = 1/2$ Isospins in the Paramagnetic State of the Spin-Orbital Mott Insulator Sr_2IrO_4 : We have investigated the dynamical correlations of $J_{eff} = 1/2$ isospins in the paramagnetic state of spin-orbital Mott insulator Sr_2IrO_4 by resonant magnetic x-ray diffuse scattering. We found a two-dimensional antiferromagnetic fluctuation with a large in-plane correlation length exceeding 100 lattice spacings at even 20 K above the magnetic ordering temperature. In marked contrast to the naive expectation of the strong magnetic anisotropy associated with an enhanced spin-orbit coupling, we discovered an isotropic isospin correlation that is well described by the two-dimensional S = 1/2 quantum Heisenberg model.
- 4. Weak antiferromagnetism of $J_{eff} = 1/2$ band in bilayer iridate $Sr_3Ir_2O_7$: We studied the antiferromagnetic structure of $Sr_3Ir_2O_7$, which is the bilayer analog of a spin-orbital Mott insulator Sr_2IrO_4 by resonant magnetic x-ray diffraction. Contrasting intensities of the magnetic diffraction at the Ir L_{III} and L_{II} edges show a $J_{eff} = 1/2$ character of the magnetic moment as is argued in Sr_2IrO_4 . The magnitude of moment, however, was found to be smaller than that of Sr_2IrO_4 by a factor of 5 to 6, implying that $Sr_3Ir_2O_7$ is no longer a Mott insulator but a weak antiferromagnet.
- 5. Electric-field-induced superconductivity in MoS_2 with double-layer FET: We have attempted electro-static carrier doping in a layered transition metal disulphide MoS_2 by constructing an electric double-layer transistor with an ionic liquid. With the application of gate voltage V_G higher than 3 V, a metallic behavior was observed in the MoS_2 channel. We found an onset of electric fieldinduced superconductivity in the field induced metallic phase. A maximum $T_C \sim 9.4$ K was observed, which could be higher than those in chemically doped bulk materials.

20 Theoretical Astrophysics Group

Research Subjects: Oservational Cosmology, Extrasolar Planets, First Star Formation

Member: Yasushi Suto, Naoki Yoshida, Takashi Hosokawa, & Atsushi Taruya

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. Among others we place emphasis on the "Observational Cosmology".

"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.

Astronomical observations utilizing large ground-based telescopes discovered distant galaxies and quasars that were in place when the Universe was less than one billion years old. We can probe directly, although not completely, the evolution of the cosmic structure all the way from the present-day to such an early epoch. Shortly after the cosmological recombination epoch when hydrogen atoms were formed, the cosmic background radiation shifted to infrared, and then the universe would have appeared completely dark to human eyes. A long time had to pass until the first stars were born, which illuminate the universe once again and terminate the cosmic Dark Ages. We study the formation of the first stars and blackholes in the universe. The first stars are thought to be the first sources of light, and also the first sources of heavy elements that enable the formation of ordinary stellar populations, planets, and ultimately, the emergence of life. We perform supercomputer simulations of structure formation in the early universe. Direct and indirect observational signatures are explored considering future radio and infrared telescopes.

Does a second earth exist somewhere in the universe? This naive question has been very popular only in science fictions, but is now regarded as a decent scientific goal in the modern astronomy. Since the first discovery of a gas giant planet around a Sun-like star in 1995, more than a few thousands candidates of exoplanets have been reported as of May 2013. While most of the confirmed planets turned out to be gas giants, the number of rocky planet candidates is steadily increasing. Therefore the answer to the above question is supposed to be affirmative. Our group is approaching that exciting new field of exoplanet researches through the spin-orbit misalignment statistics of the Rossiter-MacLaughlin effect, simulations of planet-planet scattering and tidal evolution of the angular momentum of the planetary system, photometric and spectroscopic mapping of a surface of a second earth and detection of possible biomarker of habitable planets.

Let us summarize this report by presenting recent titles of the doctor and master theses in our group;

2012

- Exploring the Landscape of Habitable Exoplanets via Their Disk-integrated Colors and Spectra: Indications for Future Direct Imaging Observations
- Toward a precise measurement of weak lensing signals through CMB experiments and galaxy imaging surveys: A theoretical development and its cosmological implications
- Measurements of Spin-Orbit Angles for Transiting Systems: Toward an Understanding of the Migration History of Exoplanets
- Modeling Redshift-Space Clustering of the SDSS Luminous Red Galaxies with Cosmological N-body Simulations: Implications for a Test of Gravity
- Probing the nature of dark matter by gravitational lensing observations
- The Formation and Evolution of Hot-Jupiter:Planet-Planet Scattering Followed by Tidal Dissipation
- Supernova Explosions in the Early Universe
- Validity of Hydrostatic Equilibrium in Mass Estimates of Simulated Galaxy Clusters

2011

• The Implication of the anomaly in the SFD Galactic extinction map on Far-infrared emission of galaxies

2010

• Precise measurement of number-count distribution function of SDSS galaxies

2009

- The Central Engine of Gamma-Ray Bursts and Core-Collapse Supernovae Probed with Neutrino and Gravitational Wave Emissions
- Numerical Studies on Galaxy Clustering for Upcoming Wide and Deep Surveys: Baryon Acoustic Oscillations and Primordial Non-Gaussianity
- Toward a precise measurement of neutrino mass through nonlinear galaxy power spectrum based on perturbation theory
- Toward Remote Sensing of Extrasolar Earth-like Planets
- Improved Modeling of the Rossiter-McLaughlin Effect for Transiting Exoplanetary Systems
- Forecasting constraints on cosmological parameters with CMB-galaxy lensing cross-correlations

2008

- Holographic non-local operators
- Neutrino Probes of Core-collapse Supernova Interiors
- Inhomogeneity in Intracluster Medium and Its Cosmological Implications
- Nuclear "pasta" structure in supernovae
- Investigation of the Sources of Ultra-high-energy Cosmic Rays with Numerical Simulations
- Formation of Pulsar Planet Systems -Comparison with the Standard Scenario of Planetary Formation-

21 Murao Group

Research Subjects: Quantum Information Theory

Faculty Members: Mio Murao, Peter S. Turner

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 last two decades.

In this year, our group consisted of two faculty members, Mio Murao (Associate Professor), Peter S. Turner (Assistant Professor), two postdoctoral fellows, Michal Hajdušek (JSPS foreign postdoctoral fellow), Fabian Furrer (JSPS foreign postdoctoral fellow) and 8 graduate students, Yoshifumi Nakakata (D3), Takanori Sugiyama (D3), Shojun Nakayama (D2), Eyuri Wakakuwa (D1), Seiseki Akibue (M2), Kotaro Kato (M1), Kosuke Nakago (M1) and Jisho Miyazaki (M1). We investigate several aspects of theoretical quantum information. Our projects worked in the academic year of 2012 were the following:

Measurement-based quantum computation

• Measurement-based quantum computation on symmetry breaking thermal states [1], Nakata and Murao in collaboration with K. Fujii (Osaka University) and M. Ohzeki (Kyoto University)

- Quantification of entanglement of pure graph states using graph theory [2], Hajdušek and Murao
- Analysis of parallelism and causality in measurement-based quantum computation, Miyazaki, Hajdušek and Murao

Network coding for quantum computation

- Analysis of implementing two-qubit unitary operations in ladder networks, Akibue and Murao
- Multicast quantum network coding, Murao in collaboration with M. Owari and G. Kato (NTT)
- Block coding for distributed implementations of bipartite unitary operations, Wakakuwa, Furrer and Murao

Quantum algorithms

- Algorithm for implementing diagonal-unitary 2-designs [3,4], Nakata and Murao
- Universal algorithm for energy eigenbasis measurement, Nakayama and Murao in collaboration with A. Soeda (National University of Singapore
- Thermalization algorithm based on higher order detailed balance, Nakayama and Murao

Quantum measurement (tomography)

- Adaptive experimental design for one-qubit state estimation with finite data [5], Sugiyama, Turner and Murao
- Quantitative evaluation of estimation errors with finite data in terms of expected loss [6], Sugiyama, Turner and Murao
- Quantitative evaluation of estimation errors with finite data in terms of error probabilities, Sugiyama, Turner and Murao

Properties of different quantum computational models

- Analysis of parallelism and causality in adiabatic quantum computation, Nakago, Nakayama, Hajdušek and Murao
- Quantum information processing with non-Abelian anyons, Kato, Furrer and Murao

Quantum cryptography

- Continuous variable uncertainty relation in the presence of a quantum memory, Furrer in collaboration with M. Berta, V. Scholz M. Christandl (ETH Zurich) and M. Tomamichel (National University of Singapore)
- Resource theory for two-party cryptographic protocols, Furrer in collaboration with S. Wehner (National University of Singapore) and I. Kerenidis (University Paris Diderot)

Implementations of quantum information processing in quantum optics

- Experimental demonstration of quantum data compression, Turner in collaboration with L.A. Rozema, D. Mahler, A. Hayat and A.M. Steinberg (University of Toronto)
- Implementation of photonic quantum *t*-designs, Turner in collaboration with J.C.F. Matthews (University of Bristol)

Quantum control

• Control of entanglement generation for two spins with anisotropic Heisenberg interactions, Nakata, Turner and Murao in collaboration with K. Nemoto (NII)

Foundation of quantum mechanics

- Analysis of information causality using a generalized mutual information [7], Wakakuwa and Murao
- Exchange fluctuation theorem for correlated quantum systems [8], akayama and Murao in collaboration with Y. Hirono (University of Tokyo), D. Jennings and T. Rudolph (Imperial College, London)
- Analysis of phases and interference in general probabilistic theories, Nakata and Murao in collaboration with A. Garner, Oscar Dahlsten and V. Vedral (University of Oxford)

Please refer our webpage: http://www.eve.phys.s.u-tokyo.ac.jp/indexe.htm

References

- K. Fujii, Y. Nakata, M. Ohzeki and M. Murao, Measurement-Based Quantum Computation on Symmetry Breaking Thermal States, Phys. Rev. Lett. 110, 120502 (2013).
- M. Hajdusek and M. Murao, Direct evaluation of pure graph state entanglement, New J. Phys. 15, 013039 (2013)
- 3. Y. Nakata, P. S. Turner and M. Murao, *Phase-random states: ensembles of states with fixed amplitudes and uniformly distributed phases in a fixed basis*, Phys. Rev. A **86**, 012301 (2012)
- 4. Y. Nakata and M. Murao, Diagonal-unitary 2-designs and their implementations by quantum circuits, arXiv:1206.4451
- 5. T. Sugiyama, P. S. Turner, M. Murao, Adaptive experimental design for one-qubit state estimation with finite data based on a statistical update criterion, Phys. Rev. A (2012)
- 6. T. Sugiyama, P. S. Turner, and M. Murao, Effect of non-negativity on estimation errors in one-qubit state tomography with finite data, New J. Phys. 14, 085005 (2012)
- E. Wakakuwa and M. Murao, The chain rule implies Tsirelson's bound: an approach from generalized mutual information, New J. of Phys. 14, 113037 (2012)
- D. Jennings, T. Rudolph, Y. Hirono, S. Nakayama and M. Murao, Exchange Fluctuation Theorem for correlated quantum systems, arXiv1204.3571 (2012)

22 Ueda Group

Research Subjects: Bose-Einstein condensation, Fermionic superfluidity, cold molecules, measurement theory, quantum information, quantum control

Member: Masahito Ueda and Shunsuke Furukawa

Quantum Many-body Phenomena in Ultracold Atoms

Criteria of off-diagonal long-range order in Bose and Fermi systems based on the Lee-Yang cluster expansion method: The superfluid state of cold fermionic gases displays a crossover from a Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) state to a Bose-Einstein condensate (BEC) of molecules, as the interaction is tuned by a Feshbach resonance. Since this system is strongly correlated especially in the crossover regime, no mean field theory has been known to describe the superfluid transition of this system in the entire range of the interaction strength. In this work, we formulated a new approach to this problem on the basis of the Lee-Yang cluster expansion method. We extended this method so that it can identify the criteria of the off-diagonal long-range order of the density matrices in both Bose and Fermi systems. This formulation is applicable to both a uniform system and a trapped system without relying on a local-density approximation and provides systematic expansions of one-particle and multiparticle density matrices in terms of cluster functions. This work was published in Phys. Rev. A [N. Sakumichi, N. Kawakami, and M. Ueda, Phys. Rev.A 85, 043601 (2012)].

Finite-temperature phase diagram of a spin-1 Bose gas: Depending on the relative strengths of the spin-dependent interaction, linear and quadratic Zeeman shifts, a BEC with spin degrees of freedom (spinor BEC) can exist in various phases. These phases have different magnetizations and symmetries in spin space. By developing a Hartree-Fock mean-field formalism for a spinor system, we investigated both numerically and analytically how the phase boundaries and the system's magnetizations are modified by finite temperatures. Due to the coherent collisions between condensed and noncondensed atoms, the noncondensate also acquires a finite magnetization provided the condensate is magnetized. We found that off-diagonal coherence within the noncondensate can shift the phase boundaries greatly, and thus, it cannot be neglected as in some previous studies. This work was published in Phys. Rev. A [Y. Kawaguchi, N. T. Phuc, and P. B. Blackie, Phys. Rev. A **85**, 053611 (2012)].

Topological classification of vortex core structures in spinor Bose-Einstein condensates: We proposed a method for topologically classifying vortex-core structures in spinor BECs. Vortices (line defects) are classified by topological charges within a conventional use of the homotopy theory. However, vortices having the same topological charge can in general have different core structures. We extended the conventional homotopy theory so that it can classify core structures. We introduced the "extended order parameter manifold (OPM)", which can treat the spatial variation of order parameters in vortex core states. By applying our method to spin-1 BECs and calculating its extended OPM, we systematically found exotic vortex-core structures in which phases with different magnetizations appear in a concentric fashion. We identified a localized topological charge defined in each phase forming an annulus region. This work was published in Phys. Rev. A [S. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda, Phys. Rev. A **86**, 023612 (2012)].

Quantum Hall states in rapidly rotating two-component Bose gases: Ultracold atomic gases under rapid rotation offer interesting analogues of quantum Hall systems with a variety of statistics and internal states of constituent particles. We studied strongly correlated phases of two-component (or pseudospin-1/2) Bose gases under rapid rotation by means of exact diagonalization. As the ratio of the intercomponent contact interaction $g_{\uparrow\downarrow}$ to the intra-component one g increases, the two components are expected to be entangled to form novel ground states. For $g_{\uparrow\downarrow} = g$, we find the formation of gapped spin-singlet states at the filling factors $\nu = k/3 + k/3$ (the k/3 filling for each component) with integer k. In particular, we presented numerical evidences that the gapped state with k = 2 is well described as a non-Abelian spinsinglet (NASS) state, in which excitations feature non-Abelian statistics. Furthermore, we find the phase transition from the product of composite fermion states to the NASS state by changing the interaction ratio $g_{\uparrow\downarrow}/g$. This work was published in Phys. Rev. A [S. Furukawa and M. Ueda, Phys. Rev. A **86**, 031604 (2012)].

Symmetry classification of spin-orbit-coupled spinor Bose-Einstein condensates: We developed a symmetry classification scheme to classify ground states of strongly spin-orbit-coupled spinor BECs, including pseudo-spin-1/2, spin-1, and spin-2 cases. Associated with breaking of simultaneous SO(2) spinspace rotation symmetry in favor of discrete symmetries, various types of lattice structures emerge in the absence of lattice potentials. Examples include two different kagome lattices for pseudo-spin-1/2 condensates and a nematic vortex lattice in which uniaxial and biaxial spin textures align alternately for spin-2 condensates. For the pseudo-spin-1/2 system, although mean-field states always break time-reversal symmetry, there exists a time-reversal-invariant many-body ground state, which is fragmented and expected to be observed in a microcondensate. This result was published in Phys. Rev. A [Z. F. Xu, Y. Kawaguchi, L. You, and M. Ueda, Phys. Rev. A **86**, 033628(1)-033628(8) (2012)].

Crossover trimers connecting continuous and discrete scaling regimes: In a three-body system composed of two component fermions, two types of trimers were known to exist. When the mass ratio between the two components is large, the Efimov states appear, which show a discrete scaling symmetry. For a smaller mass ratio, on the other hand, the Kartavtsev-Malykh trimers emerge, which feature a continuous scaling symmetry. We investigated how these two trimers evolve into each other and how the scaling symmetry of the trimers changes. We found a new type of trimers, the crossover trimers. This trimer neither possesses continuous nor discrete symmetries, and smoothly connect the Kartavtsev-Malykh trimers and the Efimov trimers. We varied the mass ratio and scattering length and mapped out in which region of parameter space each of the trimers can exist. This work was published in Phys. Rev. A [S. Endo, P. Naidon, and M. Ueda, Phys. Rev. A **86**, 062703 (2012)].

Hydrodynamic description of spin-1 Bose-Einstein condensates: Recently, non-destructive imaging of spin textures in spin-1 BECs has been established, which has prompted theoretical researches of the hydrodynamic description of spinor BECs. We derived a complete set of hydrodynamic equations for spin1 BECs that is valid regardless of the spatiotemporal dependence of the spin polarization. The obtained equations, which are expressed in terms of the density, the spin density, the nematic tensor, and the mass current, involve the continuity equations for the density, the spin density, and the nematic tensor, and the "generalized" Mermin-Ho relation for the vorticity. We also show that our hydrodynamic equations are equivalent to the multi-component Gross-Pitaevskii equations and reproduce the low-lying collective modes for phonons and magnons. This work was published in Phys. Rev. A [E. Yukawa and M. Ueda, Phys. Rev. A **86**, 063614 (2012)].

Beliaev theory of spinor Bose-Einstein condensates: For a scalar (spinless) BEC, both the mean-field results and the associated leading-order quantum corrections of the ground-state energy, the pressure, and the phonons' velocity can be derived analytically. Recent experiments and quantum Monte-Carlo simulations have shown that those leading-order corrections can accurately describe the deviations from the mean-field results for the maximum value of interaction realized in the field of ultracold atoms. We developed the spinor Beliaev theory which can give the leading-order quantum corrections of observables in a spinor Bose gas. In a spinor BEC, there exist spin waves (magnons) with quadratic dispersion relations in addition to density wave (phonons) with linear dispersion relations. We find that the effective mass of magnons increases due to density fluctuations, i.e., the motion of magnons is hindered by interaction with other particles. The enhancement factor of magnons' effective mass is the same for two different phases investigated. The effective mass of magnons, and, in turn, the quantum fluctuation effects can be experimentally probed by using a spinor wave packet. This work was published in Ann. Phys. [N. T. Phuc, Y. Kawaguchi and M. Ueda, Ann. Phys. **328**, 158 (2013)].

Quantum Information, Quantum Measurement, and Foundation of Statistical Mechanics

Bethe ansatz analysis of the thermalization mechanism of an isolated quantum system: Two thermalization mechanisms, the eigenstate thermalization hypothesis (ETH) and the typicality, have been recently proposed. However, the relative importance of these mechanisms has not yet been clarified. This is because a huge computational cost is required to perform a finite-size scaling analysis of the ETH by numerical diagonalization of interacting Hamiltonians. In this work, we used a Bethe ansatz solution of a one-dimensional Bose gas, and performed a systematic finite-size scaling analysis of the ETH. The use of an exact solution significantly reduced the computational cost. We found that the typicality gives a greater effect in the thermalization than the ETH. This work was published in Phys. Rev. E [T. N. Ikeda, Y. Watanabe, and M. Ueda, Phys. Rev. E 87, 012125 (2013)].

23 Makishima Group & Nakazawa Group

Research Subjects: High Energy Astrophysics with Energetic Photons using Scientific Satellites, Development of Cosmic X-Ray/ γ -Ray Instruments

Member: Kazuo Makishima, Kazuhiro Nakazawa

Using space-borne instruments such as Suzaku and MAXI, we study cosmic high-energy phenomena in the X-ray and γ -ray frequencies. We have been deeply involved in the development of the Hard X-ray Detector (HXD) onboard Suzaku, and are developing new instruments for its follow-up mission, ASTRO-H.

Mass Accreting Black Holes: Mass accretion onto black holes provides a very efficient way of X-ray production. Utilizing wide-band *Suzaku* spectra, we are diagnosing hot "coronae" that form around stellar-mass black holes. In active galactic nuclei (massive black holes), our new variability-assisted spectroscopy technique is revealing various emission components in a model independent manner [1]. This is expected to settle several long-lasting issues as to AGNs, including the mechanism of their "central engines".

Neutron Stars with Various Magnetic Fields: We conduct Suzaku studies of neutron stars (NSa) with various magnetic field strengths, B, believing that their magnetism is a manifestation of nuclear ferromagnetism. The targets include X-ray burst sources with $B < 10^9$ G [2], canonical magnetized NSs with $B \sim 10^{12}$ G exhibiting electron cyclotron resonances, long-period pulsars possibly with $B \sim 10^{13}$ G, and "magnetars" supposed to have $B = 10^{14-15}$ G [3]. From one magnetar, a hint of free precession was detected, and was interpreted as evidence for NS deformation under very high toroidal magnetic fields.

Supernova Remnants and Galactic Diffuse X-ray Emission: An apparently extended X-ray emission has long been known to distribute along our Galactic plane. Using *Suzaku*, we showed that this can be explained as an assembly of numerous X-ray emitting white dwarfs [4]. However, a brighter diffuse X-ray emission around the Galactic Center region, may be contributed significantly by some truly diffuse hot plasmas. *Suzaku* data also allow us to detect thermal and non-thermal emission components from supernova remnants. One such object, CTB109, was studied in depth, and its peculiar half-moon shape was found to arise via its interaction with a giant molecular cloud.

Plasma Physic in Clusters of Galaxies: The most dominant known component of cosmic baryons exists in the form of X-ray emitting hot ($\sim 10^8$ K) plasmas associated with clusters of galaxies. We have obtained novel evidence that the member galaxies in each cluster have been falling, over the Hubble time, to its potential center [5]. This is presumably due to magneto-hydrodynamic interactions between the galaxies and the plasma, that takes place as as the former keep moving through the latter. The interaction may explain various puzzles with clusters, including why these plasmas are surviving their radiative cooling.

Future Instrumentation: In collaboration with many domestic and foreign groups, we are developing a successor to *Suzaku*, *ASTRO-H*. Scheduled for launch in 2015, it will conduct hard X-ray imaging observations, high-resolution X-ray spectroscopy, and low-energy gamma-ray observations. We contribute to the development of two onboard instruments, the Hard X-ray Imager and the Soft Gamma-ray Detectors. Our effort includes mechanical/thermal designs of the instruments, development of large BGO scintillators and their read-out electronics, double-strip silicon detectors, and onboard/ground software systems.

- Noda, H., Makishima, K., Nakazawa, K., Uchiyama, H., Yamada, S. & Sakurai, S.: "The Nature of Stable Soft X-Ray Emissions in Several Types of Active Galactic Nuclei Observed by Suzaku", *Publ. Astron. Soc. Japan* 65, Article No.4 (2013)
- Sakurai, S., Yamada, S., Torii, S., Noda, H., Nakazawa, K., Makishima, K., Takahashi, H.: "Accretion Geometry of the Low-Mass X-ray Binary Aquila X-1 in the Soft and Hard States", *Publ. Astron.* Soc. Japan 64, Article No.72 (2012)
- Enoto, T., Nakagawa, Y. E., Sakamoto, T. & Makishima, K.: "Spectral comparison of weak short bursts to the persistent X-rays from the magnetar 1E 1547.0-5408 in its 2009 outburst", Mon. Not. Roy. Astr. Soc. 427, 2824 (2012)
- Yuasa, T., Makishima, K. & Nakazawa, K.: "Broadband Spectral Analysis of the Galactic Ridge X-Ray Emission", Astrophys. J. 753, article id. 129 (2012)
- 5. Gu, L., Gandhi, P., Inada, N., Kawaharada, M/. Kodama, T., Konami, S., Nakazawa, K., Shimasaku, K., Xu, H. & Makishima, K.: "Probing of the Interactions Between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters from z = 0.1 to 0.9", Astrophys. J. 767, article id. 157 (2013)

24 Takase Group

Research Subjects: High Temperature Plasma Physics Experiments, Spherical Tokamak, Wave Heating and Current Drive, Nonlinear Physics, Collective Phenomena, Fluctuations and Transport, Advanced Plasma Diagnostics Development

Member: 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 a 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 a burning plasma. 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 by our group using the TST-2 spherical tokamak. Our group is tackling the problem of creating and sustaining ST plasmas using radio frequency (RF) waves.

Noninductive plasma current (I_p) initiation and ramp-up experiments are being conducted on TST-2 with up to 100 kW of RF power in the lower hybrid (LH) frequency range (200 MHz) using a newly developed dielectric-loaded waveguide array antenna. Measurements of RF wave polarization and wavevector were performed using an array of RF magnetic probes. The detected wave was identified as the LH wave with a parallel wavenumber of $|k_{\parallel}| \sim 10 \text{ m}^{-1}$, which is substantially smaller than $|k_{\parallel}| \sim 50 \text{ m}^{-1}$ excited by the antenna, which should be absorbed efficiently by the electrons. Plasma initiation by waves at 8.2 GHz was studied since the magnetic field of 0.3 T is required for the LH wave to propagate to the plasma core. The central electron density of $8.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ was a factor of four higher than the plasma initiated by waves at 2.45 GHz.

An advanced diagnostic technique to measure the plasma current density using the double-pass Thomson scattering is being developed on TST-2. The laser light makes a round trip through the plasma. Only the signal from the second pass is affected by the plasma current and is used to derive the current density, while the signal from the first pass is used to evaluate the accuracy of the density and temperature measurements. The sign and the average value of the measured plasma current density were consistent with a theoretical estimate. Since it is difficult to measure the density and temperature by Thomson scattering in low-density plasmas, a multi-pass system is being developed to increase the scattered signal. The laser light makes multiple passes through the plasma by switching the beam path quickly using a pockels cell and a polarizer.

An electrostatic RF probe capable of measuring the 200 MHz LH wave in TST-2 is being developed. At such high frequencies, the cable capacitance shorts out the RF wave signal. A high resistance (100 k Ω or greater) is inserted just after the probe electrode to prevent shorting of the probe current. The eventual goal is to measure the wavevector of the LH wave using an array of electrostatic RF probes.

A local plasma current diagnostic using a small Rogowski probe is being developed. The probe consists of two Rogowski coils, two magnetic pick-up coils and five Langmuir probes. Small 300-turn Rogowski coils with outer and inner radii of 9.5 mm and 5 mm were made successfully. The Rogowski coils had sensitivities to toroidal and poloidal magnetic fields. Magnetic pick-up coils were placed between the two Rogowski coils to subtract these components. The local plasma current density of 750 kA/m^2 measured successfully by this probe agreed with the value calculated by magnetic equilibrium analysis.

Numerical simulation of LH current drive experiments on TST-2 were performed using the TORLH fullwave code and CQL3D Fokker-Planck code in collaboration with MIT. The calculation of the X-ray energy spectrum measured along the sightlines used in the TST-2 experiment is under preparation. Simulation using the GENRAY ray-tracing code showed that it is difficult to obtain a smooth distribution function. This is likely the result of weak absorption of the LH wave under the experimental condition on TST-2.

Analysis of non-inductive plasma start-up scenarios on the JT-60SA tokamak, currently under construction at Japan Atomic Energy Agency, were performed using the TOPICS transport code in collaboration with JAEA. The aim is to find a scenario which minimizes the consumption of magnetic flux provided by the central solenoid. A scenario which reaches the fully non-inductively driven state at an early stage of the discharge, followed by ramp-up to 2.1 MA maintaining such condition was identified.

25 Tsubono Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Gravitational Wave, Laser Interferometer

Member: Kimio TSUBONO and Yoich ASO

The detection of gravitational waves is expected to open a new window onto 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.

In 2010, a new science project, KAGRA (former LCGT)was approved and funded by the Leading-edge Research Infrastructure Program of the Japanese government. The detector is now under construction in KAMIOKA. This underground telescope is expected to catch gravitational waves from the coalescence of neutron-star binaries at the distance of 200Mpc.

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 summarize the subjects being studied in our group.

- Construction of the KAGRA gravitational wave detector
 - Optical design of the interferometer
 - Alignment control
 - Parametric instability
 - Study of cryogenic contacts
 - Study of the homogeneity of PD surface
- Space laser interferometer, DECIGO
 - Development of DECIGO pathfinder, DPF
 - SWIM_{$\mu\nu$}
 - Study of the effect of the residual gas
- Development of TOBA (Torsion Bar Antenna)
 - A new type sensor for TOBA
 - Design of next generation TOBA
- Development of the ultra stable laser source
 - Optical system
 - Vibration isolation of cavity
 - Cryogenics for cavity
- High sensitive laser interferometer using non-classical light
- Gravitational force at small distances
- Study of space isotropy

Reference

- [1] Y. Aso, K. Somiya and O. Miyakawa, Class. Quantum Gravity 29, 124008 (2012).
- [2] A. Shoda, M. Ando, K. Okada, K. Ishidoshiro, W. Kokuyama, Y. Aso, K. Tsubono: Search for a stochastic gravitational-wave background with torsion-bar antennas, J. Phys. Conf. Ser. 363 (2012) 012017.

26 Sano Group

Research Subjects: Physics of out-of-equilibrium systems and living matter

Members: Masaki Sano and Kazumasa A. Takeuchi

Our main goal is to discover and elucidate prototypical phenomena in systems far from equilibrium. To this end we develop our studies along the following three axes, integrating both experimental and theoretical approaches: (i) macroscopic systems, in which non-equilibrium fluctuations overwhelm the thermal effects, (ii) microscopic systems, in which non-equilibrium and thermal fluctuations have comparable effects, (iii) biological systems, as important instances where non-equilibrium dynamics takes the essential role. More specifically, our current research topics include:

1. Macroscopic systems out of equilibrium

- (1) Universal fluctuations of growing interfaces probed in turbulent liquid crystal [1, 2]
- (2) Topological-defect turbulence of liquid crystal
- (3) Reversible-irreversible transition in low-Reynolds fluid with non-Brownian particles and its rheology
- (4) Local structure formed in dense suspensions under vertical vibration [4]
- (5) Spontaneous segregation of granular particles in a double rotating drum
- (6) Anomalous efficiency and statistical properties of thermal transport coupled to boiling

2. Microscopic systems out of equilibrium

- (1) Motion of chains of self-propelled asymmetric particles
- (2) Collective motion of self-propelled particles [3, 6]
- (3) Lehmann effect of cholesteric liquid crystal as thermo-mechanical coupling by temperature gradient
- (4) Realization of an informatic heat engine in a microscopic system
- (5) Hidden entropy production due to coarse-graining
- (6) Stochastic energetics in out-of-equilibrium systems
- (7) Relation of information and thermodynamics in subsystems

3. Biological systems

(1) Force field of cells in motion and on division [5]

References

- K. A. Takeuchi: Statistics of circular interface fluctuations in an off-lattice Eden model, J. Stat. Mech., 2012, P05007 (2012).
- K. A. Takeuchi and M. Sano: Evidence for Geometry-Dependent Universal Fluctuations of the Kardar-Parisi-Zhang Interfaces in Liquid-Crystal Turbulence, J. Stat. Phys., 147, 853-890 (2012).
- 3. N. Yoshinaga, K. H. Nagai, Y. Sumino, H. Kitahata: Drift instability in the motion of a fluid droplet with a chemically reactive surface driven by Marangoni flow, Phys. Rev. E, **86**, 016108 (2012).
- H. Ebata and M. Sano: Heaps in the fluid film induced by slip/non-slip switching boundary condition, EPL, 100, 14001 (2012).
- H. Tanimoto, and M. Sano: Dynamics of Traction Stress Field during Cell Division, Phys. Rev. Lett., 109, 248110 (2012).
- K. H. Nagai, F. Takabatake, Y. Sumino, H. Kitahata, M. Ichikawa, N. Yoshinaga: Rotational motion of a droplet induced by interfacial tension, Phys. Rev. E, 87, 013009 (2013).
- 7. K. A. Takeuchi and H. Chaté: Collective Lyapunov modes, J. Phys. A: Math. Theor. (in press).

27 Yamamoto Group

Research Subjects: Submillimeter-wave and Terahertz Astronomy, Star and Planet Formation, Chemical Evolution of Interstellar Molecular Clouds, Development of Terahertz Detectors

Member: Satoshi Yamamoto, Nami Sakai, and Yoshimasa Watanabe

27. YAMAMOTO GROUP

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 each star has been formed. We are studying star formation processes from such a astrochemical viewpoint.

Since the temperature of a molecular cloud is as low as 10 K, an only way to explore its physical structure and chemical composition is to observe the radio wave emitted from atoms, molecules, and dust particles. In particular, there exist a number of atomic and molecular lines in the millimeter to terahertz region, and we are observing them with various large radio telescopes including ALMA.

We are conducting a line survey of low-mass star forming regions with Nobeyama 45 m telescope and ASTE 10 m telescope, aiming at detailed understanding of chemical evolution from protostellar disks to protoplanetary disks. In the course of this effort, we have recently established a new chemistry occurring in the vicinity of a newly born star, which is called Warm Carbon Chain Chemistry (WCCC). In WCCC, carbon-chain molecules are produced by gas phase reactions of CH_4 which is evaporated from ice mantles. This has recently been confirmed by our detection of CH_3D in one of the WCCC sources, L1527. Existence of WCCC clearly indicates a chemical diversity of low-mass star forming regions, which would probably reflect a variety of star formation. We are now studying how such chemical diversity is brought into the protoplanetary disks by using ALMA. The ALMA Cycle 0 result for L1527 shows that carbon-chain molecules do exist even in the closest vicinity of the protostar (~100 AU). Further analyses are now in progress.

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 phonon cooled HEB mixer using NbTiN and NbN in our laboratory. Our NbTiN mixer shows the noise temperature of 470 K at 1.5 THz, which corresponds 7 times the quantum noise. This is the best performance at 1.5 THz in spite of the use of the wave-guide mount. Furthermore, we successfully realized the waveguide-type NbN HEB mixer by using the NbN/AlN film deposited on the quartz wafer. The 0.8/1.5 THz dual-band HEB mixer receiver was assembled, and was installed on the ASTE 10 m telescope for astronomical observations. The first commissioning run was performed in September to October, 2011. We successfully observed Moon and Jupiter in the 0.9 THz continuum emission, and the Orion A molecular cloud in the 13 CO J = 8 - 7 line emission. We are expecting the scientific run from 2013.

[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).

[2] Shiino, T., Shiba, S., Sakai, N., Yamakura, T., Jiang, L., Uzawa, Y., Maezawa, H., and Yamamoto, S., Improvement of the Critical Temperature of Superconducting NbTiN and NbN Thin Films Using the AlN Buffer Layer, Supercond. Sci. Technol. **23**, 045004 (2010).

[3] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., Distributions of Carbon-Chain Molecules in L1527, ApJ, 722, 1633 (2010).

[4] Watanabe, Y., Sakai, N., Lindberg, J.E., Jorgensen, J.K., Bisschop, S.E., and Yamamoto, S., "An Unbiased Spectral Line Survey toward R CrA IRS7B in the 345 GHz Window with ASTE", ApJ, **745**, 126 (2012).

28 Sakai (Hirofumi) Group

Research Subjects: Experimental studies of atomic, molecular, and optical 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) High-intensity laser physics typified by high-order nonlinear processes (ex. multiphoton ionization and high-order harmonic generation). (3) Ultrafast phenomena in atoms and molecules in the attosecond time scale. (4) Controlling quantum processes in atoms and molecules using shaped ultrafast laser fields. A part of our recent research activities is as follows:

(1) Characteristics of high-order harmonics generated from atoms and aligned molecules with carrier-envelope-phase-stabilized 25-fs pulses [1]

With carrier-envelope phase stabilized pulses, the self-referencing technique is applied to evaluate the relative phase of high-order harmonics generated in atoms and aligned molecules. The Fourier transform analysis from the frequency domain to the time domain shows that the *effective* duration of the driving pulse, during which the specific orders of harmonics are efficiently generated, is decreased as the harmonic order is increased. In the case of aligned molecules, the interference fringes between the two adjacent odd-order harmonics from N_2 are more distinctive than those from CO_2 , which may be explained by the difference in the complexity associated with the symmetry of highest occupied molecular orbitals between N_2 and CO_2 .

(2) High-order harmonics generated from aligned molecules with carrier-envelope-phasestabilized 10-fs pulses

With carrier-envelope-phase-stabilized 10-fs pulses, harmonic spectra from aligned molecules are observed and analyzed. The control of the carrier-envelope phase allows us to observe spectral interferences caused by nonadiabatic change in the intensity of the driving pulse. The Fourier transform analysis reveals that there are clear contributions from the spectrally broadened short and long trajectory components in addition to the contribution from the usual odd-order harmonic components. We further examine the possibility of evaluating the phase change accompanied by the destructive interference in harmonic spectra observed in aligned CO_2 and N_2 molecules.

(3) Laser-field-free orientation of state-selected asymmetric top molecules

With combined electrostatic and shaped laser fields with a slow turn on and rapid turn off, laser-field-free orientation of asymmetric top iodobenzene molecules with higher degrees of orientation has been achieved for the first time. In order to further increase the degrees of orientation, state-selected molecules are used as a sample. It is confirmed that higher degrees of orientation are maintained in the laser-field-free condition for about 10 ps, which is long enough to study femtosecond-attosecond dynamics in molecules, after the rapid truncation of the laser pulse. This accomplishment means not only that a unique molecular sample has become available in various applications but also that the present technique can be used as a new approach to investigate rotational dynamics of molecules.

[1] Yusuke Sakemi, Kosaku, Kato, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Characteristics of highorder harmonics generated from atoms and aligned molecules with carrier-envelope-phase-stabilized 25-fs pulses," Physical Review A **85**, 051801(R) (4 pages) (2012). Selected for Virtual Journal of Ultrafast Science Vol. 11, Iss. 6 (2012).

29 Gonokami Group

Research Subjects: Experimental studies on many-body quantum physics by light-matter interaction, Optical phenomena in artificial nanostructures, Development of laser based coherent light source

Member: Makoto Gonokami, Kosuke Yoshioka

We are trying to explore new aspects of many-body quantum systems and their exotic quantum optical effects through designed light-matter interactions. Our current target consists of a wide variety of matter, including excitons and electron-hole ensemble in semiconductors, antiferromagnetic magnons and ultracold atomic gases. In particular, we have been investigating the Bose-Einstein condensation phase of excitons, which is considered the ground state of electron-hole ensemble but as yet not proven experimentally. Based on quantitative spectroscopic measurements, the temperature and density are determined for an exciton gas in a quasi-equilibrium condition trapped inside a high purity crystal kept below 1 K. We are now investigating a stable and quantum degenerate state of dark exciton gas at such very low temperatures. We also investigate novel optical and terahertz-wave responses for some artificial nanostructures obtained by advanced micro-fabrication technologies. As the Director of the Photon Science Center, within the Graduate School of Engineering, a project was started to develop new coherent light sources; covering a broad frequency range from terahertz to soft X-rays. Specifically, in collaboration with RIKEN, the Foundation for Coherent Photon Science Research was established two years ago. This is one of the Advanced Research Foundation initiatives from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. Within this initiative, we are developing intense and stable coherent light sources at a high repetition rate (That facility is named "Photon Ring").

This year the following activities were done:

- 1. The quest for macroscopic quantum phenomena in photo-excited systems:
 - (a) Systematic study of the Bose-Einstein condensation transition of excitons using a dilution refrigerator
 - (b) Low-temperature, many-body phenomena in electron-hole systems in diamond
 - (c) Study strongly-correlated many-body systems using ultra-cold atomic gases
- 2. The quest for non-trivial optical responses and development of applications:
 - (a) Understanding optical activity in quasi two-dimensional structures and second harmonic generationPhotoinduced three-dimensional chirality and acitive control of THz optical activity
 - (b) Vectorial control of THz oscillation in crystals with vector-field shaped optical pulses
 - (c) Terahertz vector beam generation using segmented nonlinear optical crystals

- 3. Development of novel coherent light sources and spectroscopic methods:
 - (a) Development of vacuum ultraviolet light sources and their applications
 - (b) Efficient nonlinear optical conversion using passive cavities
 - (c) High-harmonic generation and its application to spectroscopic study
 - (d) Established the Foundation for Coherent Photon Science Research

References

- K. Yoshioka and M. Kuwata-Gonokami: Relaxation explsion of a quantum degenerate exciton gas in Cu₂O, New Journal of Physics, 14, 055024 (2012).
- [2] N. Takemura, J. Omachi and M. Kuwata-Gonokami: Fast periodic modulations in the photon correlation of single-mode vertical-cavity surface-emitting lasers, Phys. Rev. A, 85, 053811 (2012).
- [3] N. Kanda, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami: Dynamics of photo-induced terahertz optical activity in metal chiral gratings, Opt. Lett., 37, 3510 (2012).
- [4] R. Imai, N. Kanda, T. Higuchi, Z. Zheng, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami: Terahertz vector beam generation using segmented nonlinear optical crystals with threefold rotational symmetry, Opt. Exp., 20, 21896 (2012).
- [5] J. Omachi, K. Yoshioka, and M. Kuwata-Gonokami: High-power, narrow-band, high-repetition-rate, 5.9 eV coherent light source using passive optical cavity for laser-based angle-resolved photoelectron spectroscopy, Opt. Exp., 20, 23542 (2012).
- [6] K. Konishi, B. Bai, Y. Toya, Jari Turunen, Y. Svirko, and M. Kuwata-Gonokami: Surface-plasmon enhanced optical activity in two-dimensional metal chiral networks, Opt. Lett., 37, 4446 (2012).
- [7] T. Higuchi, H. Tamaru, and M. Kuwata-Gonokami: Selection rules for angular momentum transfer via impulsive stimulated Raman scattering, Phys. Rev. A, 87, 013808 (2012).
- [8] A. Lebreton, I. Abram, N. Takemura, M. Kuwata-Gonokami, I. Robert-Philip, and A. Beveratos: Stochastically sustained population oscillations in high-nanolasers, New J. Phys., 15, 033039 (2013).

30 Nose Group

Research Subjects: Formation and function of neural networks

Member: Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka and Etsuko Takasu

The aim of our laboratory is to elucidate the mechanisms underlying the formation and function of neural networks, by using as a model, the simple nervous system of the fruitfly, *Drosophila*. A part of our recent research activity is summarized below.

1. Optical dissection of neural circuits that regulate larval locomotion

A major challenge in neuroscience today is to understand neural information processing in the brain. Techniques to acutely inhibit neural activity provide effective methods towards this goal. We are interested in the mechanism underlying the seamless activation of motor neurons in successive segments, particularly how it is generated by the central circuits in *Drosophila* larvae. For this investigation, we generated a transgenic line that allows halorhodopsin (NpHR) to be expressed in specific neurons and performed temporally and spatially restricted inhibition of motor neurons. NpHR is a chloride pump, which, when activated by a yellow light, suppresses the firing of neurons. Our results suggest that (1) Firing of motor

neurons at the forefront of the wave is required for the motor wave to proceed to more anterior segments, and (2) The information about the phase of the wave, namely which segment is active at a given time, can be memorized in the neural circuits for several seconds.

2. Gene regulation of synaptic components

Communication between pre- and post-synaptic cells is a key process in the development and modulation of synapses. Reciprocal induction between pre- and postsynaptic cells involves regulation of gene transcription, yet the underlying genetic program remains largely unknown. To investigate how innervationdependent gene expression in postsynaptic cells supports synaptic differentiation, we performed comparative microarray analysis of *Drosophila* muscles and identified 84 candidate genes that are potentially upor downregulated in response to innervation. We found that one of the downregulated genes, longitudinals lacking (*lola*), which encodes a BTB-Zn-finger transcription factor, is required for proper expression of glutamate receptors. When the function of lola was knocked down in muscles by RNAi, the abundance of glutamate receptors (GluRs), GluRIIA, GluRIIB and GluRIII, as well as that of p-21 activated kinase (PAK), was greatly reduced at the neuromuscular junctions (NMJs). Lola appears to regulate the expression of GluRs and PAK at the level of transcription, and the transcriptional level of *lola*, in turn, is downregulated by increased neural activity. Lola thus may coordinate expression of multiple postsynaptic components by transcriptional regulation.

References

 Fukui, A., Inaki, M., Tonoe, G., Hamatani, H., Homma, M., Morimoto, T., Aburatani, H. and Nose, A.: Lola regulates glutamate receptor expression at the Drosophila neuromuscular junction. Biol. Open, 1, 362-375 (2012).

(review)

- [2] Kohsaka, H., Okusawa, S., Itakura, Y., Fushiki, A. and Nose, A.: Development of larval motor circuits in Drosophila. Dev. Growth Diff., 54, 408-419 (2012).
- [3] Nose, A.: Generation of neuromuscular specificity in Drosophila: novel mechanisms revealed by new technologies. Front. Mol. Neurosci., 5, 62 (2012).

(book)

[4] Kohsaka, H. and Nose, A.: Optogenetics in *Drosophila*. (a chapter in "Optogenetics", NTS publisher. in Japanese)

31 Higuchi Group

Research Subjects: Motor proteins in in vitro, cells and mice

Member: Hideo Higuchi and Motoshi Kaya

Noninvasive in-vivo imaging of vesicles in mouse neutrophil

Tumor was exposed by dissecting the skin and a epicedium, so far. Many biological systems especially the immune system were activated by the dissection. To avoid the dissection, we developed the method of non-invasive imaging. The auricle was selected for non-invasive imaging because of thin and short hair. The auricle was illuminated by high power laser for short time. We investigated the motility of vesicle in neutrophil, a kind of white blood cell, in mice. Neutrophil is activated by the inflammation of TPA and goes out of blood vessel to cure the inflammation. 1 day after the inflammation, many of neutrophil go out of the blood vessel. We observed clearly the movement of vesicle containing antibody-quantum dot. The shape of neutrophil becomes long and front domain may pull the cell. The velocity of the vesicle was changed very much from 0.3 to 3.1 um/s. Surprisingly, the velocity of 3 um/s is about three times of velocity of dynein and kinesin. The MSD plots indicate that the "stop and go" fassion (figure).

Noninvasive in-vivo imaging of single molecules in mouse

We developed new imaging methods to visualize molecules under noninvasive condition. We focused on the ear auricle of mouse for observation of tumor cells because very thin (about 150-200 μ m) and limited hypodermal tissue. We developed a novel xenograft model of the ear auricle with breast cancer cells in order to observe them noninvasively by spinning disk confocal (CSU) system. We injected two kinds of human breast cancer cell lines, KPL4-EB1-GFP and MDA-MB-231, into the ear auricle of SCID mice. It is known that KPL4-EB1-GFP is easily form tumor tissue at subcutaneous of mouse backs, but MDA-MB-231 is not. Tumor composed of both cells were successfully formed in mice. This indicates that the ear auricle is suitable position to form tumor. To image the molecules, specific antibodies to recognize these cells were labeled with fluorescence quantum dots and then injected to tail vein after the formation of tumor. We successfully performed real time observation of quantum dots within breast cancer cells and on its membrane under noninvasive condition.

Imaging of dynein in muscle

Skeletal muscles are thought to be rigid structure, but it must be always maintained. In non-muscle cells, cytoplasmic dynein is bearing important roles for intracellular maintenance. However, the roles of dynein are not understood in skeletal muscles. In order to understand the role of cytoplasmic dynein, we developed the in vivo fluorescence imaging of mouse skeletal muscle which molecular structures are visualized by using the gene transfer of GFP-fused proteins. Microtubules and cytoplasmic dyneins in in vivo muscles were successfully visualized by expressing GFP-Tubulin and dynein IC74-GFP with confocal microscope. The distribution and dynamics of vesicles transported by cytoplasmic dyneins in living muscle differed from non-muscle cells, and these vesicles did not move along the microtubule in living muscle. Meanwhile, dynein IC74-GFP were stably expressed in the myoblast cell line C2C12 and, vesicle transports were observed in myoblast cell and myotube. The dynein binding vesicles in the myoblast stage distributed as similar as in non-muscle cells. However, in myotube, the vesicles mainly moved along longitudinal axis and the speed of the vesicles was decreased to 20

 \mathbf{III}

2011年度物理学教室全般に関する報告

9 学部講義概要

1 2年生 冬学期

1.1 電磁気学I: 駒宮幸男

- 請義の概要
- 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
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

1.2 解析力学·量子力学I: 須藤 靖,相原博昭

1 物理学的世界観	7.1 光の量子(フォトン)
2 最小作用の原理からニュートンの法則へ	7.2 ドブロイの物質波
	7.3 ボーアの原子模型
3 対称性と保存則	7.4 ハミルトン・ヤコビ方程式と電子波
4 ハミルトン形式と正準変換	7.5 波束 (wave packet)
5 電磁場の古典論	7.6 波動関数と不確定性原理
6 黒体輻射とエネルギー量子	7.7 ファインマンの経路積分とシュレーディンガー 方程式
7 量子力学への導入	7.8 確率解釈

275

- 7.9 運動量
- 8 時間に依存しないシュレーディンガー方程式と一次元系
- 8.1 定常状態
- 8.2 井戸型ポテンシャル
- 8.3 一次元調和振動子
 - 8.3.1 代数的解法
 - 8.3.2 解析的解法
- 1.3 物理実験学 : 藤森 淳, 酒井 広文
- 1. 序論(物理実験の魅力)
- 2. 単位
- 2.1 SI 基本単位の定義
- 2.2 代表的な物理量の単位
- 2.3 各種の常用単位系とその変換
- 3. 各種の計測法
- 3.1 レーザーの基礎と光の計測 出力の測定、パルス幅の測定、超高速ストリー クカメラ、強度相関法

- 8.4 デルタ関数ポテンシャル
- 93量子力学の定式化
- 9.1 線形代数の復習と定義の確認
- 9.2 関数空間
- 9.3 量子力学の基本原理
- 9.4 時間発展演算子
- 9.5 シュレーディンガー表示とハイゼンベルグ表示
- 9.6 不確定性原理の一般形
- 3.2 放射線の計測 放射線の基礎、放射線と物質の相互作用、放射 線検出器

4. 実験の基礎技術

- 4.1 実験環境技術 真空、低温、磁場、強電場
- 4.2 試料作製技術
- 誤差論 実験誤差、確率統計、最小二乗法
- 6. 実験レポートや論文を書く上での注意事項

- 1.4 物理数学 I: 小形正男
- 1. 複素関数
- 1.1 物理学における複素数
- 1.2 複素関数と Riemann 面
- 1.3 初等関数と収束半径
- 2. 複素関数の微分と正則性
- 2.1 複素微分
- 2.2 Cauchy-Riemann の関係式
- 2.3 調和関数
- 3. Cauchyの積分公式とその応用
- 3.1 複素積分の定義と Cauchy の積分定理
- 3.2 主値積分
- 3.3 Cauchyの積分公式とTaylor展開

- 3.4 Laurent 展開
- 3.5 解析接続
- 4. 等角写像
- 4.1 正則関数と等角(共形)写像
- 4.2 共形変換の応用
- 5. Γ関数
- 5.1 Γ 関数
- 5.2 鞍点法
- 5.3 Γ 関数の無限乗積表示と Hankel 表示
- 5.4 Stirling の公式
- **5.5** *ζ* 関数

6. Fourier 級数と Sturm-Liouville 理論

6.1 Fourier 級数と Fourier 変換 6.2 固有関数展開

物理数学 II: 立川 裕二 1.5

- 1. 偏微分方程式とフーリエ変換
- **1.1** 偏微分方程式
- 1.2 熱伝導方程式
- 1.3 波動方程式
- 1.4 ポアソン方程式
- 1.5 ラプラシアンと特殊関数
- 2. 特殊関数
- 2.1 直交関数系/直交多項式としての特殊関数 3.3 回転群と四元数

3年生 夏学期 $\mathbf{2}$

2.1電磁気学 II : 高瀬 雄一

1. Maxwell 方程式 **4.2** 電磁場の拡散 1.1 微視的描像と巨視的描像 4.3 表皮効果 1.2 電磁場とポテンシャル 4.4 渦電流 2. 静電場 5. 電磁場の保存則 2.1 誘電体 5.1 Poynting の定理 2.2 境界値問題の解法 5.2 インピーダンス 2.3 Laplace 方程式の一般解 6.物質中の電磁波 2.4 Green 関数 6.1 誘電率と屈折率 3. 静磁場 **6.2** 分散と吸収 3.1 磁性体 6.3 プラズマ中の波動 3.2 境界値問題の解法 6.4 群速度 3.3 強磁性体 **6.5** 波束の拡散 4. 準静的問題 4.1 電磁誘導 6.6 因果律

2.2 量子力学 II: 浜口 幸一

1. 3次元空間でのシュレディンガー方程式

6.3 δ 関数の Fourier 変換

- 2.2 ベッセル関数
- 2.3 直交多項式 (ルジャンドル、ラゲール、エル ミート)
- 2.4 球面調和関数
- 3. 回転対称性
- 3.1 回転群と角運動量
- 3.2 回転群と球面調和関数

1.1 極座標による3次元のシュレディンガー方程式

277

1.2 球対称ポテンシャル内の粒子のシュレディンガー	2.5 角運動量の合成と Clebsch-Gor
方程式	3. 対称性と保存則
1.3 角度成分	3.1 保存量
1.4 動径成分	3.2 対称性
2. スピン	3.3 連続対称性の生成子と保存量
2.1 スピン自由度の存在	4. 様々な近似法
2.2 スピン	4.1 摂動論(定常状態)
2.3 s=1/2のとき:パウリ行列	4.2 摂動論(時間発展)
2.4 スピンと磁気モーメント	4.3 WKB 近似

2.3 現代実験物理学I: (前半)江尻 晶 (後半)福山 寛

前半は、物理実験 I、II の理解を深めることを目的 に、歴史的な実験も紹介しつつ、基礎的な物理実験 技術とその原理を主に解説する。後半は、物性物理 学分野の実験技術とその物理について、歴史的な実 験や最先端技術の紹介も交えながら回折する。

物理実験技術の基礎とその原理 (江尻担当)

1. 回路

- 1.1 アナログ回路の雑音、応答
- **1.2** 雑音との戦いの歴史
- 2. 真空
- **2.1** 真空の歴史
- 2.2 真空を作る、測る
- 2.3 真空容器、表面洗浄

2.4 流体力学 I: 佐野 雅己

- 連続体の力学
- 2. 様々の流れと流体運動の記述
- 3. 流体力学の基礎方程式
- 4. 完全流体の運動

統計力学I: 宮下精二 2.5

1. 熱力学の復習

rdan 係数

- - 2. 可視赤外分光
 - **3.1** 分光の歴史
 - 3.2 各種分光法と性能
 - 3.3 光束、立体角、レンズ
 - 3.4 PMT & Photo Diode

物性実験技術とその物理 一物質の多様性を探る (福山担当)

4. 極限実験環境の実現と計測

4.1 超高真空、極低温、強磁場など

- 5. 物性測定法とその原理
- 5.2 粒子線回折、走査プローブ、熱測定、磁気測定、 伝導度測定など
- 5. 粘性流体の運動
- 6. 低レイノルズ数と高レイノルズ数の流れ
- 7. 流れの安定性、カオス
- 8. 乱流

1.1 熱力学の法則

278

1.2 熱力学における温度	3.3 調和振動子
2. 統計力学の原理、手法	3.4 状態密度
2.1 等重率の原理	4. 統計力学の応用 II(量子系)
2.2 ミクロカノニカル分布	4.1 黒体輻射
2.3 カノニカル分布	49 景子珊相复休
2.4 グランドカノニカル分布	
3. 統計力学の応用 I (古典系)	4.3 ノエルミ統計
3.1 理想気体	4.4 ボース統計、ボース凝縮
3.2 二準位系	4.5 量子スピン系

3 3年生 冬学期

3.1 物理数学 III: 松尾 泰

1. 君	¥論	1.8	回転群とスピノル
1.1	物理学と対称性	2. 微	收分形式
1.2	基礎概念	2.1	外積代数
1.3	指標とその直交性	2.2	微分形式とその基本的た性質
1.4	点群	2.2	いたし、知じし ~ 明に
1.5	分子振動への応用	2.3	ベクトル解析との関係
1.6	同一粒子の取り扱い	2.4	電磁気学への応用
1.7	リー群とリー代数	2.5	積分定理

3.2 量子力学 III : 大塚孝治

1. 散乱問題

- 1.1 散乱断面積
- 1.2 ポテンシャルによる散乱
- 1.3 グリーン関数による散乱振幅の計算
- 1.4 ボルン近似
- 1.5 量子論での断面積と光学定理
- 1.6 ボルン近似の成り立つ場合
- 1.7 拡がりのあるポテンシャル源による散乱
- 1.8 量子論での断面積と光学定理

2. 部分波展開による散乱問題

2.1 部分波展開と位相のずれ

- 2.2 低いエネルギーでの散乱
- 2.3 部分波展開による断面積
- 2.4 共鳴散乱
- **2.5** クーロン散乱

3. 同種粒子系

- **3.1** 同種粒子とは
- 3.2 多数の同種粒子から成る系
- 3.3 スレーター行列式とパウリの排他律
- 3.4 ボソンから成る系
- 3.5 フェルミオンの第2量子化
- 3.6 第2量子化による物理量の表現

3.7	2体演算子の第2量子化による表現	4. 紹	路積分
3.8	ハートリー・フォック法	4.1	経路積分の考え方
3.9	原子の中の電子系の構造	4.2	シュレーディンガー方程式の導出
3.3	固体物理学 I:島野 亮		
1. 固]体の凝集機構	4.4	強束縛近似
1.1	水素分子(ハイトラー-ロンドン モデル)	4.5	フェルミ面
1.2	ファン・デル・ワールス結合	4.6	バンド構造と金属・絶縁体
1.3	金属結合	5. 結	晶中の電子の運動
1.4	共有結合	5.1	結晶運動量
1.5	イオン結合	5.2	一様電場下での電子の運動-有効質量近似-
1.6	水素結合	5.3	正孔
2. 結	占晶構造	5.4	ブロッホ振動
2.1	単位格子	6. 金	
2.2	ブラベー格子	6.1	電気伝導-ドルーデモデル-
2.3	逆格子	6.2	ボルツマンの輸送方程式
2.4	X線回折	6.3	ホール効果
2.5	ブリリュアン・ゾーン	6.4	磁場中における軌道の量子化
3. 自	1由電子気体 	7.¥	2導体
3.1	状態密度	7.1	雷子と正孔の統計
3.2	フェルミエネルギー	7.2	不純物ドーピング
3.3	電子気体の比熱	73	nn 按合
3.4	静電遮蔽	0.5 0 F	
4. 唐	別期ボテンシャル中の電子	o. <u>⊫</u>	
4.1	フロッホの定理	8.1	アルーナモナル、ローレンソモナル
4.2	ほとんど自由な電子の近似	8.2	ソレンケル励起子
4.3	空格子の近似	8.3	ワニエ-モット励起子

3.4 現代実験物理学 II: 横山 将志, 中澤知洋

1. 素粒子・原子核実験の方法論	3.1 相対論的エネルギー・運動量
2. 単位系とスケール	3.2 粒子の生成,崩壊
2.1 自然単位系	4. 反応断面積と遷移確率
2.2 エネルギーと距離のスケール	4.1 反応断面積
3. 相対論的運動学	4.2 Fermi's golden rule

- 4.3 ラザフォード散乱
- 4.4 形状因子
- 5. 粒子加速器
- 5.1 静電加速器
- 5.2 線形加速器
- 5.3 サイクロトロン
- 5.4 シンクロトロン
- 6. 宇宙物理実験概要
- 6.1 宇宙物理実験学イントロダクション
- 6.2 現代の宇宙物理実験
- 7. 荷電粒子・光子の相互作用と検出器
- 7.1 粒子と光子の検出の基礎
- 7.2 荷電粒子と物質の相互作用

3.5 電磁気学 III : 内田慎一

- 1. 電磁波の放射
- **1.1** 電磁・遅延ポテンシャル (Mawell 方程式の一 般解、ローレンツゲージ)
- 1.2 双極子放射
- 2. 光学
- 2.1 電磁波の反射・屈折・回折 (Huygensの原理)

3.6 生物物理学:樋口秀男、能瀬聡直

生物物理学は物理学的な観点や手法を用い、生命 現象の基本原理を究明することを目指す研究領域で あり、その対象は、蛋白質や核酸などの分子レベル から脳・神経系の機能などの高次の生命現象まで多 岐にわたっている。本講義では、その基礎的な概念、 手法を解説するとともに、最近のトピックスについ ても紹介する。以下のような内容を予定している。

- 1. 生物物理学とは
- 2. 遺伝情報の流れ

3.7 統計力学 II : 青木 秀夫

1. 相転移

- 7.3 高エネルギー荷電粒子の検出器
- 7.4 光子と物質の相互作用
- 7.5 高エネルギー光子の検出器
- 8. 実験データの統計学
- 8.1 イントロダクション
- 8.2 実験データの扱いの基礎
- **8.3** 重要な統計分布
- 8.4 統計モデルの応用
- **8.5** 誤差の伝搬
- 8.6 パラメータ推定
- 8.7 モンテカルロ法
- 8.8 確率論と誤差の基礎的な考え方
- 2.2 空洞共振器・導波路(電磁波の制御・デバイス)
- 3. 荷電粒子の運動と電磁波
- 3.1 運動する荷電粒子がつくる電磁場
- **3.2** 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)
- 3. 蛋白質の構造と機能
- 4. 細胞内タンパク質のダイナミックス
- 5. 遺伝子操作技術
- 6. ゲノム科学とバイオインフォマティックス
- 7. バイオイメージング、生体分子計測
- 8. 脳・神経系の生物物理

1.1 秩序パラメータと対称性の破れ

1.2 二次相転移と Ginzburg-Landau 理論

1.3 相転移における臨界指数と空間次元

- 2. 同種粒子系の統計力学
- **2.1** 有限温度における Fermi 気体
- 2.2 有限温度における Bose 気体
- 4 4年生 夏学期

4.1 場の量子論 I:諸井 健夫

- 1. 相対論的量子力学
- 1.1 Klein-Gordon 方程式
- 1.2 Dirac 方程式
- **1.3** 対称性と保存量: Noether の定理

4.2 サブアトミック物理学:早野龍五

学部・大学院共通講義として新設されたこの講義 は、原子核物理学と素粒子物理学の入門として位置 づけられる。

1. 原子核の大局的性質

- **1.1** 原子核の安定性
- 1.2 原子核による電子の散乱
- **1.3** 原子核の形状
- 1.4 準弾性散乱
- 衣子の性質
- 4.3 統計力学特論:常行 真司
- 1. 相転移と臨界現象
- **1.1**相と相図
- 1.2 相転移
- 1.3 臨界現象
- 1.4 スケール変換と繰り込み群
- 1.5 イジング模型とそれに関連した模型

- 2.3 多体問題と平均場近似
- 2.4 Bose-Einstein 凝縮と超伝導
- 3. 非平衡統計力学への序論
- 3.1 輸送現象と Boltzmann 方程式
- 3.2 線形応答理論

- 3.場の量子化
- 2.1 Klein-Gordon 場の量子化
- **2.2** Dirac 場の量子化
- **2.3** 電磁場の量子化
- 2.1 核子による電子散乱
 2.2 核子の深部非弾性散乱
 3. 標準模型
 3.1 クォーク,グルオンと強い相互作用
 3.2 弱い相互作用の現象論
 4. サブアトミック物理の研究手段
 4.1 加速器
 4.2 放射線と物質の相互作用
 4.3 放射線検出器

2. 平均場理論

- 2.1 平均場理論、平均場近似
- 2.2 平均場理論の臨界指数
- 2.3 Landau 理論
- 2.4 三重臨界点のランダウ理論
- 2.5 無限レンジ模型

- **2.6** ベーテ (Bethe) 近似
- 2.7 相関関数
- 2.8 平均場理論の適用限界
- 2.9 動的臨界現象
- 3. くりこみ群とスケーリング
- **3.1** スケール変換と固定点
- **3.2** パラメータ空間と変換則
- **3.3** 固定点付近の流れ
- 3.4 スケーリング則
- 3.5 相関関数のスケーリング則
- 3.6 スケーリング則によるデータ解析
- 3.7 有限サイズスケーリング
- 3.8 クロスオーバー
- **3.9** 動的スケーリング則

4.4 宇宙物理学:牧島 一夫

- 1. 宇宙を理解する基礎
- 1.1 多体系と自己重力系
- 1.2 電磁放射

2. 星とその物理学

- 2.1 自己重力系としての星
- **2.2** 星の力学と熱力学
- 2.3 星内部の原子核反応
- **2.4** 星の進化と終末
- 3. フェルミオンの縮退圧で支えらえた星

4.5 固体物理学 II: 岡本 徹

1. 格子振動

- **1.1** フォノン
- 1.2 デバイ模型
- **1.3**比熱と諸物性
- 2. 金属および半導体における輸送現象
- 2.1 電気伝導
- 2.2 半導体中の電子と正孔

- 4. くりこみ群の実際
- **4.1** 1 次元 Ising 模型
- 4.2 2次元三角格子のブロック・スピン変換
- **4.3**2次元での部分和
- 4.4 Migdal-Kadanoff 近似
- **4.5** ϕ^4 模型
- **4.6** ε展開

5. Kosterlitz-Thouless 転移

- 5.1 Peierlsの議論
- 5.2 XY 模型の下部臨界次元
- 5.3 Mermin-Wagner の定理
- 5.4 Kosterlitz-Thouless 転移
- 5.5 渦対のエネルギー
- 5.6 Villain 模型
- 3.1 電子縮退と白色わい星
 3.2 核子縮退と中性子星
 4. ビッグバン宇宙論
 4.1 膨張宇宙の記述
- 4.2 宇宙論パラメータと暗黒エネルギー
- 4.3 宇宙の誕生と初期進化
- 4.4 宇宙初期の素粒子と、軽元素の合成
- 4.5 宇宙の「晴れ上がり」と天体形成
- 2.3 熱電効果と熱伝導
 2.4 半導体デバイス
 3. 低次元電子系の量子現象
 3.1 量子ホール効果
 3.2 メゾクコピック伝導
 4. 磁性
 4.1 反磁性と常磁性

4.2 スピン間相互作用	5.1 マイスナー効果
4.3 磁気秩序	5.2 BCS理論
4.4 磁気デバイス	5.3 ジョセフソン効果
5. 超伝導と超流動	5.4 超流動

4.6 量子光学:五神 真

- 1. 光と物質
- **1.1** 誘電媒質中の電磁波
- **1.2**2準位原子と光の相互作用
- 1.3 非線形光学とレーザー

- 畏
- 光の量子論
- 2.1 輻射場の量子性
- 2.2 輻射場の量子状態とその観測
- 2.3 量子化された輻射場と物質の相互作用

5 4年生 冬学期

5.1 化学物理学:山本智

1. 原子の電子構造とスペクトル

- 1.1 水素原子と水素様原子
- 1.2 多電子系1:ヘリウム原子
- 1.3 多電子系2:ハートリー・フォック法による取 扱い
- **1.4** 組立の原理
- 1.5 スピン軌道相互作用、LS 結合、jj 結合

1.6 原子スペクトル

2. 分子の対称性と群論

- **2.1** 点群の分類
- 2.2 対称操作の行列表現
- 2.3 既約表現と可約表現
- 2.4 指標表による表現の簡約
- **2.5** 直積の表現
- **2.6** 群論の応用例
- 3. 分子の電子構造
- 3.1 核と電子の運動の分離

- 3.2 原子価結合法と分子軌道法 3.3 二原子分子の電子状態 3.4 非経験的分子軌道法計算 3.5 配置間相互作用 3.6 近似的分子軌道法 3.7 分子軌道と化学反応 4. 分子スペクトルの概要 **4.1**回転スペクトル 4.2 振動スペクトル 4.3 電子スペクトル 4.4 光解離、前期解離、光イオン化 5. 分子間相互作用 **5.1** 配光力、誘起力 5.2 分散力 **5.3** 分子間力の現れ 5.3 ファン・デル・ワールス分子とクラスター
- 5.4 分子間力と化学反応
| 5.2 素粒子物理学 I : 浅井祥仁 | |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| 1. 単位系、概論 | 6. 連続対称性 |
| 2. クォークモデル | 7. ゲージ原理 |
| 3. Dirac 方程式 : 反物質、スピン | 8. 電磁相互作用 |
| 4. 反応の運動学 | 9. 弱い相互作用 |
| 5. 不連続対称性 | 10. 隠れた対称性とヒッグス機構 |
| 5.3 原子核物理学 : 櫻井博儀 | |
| 1. 原子核の大きさと密度 | 5. 殻模型と集団運動 |
| 2. 原子核の質量と遷移
3. フェルミガスと平均ポテンシャル | 6. 核力の基礎とアイソスピン対称性 |
| 4. 調和振動子模型と魔法数 | 7. 放射線 |
| 5.4 電子回路論: 坪野 公夫 | 3.4 グラフィックス |
| 1. 線型応答系 | 4. デジタル信号処理 |
| 1.1 フーリエ変換 | 4.1 有限時間データであるための効果 |
| 1.2 ラプラス変換 | 4.2 離散時間データである効果 |
| 1.3 出力の積分表示 | 4.3 デジタル信号のパワースペクトル |
| 1.4 伝達関数 | 4.4 z 変換 |
| 4.5 線型系と因果律 | 4.5 デジタルフィルター |
| 2. 信号と雑音の処理 | 5. 回路の安定性 |
| 21 パワースペクトル | 5.1 ナイキストの安定条件 |
| 2.2 自己相関関数 | 5.2 ボーデ線図とナイキスト線図による安定性判
別法 |
| 2.3 最適フィルター | 5.3 フィードバック系の特性 |
| 2.4 積算平均効果 | 5.4 フィードバック系の補償 |
| 3. MATLAB 入門 | 6. 低雑音回路 |
| 3.1 コマンド入力の基本 | 6.1 増幅器の雑音 |
| 3.2 行列の作り方 | 6.2 A/D 変換の基礎 |
| 3.3 演算 | 6.3 周波数安定性-アラン分散 |
| | |

5.5 現代物理学入門: 高木 英典, 吉田 直紀

1.

1.1 電子相関

285

- 1.2 金属-絶縁体転移
- 1.3 フェルミ液体論
- 1.4 量子臨界点と非フェルミ液体の出現
- 1.5 電荷秩序と軌道秩序
- 1.6 超伝導
- 1.7 銅酸化物の高温超伝導
- 1.8 鉄系高温超伝導体

- 1.9 興味あるエキゾチック超伝導体
- 2. 天体形成論
- 2.1 標準宇宙モデル
- 2.2 膨張宇宙と銀河形成、進化
- 2.3 ダークマターの性質
- 2.4 ダークエネルギーと宇宙の加速度的膨張
- 2.5 星の進化とブラックホール形成
- 2.6 将来の観測計画

10 各賞受賞者紹介

1 小林孝嘉 名誉教授:日本化学会フェロー

小林孝嘉名誉教授(現電気通信大学特任教授、及び同大学先端超高速レーザー研究センター・センター長)が 公益社団法人日本化学会より日本化学会フェローの称号を授与されました。日本化学会は、化学・化学技術関 連分野の学術または教育あるいは産業の発展・普及・振興、および同会の発展に顕著な貢献があった会員に 対し、「日本化学会フェロー」の称号を授与し、その功績を称え、もって会員の地位向上に資するとともに、 同会の更なる発展に寄与していただくことを目的として、「日本化学会フェロー」制度を設置しています。小 林先生は、平成24年度にフェローの称号を授与された10名のうちのお一人となりました。

2 浅井祥仁教授:日本学術振興会賞

浅井教授は、「LHC でのヒッグス粒子発見の貢献」に対して日本学術振興会賞が授与されました。浅井教授 は、LEP,LHC エネルギーフロンティア実験の最前線で 超対称性やヒッグス粒子の研究を行ってきました。 新しい研究方法の開発やトポロジーに分類して確実に発見する方法の考案など新しいアイデアを開拓し続け、 ヒッグス粒子発見においても、日本の若手研究者をまとめ、様々な解析方法を開発し早期の確実な発見に大 きな貢献をしました。これらの研究は激しい国際競争の中で行われますが、日本の研究者が中心的な役割を 果たすことができました。この点が評価された受賞です。

3 五神真教授: Fellow of the American Physical Society, Fellow Member of the Optical Society

五神教授は「半導体の非線形分光、高密度現象、冷却原子および微小共振器構造を含む、レーザー分光と光 科学における先駆的な研究業績並びにその貢献」に対して、米国物理学会 (American Physical Society)フェ ロー、および米国光学会 (Optical Society of America)フェローに選出されました。五神教授は、固体の光励 起状態の精密なレーザー分光法の確立、ボース・アインシュタイン凝縮をはじめとする量子縮退した励起子 系および電子正孔系の生成法と分光法の開発、さらに、アルカリ土類原子気体のスピン禁制遷移冷却法、微 小球共振器やその連結構造による光波操作やレーザー発振など幅広い課題において先駆的かつ顕著な成果を 上げ、物理学および光学におけるその多大な貢献がみとめられ両学会での選出となりました。

4 大塚孝治教授: Fellow of the American Physical Society

大塚 孝治教授が、米国物理学会 (American Physical Society) のフェローに選出されました。IBM(相互作用 するボソン模型)の微視的導出、核構造におけるテンソル力の役割、モンテカルロ殻模型の開発、エキゾチッ ク原子核を理解するための三体力の役割を含む、原子核構造研究における様々な先駆的な貢献を評価されての選出とのことです。

5 早野龍五教授:ドイツ GENCO 会員賞 (Membership Award)

物理学専攻の早野龍五教授がドイツの GSI (重イオン研究所)による GENCO 会員賞 (Membership Award) を受賞しました。GSI はドイツのフランクフルト郊外のダルムシュタットにあり、原子核、素粒子、生物に 関わる物理学、核化学、核医学の研究を進める、ドイツでも屈指の大きな研究所です。

GENCO とは GSI Exotic Nuclei Community の略称であり、GENCO 会員賞は2006年から毎年、国際的な委員会によって選ばれた、原子核に関する科学に於いて顕著な業績を挙げた1~3名の研究者に対して授与されてきました。

今回、原子核反応を用いたパイ中間子原子の精密分光の手法を開拓し、南部陽一郎先生が予言された「自 発的対称性の破れによる素粒子の質量獲得のメカニズム」の定量的な検証に成功した早野教授に授与される ことになりました。

6 松原隆彦氏: 第17回 日本天文学会林忠四郎賞

1996年から2000年まで須藤研の助手であった松原隆彦氏(現在は名古屋大学准教授)が、「統計的摂 動解析理論に基づく観測的宇宙論の開拓」の業績に対して、第17回 日本天文学会林忠四郎賞を受賞されま した。松原氏は、宇宙大規模構造に関する観測可能量に対して、従来の摂動論の枠組みを超えて非線形性をと り込むなど、主として解析的な方法論を開拓して来ました。その先駆的かつ独創的な研究は、ダークエネル ギーの性質や原始密度ゆらぎの統計的性質を実際の観測データから探る上で高い重要性を有しています。さ らに松原氏の提唱した方法論は、銀河の赤方偏移サーベイや宇宙マイクロ波背景放射の研究に広く用いられ ているのみならず、将来のすばる望遠鏡による大規模銀河サーベイにも用いられる基礎的な研究成果です。

7 細川隆史氏 (吉田研助教): 2012 年度日本天文学会研究奨励賞

宇宙初期と現在の銀河系という大きく異なる環境での大質量星形成を理論的に研究し、優れた成果を上げて きた。特に初期宇宙の初代星形成の研究では、初代星の質量はこれまで考えられてきた質量より一桁ほど小 さく典型的には数十太陽質量であることを世界で初めて理論的に予言した。また、質量降着を伴う大質量原 始星の進化モデルを初めて構築した。

8 坂井南美氏(山本研助教): 2012 年度日本天文学会研究奨励賞

坂井氏は、「低質量原始星天体における暖かい炭素鎖化学の提唱とその進展」に関する業績で標記の賞を受賞 した。坂井氏は世界中の最先端電波望遠鏡を駆使し、太陽程度の質量を持つ原始星近傍の化学組成を高感度 で測定することで、炭素鎖分子 (C₄H, HC₅N などの炭素が直線状につながった分子)が異常に豊富に存在す る原始星天体を発見した。これまで、原始星近傍には飽和有機分子 (CH₃OH, HCOOCH₃ など)が特徴的に 存在すると考えられていたので、この発見は原始星天体の化学的多様性を示すものとして大きな驚きを持っ て受け止められた。坂井氏は、その原因として、原始星近傍の暖められた領域で星間塵から CH₄ が蒸発する ことで効率的に炭素鎖分子を生成するメカニズムを提案した。これが「暖かい炭素鎖化学」(Warm Carbon Chain Chemistry: WCCC) である。WCCC は、その後、理論的研究や坂井氏らの観測的研究で確認され、星間化学過程の新しい概念として定着しつつある。坂井氏が発見した原始星天体の化学的多様性が、原始惑星系円盤、ひいては惑星系にどのように伝播されるかが、現在、注目を集めており、坂井氏は ALMA による観測でその解明を目指している。

9 古川俊輔氏(上田研助教): 第7回日本物理学会若手奨励賞

受賞の対象となったのは「量子多体系におけるエンタングルメント・エントロ ピーの研究」です。古川氏は トポロジカル相から量子臨界系までまたがる広い対象において、エンタン グルメント・エントロピー (EE) が いかに系の普遍的性質と結びついているかを示す重要な成果を挙げました。特に、Kitaev らによって提案さ れたトポロジカル秩序を特徴づける普遍的エントロピーの存在を量子スピン液体の模型において数値的に実 証しました。この結果は、Kitaev らの提案を量子スピン液体研究に広く応用するさきがけ的研究となりまし た。古川氏は相互情報量から共形場理論のより詳しい情報を得ることができることを提案し、朝永・Luttinger 流体において、相互情報量はいわゆる朝永・Luttinger 液体パラメーターのみによって普遍的に定まることを 数値的・解析的に示しました。この結果はそれまで見逃されていた EE と共形場理論のより深い関係を明ら かにしたものとして高く評価されています。

10 新倉潤氏(櫻井研助教): 第7回日本物理学会若手奨励賞

新倉潤助教は、⁶⁸Ni 近傍の不安定核の特異な集団運動を調べるため、リコイルディスタンス法を利用した、 2⁺ 準位の寿命精密測定を行い、電気四重極遷移強度 B(E2) の直接測定を試みた。フランス・GANIL 研究所 で得られる^{73,74}Zn ビームを利用し、非弾性散乱および一核子分離反応を用いて励起準位を生成し、^{72,74}Zn の B(E2) を 10% 以下の精度で測定することに成功した。この新しい精密測定値と過去のデータを組み合わせ、 (1)Ge や Se 同位体と同様、Zn 同位体でも中性子数 42 で集団性が極大となること、(2)^{72,74}Zn は軸対称性が 破れた三軸非対称変形核であり、非常にソフトな構造をもっていること、を見出した。この研究成果により、 (1)⁶⁸Ni の小さな集団性が特異点として現れることがより明確になり、また (2) 中性子数 42 での集団性極大、 (3) 魔法数近傍での三軸非対称性の出現など新たな問題が提示された。この業績によって核構造の議論がさら に拡大・深化することが期待でき、核構造分野での意義は大きいと考えられることから若手奨励賞が授与さ れた。

11 長井稔氏(諸井研特任研究員): 第7回日本物理学会若手奨励賞

長井稔氏は、電気双極子能率に対する超対称粒子の効果についての詳細な計算を行い、特に荷電ヒッグスボ ソンや荷電ヒグシーノが伝播するダイアグラムの重要性を指摘した。さらに長井氏はそれらのダイアグラム の効果を定量的に解析し、広いパラメータ領域で大きな電気双極子能率を導くことを明らかにした。今後超 対称模型を検証する上で、CPの破れのシグナルの探索は重要な役割を果たすと期待される。長井氏の研究か ら得られた結果は超対称模型における電気双極子能率の計算の信頼性を格段に向上させるものであり、今後 の電気双極子能率計測実験に対しても大きなインパクトを持つものとして高く評価されている。以上の業績 に対し、第7回日本物理学会若手奨励賞が授与された。

12 渡辺優氏(上田研:現京都大学基礎物理学研究所): 第7回日本物理 学会若手奨励賞

アインシュタインらによって指摘されたように、量子系には「物理的実在 (elements of physical reality)」は 存在せず、測定結果が確率的に出力されるため、古典系のように「測定値と真の値の差」で誤差を定量化す ることができない。渡辺氏は、測定結果に量子推定理論を適用することで測定誤差や擾乱を定量化すること ができることを洞察し、測定誤差と擾乱が、Fisher 情報量 で定量化できることを示した。これまで、不確 定性関係の下限は物理量の交換関係によっ て与えられると広く予 想されていたが、渡辺優氏は、従来予想さ れていた下限が一般には達成不可能であることを示し、等号達成可能な下限を導出することに成功した。更 に、その下限を達成する測定法を具体的に構成した。これらの結果は、物理学の基礎の確立に寄与するだけ でな く、重力波検出など超精密測定に対する最適な測定法を見出すために応用できるものと期待される。

13 西隆博氏(早野研):平成24年度 理研 研究奨励賞

西隆博君(早野研 D1)は、「RIBF における錫 121 中に深く束縛されたパイ中間子の初の精密測定」(The first precision measurement of the deeply bound pionic state in ¹²¹Sn at RIBF)の業績により、 平成 24 年度 理研研究奨励賞を受賞した。

14 小林翔悟氏 (牧島研) および村上浩章氏 (中澤研) : ASTRO-H International Summer School 2012 ポスター銀賞

次期宇宙X線衛星 ASTRO-H (2015 年度に打ち上げ予定) で開拓すべきサイエンスを、国際的に議論するこの Summer School (2012 年 8 月、京都) で、ともに修士 1 年の小林氏と村上氏は揃って、ポスター銀賞を受賞した。タイトルは、小林氏が "Study of Holmberg IX X-1 with ASTRO-H HXI"、村上氏が "Simulations of non-thermal supernova remnant G330.2+1.0" で、ともに外国人講師陣から高い評価を得た。

15 田中良樹氏 (早野研): J-PARC Hadron Hall User's Association Master Thesis Award

田中良樹 (早野研 M2)の修士論文 "Development of a High Refractive Index Aerogel Cherenkov Counter for the Spectroscopy of η' Mesic Nuclei" が, J-PARC Hadron Hall User's Association Master Thesis Award を受賞しました.

16 村上洋平氏 (早野研):Second International School for Strangeness Nuclear Physics: Osamu Hashimoto 賞 (best oral presentation)

村上洋平君(早野研 M1)は、2013 年 2 月 14 日~20 日に仙台で開催された "Second International School for Strangeness Nuclear Physics" における発表、"Measurement of the antiproton-nucleus annihilation cross section"が、Osamu Hashimoto 賞(Best Oral Presentation)に選ばれた。

11 人事異動

[物理学教室に来ら	られた方々]		
吉田直紀	教授	H24年4月1日	採用 (カブリ数物連携宇宙研究機構・特任准教授)
立川裕二	准教授	H24年4月1日	採用 (カブリ数物連携宇宙研究機構・特任助教)
谷口耕治	講師	H24年4月1日	配置換 (新領域創成科学研究科・講師)
森 貴司	助教	H24年4月1日	採用
渡邉祥正	特任助教	H24年4月1日	採用
戸部美香	物理教務	H24年4月1日	配置換 (教育学研究科・係長)
田嵜洋恵	物理事務	H24年4月1日	配置換 (工学系研究科・主任)
建野ゆかり	第1事務分室	H24年4月2日	採用 (派遣)
小林尚美	物理事務	H24年5月1日	採用
竹内一将	助教	H24年5月16日	採用 (理学系研究科物理学専攻・特任助教)
阿部 喬	特任助教	H24年6月1日	採用 (H25 年 2 月 16 日 助教に採用)
葭本智美	第1事務分室	H24年6月1日	採用
吉岡千春	第2事務分室	H24年6月1日	採用
田中友希	図書室	H24年6月1日	採用 (派遣)
石田 明	助教	H24年7月1日	採用
南 文	図書室	H24年7月1日	採用
南条良勝	試作室	H24年7月1日	採用
新倉 潤	助教	H24年8月1日	採用 (フランス国立科学研究所
			オルセー原子核研究所・ポスドク)
Denis Epifanov	特任助教	H24年8月1日	採用
古川俊輔	助教	H24年8月16日	採用
細川隆史	助教	H24年9月1日	採用
辻 直人	特任助教	H24年10月1日	採用 (フリブール大学物理学科・ポスドク研究員)
佐山芳恵	物理事務	H24年12月1日	採用
中村千佳子	物理教務	H24年12月1日	採用 (派遣)

[物理学教室から利	多られた方々]		
黒羽美由紀	第1事務分室	H24年4月6日	任期満了退職 (派遣)
杉浦かおり	第2事務分室	H24年4月13日	任期満了退職 (派遣)
建野ゆかり	第1事務分室	H24年4月27日	任期満了退職 (派遣)
角田直文	助教	H24年4月30日	辞職
矢向謙太郎	助教	H24年5月15日	配置換 (原子核科学研究センター・准教授)
吉岡千春	第2事務分室	H24年5月31日	任期満了退職 (派遣)
村中詔子	図書室	H24年5月31日	任期満了退職 (派遣)
佐山芳恵	物理事務	H24年5月31日	任期満了退職 (派遣)
岡 隆史	助教	H24年5月31日	配置換 (工学系研究科物理工学専攻・講師)
田中友希	図書室	H24年6月30日	任期満了退職 (派遣)
川口由紀	助教	H24年7月15日	辞職 (工学系量子相エレクトロニクス研究センター
			・特任准教授)
原田崇広	講師	H24年9月28日	辞職
内田慎一	教授	H25年3月31日	定年退職
坪野公夫	教授	H25年3月31日	定年退職
大塚茂己	試作室	H25年3月31日	定年退職
吉田鉄平	助教	H25年3月31日	辞職(京都大学大学院人間・環境学研究科・准教授)
Peter S. Turner	助教	H25年3月31日	辞職
掛下照久	特任助教	H25年3月31日	任期満了退職
丸屋 久	物理事務	H25年3月31日	配置換 (理学系研究科附属臨海実験所・係長)

292

12 役務分担

役務	担当教員	技術職員・事務職員
専攻長・学科長	宮下	熊崎、戸部、田嵜
幹事	福山、須藤、五神	
専攻主任	佐野	
専攻副主任	常行	
常置委員	上田、駒宮	
優先配置	村尾、福山	
教務係	小形 、藤森(大学院)、諸井、松尾	
学生実験	長谷川 、浅井、岡本、山本	佐伯 、八幡
就職係	櫻井 、牧島	横山
奨学金	青木	
G-COE	島野 、内田	
部屋割	駒宮	熊崎 、丸屋
安全衛生	岡本	八幡
放射線	蓑輪	
技術室	福山 (総括、試作室)、坪野	大塚 、柏葉
(技術室会議メンバー)	長谷川 (学生実験)	佐伯 、八幡
	岡本 (安全衛生・低温)	八幡
	須藤 (IT関連)	南野
図書係	上田 、樋口、村尾、浅井、中澤	内村
コロキューム	須藤 、佐野、青木、櫻井	佐山 、田嵜
年次報告	高木、谷本	横山、八幡
記録係	横山、立川、谷口	
物品供用官	早野	熊崎
事務分室	第1:長谷川、 第2:大塚	

*太字は責任者

役務	担当教員	技術職員・事務職員
理交会	山本	熊崎
親睦会	濱口	
進学指導	専攻長、樋口、吉田、立川	物理教務
進振委員	酒井	戸部
ホームページ	須藤 、松尾、吉田、早野	南野
オープンキャンパス	樋口 、牧島	
物理オリンピック	長谷川	
リーディング大学院	五神	物理事務、物理教務
新リーディング大学院	高木	物理事務、物理教務
次期 GCOE	専攻長、幹事、佐野、常行	
駒場対策	大塚、濱口、長谷川、五神、	
	中澤、小形、立川、吉田	

*太字は責任者

13 教室談話会

- 2012年5月11日(金) 16:30 17:30
 Dr. Maria Cruz (Associate Editor, Science magazine)
 "Scientific Publishing from the Inside Out"
- 2012年12月7日(金) 16:00-18:10
 Sir. Martin Wood Prize Lecture
 1. 第13回(2011年)受賞者河野行雄氏(東京工業大学量子ナノエレクトロニクス研究センター准教授) 「低次元電子系の機能に基づいたテラヘルツ波の検出」
 2. 第14回(2012年)受賞者千葉大地氏(京都大学化学研究所准教授) 「半導体と金属における強磁性の電解制御」
- 2012年12月14日(金) 16:30-18:00
 Carl M. Bender 氏 (Physics Dept. Washington Univ. in St. Louis)
 "PT-symmetric quantum mechanics"
- 2013年1月25日(金) 16:30-18:00
 不二門尚教授 (大阪大学大学院医学系研究科・感覚機能形成学)
 "光を取り戻す医療"-物理から見た目の病気の診断・治療-
- 2013年3月12日 (火)
 - 14:00 15:30内田 慎一 教授(最終講義)「半導体と高温超伝導体」16:00 17:30坪野 公夫 教授(最終講義)「時空のさざ波-重力波を求めて」

14 物理学教室コロキウム

- 2012年4月13日(金)16:30-18:00
 小澤正直氏(名古屋大学)
 「ハイゼンベルク不確定性原理の反証可能性」
- 2012年6月1日(金) 16:30-18:00
 Sir Anthony James Leggett (イリノイ大学)
 "Testing the limits of quantum mechanics: motivation, state of play, prospects"
- 2012年7月6日(金) 16:30-18:00
 吉田 直紀氏(東京大学)
 宇宙の構造形成一暗黒面から最初の光までー
- 2012年10月5日(金) 16:30-18:00
 川村静児氏(東京大学宇宙線研究所)
 「KAGRAによる重力波天文学の創成」
- 2012年10月19日(金) 16:30-18:00
 安藤陽一氏(大阪大学産業科学研究所)
 「トポロジカル絶縁体、トポロジカル超伝導体」
- 2012年11月16日(金) 16:30-18:00
 秋葉 康之氏 (理化学研究所)
 「RHIC での重イオン物理:ビッグバン直後の熱い宇宙の再現」
- 2013年1月11日(金) 16:30-18:00
 澤井 哲氏(東京大学総合文化研究所)
 「細胞運動とパターンダイナミクス」

15 金曜ランチトーク

- 2012 年4月6日 茅元司 (樋口研)「一分子計測からみえてきた筋収縮のメカニズム」
- 2012年4月13日合田義弘(常行研)「磁石理論の新展開に向けて」
- 2012年4月27日平原徹(長谷川研)「非磁性体表面のスピン偏極電子」
- 2012 年 5 月 11 日 松井朋裕(福山研)「超伝導ナノ粒子の STM/S 観測」
- 2012 年 5 月 18 日 鈴木隆敏(早野研)「J-PARC におけるエキゾチック系の研究」
- 2012 年 6 月 8 日 川口由紀(上田研) 「スピン自由度を持った原子気体 BEC」
- 2012 年 6 月 15 日 井上慶純 (蓑輪研)「すみ子実験 トーキョーアクシオンヘリオスコープ」
- 2012 年 6 月 29 日 枡富龍一(岡本研) 「半導体表面に創成される 2 次元電子系と単原子層超伝導」
- 2012 年7月6日 高坂洋史(能瀬研)「可視光線と遺伝学で調べる運動制御神経回路」
- 2012 年7月13日 松浦弘泰 (小形研) 「鉄-フタロシアニン化合物での磁性理論」
- 2012 年7月27日 麻生洋一(坪野研)「今度こそ本当に初検出:次世代重力波検出器 KAGRA」
- 2012 年 9 月 28 日 森貴司 (宮下研)
 「長距離相互作用系での統計力学」
- 2012年10月5日小貫良行(相原研)「素粒子実験 Belle での Direct CP Violation を通じた カビボ-小林-益川行列ユニタリー三角形の角度 \$ 3 の 測定とアップグレード計画 Belle II 概要」
- 2012 年 10 月 12 日 遠藤基 (濱口研) 「LHC 実験と TeV スケールの素粒子標準模型を超えた物理」
- 2012年10月26日ターナー・ピーター(村尾研)「From optimal tomography to mimicking randomness: quantum t-designs」
- 2012年11月9日神谷好郎(駒宮研)「中性子-Xe原子散乱の精密測定による 未知の弱結合粒子の探索実験」
- 2012年11月16日阿部香(大塚研)「HPCI戦略プログラムにおけるモンテカルロ殻模型による 第一原理計算に向けて」
- 2012 年 11 月 30 日 吉岡孝高 (五神研) 「半導体励起子のボースアインシュタイン凝縮相の探求」
- 2012年12月14日中山和則(諸井研)「重力波で探る初期宇宙相転移」
- 2012年12月21日谷口耕司「巨大な光学的電気磁気効果(方向二色性)の発見」

- 2013 年 1 月 18 日 石田明 (浅井研) 「ポジトロニウムを用いた素粒子物理学実験」
- 2013 年 2 月 1 日 細川隆史 (吉田研) 「超巨大ブラックホールの起源」
- 2013 年 2 月 8 日 古川俊輔 (上田研)「回転ボース気体における量子ホール状態」
- 2013 年 3 月 1 日 坂井南美(山本研)「星・惑星系形成に伴う化学進化の観測的研究」
- 2013 年 3 月 22 日 梅木誠
 「渦糸の局所誘導運動に関する最近の話題」