

Department of Physics
School of Science
The University of Tokyo

Annual Report

2013

平成25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: JAXA の音響試験設備に搬入される ASTRO-H 衛星。ロケットでの打ち上げ環境に耐えることを確認する試験の一コマ (写真は JAXA 提供)。ASTRO-H は日本の 6 代目の X 線観測衛星で、重さ 2.5 t、打ち上げ時の全長 8 m で、軌道上では 14 m に伸展する、日本で最大級の科学観測衛星である。最新の X 線検出器を複数搭載し、広い帯域を高感度で観測する力、X 線を精密に分光する力が、過去の衛星より桁違いに優れている。2015 年の打ち上げをめざし、JAXA を中心に東京大学はじめ国内の研究機関に加え、NASA、ESA などの世界の研究機関が協力して開発を進めている。(牧島・中澤研)

ASTRO-H satellite in mechanical test configuration moving into the acoustic test facility on May 2013 (photo by JAXA). The cosmic X-ray satellite will be launched in 2015. (Makishima-Nakazawa group)

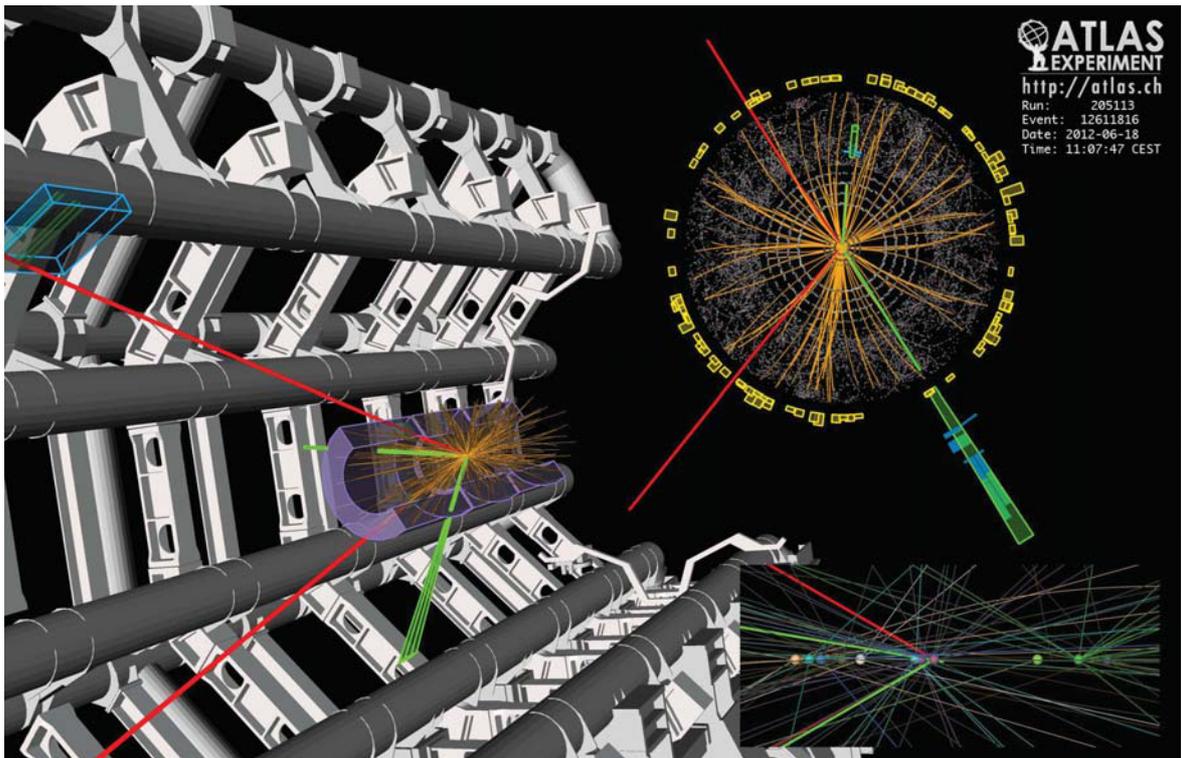


図 2: 観測されたヒッグス粒子の候補事象: ヒッグス粒子が二つの Z 粒子に崩壊し, それぞれ電子対 (緑線) と μ 粒子対 (赤線) にさらに崩壊した現象。再構成した不変質量は 123.9GeV。詳細は本文参照。(浅井研究室)

Event display of a $H \rightarrow Z Z \rightarrow 2e 2\mu$ candidate event with $m(4l) = 123.9\text{GeV}$. The event was recorded by ATLAS on 18-Jun-2012, 11:07:47 CEST. Muon tracks are colored red, electron tracks and clusters in the LAr calorimeter are colored green. (Asai group)

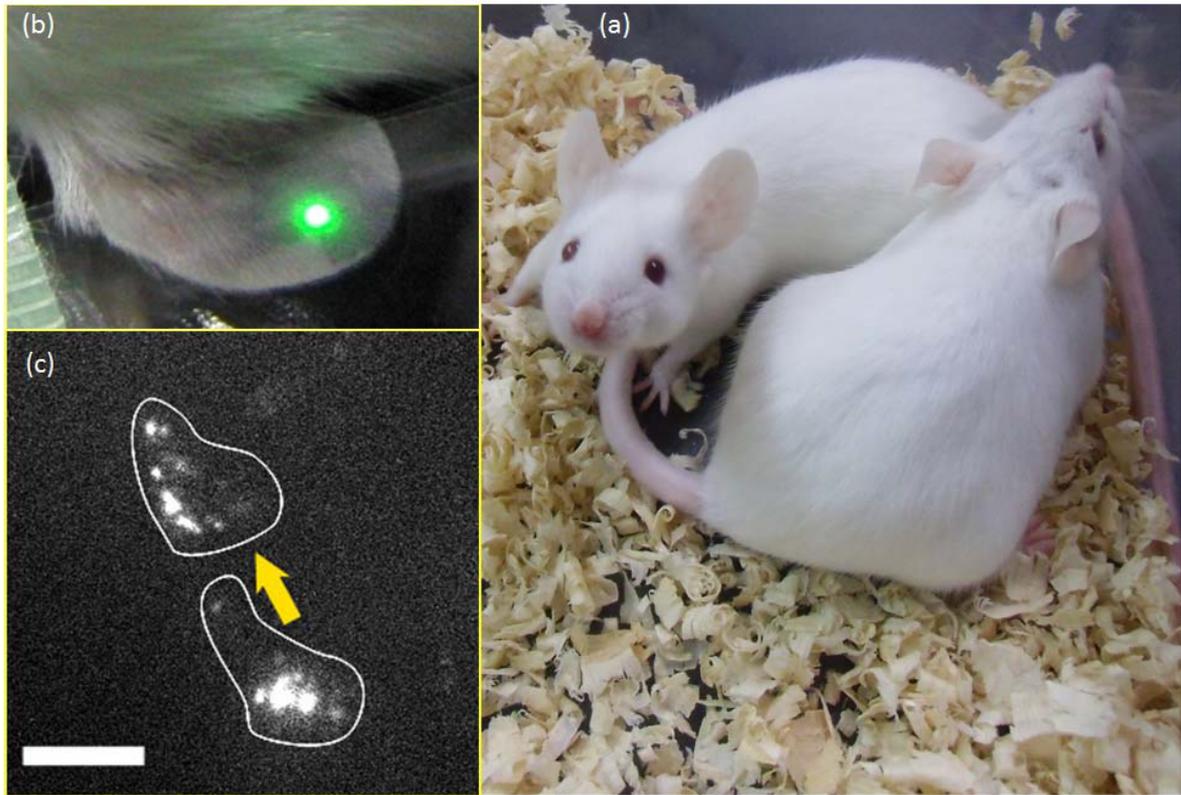


図 3: マウスに傷をつけることなく、非侵襲的に好中球（白血球の中の主要な細胞）および好中球内の小胞運動のイメージングを行った。(a) 実験に用いた T および B 細胞を欠失した SCID マウスは、好中球が多数イメージングできた。(b) マウスの耳介は、厚さ $150\ \mu\text{m}$ と薄く毛も短いことから透過率が高いので、この部位を非侵襲的にイメージングした。(c) 好中球に特異的に結合する蛍光性量子ドットをマウスに注射することで、好中球の蛍光を観察した。図は 100 秒間隔で得られた像である。好中球の運動速度が $0.1\ \mu\text{m}/\text{s}$ なのに対して、小胞の運動は $1 - 4\ \mu\text{m}/\text{s}$ であった。特に高速度 $4\ \mu\text{m}/\text{s}$ は過去に報告がない大きな値であった。バーは $10\ \mu\text{m}$ を示す。(樋口研)

Noninvasive imaging of neutrophil in mouse auricles. (a) The SCID mice were suitable for the neutrophil imaging. (b) Mouse was anesthetized with isoflurane on the stage of a confocal microscope. After the neutrophil-antibody labeled with fluorescent quantum dots was injected in tail vein, the mouse auricle was illuminated by a green laser at 532 nm. (c) The movements of neutrophil and vesicles in the auricle were noninvasively imaged with the spatiotemporal precision of 12-100 ms and 15-30 nm. The maximum velocity ($4\ \mu\text{m}/\text{s}$) of vesicles was surprisingly high. (Higuchi group)

序

平成 25 年度（2013 年 4 月-2014 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、大槻朋子特任教授（フォトンサイエンス: JDSU より）、安東正樹准教授（重力波実験：自然科学研究機構国立天文台より）、福嶋健二准教授（原子核理論：慶応義塾大学より）、藤堂眞治准教授（物性理論：物性研より）、岡崎浩三助教（藤森研）、添田彬仁助教（村尾研）、大栗真宗助教（須藤研）が着任されました。また、島野亮准教授が本学低温センターに転出し、教授に昇任されましたが、引き続き物理学専攻・物理学を兼任され、物理学教室の教育と研究に参画して頂いております。その他、谷口耕二講師（東北大学金属材料研究所・准教授）、樽家篤史助教（京都大学大学院基礎物理学研究所・准教授）、麻生洋一助教（自然科学研究機構国立天文台・准教授）、合田義弘助教（東京工業大学大学院総合理工学研究科・准教授）が転出されました。また、長年生物物理の研究室（旧堀田研、旧桑島研、能瀬研）で研究と教育にご尽力なされた高須悦子助教がこの 3 月に早期退職されました。なお、本年度定年を迎えられた先生はおられませんでした。

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。堀田凱樹名誉教授が瑞宝中綬章を受章されました。また、佐藤勝彦名誉教授が日本学士院新会員に選出されました。浅井祥仁教授が仁科記念賞を、山本智教授が第 18 回日本天文学会林忠四郎賞を受賞されました。内田慎一先生、桑島邦博先生、坪野公夫先生が名誉教授の称号を授与されました。若い方々では、竹内一将氏（佐野研助教）と沙川貴大氏（元上田研：現総合文化研究科広域科学専攻）がそれぞれ IUPAP の C3 Commission (Statistical Physics) の Young Scientist Prize in Statistical Physics を、森貴司氏（宮下研助教）が第 8 回日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。また、橋本直君（早野研）が International Nuclear Physics Conference (INPC 2013) にて Best Young Speaker Award を、風間慎吾君、グエン タン フク君、松本伸之君、宮崎彬君、野田博文君（天文学専攻；物理学教室に所属）が平成 25 年度理学系研究科研究奨励賞（博士課程）を、枝和成君、堀尾眞史君、増田賢人君、山本真吾君が平成 25 年度理学系研究科研究奨励賞（修士課程）を、小森健太郎君、杉岡新君、藤田浩之君が平成 25 年度理学部学修奨励賞を受賞しました。

教室では若手のサポートの強化に努めています。GCOE プログラム「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」、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」の制度は平成 24 年度で終了しましたが、博士課程研究遂行協力制度、「卓越した大学院拠点形成支援」、物理学専攻独自の博士課程リサーチアシスタント制度などにより学生への支援を行っています。また平成 23 年度から開始されたリーディング大学院「Advanced Leading Graduate Course for Photon Science (ALPS)」は、博士コース一貫教育、広く社会へのキャリアパスをめざした制度であり、今年 4 年目を迎えます。また、平成 24 年度からは「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 (FMSP)」のリーディング大学院も開始され、物理学専攻もこれらに参加しています。ALPS の活動と連携し、最先端の光科学を通して学術分野を横断する融合科学を創る拠点を形成する為に、物理学教室が中心となって、理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構を設置し平成 25 年 10 月に発足しました。さらに理学部で進めている基礎研究を社会につなぐ新しい仕組みとして、文部科学省の「革新的イノベーション創出プログラム」(COI-STREAM) 事業のもとで「コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点」を創設し、物理学教室との密接な連携のもとで活動を開始いたしました。

物理教室では、これからも大学や学科・専攻のあり方について真剣に考え、世界に発信できる物理学教室として、基礎研究の面白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、安東正樹准教授、八幡和志氏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。

2014年5月1日
物理学専攻長・教室主任
佐野 雅己

目次

I	研究室別 2013 年度 研究活動報告	9
1	原子核・素粒子理論	11
1.1	原子核理論研究室 (大塚・福嶋)	11
1.2	素粒子論研究室 (諸井・浜口・松尾・立川)	18
1.2.1	現象論	18
1.2.2	弦理論	20
2	原子核・素粒子実験	25
2.1	原子核実験グループ 【早野・櫻井】	25
2.1.1	反物質の研究 (早野研究室)	25
2.1.2	深く束縛された π 中間子原子の精密分光 (早野研究室)	26
2.1.3	η' 中間子原子核の研究 (早野研究室)	27
2.1.4	福島原発事故に関連して (早野研究室)	27
2.1.5	崩壊核分光による不安定核構造研究 (櫻井研究室)	27
2.1.6	インビームガンマ線核分光による不安定核構造研究 (櫻井研究室)	28
2.1.7	直接反応を用いた原子核の構造研究 (櫻井研究室)	29
2.2	駒宮研究室	36
2.2.1	電子・陽電子リニアコライダー ILC 計画	36
2.2.2	LHC 実験	37
2.2.3	小規模実験	38
2.2.4	EPR 相関測定とベル不等式検証	39
2.3	菱輪 研究室	43
2.3.1	原子炉ニュートリノモニター	43
2.3.2	Hidden photon ダークマター探索	44
2.4	相原・横山研究室	47
2.4.1	(スーパー) B ファクトリー実験	47
2.4.2	HSC 暗黒エネルギー研究	48
2.4.3	T2K 長基線ニュートリノ振動実験	49
2.4.4	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	50
2.5	浅井研究室	56
2.5.1	LHC・ATLAS 実験での研究	56
2.5.2	小規模実験で探る標準理論を超えた新しい素粒子現象の探索	57
3	物性理論	63
3.1	青木研究室	63
3.1.1	超伝導	63
3.1.2	トポロジカル系	64
3.1.3	非平衡	65
3.1.4	その他	66
3.2	宮下研究室	70
3.2.1	協力現象の統計力学	70

3.2.2	確率過程	71
3.2.3	量子統計力学の研究	71
3.2.4	統計力学の基礎的研究	72
3.3	小形研究室	76
3.3.1	高温超伝導の理論	76
3.3.2	有機導体に関する理論	76
3.3.3	ディラック電子系	77
3.3.4	重い電子系および多軌道電子系理論	78
3.3.5	磁性体およびスピン軌道相互作用	79
3.4	常行研究室	83
3.4.1	シミュレーション手法の開発	83
3.4.2	第一原理電子状態計算の応用	84
3.5	藤堂研究室	90
3.5.1	強相関多体系における新奇な状態の探索と相転移・臨界現象	90
3.5.2	強相関多体系に対する新たな計算手法の開発	90
3.5.3	次世代並列シミュレーションのためのオープンソース・ソフトウェアの開発	91
4	物性実験	94
4.1	藤森研究室	94
4.1.1	高温超伝導	94
4.1.2	スピントロニクス, 界面	94
4.2	長谷川研究室	101
4.2.1	表面電子輸送	101
4.2.2	表面ナノ構造	102
4.2.3	新しい装置・手法の開発	103
4.3	福山研究室	106
4.3.1	2次元の量子凝縮相研究	106
4.3.2	グラフェンの電子物性研究	108
4.4	岡本 研究室	111
4.4.1	劈開表面に形成された2次元電子系	111
4.4.2	金属超薄膜の超伝導	112
4.5	島野研究室	116
4.5.1	半導体高密度電子正孔系	116
4.5.2	s 波超伝導体のヒッグスモードの観測	117
4.5.3	グラフェンにおける光学量子ホール効果	118
4.5.4	時間分解テラヘルツ近接場顕微鏡の開発	118
4.6	高木研究室	121
4.6.1	イリジウム複合酸化物におけるスピン軌道相互作用に誘起された新奇電子相の開拓	121
4.6.2	3次元ディラック電子の創成	121
4.6.3	薄膜超格子構造を用いた新奇電子相の開拓	122
5	一般物理理論	125
5.1	宇宙理論研究室 (須藤・吉田)	125
5.1.1	観測的宇宙論	125
5.1.2	系外惑星	129
5.1.3	星形成	130
5.1.4	その他	130
5.2	村尾研究室	136
5.2.1	量子アルゴリズム	136
5.2.2	エンタングルメント理論	136
5.2.3	連続変数量子系の量子情報処理	137

5.2.4	分散型量子情報処理	138
5.2.5	基底状態を利用した量子情報処理	139
5.3	上田研究室	142
5.3.1	冷却原子気体	142
5.3.2	量子論・統計力学と情報理論の融合	143
6	一般物理実験	148
6.1	牧島研究室+中澤研究室	148
6.1.1	科学衛星の運用と稼働状況	148
6.1.2	強磁場中性子星と超新星残骸の研究	148
6.1.3	質量降着する弱磁場中性子星 [33]	149
6.1.4	質量降着するブラックホール	150
6.1.5	銀河団の研究	151
6.1.6	雷雲ガンマ線の研究	152
6.1.7	ASTRO-H衛星計画	154
6.1.8	将来計画	155
6.2	高瀬研究室	161
6.2.1	TST-2 実験の概要	161
6.2.2	RF プラズマ立ち上げ実験	161
6.2.3	OH プラズマ実験	162
6.2.4	計測器開発	163
6.2.5	共同研究	164
6.3	佐野研究室	169
6.3.1	巨視的非平衡系の物理	169
6.3.2	小さな非平衡系の物理	170
6.3.3	生命現象の物理・アクティブマター	171
6.4	山本研究室	176
6.4.1	はじめに	176
6.4.2	星形成の観測研究	176
6.4.3	系外銀河の化学組成	179
6.4.4	テラヘルツ帯観測技術の開拓	179
6.5	酒井広文 研究室	182
6.5.1	レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展	182
6.5.2	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	183
6.5.3	原子、及び配列した N ₂ 分子から発生する高次高調波の隣り合う次数間の位相差の観測	184
6.5.4	配列した分子中から発生する高次高調波の偏光特性	184
6.5.5	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	185
6.5.6	その他	186
6.6	五神研究室	188
6.6.1	物質系の巨視的量子現象の探索	188
6.6.2	非自明な光学現象の探索とその応用	189
6.6.3	新規コヒーレント光源開発と新しい分光手法開拓	190
6.7	安東研究室	196
6.7.1	大型低温重力波望遠鏡 KAGRA	196
6.7.2	宇宙空間レーザー干渉計	197
6.7.3	ねじれ型重力波検出器 TOBA	197
6.7.4	低温光共振器を用いた超高安定化レーザー光源	198
6.7.5	相対論・量子光学精密実験	199
7	生物物理	202
7.1	能瀬研究室	202

7.1.1	運動パターン生成の基盤となる神経細胞及び遺伝子の同定と機能解析	202
7.1.2	神経回路の活動ダイナミクス	204
7.1.3	回路構造と神経機能の発生機構	205
7.2	樋口研究室	208
7.2.1	研究の背景と目的	208
7.2.2	細胞質ダイニンの力発生	208
7.2.3	ダイニン分子の力発生機構	208
7.2.4	好中球内小胞の高速輸送	208
7.2.5	がん細胞の非侵襲 in vivo イメージング	209
7.2.6	筋肉内微小管とダイニンのダイナミクス	209
8	技術部門	211
8.1	実験装置試作室	211
8.1.1	利用状況	211
8.1.2	工作実習	211
8.2	技術室	211
8.2.1	安全衛生	211
8.2.2	IT	211
8.2.3	学生実験	212
8.2.4	研究支援	212
8.2.5	全学技術研修	212
8.2.6	各種委員会	212
II	Summary of group activities in 2013	215
1	Theoretical Nuclear Physics Group	217
2	Theoretical Particle and High Energy Physics Group	218
3	Hayano Group	220
4	Sakurai Group	222
5	Komamiya group	223
6	Minowa-Group	224
7	Aihara & Yokoyama Group	225
8	Asai group	226
9	Aoki Group	227
10	Miyashita Group	228
11	Ogata Group	229
12	Tsuneyuki Group	230
13	Todo Group	231
14	Fujimori Group	232
15	Hasegawa Group	232
16	Fukuyama Group	233
17	Okamoto Group	235
18	Shimano Group	235
19	Takagi Group	236
20	Theoretical Astrophysics Group	238
21	Murao Group	239
22	Ueda Group	241
23	Makishima Group & Nakazawa Group	242
24	Takase Group	243
25	Sano Group	244
26	Yamamoto Group	245

27	Sakai (Hirofumi) Group	246
28	Gonokami Group	247
29	Ando Group	249
30	Nose Group	250
31	Higuchi Group	251

III 2013 年度 物理学教室全般に関する報告 255

9	学部講義概要	257
1	2 年生 冬学期	257
	1.1 電磁気学 I : 駒宮 幸男	257
	1.2 解析力学/量子力学 I : 吉田 直紀, 村尾 美緒	257
	1.3 物理実験学 : 藤森 淳, 酒井 広文	257
	1.4 物理数学 I : 小形正男	258
	1.5 物理数学 II : 立川 裕二	258
2	3 年生 夏学期	258
	2.1 電磁気学 II : 島野 亮	258
	2.2 量子力学 II : 浜口 幸一	259
	2.3 現代実験物理学 I : 長谷川 修司, 溝川 貴司	259
	2.4 統計力学 I : 佐野 雅己	260
3	3 年生 冬学期	260
	3.1 物理数学 III : 松尾 泰	260
	3.2 量子力学 III : 福嶋 健二	260
	3.3 固体物理学 I : 岡本 徹	261
	3.4 現代実験物理学 II : 横山 将志, 中澤 知洋	261
	3.5 電磁気学 III : 櫻井 博儀	262
	3.6 生物物理学 : 樋口 秀男, 能瀬 聡直	262
	3.7 統計力学 II : 青木 秀夫	263
	3.8 固体物理学 I : 岡本 徹	263
4	4 年生 夏学期	263
	4.1 場の量子論 I : 諸井 健夫	264
	4.2 サブアトム物理学 : 早野 龍五	264
	4.3 統計力学特論 : 宮下 精二	264
	4.4 宇宙物理学 : 牧島 一夫	264
	4.5 固体物理学 II : 高木 英典	265
	4.6 量子光学 : 五神 真	265
	4.7 生物物理学特論 : 豊島 近, 新井 宗仁, 樋口 秀男	265
5	4 年生 冬学期	266
	5.1 化学物理学 : 山本 智	266
	5.2 素粒子物理学 I : 浅井 祥仁	266
	5.3 原子核物理学 : 大塚 孝治	266
	5.4 物性物理学特論 : 長谷川 修司, 小森 文夫	267
	5.5 電子回路論 : 福山 寛, 横山 将志	267
	5.6 現代物理学入門 : 安東 正樹, 福嶋 健二	268
10	各賞受賞者紹介	269
1	堀田凱樹 名誉教授 : 瑞宝中綬章	269
2	佐藤勝彦 名誉教授 : 日本学士院新会員	269
3	浅井祥仁 教授 : 仁科記念賞	269
4	山本智 教授 : 第 18 回 日本天文学会 林忠四郎賞	270

5	竹内一将氏 (佐野研助教) : C3 Commission (Statistical Physics) of IUPAP: Young Scientist Prize in Statistical Physics	270
6	沙川貴大氏 (上田研 : 現 総合文化研究科広域科学専攻) : C3 Commission (Statistical Physics) of IUPAP: Young Scientist Prize in Statistical Physics	270
7	森貴司氏 (宮下研) : 第 8 回 日本物理学会 若手奨励賞	270
8	橋本直氏 (早野研) : International Nuclear Physics Conference (INPC 2013) Best Young Speaker Award	271
9	平成 25 年度 理学部・理学系研究科奨励賞	271
11	人事異動	272
12	役務分担	273
13	教室談話会	275
14	物理学教室コロキウム	277
15	金曜ランチトーク	278

I

研究室別 2013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・福嶋)

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。

「原子核構造」は大塚孝治教授、阿部喬助教、博士研究員と大学院学生らによって、「ハドロン物理学」は福嶋健二准教授によって世界的にも先端を行く研究が活発に行われた。ここではそれらの活動と成果の概要を述べる。

原子核構造

原子核構造と言われる分野には色々な問題が含まれるが、我々の研究室では

- 1) 不安定核の構造と核力
- 2) 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。最近の特筆できる成果としては、以上のメカニズムに基づき我々が予言した魔法数34がカルシウム54の原子核で実現していることが、理研の重イオン加速器 RIBF での実験で見つかった事が挙げられ、それは雑誌 Nature に論文発表された。[1]

核子の間には2体力だけでなく、3体力も働く。テンソル力に加えて、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-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。[30, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 62, 64, 65, 67, 59]

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、最近では中性子数が18や19の原子核でも、不安定核であれば $N=20$ の魔法数構造が普遍的に壊れているこ

とを示した。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、通常の見え方は二重閉殻原子核のはずの ^{42}Si がオブレートに大きく変形していることなども示した。今年度の大きな成果としては、テンソル力による殻進化が一つの原子核の中でも起こることを示したことである。これは第2種殻進化 (Type II shell evolution) と呼ばれ、形の共存現象などに大きな影響を与える。[3, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 62, 64, 65, 67]

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。

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1000億にまで拡大した。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。[3, 4, 5, 6, 7, 8]

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、変形の度合いが時間とともに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、その研究は当グループ出身者によって発展されている。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。

原子核物理学の研究ではないが、原子核物理学研究者が持つ知識や経験を生かして、福島第一原子力発電所事故による環境放射線汚染の系統的な調査を事故直後から組織してきた。その報告を行っている。[33, 63, 66, 69, 70]

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二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。[15, 16, 18, 19, 23, 24, 25, 26, 27, 43, 44, 45, 46, 48, 49, 60, 61]

軽い核での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、閉殻芯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核の領域か閉殻近傍に限られる。そこで、従来の閉殻芯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芯を仮定しない殻模型へと応用する試みを行っている。今年度は、これまでと同様に p 殻核領域の原子核を主に対象として、さらに大規模な計算を京コンピュータなどで行った。相互作用としては、これまで使ってきた現象論的に構築された JISP16 という2体核力だけでなく、カイラル有効場の理論に基づいて構築された核力やその有効核力を用いた。物理量については、主にエネルギーに着目し系統的に解析し、その模型空間無限大への外挿などを試みた。これらの成果に関しては、国内外での会議で口頭発表を行い、

[23, 43, 44, 45, 46, 60, 61] 会議抄録にもまとめられている。[15, 16] 今後、3体核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、この閉殻芯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な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。

核子-核子相互作用の再検証

核子間の核力については実験・理論両面において古くから精力的に研究されてきて、基本的な問題は理解されて解決されていると考えられてはいる。しかし中間距離における σ ボソン交換に関する議論はまだ研究の余地があると思われる。OBEP 模型の中ではこの σ ボソン交換力が最も重要な引力を与えていると考えられている。しかし一方、 σ ボソンはスカラーボソンであり、極めて幅の広い共鳴状態として議論されているが、核子との結合を含めた深い理解を得るためには、理論・実験ともにさらなる研究が必要である。そこで中間距離における 2π 交換力に着目して、これまで行われてきた 2π 交換核力計算とは異なったより明瞭な方法、 2π 交換に対応するファインマンダイアグラムの近似を用いないT行列計算を行った。その結果、 $T=0$ チャンネルに関してよく知られている Reid ポテンシャルと近いポテンシャルが得られることがわかった。

原子核分裂の新しい反応機構

熱中性子による核分裂の問題は実験的にはすでに十分理解されており、また、原子炉への応用の面でも特に問題となる現象があるわけではない。しかしながら、熱中性子がU-235に吸収されると核分裂が起こるのに対して、それよりも3個中性子が増えたU-238原子核の場合、熱中性子を吸収してもほとんど核分裂はしないで γ 線遷移過程が優先的に起こる。しかしながら、理論的にみるとこの現象がきちんと理解できる模型がこれまで存在していないのである。核分裂の理論は液滴模型によって構築されてきたが、中性子の数が奇数であるか偶数であるかの差については液滴模型では示すことができない。そこで我々は核分裂を記述する新しい「重中性子模型」を提案した。その際、熱中性子がU-235核における「はぐれ中性子」(不対中性子)と散乱してペアリング力により「準束縛状態」(重中性子と呼ぶ)を形成し、これが芯原子核と散乱して核を集団励起状態に導き、核分裂に至るという模型である。この際、核分裂を起こす確率は重中性子の束縛エネルギーに強く依存しており、この引力エネルギーと等分のエネルギーが核の集団励起に使われ、核分裂へと導く事により、原子核分裂が起こる事を示した。この模型計算により、U-235核では熱中性子による核分裂が起こるが、U-238核では核分裂ではなく γ 線崩壊過程が優先される機構が解明された。特に、U-238核では熱中性子が散乱し吸収された後、主として1粒

子的な軌道に入り、このため原子核全体の励起というよりも、熱中性子が高い励起エネルギー状態に入りそこから核全体がリアレンジして γ 線崩壊をして基底状態に遷移してゆくという現象が主力である。この場合、入射中性子は核全体を集団励起する事は出来ない事が核分裂しない事の主要原因となっている。[47, 68]

殻模型有効相互作用の新しい理論

殻模型有効相互作用を求める新しい理論を構築、実装した。最新の研究で中性子過剰核などの不安定核では、非中心力の効果や三体力の寄与のように、核力に特徴的な性質が重要な役割を果たすことが分かっている。一方、殻模型は不安定核を論じるのに有効な方法であるが、その有効相互作用を核力から明らかにする理論は未だ発展途上である。特に、中性子過剰核を大規模殻模型計算で論じる時に中心的な役割を果たす、二主殻にまたがる有効相互作用を核力から求めることは摂動論の発散の問題があり、理論的に不可能とされてきた。本研究では、摂動論のre-summationの方法により既存の理論を拡張する事で、二主殻にまたがる有効相互作用を求める方法を構築、実装して、有効相互作用を求めることに成功した。この方法は、Kuo-Krenciglowa method (折れ線グラフ理論)の自然な拡張である Extended Kuo-Krenciglowa method を核子多体系に適用可能なものに改良した方法である。新しい理論は核力から出発して二主殻にまたがる有効相互作用を求める初めての方法であるから、これを用いる事で、現象論的な方法を用いる事なく、核力から出発して中性子過剰核の多彩な性質を明らかにしていくことが今後可能になると期待される。[9, 17, 20]

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。安定核から不安定核まで幅広い領域の核種を統一的に扱うためには広い模型空間を用いる必要があるが、ハミルトニアン行列のLanczos法による対角化という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大規模殻模型計算を可能にした。具体的には、 pf 殻に $g_{9/2}$, $d_{5/2}$ 軌道を加えた $pf g_{9/2} d_{5/2}$ 模型空間における有効相互作用を改良し、この模型空間と有効相互作用を用いて計算を行った。

特にNi同位体に重点を置いて計算を行い、励起状態のエネルギーについて実験をよく再現する結果が得られた。モンテカルロ殻模型法ではスレーター行列式で表される基底の線形結合として各固有状態の波動関数を表すので、個々の基底の変形度を用いることで各状態の原子核形状の解析を行うことが可能

である。この手法を用いることで、陽子数が魔法数 28、中性子数が準魔法数 40 である ^{68}Ni において球形、オブレート変形 (みかん型)、プロレート変形 (レモン型) の 3 つの形状に対応する状態が近いエネルギーに現れる変形共存現象が生じていることや、Ni 同位体での中性子数の変化に伴う形状の変化について理論的に予言した。

また、陽子数や中性子数の変化によって異なる核種で原子核の殻構造が変化すること (殻進化) が知られてきているが、陽子数や中性子数が同じである同一の核種においても、核子の配位が変化することによって異なる状態で原子核の殻構造が変化し得るといふ type II shell evolution を提唱し、 ^{68}Ni における変形共存現象を type II shell evolution によって説明した。[18, 19, 24, 25, 26, 27, 48, 49]

Extended Krenciglowa-Kuo method と Bloch-Horowitz 方程式

有効ハミルトニアンはエネルギー依存性を持つものと、持たないものの 2 つに分類することが出来る。前者として Bloch-Horowitz (BH) ハミルトニアンが知られているが、実際の計算において真の BH ハミルトニアンを求めることは困難であり、摂動展開で近似される。この際に得られる BH 方程式の解について、スペクトル半径を用いた収束判定法を導入し、得られる解とそうではない解の区別を明らかにした。さらにこの代数的な議論を多体論へ拡張した。また後者を導出する方法としては Extended Krenciglowa-Kuo (EKK) method などが知られている。EKK method と BH ハミルトニアンの関係性について研究を行い、EKK method の収束条件と BH 方程式を反復法で解いた場合の収束条件が対一に対応していることが明らかとなり、これにより EKK method により求まる有効ハミルトニアンについて従来とは異なる視点から考察することが可能となった。[28, 50, 51, 52]

3 π 交換 3 体力に起因する有効 2 体力

藤田・宮沢型 3 体力に起因する有効 2 体力を考慮した殻模型計算により、中性子ドリフライン付近の酸素同位体の束縛エネルギーをうまく再現できることが知られている。より高次の 3 体力がどのような効果をもたらすのかを探るため、中間状態に Δ 励起を含んだ 3 π 交換 3 体力を考える。 ^{16}O をコアとして、sd-shell における有効 2 体力を計算した。[21, 53, 54, 55]

ユニタリ模型演算子法による中重核の基底状態の性質

原子核物理学の基本的な目標の一つは核力に基づいた計算によって原子核の構造を理解することである。近年の計算機の発展に伴って、この目標に向けた第一原理計算が可能になりつつある。しかし、計算機の限界から、通常の第一原理計算の適用領域は質量数 12 程度の原子核までに限られている。より重

い原子核の性質を微視的に理解するためには、ユニタリ模型演算子法 (UMOA) や結合クラスター法などの第一原理的なアプローチが望まれる。

本研究では UMOA を用いて ^{16}O 、 ^{40}Ca と ^{56}Ni の基底状態エネルギーと荷電半径の計算を行った。基底状態エネルギーについては、先行研究と同様に実験値と非常に良い一致を示した。荷電半径については 1 粒子-1 空孔励起の影響が重要であることが分かった。この 1 粒子-1 空孔励起の扱いを摂動から直接対角化に切り替えることにより、実験値に近い計算結果を得た。得られた計算結果から ^{16}O と ^{40}Ca の結合エネルギーと密度の関係について議論を行い、両方の原子核について過去の計算に比べて実験値に近づくという結果を得た。しかし、計算結果が人為的に調節可能なパラメータである調和振動子基底の振動数への依存性を残している点についてはさらに議論が必要である。これについては 2 体に加えて、1 体の相関演算子を考慮すると軽減されることが期待される。[22, 29, 56, 57, 58]

ハドロン物理学

ハドロン物理学の研究グループに、10 月 1 日に福嶋健二准教授が着任した。高温・高密度クォーク・グルーオン物質の理論、高電磁場中のクォーク物質の物性、実時間量子シミュレーションなどを専門に研究を行っている。[10, 11, 12, 13, 14]

<報文>

(原著論文)

- [1] D. Steppenbeck et al., "Evidence for a new nuclear 'magic number' from the level structure of Ca-54", *Nature*, **502**, 207-210 (2013).
- [2] Y. Ohkubo et al., "Magnetic moment of the 2083 keV level of Ce-140", *Phys. Rev., C* **87**, 044324 (2013).
- [3] J. Papuga et al., "Spins and Magnetic Moments of K-49 and K-51: Establishing the 1/2(+) and 3/2(+) Level Ordering Beyond N=28", *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 172503 (2013).
- [4] Y. Fujita et al., "High-resolution study of $T_z = +2 \rightarrow +1$ Gamow-Teller transitions in the Ca-44(3He,t)Sc-44 reaction", *Phys. Rev., C* **88**, 014308 (2013).
- [5] G. Burgander et al., "Experimental Study of the Two-Body Spin-Orbit Force in Nuclei", *Phys. Rev. Lett.*, **112**, 042502 (2014).
- [6] Y. Fujita et al., "Observation of Low- and High-Energy Gamow-Teller Phonon Excitations in Nuclei", *Phys. Rev. Lett.*, **112**, 112502 (2014).
- [7] N. Tsunoda, K. Takayanagi, M.Hjorth-Jensen and T. Otsuka, "Multi-shell effective interactions", *Phys. Rev. C.*, **89**, 024313 (2014).

- [8] S. Suchyta, S. N. Liddick, Y. Tsunoda, T. Otsuka, M. B. Bennett, A. Chemey, M. Honma, N. Larson, C. J. Prokop, S. J. Quinn, N. Shimizu, A. Simon, A. Spyrou, V. Tripathi, Y. Utsuno, J. M. VonMoss, “Shape coexistence in ^{68}Ni ”, *Phys. Rev. C* **89**, 021301(R) (2014).
- [9] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, Y. Utsuno, “Novel shape evolution in exotic Ni isotopes and configuration-dependent shell structure”, *Phys. Rev. C* **89**, 031301(R) (2014).
- [10] K. Fukushima and N. Su, “Stabilizing perturbative Yang-Mills thermodynamics with Gribov quantization”, *Phys. Rev. D* **88**, 076008 (2013).
- [11] K. Fukushima and P. Morales, “Spatial modulation and topological current in holographic QCD matte”, *Phys. Rev. Lett.*, **111**, 051601 (2013).
- [12] K. Fukushima, “Turbulent pattern formation and diffusion in the early-time dynamics in the relativistic heavy-ion collision”, *Phys. Rev. C* **89**, 024907 (2014).
- [13] R. Fukuda, K. Fukushima, T. Hayata, Y. Hidaka, “Sign problem and the chiral spiral on the finite density lattice”, *Phys. Rev. D* **89**, 014508 (2014).
- [14] A. Armoni and K. Fukushima, “Silver blaze puzzle in $1/N_c$ expansions of cold and dense QCD matter”, *Phys. Rev. D* (in press).
- (会議抄録)
- [15] T. Abe, P. Maris, T. Otsuka, N. Shimizu, Y. Utsuno and J. P. Vary, “Monte Carlo Shell Model for ab initio nuclear structure”, *EPJ Web of Conferences* **66**, 02001 (2014).
- [16] T. Abe, P. Maris, T. Otsuka, N. Shimizu, Y. Tsunoda, Y. Utsuno, J. P. Vary and T. Yoshida, “Recent development of Monte Carlo shell model and its application to no-core calculations”, *J. Phys.: Conf. Ser.* **454**, 012066 (2013).
- [17] K. Takayanagi, N. Tsunoda, M. Hjorth-Jensen, and T. Otsuka, “Effective Hamiltonian in non-degenerate model space” *Journal of Physics: Conference Series* **445**, 012003 (2013).
- [18] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, Y. Utsuno, “Study of nuclei around $Z = 28$ by large-scale shell model calculations”, *J. Phys.: Conf. Ser.* **445**, 012028 (2013).
- [19] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, Y. Utsuno, “Study of nuclei around $Z = 28$ by large-scale shell model calculations”, *EPJ Web of Conferences* **66**, 02105 (2014).
- (学位論文)
- [20] 角田直文, “Effective nucleon-nucleon interaction in atomic nuclei”, 博士論文
- [21] 小嶋祐人, “Effective Two-Body Nuclear Force from Three-Pion Exchange Three-Body Force”, 修士論文
- [22] 宮城宇志, “Ground state properties of medium-mass nuclei in the unitary-model-operator approach”, 修士論文
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [23] T. Abe, “Monte Carlo shell model towards ab initio nuclear structure”, International Nuclear Physics Conference (INPC2013), Florence, Italy, June 02-07, 2013.
- [24] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, Y. Utsuno, “Study of nuclei around $Z = 28$ by large-scale shell model calculations”, The 25th International Nuclear Physics Conference (INPC 2013), the Palazzo dei Congressi, Firenze, Italy, June 3 (2-7), 2013.
- [25] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, Y. Utsuno, “Study of nuclei around $Z = 28$ by large-scale shell model calculations”, The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPS (APPC12), Makuhari Messe, Chiba, Japan, July 15 (14-19), 2013.
- [26] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, Y. Utsuno, “Monte Carlo shell model calculations of neutron-rich nuclei”, The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPS (APPC12), Makuhari Messe, Chiba, Japan, July 16 (14-19), 2013.
- [27] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, Y. Utsuno, “Study of nuclei around $Z = 28$ by large-scale shell model calculations”, The 12th CNS International Summer School, RIKEN, Wako, Japan, August 31 (August 28-September 3), 2013.
- [28] G. Shimizu, and K. Takayanagi, “Energy-dependent effective Hamiltonian and its perturbation expansion in open shell 3-level Lipkin model”, The 12th CNS international summer school, Riken, Wako, Japan, Aug. 28-Sept. 3, 2013.
- [29] T. Miyagi, T. Abe, T. Otsuka, and R. Okamoto, “Many-body calculations for ground-state properties of medium-mass nuclei”, The 12th CNS international summer school, Riken, Wako, Japan, Aug. 28-Sept. 3, 2013.
- 招待講演
- [30] T. Otsuka, “Shell model calculations with more than one shell”, INT workshop “Computational and Theoretical Advances for Exotic Isotopes in the Medium Mass Region”, INT, Seattle, U.S.A., April 11 (March 25-April 19), 2013.
- [31] T. Otsuka, “Shape coexistence and shell evolution in exotic Ni isotopes”, International Workshop on “Shape Coexistence Across the Chart of the Nuclides”, Kings Manor, York, U.K., April 15 (15-16), 2013.

- [32] T. Otsuka, “Monte Carlo Shell Model and shape phase transitions in exotic nuclei”, Int. Conf. on Nuclear Theory in the Supercomputing Era - 2013, Ames, U.S.A., May 16 (13-17), 2013.
- [33] T. Otsuka, “Fukushima Nuclear Power Plant Accident and Nuclear Physicists”, International Nuclear Physics Conference, Firenze, Italy, June 4 (3-7), 2013.
- [34] T. Otsuka, “Shapes of medium-mass exotic nuclei and MCSM calculations”, ECT*/HIC for FAIR workshop “From Few-Nucleon Forces to Many-Nucleon Structure”, ECT*, Trento, Italy, June 11 (10-14), 2013.
- [35] T. Otsuka, “Driving forces of shell evolution and shapes of exotic nuclei”, Gordon Conference on Nuclear Chemistry, Colby-Sawyer College, New London, U.S.A., June 13 (9-14), 2013.
- [36] T. Otsuka, “Structure Evolutions in Exotic Nuclei”, 12th Asia Pacific Physics Conference, Makuhari, Chiba, July 15 (15-19), 2013.
- [37] T. Otsuka, “Perspectives beyond the Shell Evolution”, French-Japanese Symposium on Nuclear Structure Problems -Organized in the framework of FJNSP LIA-, CNRS, Paris, September 30 (Sep 30-Oct 3), 2013.
- [38] T. Otsuka, “Structure Evolutions in Exotic Nuclei”, Mini-Symposium on Experiment and Theory for Nuclei Close to the Driplines, 2013 Fall Meeting of the APS DNP, Newport News, U.S.A., October 24 (Oct 23-Oct 26), 2013.
- [39] T. Otsuka, “Perspectives of physics of exotic nuclei beyond the shell evolution”, First African Symposium on Exotic Nuclei (IASEN-2013), Cape Town, South Africa, December 2 (Dec 2-6), 2013.
- [40] T. Otsuka, “Shape Evolution in Exotic Nuclei and Nuclear Forces”, Second Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure *Advances in Nuclear Structure at Extreme Conditions*, Bormio, Italy, February 19 (19-22), 2014.
- [41] T. Otsuka, “Type II Shell Evolution due to the Tensor Force”, International Molecule-type Workshop on New correlations in exotic nuclei and advances of theoretical models, YITP, Kyoto, Japan, March 13 (10-23), 2014.
- [42] T. Otsuka, “Type I and II Shell Evolutions in exotic nuclei”, French-US Theory Institute for Physics with Exotic Nuclei (FUSTIPEN) Topical Meeting “Understanding Nuclear Structure and Reactions Microscopically, including the Continuum”, GANIL, Caen, France, March 21 (17-21), 2014.
- [43] T. Abe, “Monte Carlo Shell Model Towards Ab Initio Calculations”, International Conference on Nuclear Theory in the Supercomputing Era - 2013 (NTSE2013), Iowa State University, Ames, Iowa, USA, May 13-17, 2013.
- [44] T. Abe, “Monte Carlo shell model towards ab initio nuclear structure”, ECT* Workshop 2013, From Few-Nucleon Forces to Many-Nucleon Structure, ECT*, Trento, Italy, June 10-14, 2013.
- [45] T. Abe, “K computer and HPCI Strategic Field Program 5”, RIBF Users Meeting 2013, RIKEN, Japan, June 26, 27, 2013.
- (国内会議)
- 一般講演
- [46] 阿部喬, P. Maris, 大塚孝治, 清水則孝, 宇都野穰, J. P. Vary, “Towards ab-initio nuclear structure calculations via no-core Monte Carlo shell model”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 高知大学, 2013 年 9 月 20-23 日.
- [47] 大島佐知子, 藤田丈久, 齋藤勇介, 「重中性子模型による原子核分裂」日本物理学会 2013 年秋季大会, 高知大学, 2013 年 9 月 23 日.
- [48] 角田佑介, 大塚孝治, 清水則孝, 本間道雄, 宇都野穰, 「大規模殻模型計算による $Z = 28$ 近傍核の研究」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 高知大学朝倉キャンパス, 2013 年 9 月 22 日 (20-23 日).
- [49] 角田佑介, 大塚孝治, 清水則孝, 本間道雄, 宇都野穰, 「大規模殻模型計算による $Z = 28$ 近傍核の研究」, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学湘南キャンパス, 2014 年 3 月 29 日 (27-30 日).
- [50] 清水元気, 高柳和雄, 「開殻での Lipkin モデルによる有効相互作用の研究」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 高知大学朝倉キャンパス, 2013 年 9 月.
- [51] 清水元気, 高柳和雄, 「Extended Krenciglowa-Kuo (EKK) method と Bloch-Horowitz (BH) 方程式」, ab initio 核多体ワークショップ, 京都大学吉田キャンパス, 2014 年 2 月.
- [52] 清水元気, 大塚孝治, 高柳和雄, 「Extended Krenciglowa-Kuo (EKK) method と Bloch-Horowitz (BH) 方程式」, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学湘南キャンパス, 2014 年 3 月.
- [53] 小嶋祐人, 大塚孝治, 鈴木俊夫, 阿部喬, 「 3π 交換 3 体力に起因する有効 2 体力」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 高知大学朝倉キャンパス, 2013 年 9 月.
- [54] 小嶋祐人, 大塚孝治, 鈴木俊夫, 阿部喬, 「 3π 交換 3 体力に起因する有効 2 体力」, ab initio 核多体ワークショップ, 京都大学吉田キャンパス, 2014 年 2 月.
- [55] 小嶋祐人, 大塚孝治, 鈴木俊夫, 阿部喬, 「 3π 交換 3 体力に起因する有効 2 体力」, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学湘南キャンパス, 2014 年 3 月.
- [56] 宮城宇志, 阿部喬, 大塚孝治, 岡本良治, 「中重核における荷電半径の計算値の一粒子基底への依存性の分析」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 高知大学朝倉キャンパス, 2013 年 9 月 20-23 日.
- [57] 宮城宇志, 阿部喬, 大塚孝治, 岡本良治, 「ユニタリ模型演算子法を用いた中重核の基底状態についての研究」, 「ab initio 核多体問題ワークショップ」, 京都大学, 2014 年 2 月 10-11 日.

- [58] 宮城宇志, 阿部喬, 大塚孝治, 岡本良治, 「ユニタリ模型演算子法を用いた中重核の基底状態についての研究」, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学湘南キャンパス, 2014 年 3 月 27-30 日.

招待講演

- [59] T. Otsuka, “Tensor force and shell structure - A personal history -”, RCNP Workshop on the Importance of Tensor Interactions in Nuclei and Hadron structure, RCNP, Osaka, July 11 (11-12), 2013.
- [60] 阿部喬, “モンテカルロ殻模型による第一原理計算の現状”, 「ab initio 核多体問題ワークショップ」, 京都大学, 2014 年 2 月 10, 11 日.
- [61] 阿部喬, “Ab-initio nuclear structure”, 新学術領域「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」のまとめと今後を語る研究会, 宮城, 2013 年 12 月 20, 21 日.

(セミナー)

- [62] T. Otsuka, “Evolutions of shell structure and shapes in exotic nuclei”, IPN, Orsay, France, April 29, 2013.
- [63] T. Otsuka, “Fukushima Nuclear Power Plant Accident and Nuclear Physicists”, IPN, Orsay, France, April 30, 2013.
- [64] T. Otsuka, “Evolutions of shell structure and shapes in exotic nuclei”, GANIL, Caen, France, May 3, 2013.
- [65] T. Otsuka, “Tensor force in nuclei”, Hanyang University, Seoul, Korea, May 28, 2013.
- [66] T. Otsuka, “Fukushima Nuclear Power Plant Accident”, GSI Colloquium, GSI, Darmstadt, Germany, August 15, 2013.
- [67] T. Otsuka, “Shell and shape evolutions in exotic nuclei - How magic are ^{54}Ca and $^{68-78}\text{Ni}$? -”, Seminar at Technical University of Darmstadt, Darmstadt, Germany, July 31, 2013.
- [68] 大島佐知子, “核分裂に対する新しい模型”, 埼玉大学, 2014 年 3 月 5 日.

(その他)

- [69] 大塚孝治, “原子核物理学者による環境放射線の大規模緊急測定とそこから学べること”, RADIOISOTOPES (日本アイソトープ協会), **62**, 746 (2013).
- [70] 大塚孝治, 下浦享, 恩田裕一, 篠原厚, 柴田徳思, “パイロット調査による ^{131}I の土壌放射線測定”, RADIOISOTOPES (日本アイソトープ協会), **62**, 752 (2013).

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行っている。基礎的な弦理論や超対称性を持つ場の理論のさまざまな理論的な可能性の追求と同時に、高エネルギー物理や宇宙線物理に関する実験的な検証あるいは宇宙物理的な応用が研究されている。

1.2.1 現象論

コライダー現象論

遠藤、濱口、石川、Stoll は、LHC 実験において vector-like top 粒子の質量を再構成する解析手法について研究した。Full hadronic な終状態を考え、top や higgs-tagger を用いることで、背景事象を落としシグナルを抜き出し質量を再構成する手法を考案した。この研究に関して石川 [77, 78] と Stoll [48] により研究発表が行われている。

SUSY 現象論

北原と吉永は、超対称標準模型において、超対称性粒子の質量差が大きい場合は真空の安定性は質量差が小さい場合と比べて良くなるが、このような場合においても真空の準安定性を考慮に入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]。

フレーバー物理

諸井は、長井、柳田と共に、10 – 100 TeV 程度の質量を持つ超対称粒子がフレーバーや CP の破れに与える影響について、研究を行った [8]。特に右巻きニュートリノを含む模型においては、ニュートリノセクターのフレーバーの破れの効果を将来のレプトンフレーバーの破れの探査実験で観測し得ることを指摘した。さらに同内容に関し、The 3rd KIAS Phenomenology Workshop にて招待講演を行った [63]。

CP の破れ

電気双極子モーメントへ与えられる新しい物理の主要な寄与は2次の量子補正である Barr-Zee ダイアグラムであるが、従来の研究ではゲージ不変な形ではなく、その予言に問題があった。北原は、阿部 (KEK)、久野 (名古屋大)、飛岡 (IPMU) とともに、Pinch 手法を用いて Barr-Zee ダイアグラムのゲージ不変な形をはじめて導出し、2HDM における電気双極子モーメントの大きさを調べた [6]。

異常磁気モーメント

三嶋は電子の異常磁気モーメントに対する量子電磁気力の非摂動的寄与の大きさが微細構造定数 α の5次となることを示した [83], [82]。

遠藤、濱口、吉永は岩本 (IPMU) と共にミュオン異常磁気モーメントのアノマリーが示唆する超対称模型の LHC におけるシグナルを調べた [2]。

遠藤、濱口、北原、吉永はスミューオンの混合が大きい超対称模型を議論した。スレプトンによる真空の安定性を軸とすることで、加速器実験とレプトンフレーバー実験でこのような模型を相補的に探索可能であることを示した。この成果は日本物理学会および KEKPH FALL 2013 という国際会議で発表された [91, 54]。

遠藤、濱口、北原、諸井は岩本 (IPMU) とともに、ILC 実験においてスレプトンとニュートラリーノを観測できれば、ミュオン粒子の異常磁気モーメントへの超対称性粒子の寄与が再構成できることを示した [5]。

暗黒物質の直接検出

リュウは修士論文において、CDMS 実験で観測された信号を 10 GeV の暗黒物質と解釈し、その現象論 (コライダー、フレーバー、間接検出など) について調べた [38]。

高エネルギー宇宙線

諸井は、伊部、岩本、松本、横崎と共に AMS-02 で観測された高エネルギー中の陽電子フラックスの起源について、研究を行った [7]。そして、不安定なグラビティーノが暗黒物質であるようなシナリオにおいて、その寿命が 10^{26} 秒程度であれば AMS-02 の結果を説明し得ることを指摘した。

リュウは、R-パリティが小さく破れた超対称模型において、グラビティ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 130 GeV ガンマ線の超過を説明可能であることを示した [24]。

論文 [25] は、最近 IceCube において発見された PeV スケールのニュートリノが、宇宙年齢よりはるかに短い寿命を持つ親粒子の崩壊により生じた可能性を指摘し、親粒子のある質量領域が観測的に許されていることを示した。

超伝導コズミックストリングに対する宇宙論的制限

中山は宮本 (東大宇宙線研) とともに、超伝導コズミックストリングに対する宇宙論的制限を詳しく調べ、コズミックストリングを流れる電流の大きさと張力に対して、一般的な制限を導いた [9]。

アクシオンの宇宙論

アクシオンは強い CP 問題を解決する Peccei-Quinn 機構において現れる南部ゴールドストーン粒子であり、宇宙論に様々な影響を及ぼす。特に近年、アクシオンの持つ非ガウスの等曲率揺らぎ、ドメインウォールからのアクシオン放出、モジュライからのアクシオン生成など、理論的に色々な発展があった。中山は川崎（東大宇宙線研）とともに、最近のアクシオン宇宙論に関する発展をまとめたレビューを執筆した [11]。

超対称アクシオン模型におけるゲージノ質量

中山は、柳田（Kavli IPMU）とともに、超対称アクシオン模型において、ゲージノの質量が補正を受け、アノマリー伝達模型の予言から大きくずれる可能性があることを示した [12]。

超重重力理論におけるインフレーション模型

中山は、川崎、北嶋（東大宇宙線研）、柳田（Kavli IPMU）とともに、最近 LHC の結果から示唆されている重いグラビティーノと整合的な超対称ハイブリッドインフレーション模型を構築した [10]。

中山は、高橋（東北大）、柳田（Kavli IPMU）とともに、超重重力理論の枠内で広いクラスのカオティックインフレーションを考察し、宇宙背景放射温度揺らぎのスペクトル指数や、テンソル揺らぎの大きさ等、従来よりも遥かに広いパラメータをとることが出来ることを示した [13, 16]。また、同様の模型を右巻きスカラーニュートリノをインフラトンとみなすことで実現可能であることを示した [21]。

スカラー場のダイナミクス

諸井、向田、中山、瀧本は、二重井戸型あるいはメキシカンハット型の、対称性を破るポテンシャルを持つスカラー場のダイナミクスを詳しく考察し、スカラー場の初期値が非常に大きい場合であっても、粒子生成および熱的散逸の効果により、一旦スカラー場は原点にトラップされ、対称性が回復することを示した。更にこの解析を超対称模型におけるスアクシオンに適用し、その宇宙論を議論した [14]。

向田、中山、瀧本は、 Z_2 対称性を持ったスカラー場のダイナミクスを詳しく調べた。このスカラー場は振動的に安定であるが、背景粒子との散逸効果により、スカラー場の振動エネルギーが早い段階で輻射エネルギーに転化される場合があることを示した [19]。

最近、スカラー場とアインシュタインテンソルが微分結合を持つような系が、宇宙初期で自然にインフレーションを引き起こすことから、注目されている。神野、向田、中山は、このような系におけるインフレーション後のスカラー場の振動期におけるダイナミクスを解析し、この時期での宇宙膨張則が通

常のスカラー場振動期の場合と大きく異なることを示した [20]。

モジュライ問題とアクシオン暗黒輻射

中山は、檜垣（KEK）、高橋（東北大）とともに、具体的なコンパクト化模型における超弦理論モジュライの宇宙論を調べた。一般にモジュライがシフト対称性を持つとき、モジュライはそのアクシオン成分に崩壊し、観測と矛盾する量のアクシオン暗黒輻射が生成され得ることを示した [15]。また、宇宙初期に原始磁場が存在していた場合、アクシオンの一部が光子に変換されることから、アクシオン暗黒輻射の量に対する宇宙論的制限を導いた [17]。

原始重力波による初期宇宙探査

神野、諸井、中山は将来の干渉計におけるインフレーション起源背景重力波の直接観測により、初期宇宙での再加熱や相転移、エントロピー生成など様々な現象を検証可能であることを示した [18]。同内容について、諸井は PLANCK 2013 会議における招待講演を行った [64]。

修正超重重力理論

寺田は、標準模型を超える物理理論や量子重力の有効理論の候補として、またインフレーション理論への応用の為、超重重力理論の拡張に関する研究を行った。首都大、Kavli IPMU、ハノーファー大（当時）の Ketov 氏との共同研究 [22] では、一般の正則関数を作用としてもつ純粋な超重重力理論を提唱し、ボソン場の作用を書き下すと共に、ワイルテンソルの影響によりインフレーションが不安定になる可能性を指摘した。この成果は国際学会等で発表された [49, 88]。

また寺田は首都大、Kavli IPMU、オスロ大（当時）の Ketov 氏と共に $F(R)$ 超重重力理論におけるインフレーションの可能性について再考した。 $F(R)$ 超重重力理論においては Starobinsky インフレーションは起こらないという結論に到達し、 $F(R)$ 超重重力理論を拡張する 2 種類の理論について、ボソン場の作用を書き下し、等価な理論へ変形し、運動項の符号やインフレーションの条件などについて解析を行った [23]。この成果は国際学会等で発表された [89, 50, 51]。

東大 RESCEU、早稲田大との共同研究において寺田は修正超重重力理論における Starobinsky インフレーションの後の宇宙の再加熱過程を研究し、国際学会等で結果を報告した [52, 53, 90]。

1.2.2 弦理論

インスタントン分配関数の構造

松尾と張は東工大の菅野とともに $N=2$ 超対称ゲージ理論の分配関数が満たす漸化式を導いた。漸化式は Degenerate Double Affine Hecke 代数と呼ばれる量子群の構造を持っており、適当な読み替えの下で高階スピン生成子を含む共形代数 (W 代数) に対する Ward・高橋恒等式に同一視することができた。これにより Quiver 型のゲージ理論の分配関数が戸田場の理論の相関関数と等しいという AGT 予想の一つの証明を与えた。[26] また、張はこの内容をもとに学位論文をまとめた [36]。

自己双対場の量子化

松尾は台湾大学のグループとともに M5 ブレーンの定式化に取り組んでいる。M5 ブレーン上には自己双対 2 形式場が存在していて、この場にゲージ対称性を与える必要がある。今年の研究では自己双対場の量子化の経路積分量子化、および正準量子化を考え、これらの場が持つ位相因子をどのように量子化に組み込むかについて議論を行った。[27] [108]。

曲がった空間での超対称ゲージ理論

川野は、去年度の同様に、5 次元の SuperYang-Mills 理論の 3 次元球と 2 次元リーマン面へのコンパクト化について調べた。特に、去年度の丸い球を今年度は squash された球への拡張へ試みた。

松宮は、昨年度に引き続き、 $S^3 \times \Sigma$ 上の 5 次元 $\mathcal{N} = 2$ Yang-Mills 理論の研究を行った。特に、 S^3 に巻き付いた Wilson ループが超対称性を保つ条件を求め、そのときの期待値を計算した。この結果は、昨年度の研究とともに博士論文にまとめた。[37]

超弦理論の摂動論と超モジュライ空間

大森、立川は超弦理論の摂動論がボソンの弦理論の摂動論に帰着するための必要条件を超モジュライ空間の幾何学の観点から与えた。[28]

大森は、本研究を含め、超モジュライ空間の幾何学を用いた超弦理論の摂動論の発展を修士論文にまとめた。[39]

4 次元の場の理論

立川は、カリフォルニア工科大の Gadde、丸吉、顔とともに、ラグランジアンのない $\mathcal{N} = 2$ 超対称理論の典型例である T_N 理論に $\mathcal{N} = 1$ 場を結合させて得られる系の力学を調べた。双対性については

[29]、その詳細は [30]、超対称性を破る系については [31] に発表した。

立川は、イスラエル Weizmann 研の Aharony とプリンストン高等研の Seiberg とともに、ゲージ理論においてこれまで見逃されていた離散的な θ 角について議論した [32, 73]。また、立川は、インドのチェンナイ工科大の Bhardwaj とともに、可能な $\mathcal{N} = 2$ 超対称ゲージ理論を分類した [33]。

また、立川は、IPMU の渡辺と、4 次元のラグランジアンのない $\mathcal{N} = 2$ 超対称理論の線演算子について調べ、その結果を [74] で報告した。また、立川は、4 次元のゲージ理論の強結合極限を用いて、曲がった空間上の $SO(8)$ 群のインスタントンモジュライのあらたな表式を求めた [75]。

二次元超対称理論

立川は、東大 IPMU の堀、カリフォルニア工科大の Park と共に、M2 ブレーンが M5 ブレーンの特異点を持つ場合に生じる二次元超対称理論について調べた [34]。また、東大 IPMU の堀、Eager、ニューヨーク州立大 Stony Brook 校の Benini と共に、二次元超対称ゲージ理論の T^2 上の分配関数を局所化によって計算した [35]。

場の理論と数学

また、立川は、純粋数学の種々の研究会において招待を受け、上記の内容を数学者になるべくわかるような形で講演を行った [109, 110, 111]。

<受賞>

- [1] 諸井健夫、木村利栄理論物理学賞 (川崎雅裕氏 (東京大学宇宙線研究所) 及び郡和範氏 (高エネルギー加速器研究機構) との共同受賞)、湯川記念財団、平成 26 年 1 月 22 日。

<報文>

(原著論文)

- [2] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto and T. Yoshinaga, “Muon $g - 2$ vs LHC in Supersymmetric Models,” JHEP **1401**, 123 (2014) [arXiv:1303.4256 [hep-ph]].
- [3] M. Endo, K. Hamaguchi, T. Kitahara and T. Yoshinaga, “Probing Bino contribution to muon $g - 2$,” JHEP **1311**, 013 (2013) [arXiv:1309.3065 [hep-ph]].
- [4] T. Kitahara and T. Yoshinaga, “Stau with Large Mass Difference and Enhancement of the Higgs to Diphoton Decay Rate in the MSSM,” JHEP **1305** (2013) 035.
- [5] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto, T. Kitahara and T. Moroi, “Reconstructing Supersymmetric Contribution to Muon Anomalous Magnetic Dipole Moment at ILC,” Phys. Lett. B **728** (2014) 274.

- [6] T. Abe, J. Hisano, T. Kitahara and K. Tobioka, “Gauge invariant Barr-Zee type contributions to fermionic EDMs in the two-Higgs doublet models,” *JHEP* **1401** (2014) 106.
- [7] M. Ibe, S. Iwamoto, S. Matsumoto, T. Moroi and N. Yokozaki, “Recent Result of the AMS-02 Experiment and Decaying Gravitino Dark Matter in Gauge Mediation,” *JHEP* **1308** (2013) 029.
- [8] T. Moroi, M. Nagai and T. T. Yanagida, “Lepton Flavor Violations in High-Scale SUSY with Right-Handed Neutrinos,” *Phys. Lett. B* **728** (2014) 342.
- [9] K. Miyamoto and K. Nakayama, “Cosmological and astrophysical constraints on superconducting cosmic strings,” *JCAP* **1307**, 012 (2013) [arXiv:1212.6687 [astro-ph.CO]].
- [10] M. Kawasaki, N. Kitajima, K. Nakayama and T. T. Yanagida, “Heavy gravitino in hybrid inflation,” *JCAP* **1306**, 037 (2013) [arXiv:1301.6281 [hep-ph]].
- [11] M. Kawasaki and K. Nakayama, “Axions: Theory and Cosmological Role,” *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **63**, 69 (2013) [arXiv:1301.1123 [hep-ph]].
- [12] K. Nakayama and T. T. Yanagida, “Anomaly mediation deformed by axion,” *Phys. Lett. B* **722**, 107 (2013) [arXiv:1302.3332 [hep-ph]].
- [13] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “Polynomial Chaotic Inflation in the Planck Era,” *Phys. Lett. B* **725**, 111 (2013) [arXiv:1303.7315 [hep-ph]].
- [14] T. Moroi, K. Mukaida, K. Nakayama and M. Takimoto, “Scalar Trapping and Saxion Cosmology,” *JHEP* **1306**, 040 (2013) [arXiv:1304.6597 [hep-ph]].
- [15] T. Higaki, K. Nakayama and F. Takahashi, “Moduli-Induced Axion Problem,” *JHEP* **1307**, 005 (2013) [arXiv:1304.7987 [hep-ph]].
- [16] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “Polynomial Chaotic Inflation in Supergravity,” *JCAP* **1308**, 038 (2013) [arXiv:1305.5099 [hep-ph]].
- [17] T. Higaki, K. Nakayama and F. Takahashi, “Cosmological constraints on axionic dark radiation from axion-photon conversion in the early Universe,” *JCAP* **1309**, 030 (2013) [arXiv:1306.6518 [hep-ph]].
- [18] R. Jinno, T. Moroi and K. Nakayama, “Inflationary Gravitational Waves and the Evolution of the Early Universe,” *JCAP* **1401**, 040 (2014) [arXiv:1307.3010].
- [19] K. Mukaida, K. Nakayama and M. Takimoto, “Fate of Z_2 Symmetric Scalar Field,” *JHEP* **1312**, 053 (2013) [arXiv:1308.4394 [hep-ph]].
- [20] R. Jinno, K. Mukaida and K. Nakayama, “The universe dominated by oscillating scalar with non-minimal derivative coupling to gravity,” *JCAP* **1401**, 031 (2014) [arXiv:1309.6756 [astro-ph.CO]].
- [21] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “Chaotic Inflation with Right-handed Sneutrinos after Planck,” *Phys. Lett. B* **730**, 24 (2014) [arXiv:1311.4253 [hep-ph]].
- [22] S. V. Ketov and T. Terada, “New Actions for Modified Gravity and Supergravity,” *JHEP* **1307** (2013) 127 [arXiv:1304.4319 [hep-th]].
- [23] S. V. Ketov and T. Terada, “Old-minimal supergravity models of inflation,” *JHEP* **1312** (2013) 040 [arXiv:1309.7494 [hep-th]].
- [24] S. P. Liew, “Gamma-ray line from radiative decay of gravitino dark matter,” *Phys. Lett. B* **724** (2013), pp. 88 [arXiv:1304.1992 [hep-ph]].
- [25] Y. Ema, R. Jinno and T. Moroi, “Cosmic-Ray Neutrinos from the Decay of Long-Lived Particle and the Recent IceCube Result,” arXiv:1312.3501 [hep-ph].
- [26] S. Kanno, Y. Matsuo and H. Zhang, “Extended Conformal Symmetry and Recursion Formulae for Nekrasov Partition Function,” *JHEP* **1308**, 028 (2013) [arXiv:1306.1523 [hep-th]].
- [27] W. -M. Chen, P. -M. Ho, H. -c. Kao, F. S. Khoo and Y. Matsuo, “Partition function of a chiral boson on a 2-torus from the Floreanini-Jackiw Lagrangian,” *PTEP* **2014**, no. 3, 033B02 [arXiv:1307.2172].
- [28] K. Ohmori and Y. Tachikawa, “Notes on reductions of superstring theory to bosonic string theory,” *JHEP* **1308**, 024 (2013) [arXiv:1303.7299, arXiv:1303.7299 [hep-th]].
- [29] A. Gadde, K. Maruyoshi, Y. Tachikawa and W. Yan, “New $N=1$ Dualities,” *JHEP* **1306** (2013) 056 [arXiv:1303.0836 [hep-th]].
- [30] K. Maruyoshi, Y. Tachikawa, W. Yan and K. Yonekura, “ $N=1$ dynamics with T_N theory,” *JHEP* **1310** (2013) 010 [arXiv:1305.5250 [hep-th]].
- [31] K. Maruyoshi, Y. Tachikawa, W. Yan and K. Yonekura, “Dynamical Supersymmetry Breaking with T_N Theory,” *Phys. Rev. D* **88**, 085037 (2013) [arXiv:1308.0064 [hep-th]].
- [32] O. Aharony, N. Seiberg and Y. Tachikawa, “Reading between the lines of four-dimensional gauge theories,” *JHEP* **1308** (2013) 115 [arXiv:1305.0318, arXiv:1305.0318 [hep-th]].
- [33] L. Bhardwaj and Y. Tachikawa, “Classification of 4d $N=2$ gauge theories,” *JHEP* **1312**, 100 (2013) [arXiv:1309.5160, arXiv:1309.5160 [hep-th]].
- [34] K. Hori, C. Y. Park and Y. Tachikawa, “2d SCFTs from M2-branes,” *JHEP* **1311** (2013) 147 [arXiv:1309.3036 [hep-th]].
- [35] F. Benini, R. Eager, K. Hori and Y. Tachikawa, “Elliptic genera of two-dimensional $N=2$ gauge theories with rank-one gauge groups,” *Lett. Math. Phys.* **104** (2014) 465 [arXiv:1305.0533 [hep-th]].

- (会議抄録)
- (国内雑誌)
- (学位論文)
- [36] 博士論文: H. Zhang, “Selberg Integral and Gauge Toda Duality”
- [37] 博士論文: N. Matsumiya, “Localization of Five Dimensional Super Yang-Mills Theory and 4D/2D Duality ”
- [38] 修士論文: Seng Pei Liew, “Quest for light dark matter”
- [39] 修士論文: 大森寛太郎, “超幾何を用いた摂動的超弦理論の定式化と不定性の固定”
- (著書)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [40] M. Endo, “Reconstructing SUSY Contribution to Muon $g-2$ at ILC,” International Workshop on Future Linear Colliders, 11-15 November 2013, Tokyo
- [41] K. Ishikawa, “LHC phenomenology of SUSY model with vector-like matters,” PASCOS 2013, Taipei, November 2013.
- [42] T. Kitahara, “Gauge invariant Barr-Zee type contributions to fermionic EDMs in the 2HDMs,” The annual Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology 2013 FALL, KEK, October 2013.
- [43] T. Kitahara, “Probing Bino Contribution to Muon $g-2$,” SUSY: Model-building and Phenomenology, Kavli IPMU, December 2013.
- [44] T. Kitahara, “Gauge invariant Barr-Zee type contributions to fermionic EDMs in the two-Higgs doublet models,” Basis of the Universe with Revolutionary Ideas 2014, Toyama University, February 2014.
- [45] K. Nakayama, “Polynomial chaotic inflation in supergravity : toward observable B-modes”, CMB2013, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, Japan (2013/6/10).
- [46] K. Nakayama, “Moduli-Induced Axion Problem”, SUSY2013, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italy (2013/08/26).
- [47] K. Nakayama, “Axionic dark radiation from string moduli” PASCOS2013, GIS International Convention Center, Taiwan (2013/11/20) .
- [48] M. Stoll, “Reconstructing vector-like top partner from fully hadronic final states,” Basis of the Universe with Revolutionary Ideas 2014 (BURI 2014), University of Toyama, February 2014.
- [49] Takahiro Terada, “General holomorphic pure supergravity and its cosmology,” 19th International Summer Institute on Phenomenology of Elementary Particles and Cosmology, Korea, August.
- [50] Takahiro Terada, “Starobinsky inflation in the old minimal supergravity,” KEK-PH2013 FALL, Ibaraki, October.
- [51] Takahiro Terada, “Stability of Inflationary Dynamics in $F(\mathcal{R})$ Supergravity,” 19th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology, Taiwan, November.
- [52] Takahiro Terada, “Inflaton decay in the SUSY R^2 inflation,” 2nd Winter Toyoma Mini-Workshop on Particle Physics and Cosmology “Basis of the Universe with Revolutionary Ideas 2014”, Toyama, February.
- [53] Takahiro Terada, “ R^2 Inflation and Reheating in Supergravity,” The 1st KEK Workshop on “Beyond the Standard Model 2014”, Ibaraki, March.
- [54] Takahiro Yoshinaga, “Probing Neutralino Contribution to Muon $g-2$,” KEKPH FALL, KEK, Oct. 2 2013
- [55] K. Mukaida, “Dissipative Effects on Reheating After Inflation,” PASCOS 2013, GIS International Convention Center, Taiwan (2013/11/20).
- [56] 向田享平, “Thermalization after/during Reheating”, Basis of the Universe with Revolutionary Ideas (BURI 2014), 富山大学 (2014/02/14).
- [57] 神野隆介, “Decay of long-lived particle and the recent IceCube result,” Basis of the Universe with Revolutionary Ideas (BURI), 富山大学, 2014年2月13 - 14日
- [58] N. Matsumiya “5D SYM and 2D q-Deformed YM” KIAS-YITP Joint Workshop 2013: String Theory, Black Holes and Holography , Kyoto, Japan (Jul. 2013)
- 招待講演
- [59] M. Endo, “Flavor vs Dark Matter,” Workshop on Particle Physics of the Dark Universe, 2013. 4. 4, Tokyo
- [60] M. Endo, “Probing SUSY Contributions to Muon $g-2$ at LHC and ILC,” Particle Physics and Cosmology after the Discovery of Higgs Boson,” 2013. 10. 21–25, Tohoku
- [61] K. Hamaguchi, “Supersymmetry after Higgs discovery,” ECFA Linear Collider Workshop 2013, May 29, 2013, DESY, Hamburg.
- [62] K. Hamaguchi, “Supersymmetry after Higgs discovery,” Higgs and Beyond, June 6, 2013, Tohoku U., Sendai.
- [63] T. Moroi, “Flavor and CP Violations as Probes of BSM Physics,” The 3rd KIAS Phenomenology Workshop (November 11 – 15, 2013), Seoul, Korea.

- [64] T. Moroi, “Probing Beyond-the-Standard-Model Physics with Inflationary Gravitational Waves,” PLANCK 2013 (May 20 – 24, 2013), Bonn, Germany.
- [65] K. Nakayama, “Scalar Fields in the Universe”, KEKPH2013 FALL, KEK (2013/10/01-02).
- [66] K. Nakayama, “Dynamics of reheating after inflation”, Tohoku Forum for Creativity, Particle Physics and Cosmology after the discovery of Higgs boson, Tohoku University (2013/10/24).
- [67] K. Nakayama, “Dark Matter Indirect Detection”, CTA LST General Meeting, University of Tokyo, Kashiwa Campus (2014/01/14).
- [68] Yutaka Matsuo, “Extended conformal symmetry and recursion formulae for Nekrasov partition function”, Todai/Riken joint workshop on Super Yang-Mills, solvable systems and related subjects, The University of Tokyo, October 23-24, 2013.
- [69] Yutaka Matsuo, “Extended conformal symmetry and recursion formulae for Nekrasov partition function”, PASCOS2013, Taipei, November 20-26, 2013.
- [70] Yutaka Matsuo, “Dunkl operator and degenerate double affine Hecke algebra in supersymmetric gauge theories”, Workshop ‘New Topics on Stochastic and Quantum Interacting Particle Systems’, The University of Tokyo, 10 December 2013.
- [71] Yutaka Matsuo, “Extended conformal symmetry and recursion formulae for Nekrasov partition function”, IV International Conference in the memory of Alexei Zamolodchikov, CFT and Integrability, Sogang University, Seoul, December 16-20, 2013.
- [72] Yutaka Matsuo, “Instanton partition function, DDAHA and recursion formula”, “Progress in the synthesis of integrabilities arising from gauge-string duality” JSPS/RFBR collaboration, Ootsu, Japan, March 4-7, 2014.
- [73] Y. Tachikawa, “Line operators and dualities of 4d gauge theories”, Workshop on Gauge and String Theory, Kavli IPMU, August 16–September 6.
- [74] Y. Tachikawa, “On lines in class-S theories and in q-deformed Yang-Mills”, Workshop on “Integrability, Symmetry and Quantum Space-Time”, 京都大学基礎物理研究所, January 7-9, 2014
- [75] Y. Tachikawa, “Instantons and string theory”, Peter Goddard Symposium, Kavli IPMU, March 31, 2014.
- (国内会議)
一般講演
- [76] 石川 和哉, “SUSY searches in V-GMSB,” 原子核三者若手 夏の学校, 愛知, 2013 年 8 月.
- [77] 石川 和哉, “Reconstructing vector-like top with fully hadronic decay,” 松江現象論研究会 2014, 島根, 2014 年 2 月.
- [78] 石川 和哉, “Reconstruction of vector-like top in fully hadronic final states,” 日本物理学会, 東海大学, 2014 年 3 月.
- [79] 北原鉄平, “FCNCを禁止した一般的な 2HDM におけるフェルミオン電気双極子能率,” 日本物理学会 2013 年秋季大会, 高知大学, 2013 年 9 月.
- [80] 北原鉄平, “ILC によるミュオン異常磁気能率に対する超対称性粒子の寄与の再構成,” 日本物理学会 2014 年年次大会, 東海大学, 2014 年 3 月.
- [81] 三嶋剛, “原子分光を用いたミニ電荷粒子の探索,” 日本物理学会, 高知大学, 2013 年 9 月 21 日.
- [82] 三嶋剛, “Bound State Effect on the Electron g-2”, 松江現象論研究会 2014, くにびきメッセ, 2014 年 2 月 9 日.
- [83] 三嶋剛, “レプトン g-2 に対する仮想ポジトロニウムの寄与,” 日本物理学会, 東海大学, 2014 年 3 月 28 日.
- [84] 中山和則, “Axion overproduction from modulus decay,” 日本物理学会 2013 年秋季大会, 高知大学 (2013/09/23).
- [85] 瀧本真裕, “大きい初期値を持ったサクシオンのトラッピングとその後の発展”, 日本物理学会, 高知大学, 2013 年 9 月
- [86] 瀧本真裕, “大きい初期値を持ったサクシオン場の振る舞い”, 基研研究会, 京都大学基礎物理学研究所, 2013 年 8 月
- [87] 瀧本真裕, “ z_2 対称性を持ったスカラー場の初期宇宙論”, 日本物理学会, 東海大学, 2014 年 3 月
- [88] 寺田隆広, “一般の正則関数を用いた純粋超重力理論とその宇宙論”, 素粒子物理学の進展 2013, 基礎物理学研究所, 8 月.
- [89] 寺田隆広, “ $F(R)$ 超重力理論における R^2 インフレーション後のグラヴィティノー生成量の評価”, 日本物理学会秋季大会, 高知大学, 9 月.
- [90] 寺田隆広, “超重力理論における R^2 インフレーション後の再加熱”, 第 69 回日本物理学会年次大会, 東海大学, 3 月.
- [91] 吉永尊洸, “Muon g-2 を説明する超対称モデルの検証可能性について,” 日本物理学会 2013 年秋季大会 高知大学 2013 年 9 月 20 日
- [92] 吉永尊洸, “Muon g-2 と暗黒物質を説明する超対称モデルの検証可能性について,” 日本物理学会 2014 年年次大会 東海大学 2014 年 3 月 30 日
- [93] 向田享平, “Dissipative Effects on Reheating After Inflation”, 素粒子物理学の進展 2013, 京都大学基礎物理学研究所 (2013/8/8).
- [94] 向田享平, “Thermalization after/during Reheating”, 日本物理学会 第 69 回年次大会, 東海大学 (2014/03/27).
- [95] “高エネルギー相転移を重力波で探る” 神野隆介, 2013 年度日本物理学会秋季大会, 高知大学, 2013 年 9 月 20 - 23 日

- [96] 神野隆介, “高エネルギー相転移を重力波で探る”, 素粒子物理学の進展 2013, 京都大学基礎物理学研究所, 2013 年 8 月 5 - 9 日
- [97] 神野隆介, “Testing slow-roll inflation with the deflection of hydrogen 21cm line”, 2013 年度日本物理学会春季大会, 東海大学, 2014 年 3 月 27 - 30 日
- [98] 大森寛太郎, “超弦理論とモジュライ積分”, 日本物理学会, 高知大学, 2013 年 9 月
- [99] 松宮就章 “5 次元 SYM と 2 次元 q-YM” 基研研究会 場の理論と弦理論, 京都, 2013 年 8 月

招待講演

- [100] 遠藤 基, “Muon g-2 in SUSY from LHC to ILC,” 松江現象論研究会, 2014. 2. 8, 島根
- [101] 濱口幸一, “126 GeV and SUSY”, 新学術領域研究「先端加速器 LHC が切り拓くテラスケールの素粒子物理学～真空と時空への新たな挑戦～」研究会, 2013 年 5 月 25 日, 名古屋大学
- [102] 濱口幸一, “126 GeV Higgs から テラスケールへ”, 日本物理学会, 2013 年 9 月 21 日, 高知大学
- [103] 濱口幸一, “レプトジェネシス と二重ベータ崩壊 … と BICEP2?” 日本物理学会, 2014 年 3 月 28 日, 東海大学
- [104] 中山和則, “SUSY Dark Matter,” 先端加速器 LHC が切り拓くテラスケールの素粒子物理学 ～真空と時空への新たな挑戦～ 研究会, 名古屋大学 (2013/5/25).
- [105] 中山和則, “Inflationary gravitational waves as a probe of the early Universe,” DECIGO ワークショップ, 東京大学 (2013/10/27).
- [106] 中山和則, “Anomaly mediation deformed by axion”, Basis of the Universe with Revolutionary Ideas (BURI2014), 富山大学 (2014/02/14)
- [107] 中山和則, “初期宇宙におけるスカラー場のダイナミクス”, 日本物理学会 第 69 回年次大会, 東海大学 (2014/03/27).
- [108] Yutaka Matsuo, “Nonabelian gerbe and its application to string theory”, 非可換幾何湯谷研究集会, November 26-29, 2013.
- [109] 立川裕二, “On some conjectures extracted from supersymmetric quantum field theories”, 第 16 回第数軍と量子群の表現論, 箱根, 6 月 2 日-6 月 5 日, 2014
- [110] 立川裕二, “頂点作用素代数に関する新たな沢山の予想について”, 研究集会頂点作用素代数と超弦理論, 立教大学, 1 月 31 日, 2 月 1 日, 2014
- [111] 立川裕二, “ゲージ理論の双対性とハイパーケーラー空間”, “Geometry, Physics and Representation Theory”, 名古屋大学, 2 月 21 日, 2 月 22 日, 2014
(セミナー)
- [112] 北原鉄平, “電気双極子を用いた粒子反粒子対称性の破れの探索と new physics”, 素粒子カフェ Vol. 43 一般向け招待セミナー, 新宿, 2014 年 1 月.

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)の分光実験を進めている。CERNの反陽子減速器にて反陽子ヘリウム原子と反水素原子を、J-PARC及びイタリアのDAΦNE加速器にてK中間子原子・原子核を、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(魔法数の喪失や新魔法数の発見)、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、反陽子ヘ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 $\bar{p}\text{He}^+$)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 $n \sim 38$ と軌道角運動量子数 $l \sim n+1 \sim 38$

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 $M_{\bar{p}}/m_e$ を求めて、陽子のものと等価か検証する事ができる[16]。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。2013年度は、CERNの反陽子減速器ADの運転が停止されたため、実験は行われなかった。現在、早野研究室とマックスプランク量子光学研究所は、2012年度までに行われた精密分光実験のデータを解析している。ロシアJINR研究所のV.I. Korobovらは、反陽子ヘリウム原子の遷移エネルギーについて、高次の量子電磁力学的補正の計算を行ったが、その精度は10桁以上に達した。この計算結果は、Physical Review Aの編集長注目記事に指定された。我々の実験結果との比較が期待されている。

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ヘリウム原子の新たな共鳴線の検出について、論文を発表した[29]。反陽子ヘリウムのマイクロ波分光の詳細な解析結果についても論文を発表した[10]。この他にも、反陽子ヘリウム原子を超流動ヘリウム中で生成してレーザー分光を行ったが、フェルミ縮退した媒質中で、反陽子ヘ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。これに関連して、multi-pixel photon counterを用いたプラスチックシンチレータ検出器の開発を行い、その特性について論文を発表した[32]。また実験に必要な半導体励起型固体レーザーや、多チャンネル波形記憶装置、セグメント型シンチレータの開発なども行った(早野・山田)

超低速反陽子ビームのための静電ビームライン開発研究

CERNの反陽子減速器施設で反物質の性質の測定やCPT対称性の検証を目指した実験を行っている複数の実験グループは、標的中に反陽子を静止させて反水素や反陽子ヘリウムを生成し、また実験の精度を向上させるために、反陽子減速器から供給される運動エネルギー5.3 MeVの反陽子ビームを減速材や線形減速器を用いて数keVから数百keV程度に減速して使用している。現時点に於いてはこの減速の際に7割から9割超の反陽子を減速材や実験設備の壁との反応で失うため効率が低く、またビームがその減速過程で位相空間上で広がるために実験精度の向上には限界がある。この効率・精度を上げるために反陽子減速器からの反陽子ビームを電子冷却によって、冷却しながら更に100 keVまで減速させる直径10 mのストレージリングであるELENA(Extra Low ENergy Antiproton storage ring)の設計・建設が進められている。そのELENAプロジェクトの一部として、100 keVの反陽子ビームを各実験グループに輸送する静電ビームラインも建設することになっている。我々はCERNの加速器チームに協力する形で、反陽子ビームの収束・発散を制御する四重極レンズや進行方向を曲げる球型ディフレクター、ビームラ

インの交差する位置に設置する5叉路のスイッチの電場並びにビームの軌道のシミュレーションを行い、設計に貢献した。また静電ビームライン上のビームの通過位置を0.5-1.5 mmの空間分解能で検出するビームプロファイルモニターは我々が設計し提供する事になっており開発が進められている。これらの内容については2014年度の初めにテクニカルデザインレポートとして公表される予定である。

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、原子核表面付近の核子と対消滅する。高エネルギー領域では、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 A の $2/3$ 乗に比例 ($\sigma_{ann} \propto A^{2/3}$) する事が知られている。一方、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、反陽子の波としての性質が現れ、上記の質量数依存性からのズレが観測されることが予想される。しかし、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。そこで我々は、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-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ており、反陽子の原子核中での消滅反応を観測することに初めて成功した。

2013年度は大きく3つに分けて、取得したデータの解析、シミュレーション、実験で用いた標的の厚さの測定を行った。実験で用いたプラスチックシンチレータで得られたシグナルのアナログ波形から、標的中で消滅した反陽子由来の二次粒子を時間的に特定し、標的中での消滅反陽子数を求めた。また標的原子核に散乱されて壁に消滅した反陽子の数から、ラザフォード散乱の公式を用いて入射反陽子数が1パルス当たり $10^4 \sim 10^5$ 個である事が分かった。これに加えて、実験状況を再現するシミュレーションを作成し、実験装置のジオメトリーから生じる系統誤差を評価した。更に、ラザフォード後方散乱分光法によって実験で用いた標的の厚さを測定し、公称値が正しい事を確認した。これらの結果をまとめて2014年度中に成果報告する予定である。

また解析結果から、標的表面に不純物が付着していた事や、検出器の検出効率が15%程度と低い事等、問題点が明らかになった。現在これらを改善した再実験を考案している(早野・轟・村上)。

2.1.2 深く束縛された π 中間子原子の精密分光 (早野研究室)

QCD 真空におけるカイラル対称性の自発的な破れ部分的回復の定量的な評価は、今日のハドロン物理学における最重要課題の一つである。カイラル対称性の自発的な破れのオーダーパラメータはクォーク反クォーク対 ($\bar{q}q$) の真空期待値である。この真空期待値をクォーク凝縮 (もしくはカイラル凝縮) と呼ぶが、核媒質中など有限密度下ではカイラル対称性の部分的回復に従いその絶対値が減少することが言われている。我々は π 中間子を電子の代わりに原子核に”深く”束縛させた π 中間子原子の精密測定を行う。ここで”深い束縛状態”とは $1s$ などの原子軌道に束縛された状態を指している。この状態の π 中間子と原子核は主に原子核で相互作用し、その相互作用の精密測定は有限密度化での QCD、特に前述のクォーク凝縮の定量評価に繋がる。

($d, {}^3\text{He}$) 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 ${}^{122}\text{Sn}(d, {}^3\text{He})$ 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。2013年度に行ったのは主に以下の3点である。(i) 2010年に行われたパイロット実験の解析 (ii) 実験計画書の再提出 (iii) 2014年に行う予定の実験の準備。

まず (i) については、転送行列の高次項の再評価を行った。また、粒子が BigRIPS を通過する際にビームラインの壁に衝突して削られる効果の見積もりを新たな手法を用いて行った。これらによってより精度の高い ${}^3\text{He}$ の運動量スペクトルの生成に成功した。現在は運動量校正の評価のためのシミュレーションと実験データを比較し、最終スペクトルを導出しているところである。

(ii) については、2013年度9月に理化学研究所より過去理研で行うことを認められたビームタイム (NP0802-RIBF54) を一旦白紙とし、再評価を行う旨を通達された。これに従い2010年の実験データをもとにした計画書を作成し、これまで認められていたビームタイム (~6日) を大幅に上回る10.5日のビームタイムを獲得した (NP1312-RIBF54R1)。これは昨今の理研において非常に厳しい予算状況の中でも我々の実験の重要性が十分に理解された結果だといえる。

(iii) (ii) によりビームタイムがあらためて認められ、1月のマシンタイム委員会により2014年5月末より実験を行うこととなった。現在は検出器の整備や実験手順の確認、あらたな光学系の調整法の確立、データ取得システムの改善などを行っている。(早野・西・田中・渡辺)。

π 中間子原子の逆運動学による分光

安定核の π 中間子原子実験で得られる知見を拡張するため、不安定核に束縛された π 中間子原子の分光実験を理研 RIBF において計画している。例えば中性子過剰な原子核の π 中間子原子は、中性子- π 中間子間の斥力によって π 中間子が原子核の外側に押し出されるため、より低い密度での強い相互作用の研究を可能にする。重水素ガスを用いたアクティブターゲット TPC (AT-TPC) 及びシリコン検出器のセットアップによって ($d, ^3\text{He}$) 反応の逆運動学のミッシングマス分光を行う予定である。

2013 年度は (i)300 μm 厚のシリコン検出器の性能評価、(ii)CNS Active Target (CAT) の実験グループに参加し GEM (Gas Electron Multiplier) を用いた重水素ガス AT-TPC についての研究、を行った。(i) については分解能を向上させるため、真空チェンバーの中にプリアンプを入れるなどの工夫により、低ノイズの実現を目指した。 α 線源を用いた性能評価の結果、エネルギー分解能はおよそ 0.7 % (FWHM) と見積もられた。今後はよりエネルギーの高い入射粒子を用いて分解能の評価を行う予定である。(ii) については、低圧重水素下での GEM について研究し、 10^4 程度の高いゲインを得るために、圧力・GEM の電圧などの最適な条件を調査した。また、TPC 中の電子のドリフト速度・拡散長など、重水素ガスを用いた検出器の特性について α 線源を用いて測定を行い、文献値に基づいた計算との比較を行った。今後は追加測定を行い、より高統計のデータを用いて再評価をする予定である。

2.1.3 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、 $U_A(1)$ 量子異常の効果であると考えられているが、その寄与はカイラル凝縮の大きさに関係していることが指摘されている。原子核中ではカイラル対称性の部分的回復によりカイラル凝縮の大きさが減少するため、 η' 中間子の質量が減少すると予想され、原子核と η' 中間子の束縛状態 (η' 中間子原子核) が存在すると考えられる。

我々は、ドイツの GSI 研究所において、 η' 中間子原子核を探索する分光実験を計画している。この実験では、加速器から供給される 2.5 GeV の陽子 (p) ビームを炭素 12 標的に入射し、 $^{12}\text{C}(p,d)$ 反応により η' 中間子を生成し、出てくる重陽子 (d) の運動量をスペクトロメーターによって測定することで、 η' 中間子原子核の分光を行う。

2013 年度には、スペクトロメーターとして用いる FRS (FRagment Separator) のイオン光学系の開発、データ収集システムの準備、粒子の飛跡を測定するドリフトチェンバー、実験においてシグナルの重陽子とバックグラウンドの陽子を識別するためのエアロジェルチェレンコフ検出器の改良とテストを行った。イオン光学系は、GICOSY と呼ばれるイオン光学系のシミュレーションを用いて、実験の要求を満たす光学系を設計した。また、データ収集システム

と一連の検出器は、ドイツの FZJ 研究所の COSY 加速器の陽子ビームを用いて統合的にテストを行った。

GSI 研究所において陽子ビームを用いて行う本実験は、2014 年の 7 月に予定されている。今後は、イオンビームを用いて FRS のイオン光学系のテストを行った後に、7 月に陽子ビームを用いた本実験を実施して、その解析を行う予定である。

2.1.4 福島原発事故に関連して (早野研究室)

福島住民の内部被ばくの解明

2011 年度から、福島県内の医療機関等と協力して、ホールボディカウンター (WBC) を用いた福島住民の内部被ばくの解明に努めている。その成果の一つが、3 万人規模の内部被ばく検査に基づき、福島内部被ばくが当初恐れていたよりもはるかに低いレベルであることを示した論文 [3] である。この論文は、原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR) の報告書にも採録された。

乳幼児専用内部被ばく検査機 BABYSCAN の開発

従来型の WBC では測定困難な乳幼児の内部被ばく検査の需要が高いところから、乳幼児専用の内部被ばく検査機 BABYSCAN を開発し、2013 年 12 月より福島県内で運用を開始したが、現時点では検出限界 (全身で 50 Bq) を超える放射性セシウムが体内にあるお子さんは見つかっていない [31]。

2.1.5 崩壊核分光による不安定核構造研究 (櫻井研究室)

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。

ベータ崩壊分光法による ^{78}Ni 近傍の核構造研究

原子核を構成する陽子・中性子がともに閉殻となる魔法数 $2 \cdot 50$ を持つ ^{78}Ni 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。この中性子過剰な ^{78}Ni 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困難であった。我々は、この ^{78}Ni 周辺核の新異性体、新半減期測定を目的とした β 崩壊核分光実験を、2012 年後期および 2013 年前期に 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 ^{238}U 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 ^{78}Ni 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。およそ 15 日の実験で、これまで観測されているおよそ 600 倍にあたる 8000 個の ^{78}Ni 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, Wide-range Active Silicon Strip Stopper Array for β and Ion) に打ち込み停止させた。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 WAS3ABi 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 γ 線検出器アレイである。

WAS3ABi で測定した不安定核とその後の崩壊 β 線の時間関係から、 ^{78}Ni 周辺核の半減期を導出した。本測定により、これまで半減期を測定されていない 14 核種の新半減期を初めて決定することに成功した。不安定核の半減期は β 崩壊の Q 値、すなわち親核と娘核の質量差に敏感である。我々の半減期測定によって得られた系統性から、二重魔法数核 ^{78}Ni における陽子・中性子の魔法数 $50 \cdot 28$ の保存を確認した [55, 64, 73, 75, 79, 113, 114]。

核異性体崩壊分光法による ^{132}Sn 近傍の核構造研究

上記の EURICA 国際共同研究プロジェクトでは、さらに重い二重魔法数核 ^{132}Sn 近傍核の核異性体崩壊分光も行った。 ^{132}Sn からさらに陽子が 4 つ少ない ^{128}Pd とその同位体 ^{126}Pd において、新たにマイクロ秒の寿命を持つ核異性体を発見した。この核異性体は Seniority 核異性体と呼ばれ、二重魔法数核に加えた少数個の核子 (陽子・中性子) の粒子または空孔の運動のみによって解釈できる。 ^{128}Pd での Seniority 核異性体の存在の確認により、中性子の魔法数 82 がより中性子過剰核においても消滅せず、存続することを示した [38]。

β 遅発中性子放出確率測定のための ^3He 中性子検出器アレイの開発

β 遅発崩壊過程の研究は、宇宙における元素合成過程を理解する上でも重要である。現在のウラン合成仮説によれば、鉄より重い元素は Rapid neutron capture process (R 過程) で合成された。R 過程は原子核が中性子を連続的に捕獲することによってより重い原子核が合成される過程であり、超新星爆発や中性子星同士の衝突などによって生じる高い中性子密度および高温の空間において生じる過程であると考えられている。R 過程の問題点として挙げられるのは、生成される元素の存在比が太陽系内の元素存在度をよく再現していないという点である。これは R 過程によって生成された中性子過剰核が安定な核へと β 崩壊を繰り返す際に中性子を放出し質量数が増えるためであると考えられている。よって R 過程に関与する中性子過剰核の β 遅発中性子放出確率 (P_n) を実験的に測定することは、R 過程の全容を解明する上で必要不可欠である。

我々は 2013 年にこの β 遅発中性子放出確率測定のための共同研究計画 (BRIKEN プロジェクト) を立ち上げた。RIKEN プロジェクトはスペイン、ドイツ、イギリス、アメリカを含む各国の研究機関が保有する ^3He 中性子検出器を理化学研究所に集め、 P_n 測定のための ^3He 中性子検出器アレイ (BRIKEN アレイ) を理化学研究所の RIBF に建設する計画である。

2015 年の本実験実現に向け、今年度は BRIKEN で用いる中性子検出器の設計を行った。BRIKEN 中性子検出器では高い検出効率とともに、放出中性子の初期エネルギーに依存しない検出効率が必要となるため、シミュレーター (Monte-Carlo N-Particle 5) を用いて、BRIKEN アレイの立体配置を最適化した [66, 77, 115]。

2.1.6 インビームガンマ線核分光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、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。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、実験目的に合わせて異なる測定方法、励起方法を用いた実験を行っている。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。

「逆転の島」近傍の殻構造研究

$Z = 10 - 12$, $N = 20 - 22$ の領域の核種は、魔法数 $N = 20$ の近傍にありながら大きな集団運動性が測定されてきた。この大きな集団運動性は、殻模型の枠組みではエネルギーの低い一粒子軌道から順番に隙間なく詰まる配位ではなく、2つの中性子が $N = 20$ のシェルギャップを越えてエネルギー的に高い軌道を占有する配位として解釈されている。これまで励起状態にあると考えられてきた中性子配位が基底状態となるため、この領域は「逆転の島 (island of inversion)」と呼ばれている。このような「逆転の島」領域の Mg 同位体における変形の変化とその微視的なメカニズムを探るために、我々は 2010 年に理化学研究所の RIBF においてインビーム γ 線核分光による励起準位構造を調べる実験を行った。

実験では、超伝導リングサイクロトロン (SRC) を用いて 345 MeV/u まで加速した ^{48}Ca 一次ビームを ^9Be の一次標的に照射し、核破碎反応によって「逆転の島」近傍の不安定核を含む二次ビームを生成した。二次ビームから超伝導 RI ビーム分離生成装置 (BigRIPS) を用いて目的核を選別・同定した。BigRIPS の後端には ^{12}C の二次標的が配され、反応によって放出する γ 線をその周囲に配置した 186 個の NaI(Tl) シンチレータで構成される DALI2 γ 線検出器で測定した。二次標的での反応生成物は、その下流に配置された ZeroDegree Spectrometer で核種の同定を行い、反応チャンネルをイベント毎に同定した。

本実験により、「逆転の島」領域よりもさらに中性子過剰な $^{36,38}\text{Mg}$ 同位体の第一 2^+ および 4^+ 励起準位エネルギーを測定した。この二つの励起準位エネルギーの比は原子核の変形度を示す指標となっており、我々の測定した励起準位エネルギーの比は $^{34,36,38}\text{Mg}$ において原子核が非常に大きく変形していることを示している [42]。

また、 ^{36}Mg から ^{35}Mg の一中性子ノックアウト反応を選別し、 ^{35}Mg の励起状態からの脱励起 γ 線エネルギーを導出した。 γ 線を放出する ^{35}Mg は光速の約 60% で飛行しているため、相対論的なドップラー効果の補正が必要である。このドップラーシフトの補正量は励起準位の寿命に依存するため、過去測定されている励起準位エネルギーとの比較から励起準位寿命を導出することができる。また、励起準位寿命は脱励起ガンマ線の電磁相互作用による遷移の多重極度に大きく依存するため、遷移の多重極度の同定により、これまで全くわかってない励起準位のスピン・パリティを同定することが可能となる。現段階までに ^{35}Mg における 2 つの異なる脱励起 γ 線エネルギーを確認しており、今後その多重極度の決定から「逆転の島」の一中性子準位構造について議論を進めていく [116]。

中性子新魔法数 34 の発見

中性子過剰な Ca 同位体においては、2001 年から理論計算により中性子数 34 が新たな魔法数が予言されていたが、実験的検証の困難さからこれまで未解決の問題となっていた。我々は、この新魔法数の存

在を実験的に決定するため RIBF においてインビーム γ 線核分光による ^{54}Ca の励起準位測定実験を行った。わずか 10 時間の短いデータ取得時間にも関わらず、 ^{54}Ca の第一 2^+ 励起準位の測定に成功し、その励起エネルギー値から、殻が大きく変化し中性子数 34 が魔法数となっていることを示した [39, 51]。

SHOGUN プロトタイプ開発

RIBF でのインビーム γ 線核分光において、二次標的で反応した不安定核の高励起準位から放出される複数の脱励起 γ 線を、高いエネルギー分解能と高い検出効率で測定することは解決されるべき課題である。我々はこの課題解決に向けて、現行の NaI(Tl) シンチレーターアレイ DALI2 の次世代の検出器の開発を行っている。高い検出効率を持つ無機シンチレーターでありながらエネルギー分解能・時間分解能に優れた $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーターは高速不安定核実験の γ 線測定に最適な検出器の候補であり、この $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ を用いた SHOGUN (Scintillator based High-resolution Gamma-ray spectrometer for Unstable Nuclei) 検出器アレイ建設に向けて、検出器の基礎特性評価を行っている。

RIBF の高速な不安定核ビーム ($\beta \sim 0.6$) は核反応を起こすための標的を厚くすることができ一方で、反応後のビームから放出される γ 線は強くドップラー効果の影響を受ける。 γ 線を放出した原子核の励起準位同定には重心系での γ 線エネルギーを実験室系での測定値から再構成する必要があり、ドップラー補正に用いる検出器の角度の分解能は励起準位エネルギーの分解能を決定する重要な要因となる。検出効率を維持しつつも高速ビームゆえに生じる γ 線のドップラー効果を補償するため、シンチレーターの形状に制限があり、その形状の制限により $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーターがもつ本来のエネルギー分解能が低下する恐れがある。

我々は形状に伴うエネルギー分解能の変化を定量的に取り扱うために、半経験的な分解能の表式を導入し、これを基に複数の形状の $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーターを用いてエネルギー分解能の測定を行った。本年度は 1 MeV 程度までの範囲の γ 線を用いた測定を行ったが、SHOGUN 検出器は数 MeV 程度の γ 線の測定を必要としており、今後更に広いエネルギーの範囲について定量的な評価が必要である。 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 以外の高分解能シンチレーターとも比較検証を行いつつ、SHOGUN 検出器の材質や形状について詳細を決定していく [65, 71, 119]。

2.1.7 直接反応を用いた原子核の構造研究 (櫻井研究室)

直接反応は、核表面における核子の一粒子軌道を特定するために有効な手法である。これまで、安定核の微視的構造を特定するために用いられてきた手法であるが、近年の不安定核ビーム生成技術の進歩

に伴い、不安定核にも適応され大きな成果を挙げている。他の核分光法に比べ直接反応の測定では多くの統計が必要となるが、得られる核の情報は多く、基底状態、又は励起状態における一粒子軌道のスピンパリティ、分光学的因子、さらには核全体のスピンパリティ、核子の分離エネルギーなどを議論することが可能である。以下では、中性子ノックアウト反応、又は二核子移行反応を用いた中性子および陽子過剰核の構造研究について報告する。

分解反応による中性子ドリップライン核の構造研究

近年、「逆転の島」の中、又は端に位置する変形した核における p -wave ハロー構造が興味を持たれている。我々の研究によって ^{31}Ne が「逆転の島」に属するハロー核であると確認されてから、理論と実験の両面からその殻構造に関する研究が盛んに行われている。中性子数 $N = 20 - 28$ の p -wave ハロー核の存在を説明するためには、 pf -shell の強い混合が必要であるが、この混合のメカニズムについては異なる解釈が存在しており、ハロー中性子の一粒子軌道に関する実験的データが待ち望まれていた。

本研究では $N = 20 - 28$ のドリップライン近傍に位置する中性子過剰な Mg 同位体のインクルーシブなクーロン分解反応、及び核力分解反応を測定し、中性子ハロー構造の有無を探った。さらに2つの反応の違いを利用し、中性子分離エネルギーや分光学的因子の導出を行った。実験は理化学研究所の加速器施設 RI ビームファクトリーにある入射核破砕片分離装置 BigRIPS と Zero Degree Spectrometer を用いて行なった。クーロン分解反応の測定には鉛標的、核力分解反応の測定には炭素標的を用いた。

^{37}Mg について得られた一粒子分離断面積、核力分解反応後のフラグメントの運動量分布から、ハロー構造の有無について議論した。さらに、得られた結果から中性子分離エネルギー、分光学的因子、基底状態のスピン・パリティについての議論も行っている [53, 55, 74, 76, 96, 117]。

欠損質量法による ^8C 核励起準位の探査

^8C 原子核は、陽子ドリップラインの外側に存在する陽子非束縛な陽子過剰核である。先行研究により、 ^8C 核の質量および崩壊様式は既知であるが、励起状態のエネルギーおよびスピンパリティは未知である。我々は、中性子移行反応を用いた欠損質量核分光法を適用することで、非束縛核である ^8C 核の励起準位探査を可能とした。

実験は、2013年11月に理研仁科センターの RI ビーム生成装置 (RIPS) を用いて行った。核子当たり 70 MeV の ^{12}C 1 次ビームをベリリウム標的に照射して不安定核 (RI) を得た。生成された RI は RIPS により分離され、1 秒当たり 2×10^5 個の ^{10}C 核 2 次ビームを得た。二次ビームの粒子識別は、飛行時間情報およびエネルギー損失を用いて行った。得られた 2 次ビームを水素気体標的に入射し、二核子移

行反応 (p, t) を用いて ^8C 核を生成した。反跳核である重水素および三重水素原子核は、水素標の後方に配置した 2 種類のシリコン検出器によって検出した。ビームライン上流には、シリコン検出器を 8 枚層状に並べた RIKEN telescope を配置し、主に重水素核の検出を行った。RIKEN telescope 後方には、シリコン検出器と CsI(Tl) 検出器を組み合わせた Dubna telescope を配置し、主に三重水素核検出に用いた。さらに、これらシリコン検出器の後方には、4 枚のプラスチックシンチレータを配置し、残余核およびその崩壊から生成される原子核の検出を行った。

実験データは現在解析中であるが、これまでに基底状態のエネルギー測定に成功している [118]。

<受賞>

- [1] 橋本直, Best Young Speaker Award, International Nuclear Physics Conference (INPC 2013), June 7, 2013.
- [2] 小林信之, RIBF 博士論文賞, RIBF User Group, 2013 年 6 月.

<報文>

(原著論文)

- [3] Hayano, RS *et al.*, “Internal radiocesium contamination of adults and children in Fukushima 7 to 20 months after the Fukushima NPP accident as measured by extensive whole-body-counter surveys”, *Phys. Rev. C* **87**, 044909 (2013).
- [4] Adare, A *et al.* (PHENIX collaboration), “gamma ($1S+2S+3S$) production in $d + \text{Au}$ and $p + p$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and cold-nuclear-matter effects”, *Proc. Japan Academy* **B 89**, 157-163 (2013).
- [5] Yasunari, TJ *et al.*, “Cesium-137 deposition and contamination of Japanese soils due to the Fukushima nuclear accident”, *PNAS* **110**, 7525-7528 (2013).
- [6] Hayano, RS *et al.*, “Estimation of the total population moving into and out of the 20 km evacuation zone during the Fukushima NPP accident as calculated using “Auto-GPS” mobile phone data”, *Proc. Japan Academy* **B 89**, 196-199 (2013).
- [7] Adare, A *et al.* (PHENIX collaboration), “Direct photon production in $d+\text{Au}$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV”, *Phys. Rev. C* **87**, 054907 (2013).
- [8] Corradini, M *et al.*, “Experimental apparatus for annihilation cross-section measurements of low energy antiprotons”, *Nucl. Instr. Meth. A* **711**, 12-20 (2013).
- [9] Bazzi, M *et al.*, “Preliminary study of kaonic deuterium X-rays by the SIDDHARTA experiment at DAΦNE”, *Nucl. Phys. A* **907**, 69-77 (2013).
- [10] Friedreich, S *et al.*, “Microwave spectroscopic study of the hyperfine structure of antiprotonic He-3”, *J. Phys. B* **46**, 125003 (2013).

- [11] Adare, A *et al.* (PHENIX collaboration), “Medium Modification of Jet Fragmentation in Au plus Au Collisions at root $\sqrt{s_{(NN)}} = 200$ GeV Measured in Direct Photon-Hadron Correlations”, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 032301 (2013).
- [12] Itahashi, K *et al.*, “First Precision Spectroscopy of Pionic Atoms at RI Beam Factory”, *Few Body Systems* **54**, 1569-1572 (2013).
- [13] Tanaka, YK *et al.*, “Spectroscopy of η' Mesic Nuclei with (p, d) Reaction”, *Few Body Systems* **54**, 1263-1266 (2013).
- [14] Ajimura, S *et al.*, “A Search for Deeply Bound Kaonic Nuclear States at J-PARC”, *Few Body Systems* **54**, 1195-1199 (2013).
- [15] Iliescu, M *et al.*, “Kaon-Nucleon Strong Interaction in Kaonic Atoms: The SIDDHARTA Program”, *Few Body Systems* **54**, 1123-1126 (2013).
- [16] Hori, M *et al.*, “Sub-Doppler Two-Photon Laser Spectroscopy of Antiprotonic Helium and the Antiproton-to-Electron Mass Ratio”, *Few Body Systems* **54**, 917-922 (2013).
- [17] Adare, A *et al.* (PHENIX collaboration), “Inclusive cross section and single transverse spin asymmetry for very forward neutron production in polarized p + p collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV”, *Phys. Rev. D* **88**, 032006 (2013).
- [18] Adare, A *et al.* (PHENIX collaboration), “Spectra and ratios of identified particles in Au plus Au and d plus Au collisions at $\sqrt{s_{(NN)}} = 200$ GeV”, *Phys. Rev. C* **88**, 024906 (2013).
- [19] Ajimura, S *et al.*, “A search for deeply-bound kaonic nuclear state at the J-PARC E15 experiment”, *Nucl. Phys. A* **914**, 315-320 (2013).
- [20] Ishiwatari, T *et al.*, “Strong-interaction shifts and widths of kaonic helium isotopes”, *Nucl. Phys. A* **914**, 305-309 (2013).
- [21] Ishiwatari, T *et al.*, “Unlocking the secrets of the kaon-nucleon/nuclei interactions at low-energies: The SIDDHARTA-2 and the AMADEUS experiments at the DAΦNE collider”, *Nucl. Phys. A* **914**, 251-259 (2013).
- [22] Tsubokura, M *et al.*, “Measurement of internal radiation exposure among decontamination workers in villages near the crippled Fukushima Daiichi nuclear power plant”, *Health Physics* **105**, 379-381 (2013).
- [23] Bazzi, M *et al.*, “X-ray transition yields of low-Z kaonic atoms produced in Kapton”, *Nucl. Phys. A* **916**, 30-47 (2013).
- [24] Adare, A *et al.* (PHENIX collaboration), “Nuclear Modification of ψ' , χ_c , and J/ψ production in d + Au collisions at $\sqrt{s_{(NN)}} = 200$ GeV”, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 202301 (2013).
- [25] Adare, A *et al.* (PHENIX collaboration), “Quadrupole Anisotropy in Dihadron Azimuthal Correlations in Central d + Au Collisions at $\sqrt{s_{(NN)}} = 200$ GeV”, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 212301 (2013).
- [26] Tsubokura, M *et al.*, “Limited Internal Radiation Exposure Associated with Resettlements to a Radiation-Contaminated Homeland after the Fukushima Daiichi Nuclear Disaster”, *PLOS ONE* **8**, e81909 (2013).
- [27] Nishi, T *et al.*, “BigRIPS as a high resolution spectrometer for pionic atoms”, *Nucl. Instr. Meth. B* **317**, 290-293 (2013).
- [28] Adare, A *et al.* (PHENIX collaboration), “Azimuthal anisotropy of π^0 and η mesons in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{(NN)}} = 200$ GeV”, *Phys. Rev. C* **88**, 064910 (2013).
- [29] Kobayashi, T *et al.*, “Observation of the 1154.9 nm transition of antiprotonic helium”, *J. Phys. B* **46**, 245004 (2013).
- [30] Amore, C *et al.*, “The ALPHA antihydrogen trapping apparatus”, *Nucl. Instr. Meth. A* **735**, 319-340 (2013).
- [31] Hayano, RS *et al.*, “BABYSCAN - a whole body counter for small children in Fukushima”, arXiv:1402.5508 [physics.med-ph], 2014.
- [32] Soter, A *et al.*, “Segmented scintillation detectors with silicon photomultiplier readout for measuring antiproton annihilations”, *Rev. Sci. Instr.* **85**, 023302 (2014).
- [33] H. Wang *et al.*, “Observation of New Isotope ^{131}Ag via the Two-Step Fragmentation Technique”, *Chin. Phys. Lett.* **30**, 042501 (2013).
- [34] D. Verney *et al.*, “Structure of ^{80}Ge revealed by the β decay of isomeric states in ^{80}Ga : Triaxiality in the vicinity of ^{78}Ni ”, *Phys. Rev. C* **87**, 054307 (2013).
- [35] P.-A. Söderström *et al.*, “Shape evolution in $^{116,118}\text{Ru}$: Triaxiality and transition between the O(6) and U(5) dynamical symmetries”, *Phys. Rev. C* **88**, 024301 (2013).
- [36] H. Suzuki *et al.*, “Collectivity of neutron-rich Ti isotopes”, *Phys. Rev. C* **88**, 024326 (2013).
- [37] K. Kolos *et al.*, “Probing nuclear structures in the vicinity of ^{78}Ni with β - and β_n -decay spectroscopy of ^{84}Ga ”, *Phys. Rev. C* **88**, 047301 (2013).
- [38] H. Watanabe *et al.*, “Isomers in ^{128}Pd and ^{126}Pd : Evidence for a Robust Shell Closure at the Neutron Magic Number 82 in Exotic Palladium Isotopes”, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 152501 (2013).
- [39] D. Steppenbeck *et al.*, “Evidence for a new nuclear magic number from the level structure of ^{54}Ca ”, *Nature* 502.7470, 207 (2013).
- [40] L. Audirac *et al.*, “Evaporation-cost dependence in heavy-ion fragmentation”, *Phys. Rev. C* **88**, 041602(R) (2013).

- [41] M. Cavallaro *et al.*, “Quantitative analysis of two-neutron correlations in the $^{12}\text{C}(^{18}\text{O}, ^{16}\text{O})^{14}\text{C}$ reaction”, *Phys. Rev. C* **88**, 054601 (2013).
- [42] P. Doornenbal *et al.*, “In-Beam γ -Ray Spectroscopy of $^{34,36,38}\text{Mg}$: Merging the $N = 20$ and $N = 28$ Shell Quenching”, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 212502 (2013).
- [43] H. Wang *et al.*, “Collectivity evolution in the neutron-rich Pd isotopes toward the $N = 82$ shell closure”, *Phys. Rev. C* **88**, 054318 (2013).
- [44] P.-A. Söderström *et al.*, “Installation and commissioning of EURICA — Euroball-RIKEN Cluster Array”, *Nucl. Instrum. Method* **B317**, 649 (2013).
- [45] Y. Sato *et al.*, “One-neutron knockout reaction of ^{17}C on a hydrogen target at 70 MeV/nucleon”, *Phys. Lett.* **B728**, 462 (2014).
- [46] H. Wang *et al.*, “Structure of ^{136}Sn and the $Z = 50$ magicity”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2014, 023D02 (2014).
- (会議抄録)
- [47] Kobayashi, T *et al.*, “Near-infrared laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms”, *EPJ Web of Conferences* **66**, 05010 (2014).
- [48] Aghai-Khozani, H *et al.*, “Experimental results on antiproton-nuclei annihilation cross section at very low energies”, *EPJ Web of Conferences* **66**, 09001 (2014).
- [49] Tanaka, YK *et al.*, “Missing Mass Spectroscopy of η' Mesic Nuclei with (p,d) Reaction at GSI”, *EPJ Web of Conferences* **66**, 09019 (2014).
- [50] Todoroki, K *et al.*, “Beam Diagnostics for Measurements of Antiproton Annihilation Cross Sections at Ultra-low Energy”, *EPJ Web of Conferences* **66**, 09020 (2014).
- [51] D. Steppenbeck *et al.*, “Investigating the strength of the $N = 34$ subshell closure in ^{54}Ca ”, *J. Phys. Conf. Ser.* **445**, 012012 (2013).
- [52] R. Chen *et al.*, “Proton Elastic Scattering of F-23,25”, *Few-Body Systems*, **54**, 1405 (2013).
- [53] N. Kobayashi *et al.*, “Breakup Reactions of Drip-Line Nuclei Near $N = 20, 28$ ”, *Few-Body Systems*, **54**, 1441 (2013).
- [54] J. W. Hwang *et al.*, “Discovery of the First 2^- State in C-16 via Neutron Knockout Reaction”, *Few-Body Systems*, **54**, 1469 (2013).
- [55] N. Kobayashi *et al.*, “Breakup reactions of neutron drip-line nuclei near $N = 20, 28$ ”, *J. Phys. Conf. Ser.* **436**, 012047 (2013).
- [56] Z. Y. Xu *et al.*, “Systematic study of β -decay half-lives in the vicinity of ^{78}Ni ”, *JPS Conf. Proc.* **1**, 013035 (2014).
- (国内雑誌)
- [57] Tanaka, YK *et al.*, “Performance study of a high-refractive-index aerogel Cherenkov detector for the spectroscopy experiment of η' mesic nuclei”, *RIKEN Accelerator Progress Report* **46**, 211 (2013).
- [58] 早野龍五, “福島の内被ばくと外被ばく - 福島のリングテール”, *日本原子力学会誌* 2014年1月号 pp.30-36.
- [59] 早野龍五, “現代物理のキーワード：物質世界？ 反物質世界？”, *日本物理学会誌* 2014年1月号 pp.4-5.
- (学位論文)
- [60] 橋本直, “Search for K^-pp bound state in the $^3\text{He}(K^-, n)$ reaction at $p_{K^-} = 1 \text{ GeV}/c$ ”, 早野研博士論文, 2014.
- [61] 小林拓実, “Study of the highly excited states of antiprotonic helium atoms”, 早野研博士論文, 2014.
- [62] 村上洋平, “Analysis of a Cherenkov Detector in Antiproton-Nucleus Annihilation Cross Section Measurements”, 早野研修士論文, 2014.
- [63] 山田裕之, “Simulation of electrostatic transfer line for low energy antiproton beam from ELENA”, 早野研修士論文, 2014.
- [64] Z. Y. Xu, “Beta-decay spectroscopy on neutron-rich nuclei in a range of $Z = 26-32$ ”, 櫻井研博士論文, 2014.
- [65] 谷内稜, “エギゾチック原子核のインビーム γ 線分光実験に向けた次世代検出器の開発”, 櫻井研修士論文, 2014.
- [66] 松井圭司, “ β 遅発中性子放出確率測定のための ^3He 中性子検出器アレイの開発”, 櫻井研修士論文, 2014.
- (著書)
- [67] 櫻井博儀, “元素はどうしてできたのか 誕生・合成から「魔法数」まで”, *PHPサイエンス・ワールド新書*, PHP研究所, 2013年12月.
- <学術講演>
- (国際会議)
- ポスターセッション
- [68] Tanaka, YK, “Experimental Search for η' Mesic Nuclei with (p, d) Reaction at GSI and FAIR”, *International Workshop Mesonnet Meeting*, Prague, Czech Republic, 17th June 2013.
- [69] Kobayashi, T, “Near-infrared laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms”, *International Nuclear Physics Conference (INPC 2013)*, Firenze, Italy, June 2013.
- [70] Y. Murakami, “The analysis of the Cherenkov detector of the antiproton-nucleus annihilation experiment by ASACUSA collaboration”, *12th Asia Pacific Physics Conference*, Makuhari, Chiba, 15th July 2013.

- [71] R. Taniuchi, “Development of LaBr₃(Ce) array, SHOGUN, for next-generation in-beam γ -ray spectroscopy of exotic nuclei at the RIBF”, IEEE Nuclear Science Symposium, Seoul (Korea), Oct. 29, 2013.
- 一般講演
- [72] Tanaka, YK, ”Missing Mass Spectroscopy of η Mesic Nuclei with (p, d) Reaction at GSI”, International Nuclear Physics Conference (INPC 2013), Firenze, Italy, 6th June 2013.
- [73] Z. Y. Xu, “The β -decay studies of neutron-rich nuclei in the vicinity of ^{78}Ni ”, The 25th International Nuclear Physics Conference (INPC 2013), June 3, 2013.
- [74] N. Kobayashi, “Inclusive breakup measurement of $N = 20 - 28$ nuclei near neutron drip-line”, The 25th International Nuclear Physics Conference (INPC 2013), June 3, 2013.
- [75] Z. Y. Xu, “Systematic study of β -decay half-lives in the vicinity of ^{78}Ni ”, The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), Makuhari (Japan), July 16, 2013.
- [76] N. Kobayashi, “Spectroscopy of $N = 20 - 28$ Nuclei Near Neutron Drip-Line Via Breakup Reactions”, The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), Makuhari (Japan), July 16, 2013.
- [77] K. Matsui, “Neutron background measurement and simulation”, 2nd BRIKEN workshop, Wako (Japan), July 30, 2013.
- [78] M. Niikura, “Study of proton shell evolution towards ^{78}Ni ”, SUNFLOWER Workshop, Darmstadt (Germany), Sep. 11, 2013.
- [79] M. Niikura, “Beta-decay spectroscopy in the vicinity of ^{78}Ni ”, LIA symposium, Paris (France), Oct. 1, 2013.
- 招待講演
- [80] Hayano, RS, “ASACUSA Overview”, LEAP 2013, Uppsala, June 11, 2013.
- [81] Hayano, RS, “Nuclear Physicists’ involvement in the extensive whole-body-counter surveys of residents after the Fukushima NPP accident”, 12th Asia Pacific Physics Conference, July 18, 2013.
- [82] Hayano, RS, “Internal and external radiation exposures of residents after the Fukushima Dai-ichi NPP accident”, International Conference on Science and Technology for Sustainability, Science Council of Japan (Tokyo), Oct 9-10, 2013.
- [83] Hayano, RS, “Engaging with local stakeholders: Some lessons from Fukushima for recovery”, The 2nd International Symposium on the System of Radiological Protection, Abu Dhabi, Oct 23, 2013.
- [84] Hayano, RS, “HIN2013 Summary”, YITP workshop on Hadron in Nucleus, Yukawa Institute (Kyoto), Oct 31-Nov 2, 2013.
- [85] Hayano, RS, “How can the big data analyses help people affected by the Fukushima Dai-ichi accident?”, The 9th International Conference on Signal Image Technology, Terrsa Conference Center (Kyoto), Dec 3, 2013.
- [86] Hayano, RS, “Communicating issues of risk The perspectives of academics, experience and issues”, UK-Japan Risk Communication Symposium -Approaches on engaging science and the public-, British Embassy (Tokyo), Feb 13, 2014.
- [87] Hayano, RS, “Experimental studies of exotic atoms”, NUSTAR Annual Meeting 2014 - GENCO award session, GSI Darmstadt Germany, Mar 6, 2014.
- [88] Hayano, RS, “Interacting with society after Fukushima: a personal experience”, Analysis of feedback experience from the ICRP Dialogue Initiative on the rehabilitation of living conditions after the Fukushima accident, IRSN Paris France, Mar 11, 2014.
- [89] Hayano, RS, “Weighing the Antiproton: Precision Laser Spectroscopy of Antiprotonic Helium Atoms”, 7th International conference on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA 2014), Tokyo, Mar 14-16, 2014.
- [90] Hayano, RS, “Fukushima Dai-ichi accident, a personal recollection of an antimatter physicist”, Les Recontres Internationales de la Radioprotection, CERN, Mar 31, 2014.
- [91] H. Sakurai, “Nuclear data produced at the RIBF”, New Energy Forum 2013, Xi’an (China), Sept. 28, 2013.
- [92] H. Sakurai, “Overview of RIBF”, 1st RIBF-RISP Joint Workshop, Daejeon (Korea), Nov. 7, 2013.
- [93] H. Sakurai, “The RIKEN RI Beam Factory - Its Scientific Programs”, 17th International Conference on Accelerators and Beam Utilization (ICABU 2013), Daejeon (Korea), Nov. 13, 2013.
- [94] H. Sakurai, “Present Status of RIBF”, JUSTIPEN-JUSEIPEN Joint Workshop, Wako (Japan), Dec. 9, 2013.
- [95] H. Sakurai, “Nuclear data programs at RIBF for nuclear engineering and transmutation”, 16th ASRC International Workshop on “Nuclear Fission and Structure of Exotic Nuclei”, Tokai (Japan), March 19, 2014.
- セミナー
- [96] N. Kobayashi, “Spectroscopy of p-wave neutron halo nuclei via neutron removal reactions”, RIBF Nuclear Physics Seminars, Wako, Japan, February 18, 2014.
- (国内会議)
- 一般講演

- [97] 西隆博 他, “ $(d, {}^3\text{He})$ 反応を用いた π 中間子原子の精密分光 (9)”, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (高知大) .
- [98] 川崎新吾 他, “ $d(K^-, n)$ 反応による $\Lambda(1405)$ 粒子の精密分光実験のための液体重水素標的開発 (3)”, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (高知大) .
- [99] 橋本直 他, “J-PARC K1.8BR ビームラインにおける液体 ${}^3\text{He}$ 標的への K^- ビーム照射実験 (1)”, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (高知大) .
- [100] 佐田優太 他, “J-PARC K1.8BR ビームラインにおける液体 ${}^3\text{He}$ 標的への K^- ビーム照射実験 (2)”, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (高知大) .
- [101] 徳田真 他, “J-PARC K1.8BR ビームラインにおける液体 ${}^3\text{He}$ 標的への K^- ビーム照射実験 (4)”, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (高知大) .
- [102] 井上謙太郎 他, “J-PARC K1.8BR ビームラインにおける液体 ${}^3\text{He}$ 標的への K^- ビーム照射実験 (5)”, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (高知大) .
- [103] 田中良樹 他, “GSI の FRS での η' 核分光実験のための光学系と検出器の開発”, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (高知大) .
- [104] 山上大貴 他, “MWDC 用一体型読み出しボードを用いた η 核分光実験データ収集システムの開発状況”, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (東海大) .
- [105] 佐田優太 他, “J-PARC K1.8BR における ${}^3\text{He}(K^-, \Lambda pn)$ 反応を用いた K-多核子吸収の研究”, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (東海大) .
- [106] 早野龍五, “実験核物理領域 若手奨励賞の選考結果について”, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (東海大) .
- [107] 村上洋平 他, “超低速反陽子の原子核中における吸収全断面積測定実験”, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (東海大) .
- [108] 川崎新吾 他, “ $d(K^-, n)$ 反応による $\Lambda(1405)$ 分光実験のための後方散乱陽子検出器の性能評価”, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (東海大) .
- [109] 西隆博 他, “ $(d, {}^3\text{He})$ 反応を用いた π 中間子原子の精密分光 (10)”, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (東海大) .
- [110] 藤岡宏之 他, “FAIR Super-FRS における η 中間子原子核の分光実験に関する検討”, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (東海大) .
- [111] 小林拓実 他, “反陽子ヘリウム原子の波長 1154.9 nm 遷移の観測”, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (東海大) .
- [112] 渡辺珠以, “重水素アクティブ標的の低圧動作における性能評価”, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (東海大) .
- [113] 新倉潤, “ベータガンマ核分光による中性子過剰な ${}^{78}\text{Ni}$ 近傍核の構造研究”, 日本物理学会 2013 年度秋季大会, 高知大学, 2013 年 9 月 21 日.
- [114] 新倉潤, “Beta-decay spectroscopy at RIBF”, 7th SSRI workshop (和光), 2013 年 3 月 3 日.
- [115] 松井圭司, “ β 遅発中性子放出確率 (P_n) 測定のための ${}^3\text{He}$ 中性子検出器アレイの開発”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014 年 3 月 27 日.
- [116] 靱山悟至, “中性子過剰な Mg 同位体のインビームガンマ線核分光”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014 年 3 月 28 日.
- [117] 小林信之, “分解反応を用いた中性子過剰な Mg 同位体の研究”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014 年 3 月 28 日.
- [118] 宮崎卓也, “欠損質量核分光による ${}^8\text{C}$ 核励起状態の探索”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014 年 3 月 28 日.
- [119] 谷内稜, “高速な不安定核ビームを用いたインビーム γ 線核分光実験のための次世代検出器開発”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014 年 3 月 30 日.
- 招待講演
- [120] 早野龍五, “福島の内被ばくと外部被ばく - 福島のロングテール -”, 日本原子力学会福島シンポジウム 2013 年 8 月 25 日 (コラッセふくしま) .
- [121] 早野龍五, “不要だが必須 - 私が BABYSCAN を作るに至ったわけ”, 3.11 メモリアル・シンポジウム「生命をめぐる科学と倫理」- エネルギー・災害と人類の未来, 2014 年 3 月 9 日 (東京大学福武ホール) .
- [122] 早野龍五, “福島の内被ばくと外部被ばく - 福島のロングテール -”, 日本原子力学会 2014 年 3 月 26 日 (東京都市大学) .
- [123] 早野龍五, “福島の内被ばくと外部被ばく”, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (東海大) .
- (セミナー)
- [124] 早野龍五, “Internal radiocesium contamination of people in Fukushima”, 外国特派員協会 (FCCJ) April 25, 2013.
- [125] 早野龍五, “BABYSCAN - 技術面から”, 第 2 回福島県 WBC 研究会 (福島県平田村), June 29, 2013.
- [126] 早野龍五, “五七五 で始まりアインシュタイン に至る一時間の冒険”, 荒川区自然科学フォーラム (東大本郷), July 6, 2013.
- [127] 早野龍五, “福島の内被ばくと外部被ばく - 福島のロングテール -”, 原子力学会福島シンポジウム (福島市), Aug 25, 2013.
- [128] 早野龍五, “個人線量を測るのは何のため? 内部被ばくと外部被ばくのロングテール”, テレビユー福島主催・第 2 回公開講座「福島で日常を暮らすために」(福島市), Sep 1, 2013.
- [129] 早野龍五, “福島の『その後』現状と将来の課題”, 府省庁「放射線について『知って・測って・伝える』ために」 第五回 (東京南青山), Sep 11, 2013.
- [130] 早野龍五, “データで見る福島の内被ばくと外部被ばく”, 奈良学園中高 (大和郡山市), Sep 14, 2013.
- [131] Hayano, RS, “Higgs wasn't discovered in a day”, 福島高校, Oct 11, 2013.

2. 原子核・素粒子実験

- [132] 早野龍五, “福島の内被ばくと外被ばく - 個人線量測定的重要性”, 現場からの医療改革推進協議会 (東大医科研), Nov 9, 2013.
- [133] 早野龍五, “理科教員は何を伝えるべきか - データで見る福島の内被ばくと外被ばく”, 福島県高等学校教育研究会理科部会 (福島高校), Dec 8, 2013.
- [134] Hayano, RS, “Engaging with local stakeholders: Some lessons from Fukushima for recovery”, Wiener Physikalisches Kolloquium, University of Vienna, Austria, Dec 16, 2013.
- [135] 早野龍五, “私が不要な測定装置をあえて作った理由”, 東京大学物理学教室ランチトーク, Jan 30, 2014.
- [136] 早野龍五, “福島の内被ばくと外被ばく”, 第 34 回放射線防護研究会 (東京), Feb 15, 2014.
- [137] 早野龍五, “五七五 で始まりアインシュタイン に至る 一時間の冒険”, 中学校教員研修会 (大日本図書), Feb 23, 2014.
- [138] 櫻井博儀, “科学するところ — 対象、思索、実行 —”, 不動岡高校, 2013 年 4 月 30 日.
- [139] 櫻井博儀, “元素合成の謎 — 超新星爆発がウランを生み出したのか? —”, 日本物理学会科学講演会, 2013 年 8 月 22 日.

(集中講義)

- [140] 櫻井博儀, “RI ビームで拓く不安定核物理”, 九州大学, 12 月 2 日~4 日.

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約 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 2.2.1) を建設し、精密実験によってヒッグス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 年には大きなブレイクスルーがあり、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^+ と e^-) は、素粒子とみなすことができるので、それらの衝突は素過程である。また、 e^+ と e^- は粒子と反粒子の関係にあるので、衝突によって対消滅が起こり、その全ての衝突エネルギーは新たな粒子の生成に使われる。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



図 2.2.1: 陽電子・電子衝突のリニアコライダー、ILC

的利点を有する。しかし、LEP のような円形 e^+e^- コライダーではシンクロトロン放射によって電子や陽電子のエネルギーが急速に失われる。従って、電子・陽電子を向かい合わせて直線的に加速して正面衝突させるシンクロトロン放射の出ないリニアコライダーの方が経済的である。日本はいち早く e^+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い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。8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 [1]。2013年からは ILC は新たな国際組織 LCC (Linear Collider Collaboration) 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）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。更に、2013年9月には日本学術会議が「国際リニアコライダー計画に関する所見」を発表し、2014年度には ILC の名前がついた準備予算が執行される。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と浅井研究室、素粒子物理国際研究センターとも連携し、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

ILC のための最終収束系の試験施設 ATF2 の仮想衝突点において縦方向に 37nm に収束した極小の電

子ビームサイズを測定する「新竹モニタ」を開発している。測定原理としては、電子ビームに直交する平面上に作るレーザー干渉縞でビームをスキャンする。干渉縞上で磁場強度の山の位置に電子ビームが衝突する時、モニタ後方に置いた 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。コンプトン信号量の変調度を測定し、そこからビームサイズを算出する。このビームサイズ測定方式は新竹積氏によって提唱され、先行するFFTB 実験では波長 1064nm のレーザーを用いて 70nm のビームサイズが測定された。ATF2 における改良点は、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 のレーザーの使用、ビームを固定したまま測定できるように光学遅延の導入、水平方向のビームサイズ測定にも対応するレーザーワイヤー方式の導入、シグナルとバックグラウンドの分離に有利な多層構造の 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 (仮想衝突点の垂直方向ビームサイズ) を測れる唯一の手段として 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_y 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と収束手法の研究に常時安定に貢献している。これまでに多数回のハードウェアと測定手法の改良により、5%の測定安定性と性能の向上が明確に確認されてきた。2012 年末に世界最小の 70 nm を再現性を以って連続測定でき、2013 年 3 月には 65 nm、更に今年 4 月には 4.5%の測定安定性で 63 nm の記録を達成し、次々と記録を更新してきた。瞬間的には 55 nm 程度の測定まで達成している。様々なレーザー由来の系統誤差要因の詳細分析が継続し、測定値に不確定性の考慮や、補正を加えることで、「真」のビームサイズを導出することが目的である。

ILD 電磁カロリメータ

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 は、Particle Flow Algorithm (PFA) を使い、50 GeV のジェットに対して 3-4 % の分解能を目指す。PFA では、飛跡検出器の情報を用いて、荷電粒子の寄与を推定し、粒子の種類に適した方法でエネルギーを測定する。PFA は、十分な細密度の電磁カロリメータを必要とするため、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吸収体を使ったサンドイッチカロリメータにしている。検出器層は、5 mm 四方のピクセルのシリコン PIN ダイオード (SiECAL) が候補の一つである。

シミュレーションでの 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。一つ目はガードリングの幅で、0 mm から 2 mm ではほぼ線形に分解能が悪化する。二つ目は PCB の厚みで、3 mm から悪化し始める。シミュレーションでの頑健性の評価も行った。一つ目はデッドピクセルで、ランダム分布ならば、ピクセルごとよりも読み出しチップ

1 つ (8 × 8 ピクセル) ごとに死んでいる方が分解能への影響は 2 倍程度大きい。二つ目はベDESTAL の広がりによるノイズで、 10^{-5} までの割合では分解能への影響はない。三つ目は校正のずれで、ジェットのエネルギー分解能にはほぼ影響がないが、光子の分解能の定数項は悪化する。四つ目は隣り合うピクセルへのクロストークで、光子ではエネルギー測定値への影響がエネルギーが高いほど大きくなる。今後、より現実に即したシミュレーションを行うためのモデルも提案している。

2011 年の FNAL での SiECAL の物理試作機のビームテスト結果を利用した、2 光子分離の研究を行った。イベント再構成のための、光子の同定に特化した GARLIC (GAMMA Reconstruction at a LInear Collider experiment) の開発を行っており、これを用いた 2 光子イベントでのクラスタの分離性能は、従来の PandoraPFA による再構成よりも分離可能なクラスタ間距離が半分程度に改善することを示した。

シリコン PIN ダイオードの I-V、C-V 測定曲線から基本特性の評価をしており、その結果は ILD の要求性能を満たすものだった。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 [1, 12]。

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。超対称性粒子 (SUSY) の発見が期待されているが、まだその兆候は見えていないため、アップグレード後に期待されている。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、真に国際的な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。

ヒッグス粒子の性質測定

2012 年に ATLAS 検出器を用いてヒッグス粒子を発見し、これによりヒッグスの物理が幕を開けた。このヒッグス粒子の性質を明らかにすることは、標準理論を完成できるだけでなく、新物理に対する示唆を得ることにつながる。そのために、二光子へ崩壊する事象を解析し、ヒッグス粒子の結合定数の、より詳細な測定をおこなった [5]。測定精度を高めるため、統計手法を改善して光子同定の系統誤差を半減させた。ジェットが光子に誤同定される背景事象のために実現されなかった、実光子による電磁カロリメータのエネルギースケール校正を開発し、ヒッグス粒子の質量測定精度を向上させた。標準理論のインプットパラメータであるヒッグス粒子の質量を、0.6% の精度で決定した。これにより、ヒッグス粒子の結合を 21% の精度で測定することができ、標準理論と無矛盾な結果を得た (図 2.2.2) [11]。さらにヒッグス粒子のスピンも測定し、標準理論で予言されたとお

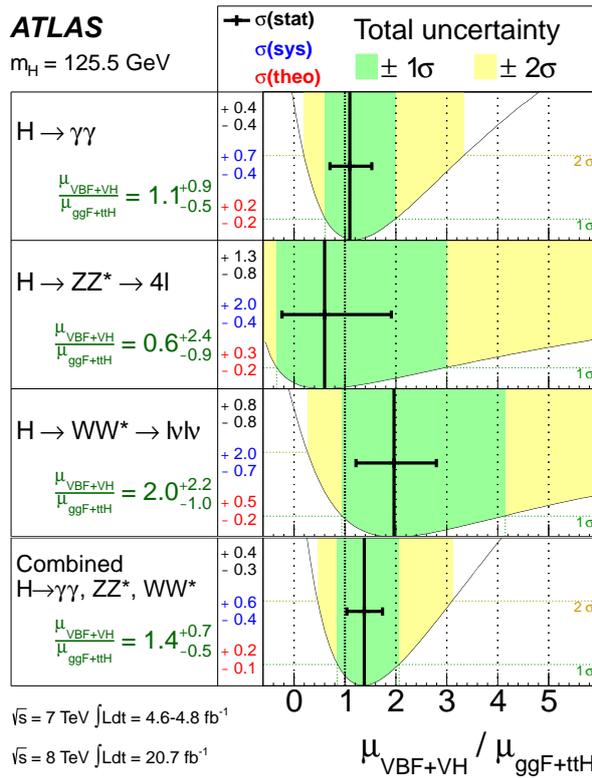


図 2.2.2: VBF+VH と ggF+ttH のシグナル強さの比。

りスピン 0 であることが確認された [6]。スピン測定と結合測定の結果と合わせて、発見した新粒子の性質がヒッグス粒子と無矛盾であると結論付けた。

超対称性粒子発見に向けた研究

2015 年から LHC は前人未到の重心系エネルギー 13(14) TeV での稼働を開始する (Run2)。SUSY 粒子が存在すれば Run2 初期でも発見の可能性があるが、精度の良い背景事象推定が必要である。そのために、2012 年までの重心系エネルギー 8 TeV (Run1) での実験データを用いる背景事象推定方法を開発した。モンテカルロシミュレーションを用いた検証で、横方向運動量分布などを良く再現することが確かめられた。また、この方法を用いれば、背景事象推定の誤差を約 3 倍改善することが可能であり、Run2 での SUSY 粒子発見の大きな助けとなる。

2.2.3 小規模実験

超冷中性子実験

超冷中性子は、典型的な物質のフェルミポテンシャルに比べ、小さな運動エネルギーを持つ低速中性子である。物質表面で全反射する性質を持つ上に電磁気力に影響されにくい事から、重力などの微弱な相互作用の検証実験に最適な試験粒子として利用されている。

地球の重力ポテンシャルと滑らかな面を持つガラス製の床からなる系で束縛した場合、鉛直方向の存在確立分布に 10 μm の濃淡分布を示すことが量子論から期待される。この分布を精密に測定することによって、重力場による量子効果を観測する。これが、この実験の第一の目標である。

過去に報告されている実験において、中性子検出器の位置分解能 (数 μm 程度) が濃淡分布の測定精度を制限していた。そこで、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 2.2.3)。超冷中性子は、平滑な床と 0.3 μm の粗さを持つ天井で構成された中性子ガイドの中を通り、床の上での重力による量子状態を作る。主量子数の高い中性子は 100 μm の高さにある粗い天井で反射し、鉛直方向のエネルギーを得ることで取り除かれる。ガイドを通ってきた超冷中性子は、ニッケル円筒面で全反射し、高さ方向の分布が 25 倍程度に拡大される。円筒面は、大阪大学超精密科学研究センターにおいて、中性子波長に比べ十分滑らかに研磨した。拡大した分布は、CCD を用いたピクセル検出器によって測定する。受光面に中性子を荷電粒子へ変換するボロン 10 を蒸着し、位置分解能を損なうことなく中性子検出を可能にした。以上の検出器システムで 0.7 μm の位置分解能を得ることに成功している。

フランスにあるラウエ-ランジュバン研究所において約 50 日間の物理測定を行った。図 2.2.4 に、得られた実験データと計算による中性子分布を示す。(a) が全体の分布で (b) が立ち上り部分を拡大したものである。十字のプロットが測定データを示す。ヒストグラムは計算による分布で、各々の順位まで足し合わせたものを示した。主量子数が 50 を越える状態からの寄与は十分に小さく無視できる。円筒面による超冷中性子分布の拡大過程では位置と運動量の情報が必要で、ウィグナー関数を用いて位相空間上での

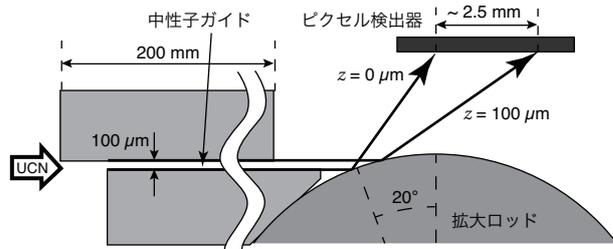


図 2.2.3: 測定器システムの主要部分。

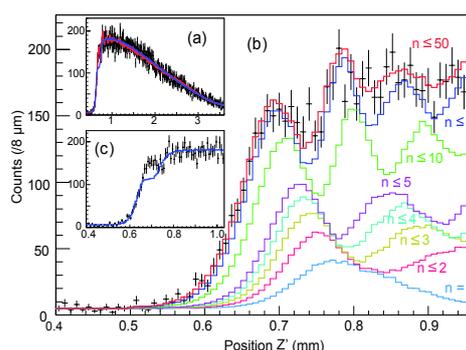


図 2.2.4: 実験結果と計算による分布（第 50 単位まで）の比較。(a) 全体と (b) 分布の立ち上がり部分。(c) 古典力学による計算から得られる分布との比較。

量子状態を記述し評価をした。(c) は測定データと、古典力学による計算から得られる分布との比較である。十分な確度で量子効果が確認され、この結果を、投稿論文や国際会議を通して公開した。[9, 30]

今回観測された存在確立分布の濃淡をさらに精密に測定することで、ミクロスコピックなレベルで等価原理を検証できる可能性があり、これが、この実験の二つ目の目的である。また、到達距離にして $10 \mu\text{m}$ 程度の未知相互作用が存在すれば、測定分布に摂動の効果が認めらる。摂動を評価することで未知短距離力の探索が可能となるが、これが三つ目の目的となる。

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散乱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て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。

実験は大韓民国の研究炉 (HANARO) にある SANS ビームラインにて行っている。散乱原子として高質量数の反磁性原子である Xe を用いる。高純度試料ガスを扱うための真空系やガス配管と、ビームラインにインストールする試料チャンバーの製作をおこなった。系統誤差の一要因にチャンバー表面からのアウトガスなどによるキセノン試料の汚染が考えられるが、適切な表面処理を施すことで無視できる程度まで抑えられる事がわかった。また、試料ガス純

化ラインのプロトタイプを製作し評価した。本年度末に、一回目の実験を行い、予定されていた統計量のデータを取得した。現在、解析を進めているところである。これらは、APPC12 や GRANIT2014 などの国際会議等で公表した。[4, 19, 29, 53]

2.2.4 EPR 相関測定とベル不等式検証

量子論による我々の世界の記述はとても成功している。しかしそれが唯一解であるか、あるいは拡張した古典論によって再現されるかというのは甚だ非自明である。ベル不等式はその問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。光子の実験においてその破れは既に多数確認されているが、破れの普遍性という観点から、また不等式を破る原因となる量子力学の性質へのさらなる理解のため光子以外の様々な系で同様実験が望まれる。これはまだ例が非常に限られている。高エネルギーコライダー実験は、生成される不安定粒子がエンタングル状態のソースとなること、その崩壊の様子からスピンの情報を取得できること、様々な粒子・相互作用を含んだ系が実現されることからその突破口として大きく期待される。我々はこれまでの理論的考察を見直し、新たなベル不等式の定式化を行った。また実験における不等式の検証可能性を、5つの崩壊モード; $\eta_c, \chi_{c0}, J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda} \rightarrow p\pi^-\bar{p}\pi^+, Z/\gamma^*, H \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow \pi^-\nu\pi^+\bar{\nu}$ に関して解析し、現存および将来のコライダー実験 (BES, Belle, LEP, ILC) にて到達できる感度を見積もった。結果、 $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda} \rightarrow p\pi^-\bar{p}\pi^+$ 以外のチャンネルでベル不等式は破れ、潜在的に実験で検証が可能であること、また $\eta_c, \chi_{c0} \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda} \rightarrow p\pi^-\bar{p}\pi^+$ の2つのチャンネルでは既存のコライダー実験のデータで十分感度があり、それぞれ $2\sigma, 3\sigma$ でベル不等式の破れが確認できることを確認した [13]。

<受賞>

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Behnke, J. E. Brau, P. Burrows et al.: The International Linear Collider Technical Design Report (2013) ISBN 978-3-935702-74~79
- [2] S. Chen, Y. Nakaguchi, S. Komamiya: "Testing Bell's Inequality using Charmonium Decays" Prog. Theor. Exp. Phys. (2013) 063A01
- [3] Go Ichikawa, Sachio Komamiya, and Yoshio Kamiya: "Observation of the Gravitationally Bound Quantum States of Ultracold Neutrons with Submicron Spatial Resolution", JPS Conference Proceedings 1, 013101 (2014).
- [4] Yoshio Kamiya, Misato Tani, Sachio Komamiya et al.: "A Search for Non-Newtonian Force in a Precision Measurement of the Scattering of Slow Neutrons in Xenon Gas", JPS Conference Proceedings 1, 013017 (2014).

- [5] The ATLAS Collaboration: “Measurements of Higgs boson production and couplings in diboson final states with the ATLAS detector at the LHC”, *Phys. Lett. B* **726** (2013) 88
- [6] ATLAS Collaboration: “Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data”, *Phys. Lett. B* **726** (2013) 120
- [7] Jacqueline Yan, Yohei Yamaguchi, Yoshio Kamiya, et al.: “Measurement of nanometer electron beam sizes with laser interference using Shintake Monitor”, *Nucl. Instrum. Meth. A* **740** (2014) 131
- [8] G.R. White, R. Ainsworth, T. Akagi et al. (ATF2 Collaboration): “Experimental Validation of a Novel Compact Focusing Scheme for Future Energy-Frontier Linear Colliders” *Phys. Rev. Lett* **112**, 034802 (2014)
- [9] G. Ichikawa, S. Komamiya, Y. Kamiya et al. : “Observation of the Spatial Distribution of Gravitationally Bound Quantum States of Ultracold Neutrons and Its Derivation Using the Wigner Function”, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 071101 (2014)
- (国内雑誌)
- [10] 駒宮幸男:「ヒッグス粒子の発見と素粒子物理学の展開」、数理科学 2013 年 11 月
- (学位論文)
- [11] 山口洋平:「Observation of Higgs Boson with Diphoton Events in Proton-Proton Collisions」、博士論文 (東京大学理学系研究科)、2014 年 3 月
- [12] 小坂井千紘:「Test of Basic Properties for Radiation Damage Measurement of Silicon Detector for the ILD Electro-magnetic Calorimeter」 修士論文 (東京大学大学院理学系研究科)、2014 年 3 月
- [13] 陳 詩遠:「Test of Bell Inequality and Entanglement Measurement in Collider Experiments」 修士論文 (東京大学大学院理学系研究科)、2014 年 3 月
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [14] C. Kozakai, S. Chen, D. Jeans, S. Komamiya: “SiW ECAL optimization study”, European Linear Collider Work Shop 2013, DESY, Hamburg, 27-31 May 2013.
- [15] J. Yan: “IPBSM Beam Size Measurement & Performance Evaluation”, European Linear Collider Workshop ECFA LC2013 , BDS+MDI, May 29 (2013) , DESY
- [16] J. Yan: “IPBSM (Shintake Monitor) Beam Size Measurement & Performance Evaluation” , 1st European Advanced Accelerator Concepts Workshop, 2-7 June 2-7 2013 , La Biodola, Isola d’Elba
- [17] C. Kozakai, S. Chen, D. Jeans, S. Komamiya: “SiW ECAL optimization study”, ILD ECAL meeting, LPNHE, Paris, 3-4 June 2013.
- [18] J. Yan: “Recent Results in Analysis of Errors in Fringe Scans by Shintake Monitor (IPBSM) ”, ATF2 Topical Meeting , July 8 , 2013 , KEK
- [19] Y. Kamiya, S. Komamiya, Guinyun Kim et al.: “A Search for Non-Newtonian Force in a Precision Measurement of the Scattering of Slow Neutrons in Xenon Gas”, the 12th Asian Pacific Physics Conference (APPC12), Makuhari, Japan, July 14-19 (2013)
- [20] Go Ichikawa, Sachio Komamiya, and Yoshio Kamiya: “Observation of the Gravitationally Bound Quantum States of Ultracold Neutrons with Submicron Spatial Resolution”, the 12th Asian Pacific Physics Conference (APPC12), Makuhari, Japan, July 14-19 (2013)
- [21] Yohei Yamaguchi: “Mass measurement in $H \rightarrow \gamma \gamma$ in ATLAS”, Higgs Hunting 2013, July 25-27 2013, Linear Accelerator Laboratory, Orsay, France
- [22] S. Chen: “Test beam analysis of SiW ECAL physics prototype in 2011 in FNAL”, CALICE Collaboration Meeting, September, 2013, LAPP, Annecy, France.
- [23] S. Chen : “Test of Power Pulsing with the HBU-LED System” CALICE Collaboration Meeting, September, 2013, LAPP, Annecy, France.
- [24] S. Chen: “ECAL optimisation - dead pixels, guard rings and PCB thickness” CALICE Collaboration Meeting, September, 2013, LAPP, Annecy, France.
- [25] C. Kozakai, S. Chen, D. Jeans, S. Komamiya: “Robustness of a SiECAL used in Particle Flow Reconstruction”, 2013 International Workshop on Future Linear Colliders, The University of Tokyo, Tokyo, 11-15 November 2013.
- [26] J. Yan: “IPBSM Beamsizes Measurement and Performance Evaluation”: LCWS2013, Nov 13, Tokyo, 2013
- [27] C. Kozakai, S. Chen, D. Jeans, S. Komamiya: “Robustness of a SiECAL used in Particle Flow Reconstruction”, ILD ECAL meeting, The University of Tokyo, Japan, 16-17 November 2013.
- [28] J. Yan: “IP-BSM Performance Evaluation” , “Beamtime Performance and Error Evaluations ” 17 th ATF2 Project Meeting, Feb 2014, KEK, Japan
- [29] Y. Kamiya, S. Komamiya, Guinyun Kim et al.: “A search for gravity-like short-range forces in precision measurement of neutron scattering in Xenon gas”, GRANIT2014 - Quantum Gravitational Spectroscopy with Ultracold Systems, Ecole de Physique des Houches, France, Mar. 2-7 (2014).

- [30] G. Ichikawa, S. Komamiya, Y. Kamiya and P. Geltenbort: “Observation of gravitational quantum states of ultracold neutrons and its derivation using the Wigner function”, GRANIT2014 - Quantum Gravitational Spectroscopy with Ultracold Systems, Ecole de Physique des Houches, France, Mar. 2-7 (2014).
- [31] J. Yan: “Stability Studies Based on IPBSM Fringe pattern Analysis”, FJPPL-FKPPL ATF2 Workshop, Mar 17-19, 2014, LAPP
- 招待講演
- [32] Sachio Komamiya: “The View from Japan -after the discovery of a Higgs Boson-”, Institute of Physics in UK, 10 April 2013, Liverpool UK
- [33] Sachio Komamiya: Linear Collider Board Report, ECFA-Linear Collider Workshop, 27 May 2013, DESY Hamburg Germany
- [34] Sachio Komamiya: “Update on Japanese Strategy”, ECFA-Linear Collider Workshop, 27 May 2013, DESY Hamburg Germany
- [35] Sachio Komamiya: “History and Prospect of the ILC Project”, From Design to Reality: Global TDR Event in Tokyo, 12 June 2013, The University of Tokyo, Tokyo
- [36] Sachio Komamiya: “Linear Collider Board and ILC in Japan”, Snowmass Studies -High Energy Frontier-, 1 July 2013, University of Washington, Seattle, USA
- [37] Sachio Komamiya: “International Linear Collider in Japan”, European Physics Society Meeting on High Energy Physics, 20 July 2013, Stockholm, Sweden
- [38] Sachio Komamiya: “View from Japan”, Snowmass Meeting, 6 August 2013, Minneapolis, MN, USA
- [39] Sachio Komamiya: “History and Future of the International Linear Collider ILC”, Workshop on Science Project Management, 16 October 2013, Fuku- racia Tokyo Station, Tokyo
- [40] Sachio Komamiya: “Linear Collider Board”, International Workshop on Linear Collider (LCWS13), 11 Novemver 2013, The University of Tokyo, Tokyo
- [41] Sachio Komamiya: “ILC after TDR”, Workshop on Helmholtz Alliance, 4 December 2013, KIT Karlsruhe, Germany
- (国内会議)
- 一般講演
- [42] ジャクリン ヤン: 「レーザー干渉縞を用いた新竹モニタ ILC の実現に向けての nm 電子ビームサイズ測定」、第4回 加速器・物理合同 ILC 夏の合宿 2013、富山、2013年7月20日～23日
- [43] 小坂井千紘、D. Jeans、駒宮幸男、神谷好郎: 「SiW ECAL のシミュレーション研究と Si センサー測定」、加速器・物理合同 ILC 夏の合宿 2013、富山、2013年7月20日～23日
- [44] 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 Higgs 粒子の性質測定」、日本物理学会 (秋)、2013年9月20日～23日、高知大学
- [45] ジャクリン ヤン: 「レーザー干渉型新竹モニターを用いた nm 電子ビームサイズの収束と測定」、日本物理学会 (秋)、2013年9月20日～23日、高知大学
- [46] 陳詩遠、Daniel Jeans、小坂井千紘、神谷良郎、駒宮幸男: 「ビームテストデータを用いた Particle Flow Algorism の性能の実験的評価」、日本物理学会 (秋)、2013年9月20日～23日、高知大学
- [47] 小坂井千紘、D. Jeans、神谷好郎、陳詩遠、駒宮幸男: 「ILD のためのシリコンセンサーの特性研究」、日本物理学会 (秋)、2013年9月20日～23日、高知大学
- [48] C. Kozakai, S. Chen, D. Jeans, S. Komamiya: “Robustness of a SiECAL used in Particle Flow Reconstruction”, 特別推進会議、KEK、2013年12月
- [49] ジャクリン ヤン: 「レーザー干渉型新竹モニターの性能評価と nm 電子ビームサイズの測定」、日本物理学会 (春)、2014年3月27日～30日、東海大学
- [50] 小坂井千紘、D. Jeans、駒宮幸男、神谷好郎: 「ILD のシリコン電磁カロリメーターの最適化と頑健性についてのシミュレーション研究」、日本物理学会 (春)、2014年3月27日～30日、東海大学
- [51] 陳詩遠、Daniel Jeans、小坂井千紘、神谷好郎、駒宮幸男: 「GARLIC と Pandora における 2 粒子分解」、日本物理学会 (春)、2014年3月27日～30日、東海大学
- [52] 荻野真由子、市川豪、駒宮幸男、神谷好郎: 「超冷中性子を用いた重力場による量子状態観測実験と中性子用ピクセル検出器の最適化」、日本物理学会 (春)、2014年3月27日～30日、東海大学
- [53] 板垣景大、駒宮幸男、神谷好郎、谷美慧: 「低速中性子散乱による質量と結合した新しい相互作用の探索」、日本物理学会 (春)、2014年3月27日～30日、東海大学
- 招待講演
- [54] 駒宮幸男: 「国際リニアコライダー ILC 学術的期待と概要」、日本学術会議・国際リニアコライダーに関する検討会、(2013年6月14日) 日本学術会議、東京
- [55] 駒宮幸男: 「ヒッグス粒子の発見と国際リニアコライダー」、Executive Management Program (2013年7月13日) 東京大学
- [56] 駒宮幸男: 「ヒッグス粒子の発見と素粒子物理学の発展」、サマーチャレンジ (2013年8月17日) 高エネルギー加速研究機構、つくば市、茨城県
- [57] 駒宮幸男: 「ヒッグス粒子の発見-素粒子物理学の一大革命」、駿台天文講座、駿台学園 (2013年8月17日) 東京

- [58] 駒宮幸男:「素粒子物理学の発展と次世代加速器」、三井住友 PreEMP (2013 年 11 月 26 日) 東京大学、東京
- [59] 駒宮幸男:「素粒子物理学の発展と国際リニアコライダー ILC」、南部コロキウム、(2013 年 12 月 12 日) 大阪大学、大阪
- [60] 駒宮幸男:「ヒッグス粒子発見!」、SSH 特別講座 (2014 年 1 月 31 日) 東京学芸大学附属高等学校、東京
- [61] 駒宮幸男:「国際リニアコライダー現状と展望 (趣旨説明)」、日本物理学会 2013 年秋季大会 (2014 年 3 月 28 日) 東海大学、神奈川

(セミナー)

- [62] 駒宮幸男:「ヒッグス粒子の発見と素粒子物理学の発展」、知の拠点フォーラム、(2013 年 4 月 19 日) 京都大学東京オフィス、品川、東京
- [63] 駒宮幸男:「詳細ヒッグス粒子 -素粒子物理学の到達・と今後-」、朝日カルチャーセンター (2013 年 4 月 27 日, 5 月 25 日, 6 月 15 日) 横浜、神奈川
- [64] 駒宮幸男:「素粒子物理学の最前線 「ヒッグス粒子」発見は何を意味するのか」、アカデミーヒルズ (2013 年 5 月 16 日) 六本木ヒルズ、東京
- [65] Shion Chen: “Test of Bell ’ s Inequality in the Charm Factory”, Open Seminar talk, 2 December 2013, IHEP, China.
- [66] 陳 詩遠:「コライダー実験における崩壊粒子の運動量エンタングルメントを用いたベル不等式検証」、KEK 理論セミナー、(2013 年 12 月 17 日)、KEK.
- [67] 駒宮幸男:「LHC でのヒッグス粒子発見と ILC の展望」、朝日カルチャーセンター (2014 年 1 月 25 日) 新宿、東京
- [68] Yoshio Kamiya: “A search for gravity-like short-range force using HANARO 40 m SANS beam line”, Korea Atomic Energy Research Institute, Feb. 11 (2014).

2.3 衰輪 研究室

衰輪研究室では、「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 原子炉ニュートリノモニター

PANDA (Plastic Anti-Neutrino Detector Array) は原子炉モニタリングを目的とした小型ニュートリノ検出器である。

原子炉では核分裂反応に伴う β 崩壊により大量の反電子ニュートリノが発生しており、このニュートリノは炉心を取り囲む水やコンクリートなどの遮蔽物によって遮られることなく建屋の外まで出てくる。原子炉に匹敵するニュートリノ発生源を人為的に用意することは困難であることから、ニュートリノの放出量をモニタリングすることで原子炉の運転状況を外部から監視することが可能になる。国際原子力機関 (IAEA) によって核不拡散の目的で現在実施されている原子力施設の保障措置は、負担の大きい侵襲的な方法に頼らざるを得ないことが課題となっており、ニュートリノを用いた新しいモニタリング手法は強力かつ非侵襲的な査察のツールになることが期待されている。そのため IAEA の要請に基づく形で、世界の複数のグループで原子炉モニタリングを目的とした小型ニュートリノ検出器の開発が進められている。

原子炉由来の反電子ニュートリノはターゲットとなるシンチレータ内で逆 β 崩壊を起こし、この反応で陽電子と中性子が同時に発生する。陽電子はただちにエネルギーを失って対消滅する一方、中性子はシンチレータ中で熱化した後ガドリニウムなどに捕獲されて γ 線を放出する。時間差を持つこの 2 種類のイベントを遅延同時計測で測定することで、バックグラウンド事象を排除してニュートリノイベントを検出することができる。

我々のグループが開発している PANDA は原子力発電所で求められる高い安全性を実現するべく、他の多くのグループが使用している液体シンチレータではなく、燃えにくいプラスチックシンチレータを採用している。それぞれに遮光を施した 10cm 四方、長さ 1m の棒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積み重ねることでターゲット部分を構成しており、各モジュールでのエネルギーデポジットからニュートリノイベントのセレクションを効果的に行うことができる。また、原子炉モニタリングを実現するため可搬性も重視しており、過去に開発したプロトタイプ検出器はすべて 2 トントラックまたは貨物輸送用コンテナに積載した状態で運搬と測定ができるよう設計されている。これらの特徴をいかして、原子炉建屋の外、かつ地上からの原子炉モニタリングを世界で初めて実現することを目指している。

プラスチックシンチレータを 100 本使用する PANDA100 のプロトタイプとして、シンチレータをそれぞれ 16 本、36 本、64 本使用した lesserPANDA、

PANDA36、そして PANDA64 の 3 つの検出器をこれまでに開発した。第 1 次プロトタイプ検出器 lesserPANDA は中部電力浜岡原子力発電所の敷地内で 2 か月間の試験的なバックグラウンド測定を行い、安定した無人運転が可能であることを確認した。それに続く第 2 次プロトタイプ検出器 PANDA36 では、関西電力大飯発電所の 2 号機近傍 (屋外・地上) での 2 か月間の測定を経て、原子炉運転期間と停止期間の間でニュートリノイベント検出率の 2σ の変化を捉えることに成功した (図 2.3.1)。これは原子炉建屋の外、かつ地上からの原子炉ニュートリノの検出としては、世界で初めてである。昨年度開発した第 3 次プロトタイプ検出器 PANDA64 は、データ取得回路の改善やシールドの設置などにより性能が大きく向上し、本郷キャンパス内に設置した貨物輸送用コンテナ内でのテスト測定も完了した。

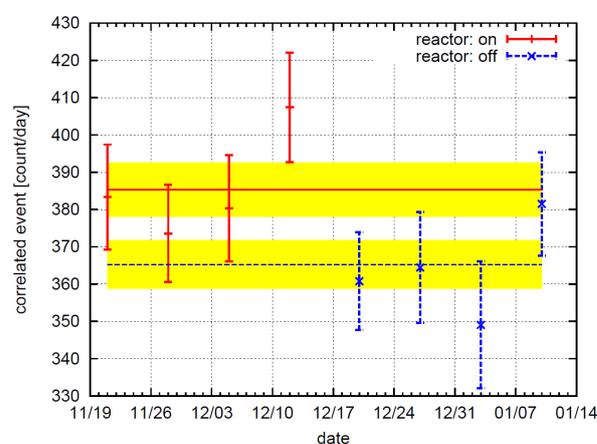


図 2.3.1: PANDA36 による大飯発電所での測定結果

地上測定において最大のバックグラウンドである高速中性子イベントについて、セレクションによる対処も検討した。原子炉ニュートリノ入射時の陽電子イベントと、高速中性子入射時の陽子反跳イベントを区別出来ればよい。プラスチックシンチレータを用いる PANDA では、液体シンチレータ方式の検出器で試みられている波形弁別法を行うのは難しいものの、モジュール構造を利用してエネルギーデポジット位置間の距離・角度情報を得る事ができる。これを利用したセレクションを検討し、比較的ニュートリノイベント数が少ないとき、従来行っていたセレクションより有利となるようなセレクションを開発した。またそれとは別に、同じく検出器のモジュール構造を利用して宇宙線ミューオンの飛跡の再構成を行うことで、建物での減衰による影を捉えた。

PANDA64 での測定に向けた準備と並行して、シンチレータを 100 本使用するプロジェクトの最終的な検出器である PANDA100 の開発も開始しており、データ取得回路のアップデート、水シールド構造の簡略化などを進めている。PANDA64 や PANDA100 を使用して、PANDA36 が大飯発電所で測定を行ったときと同じ条件下で測定を行うことを想定した場合、原子炉運転期間と停止期間を PANDA64 の場合

は2.5日ずつ、PANDA100の場合は0.8日ずつ測定するだけでニュートリノイベントの 3σ の変化を捉えることができると見込まれている。

PANDAの開発を進めつつ、ニュートリノによる原子炉モニタリングの実現にさらに貢献すべく、フランスで行われているNucifer実験に2013年度から参加している。NuciferはCEA Saclayが中心となって開発している液体シンチレータを用いた小型ニュートリノ検出器であり、PANDAがモジュールごとのエネルギーデポジットの情報をイベントセレクションに用いているのに対して、Nuciferは波形弁別法を用いてバックグラウンドイベントの除去を試みている。測定はフランスの実験炉Osirisにおいて行われており、検出器の設置場所は炉心から約7mのごく近傍である。屋外や地上での測定ではないため環境由来のバックグラウンドの影響が小さい一方で、炉心や周囲の配管からのバックグラウンドが原子炉の運転状況に伴って変化する環境にあり、PANDAとは異なる条件下での原子炉モニタリングに挑んでいる。Nuciferは昨年3月から安定した測定を行っており、現在得られたデータの解析を共同で進めている。

最近、複数の原子炉ニュートリノ実験の解析結果から指摘されている原子炉アノマリーをはじめ、さまざまな異なるタイプのニュートリノ実験によって第4のニュートリノ（ステライルニュートリノ）の存在が示唆されており、世界各地で20以上の検証実験が計画されている。ステライルニュートリノの検証は、短いベースラインでのニュートリノ振動を捉えるために、原子炉などのニュートリノ源のごく近傍にニュートリノ検出器を設置する必要がある。将来的にはPANDAを用いてステライルニュートリノの検証実験に貢献することを目指している。

想定外の現象

約2か月に及ぶ大飯発電所でのPANDA36検出器による測定データを再解析したところ、数十秒以上継続する γ 線と思われる放射線のバースト現象が3例観測された。そのうち、日本標準時2012年1月5日6:46頃に観測されたバーストは継続時間が約180sで、エネルギーが3MeV以上の検出率が最高で $5.5 \times 10^2/s$ もあった。

いずれの事例でも、気象庁の観測データによれば、近くに活動度の高い雷雲の存在が確認されており、雷雲中の電場と何らかの関係があると考えられる。我々の観測以前にも、冬の日本海沿岸地方の雷雲に関係した類似の γ 線バースト現象が観測されている。PANDA検出器のような、比較的大質量でセグメント構造をもつ検出器による観測はこれが初めてなので、このバースト現象を詳しく解析してみた。

γ 線がプラスチックシンチレータモジュールのひとつでコンプトン散乱をして別のモジュールで再びエネルギーを落とすようなイベントを解析することにより、 γ 線の飛来方向が推定できる。それによると、我々の観測したバーストは、すべてほぼ天頂方向より飛来しており、バースト継続中はその方向は変わらなかった。

また、検出されたエネルギーは10–15MeVまで延びる連続スペクトルであった。単純なモデルによるモンテカルロ・シミュレーションを行ったところ、エネルギーが16MeVの単色の電子を高度400–1100mの上空から鉛直下方に発射した場合の電磁シャワーによるエネルギースペクトルが観測データをよく近似していることがわかった。日本海沿岸の冬の雷雲は一般的な夏の雷雲と異なり、高度が低いことがわかっておりこのモデルと矛盾しない。逆に、夏の雷雲では高度が高すぎてこの程度のエネルギーの電子の発生する電磁シャワーは空気により吸収されて地上には届かない。

このような高エネルギーの γ 線が空気中を通過した時には、空気中の窒素原子に対するphotonuclear reactionにより高速中性子が発生することがあるが、PANDA36検出器でも少数の高速中性子が検出されている。

このような γ 線を発生する機構として、雷雲中の電場による相対論的逃走電子のなだれ増幅モデルが提唱されている。空気中ではその阻止能のため、加速電場があっても低エネルギーの電子は加速されない。しかし、ある程度以上のエネルギー（典型的な雷雲では百～数百keV以上）の電子に対しては、加速電場による静電気力が阻止能を超えるので ~ 20 MeVまで加速されうる。この加速された電子が、電磁シャワーなどにより電子を生み出して、さらに加速されることを繰り返すというのが、相対論的逃走電子のなだれ増幅モデルである。われわれの解析結果もこのモデルと矛盾しない。このなだれ増幅の種になる電子は宇宙線により供給されると考えられるが、知られている宇宙線中の電子のフラックスと、電子や γ 線の空気による減衰を考慮して、はたして我々の観測した検出率 $5.5 \times 10^2/s$ を説明できるのかどうかについては現在解析中である。

2.3.2 Hidden photon ダークマター探索

概要

様々な天文的観測の結果から、宇宙の物質成分の大半は、我々がよく知る通常の物質ではない何か、暗黒物質＝ダークマターによって占められていることが明らかになった。このダークマターの正体を突き止めることは、現在の宇宙・素粒子物理にとって最も重要な課題の一つとなっている。その中でも、ダークマターを直接実験室中の物質と反応させてその信号を得る直接探索実験はその証拠を掴み性質を調べる上で必須である。

近年、国内外の多数のグループにより直接探索実験が行われている。そのほとんどはダークマター粒子として質量が $\gtrsim \text{GeV}$ と重いWeakly Interacting Massive Particle (WIMP)を想定し、その原子核反跳を捉える実験である。その他にはaxionダークマター探索実験ADMXが存在する程度で、WIMP以外のダークマター候補についての探索は十分に行われているとはいいがたい現状がある。

その中で、我々は hidden photon と呼ばれる新たな U(1) 対称性に対応するゲージボソン \tilde{X}_μ を持つモデルについて、それがダークマターとなりうることに目をつけ、実験的探索を行っている。そのラグランジアンは、

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}\tilde{X}_{\mu\nu}\tilde{X}^{\mu\nu} - \frac{\chi}{2}F_{\mu\nu}\tilde{X}^{\mu\nu} + \frac{m_{\gamma'}^2}{2}\tilde{X}_\mu\tilde{X}^\mu + J^\mu A_\mu$$

と、通常の光子との間に mixing parameter χ で記述される小さな混合が存在し、また質量 $m_{\gamma'}$ を持つ。このようなモデルは、標準理論を拡張する多くの模型において出現することが知られている。標準理論の電磁場との結合が存在するため、それを介して hidden photon を探索することができるが、 χ は非常に小さいことが想定されるため、何らかの方法でその信号を増幅する必要がある。これまでに axion ダークマターの探索を行ってきた ADMX では resonant cavity を用いて信号を増幅していた他、新たに dish antenna を用いる手法が提案された。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行っている。

光学領域

Hidden photon の質量が \sim eV の光学領域では、光を反射する球面鏡と光検出器を用いて探索を行うことができる。我々は直径 50cm の鏡と、フォトンカウンティングが可能な低ノイズの光電子増倍管を用いて、質量が光学領域にある hidden photon CDM の探索実験を行っている。2013 年度はこの実験装置の設計・制作を行い、現在実際に地下の実験室において探索実験を実行中である。

電波領域

我々は hidden photon の質量が 10^{-5} – 10^{-4} eV オーダーである電波領域での探索も行う予定である。探索は市販のパラボラアンテナを用い、BS 放送に使われている Ku バンド (約 12GHz) について行う。

パラボラアンテナは直径が 2.2m と大口径のものを使用し、受信された信号を FFT アナライザでフーリエ変換する。検出される電波のエネルギーは hidden photon ダークマターの質量と同等であるため、もし本粒子が検出された場合にはその質量に相当する周波数の信号強度だけが大きくなる。

現在はパラボラアンテナの信号利得の性能評価測定を行っている。今後はパラボラアンテナを電波暗室内に設置し、hidden photon の探索測定を開始する予定である。

本探索測定は約 1 か月を想定している。また、この測定を様々な周波数に感度のある受信機を用いて行うことで、広い領域の探索測定を行える。これらの測定によって図 2.3.2 に示すような領域の探索が可能になると期待される。

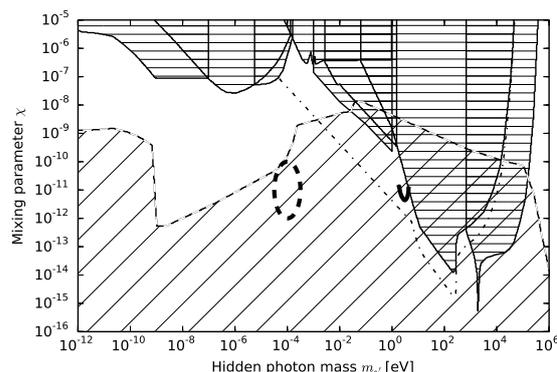


図 2.3.2: 斜線で塗りつぶされた部分が hidden photon ダークマターの未だに否定されていない領域。期待される感度領域はそれぞれ可視光領域については実線、電波領域については点線部分である。横線で塗りつぶされた領域は hidden photon について他グループの実験、考察によってすでに否定された領域。

<報文>

(原著論文)

- [1] 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, JCAP 07 (2013) 013, arXiv:1302.1000 [astro-ph.SR].

(会議抄録)

- [2] Y. Inoue, *et al.*: Search for Hidden photons with Sumico, Proceedings of the 9th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs 2013, eds. U. Oberlack and P. Sissol, DESY-PROC-2013-04, pp.109–114; arXiv:1312.7245.

(学位論文)

小型反電子ニュートリノ検出器におけるバックグラウンド事象、平成 26 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)

招待講演

- [3] Y. Inoue: Search for Hidden Photons with Sumico, 9th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs, Schloß Waldthausen, Mainz, Germany, 24–28 June 2013.
- [4] S. Oguri: Reactor neutrino monitoring with a mobile plastic scintillator array (PANDA), Applied Anti-neutrino Physics 2013 (AAP2013), COEX Convention Center, Seoul, Korea, 1–2 November 2013.

(国内会議)

一般講演

- [5] 鈴木惇也: Hidden photon とダークマター、ビッグバンセンター研究者交流会、東京大学 2013 年 6 月 26 日.
- [6] 井上慶純: Hidden photon search experiment, RESCEU サマースクール、「第 13 回 宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会、山形県山形市蔵王温泉みはらしの宿 故郷、2013 年 7 月 27 日.
- [7] 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 PANDA の高速中性子バックグラウンド、日本物理学会 2013 年秋季大会、高知大学 2013 年 9 月 20 日.
- [8] 黒田康浩: 原子炉モニタリングのための小型ニュートリノ検出器 PANDA の目的外使用、日本物理学会 2013 年秋季大会、高知大学 2013 年 9 月 20 日.
- [9] 鈴木惇也: Hidden photon ダークマター探索、日本物理学会 2013 年秋季大会、高知大学 2013 年 9 月 23 日.
- [10] 堀江友樹: 太陽 hidden photon の探索手法について、日本物理学会 2013 年秋季大会、高知大学 2013 年 9 月 23 日.
- [11] 加藤陽: 原子炉モニター Nucifer@Osiris、新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会、東京都府中市「クロス・ウェーブ府中」 2013 年 12 月 7 日.
- [12] 蓑輪 真: その後の PANDA、物理学教室ランチトーク、東京大学 2014 年 1 月 24 日.
- [13] 鈴木惇也: Hidden photon ダークマター探索 (1)、日本物理学会第 69 回年次大会、東海大学 2014 年 3 月 28 日.
- [14] 堀江友樹: Hidden photon ダークマター探索 (2)、日本物理学会第 69 回年次大会、東海大学 2014 年 3 月 28 日.
- [15] 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 PANDA[1]、日本物理学会第 69 回年次大会、東海大学 2014 年 3 月 27 日.
- [16] 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 69 回年次大会、東海大学 2014 年 3 月 27 日.

(セミナー)

- [17] 蓑輪 真: 素粒子と放射線、東京大学応用倫理教育プログラム「応用倫理研究 3」「生命をめぐる科学と倫理」、東京大学 2013 年 7 月 11 日.
- [18] 蓑輪 真: 科学的なものの見方、考福塾第一期第四回研修会、福井新聞社 2013 年 10 月 22 日.
- [19] 蓑輪 真: 世界は何でできている?、福井県おおい町名田庄中学校 2013 年 12 月 10 日、同大飯中学校 12 月 11 日.
- [20] 蓑輪 真: 宇宙と素粒子、高校生対象 クリスマス・レクチャー、けいはんなプラザ 2013 年 12 月 25 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)、ハワイ・マウナケア山頂にある国立天文台・すばる望遠鏡に搭載した超広視野 CCD カメラ(Hyper Suprime-Cam)によるダークエネルギーの研究、茨城県東海村の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、さらに、それら将来の研究計画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、我が国が誇る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。

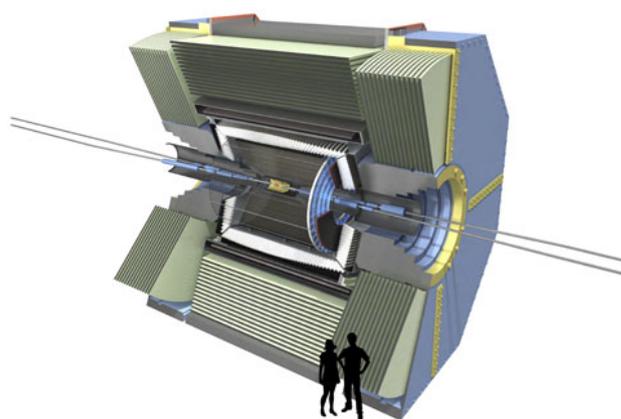


図 2.4.1: Belle II (ベルツー) 測定装置の完成予想図

2.4.1 (スーパー) B ファクトリー実験

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。現在は、2016年に予定されるSuperKEKB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中間子対や約9億のタウ・反タウ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、標準模型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_ℓ/Λ)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KEKBファクトリー加速器で得られた大量のタウ・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。KEKB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; $\tau \rightarrow \mu\nu\nu\gamma$ と $\tau \rightarrow e\nu\nu\gamma$)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 $F_2(0) = a_\tau$ を 10^{-3} の精度で測定し、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、 τW 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。これによって、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。

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、SuperKEKB加速器とBelle II測定器の建設が進行中である。SuperKEKBは、KEKBの40倍のルミノシティ($8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)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2.4.1)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。Belle II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。Belle実験に比べ、Belle IIでは崩壊点検出器をより外側まで配置することにより 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率が改善される(図2.4.2)。一方で、大面積を覆うために、特に最外層のラダーはこれまでの検出器に比べ格段に長くなり、製作にはさらに高度な技術が要求される。

本研究室はBelle II用SVD検出器(図2.4.3)の開発・量産を主導しており、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。

本研究室では特にSVDラダーの量産組立手法の開発、機械的品質検査の開発、電気的品質検査の開発を行っている。崩壊点の位置再構成精度に対する物理解析からの要請を考慮し、SVD検出器のラダーの組立精度は $10\mu\text{m}$ 以下を目指している。加えて、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内センサーのミスアライメントを直接測定し、デー

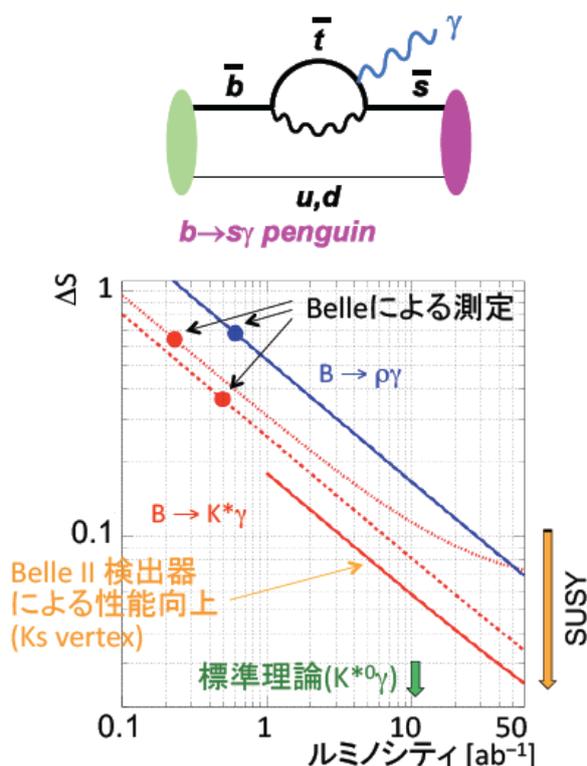


図 2.4.2: $b \rightarrow s\gamma$ 崩壊のダイアグラム (上) と Belle II 実験で期待される新物理に対する感度 (下)。標準理論では $b \rightarrow s(d)\gamma$ 過程からの光子はほぼ左巻きとなり、 CP 非対称度は < 0.02 と予想されている。一方、新物理による右巻きカレントがあると時間に依存した CP 非対称度が現れ、超対称性を仮定したモデルでは 10% 程度の CP 非対称度を予言するものもある。

タ解析時に補正することにより、さらなる崩壊点再構成精度の向上を図る予定である。

本年度は、より確実で安全な量産組立手法の確立で大きな進展があった。機械的品質検査の手法を開発したことにより組立精度のモニタリングが可能となり、以前より精度のよい組立が可能となった [48]。また、電気的品質検査装置を本年度に立ち上げたことにより、組立工程中に信号読み出し検査が行えるようになり、不良信号チャンネルの早期発見と修理が可能となった。これらの手法を用い、2013 年度末までに 7 台のモックアップラダーを組立てた (図 2.4.4)。SVD ラダーの量産は、2014 年 7 月開始を目指している。

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

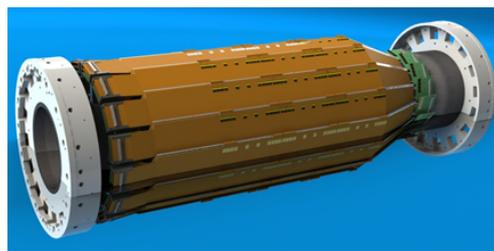


図 2.4.3: 当研究室で製作中の、Belle II SVD 測定器の完成予想図



図 2.4.4: Belle II SVD ラダー生産組立手法を用いて組み立てた精密モックアップ

ている CsI(Tl) 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。

2.4.2 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 2.4.5 に示す。2012 年後半および 2013 年に様々な試験観測を行い、2014

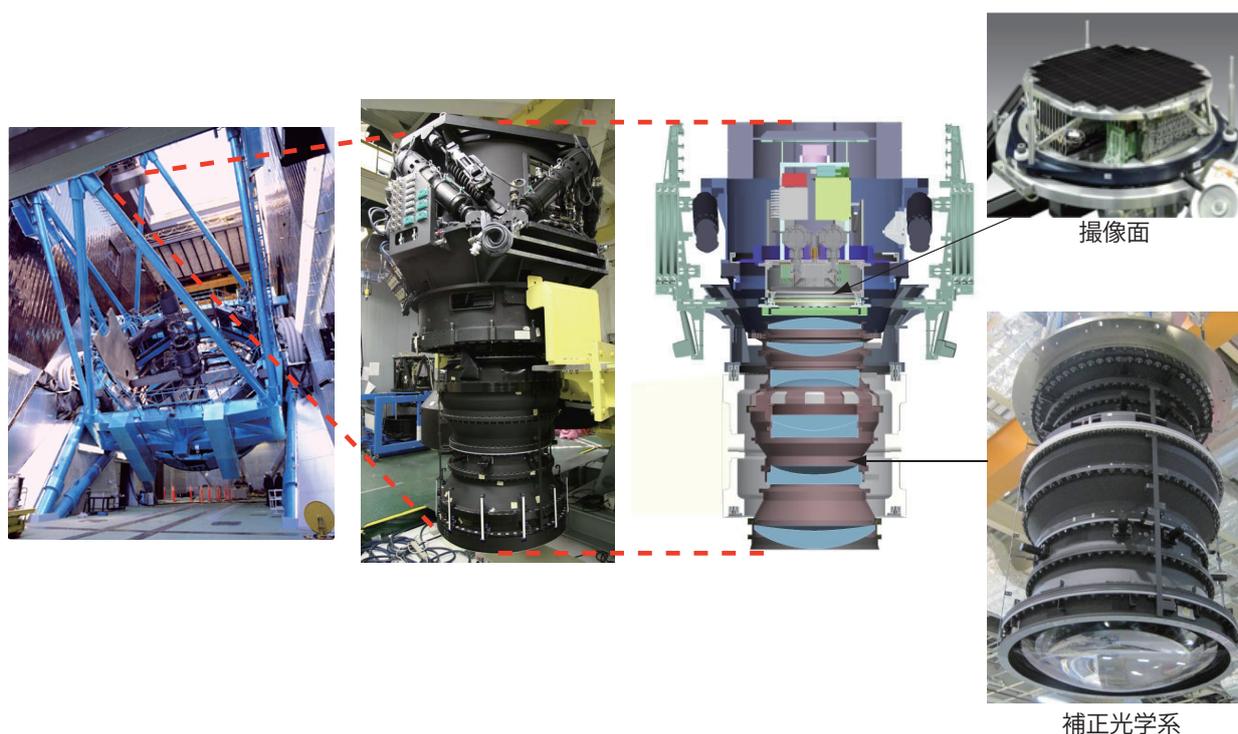


図 2.4.5: 完成した Hyper Suprime-Cam の概観。

年3月より、いよいよ大規模サーベイ観測を開始した。試験観測では、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2.4.6に示す。今後は、これまで当研究室が開発してきた銀河の形状測定アルゴリズムなどを用い重力レンズ効果の解析を進め、サーベイの最初の段階で得られるデータからダークマターの正体に迫る物理結果を出していきたい。

2.4.3 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、295 km 離れた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、世界最高精度でのニュートリノ振動の測定を行っている。

電子ニュートリノ発現現象の発見 電子ニュートリノ発現現象 ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動) が観測されれば、今後 CP 対称性の破れの探索ができる可能性が開けるため、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。

これまで収集した 2013 年 5 月までのデータを全て解析した結果、背景事象の期待値 4.9 ± 0.6 事象に

対し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 28 事象観測し、 7.3σ の有意度で電子ニュートリノ発現現象の確証を得た (図 2.4.7)。また、さらに原子炉ニュートリノ実験によるニュートリノ混合角 θ_{13} の測定結果と合わせることで、世界で初めてレプトンセクターでの CP 対称性 (粒子と反粒子の間の対称性) の破れに対する制限を与えた (図 2.4.8)。今後は、反ニュートリノビームを用いた実験を行い、 CP 対称性の破れに関する測定を続けていく予定である。

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° , $\sin^2 2\theta_{23} = 1$) 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 2013 年 5 月までに得られた 120 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、 $\sin^2 \theta_{23} = 0.514^{+0.055}_{-0.056}$ と、世界最高精度での測定を行うことに成功した (図 2.4.10)。1998 年のニュートリノ振動の発見以来、混合角 θ_{23} の最も精度が高い測定はスーパーカミオカンデによる大気ニュートリノ観測を使ったものであったが、今回の結果で、人工ニュートリノによる実験の精度がそ

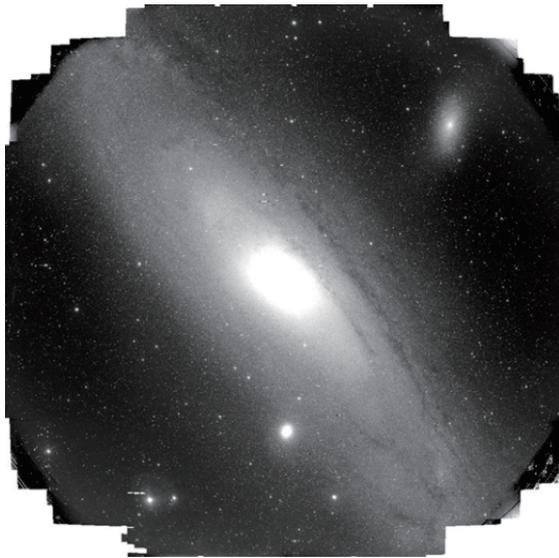


図 2.4.6: 試験観測で得られたアンドロメダ銀河 M31 の画像。拡大すると、230 万光年かなたの M31 の星々が一個々々分離して見分けられる。

れを初めて上回った。T2K 実験では、今後もデータ収集を続け、さらに精度のよい測定を行っていく。

T2K 前置検出器ホールでの新実験の提案 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る。今後、T2K 実験で精密測定を行う上で、ニュートリノ-原子核反応断面積の不定性による系統誤差が支配的となることが予想される。そこで、この系統誤差を削減するための新実験の設計を開始した。

T2K 実験では前置検出器での測定により反応断面積の系統誤差を削減しているが、スーパーカミオカンデ検出器と前置検出器の違いによる二つの系統誤差が大きな要因となっている。

1. 標的原子核の違い: スーパーカミオカンデが水を標的とするのに対し、前置検出器ではプラスチック(炭化水素)が主な標的であり、原子核効果の違いによる不定性がある。

2. アクセプタンスの違い: スーパーカミオカンデは全方位角に高い効率を持つのに対し、前置検出器は主にニュートリノビームの前方方向に生成された粒子に感度を持つ。

我々は、水とプラスチックの反応断面積の比を 3% の精度で測定し、T2K 実験の系統誤差を削減することを目標にした新実験の提案に向けて、研究を開始した。前置検出器ホール地下 2 階のスペースに、水と炭化水素の二種類の標的を持ち、かつ大角度まで高いアクセプタンスを持った新しい検出器を設置し、ニュートリノビームによる測定を行う。現在、モンテカルロシミュレーションにより検出器の設計・最

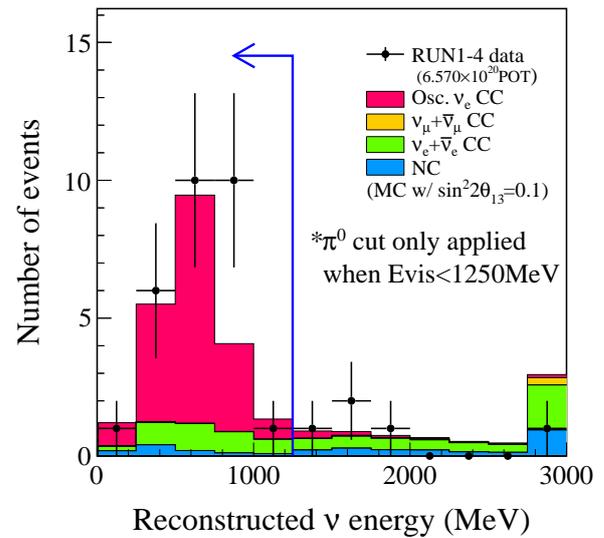


図 2.4.7: T2K 実験で得られた電子ニュートリノ反応事象候補の、再構成されたニュートリノエネルギー分布。黒点がデータ、ヒストグラムは $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$ を仮定したシミュレーションによる予測。

適化をするとともに、検出器要素であるシンチレータ・光検出器(MPPC)の開発を進めている。

2.4.4 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と比較することであるが、非対称性の確実な観測のためには 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

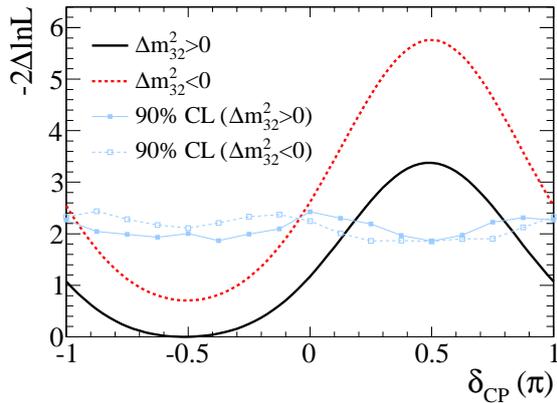


図 2.4.8: CP 対称性を破るパラメータ δ_{CP} に対する制限 [38]。横軸に δ_{CP} の値を取り、縦軸は negative log-likelihood の最小値からの差を示す。実線は正質量階層 ($\Delta m_{32}^2 > 0$)、点線は負質量階層 ($\Delta m_{32}^2 < 0$) の場合。正質量階層 (負質量階層) に対し、90%信頼度で $0.19\pi < \delta_{CP} < 0.80\pi$ ($-\pi < \delta_{CP} < -0.97\pi$, $-0.04\pi < \delta_{CP} < \pi$) を排除した。

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 2.4.11) 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。

陽子崩壊の有力なモードである $p \rightarrow e^+\pi^0$ 崩壊の寿命は、スーパーカミオカンデでの観測から下限値が 90% 信頼度で 1.3×10^{34} 年と測定されている。この寿命を 2.5×10^{34} 年と仮定したときに、ハイパーカミオカンデで 10 年間観測をした場合に期待される不変質量分布を図 2.4.12 に示す。ハイパーカミオカンデでの 10 年の観測により、陽子の質量が 5.7×10^{34} 年以上の場合には、 3σ 以上の有意度で信号の観測が可能である。

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験での CP 対称性の破れに対する感度を研究している。

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

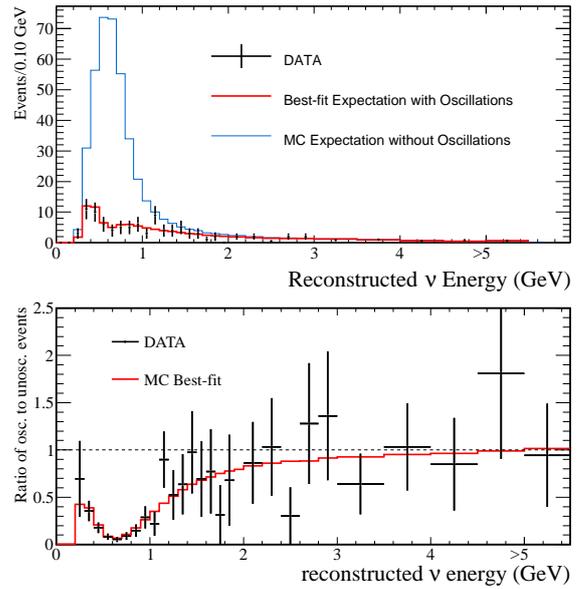


図 2.4.9: (上) T2K 実験で得られたミューオンニュートリノ事象の再構成エネルギー。実線はニュートリノ振動がない場合と、振動パラメータの最適解を仮定した時の MC シミュレーションによる予想値。ニュートリノ振動により、主にタウニュートリノに変化したニュートリノが検出されなくなっている。(下) ニュートリノ振動がない場合の予想値との比をエネルギーごとにとったもの。ニュートリノ振動に特有のパターンが見えている。

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 $O(10^5)$ 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 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。

我々は、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 HPD8 本を 200 トン水タンクに設置し、長期試験を開始した (図 2.4.13) [49]。また、20 インチ PMT の性能改良版、および 20 インチ径の HPD を世界で初めて製造し、その性能評価を開始した。

<受賞>

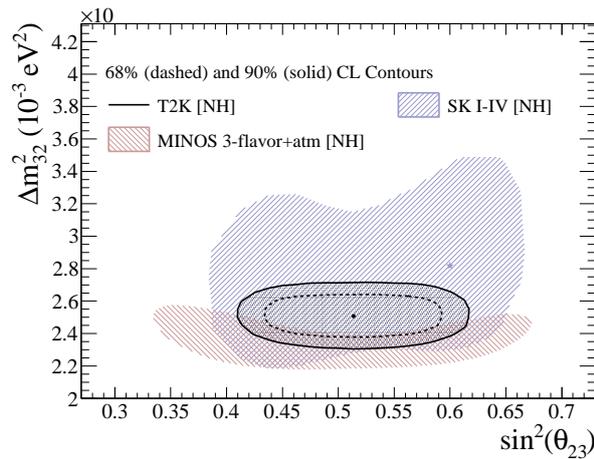


図 2.4.10: T2K 実験で得られた $|\Delta m_{32}^2|$ と θ_{23} に対する制限。スーパーカミオカンデ実験や、米国の MINOS 実験の結果と重ねてプロットしてある。

100万トン水チェレンコフ検出器 「ハイパーカミオカンデ」

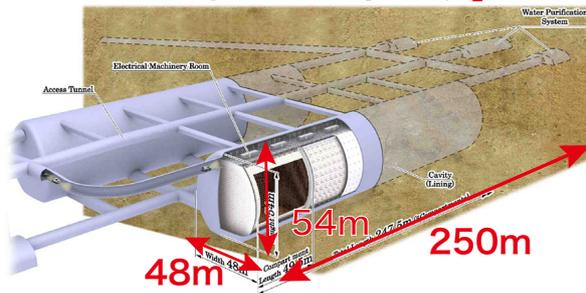


図 2.4.11: ハイパーカミオカンデ検出器の概念図。

- [1] 相原博昭、横山将志、他 (J-PARC ニュートリノビームライングループとして) 2013 年度 高エネルギー加速器科学研究奨励会 諏訪賞

<報文>

(原著論文)

- [2] C. Oswald *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the inclusive semileptonic branching fraction $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow X^- \ell^+ \nu_\ell)$ at Belle,” *Phys. Rev. D* **87**, 072008 (2013).
- [3] D. Liventsev *et al.* [Belle Collaboration], “Search for heavy neutrinos at Belle,” *Phys. Rev. D* **87**, 071102 (2013).
- [4] M. Leitgab *et al.* [Belle Collaboration], “Precision Measurement of Charged Pion and Kaon Differential Cross Sections in e^+e^- Annihilation at $\sqrt{s}=10.52$ GeV,” *Phys. Rev. Lett.* **111**, 062002 (2013).

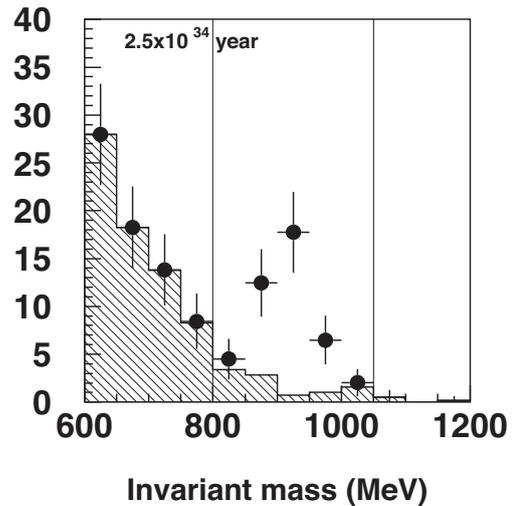


図 2.4.12: 陽子崩壊の有力な崩壊モード、 $p \rightarrow e^+\pi^0$ モードの寿命が 2.5×10^{34} 年と仮定したときに、ハイパーカミオカンデで 10 年間観測をした場合に期待される不変質量分布 (シミュレーション)。大気ニュートリノ由来の背景事情 (ハッチ部分) の上に明瞭なピークが観測可能である。

- [5] I. Adachi *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the CP Violation Parameters in $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ Decays,” *Phys. Rev. D* **88**, 092003 (2013).
- [6] B. H. Kim *et al.* [Belle Collaboration], “Search for an H -dibaryon with mass near $2m_\Lambda$ in $\Upsilon(1S)$ and $\Upsilon(2S)$ decays,” *Phys. Rev. Lett.* **110**, 222002 (2013).
- [7] O. Lutz *et al.* [Belle Collaboration], “Search for $B \rightarrow h^{(*)}\nu\bar{\nu}$ with the full Belle $\Upsilon(4S)$ data sample,” *Phys. Rev. D* **87**, 111103 (2013).
- [8] Z. Q. Liu *et al.* [Belle Collaboration], “Study of $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ and Observation of a Charged Charmoniumlike State at Belle,” *Phys. Rev. Lett.* **110**, 252002 (2013).
- [9] V. Bhardwaj *et al.* [Belle Collaboration], “Evidence of a new narrow resonance decaying to $\chi_{c1}\gamma$ in $B \rightarrow \chi_{c1}\gamma K$,” *Phys. Rev. Lett.* **111**, 032001 (2013).
- [10] V. Gaur *et al.* [Belle Collaboration], “Evidence for the decay $B^0 \rightarrow K^+K^-\pi^0$,” *Phys. Rev. D* **87**, 091101 (2013).
- [11] C. P. Shen *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of exclusive $\Upsilon(1S)$ and $\Upsilon(2S)$ decays into Vector-Pseudoscalar final states,” *Phys. Rev. D* **88**, 011102 (2013).
- [12] A. Sibidanov *et al.* [Belle Collaboration], “Study of Exclusive $B \rightarrow X_u \ell \nu$ Decays and Extraction of $|V_{ub}|$ using Full Reconstruction Tagging at

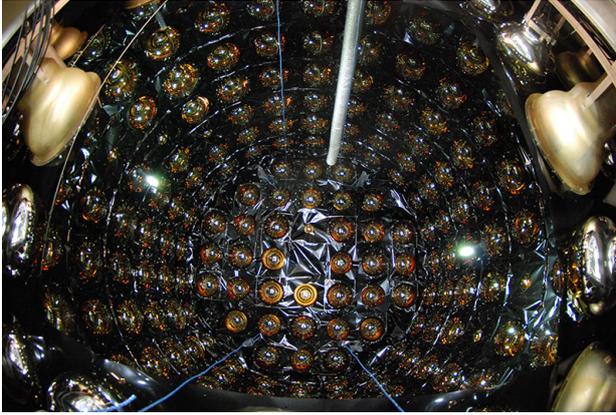


図 2.4.13: 試験のために 200 トン水タンク中に設置された光検出器。多数の 20 インチ光電子増倍管とともに、8 本の 8 インチ HPD が設置されている。

- the Belle Experiment,” Phys. Rev. D **88**, 032005 (2013).
- [13] K. J. Tien *et al.* [Belle Collaboration], “Evidence for Semileptonic $B^- \rightarrow p\bar{p}\ell\nu$ Decays,” Phys. Rev. D **89**, 011101 (2014).
- [14] K. Chilikin *et al.* [Belle Collaboration], “Experimental constraints on the spin and parity of the $Z(4430)^+$,” Phys. Rev. D **88**, 074026 (2013).
- [15] R. Chistov *et al.* [Belle Collaboration], “First Observation of Cabibbo-Suppressed Ξ_c^0 Decays,” Phys. Rev. D **88**, 071103 (2013).
- [16] S. Sandilya *et al.* [Belle Collaboration], “Search for Bottomonium States in Exclusive Radiative $\Upsilon(2S)$ Decays,” Phys. Rev. Lett. **111**, 112001 (2013).
- [17] E. White *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the Wrong-Sign Decay $D^0 \rightarrow K^+\pi^-\pi^+\pi^-$,” Phys. Rev. D **88**, 051101 (2013).
- [18] A. Zupanc *et al.* [Belle Collaboration], “Measurements of branching fractions of leptonic and hadronic D_s^+ meson decays and extraction of the D_s^+ meson decay constant,” JHEP **1309**, 139 (2013).
- [19] S. Uehara *et al.* [Belle Collaboration], “High-statistics study of K_S^0 pair production in two-photon collisions,” PTEP **2013**, 123C01 (2013).
- [20] M. Prim *et al.* [Belle Collaboration], “Angular analysis of $B^0 \rightarrow \phi K^*$ decays and search for CP violation at Belle,” Phys. Rev. D **88**, 072004 (2013).
- [21] P. Krokovny *et al.* [Belle Collaboration], “First Observation of the $Z_b^0(10610)$ in a Dalitz Analysis of $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(nS)\pi^0\pi^0$,” Phys. Rev. D **88**, 052016 (2013).
- [22] C. P. Shen *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$, $K^*(892)\bar{K}$ and $K_2^*(1430)\bar{K}$ at \sqrt{s} near 10.6 GeV,” Phys. Rev. D **88**, 052019 (2013).
- [23] K. Belous *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the τ -lepton lifetime at Belle,” Phys. Rev. Lett. **112**, 031801 (2014).
- [24] X. H. He *et al.* [Belle Collaboration], “Search for the process $e^+e^- \rightarrow J/\psi + X(1835)$ at $\sqrt{s} \approx 10.6\text{GeV}$,” Phys. Rev. D **89**, 032003 (2014).
- [25] B. R. Ko *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of $D^0 - \bar{D}^0$ Mixing in e^+e^- Collisions,” Phys. Rev. Lett. **112**, 111801 (2014).
- [26] Y. T. Lai *et al.* [Belle Collaboration], “Search for $B^0 \rightarrow p\bar{\Lambda}\pi^-\gamma$ at Belle,” Phys. Rev. D **89**, 051103(R) (2014).
- [27] M. Nayak *et al.* [Belle Collaboration], “Evidence for the suppressed decay $B^- \rightarrow DK^-, D \rightarrow K^+\pi^-\pi^0$,” Phys. Rev. D **88**, 091104(R) (2013).
- [28] F. Thorne *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the Decays $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi(1020)$, $B_s^0 \rightarrow J/\psi f_2'(1525)$ and $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+K^-$ at Belle,” Phys. Rev. D **88**, 114006 (2013).
- [29] E. Solovieva *et al.* [Belle Collaboration], “Evidence for $\bar{B}_s^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}\pi^-$,” Phys. Lett. B **726**, 206 (2013).
- [30] M. Friedl, K. Ackermann, H. Aihara, T. Aziz, T. Bergauer, A. Bozek, A. Campbell and J. Dingfelder *et al.*, “The Belle II Silicon Vertex Detector,” Nucl. Instrum. Meth. A **732**, 83 (2013).
- [31] C. Irmmler, T. Bergauer, A. Frankenberger, M. Friedl, I. Gfall, T. Higuchi, A. Ishikawa and C. Joo *et al.*, “A Low Mass On-Chip Readout Scheme for Double-Sided Silicon Strip Detectors,” Nucl. Instrum. Meth. A **732**, 109 (2013).
- [32] 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,” MNRAS **429**, 3627 (2013).
- [33] R. R. Akhmetshin *et al.* [CMD-3 Collaboration], “Study of the process $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$ in the c.m. energy range 1.5–2.0 GeV with the CMD-3 detector,” Phys. Lett. B **723**, 82 (2013).
- [34] A. V. Anisenkov, V. M. Aulchenko, L. M. Barkov, N. S. Bashtovoy, A. E. Bondar, D. A. Epifanov, L. B. Epshteyn and A. L. Erofeev *et al.*, “Barrel calorimeter of the CMD-3 detector,” Nucl. Instrum. Meth. A **732**, 463 (2013).
- [35] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Measurement of the Inclusive NuMu Charged Current Cross Section on Carbon in the Near Detector of the T2K Experiment,” Phys. Rev. D **87**, 092003 (2013).
- [36] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Evidence of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam,” Phys. Rev. D **88**, no. 3, 032002 (2013).

- [37] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Measurement of Neutrino Oscillation Parameters from Muon Neutrino Disappearance with an Off-axis Beam,” *Phys. Rev. Lett.* **111**, 211803 (2013).
- [38] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam,” *Phys. Rev. Lett.* **112**, 061802 (2014).
- [39] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “A Measurement of the Appearance of Atmospheric Tau Neutrinos by Super-Kamiokande,” *Phys. Rev. Lett.* **110**, 181802 (2013).
- [40] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Calibration of the Super-Kamiokande Detector,” *Nucl. Instrum. Meth. A* **737**, 253 (2014).
- [41] A. Renshaw *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “First Indication of Terrestrial Matter Effects on Solar Neutrino Oscillation,” *Phys. Rev. Lett.* **112**, 091805 (2014).
- (会議抄録)
- [42] M. Yokoyama, “Future (underground) Water Cherenkov detectors,” *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **235-236**, 183 (2013).
- [43] D.A. Epifanov, “CP violation in Charm and Tau at B-factories,” *Proc. of XXIVth Rencontres de Blois (May 27 – June 1, 2012 France)*, The Gioi Publishers, page 107 (2013).
- (その他)
- [44] R. Ellis *et al.* [PFS Team], “Extragalactic Science and Cosmology with the Subaru Prime Focus Spectrograph (PFS),” arXiv:1206.0737 [astro-ph.CO].
- [45] E. Kearns *et al.* [Hyper-Kamiokande Working Group], “Hyper-Kamiokande Physics Opportunities,” arXiv:1309.0184 [hep-ex].
- [46] A. de Gouvea *et al.* [Intensity Frontier Neutrino Working Group], “Neutrinos,” arXiv:1310.4340 [hep-ex].
- [47] K. S. Babu, E. Kearns, U. Al-Binni, S. Banerjee, D. V. Baxter, Z. Berezhiani, M. Bergevin and S. Bhattacharya *et al.*, “Baryon Number Violation,” arXiv:1311.5285 [hep-ph].
- (学位論文)
- [48] 清水信宏、修士論文：“Development of the Silicon Vertex Detector for Belle II Experiment” (2014年2月)
- [49] 須田祐介、修士論文：“Research and Development of Large-Aperture Hybrid Photo-Detectors for Hyper-Kamiokande” (2014年2月)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [50] Yoshiyuki Onuki, “The silicon strip vertex detector of the Belle II experiment,” HSTD9 - International “Hiroshima” Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors, Hiroshima, Japan, Sep. 1–5, 2013.
- [51] Yusuke Suda, “Performance Evaluation of the 8-inch Hybrid Photo-Detector,” The 14th International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN13), Kavli IPMU, Kashiwa, Japan, Nov. 11–13, 2013.
- [52] Taichiro Koga, “Performance Evaluation of New MPPC,” *ibid.*
- [53] Yusuke Suda, “Performance Evaluation of the Large-Aperture Hybrid Photo-Detector,” 8th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH 2013), Hayama, Kanagawa, Japan, Dec. 2–6, 2013.
- 招待講演
- [54] Masashi Yokoyama, “Nucleon Decay Search with Hyper-Kamiokande,” Intensity Frontier Workshop, Argonne National Laboratory, IL, USA, Apr. 25–27, 2013.
- [55] Masashi Yokoyama, “Long Baseline Experiments in Japan,” Colloquium Towards CP violation in neutrino Physics, Prague, Czech Republic, May 23–24, 2013.
- [56] Hiroaki Aihara, “Exploring the Energy Frontier with Lepton Colliders,” SLAC Summer Institute, July 10, 2013.
- [57] Masashi Yokoyama, “Hyper-Kamiokande: Detector Design and Physics Potential,” Community Summer Study 2013 (Snowmass on the Mississippi), Minneapolis, MN, USA, Jul. 29–Aug. 6, 2013.
- [58] Masashi Yokoyama, “Hyper-Kamiokande Project,” 16th Lomonosov Conference, Moscow, Russia, Aug. 22–28, 2013.
- [59] Masashi Yokoyama, “Experimental Status of Neutrino Physics,” XXIV Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN13), Natal, Brazil, Sep. 16–21, 2013.
- [60] Hiroaki Aihara, “Large particle accelerators in Japan — Tools for discoveries and innovation —,” Hard and Earth Sciences Workshop (UTokyo Forum), Sao Paulo, Brazil, November 12, 2013.
- [61] Masashi Yokoyama, “Status and future prospects of neutrino oscillation experiments,” Beyond the Standard Model 2014, KEK, Tsukuba, Japan, Mar. 3–7, 2014
- (国内会議)
- 一般講演
- [62] 須田祐介、「ハイパーカミオカンデに向けたハイブリッド光検出器の開発」、第3回高エネルギー春の学校、琵琶湖リゾートクラブ、2013年5月30日–6月1日

- [63] 清水信宏、「Belle II 実験 量産に向けた SVD モックアップ製作とその機械精度測定」、同上
- [64] 古賀太一郎、「新型 MPPC の特性評価」、同上
- [65] 須田祐介、「ハイパーカミオカンデに向けたハイブリッド光検出器の実証試験」、日本物理学会 2013 年秋季大会、高知大学、2013 年 9 月 20 日-23 日
- [66] 佐々木淳弥、清水信宏、「Belle II SVD layer-6 full ladder assembly status report,」 Flavor Physics Workshop 2013、三重県賢島、2013 年 11 月 25 日-28 日
- [67] 須田祐介、「ハイパーカミオカンデ用光センサー開発の現状」、第 3 回ニュートリノフロンティア研究会、2013 年 12 月 8 日
- [68] 横山将志、「100 万トン水チェレンコフ検出器ハイパーカミオカンデの開発研究」、平成 25 年度 宇宙線研究所共同利用研究成果発表会、2013 年 12 月 20 日
- [69] 佐々木淳弥、「Belle II 実験で用いるシリコンストリップ崩壊点検出器 (SVD) の電気的性能の評価方法について」、第 20 回東京大学素粒子物理国際研究センターシンポジウム、長野県白馬、2014 年 2 月 23 日-26 日
- [70] 古賀太一郎、「ニュートリノ振動精密測定のための水とプラスチックにおけるニュートリノ荷電カレント反応断面積比測定」、同上
- [71] 須田祐介、「ハイブリッド型光検出器の詳細評価と水タンク内における性能測定」、日本物理学会 第 69 回年次大会、東海大学、2014 年 3 月 27 日-30 日
- [72] 古賀太一郎、「T2K 実験ニュートリノビームを用いた水とプラスチックにおけるニュートリノ荷電カレント反応断面積比測定のための新検出器の設計」、同上
- [73] 佐々木淳弥、「Belle II 実験におけるシリコンストリップ型崩壊点検出器の電気的性能評価方法の構築」、同上



図 2.5.1: 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 2.5.1)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。

ヒッグス粒子発見と性質を探る

ヒッグス粒子は素粒子の質量の起源であり、本研究室も参加する LHC・ATLAS 実験及び CMS 実験で 2012 年に発見された。この発見をうけて、2013 年のノーベル物理学賞が受賞された。

我々のグループは、 $H \rightarrow \gamma\gamma, \tau\tau$ 及び WW の 3 つのモードに絞って研究を行い、発見やスピンの同定などを行った。また、 $H \rightarrow \tau\tau$ の明確な信号 ($> 4\sigma$) を初めてとらえ、フェルミオンとの湯川結合の存在も確認した。

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 8σ 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、 γ 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。同様にスピン 0 は、 $H \rightarrow WW$ からも得られており、99.9%CL で spin2 は除外した。

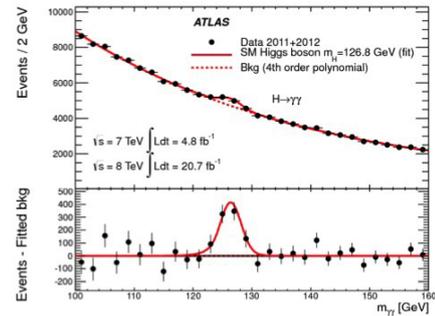


図 2.5.2: ヒッグス粒子が $\gamma\gamma$ に崩壊したモード:再構成した $\gamma\gamma$ 質量分布, 下図がフィットで求めたバックグラウンドを引いた分布

図 2.5.3 に $H \rightarrow \tau\tau$ モードの探索結果を示す。このチャンネルは、 ν がタウの崩壊から放出される。しかし、観測されたタウからの粒子とニュートリノとの方向は近いため、近似的にニュートリノの運動量を再構成でき不変質量をもとめることができる。ヒッグス粒子とフェルミ粒子の結合 (湯川結合) は、additional に加えたものであり、自明ではない。その湯川結合が観測されたことで、フェルミ粒子の質量の起源もヒッグス場であることが分かった。今後は、なぜ湯川結合にこのような大きな差 (トップクォークは結合 1、電子は 10^{-5}) がある理由や世代の解明が重要になる。

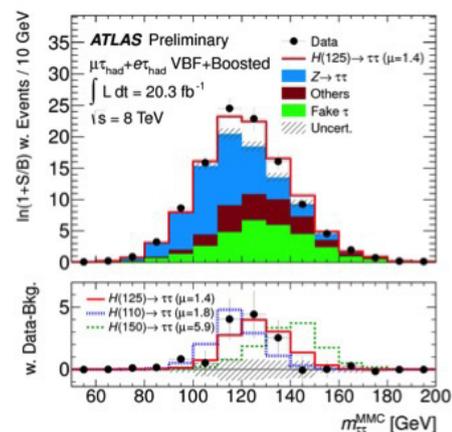


図 2.5.3: ヒッグス粒子が $\tau\tau$ に崩壊した時の再構成した不変質量分布; 図中色付きヒストグラムはバックグラウンド、無色のヒストグラムはヒッグス粒子から期待される信号を示す

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 mE_T が信号
2. レプトンを含み、それ以外にジェットと mE_T が信号
3. bクォークを含む信号 (スカラートップクォーク)
4. 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

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 1.1 TeV (スカラークォークが重い) 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 1.8 TeV 程度まで棄却された。軽い ($< 1\text{TeV}$) の超対称性モデルはこれでもかなり厳しくなり、naturalness などを一部緩和しながら超対称性研究を進めねばならないことが分かった。

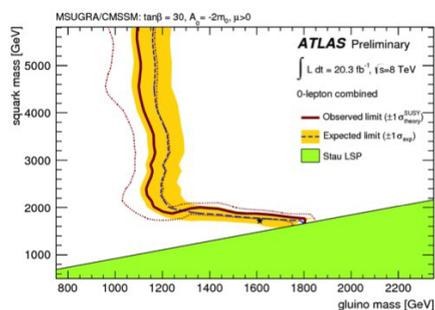


図 2.5.4: グルーイーノ (横軸) とスカラークォーク (縦軸) の質量平面で棄却された領域 赤線の左下側が今回棄却した領域 (95%CL)

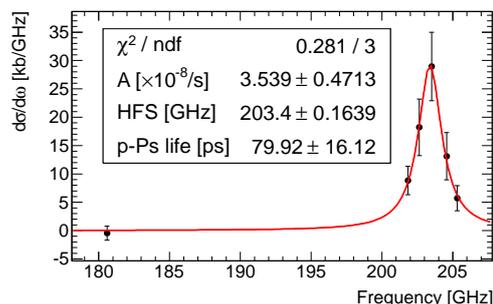


図 2.5.5: 直接測定で得られた Ps HFS の共鳴曲線

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。

強力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 ($o\text{-Ps}$, スピン = 1) とパラポジトロニウム ($p\text{-Ps}$, 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、本実験では直接ミリ波を照射して Ps HFS 遷移をおこし、その値を直接測定した。

Ps 生成効率とミリ波に対する応答性を考慮し、チェンバーガスとしてネオペンタンを選択した。ジャイロトロンのキャビティを交換しながらミリ波の周波数を変更してスキャンし、Ps HFS 遷移のブライトウィグナー共鳴を世界で初めて観測した (図 2.5.5)。フィットによって得られた値は、 $203.39^{+0.15}_{-0.14}(\text{stat.}) \pm 0.11(\text{syst.})$ GHz であり、束縛系 QED の予言値と無矛盾であった。また、同時に共鳴幅から世界で初めての $p\text{-Ps}$ の寿命が得られ、こちらも $89^{+18}_{-15}(\text{stat.}) \pm 10(\text{syst.})$ と QED 予言値と無矛盾であった [6, 9]。

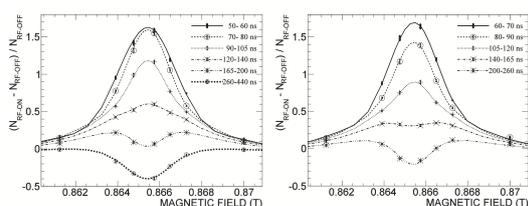


図 2.5.6: 時間発展を考慮してフィットした Ps のゼーマン共鳴

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た。

ppm の精度でコントロールされた静磁場中で Ps に対してマイクロ波を印化し、遷移の磁場依存性を見る事でゼーマン分裂幅を精密に測定する。ただし、物質中での Ps HFS の値は、周囲の物質の影響を受け、さらに Ps 自身の速度にも依存する。過去の測定は、Ps の速度変化(熱化)の影響を一切考慮してなかったが、われわれは Ps とゼーマン遷移の時間発展を正確に追う事で系統誤差を小さくして解析を行った(図 2.5.6)。ゼーマン分裂幅から最終的に得られた Ps HFS の値は $203.3942 \pm 0.0016(\text{stat.}) \pm 0.0013(\text{sys.})$ GHz であり、理論の予言と無矛盾であった [8]。

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。このスペクトルを $O(\alpha)$ の精度で検証する事で、未知の素粒子現象の寄与を探索している。検出器にはエネルギー/時間分解能の良い LaBr₃(Ce) 検出器を使用し、周囲の物質によるガンマ線散乱を極力減らしたセットアップで測定を行っている。これまでの測定結果を、単色線源でチューンを行ったモンテカルロシミュレーションと比較する事で、tree level よりも $O(\alpha)$ を favor する結果を得ている。今後は、統計量を上げる事で p-Value 5% のレベルで検証を行う。

ミリ波を用いた光と弱い結合を持つ未知粒子の探索

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预言するものがある。

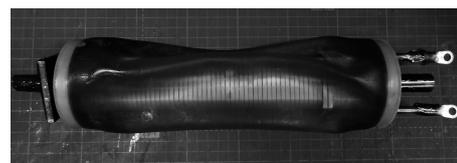


図 2.5.7: アクシオン探索用のプロトタイプコイル

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。

そのような粒子のひとつであるパラフォトンのミリ波帯での探索を計画し、予備実験を行った。実験はいわゆる ‘light shining through a wall’ (LSW) と呼ばれる方式であり、未知粒子を介して遮蔽越しに光が伝播する現象を探索する。他の波長領域に比べて探索が遅れていたミリ波帯での LSW 探索を行うことで、これまで探索されていなかった質量領域でのパラフォトンに感度を持つ。予備実験では、福井大学遠赤外センターのジャイロトロンを光源として利用し、ミリ波検出器にはショットキダイオードを使用した。その結果、期待どおりの感度が得られ、今後は大強度ジャイロトロンと超伝導 SIS ミリ波検出器を組み合わせる実験を行う予定である。

SACLA とパルス磁石を用いたアクシオン探索

世界最高輝度 X 線自由レーザーである SACLA を光源とし、LSW 実験の手法でアクシオンの探索を計画している。アクシオンは磁場と結合して光子と変換/再変換されるため、強磁場の発生装置が探索感度を決める。われわれは、S/N の観点と装置の取り扱いやすさの観点から、SACLA に同期したパルス磁石を使用して強磁場を発生させる。

物性研の金道研究室と共同でそのためのダイポール磁石(長さ 20 cm)を設計し、プロトタイプコイルを製作した(図 2.5.7)。SPRING-8、BL19LXU に付随のコンデンサバンクを使用して励磁試験を行った所、期待どおりの磁場分布であり、約 7 T の磁場強度まで耐えられる事がわかった。今後は、デザインの改良で 10 T コイルを製作する。また、東北大金属材料研究所と共同で、必要なコンデンサバンクも設計を進めており、基本充電回路の設計を行った。

なお、昨年度、アクシオン探索の予備実験としてパラフォトン探索を行ったが、その結果を取りまとめて学術誌で発表した [5]。

SACLA 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、散乱することが预言されている。QED の究極の検証であるこの光子・光子散乱を SACLA のパルス X 線を用いて行った。シリコンのラウエ散乱を利用した X 線光学系を組む事で、1 本の X 線を分岐し衝突させた。 6.5×10^5 パ

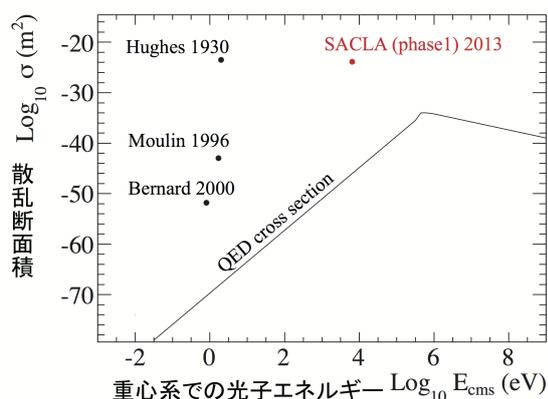


図 2.5.8: 得られた断面積の上限と既存の上限、理論予想値

ルスの衝突で散乱光が観測されなかったことから、重心系エネルギー 6.5 keV において、 $1.7 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ (95% C.L.) の制限を得た (図 2.5.8) [7]。

<受賞>

- [1] 浅井祥仁, 2013 年仁科記念賞, ヒッグス粒子発見に対する貢献
- [2] 浅井祥仁, 第 19 回ゴールドメダル賞, ヒッグス粒子発見への貢献
- [3] 浅井祥仁, 第 5 回折戸周治賞, ヒッグス粒子発見における解析への貢献
- [4] 宮崎彬, 東京大学大学院理学系研究科 研究奨励賞.

<報文>

(原著論文)

- [5] 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”, Phys. Lett. B 722, 301 (2013).
- [6] A. Miyazaki, T. Yamazaki, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, T. Idehara, I. Ogawa, and Y. Tatematsu, “The Direct Spectroscopy of Positronium Hyperfine Structure Using a Sub-THz Gyrotron”, J. Inf. Milli. Terahertz Waves, 35, 1, 91 (2014).
- [7] T. Inada, T. Yamaji, S. Adachi, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, K. Tamasaku, Y. Inubushi, K. Sawada, M. Yabashi, and T. Ishikawa, “Search for Photon-Photon Elastic Scattering in the X-ray Region”, arXiv:1403.2547, accepted by Phys. Lett. B.
- [8] A. Ishida, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, M. Yoshida, K. Tanaka, and A. Yamamoto, “New Precision Measurement of Hyperfine Splitting of Positronium”, arXiv:1310.6923.

- [9] A. Miyazaki, T. Yamazaki, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, Y. Tatematsu, I. Ogawa, and T. Idehara, “Direct Measurement of the Hyperfine Interval of Positronium Using High Power Millimeter Waves”, arXiv:1403.0312.
- [10] The ATLAS Collaboration, “Search for dark Matter in events with single Z and missing transverse Energy using pp collisions at $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector”, arXiv:1404.0051
- [11] The ATLAS Collaboration, “Search for top quark decays $t \rightarrow qH$ with $H \rightarrow \gamma\gamma$ using the ATLAS detector”, arXiv:1403.6293
- [12] The ATLAS Collaboration, “Searches for direct production of charginos, neutralinos and sleptons in final states with two leptons and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector”, arXiv:1403.5294
- [13] The ATLAS Collaboration, “Measurement of the 4l Cross Section at the Z Resonance and Determination of the Branching Fraction of $Z \rightarrow 4l$ in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with ATLAS”, arXiv:1403.5657
- [14] The ATLAS Collaboration, “Search for direct stop pair production in events with a Z boson, b-jets and missing transverse energy with the ATLAS detector using 21 fb^{-1} from proton-proton collision at $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ ”, arXiv:1403.5222
- [15] The ATLAS Collaboration, “Search for direct top squark pair production in final states with two leptons in $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ pp collisions with the ATLAS detector”, arXiv:1403.4853
- [16] The ATLAS Collaboration, “Measurement of event-plane correlations in $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$ lead-lead collisions with the ATLAS detector”, arXiv:1403.0489
- [17] The ATLAS Collaboration, “Search for direct production of charginos and neutralinos in events with three leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ pp collisions with the ATLAS detector”, arXiv:1402.7029
- [18] The ATLAS Collaboration, “Measurement of the production of a W boson in association with a charm quark in pp collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector”, arXiv:1402.6263
- [19] The ATLAS Collaboration, “The differential production cross section of the phi(1020) meson in $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ pp collisions measured with the ATLAS Detector”, arXiv:1402.6162
- [20] The ATLAS Collaboration, “Search for Invisible Decays of a Higgs Boson Produced in Association with a Z Boson in ATLAS”, arXiv:1402.3244
- [21] The ATLAS Collaboration, “Search for the Standard Model Higgs boson decay to a photon and a Z boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 732C (2014), pp. 8-27

- [22] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the electroweak production of dijets in association with a Z-boson and distributions sensitive to vector boson fusion in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector", JHEP04(2014)031
- [23] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the production cross-section of prompt J/Psi mesons in association with a W boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", arXiv:1401.2831
- [24] The ATLAS Collaboration, "Measurement of dijet cross sections in pp collisions at 7 TeV centre-of-mass energy using the ATLAS detector", arXiv:1312.3524
- [25] The ATLAS Collaboration, "Search for a Multi-Higgs Boson Cascade in $W+W-$ bbar events with the ATLAS Detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV", 1312.1956 Phys. Rev. D 89, 032002 (2014)
- [26] The ATLAS Collaboration, "Standalone Vertex Finding in the ATLAS Muon Spectrometer", JINST 9 (2014) P02001
- [27] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the top quark pair production charge asymmetry in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector", JHEP02(2014)107
- [28] The ATLAS Collaboration, "Search for Quantum Black-Hole Production in High-Invariant-Mass Lepton+Jet Final States Using Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV and the ATLAS Detector", Phys. Rev. Lett 112, 091804 (2014)
- [29] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the inclusive isolated prompt photon cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector using 4.6 fb^{-1} ", Phys. Rev. D 89, 052004 (2014)
- [30] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the mass difference between top and antitop quarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector", Physics Letters B 728C (2014), pp. 363-379
- [31] The ATLAS Collaboration, "Search for long-lived stopped R-hadrons decaying out-of-time with pp collisions using the ATLAS detector", Phys. Rev. D 88, 112003 (2013)
- [32] The ATLAS Collaboration, "Search for charginos nearly mass-degenerate with the lightest neutralino based on a disappearing-track signature in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Rev. D 88, 112006 (2013)
- [33] The ATLAS Collaboration, "Search for dark matter in events with a hadronically decaying W or Z boson and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Rev. Lett 112, 041802 (2014)
- [34] The ATLAS Collaboration, "Search for new phenomena in photon + jet events collected in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Lett. B 728C (2014) 562-578
- [35] The ATLAS Collaboration, "Search for Microscopic Black Holes in a Like-sign Dimuon Final State using large Track Multiplicity with the ATLAS detector", Phys. Rev. D 88 (2013) 072001
- [36] The ATLAS Collaboration, "Search for direct third-generation squark pair production in final states with missing transverse momentum and two b-jets in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector", JHEP10(2013)189
- [37] The ATLAS Collaboration, "Search for new phenomena using final states with large jet multiplicities and missing transverse momentum with ATLAS in 20 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collisions", JHEP10(2013)130
- [38] The ATLAS Collaboration, "Search for excited electrons and muons with proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector", New J. Phys. 15 (2013) 093011
- [39] The ATLAS Collaboration, "Dynamics of isolated-photon plus jet production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Nucl. Phys. B 875 (2013) 483-535
- [40] The ATLAS Collaboration, "Measurement of top quark polarization in top-antitop events from proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector", Phys. Rev. Lett 111, 232002 (2013)
- [41] The ATLAS Collaboration, "Measurement of jet shapes in top-quark pair events at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector", Eur. Phys. J. C (2013) 73:2676
- [42] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the top quark charge in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", JHEP11(2013)031
- [43] The ATLAS Collaboration, "Measurements of Higgs production and couplings using diboson final states with the ATLAS detector at the LHC", Phys. Lett. B 726 (2013), pp. 88-119
- [44] The ATLAS Collaboration, "Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data", Phys. Lett. B 726 (2013), pp. 120-144
- [45] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the differential cross section of B^+ meson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV at ATLAS", JHEP10(2013)042
- [46] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the azimuthal angle dependence of inclusive jet yields in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Rev. Lett 111, 152301 (2013)

- [47] The ATLAS Collaboration, "Performance of jet substructure techniques for large-R jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector", JHEP09 (2013) 076
- [48] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the high-mass Drell-Yan differential cross-section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Lett. B 725 (2013) pp. 223-242
- [49] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the distributions of event-by-event flow harmonics in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector", JHEP11(2013)183
- [50] The ATLAS Collaboration, "A search for ttbar resonances in the lepton plus jets final state with ATLAS using 4.7 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", Phys. Rev. D 88, 012004 (2013)
- [51] The ATLAS Collaboration, "Triggers for Displaced Decays of Long-lived Neutral Particles in the ATLAS Detector", JINST 8 (2013) P07015
- [52] The ATLAS Collaboration, "Characterisation and mitigation of beam-induced backgrounds observed in the ATLAS detector during the 2011 proton-proton run", JINST 8 (2013) P07004
- [53] The ATLAS Collaboration, "Search for heavy resonance decaying to WW or WZ in the lvjj and lvJ (boosted) final states.", Phys. Rev. D 87, 112006 (2013)
- [54] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the production cross section of jets in association with a Z boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", JHEP07(2013)032
- [55] The ATLAS Collaboration, "A study of heavy-flavor quarks produced in association with top-quark pairs at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector", arXiv:1304.6386
- [56] The ATLAS Collaboration, "Search for non-pointing photons in the diphoton and ETmiss final state in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions using the ATLAS detector", Phys. Rev. D 88, 012001 (2013)
- [57] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the inclusive jet cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV and comparison to the inclusive jet cross section at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector", EPJC (2013) 73 2509
- (会議抄録)
- (国内雑誌)
- [58] 浅井祥仁, ヒッグス粒子発見とその意味, 応用物理学会誌 2013年8月号 643-648
- [59] 浅井祥仁, ヒッグス粒子の見つけ方ー発見と性質をさぐるー, 数学セミナー 2014年5月 39-47
- [60] 浅井祥仁, 統一論・宇宙論から見たヒッグス粒子発見の意味, 日本医事新法 2014年3月 68-70
- (学位論文)
- [61] 博士論文, 宮崎彬, "Direct Measurement of the Hyperfine Structure Interval of Positronium Using High Power Millimeter Wave Technology".
- [62] 博士論文, 佐々木雄一, "Search for supersymmetry in the final state with multiple jets, missing transverse momentum and one isolated lepton, using 20.3 fb^{-1} of data recorded by the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 8$ TeV"
- [63] 修士論文, 大川真耶, "LHC-ATLAS 実験における標準模型 Higgs 粒子の tt_H 生成過程の探索"
- [64] 修士論文, 川西裕基, "ATLAS アップグレードに向けた MicroMegas 検出器の開発および試験"
- (著書)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [65] S.Asai Higgs Boson, Dawn of Physics to explore the vacuum, CLEO-PR & OECCPS 2013, July 2013 Kyoto
- [66] S.Asai Highlight of LHC Physics (Higgs and SUSY), CNS international school, September 2013 Tokyo
- [67] S.Asai SUSY Searches AT ATLAS, CMS international school, October 2013 Teheran
- [68] S.Asai Discovery of Higgs boson and Beyond, Fundamental Physics Using Atoms 2014, March 2014 Tokyo
- 一般講演
- [69] A. Ishida, "New Precision Measurement of Hyperfine Splitting of Positronium" (Poster), The XVII International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics (POSMOL2013), Japan, July 2013.
- [70] A. Miyazaki, "Direct Measurement of Positronium Hyperfine Structure with a High-Power Millimeter-wave Gyrotron" (Talk), The 5th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT2014), Japan, March 2014.
- (国内会議)
- 招待講演
- [71] 浅井祥仁 ヒッグス粒子から宇宙誕生を探る, 日本放射線腫瘍学会総合講演, 2013年11月 青森大学
- [72] 浅井祥仁 ヒッグス粒子発見とその後の課題, 日本物理学会総合講演, 2014年3月 東海大学
- 一般講演
- 日本物理学会秋季大会:高知大学:2012年9月20日

- [73] 宮崎彬, “ポジトロニウム超微細構造の直接測定 II (解析及び暫定結果)”.
- [74] 石田明, “ポジトロニウム超微細構造の精密測定”.
- [75] 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”.
- [76] 山道智博, “SPring-8/SACLA における光子光子散乱の探索 I”
- [77] 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”.
- [78] 森永真央, “LHC-ATLAS 実験における $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \text{lepton lepton}$ 崩壊チャンネルを用いたヒッグス粒子の探索”.
- [79] 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”.
- [80] 浅井祥仁, “ヒッグスからテラスケールへ”, シンポジウム ヒッグスからテラスケールへ

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:2013 年 11 月

- [81] 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”.

日本物理学会:第 69 回年次大会:東海大学:2014 年 3 月

- [82] 宮崎彬, “大強度ミリ波を用いたポジトロニウム超微細構造の直接測定”.
- [83] 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”.
- [84] 山道智博, “SPring-8/SACLA における光子光子散乱の探索”.
- [85] 森永真央, “LHC-ATLAS 実験における $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \text{lepton-lepton}$ 崩壊チャンネルを用いたヒッグス粒子の探索”.

(セミナー)

- [86] 石田明 ポジトロニウム超微細構造の精密測定
11 月 KEK 超伝導低温工学センターセミナー
- [87] 宮崎彬 サブテラヘルツジャイロトロンを用いたポジトロニウム超微細構造の初直接測定 3
月福井大学

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、系が「トポロジカル」であるために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 T_c をもつ銅酸化物を現在の視点で再訪するのは意味が大きい。銅酸化物では、実験的に T_c に大きな物質依存性があり、特に、良くネストしたフェルミ面をもつ物質が理論的には高い T_c をもつはずなのに、実験事実は逆に湾曲したフェルミ面をもつ物質の方が高い T_c をもち、この矛盾が長年の謎となっていた。榊原、白井、黒木（阪大）、有田（東大工）と青木等は、銅酸化物を、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 軌道模型として捉えた。これにより、超伝導を有利化する単一バンド性の高さが重要であり、これがネスティングの効果を凌駕し、物質依存性を系統的に説明することを明らかにした [2, 28, 46]。高温超伝導体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も考察し、最近の一軸圧効果の実験結果とも整合する。このような「軌道純化」により、現存の銅酸化物以上に高い転移温度を持つ物質の設計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 CuO_2 面を有する多層銅酸化物高温超伝導体は、面の枚数を増加させると実験的に T_c が上昇し、3 枚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 [1]。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 T_c を増大させる、という結果を得た。

強相関系に対する DMFT+FLEX 法の提案と Hubbard 模型への応用

2次元斥力 Hubbard 模型における d 波超伝導に代表される強相関効果に対しては、従来しばしば用いられてきた揺らぎ交換 (FLEX) 近似は、反強磁性的スピン揺らぎや、それに媒介されるペアリング相互作用など k 依存の相互作用を記述できる利点がある一方、母物質の Mott 絶縁相を記述できず、 T_c のドーム構造などのドーピング依存性は記述できない。他方、Mott 絶縁相を記述できる動的平均場理論 (DMFT) を出発点としてクラスター拡張により Hubbard 模型が調べられているが、そこで無視されている k 依存性の効果は明らかでない。そこで北谷等は、DMFT の新しい拡張として DMFT と FLEX を組み合わせ、自己無撞着なループを構成することにより、局所的なダイアグラムの寄与を DMFT で、非局所的なダイアグラムの寄与を FLEX で取り込む方法を新たに提案した [50]。この手法を 2次元 Hubbard 模型に適用した結果、FLEX では記述出来なかった T_c のドーム構造が得られた。これは、FLEX で overestimate されていた自己エネルギーが DMFT で補正される際の filling 依存性から生じると考えられる。北谷はこの成果を修士論文にまとめた [70]。

芳香族新有機超伝導体の電子構造

芳香族有機分子 (ピセン) の固体にカリウムをドーブすると $T_C = 7-18\text{K}$ 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第一原理電子状態を初めて与えたが、苜宿 (現筑波大)、青木はその解析を発展させた [15, 22]。

強い電子間斥力と強い電子・格子相互作用の共存系における超固体

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)、辻、青木は、電子間相互作用、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 DMFT により初めて扱った。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、ならびに有限温度での相図を求めた。村上等は、量子多体系における超固体 (supersolid) 相を量子スピン系において理論的に調べていた [3] が、本年度は特に電子系における supersolid 相について調べ、相図を明らかにし、BCS-BEC ク

ロスオーバー領域で supersolid が発現することを見出した [4, 5, 29, 30, 47, 48]。

平坦バンド模型上のフェルミオン系超伝導、ボゾン系ペア朝永液体

平坦バンド系は、強磁性や分数量子ホール効果の観点から興味をもたれており、冷却原子系においても平坦バンドを持つ光学格子の生成が可能になりつつある。平坦バンド上において超伝導・超流動が実現し得るかは、興味深い問題である。小林、奥村、山田、町田（原子力機構）と青木は、平坦バンドを持つ擬一次元格子である、ダイヤモンド鎖上での斥力フェルミ・ハバード模型における超伝導を、密度行列繰り込み群 (DMRG) と厳密対角化を用いた解析を行った [49]。これにより、斥力相互作用であるにも関わらずフィリングによってはペアの束縛が生じ、ペア相関関数が発達することが示された。

また、高吉（物材機構）、桂（学習院、現東大理）、渡辺（IPMU）、青木は、やはり擬一次元格子で平坦バンドをもつ cross-linked ladder (Fig.3.1.1) においてボーズ・ハバード模型における超流動を、量子スピン $1/2$ XXZ 模型にマップすることにより朝永・Luttinger 理論による解析を行い、ボゾン密度によっては、ボゾンのペアが朝永・Luttinger 液体になり、Wigner 固体相とも overlap するので、いわば supersolid 相となることを見出した [6]。

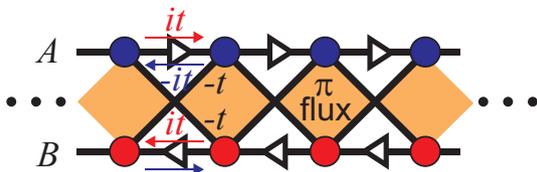


図 3.1.1: A cross-linked ladder with π -flux [6].

非平衡誘起超伝導

辻、Werner、岡（東大工）、青木は、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ことを理論的に示した [19]。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、光を突然照射すると負温度状態が実現するためである。

3.1.2 トポロジカル系

光学格子上の冷却原子系に対する第一原理バンド計算とトポロジカル相

近年、強相関電子系の物理と冷却原子系（特に光学格子上）の物理が重なり合い発展している。前者に対しては第一原理電子状態計算法は確立しているが、冷却原子系に対する第一原理計算法の構築が望まれる。北村等は、この観点から、前者が長距離クーロン相互作用系に対するものであったのに対し、原子間短距離相互作用に対する定式化を行い、これを様々な格子構造に適用した。特に、checkerboard lattice 等、トポロジカル Mott 相（相互作用のために自発的にトポロジカルになる相）を発生させるためにはどのような条件が必要であるかを、第一原理的に同定し、これに要するレーザーの当て方を与えた。北村はこの成果を修士論文にまとめた [71]。

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 [51, 52]。グラフェン量子ホール効果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も、カイラル対称性が保たれば、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）、青木等は、この解析を 3 層グラフェンのゼロエネルギー・ランダウ準位、また傾いたディラック・コーンにエネルギー差がある場合、さらにケクレ型ボンド秩序があるグラフェンのドメイン境界に拡張し、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 [55, 56, 57]。

また、濱本（筑波大、現阪大）、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 [10, 54]。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 [8] ならびに書籍の一章 [18] を執筆した。

光で見るグラフェン量子ホール効果

グラフェン量子ホール効果が、光学領域でもプラトーとして現れるという森本（理研）、青木等の理論的予言を受け、本物理学教室の島野のグループがグラフェンにおける量子ホール系の THz 帯におけるファラデー回転角の測定を行い、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た。プラトーの位置は massless Dirac 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 (Fig.3.1.2)、論文は *Nature Commun.* に出版された [9, 20]。

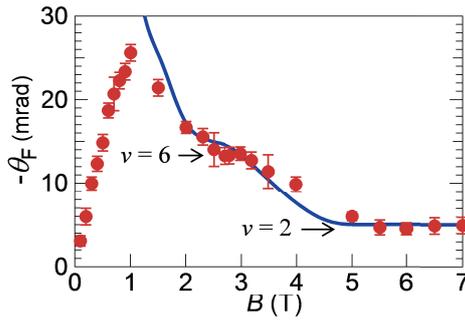


図 3.1.2: Magnetic field (B) dependence of the optical Hall conductivity as measured from Faraday rotation θ_F for frequency of 1 THz. Symbols are experimental result by Shimano's group, while solid curve is a theoretical result. Plateaux with arrows indicate graphene quantum Hall effect[9].

グラフェンにおける第二トポロジカル量子数

グラフェンは、ディラック粒子を反映したトポロジカルな Chern 数 (量子ホール効果) をもつのが最大の特徴の一つであるが、一般に、格子構造を反映した量子ホール系を記述する TKNN 方程式には、量子ホール Chern 数以外に第二のトポロジカル量子数が現れ、その意味は Štředa 等により、或る種の分極を表すことが示されていた。青木、初貝は、このトポロジカル量子数が、グラフェンにおいて特徴的に振る舞うことを見出し、分極トポロジカル量子数は Dirac cone 当たり $1/2$ (K 点と K' 点をもつ蜂の巣格子全体として 1) であることを示した [7, 53]。

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、グラフェンに Coulomb 引力ポテンシャルを印加すると supercritical 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、 10^8 – 10^{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 1 T 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 (Fig.3.1.3)[11]。

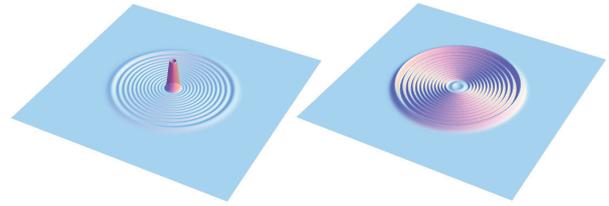


図 3.1.3: A typical (squared) amplitude in a graphene quantum dot is plotted for the two-component Dirac wavefunction[11].

3.1.3 非平衡

強相関電子系やトポロジカル系における非平衡現象は、興味深い分野である。上記の様々な節でも解説したが、本年度は以下を行った。

非平衡動的平均場、動的クラスター理論

動的平均場理論は強相関系の格子模型を有効媒質中の不純物模型に置き換えて自己無撞着に解く方法論であるが、それを Kadanoff-Baym 形式や Keldysh 形式を用いて拡張することで強相関系の非平衡状態を扱うことができるようになる。このような理論が、非平衡強相関系に対する有力な手法として近年発展してきており、様々な系に適用されて新しい知見を生み出している。青木、辻は、Eckstein (Hamburg 大)、Kollar (Augsburg 大)、岡、Werner と、最近の非平衡動的平均場理論の進展をまとめたレビュー論文を執筆した [12]。

非平衡動的平均場理論は格子模型の無限次元極限で厳密に成り立つが、有限次元においては自己エネルギーを空間的に局所近似する近似手法である。このため、低次元強相関系で空間的なゆらぎが無視できなくなると破綻すると考えられる。そこで辻、青木は、Barmettler (Genève 大)、Werner と、自己エネルギーの非局所成分を取り込める「非平衡動的クラスター理論」を提案した [13, 37, 38, 58, 61, 62, 68]。これを 2 次元 Hubbard 模型に適用し、波数に依存した特異的な緩和現象が現れることを明らかにした。

非熱的固定点

量子多体系が励起状態から平衡状態へ緩和する過程で、直ちに熱化するのではなく一旦ある準定常状態 (非熱的固定点) にとどまり、そこから熱化することが様々な量子系で普遍的に見られる。辻は、特に対称性の破れた系で長距離秩序 (反強磁性・超伝導) が存在する場合について、Hubbard 模型に対して非熱的固定点が存在するかを調べた [32, 33, 34, 35, 36, 39, 40, 41, 60, 67]。相互作用クエンチにより励起した後の時間発展を動的平均場理論に基づいて解析し

た結果、励起エネルギーが全て熱に変換されたとすれば平衡の臨界温度を超えているにも関わらず、長距離秩序が保たれた非熱的固定点に長時間とどまり、非平衡臨界点が平衡の相転移点とは別に存在することが示唆された。

フロケ・トポロジカル相転移

グラフェンに円偏光を当てるとトポロジカル絶縁体状態がダイナミカルに発現することが岡、青木により示されて以来、フロケ (Floquet) トポロジカル絶縁体が注目を集めており、最近ではトポロジカル絶縁体の表面に存在するディラック・フェルミオンに対して観測されている。外場が十分弱い領域では有効ディラック模型を使ってよく理解されているが、外場が強い場合、および電子間相互作用がある場合にどうなるかはわかっていなかった。見上、辻、青木は Floquet 動的平均場理論を用いて、様々な格子模型に円偏光を印加したときの電子状態および光学伝導度を計算した [42, 43, 63]。その結果、外場の振幅を増加させていくとトポロジカル状態を特徴付ける Chern 数が変化し、トポロジカル・トポロジカル転移が起きることがわかった。また、相互作用を導入すると Floquet トポロジカル絶縁体からモット絶縁体に転移する。これらの相転移の様子を、外場の振幅と相互作用の強さを軸にとった相図を作ることによって明らかにした。見上はこの成果、および dp 模型に対する解析を博士論文にまとめた [69]。

超伝導体における Higgs モード共鳴

超伝導体における集団励起には、秩序パラメーターの位相が振動する南部・Goldstone モードもあるが、振幅が振動する集団励起モード (Higgs モード; 超伝導ギャップ 2Δ の周波数) も存在する。Higgs モードは電磁場と直接結合しないため、線形応答の範囲では励起できないために長年実験観測にはかかっている。辻、青木は、非線形応答まで考慮すると結合し、電磁場の非線形項が超伝導体における Anderson 擬スピンの有効磁場として働くと見なせることを見いだした [44, 59]。これにより、振動電場を加えると Anderson 擬スピンの集団歳差運動を起し、これが Higgs モードを誘起する。さらに、振動電場の周波数 ω が $2\omega = 2\Delta$ を満たすときに擬スピンの歳差運動と Higgs モードが共鳴する。これとは同時に、島野、松永、藤田、杉岡 (東大理) 等により、テラヘルツ光の実験から超伝導体における Higgs モード共鳴が実験観測された。

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、直接スピンをレーザー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、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、という新しい現象を見出した [14]。磁化誘起の機構は、多体 Floquet 法を量子スピン系に初めて適用することにより、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とが示された。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、必要なレーザーは THz 領域と見積もられる。

3.1.4 その他

青木研で理論演習を行った杉岡新さんが理学部学修奨励賞を受賞した。青木が M. S. Dresselhaus と共に編集したグラフェンの本が出版された [17]。青木は、国際会議招待講演で、超伝導 (銅酸化物、鉄系、系元素系の俯瞰) [23]、グラフェンのトポロジカル、カイラルな性質 [24, 25] について解説し、セミナー講演も行い [64, 65, 66]、また物性と素粒子の学際 [21] などにも触れた。辻は非平衡強相関係について招待講演を行った [26, 27, 44, 45]。

<報文>

(原著論文)

- [1] K. Nishiguchi, K. Kuroki, R. Arita, T. Oka and H. Aoki: Superconductivity assisted by inter-layer pair hopping in multi-layered cuprates, *Phys. Rev. B* **88**, 014509 (2013).
- [2] H. Sakakibara, K. Suzuki, H. Usui, S. Miyao, I. Maruyama, K. Kusakabe, R. Arita, H. Aoki, and K. Kuroki: Orbital mixture effect on the Fermi surface-Tc correlation in the cuprate superconductors — bilayer vs single layer, arXiv:1403.2497.
- [3] Y. Murakami, T. Oka and H. Aoki: Supersolid states in a spin system — phase diagram and collective excitations, *Phys. Rev. B* **88**, 224404 (2013).
- [4] Y. Murakami, P. Werner, N. Tsuji and H. Aoki: Ordered phases in the Holstein-Hubbard model: Interplay of strong Coulomb interaction and electron-phonon coupling, *Phys. Rev. B* **88**, 125126 (2013).
- [5] Y. Murakami, P. Werner, N. Tsuji and H. Aoki: Supersolid phase accompanied by a quantum critical point in the intermediate coupling regime of the Holstein model, arXiv:1402.6456.
- [6] Shintaro Takayoshi, Hoshio Katsura, Noriaki Watanabe and Hideo Aoki: Phase diagram and pair Tomonaga-Luttinger liquid in a Bose-Hubbard model with flat bands, *Phys. Rev. A* **88**, 063613 (2013).
- [7] H. Aoki and Y. Hatsugai: Polarization as a topological quantum number in graphene, arXiv:1403.1648.

- [8] 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, an invited article in *New J. Phys.* **15**, 035023 (2013).
- [9] 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.* **4**, 1841 (2013).
- [10] Y. Hamamoto, T. Kawarabayashi, H. Aoki and Y. Hatsugai: Spin-resolved chiral condensate as a spin-unpolarized $\nu = 0$ quantum Hall state in graphene, *Phys. Rev. B* **88**, 195141 (2013).
- [11] P.A. Maksym and H. Aoki: Magnetic field controlled vacuum charge in graphene quantum dots with a mass gap, *Phys. Rev. B* **88**, 081406(R) (2013).
- [12] H. Aoki, N. Tsuji, M. Eckstein, M. Kollar, T. Oka and P. Werner: Nonequilibrium dynamical mean-field theory and its applications, *Rev. Mod. Phys.*, to be published (arXiv:1310.5329).
- [13] N. Tsuji, P. Barmettler, H. Aoki and P. Werner: Nonequilibrium dynamical cluster theory, arXiv:1307.5946.
- [14] S. Takayoshi, H. Aoki and T. Oka: Many-body Floquet theory of laser-induced phase transition in quantum magnets, arXiv:1302.4460.
(国際会議録 (招待講演))
- [15] Hideo Aoki and Toshikaze Kariyado: Pressure effects and orbital characters in cuprate and carbon-based superconductors, *Int. Conf. Superstripes*, Ischia, 28 May, 2013 [J. Superconductivity and Novel Magnetism **27**, 995 (2014)].
(国際会議録 (一般発表))
- [16] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji, and Hideo Aoki: Dynamical mean-field analysis of ordered phases in the half-filled Holstein-Hubbard model, SCES2013, Tokyo 2013, to be published in *JPS Conf. Proc.* (arXiv:1309.7554).
(編著書)
- [17] Hideo Aoki and Mildred S. Dresselhaus (eds.): *Physics of Graphene* (Springer-Verlag, 2014).
- [18] Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Graphene — topological properties, chiral symmetry and their manipulation, in H. Aoki and M. S. Dresselhaus (eds.): *Physics of Graphene* (Springer, 2014), Ch.7.
(国内雑誌)
- [19] 辻 直人, 岡隆史, 青木秀夫: 非平衡強相関係における斥力・引力転換, 固体物理 **48**, 425 (2013).
- [20] 島野 亮, 青木秀夫: グラフェンの量子フェラデー効果, 光アライアンス **24**, No.11, p.21 (2013).
- [21] 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**, 193 (2013).
<学術発表>
(国際会議)
招待講演・総合報告 (会議録掲載以外)
- [22] Hideo Aoki and Toshikaze Kariyado: Theoretical analysis of magnetism and superconductivity in picene superconductor with updated experimental lattice parameters, *EU-Japan LEMSUPER Workshop*, Kyoto, 4 Apr. 2013.
- [23] Hideo Aoki: Carbon-based vs transition-metal superconductors — a theoretical outlook, *ICTP-LEMSUPER Conf. on Mechanisms and Developments in Light-element Based and Other Novel Superconductors*, Trieste, 25 Sept. 2013.
- [24] Hideo Aoki: How we can manipulate graphene — chiral symmetry, topology and charged vacuum, *ISSP Int. Symposium Emergent Quantum Phases in Condensed Matter*, Kashiwa, 14 June 2013.
- [25] Hideo Aoki: Manipulating Dirac fermions — graphene nanomesh, dot and polarisation, *Int. Focus Workshop on Recent Progress and Perspectives in Scaling, Multifractality, Interactions, and Topological Effects Near Anderson Transitions*, Dresden, 11 Mar 2014.
- [26] Naoto Tsuji: Prethermalization and nonthermal fixed point in the Hubbard model, *Interdisciplinary Mini-workshop on Nonequilibrium Physics*, Kyoto, 8 Dec 2013.
- [27] Naoto Tsuji: Nonthermal fixed point in the antiferromagnetic Hubbard model, *Non-equilibrium Dynamics of Correlated Electron-systems*, Krvavec, Slovenia, 19 Dec 2013.
一般発表 (会議録掲載以外)
- [28] H. Sakakibara, K. Suzuki, H. Usui, S. Miyao, I. Maruyama, K. Kusakabe, R. Arita, H. Aoki, and K. Kuroki: Two orbital analysis on the correlation between T_c and the Fermi surface shape in the cuprate superconductors, *American Physical Society March Meeting*, Denver, Mar 2014.
- [29] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji, and Hideo Aoki: DMFT analysis for superconductivity in the Holstein-Hubbard model, *2013 Gordon Research Conference on Superconductivity*, Les Diableret, Switzerland, May 2013.
- [30] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji, and Hideo Aoki: Ordered phases in the Holstein-Hubbard model: Interplay of strong electron-electron and electron-phonon interactions, *Int. Conf. on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2013)*, Tokyo, Aug 2013.

- [31] Y. Murakami, P. Werner, N. Tsuji, and H. Aoki, DMFT analysis of the superconductivity in the Holstein-Hubbard model: Interplay of strong Coulomb interaction and electron-phonon coupling, *American Physical Society March Meeting*, Denver, March 2014.
- [32] Naoto Tsuji, Martin Eckstein, and Philipp Werner: Nonequilibrium dynamical mean-field study of the nonthermal fixed point in the Hubbard model, *American Physical Society March Meeting*, Denver, Mar 2014.
- [33] Naoto Tsuji: Quantum interaction quench in the presence of a long-range order, *Quantum Many Body Systems out of Equilibrium (QSOE13)*, Dresden, Aug 2013.
- [34] Naoto Tsuji, Martin Eckstein, and Philipp Werner: Dynamical phase transition and nonequilibrium criticality in correlated fermion systems, *Int. Conf. on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2013)*, Tokyo, Aug 2013.
- [35] Martin Eckstein, Philipp Werner, and Naoto Tsuji: Nonthermal broken symmetry states in the Hubbard model, *Int. Workshop on Strong Correlations and Angle-resolved Photoemission Spectroscopy (CORPES13)*, Hamburg, July 2013.
- [36] Naoto Tsuji, Martin Eckstein, and Philipp Werner: Quantum interaction quench in the presence of a long-range order, *Emergent Quantum Phases in Condensed Matter (EQPCM2013)*, Kashiwa, June 2013.
- [37] Naoto Tsuji, Peter Barmettler, Hideo Aoki, and Philipp Werner: Nonequilibrium dynamical cluster theory, *Conference on Ultrafast Dynamics of Correlated Materials*, Trieste, Oct 2013.
- [38] Naoto Tsuji, Peter Barmettler, Philipp Werner, and Hideo Aoki: Non-local correlations in real time: nonequilibrium dynamical cluster approximation, *Int. Workshop on Strong Correlations and Angle-resolved Photoemission Spectroscopy (CORPES13)*, Hamburg, July 2013.
- [39] Yuya Nakagawa, Naoto Tsuji, and Hideo Aoki: Electric-field-induced dynamics of s-wave superconductor — Time-dependent Bogoliubov-de Gennes analysis, *Emergent Quantum Phases in Condensed Matter (EQPCM2013)*, Kashiwa, June 2013.
- [40] Naoto Tsuji, Martin Eckstein, and Philipp Werner: Nonequilibrium superconducting phase transition in correlated electron systems, *Gordon Research Conference: Superconductivity*, Les Diableret, Switzerland, May 2013.
- [41] Naoto Tsuji, Martin Eckstein, and Philipp Werner: Dynamically induced antiferromagnetic phase transition in correlated electron systems, *Int. Workshop on Optical Terahertz Science and Technology (OTST 2013)*, Kyoto, April 2013.
- [42] Takahiro Mikami, Takashi Oka and Hideo Aoki: Floquet DMFT study of non-equilibrium steady states in the dp-model in ac-fields, *Int. Conf. on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2013)*, Tokyo, Aug 2013.
- [43] Takahiro Mikami, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Photo-induced topological phase transitions in the Hubbard model on honeycomb lattice, *American Physical Society March meeting*, Denver, Mar 2014.
- (国内会議)
招待講演
- [44] 辻 直人: 強相関電子系・超伝導体の非平衡理論、(日本物理学会「限界駆動の物質光科学」シンポジウム、神奈川、2014年3月)。
- [45] 辻 直人: 強相関系の非平衡ダイナミクス 相互作用クエンチを例に、(CMSI 第一部会「新物質・新量子相の基礎科学」夏の学校 2013、蔵王、2013年8月)。
- 一般発表
- [46] 榎原寛史, 鈴木雄大, 白井秀知, 黒木和彦, 有田亮太郎, 青木秀夫: 元素置換された銅酸化物における化学的圧力による超伝導最適化の可能性 (日本物理学会、徳島、2013年9月)。
- [47] 村上雄太, Philipp Werner, 辻 直人, 青木秀夫: ホルスタイン・モデルにおける s 波超伝導と電荷秩序相の共存と競合 (日本物理学会、徳島、2013年9月)。
- [48] 村上雄太, Philipp Werner, 辻 直人, 青木秀夫: Holstein-Hubbard モデルにおける秩序相の競合と共存 (第七回物性科学領域横断研究会、東京、2013年12月)。
- [49] 小林恵太, 奥村雅彦, 山田進, 町田昌彦, 青木秀夫: ダイヤモンド鎖斥力ハバード模型における超伝導のDMRG 解析 (日本物理学会、神奈川、2014年3月)。
- [50] 北谷基治, 辻 直人, 青木秀夫: DMFT+FLEX 法の提案と2次元 Hubbard 模型への応用 (日本物理学会、神奈川、2014年3月)。
- [51] 青木秀夫: 原子層における多体効果 — 電子間相互作用によるトポロジカル状態、超伝導、強磁性の探究 (新学術「原子層科学」ワークショップ、仙台、3 Sept 2013)。
- [52] 青木秀夫: グラフェンのカイラルおよびトポロジカルな性質 (新学術「原子層科学」ワークショップ、名古屋、19 Feb. 2014)。
- [53] 青木秀夫, 初貝安弘, Pavel Streda: グラフェンにおける分極としての第二トポロジカル量子数 (日本物理学会、神奈川、2014年3月)。
- [54] 濱本雄治, 河原林透, 青木秀夫, 初貝安弘: 磁場中グラフェンのスピン非偏極なカイラル凝縮相の相関関数 (日本物理学会、徳島、2013年9月)。
- [55] 坂本紘樹, 初貝安弘, 青木秀夫, 河原林透: 3層グラフェンのゼロエネルギー・ランダウ準位のランダムネスに対する安定性 (日本物理学会、徳島、2013年9月)。

- [56] 本田貴大, 初貝安弘, 青木秀夫, 河原林透: 傾いたディラック・コーンにエネルギー差がある場合の $n = 0$ ランダウ準位の異常性 (日本物理学会、徳島、2013 年 9 月)。
- [57] 井上裕哉, 初貝安弘, 青木秀夫, 河原林透: ケクレ型ボンド秩序があるグラフェンのドメイン境界における局所状態密度 (日本物理学会、神奈川、2014 年 3 月)。
- [58] 辻 直人, Peter Barmettler, 青木秀夫, Philipp Werner: 非平衡動的クラスター理論 (日本物理学会、神奈川、2014 年 3 月)。
- [59] 辻 直人, 青木秀夫: s 波超伝導体における Higgs mode の非平衡動的平均場理論 (日本物理学会、徳島、2013 年 9 月)。
- [60] 辻 直人, Martin Eckstein, Philipp Werner: フェルミオン超流動における相互作用クエンチ (日本物理学会、徳島、2013 年 9 月)。
- [61] 辻 直人: 非平衡動的クラスター理論の開発 (新学術「コンピューティクスによる物質デザイン: 複合相関と非平衡ダイナミクス」、東京、2013 年 7 月)。
- [62] 辻 直人, Peter Barmettler, 青木秀夫, Philipp Werner: 非平衡動的クラスター理論と Hubbard 模型における相互作用クエンチへの適用 (第 7 回物性科学領域横断研究会、東京、2013 年 12 月)。
- [63] 見上敬洋, 辻 直人, 青木秀夫: 円偏光照射下のハニカム格子 Hubbard 模型の光誘起トポロジカル転移の理論 (日本物理学会、神奈川、2014 年 3 月)。
- (セミナー (国外))
- [64] Hideo Aoki: Orbital characters and pressure effects in cuprate and carbon-based superconductors, Univ. Fribourg, 4 June, 2013.
- [65] Hideo Aoki: From transition-metal to carbon-based superconductors — a theoretical outlook, Technische Universität Wien, 19 Sept 2013.
- [66] Hideo Aoki: Transition-metal vs carbon-based superconductors — a theoretical outlook, Heidelberg Univ., 17 Mar 2014.
- (セミナー (国内))
- [67] 辻 直人: 非平衡量子多体系における熱平衡化と非熱的固定点 (青山学院大学コロキウム、東京、2013 年 11 月)。
- [68] 辻 直人: Nonequilibrium dynamical cluster theory and its applications (京大基研セミナー、京都、2013 年 9 月)。
- (学位論文)
- [69] Takahiro Mikami: Theory of nonequilibrium steady states in multiband systems in ac-fields and its applications (博士論文、2013 年 12 月)。
- [70] Motoharu Kitatani: Theory of correlated electron systems: DMFT+FLEX approach (修士論文、2014 年 1 月)。
- [71] Sota Kitamura: First principles band calculation for cold atom systems in optical lattices (修士論文、2014 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、
 - (5) 確率過程、非平衡現象
- 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、特にフラストレーション、量子ゆらぎ、格子変形効果、などいろいろな新しい状況の下での相転移機構解明に努めている。

特に、25年度は、我々のグループが提案してきている、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、構成要素間の短距離相互作用との相乗効果、競合効果や、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、長岡強磁性を拡張し、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、元素戦略プロジェクトとして磁石の保持力機構についての研究も進めた。

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、その機構の解明を進めている。また、容易軸型異方性のある磁性体が磁場掃引のもとで示す磁化の運動について、古典、量子対応について研究を進めた。

確率過程、非平衡現象に関しては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、粒子間相互作用が大きい場合の分布が満たすスケーリングや、定常状態への移行過程についてintertwing operatorによる定式化を行い、いくつかのモデルに関して一般的な性質を明らかにした。

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や、量子力学の基礎性質に関する問題も重要なテーマであり、研究を進めた。

3.2.1 協力現象の統計力学

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、スピントロニクスオーバー物質、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きた。これらの系は、双安定状態間のスイッチを磁場、光、圧力、温度などのパラメータによって制御でき、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。そこで、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、隠れた相を発見してきた。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。さらに、これらの系では、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、結晶のひずみに起因する弾性相互作用によってスピン間に実効的な長距離相互作用が生じることを発見した。[14] その効果として、双安定状態間のスイッチの際の臨界核の大きさが、系の大きさに比例するなど、動的特徴に種々のマクロな性質が現れることなどを明らかにして来た。

25年度は、弾性相互作用起因の実効的な長距離力相互作用と分子間の短距離相互作用の関係でどのように相転移の様子が変わるかについて調べた。特に、短距離相互作用が反強磁性的である場合は、中間温度で系が交替的な構造を示すことが知られているが、その詳しい相図を明らかにするとともに、そのような場合には、格子変形の効果はないことを明らかにした。[3] さらに、2つのスピン状態が入れ替わる場合のドメイン壁の構造や伝搬の特徴を明らかにした。今の系は、格子とスピンの2つの自由度があるため、それぞれのドメインの形態、伝搬の様子は必ずしも同じでないことを示した。特に、ドメイン壁の厚さや伝搬速度などが2つの自由度のタイムスケールの違いによって定性的に変化することを発見した。[5] また、格子のひずみに起因する圧力分布やそのために生じる温度ヒステリシスへの効果などについても詳しく調べた。[6]

フラストレート系での磁化過程

三角格子反強磁性体などフラストレート系での磁化過程は、これまで詳しく調べられてきているが、希土類原子からなる系では、スピンのモーメントの温度、磁場変化なども関与して興味深い磁場・温度相図が得られる。その機構について、動的効果も含めて解析を行った。[2]

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いる。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ンニングなどの機構を総合的に考え、ピンニングの統計力学的理論や、結晶の異方性、保磁力に対する研究基盤の整理、開発を行っている。特に、従来の方法では取り入れることが難しい、温度の取り扱いや、反磁場の動的効果について新しい計算手法を開発し、結晶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の研究を進めた。[31, 32]

3.2.2 確率過程

Dunkl 過程とは Dunkl 演算子と呼ばれる微分差分演算子を用いた多次元ブラウン運動の拡張である。Dunkl 演算子は様々な種類が存在し、A 型と B 型 Dunkl 演算子からなる過程は、クーロン相互作用系での多粒子ブラウン運動になることが知られている [18, 19]。このモデルと通常の拡散過程を結びつける intertwining 演算子 V_β はシステムのダイナミクスにおける重要な役割を果たすが、その一般的な具体形が知られていない。従って、 V_β の性質を調べることで、このモデルの特徴が理解できることは明らかである。

本研究では、数値シミュレーションと V_β の線形関数への作用を厳密に導出することで、Dunkl 過程の定常状態への緩和時間を評価した [29, 13]。特に、A 型 Dunkl 過程の定常分布が β -エルミートランダム行列アンサンブルの固有値分布と一致し、B 型 Dunkl 過程の定常分布が β -ラゲールランダム行列アンサンブルの固有値分布に収束することを明らかにした [36, 37]。(図 3.2.1)

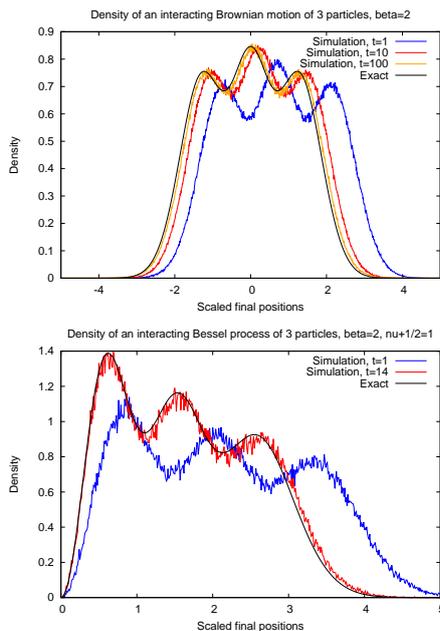


図 3.2.1: (a) A 型 Dunkl 過程の定常分布への収束。黒い曲線は β -エルミートランダム行列アンサンブルの固有値分布を示す。(b) B 型 Dunkl 過程の定常分布への収束。黒い曲線は β -ラゲールランダム行列アンサンブルの固有値分布を示す。

更に、相互作用が強い極限における V_β の指数関数への作用を導出した。この作用を用いることで、相互作用が強い極限での Dunkl 過程は peak set と呼ばれる点の集合に固定されることを示した。特に、peak set が直交多項式の零点になる場合は A、B と D 型

Dunkl 過程のみであることも証明した [13]。

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ク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

25 年度は、昨年度に引き続き、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。従来の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、我々は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ことで、実効的にモット状態と長岡強磁性の状態の間を連続的に移り変われるドーブ機構を考案し、ランチョス法による大規模対角化法、有限サイト密度行列繰り込み群の方法 (DMRG) を用いて、磁性出現のあり方を詳しく調べた。相転移の様子のサイズ依存性からその結果はスムーズに外挿でき、ここで求められた有限の電子密度領域で強磁性が発生は熱力学的極限でも存在することを示した。

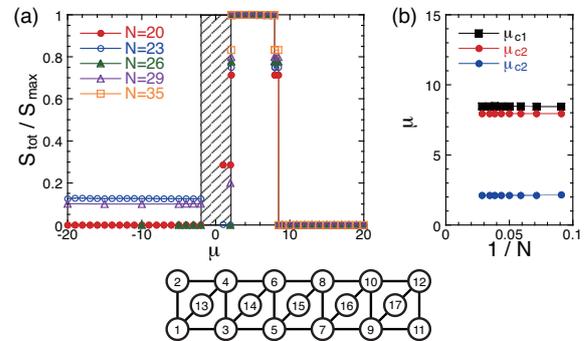


図 3.2.2: 格子の中心部分の電子の化学ポテンシャルの関数としての全スピンの変化

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、25 年度も、周期的な駆動力下での定常状態や掃引磁場中での容易軸型強磁性体の磁化ダイナミクスに関する研究を行った。

駆動された共振器系における相転移現象

外から加えられた外場によって駆動される系の定常状態において、どのような協力現象が現れるのかという問題について研究を行った。その問題を調べるために、具体的には共振器系の問題を調べた。共振器系は共振器中の量子化された光子のモードと物質中の互いに独立な自由度（原子エネルギー準位やスピン自由度など、ここではスピンと呼ぶことにする）からなり、それらの間の相互作用によって協力現象が現れる。その共振器系が振動外場による駆動と、熱浴との相互作用による散逸を受けてどのような振る舞いを行うのかという点に注目している。具体的なモデルとしては、共振器系のモデルとしてしばしば用いられる、Dicke 模型もしくはその模型に回転波近似を施すことによって得られる Tavis-Cummings 模型に、振動外場の項を加えたものを用いた。

我々はこれまで系の定常状態を正しく記述する量子マスター方程式の定式化を進めてきた。量子マスター方程式は、非常に大きな自由度を持つ熱浴と相互作用している結果生じる散逸の効果を取り入れたダイナミクスを記述する方程式である。一般に、量子マスター方程式を導く際には、系の全ての固有状態と固有値を知る必要があり、今考えているような多くの自由度が絡む系ではそれを知ることは難しい問題となる。そこで、共振器 (cavity) 内の光子がコヒーレントに全てのスピンと結合するため、実効的な長距離相互作用が働くということに着目し、平均場の手法を用いて多体問題を一体問題として取り扱う方法を考案した。実際に、適切な極限のもとで、平均場の手法が系の時間発展を厳密に記述することを示した [10]。このようにして相互作用の効果を取り込んだ量子マスター方程式を導き、それによって、これまで知られている、光と物質との相互作用が比較的弱い時に起きる Optical Bistability と呼ばれる非線形現象や、駆動力がないとき相互作用を強くすることで起こる Dicke 転移と呼ばれる量子相転移現象を再現することを示すと同時に、相互作用、駆動外場ともに強い領域での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。この現象に伴う相図の特徴を、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 (CDT) の機構にもとづいて明らかにした。[7, 20, 25, 26]

さらに共振器系に留まらない基礎的問題として、駆動外場のもとで実現する定常状態に対して熱浴のミクロな性質が与える効果について考え、駆動量子開放系に対するより深い理解を得ることを目指している。一般に定常状態の性質は一般に熱浴のミクロな性質に依存する。しかし、ある条件下では、定常状態は熱浴のミクロな詳細に依らず、Floquet 状態のカノニカル分布で記述されることがわかってきた。[30]

磁場掃引のもとでの磁化の運動

スピン $S = 1/2$ の磁化の掃引磁場に対する運動は、Landau-Zener 過程としてよく調べられている。

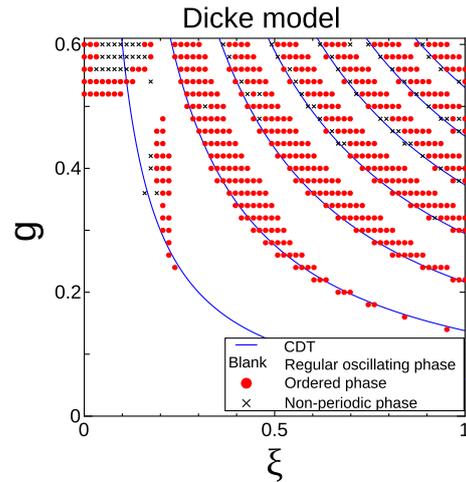


図 3.2.3: 外部からの周期的外場で駆動される Dicke モデルの相図。赤丸の場所では、対称性の破れが生じている。また、線は Coherent Destruction of Tunneling の考え方による相境界。

この現象は、磁化が $SU(2)$ 対称性を持つ限り運動方程式が古典スピンのトルク方程式と一致しているため、磁化の運動はスピンの大きさに依らず同じである。それに対し、系が一軸的異方性を持つ場合には単独のスピンであってもスピン状態が古典状態では現れない矢印で表せない特有な量子状態をとる。スピンの大きさ S が 1 以上の場合に、この効果を調べた。また、 S が無限大である古典極限では、磁化の準安定性が消失する Stoner-Wohlfarth 現象が知られているが、この現象が大きな S でどのように現れるかについて調べ、古典系での軌道の不安定現象と量子系での非断熱遷移の関係についても研究を進めた。

3.2.4 統計力学の基礎的研究

長距離相互作用系の統計力学

最近、従来の熱統計力学では詳しく吟味されてこなかった長距離相互作用系の統計力学について調べている。長距離相互作用系は従来、物性の分野では人工的な模型と考えられてきたが、上で述べたよう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のがわかってきており、また冷却原子系の実験の進歩によって、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いる。それらの計で現れる、新しい性質、特徴に注目している。

平成 25 年度は、相加性を破る長距離相互作用が長距離相互作用系から生じるかについて議論した。統計力学の厳密な数理的結果によれば、平衡状態に

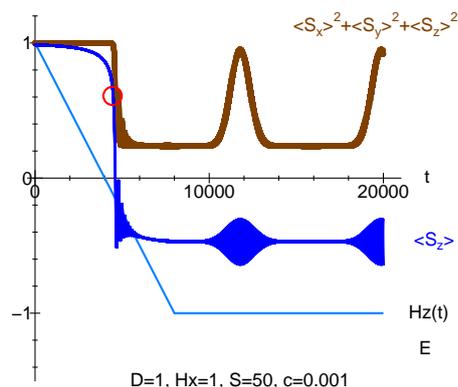


図 3.2.4: 大きな S ($S = 50$) が磁場掃引 $H_z = H_0 - 0.001t$, $D = 1$, $H_x = 1$ のもとで見せる量子振動現象

においてはそのような可能性は否定される。しかし、真の平衡状態ではなく準平衡状態と呼ばれるタイプの状態を考えれば、短距離相互作用の影響が非常に遠くまで伝わることで見かけ上の長距離相互作用が働き、相加性が破れることがあることを示した [8]。準平衡状態とは、真の平衡に緩和する前に長い時間トラップされる定常状態のうち、真のハミルトニアンとは異なる有効ハミルトニアンの平衡統計力学で記述できるような状態のことである。この結果により、比熱が負になるような異常な熱統計力学系をより身近な物質で実現できることが示唆された。

また、長距離相互作用系の統計力学について得られた結果を統計力学の国際会議 (StatPhys25) の Proceedings にまとめた [9]。

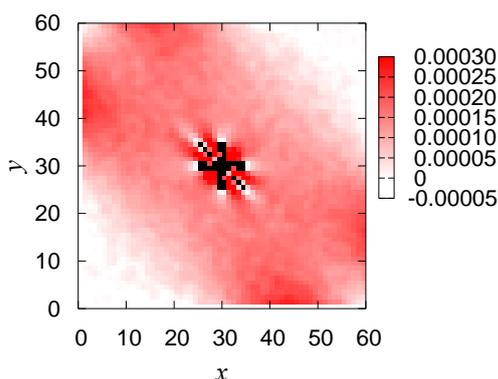


図 3.2.5: 見かけ上の相互作用ポテンシャル。相互作用が遠くまで働くことがわかる。

cavity QED 系での平均場ダイナミクスの妥当性

我々は強いレーザー照射にさらされた cavity QED 系において、cavity 内の原子と光子の間の相互作用が強いときに多様な非平衡相転移が生じることを平均場ダイナミクスの手法によって明らかにしてきた。

平成 25 年度、森は、cavity QED 系を調べる適切な熱力学的極限のもとで、平均場ダイナミクスによる解析が一切の近似を持ち込まない厳密な解析になっていることを示した [10]。通常、平均場理論は粗い近似でしかないが、cavity QED 系では原子と光の間の相互作用が一種の長距離相互作用と見なせるという事情のために平均場理論が完全に厳密な結果を与える。

<受賞>

- [1] 森貴司、第 8 回日本物理学会若手奨励賞「非局在モードに由来する長距離相互作用を持つ系の統計力学」、日本物理学会 2014 年 3 月 28 日

<報文>

(原著論文)

- [2] J. Pospisl, G. Nenert, S. Miyashita, H. Kitazawa, Y. Skourski, M. Divis, J. Prokleska, and V. Sechovsky, Complex magnetic phase diagram of a geometrically frustrated Sm lattice: Magnetometry and neutron diffraction study of SmPd₂Al₃ Phys. Rev. B **87** 214405 (2013).
- [3] Masamichi Nishino, and Seiji Miyashita, Effect of the short-range interaction on critical phenomena in elastic interaction systems, Phys. Rev. B **88**, 014108 (2013).
- [4] Kristel MICHELSEN, Thomas LIPPERT, Bernard BARBARA, Seiji MIYASHITA and Hans DE RAEDT, Comment on “Experimental Test of an Event-Based Corpuscular Model Modification as an Alternative to Quantum Mechanics”, J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 034004.
- [5] Masamichi Nishino, Taro Nakada, Cristian Enachescu, Kamel Boukheddaden, and Seiji Miyashita, Crossover of the roughness exponent for interface growth in systems with long-range interactions due to lattice distortion, Phys. Rev. B **88**, 094303 (2013).
- [6] A. Slimani, K. Boukheddaden, F. Varret, M. Nishino, and S. Miyashita, Properties of the low-spin high-spin interface during the relaxation of spin-crossover materials, investigated through an electro-elastic model, J. Chem. Phys. **139**, 194706 (2013).
- [7] T Shirai, T Mori and S Miyashita, Novel symmetry-broken phase in a driven cavity system in the thermodynamic limit, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **47** (2014) 025501 (9pp).
- [8] T Mori, Nonadditivity in Quasiequilibrium States of Spin Systems with Lattice Distortion, Phys. Rev. Lett. **111**, 020601 (2013).

- [9] T. Mori, Phase transitions in systems with non-additive long-range interactions (Proceedings of Statphys25), J. Stat. Mech. P10003 (2013).
- [10] T. Mori, Exactness of the mean-field dynamics in optical cavity systems, J. Stat. Mech. P06005 (2013).
- (国内雑誌)
- [11] 1 宮下精二: 巻頭言「発展する統計力学」特集:「発展する統計力学」数理科学 2013年6月号 No.600 pp.5-6.
- [12] 宮下精二:巻頭言「会誌が変わります。」日本物理学会誌 **68** (2013) 651.
- (学位論文)
- [13] S. Andraus, Multiple-particle diffusion processes from the viewpoint of Dunkl operators: relaxation to the steady state, December 2013.
- (著書)
- [14] C. Enachescu, M. Nishino, S. Miyashita, Theoretical Descriptions of Spin-Transitions in Bulk Lattices, in "Spin Crossover Materials, Properties and Applications", Ed. M. Halcrow, John Wiley & Sons, Ltd. Published 2013 (pag.455-474), ISBN: 9781119998679.
- [15] 宮下精二:「量子力学」物理学ガイダンス 日本評論社 (2014) pp.37-45.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [16] T. Mori, Short-range interacting system without additivity, Frontier of Statistical Physics and Information Processing (FSPIP, A satellite meeting of STATPHYS 25), Kyoto, 2013/07/11-14.
- [17] T. Mori, Exactness of the mean-field dynamics in the driven-dissipative cavity QED system, Mathematical Statistical Physics (A satellite meeting of STATPHYS 25), Kyoto, 2013/07/29-08/03.
- [18] S. Andraus and S. Miyashita, Freezing properties of Radial Dunkl processes, 25th IUPAP International Conference on Statistical Physics, Seoul National University, Korea, July 2013
- [19] S. Andraus and S. Miyashita, Freezing properties of Radial Dunkl processes, 36th Conference on Stochastic processes and their Applications, University of Colorado Boulder, USA, July 2013.
- [20] Tatsuhiko Shirai, Takashi Mori, Seiji Miyashita, Non-equilibrium phase transitions induced by interactions between photon and material in a cavity system, Statphys25, Seoul University, 2013/07/22-26.
- 招待講演
- [21] T. Mori, Phase transitions in systems with non-additive long-range interactions, Statphys25, Seoul, Korea, 2013/07/22-26.
- [22] S. Miyashita, Phase transitions in a cavity system under strong driving field International Workshop on Classical/Quantum Decoherence and Foundations of Quantum Mechanics Neel Institute, Grenoble, Date : 22 - 23 July 2013.
- [23] Seiji Miyashita, "Phase transitions in a strongly driven cavity system" ENS-UT Workshop Program, Seminar Room, Komaba Faculty House (Tokyo) 2013/12/3
- (国内会議)
- 一般講演
- [24] 森貴司, 量子開放系における注目系と熱浴の間の自然な相関, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013/09/25-28.
- [25] 白井達彦, 森貴司, 宮下精二, 「量子干渉効果を起源とした相転移現象」2013 年秋季大会, 徳島大学常三島キャンパス, 2013 年 9 月 25 日-28 日
- [26] 白井達彦, 森貴司, 宮下精二「駆動共振器系における量子力学的干渉効果を起源とした相転移現象」第 6 回 基礎物理セミナー合宿, 箱根太陽山荘, 2013 年 12 月 7 日-9 日
- [27] 森貴司, Nontrivial prethermalization, 第 6 回 基礎物理セミナー合宿, 箱根太陽山荘, 2013 年 12 月 7 日-9 日
- [28] 西野正理, 宮下精二, C.Enachescu, K.Boukheddaden, 「スピークロスオーバー系の協力現象における相互作用の競合の効果」第 69 回年次大会, 東海大学湘南キャンパス, 2014 年 3 月 27 日-30 日
- [29] S. Andraus and S. Miyashita, Interacting particle systems in the steady state using Dunkl operators, 日本物理学会第 69 回年次大会東海大学, 2014 年 3 月
- [30] 白井達彦, 森貴司, 宮下精二「駆動量子開放系における散逸の取扱いについて」第 69 回年次大会, 東海大学湘南キャンパス, 2014 年 3 月 27 日-30 日
- [31] 宮下精二, 核生成理論と単磁区反転機構理論の整備, 第 3 回 ESICMM 成果報告会 (元素戦略), 中央大学駿河台記念館, 2013/6/28-29.
- [32] 宮下精二, 掃引磁場下での大きなスピン ($S_{\downarrow}1/2$) の磁化反転機構, 物性研究所 計算物質科学研究センター 第 3 回シンポジウム「スピン・軌道相互作用の物理における実験・理論・計算」, 東京大学物性研究所 6 階大講義室 2013/11/19-20.
- [33] 宮下精二, 核生成理論と単磁区反転機構理論の整備, 第 4 回 ESICMM 成果報告会 (元素戦略), 物質・材料研究機構 研究本館 1F 第 1 会議室, 2013/12/13-14.
- 招待講演
- [34] 森貴司, 長距離相互作用系の統計熱力学, 第 58 回物性若手夏の学校分科会, 滋賀県白浜荘, 2013/08/14.

- [35] S. Andraus and S. Miyashita, Interacting particles on the line: steady state and freezing regimes, Random matrix theory - fluctuation in complex systems, 沖縄科学技術大学院大学, 2013 年 10 月
- [36] S. Andraus, M. Katori and S. Miyashita, Limiting regimes of interacting particle systems using Dunkl operators, Spectra of random operators and related topics, 京都大学, 2013 年 12 月
- [37] S. Andraus, M. Katori and S. Miyashita, Limiting regimes of interacting particle systems using Dunkl operators, New topics on stochastic and quantum interacting particle systems, 東京大学, 2013 年 12 月
- [38] T. Mori, Thermodynamic limit in long-range interacting systems, New topics on stochastic and quantum interacting particle systems, 東京大学, 2013 年 12 月
- [39] 森貴司, 準平衡状態における長距離相互作用, 第 2 回統計物理学懇談会, 学習院大学, 2014/03/10-11.
- [40] 宮下精二「Phase Transition and Cooperative Phenomena in Cavity Systems」 「京」物性セミナー、理化学研究所 計算科学研究機構（神戸）2013 年 8 月 20 日
- [41] 宮下精二 掃引磁場下での大きなスピン ($S_i=1/2$) の磁化反転機構、物性研究所 計算物質科学研究センター 第 3 回シンポジウム「スピン・軌道相互作用の物理における実験・理論・計算」、東京大学物性研究所 6 階大講義室 2013/11/19-20
- [42] 宮下精二, Studies on fluctuation, ワークショップ「統計物理学の新しい潮流」, 東京大学, 2014/03/26.
- [43] 森貴司, Nonadditivity in quasi-equilibrium states of the spin-crossover system, ワークショップ「統計物理学の新しい潮流」, 東京大学, 2014/03/26.
- [44] 森貴司 (第 8 回領域 11 若手奨励賞受賞講演) 非局在モードに由来する長距離相互作用を持つ系の統計力学日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014/03/28.
- (セミナー)
- [45] 森貴司, Out-of-equilibrium phase transitions in the optical cavity system, Qulink セミナー, 東京大学, 2013/06/24.
- [46] 森貴司, 長距離相互作用系の熱力学的極限, 沙川研究室セミナー, 東京大学, 2013/09/09.
- [47] 森貴司, 量子開放系における注目系と熱浴の間の自然な相関, 佐々研究室セミナー, 京都大学, 2013/11/18.
- [48] 森貴司, 非加法的な準平衡状態を持つ短距離相互作用模型, 佐々研究室セミナー, 京都大学, 2013/11/18.

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

ドーピング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ている。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、変分モンテカルロ法によって基底状態を調べる。その結果、高温超伝導の本質であると考えられる「ドーピング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。[3, 14, 44, 68]

波動関数の特徴を調べることによって、強相関領域では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 3.3.1 右図参照)、残りの holon が伝導を担っていることがわかった。さらに反強磁性スピン相関が重要な役割を果たし、また antinode($\pi, 0$) 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。

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。我々はフラックス状態が擬ギャップ状態の候補ではないかという新しい観点から詳しく検討した。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 の束縛という観点を加えて調べた。また、波動関数に適当なゲージ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。[16, 32, 51, 61]

3.3.2 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。

有機物におけるディラック電子の輸送現象

有機物においてディラック電子系が実現する場合があるが、それについて久保公式および一般化されたモット関係式を併用して、熱的な輸送係数と電気的な輸送係数について調べた。磁場が強い量子極限の

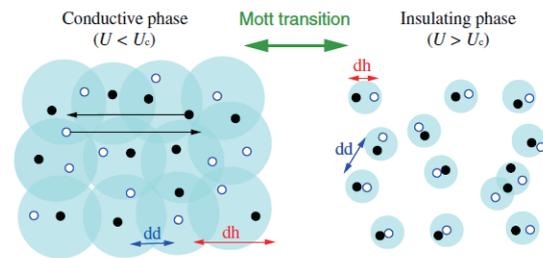


図 3.3.1: 黒丸が doublon、白丸が holon を表す。右図は束縛状態を作った絶縁体状態（モット絶縁体）で、左図は束縛状態が重なり合って金属となった状態。右図の状態に動けるキャリアがドーピングされた状態が、高温超伝導の舞台であると考えられる。[3]

場合を含めて、ネルンスト効果の磁場依存性・温度依存性を明らかにした。その結果を、最近の α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ という物質における実験と比較し、定性的にも定量的にも非常によく一致することを見出した。とくに高磁場領域では、ゼーマン効果によるランダウレベルの分離が重要であることを示した。[1, 27]

さらに実際の物質では、ディラックコーンが傾いていることが予想されているが、この傾きの効果について面内電気伝導度を解析的に導出することによって明らかにした。傾きの方向と、外から印加した電場の方向の相対関係によって特徴的な異方的伝導度が得られることを示し、この現象を用いて物質中のディラック電子の傾きの大きさと方向を決定できるということ提唱した。[2, 12]

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 3.3.2) 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が、この系における 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を明らかにした。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がわかった。この相互作用は、分子の自由度のために生じる新規のメカニズムである。[26]

有機ディラック電子系 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ 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) $_2$ I $_3$ (α -(ET) $_2$ I $_3$) 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。この系に格子欠陥などが入ると、ディラック電子特有の状態が出現する可能性がある。そ

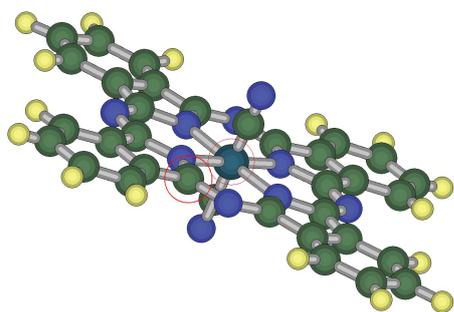


図 3.3.2: 鉄-フタロシアン (Pc)。中央にあるのが鉄元素で、そのまわりがフタロシアン。この大きな分子が1次元的に並んだ構造をもつ。

ここで我々は α -(ET) $_2$ I $_3$ 中の欠陥周辺における電子状態を調べた。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。この局在状態を波数空間において調べ、この系に特徴的なディラックコーンの傾きを反映した異方性が現れることを明らかにした。[10, 23, 29, 72]

有機ディラック電子系における電荷ゆらぎの影響

有機導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ におけるディラック電子相は、温度圧力相図上で電荷秩序相に隣接している。このことはこの系において強い電子間相互作用が働いていることを示している。とくに低温で電気抵抗が対数的に増大することが報告され、その起源が問題となっている。我々はこの原因として電荷秩序相近傍で発達する電荷ゆらぎに注目し、その性質と物理量への影響を自己無撞着くりこみ (SCR) 理論により調べた。その結果、電気抵抗をはじめ種々の実験事実が量子臨界点近傍の電荷ゆらぎの影響により説明できることがわかった。[23, 42, 56, 64, 78]

異方的三角格子スピン系におけるスピン液体状態

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。そのため、「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) $_2$ Cu $_2$ (CN) $_3$ や EtMe $_3$ Sb [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、隣接したスピンの 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が、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。これらスピン液体に関して現状までの研究をまとめた。[20, 81, 82]

スピン液体状態の低温物性

有機物におけるスピン液体状態の原因は未だに謎のままである。とくにこれらの物質では誘電率がブロードなピークを持つなど、リクサー的な特徴を持つことも明らかになった。我々はこれらのスピン液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。量子モンテカルロ法の結果、クーロン相互作用の大きさによって、実現される電子状態やフラストレーションの強さは様々に変化するということがわかった。とくにフラストレーションは低温においてあまり発達しない場合が多く、特定の相互作用のときのみ、低温で異常が現れる。つまり、格子・分子の形状変化や有機分子がペアを組んでいることなどの要因がこの系では重要であると考えられる。[28, 55]

3.3.3 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) $_2$ I $_3$ 、さらに古くから調べられている物質である 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さうと予想され、新たな電子状態として非常に興味を持たれている。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。我々は興味ある物性を開拓すべく研究を開始した。[9]

ディラック電子のスピンホール効果

固体中ディラック電子は、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。これまでも様々な系で研究が進められてきたが、我々は非放射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を現実の異方的パラメータを含めて調べた。その結果、スピンホール伝導度は絶縁体のとき最大値を取ること、絶縁体のスピンホール伝導度は軌道反磁性と物理定数のみによって厳密に関係付けられることを示した。このことは、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。この結果はビスマスのみならずすべての固体中ディラック電子系に適用可能である。[8, 31, 45, 62, 76]

グラフェンにおける欠陥誘起の近藤効果の理論

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

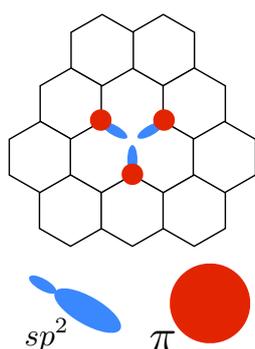


図 3.3.3: グラフェン中の点欠陥とその周りの sp^2 軌道と π 軌道

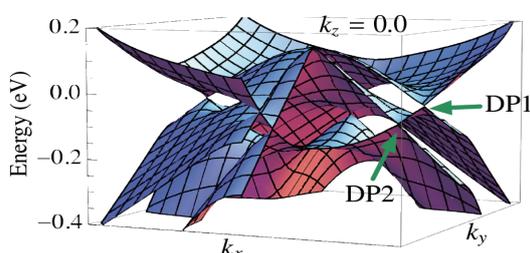


図 3.3.4: Ba_3SnO のフェルミエネルギー近傍の分散関係。DP1 と DP2 が 2 つの Twin Dirac 点を示している。

実験はグラフェン中の単純な欠陥が近藤効果を引き起こすことを示唆している。この近藤効果が、点欠陥に現れた sp^2 電子の持つ局在モーメント (図 3.3.3) によって説明できることを数値くりこみ群により示した。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。[19, 23]

Twin Dirac 電子系の発見

グラフェンやビスマス以外に、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。我々は以前、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 Ca_3PbO (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。この物質群は 3 次元的であり、かつディラック点がまさにフェルミエネルギーのところまに位置している。さらに我々は関連物質である Ba_3SnO の電子状態を詳細に解析し、 Ba_3SnO 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 3.3.4 参照)。この特異な Twin Dirac のために、たとえば軌道帯磁率が特異な振舞いをするを予言した。[11]

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。その結果、通常の反磁性項ではなく、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。また、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、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。[73]

3.3.4 重い電子系および多軌道電子系理論

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 (Tl) イオンは $1+$ と $3+$ の形式価数を取り、 $2+$ の価数を飛ばすことが知られている。他の元素でも、これと同様な現象が確認されており、バレンススキッピングと呼ばれている。最近、Tl を少量ドーブした $PbTe$ において近藤効果が確認されたが、これを理解するために Tl の電荷の自由度を使った近藤効果 (『電荷近藤効果』) を提唱した。その結果、温度を下げるにつれて、まず原子価スキッピング状態が現われ、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。(この成果は、Journal of the Physical Society of Japan の editors' choice に選ばれた。) [21, 79]

UPT₃ におけるスピン三重項超伝導の理論

UPT₃ はスピン 3 重項超伝導状態が実現していると考えられているが、超伝導状態の起源についてはいまだに明らかにされていない。U 系化合物は局在軌道に電子が複数配置されており、スピン軌道相互作用・電子相関ともに重要である。このような系の超伝導状態を議論するために、我々は多軌道周期的アンダーソンモデルに結晶場効果を加えたハミルトニアンを調べた。とくに、スレーブボゾン平均場近似からの量子的な揺らぎを考えることで相互作用を導入し、超伝導をひきおこすペア相互作用を調べた。その結果、特定の場合には同じ“スピン”間でのみ選択的に相互作用することがわかった。このことは“スピン”3 重項超伝導状態を自然に説明する。[35, 59]

Ru 酸化物の理論

Ru 酸化物は豊富な電子状態 (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) を有している。これらの起源を解明するため、Ru の t_{2g} 軌道の自由度と RuO_6 八面体ひずみを考慮したモデルを調べ、以下のことを明らかにした。(1) RuO_6 八面体ひずみがない場合、反強磁性量子臨界点近傍の輸送現象を真木-Thompson 型の電流バー

テクス補正を考慮して調べた。[22, 43, 57, 65, 85] その結果、電流バーテクス補正がホール係数の負の増大を誘起することなどが分かった。(2) また、この系における重い電子的な挙動の起源を明らかにするため、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、乱雑位相近似 (RPA) [7, 18] やゆらぎ交換 (FLEX) 近似 [30, 34, 84] を使って調べた。その結果、強磁性近傍のスピンゆらぎによって有効質量大きくなることがわかった。(3) さらに、有限な rotation と tilting がある場合の flattening の磁気ゆらぎに対する影響を調べた。[58]

空間反転対称性の破れた多軌道系のスピンホール効果

スピン軌道相互作用に由来した特異な輸送現象のひとつにスピンホール効果がある。我々は、軌道自由度と空間反転対称性の破れの両方を考慮したモデルにおけるスピンホール伝導率を調べた。その結果、スピンホール伝導率は不純物による緩和の関数として、符号反転含む特異な依存性を示すことがわかった [24, 39, 60, 75]。さらに、不純物による自己エネルギー補正を自己無撞着ボルン近似で取り込んだ場合には、軌道依存性のためにスピンホール伝導率が増大することを明らかにした [24, 67, 75]。また、電流バーテクス補正はスピンホール伝導率にほとんど影響しないことを明らかにした [24, 67]。

3.3.5 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 の有効モデルの導出

カイラル磁性体は、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。 CrNb_3S_6 は MnSi 同様に伝導体であるが、その電子状態は MnSi と非常に異なっていて、局在した Cr の d 電子と遍歴電子が共存している。このような系で、カイラル磁性を引き起こすジャロシンスキー・守谷的な相互作用がどのように現れるか調べた。その結果、原子内スピン軌道相互作用と結晶の対称性のために通常の d 電子系では現れない相互作用が現われ、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。[6, 36, 47, 74, 80]

$4d^3$, $5d^3$ 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 $5d^3$ や $4d^3$ 電子系遷移金属酸化物は、スピン軌道相互作用が大きいために、近年非常に興味を持たれている。例えば、 NaOsO_3 ($5d^3$ 系) での新奇の金属絶縁体転移 (スレーター転移) や、 SrTcO_3 ($4d^3$ 系) での非常に高温 ($T_N \sim 1000\text{K}$) の反強磁性体転移温度などがある。我々は d^3 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モデルを構築して、磁気モーメントの大きさを考察した。その結果、今までの理論とは異なり、スピン軌道相互作用が大きいときには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、 $4d^3$ や $5d^3$ 化合物ではスピン軌道相互作用が重要な役割を果たし、特に NaOsO_3 や SrTcO_3 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。[4, 63, 83]

j-j 結合描像に基づく超交換相互作用

近年、大きなスピン軌道相互作用が引き起こす新奇の現象がみられる系として $5d$ 電子系化合物が非常に興味を持たれている。このようにスピン軌道相互作用が大きい場合に、スピン軌道相互作用を明確に取り入れた形での超交換相互作用の導出は議論されていなかった。そこで我々は、スピン軌道相互作用作用が大きい場合の超交換相互作用を微視的に導出する方法を定式化した。その結果、量子コンパス-ハイゼンベルグモデルが得られることが分かった。[5, 54, 83]

<報文>

(原著論文)

- [1] I. Proskurin, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 063712-1-4 (2013). "Thermoelectric Transport Coefficients for Massless Dirac Electrons in Quantum Limit"
- [2] Y. Suzumura, I. Proskurin, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 023701-1-4 (2014). "Effect of Tilting on the In-Plane Conductivity of Dirac Electrons in Organic Conductor"
- [3] 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"
- [4] H. Matsuura and K. Miyake: J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 063709-1-4 (2013). "Effect of Spin-Orbit Interaction on $(4d)^3$ - and $(5d)^3$ -Based Oxides"
- [5] H. Matsuura, and M. Ogata: in preparation. "Superexchange Mechanism Based on J-J Coupling Scheme"
- [6] H. Matsuura, T. Shishidou, and M. Kishine: in preparation. "Derivation of Dzyloshinskii-Moriya Interaction on Metallic Chiral Magnet CrNb_3S_6 "
- [7] N. Arakawa and M. Ogata: Phys. Rev. B **87**, 195110-1-11 (2013). "Competition between spin fluctuations in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ around $x = 0.5$ "
- [8] Y. Fuseya, M. Ogata, and H. Fukuyama: submitted to J. Phys. Soc. Jpn. "Spin-Hall Effect and Diamagnetism of Anisotropic Dirac Electrons in Solids"
- [9] Y. Fuseya, M. Ogata, and H. Fukuyama: Review article in preparation. "Transport Phenomena and Diamagnetism of Dirac Electrons in Bismuth"
- [10] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: in preparation. "Defect-induced zero-energy localized state in massless Dirac electron system $\alpha\text{-(ET)}_2\text{I}_3$ "
- [11] T. Kariyado and M. Ogata: in preparation. "Twin Dirac electrons and diamagnetism in Ba_3SnO "
- [12] Y. Suzumura, I. Proskurin, and M. Ogata: in preparation. "Dynamical Conductivity of Dirac Electrons in Organic Conductor"

(会議抄録)

- [13] M. Ogata and T. Kariyado: Journal of Physics: Conference Series. **449**, 012018 (2013). “Impurity bound-state as a probe of order-parameter symmetry in iron-pnictide superconductors: T -matrix approach”
- [14] H. Yokoyama, S. Tanuma, K. Kobayashi, and M. Ogata: (ArXiv:1211.6175). Phys. Proc. **45**, 9 (2013). “Variational study of conduction in doped Mott insulator in terms of kinetic energy”
- [15] T. Watanabe, H. Yokoyama, and M. Ogata: to appear in JPS Conf. Proc. (2014). “Superconductivity and Non-Fermi-Liquid Metal in Carrier-Doped Triangular Hubbard Model”
- [16] H. Yokoyama, S. Tamura, and M. Ogata: to appear in JPS Conf. Proc. (2014). “Effect of Diagonal Hopping on Staggered Flux State in Square-Lattice Hubbard Model”
- [17] H. Yokoyama, S. Tamura, T. Watanabe, K. Kobayashi, and M. Ogata: to appear in Phys. Proc. (2014). “Stability of staggered flux state for anisotropic triangular lattice”
- [18] N. Arakawa and M. Ogata: J. Korean Phys. Soc. **63**, 390-393 (2013). “Magnetic Instability in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ with $x = 0.5$ ”
- [19] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: J. Phys.: Conf. Ser. **456**, 012018 (2013). “Theory of Defect-Induced Kondo Effect in Graphene: Effect of Zeeman Field”

(国内雑誌)

- [20] 日本物理学会誌 **69**, 130 (2014). “秩序なし+ギャップなしのドロドロ三つ巴液体状態を求めて”
- [21] 松浦弘泰、三宅和正: 固体物理 **47**, no. 9 (2013). “原子価スキッピング現象における近藤効果と超伝導”

(学位論文)

- [22] 荒川直也: “Theoretical analyses of Ru oxides on the basis of a conserving approximation” (東京大学大学院理学系研究科・博士論文)
- [23] 金尾太郎: “Effects of Electron-Electron Interaction on Dirac Fermions in Solids” (東京大学大学院理学系研究科・博士論文)
- [24] 溝口知成: “Theoretical study of spin transport phenomena on a multiorbital system without inversion symmetry” (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)
- [25] 森井麗望: “周期的な外場下でのグラフェンのホール効果におけるスピン軌道相互作用や不純物の影響” (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

- [26] H. Matsuura: The 10th International Symposium on Crystalline Organic Metals Superconductors and Ferromagnets (ISCOM2013), (Montreal, Canada, July 14–19, 2013). “Theory of Mechanism of π -d Interaction in Iron- Phthalocyanine”
- [27] I. Proskurin and M. Ogata: ICSOM2013 “Thermoelectric transport coefficients for massless Dirac electrons in quantum limit”
- [28] A. Igarashi and M. Ogata: ICSOM2013 “Effects of Coulomb interaction and hopping interaction in Dimer Mott insulators”
- [29] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: ICSOM2013 “Defect-Induced Zero-Energy Localized State in Dirac Electron System α -(ET) $_2$ I $_3$ ”
- [30] N. Arakawa: The 7th ISSP International Workshop “Emergent Quantum Phases in Condensed Matter” (Kashiwa, July 3–21, 2013). “Quantum Criticality and Orbital-dependent Renormalization of Quasiparticles in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ ”
- [31] Y. Fuseya, M. Ogata, and H. Fukuyama: The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2013), (Tokyo, August 5–9, 2013) “Large Spin-Hall Effect of Dirac Electrons in Bismuth”
- [32] H. Yokoyama, S. Tamura, and M. Ogata: SCES 2013 “Stability of staggered flux state in two-dimensional Hubbard model”
- [33] T. Watanabe, H. Yokoyama and M. Ogata SCES 2013 “Superconductivity and non-Fermi-liquid metal in carrier-doped triangular Hubbard model”
- [34] N. Arakawa: SCES 2013 “Quantum Criticality and Orbital-dependent Renormalization of Quasiparticles in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ ”
- [35] T. Hinokihara, A. Tsuruta, and K. Miyake: SCES2013 “Selection Rule on Pairing Interaction in f -Based Heavy Electron Systems”
- [36] H. Matsuura: International Symposium on Science Explored by Ultra Slow Muon (Matsue, August 8–12, 2013). “Derivation of Dzyloshinskii-Moriya Interaction on Metallic Chiral Magnet CrNb_3S_6 ”
- [37] Y. Fuseya, M. Ogata, and H. Fukuyama: Mini-workshop on Dirac fermions in solids (ESPCI Paris, October 14, 2013). “Spin-Hall effect and diamagnetism of Dirac electrons in bismuth”
- [38] M. Ogata, Y. Fuseya, and H. Fukuyama: ESPCI “Spin Seebeck effects of Dirac electrons”
- [39] T. Mizoguchi, N. Arakawa: International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena (Okinawa, Oct. 22-26, 2013) “Unique spin Hall effect due to combination of orbital degree of freedom and inversion-symmetry breaking”
- [40] I. Proskurin: FIRST-QS 2 C WS on “Emergent Phenomena of Correlated Materials” (Tokyo, November 13–16, 2013). “Thermoelectric transport of massless Dirac fermions in magnetic field”

- [41] H. Yokoyama, S. Tamura, K. Kobayashi, and M. Ogata: ISS 2013 (Tokyo, November 18–20, 2013). “Staggered flux state on anisotropic triangular lattice”
- [42] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: APS March Meeting (Denver, USA, March 3–7, 2014). “Effects of Charge Fluctuations on Massless Dirac Fermions in Organic Conductor α -(ET) $_2$ I $_3$ ”
- [43] N. Arakawa: APS March Meeting “Resistivity for Ru oxides on the basis of conserving approximation”
- 招待講演
- [44] M. Ogata and H. Yokoyama: “Superconductivity research advanced by new materials and spectroscopies” (Sendai, July 23–25, 2013) “Superconductivity in the Hubbard model near the Mott insulator”
- [45] M. Ogata, Y. Fuseya, and H. Fukuyama: Workshop on Quantum Materials (MPI, Stuttgart, December 9–11, 2013) “Spin Hall effect and large diamagnetism in Dirac electrons in Bismuth”
- [46] M. Ogata: RIKEN-APW joint workshop “Highlights in condensed matter physics” (RIKEN, Wako, January 23–25, 2014) “Spin Hall effect and large diamagnetism in Dirac electrons in Bismuth”
- [47] H. Matsuura: Trends in Theory of Correlated Materials 2013 (EPFL, Lausanne, Swiss, October 2–5, 2013) “Derivation of Dzyaloshinskii-Moriya Interaction on Metallic Chiral Magnet CrNb $_3$ S $_6$ ”
- (国内会議)
- 一般講演
- [48] 小形正男、伏屋雄紀、福山秀敏: 日本物理学会、徳島大学 2013, 9.25–9.28 (秋季大会) “ビスマスにおけるディラック電子の巨大スピントリック効果”
- [49] 伏屋雄紀、小形正男、福山秀敏: 日本物理学会、徳島大学 “ビスマスにおける異方的ディラック電子の巨大スピントリック効果”
- [50] Igor Proskurin, Masao Ogata: 日本物理学会、徳島大学 “Nernst effect for massless Dirac electrons in quantum limit”
- [51] 横山寿敏、田村駿、小林憲司、小形正男: 日本物理学会、徳島大学 “交替フラックス状態に対する対角ホッピングの効果”
- [52] 渡邊努、横山寿敏、小形正男: 日本物理学会、徳島大学 “キャリアドープした三角格子ハバード模型における非フェルミ流体と超伝導”
- [53] 妹尾仁嗣、中惇、小形正男: 日本物理学会、徳島大学 “スピ液体系における乱れの効果 RVB 平均場理論による解析”
- [54] 松浦弘泰、獅子堂達也、岸根順一郎: 日本物理学会、徳島大学 “JJ 結合描像からのジャロシンスキー・守谷相互作用の導出”
- [55] 五十嵐章大、小形正男: 日本物理学会、徳島大学 “ダイマート絶縁体における電荷秩序とホッピング”
- [56] 金尾太郎、松浦弘泰、小形正男: 日本物理学会、徳島大学 “多層ディラック電子系 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ における電場効果: 遮蔽効果と電荷分布”
- [57] 荒川直也: 日本物理学会、徳島大学 “微視的なフェルミ液体論に基づく Ru 酸化物の電気抵抗”
- [58] 荒川直也: 日本物理学会、徳島大学 “Ru 酸化物における flattening の磁気的な性質への影響”
- [59] 檜原太一、鶴田篤史、三宅和正: 日本物理学会、徳島大学 “ f^2 電子配置重い電子系での ESP 超伝導発現機構: UPt $_3$ の場合”
- [60] 溝口知成、荒川直也: 日本物理学会、徳島大学 “軌道自由度と空間反転対称性の破れの絡み合いによる特異なスピントリック効果”
- [61] 横山寿敏、田村駿、小形正男: 日本物理学会、東海大学 2014, 3.27–3.30 (年次大会) “擬ギャップ相と交替フラックス状態”
- [62] 伏屋雄紀、小形正男、福山秀敏: 日本物理学会、東海大学 “異方的ディラック電子のスピントリック効果と軌道磁性”
- [63] 松浦弘泰、三宅和正: 日本物理学会、東海大学 “(4d) 3 、(5d) 3 遷移金属酸化物におけるスピントリック相互作用の効果”
- [64] 金尾太郎、松浦弘泰、小形正男: 日本物理学会、東海大学 “有機導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ のディラック電子相における臨界電荷ゆらぎの効果”
- [65] 荒川直也: 日本物理学会、東海大学 “Ru 酸化物における軌道協力的スピントリックによる通常ホール係数の異常”
- [66] Y. Suzumura, I. Proskurin, and M. Ogata: 日本物理学会、東海大学 “In-plane Conductivity of Dirac Electrons in α -(ET) $_2$ I $_3$ Organic Conductor”
- [67] 溝口知成、荒川直也: 日本物理学会 東海大学 “空間反転対称性の破れた多軌道系のスピントリック効果への非磁性不純物による自己エネルギー補正とバーテックス補正の影響”
- [68] 小形正男、横山寿敏: 高温超伝導フォーラム第二回会合 (上智大学 2014, 3.26) “ハバードモデルにおける超伝導・ノーマル状態”
- [69] I. Proskurin: 基研研究会「固体中におけるディラック電子系物理の新展開」(京都大学 2013, 6.19–6.21) “Thermoelectric transport coefficients for massless Dirac electrons in quantum limit”
- [70] 伏屋雄紀: 基研研究会 “ビスマスにおける巨大スピントリック効果”
- [71] 松浦弘泰: 基研研究会 “表面にキャリアドープされた有機ディラック電子系 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ における層ごとの電荷分布”
- [72] 金尾太郎、松浦弘泰、小形正男: 基研研究会 “有機ディラック電子系 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ における欠陥誘起ゼロエネルギー局在状態”
- [73] 溝口知成、小形正男: 基研研究会 “ディラック分散を持つ電子系の超伝導と「スピントリック」”

- [74] 松浦弘泰:「カイラル磁性と超伝導のアナロジー」(東京大学 2013, 8.5) “カイラル磁性体 CrNb_3S_6 におけるジャロシンスキー守谷相互作用の導出”
- [75] 溝口知成、荒川直也:「第7回物性科学領域横断研究会」(東京大学, 2013 12.1-2) “軌道自由度と空間反転対称性の破れの絡み合いによる特異なスピンホール効果”
- [76] 伏屋雄紀:基盤研究A「固体中のディラック電子」第3回ディラック電子研究会(赤穂御崎温泉、兵庫 2013, 12.27-28) “異方的ディラック電子のスピンホール効果と反磁性”
- [77] I. Proskurin:第3回ディラック電子研究会 “Thermoelectric transport of massless Dirac fermions: Application to α -(BEDT-TTF) $_2\text{I}_3$ organic conductor”
- [78] 金尾太郎、松浦弘泰、小形正男:第3回ディラック電子研究会 “固体中のディラック電子系における電子間相互作用の効果”
- [79] 松浦弘泰:「金属錯体の固体物性最前線-金属錯体と固体物性物理と生物物性の連携新領域をめざして-」(東北大学 2014, 2.21-2.23) “原子価スキッピング現象による電荷近藤効果の微視的理論”
- [80] 松浦弘泰:chiral 研究会「哲学者と科学者の打ち出す真理への共同戦線」(山梨 2014, 3.30-4.1) “近藤効果によるジャロシンスキー守谷相互作用のくりこみ効果”

招待講演

- [81] 小形正男:第二回神楽坂・凝縮系理論研究会 2013, 5.17 “スピン液体の理論”
- [82] 小形正男:日本物理学会、東海大学湘南キャンパス 2014, 3.27-3.30 (年次大会) 領域 7、3、8 合同シンポジウム「スピン液体:実験研究の最前線」“おわりに”
- [83] 松浦弘泰:第3回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—(紀伊勝浦 2013, 12.16-18) “5d 系遷移金属酸化物の電子状態の理論”

(セミナー)

- [84] 荒川直也:名古屋大学, S 研コロキウム (2013.4.12) “ $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ における量子臨界性と軌道依存する準粒子のくりこみ”
- [85] 荒川直也:新潟大学, 物性理論コロキウム (2014.3.12) “Ru 酸化物における軌道協力的スピンゆらぎと軌道依存電荷輸送”

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、超高压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

第一原理計算の直面する重要な課題のひとつに精度の問題がある。現在、一般的に使われている密度汎関数理論 (DFT) における局所密度近似や一般化勾配近似は、幅広い物性を定量的に再現できることが知られている一方で、強相関係の記述がうまくいかない、分散力が記述できない、バンドギャップを大幅に過小評価してしまう、といった精度上の問題を複数有することが知られている。その一方で、それらをバランス良くかつ系統的に改善していく手段は必ずしも明らかではない。その観点から、DFTとは異なる理論的枠組みである、波動関数理論に基づく第一原理計算手法の開発が近年、注目を集めている。

我々が取り組んでいるトランスコリレイティッド (TC) 法もそうした波動関数理論の一種であり、電子座標の二変数関数によって記述されるジャストロウ因子によって多体ハミルトニアンを相似変換することによって、電子相関効果を取り込むことができる。本年度の成果としては、(1) 多体波動関数をジャストロウ因子とスレーター行列式の積で表す近似において、ジャストロウ因子の改善を行った。改善手法は我々が一昨年度から開発してきているものであるが、本年度はこれまでよりも適用範囲を広げ、イオン性の結晶の短距離ジャストロウ関数最適化などにも適用した。これらの物質においても、ジャストロウ因子の短距離部分は、長距離部分と共存する条件においてはバンドギャップに大きな影響を与えないが、格子定数を改善することがわかった。(2) 先述のジャストロウ因子最適化と配置間相互作用法を組み合わせ、光吸収スペクトルの計算を行った。以前、固体のフッ化リチウムに適用したことがあったが、今年度はバンドギャップの小さいヒ化ガリウムにも適用し、この物質においても励起子効果を取り入れられることがわかった。(3) 二次のメラレー・プレセット摂動論と TC 法を組み合わせることにより、バンド構造がどのように変化するかを調べた。結果、出発点の TC 法の時点で相関エネルギーを大部分取りこ

んでいるため、摂動の影響は小さいことがわかった。また、そのために双直交形式の TC 法を固体に適用するコード開発も行った。

トランスコリレイティッド法の波動関数を用いた拡散量子モンテカルロ法

拡散量子モンテカルロ法 (DMC) は高度に電子相関を取り込める第一原理電子状態計算手法であり、計算コストのスケールが良いことから、特に固体において信頼できる電子状態計算手法として用いられている。しかし電子系の計算では多体波動関数の節を固定する節固定近似を用いる必要があり、得られる電子状態の精度は前もって用意した節の質によって決まる。通常はハートリーフォック (HF) 法や密度汎関数法の波動関数の節を用いる。多くの物質では用いる節によって構造や電子状態は変わらないとされているが、近年、遷移金属酸化物では節の質も重要であるとの報告がなされている。

こうした背景のもと我々はトランスコリレイティッド (TC) 法の波動関数の節を用いた DMC の計算を行った。TC 法ではジャストロー因子により電子相関を露に取り入れた上で一電子軌道を最適化するため、TC 法の波動関数は HF 法の波動関数よりも良い節を持つことが期待される。TC 法、HF 法の波動関数の節を用いた DMC のエネルギーを比較することで、TC 法の波動関数の DMC における有用性について、次の知見を得た。(1) 電子間の遮蔽を取り込める長距離型のジャストロー因子を用いた場合、TC 法の波動関数の節はよりバンドギャップの小さい系で良くなる、(2) 短距離の電子相関を精度よく記述できる短距離型のジャストロー因子を用いた場合、TC 法の波動関数の節は HF 法の波動関数の節と同等かそれ以上に良い。これらの結果はそれぞれ、長距離型のジャストロー因子は電子ガス系を元に作られているためギャップの小さい系に向いている、短距離型のジャストロー因子は汎用的な形であるため悪く作用することはないと解釈される。今後はこの手法の遷移金属酸化物系への適用を計画している。

金属中のフォノン振動数および電子フォノン相互作用の高精度第一原理計算

金属中のフォノンは輸送現象や比熱、そして超伝導の発現において重要な役割を演じるため、それらの現象の理解のためにはフォノンの振動数や電子フォノン相互作用の強さを精度良く求めることが必要不可欠となる。金属中の格子振動においては、Fermi 面近傍の軌道にある電子によりイオン同士の Coulomb 相互作用が遮蔽され、振動数が減少する「ソフト化」がおこる。ソフト化に大きく寄与する Fermi 面近傍の軌道と比較的寄与の小さいそれ以外の軌道の両者を含む Brillouin 領域全体に渡る数値積分を精度良く行うために、昨年度から当研究室で開発している改良テトラヘッドロン法をフォノン及び電子フォノン結合定数の計算コードに実装し、それを高压下のリチ

ウム単体の計算に対して適用した。その結果、高圧下でフォノンのソフト化が起こっている部分では電子フォノン結合も非常に強くなり、Fröhlich パラメータの値は 1.57 と、単体金属の中では極めて大きいことが分かった。

物質構造探索手法の開発

与えられた化学組成に対して安定な原子配置（結晶構造）を探索する物質構造探索は、その系のポテンシャルエネルギーを原子座標等の構造変数の関数として見た時、複雑なポテンシャル超曲面の最小（極小）点探索問題として実現される。ポテンシャル面内のある極小点から出発してポテンシャル面上を登坂し、鞍点を經由して別の極小点へと飛び移っていく一つの手法として、極小点と鞍点におけるポテンシャル面のヘッセ行列 $H_{ij} = \partial^2 U(\mathbf{x}) / \partial x_i \partial x_j$ 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用いる超球面探索法が提案されている。

我々はこの超球面探索法のアイデアをさらに進め、ヘッセ行列を利用してポテンシャル面をかき上げすることで、元の極小点を脱出して別の極小点へと飛び移る手法を開発している。今年度はこの嵩上げポテンシャル法のプログラム開発を継続し手法の改良を行った。また、テスト計算として Stillinger-Weber ポテンシャルの周期系に対する構造探索を行った。更に、第一原理計算によるエネルギーと原子間力を用いたテストについても、孤立分子に対するものが進行中である。今後は、第一原理計算によるテストを中心に、結晶構造探索などのより実際的なテストから、応用に繋げることを目指していく。

分割統治法による大規模系の全系スペクトル計算

第一原理計算による物性の研究において、しばしば極めて大規模な系を対象としなければならない場合がある。しかしながら、密度汎関数法の計算コストは系の大きさの 3 乗に比例して増加するため、計算機の能力による制約を受けてしまう。この問題に対処するために、計算コストが系の大きさの 1 乗でスケールする手法（オーダー N 法）が幾つか提唱されており、その内の一つに分割統治法がある。分割統治法とは、大規模系を小さな部分系に分割し、個々の部分系における電子状態計算の結果を統合する事で、全系の物理量を構成する手法である。ところが、分割統治法では自己無撞着計算に各部分系の波動関数のみを使用するため、全系の波動関数を考慮しておらず、従ってそのままでは全系のスペクトルを計算できないという問題がある。

そこで、我々は分割統治法計算の出力を最大限に利用してハミルトニアンを再構成し、全系スペクトルの高速計算を可能にする手法の開発を行っている。基盤となる分割統治法として、高精度で汎用性の高い LS3DF 法と呼ばれる手法を採用した。具体的には、LS3DF 法の計算における副産物である、部分系

の軌道波動関数と軌道エネルギーを組み合わせる事で、全系のハミルトニアンを再構築する。このように表したハミルトニアンは部分系の軌道だけで展開できるため、ハミルトニアン行列要素を部分系軌道の内積を計算するだけで求めることができ、計算量を劇的に削減することができる。現在、この手法の有効性を検証するために、シリコン結晶等のスペクトル計算を行っている。精度と汎用性の向上を目指して、引き続き開発を行う予定である。

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 ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 焼結磁石) は最も強い永久磁石として多くの応用に用いられているが、その保磁力のメカニズムには未知の部分が多く残されている。 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 主相と Nd 酸化物等からなる副相との界面が保磁力に重要な役割を果たしている事は実験的によく知られており、その界面がどのような構造、電子状態を持っているかも明らかにする事は意義深い。界面近傍に存在する Nd サイトの磁気異方性は界面において Nd の 4f 電子が感じるポテンシャルの異方性により支配されると考えられるため、磁気特性の理解には界面構造を同定する必要がある。2013 年度は副相として Nd 酸化物に着目し、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 主相との界面の安定構造、電子状態を明らかにする事を試みた。副相の Nd 酸化物はエネルギー的に安定で実験で知られた特徴を良く再現する酸素 4 配位配置の Nd_4O を用いた。界面構造として $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 主相の (001)- $(\sqrt{2} \times \sqrt{2})$ 面の上に Nd_4O (001)- $(\sqrt{5} \times \sqrt{5})$ 面を 5 層配置し、安定構造を得た。界面近傍で生じた Nd 酸化物 Nd 副格子の fcc 構造から乱れが、界面垂直方向に界面からの距離の増大に応じて緩和し fcc 構造を回復していく様子が見て取れる。また構造を緩和させる過程で界面近傍の Nd 酸化物中の酸素原子が界面から離れていく様子が確認された。接合面の酸素原子の位置は Nd の 4f 電子が感じるポテンシャル [図 3.4.1(a)] に大きな影響を与え、磁気異方性への重要な寄与となり得る。また主相の界面電子状態を真空表面に対する電子状態と比較した所、Fe 原子の磁化に真空表面に対する電子状態には見られない増減が見られ、Nd 酸化物からの電荷移動による一電子ポテンシャルの変化を示唆している。

$\text{Y}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ の磁気異方性に対するひずみ効果

磁性金属状態の中でも d 電子による遍歴電子状態は 4f 電子による局在状態と異なりサイト間の相互作用を直接的に決定づけるため、格子ひずみに対し敏感に変化すると予想される。2013 年度はその様な磁性金属として $\text{Y}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ を取り上げ、その歪みと磁気異方性の相関を精査した。第一原理計算には実空間基底とノルム保存擬ポテンシャルによる OpenMX コードを用いた。その結果、結晶を 3 軸圧縮する事による磁気異方性の増大が見られた。そこで、我々

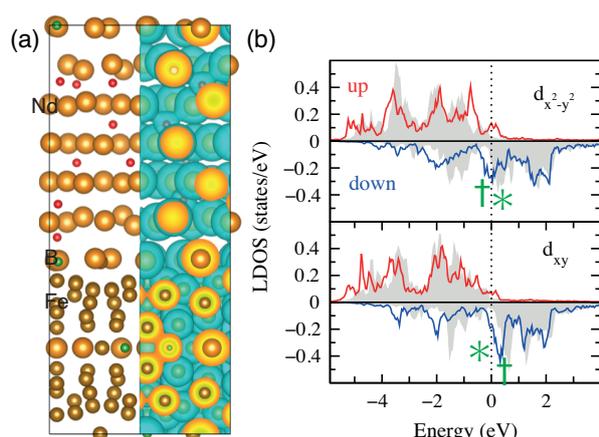


図 3.4.1: (a) $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\text{Nd}_4\text{O}$ 界面の原子構造と一電子ポテンシャル分布。(b) $\text{Y}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 単相の j_2 サイトにおける $d_{x^2-y^2}$ 軌道成分と d_{xy} 軌道成分に射影した局所状態密度。圧縮により状態は shades から実線へと変化する。†と*の対はそれぞれカップリングをあらわす。

は磁気異方性の原子サイト毎・軌道カップリング毎の寄与を分解するために、2次摂動とオンサイト近似に基づく手法を開発し、適用した。本手法は、著しく計算コストが少ないかつ、それぞれの寄与を合計した際の総和則を満たす事が長所である。非摂動状態としては、状態の空間部分はスピン・軌道相互作用を含まないで求められたものを用い、状態のスピン部分を回転させる事により磁気異方性エネルギーを計算した。本手法によるサイト分解の結果、Fe の j_2 サイトの垂直磁気異方性が圧縮歪みにより著しく増大している事が分かった。さらに、軌道カップリング毎の寄与を調べた所、 j_2 サイトにおける $d_{x^2-y^2}$ 軌道成分と d_{xy} 軌道成分による少数スピン同士のカップリングが支配的である事が明らかとなった。その原因としては、i) それぞれの $3d$ 状態に射影した局所状態密度が圧縮により Fermi エネルギー近傍で増大する事 [図??(b)]、ii) 孤立原子における $d_{x^2-y^2}$ 軌道と d_{xy} 軌道のカップリングの行列要素が他の行列要素に比べて大きい事、の2つの要因が両方とも効いている事を示した。本手法により、界面・ナノ構造における局所的な磁気異方性を定量的に議論する事が可能となった。

I型クラスレートにおけるホスト-ゲスト相互作用と熱伝導の体積依存性

I型クラスレート化合物 $\text{A}_8\text{M}_{16}\text{X}_{30}$ は高い熱電性能 ZT を示す籠状物質で、 sp^3 ネットワークから構成されるホスト構造と、内包されたゲスト原子 (rattler) との間のホスト-ゲスト相互作用によって極めて低い格子熱伝導率 κ_ℓ が実現されている。当研究グループでは、その低い熱伝導率の起源を理論的に解明することを目的とし、フォノン伝導率の第一原理計算を行っている。今年度は特に、実験的に報告されている籠中における rattler の可動域の大きさと κ_ℓ の間

の相関に着目し研究を行った。

I型クラスレートにおいて、rattler の可動域は籠を構成する原子種や籠のサイズなどによって多様な変化を示すことが知られている。例えば、 $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$ (BGG) の14面体籠中のBa原子 (rattler) が籠の中心位置を占める一方で、より格子定数の大きな $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Sn}_{30}$ (BGS) では非中心位置が安定になる。この非中心のラットリング振動は、BGS の極めて低い熱伝導率やそのガラス的な温度依存性の起源であると考えられている。この違いを定性的に理解するため、BGG の格子定数を計算で得られた最適値を基準に -2% から $+6\%$ まで様々に変化させ、それに伴うフォノンの寿命や熱伝導率の変化を第一原理的に解析した。

BGG の格子定数を徐々に大きくした結果、rattler の原子振動がより非調和的になり、格子定数を $+6\%$ とした系でラットリング振動が非中心に遷移することを確認した。また、rattler の非調和性が顕著になるのに伴い、音響フォノンの寿命が大幅に短くなり、その結果として熱伝導率が大幅に減少した (図 3.4.2)。計算によって得られた κ_ℓ の体積依存性は、実験的に報告されている rattler の可動域と κ_ℓ 間の相関と定性的に一致するものである。

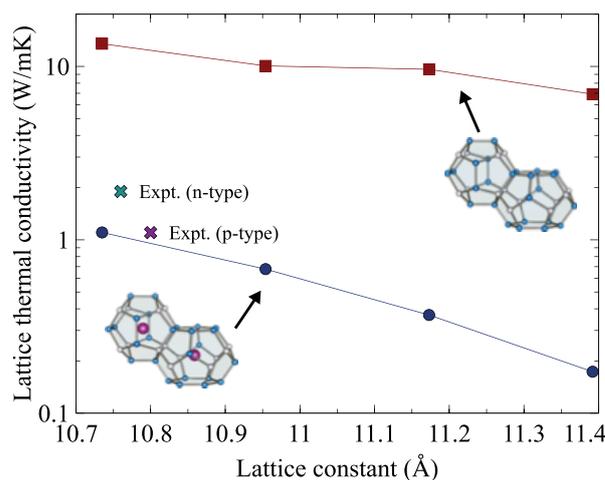


図 3.4.2: I型クラスレート化合物 $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$ における格子熱伝導率の格子定数依存性

ペロブスカイト型酸化物 (ATiO_3) 中の水素の多様な振る舞い

ペロブスカイト型酸化物は絶縁体の状態で、強誘電性、圧電性、焦電性等、極めて多彩な物性を示すが、還元処理により絶縁性は失われ、金属絶縁体相転移を示すことが知られている。典型的な還元処理の一つである水素アニール実験では、これまで電子キャリアの生成は酸素欠損 (V_O^{2+}) や格子間水素 (H_i) に由来すると考えられてきたが、これまでの我々の研究では、水素は必ずしもキャリア生成の源であるとは限らず、酸素負イオン (O^{2-}) と負に帯電したヒドリド (H^-) との置換に基づく従来知られていな

い欠陥形成メカニズムがある事が示された。しかしながら、密度汎関数理論で一般的な交換相関エネルギーに対する近似である GGA では、バンドギャップ値が実験と一致しないなど、計算精度に問題があった。我々は、より高精度にギャップ値を再現できるハイブリッド汎関数法 (HSE06) を用いてこれら水素不純物の電子状態を詳細に計算し、水素と酸素の交換により生じる欠陥の安定性や、ギャップ中に生じる不純物レベルの位置を現実の系に近い状態で予測した。その結果、酸素と水素の置換は極めて安定で有ることに加えて、電子フェルミエネルギーが高い条件下では2つの水素が酸素欠陥位置を占めて安定化する事を示した。また、酸素欠陥位置に2つの水素が占めると Ti-3d 軌道のダングリングボンドの水素終端によりバンドギャップの非常に深い位置に電子のトラップレベルが生じる過程等、水素によるキャリア電子の減少は分子結合に基づいて明瞭に理解出来る事を示した。

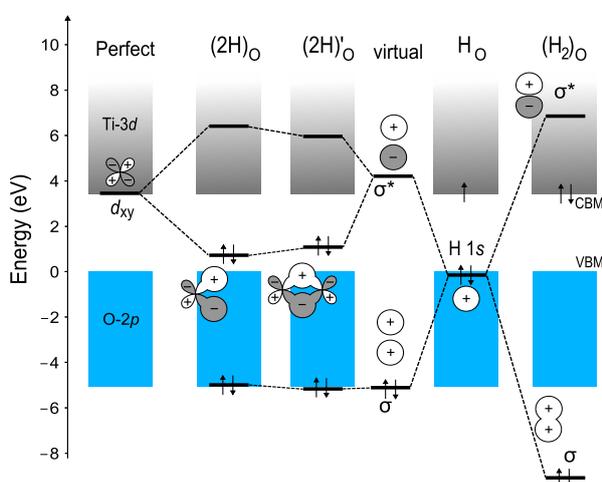


図 3.4.3: SrTiO₃ 完全結晶 (Perfect) の酸素欠陥位置に一つの水素が入った状態 (H_O) と二つの水素が入った状態 ((2H)_O、(2H)_O') の水素不純物エネルギーレベル。

BaTiO₃ 中の水素の NMR 化学シフト

固体中のアニオンを H⁻ で置換することは H⁻ の強い還元性から困難であったが、近年になりそれが可能になってきている。H⁻ での置換は電子ドープなどによる物性の制御に利用することができる。このような固体中水素の位置や電子状態を知るにはプロトン核磁気共鳴 (¹H NMR) が有効な手段の一つである。¹H NMR の化学シフトは水素の荷電状態によって異なり、通常は H⁺ であれば正、H⁻ であれば負になると考えられている。しかし固体中では H⁻ の化学シフトが正になるなど理解が容易でない。そこで本研究では BaTiO₃ において酸素を水素で置換した BaTiO_{3-x}H_x について、水素の荷電状態と NMR 化学シフトを第一原理的に計算し、実験との比較を行った。

水素濃度 $x = 0.125, 0.5, 1$ について構造最適化と Bader 解析を行うと、いずれの濃度でも水素は酸素サイトで安定し電子数は約 1.6 となり、実験と同じく酸素サイトで H⁻ になるという結果を得た。また背景電荷を置き絶縁体の状態で化学シフトを計算したところ、水素濃度によって差はあるが何れも 1–3 ppm であった。実験では $x = 0.1$ で 4.4 ppm と報告されているため値が正になるという傾向は同じであるが、他の物質での計算値と実験値の差に比べて大きく、伝導電子の影響を考慮する必要があると考えられる。

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Kobori, K. Sodeyama, T. Otsuka, Y. Tateyama and S. Tsuneyuki, “Trimer effects in fragment molecular orbital-linear combination of molecular orbitals calculation of one-electron orbitals for biomolecules”, *J. Chem. Phys.* 139, 094113 (2013).
- [2] A. Nakamura, Y. Hiranaka, M. Hedo, T. Nakama, Y. Tatetsu, T. Maehira, Y. Miura, A. Mori, H. Tsutsumi, Y. Hirose, K. Mitamura, K. Sugayama, M. Hagiwara, F. Honda, T. Takeuchi, Y. Haga, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, and Y. Ōnuki, Fermi surface and magnetic properties of Antiferromagnet EuBi₃, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 82 (2013) 124708.
- [3] Y. Iwazaki, Y. Gohda and S. Tsuneyuki, Diversity of hydrogen configuration and its roles in SrTiO₃, *APL Materials*, 2, (2014) 012103.
- [4] M. Ochi, K. Sodeyama and S. Tsuneyuki, “Optimization of the Jastrow factor using the random-phase approximation and a similarity-transformed Hamiltonian: Application to band-structure calculation for some semiconductors and insulators”, *J. Chem. Phys.* 140, 074112 (2014).
- [5] M. Kawamura, Y. Gohda, and S. Tsuneyuki, “Improved tetrahedron method for the Brillouin-zone integration applicable to response functions”, *Phys. Rev. B*, 89, 094515 (2014).
- [6] T. Tadano, Y. Gohda and S. Tsuneyuki, “Anharmonic force constants extracted from first-principles molecular dynamics: applications to heat transfer simulations”, *J. Phys.: Condens. Matter* accepted.
- [7] Y. Tatetsu, H. Watanabe, E. Sakai, and T. Maehira, “Fermi surfaces of Eu compounds”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, accepted.

(会議抄録)

- [8] 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”, *J. Phys. Conf. Ser.* 454, 012020 (2013).
- [9] H. Ariga, K. Shimomura, K. Ishida, F. Pratt, K. Yoshizawa, W. Higemoto, E. Torikai and K. Asakura: Detection of oxygen vacancy in rutile

TiO₂ single crystal by μ SR measurement, Proc. Int. Symp. Science Explored by Ultra Slow Muon (USM2013), JPS Conf. Proc. **2**, 010307 (2014).

(国内雑誌)

- [10] 常行真司「京コンピュータが拓く高圧力の物質科学」, 高圧力の科学と技術 Vol. 23, No.2, 88 (2013).
- [11] 岩崎誉志紀「ペロフスカイト型酸化物中の不純物水素」, めそん 39, 12 (2014).
- [12] 佐藤暢哉, 合田義弘, 常行真司「固体中水素の電子状態と NMR 化学シフト」, めそん 39, 9 (2014).
- [13] 吉澤香奈子, 岩崎誉志紀, 合田義弘, 常行真司:「ルチル型酸化物半導体中の不純物水素の電子状態」, MSL ワークショップ, めそん 39, 33 (2014)

(学位論文)

- [14] (博士論文) 越智正之: “First-principles study of electron correlation in condensed matter with explicitly correlated wave functions” (露に 관련된 波動関数による固体の電子相関効果の第一原理的研究), 東京大学 (2014).
- [15] (修士論文) 山田俊介: 「分割統治法に基づく一電子エネルギースペクトル計算手法の開発」, 東京大学 (2014).
- [16] (修士論文) 佐藤暢哉: 「NMR 化学シフトの理論計算によるペロフスカイト型酸化物中の水素の解析」, 東京大学 (2014).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [17] S. Tsuneyuki, “Welcome & Introduction to Computational Materials Science Initiative”, CMSI International Symposium 2013 (The University of Tokyo), Oct. 21-22, 2013.
- [18] Y. Gohda and S. Tsuneyuki, “First-principles study using hybrid-density functional theory for the optical conductivity of GaP alloys”, The 8th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM8), (Waikoloa, USA, Aug. 5, 2013).
- [19] Z. Torbatian, Y. Gohda, and S. Tsuneyuki, “First-principles study of magnetic anisotropy in Y₂Fe₁₄B” The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), (Chiba, Japan, Jul. 17, 2013).
- [20] Y. Tatetsu and T. Maehira: Fermi surfaces of Eu compounds, Strongly Correlated Electron Systems (SCES2013), Tokyo, Japan, Aug. 8, 2013.
- [21] T. Maehira and Y. Tatetsu: Fermi surfaces of GdPb₃ and YPb₃, Strongly Correlated Electron Systems (SCES2013), Tokyo, Japan, Aug. 8, 2013.

[22] H. Ariga, K. Shimomura, K. Ishida, F. Pratt, K. Yoshizawa, W. Higemoto, E. Torikai and K. Asakura: Detection of oxygen vacancy in rutile TiO₂ single crystal by μ SR measurement, Int. Symp. Science Explored by Ultra Slow Muon (USM2013), Kunibiki Messe (Matsue), Aug. 9-12, 2013.

[23] Y. Gohda and S. Tsuneyuki, “First-principles study on magnetism and its control at interfaces”, International Conference on Nanoscale Magnetism 2013 (ICNM-2013), (Istanbul, Turkey, Sep. 4, 2013)

[24] T. Tadano, Y. Gohda and S. Tsuneyuki: First-principles study of anharmonic phonon lifetimes in thermoelectric materials, 16th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN16), Beijing, China, Oct. 28 2013.

[25] Yuki Kawashiri, Daisuke Hirai, Kenji Sasaoka, A-ihiro Tawara, and Satoshi Watanabe: Theoretical calculation for AC transport properties of molecular junctions between metal electrodes, 16th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN16), Beijing, China, October 27-30, 2013.

[26] Daisuke Hirai, Takahiro Yamamoto, and Satoshi Watanabe: AC Response of Carbon Nanotubes with Randomly Distributed Impurities, 12th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-12) in conjunction with 21st International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM21), Tsukuba, Japan, November 4-8, 2013.

[27] Y. Yamamoto, R. Maezono, M. Ochi and S. Tsuneyuki: Diffusion Monte Carlo calculations of solids using transcorrelated trial wave functions, March Meeting of American Physical Society, Denver, USA, Mar. 6 2014.

[28] T. Tadano, Y. Gohda and S. Tsuneyuki: An ab initio study of the effect of host-guest interaction on thermal transport in Ba₈Ga₁₆Ge₃₀, APS March meeting 2014, Denver, Colorado, USA, Mar. 5 2014.

[29] M. Ochi and S. Tsuneyuki: “Solid-state calculations using the second-order Møller-Plesset perturbation theory combined with the transcorrelated method, APS March meeting 2014 (Denver, USA, Mar. 6, 2014).

招待講演

[30] S. Tsuneyuki, “Software Development in the Computational Materials Science Initiative for Innovative Materials”, The 7th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC-7) (Mielparque, Yokohama), Jun. 20, 2013.

- [31] Y. Iwazaki, T. Suzuki, Y. Mizuno, H. Kishi, S. Tsuneyuki: 10th Pacific Rim Conference on Ceramic and Glass Technology (PACRIM10), San Diego, CA, USA, June 2-7, 2013.
- [32] Satoshi Watanabe, Daisuke Hirai, and Takahiro Yamamoto: Theoretical study on AC electronic transport properties of nanostructures, 16th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN16), Beijing, China, October 27-30, 2013.
- [33] Daisuke Hirai, Takahiro Yamamoto, and Satoshi Watanabe: AC Transport Properties of Carbon Nanotubes, International Conference of Small Science, Las Vegas, NV, USA, December 15-18, 2013.
- [34] S. Tsuneyuki, "Computer Experiments for Materials Science", The international symposium on Recent Trend of Interdisciplinary Research of Physics, Earth and Space Science (Osaka), Dec. 17-18, 2013.
- (国内会議)
一般講演
- [35] 立津慶幸:「アクチナイド化合物の電子構造」, 強相関 f 電子系研究会, 琉球大学(沖縄), 2013 年 6 月 25 日.
- [36] 合田 義弘:「ハイブリッド密度汎関数と結晶中電子の局在性」文部科学省科学研究費新学術領域「コンピュータによる物質デザイン:複合相関と非平衡ダイナミクス」平成 25 年度第 1 回研究会東京大学(東京都文京区) 2013 年 7 月 8 日
- [37] 川尻雄基, 平井大介, 笹岡健二, 俵有央, 渡邊聡: 金電極間単分子架橋の交流応答の理論計算, コンピュータによる物質デザイン:複合相関と非平衡ダイナミクス」平成 25 年度第一回研究会, 本郷, 2013 年 7 月 8 日-9 日.
- [38] 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散乱機構の理論解析」, 新学術研究「コンピュータによる物質デザイン:複合相関と非平衡ダイナミクス」平成 25 年度第 1 回研究会, 東京大学(文京区), 2013 年 7 月 8 日.
- [39] 合田 義弘:「永久磁石材料の微細構造と電子状態」第 6 回 JAIST シミュレーション科学セミナー「磁石と構造材料の第一原理シミュレーション」, 北陸先端科学技術大学院大学(石川県能美市) 2013 年 8 月 27 日
- [40] 見澤英樹, 合田義弘, 土浦宏樹, 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」, 元素戦略プロジェクト「研究拠点形成型」研究報告会, 学士会館, 2013 年 8 月 30 日.
- [41] 佐藤暢哉, 吉澤香奈子, 合田義弘, 常行真司:「酸化物中の不純物水素の荷電状態と NMR 化学シフトの第一原理計算」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学(徳島市), 2013 年 9 月 25 日.
- [42] 川尻雄基, 平井大介, 笹岡健二, 俵有央, 渡邊聡: 金属電極間単分子架橋系の交流応答特性の理論計算, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島, 2013 年 9 月 25 日-28 日.
- [43] 渡辺紘幸, 立津慶幸, 眞榮平孝裕:「EuPb₃ と CaPb₃ の電子構造」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学(徳島), 2013 年 9 月 25 日.
- [44] 河村光晶, 合田義弘, 常行真司:「線形応答計算に現れる Brillouin 領域積分のための改良テトラヘドロン法の開発」, 日本物理学会 2013 年度秋季大会, 徳島大学常三島キャンパス(徳島), 2013 年 9 月 26 日.
- [45] 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固体の光吸収スペクトルの計算」日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島(徳島), 2013 年 9 月 26 日.
- [46] 吉澤香奈子, 岩崎誉志紀, 合田義弘, 常行真司:「ルチル型酸化物半導体中の不純物水素の電子状態とその起源」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学(徳島市), 2013 年 9 月 27 日.
- [47] 遠藤辰哉, 合田義弘, 常行真司:「修正ポテンシャルエネルギー曲面による物質構造探索手法の開発」日本物理学会秋季大会, 徳島大学(徳島市), 2013 年 9 月 27 日
- [48] 山田俊介, 合田義弘, 常行真司:「分割統治法に基づく全系電子エネルギースペクトルの第一原理計算手法」, 日本物理学会秋季大会, 徳島大学(徳島市), 2013 年 9 月 27 日.
- [49] 只野央将, 合田義弘, 常行真司:「半導体における高次フォノン散乱効果の理論解析」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学(徳島市), 2013 年 9 月 28 日.
- [50] 山本良幸, 前園涼, 常行真司:「トランスコリレイティッド法の試行波動関数を用いた拡散量子モンテカルロ法」日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学(徳島市), 2013 年 9 月 28 日
- [51] 吉澤香奈子, 岩崎誉志紀, 合田義弘, 常行真司:「ルチル型酸化物半導体 MO₂ (M=Si, Ge, Sn, Pb, Ti, Zr, Hf) 中の不純物水素の第一原理計算」, 第 7 回物性科学領域横断研究会 凝縮系科学の最前線, 東京大学(文京区), 2013 年 12 月 1 日.
- [52] 佐藤暢哉, 吉澤香奈子, 合田義弘, 常行真司:「ルチル型 TiO₂ 中の不純物水素の荷電状態と NMR 化学シフトの第一原理計算」, 第 7 回物性科学領域横断研究会, 東京大学(文京区), 2013 年 12 月 1 日.
- [53] 常行真司「第一原理からの熱科学:非調和格子振動のモデリングと熱伝導計算」, 第 7 回物性科学領域横断研究会「凝縮系科学の最前線」, 2013 年 12 月 2 日.
- [54] 吉澤香奈子, 吉本芳英, 合田義弘, 常行真司:「xTAPP と TAPIOCA の開発:統合入力ファイルへの拡張とソフトウェアの公開」, 第 4 回計算物質科学イニシアティブ(CMSI)研究会, 東京大学(柏市), 2013 年 12 月 11 日.
- [55] 吉本芳英, 吉澤香奈子, 山本良幸, 常行真司:「第一原理電子状態計算ソフトウェア xTAPP の開発と一般公開」, 第 4 回計算物質科学イニシアティブ(CMSI)研究会, 東京大学(柏市), 2013 年 12 月 11 日.
- [56] 常行真司「計算機シミュレーションで探る物質のダイナミクスと光応答」光量子科学研究センター・レーザーアライアンス合同シンポジウム/第 21 回 先端光量子科学アライアンスセミナー(東京大学), 2013 年 12 月 25 日.

- [57] Shinji Tsuneyuki, "CMSI and materials simulation from first-principles", Cooperation of Computational Materials Science and Mathematics toward Smart Materials Design (Study Group) (JST 東京本部), 2014 年 1 月 6-7 日.
- [58] Daisuke Hirai, Yasutomi Tatetsu, Hideki Misawa, Yoshihiro Gohda, Shinji Tsuneyuki, and Taisuke Ozaki: First-Principles Simulation of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\text{Nd-Rich Phases}$, 元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>・大型研究施設<CMSI・Spring-8・J-PARC・KEK>連携シンポジウム 2014~ 大型研究施設を利用した物質・材料研究の課題共有と共創~, 柏, 2014 年 2 月 28 日, 3 月 1 日.
- [59] 吉本芳英, 吉澤香奈子, 常行真司:「平面波基底第一原理計算ソフト xTAPP と入力支援・可視化ソフト TAPIOCA」, 元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>・大型研究施設 (CMSI・Spring-8・J-PARC・KEK) 連携シンポジウム 2014~ 大型研究施設を利用した物質・材料研究の課題共有と共創~, 東京大学 (柏市), 2014 年 3 月 1 日.
- [60] 只野央将, 合田義弘, 常行真司:「熱電材料 I 型クラスレートにおけるフォノン-フォノン相互作用の体積依存性」, 新学術研究「コンピューティクスによる物質デザイン:複合相関と非平衡ダイナミクス平成 25 年度第 2 回研究会, 東京大学 (文京区), 2014 年 3 月 10 日.
- [61] 平井大介, 合田義弘, 常行真司: $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の第一原理電子状態解析, 「コンピューティクスによる物質デザイン:複合相関と非平衡ダイナミクス」平成 25 年度第 2 回研究会, 本郷, 2014 年 3 月 10 日-11 日.
- [62] 河村光晶, 合田義弘, 常行真司:「改良テトラヘドロン-Brillouin 領域積分法による 金属中のフォノンの第一原理計算」, 文部科学省科学研究費新学術領域研究「コンピューティクスによる物質デザイン:複合相関と非平衡ダイナミクス」平成 25 年度第 2 回研究会, 東京大学本郷キャンパス (東京), 2014 年 3 月 10 日.
- [63] 川尻雄基, 平井大介, 笹岡健二, 俵有央, 渡邊聡: 金電極間単分子架橋の交流応答特性の理論計算, コンピューティクスによる物質デザイン:複合相関と非平衡ダイナミクス」平成 25 年度第 2 回研究会, 本郷, 2014 年 3 月 10 日-11 日.
- [64] 立津慶幸, 合田義弘, 常行真司:「Fe/Cu(001) 磁性薄膜の第一原理計算」, 文部科学省科学研究費新学術領域研究「コンピューティクスによる物質デザイン:複合相関と非平衡ダイナミクス」, 東京大学 (東京), 2014 年 3 月 10 日.
- [65] 岩崎誉志紀, 常行真司:「ペロフスカイト型酸化物中の不純物水素」, MSL ワークショップ, つくば国際会議場 (つくば市), 2014 年 3 月 19 日.
- [66] 吉澤香奈子, 岩崎誉志紀, 合田義弘, 常行真司:「ルチル型酸化物半導体中の不純物水素の電子状態」, MSL ワークショップ, つくば国際会議場 (つくば市), 2014 年 3 月 19 日.
- [67] 佐藤暢哉, 合田義弘, 常行真司:「固体中水素の電子状態と NMR 化学シフト」, MSL ワークショップ, つくば国際会議場 (つくば市), 2014 年 3 月 19 日.
- [68] 見澤英樹, 合田義弘, 土浦宏紀, 常行真司:「第一原理計算による Nd-Fe-B 焼結磁石主相/Nd 酸化物相界面の構造と電子状態」, 日本金属学会春期講演大会, 東京工業大学 大岡山キャンパス, 2014 年 3 月 21 日-23 日.
- [69] 見澤英樹, 合田義弘, 土浦宏紀, 常行真司, 「Nd-Fe-B 焼結磁石における結晶粒主相/Nd 酸化物相界面の第一原理計算」, 日本物理学会年次大会 (春季大会), 東海大学 湘南キャンパス, 2014 年 3 月 27 日-30 日.
- [70] 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を出発点とした MP 摂動論による固体バンド構造の制度改善」日本物理学会第 69 回年次大会, 平塚 (神奈川), 2014 年 3 月 27 日.
- [71] 渡辺紘幸, 池田亘, 佐藤竜馬, 立津慶幸, 眞榮平孝裕:「 YbAl_2 の電子構造」, 日本物理学会 2014 年春季大会, 東海大学 (神奈川), 2014 年 3 月 27 日.
- [72] 佐藤暢哉, 合田義弘, 常行真司:「NMR 化学シフトの第一原理計算による BaTiO_3 中の水素の理論解析」, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学 (平塚市), 2014 年 3 月 30 日.

招待講演

- [73] 常行真司「新物質から新エネルギーへ」, 京コンピュータシンポジウム 2013 (東京, イイノカンファレンスセンター), 2013 年 5 月 13 日.
- [74] 常行真司「新物質・新エネルギーに向けた CMSI (分野 2) の戦略」, HPC 産業応用オータムスクール ー企業における HPC 戦略立案のためにー (多摩永山情報教育センター), 2013 年 10 月 18 日.
- [75] 常行真司「スーパーコンピュータ「京」の利用に向けた物質科学分野の教育活動」, 大型研究施設と大学院教育の連携シンポジウム (東京大学柏キャンパス), 2013 年 11 月 15 日.
- [76] 合田 義弘:「永久磁石材料の保磁力・微細構造と磁気異方性」物性研究所 計算物質科学研究センター 第 3 回シンポジウム「スピン・軌道相互作用の物理における実験・理論・計算」東京大学 (千葉県柏市) 2013 年 11 月 20 日
- [77] 常行真司「計算機で見た固体中の水素」, KEK 物構研サイエンスフェスタ 2013 (つくば国際会議場エポカール), 2014 年 3 月 18 日.
- [78] 常行真司「元素戦略への計算科学的アプローチ」, 日本化学会中長期テーマシンポジウム「元素戦略:物質開発に基づく材料科学のジャンプアップ」(名古屋大学), 2014 年 3 月 28 日.

3.5 藤堂研究室

量子モンテカルロ法など最先端の計算物理学の手法を用いて、量子スピン系やボーズハバード系など強相関多体系における新奇な状態の探索と相転移・臨界現象の解明を目指している。また同時に、テンソルネットワークなどの量子多体系に対する新たな計算手法開発や京コンピュータなど最先端スパコンの能力を活かすための並列化手法の研究、次世代並列シミュレーションのためのオープンソースソフトウェアの開発も進めている。

3.5.1 強相関多体系における新奇な状態の探索と相転移・臨界現象

局所 Z_2 ベリー位相による量子相・量子相転移の解析

量子効果の強い低次元量子スピン系の基底状態は、古典系では対応するものがない「トポロジカル秩序変数」で特徴付けられる。我々は、量子モンテカルロ法により波動関数の重なり積分(位相因子も含む)を計算する手法を開発し、トポロジカル秩序変数のひとつである局所 Z_2 ベリー位相の計算に応用した。さらに、 $SU(N)$ 対称性をもつ量子スピン系への一般化を行い、トポロジカルに異なる N 種類の量子相の存在を見出した [1, 10, 11, 15, 19, 27, 35, 43]。

長距離相互作用を持つスピン系の臨界現象

長距離相互作用を持つスピン系は、近接相互作用のみの系とは異なった臨界現象を示すことが知られている。我々は、べき的に減衰する長距離相互作用を持つ 2 次元正方格子イジング模型を、 $O(N)$ クラスタールゴリズムを用いてシミュレーションを行い、臨界指数と臨界係数を精度よく評価した。その結果、平均場の領域、中間領域、近接的領域の境界で臨界指数は相互作用の減衰のべき σ の関数としてなめらかに変化することを明らかにした [12, 30, 34]。

$SU(N)$ J - Q 模型の量子相転移

従来の連続相転移の Landau 理論では説明のできない、「脱閉じ込め臨界現象」が理論的に予言されている。その有力な候補と考えられている、二次元格子上的 2 体と 4 体の相互作用をもつ、 J - Q 模型の量子臨界現象を、並列化されたループアルゴリズム量子モンテカルロ法により精密に調べた。その結果、システムサイズの小きな系では、脱閉じ込め臨界現象を示唆する臨界指数が得られたが、サイズが大きくなるにつれて、指数が系統的にシフトすることを見出した。この結果は、この量子相転移が非常に弱い 1 次転移である可能性を示唆している [3]。

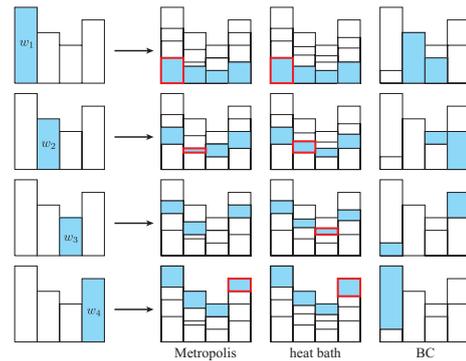


図 3.5.1: マルコフ連鎖モンテカルロ法における幾何学的カーネル構成法。

3.5.2 強相関多体系に対する新たな計算手法の開発

詳細つりあいを満たさないマルコフ連鎖モンテカルロ

マルコフ連鎖モンテカルロ法においては、遷移確率を決定するのに通常「詳細つりあい条件」が用いられてきた。しかし、この条件は必要条件ではない。我々は、幾何学的に遷移確率を求める一般的な手法を開発し、詳細つりあいを満たさない遷移確率の構築法を確立した。さらに、この方法により棄却率を最小化する解が常に得られることを示し、実際に従来のメトロポリス法などと比べて、マルコフ連鎖の自己相関時間が劇的に短くなることを見出した [7, 8, 17, 23, 41, 45]。

強い空間的異方性をもつ系に対するモンテカルロシミュレーション手法

強い空間的異方性をもつ系のシミュレーションでは、系のアスペクト比を適切な値に選ぶことが非常に重要である。我々は、量子モンテカルロ法と機械学習の手法を組み合わせることで、アスペクト比を自動的最適化する計算手法を開発した。さらに、二次元量子ハイゼンベルグ模型の量子相転移の解析に応用し、特殊な相互作用の空間的パターンをもつ系においては、系の実効的なアスペクト比に強いシステムサイズ依存性があらわれ、その結果、スケール補正が非常に大きくなることを明らかにした [4, 9, 16, 24, 29, 38, 44]。

3.5.3 次世代並列シミュレーションのためのオープンソース・ソフトウェアの開発

ワームアルゴリズム量子モンテカルロ法の並列化

ワームアルゴリズム量子モンテカルロ法は、対称性の低い量子スピン系、ボーズハバード模型などに有効なシミュレーション手法である。この方法では、世界線配位に「ワーム」と呼ばれる不連続点の組を挿入し、不連続点を確率的に移動させていくことにより更新を行う。我々は、ワームアルゴリズムを一般化し、分散メモリ並列コンピュータ上で領域分割並列化を行った。これにより超巨大な格子系を扱うことが可能となった [5]。

並列厳密対角化パッケージ Rokko の開発

計算物質科学においては、密行列や疎行列の固有値問題が様々な場面で利用される。超並列スーパーコンピュータ向けの並列固有値ソルバーも数多く開発されているが、そのインターフェースはまちまちで、コードのポーラビリティにも問題が多い。我々は、並列厳密対角化パッケージ Rokko を開発し公開を行った (<https://github.com/t-sakashita/rokko>)。Rokkoにより大規模行列の対角化を統一的に利用することが可能となる。[14, 18, 25, 28, 32, 36, 42]

将来の HCPI システムに対するアプリケーションの性能評価と最適化

スーパーコンピュータの次の世代として、エクサスケール (1 秒間に 10^{18} 回の浮動小数点数計算が可能) のスーパーコンピュータが 2020 年前後に登場すると期待されている。しかしながら、そのアーキテクチャーは現在のものとはかなり異なったものとなる可能性も高い。我々は、エクサスケールコンピュータの設計指針を与えるべく、計算科学分野で代表的なアプリケーションについて、エクサ時代に想定される様々なアーキテクチャー上での性能評価を行い、最適化の可能性を探った [6]。

物質科学シミュレーションのポータルサイト MateriApps の開発

日本国内においても、高性能な物質科学シミュレーションソフトウェアが数多く開発・公開されているが、その知名度は必ずしも高くない。また、ドキュメントの作成やユーザサポートにも問題が多く、普及の妨げとなっている。物質科学アプリケーションのさらなる公開・普及を目指し、物質科学シミュレーションのポータルサイト「MateriApps」(<http://ma.cms-initiative.jp>) の整備を行った。また、物質科学アプ

リケーションを気軽に試す環境として、Live USB Linux システム「MateriApps LIVE!」を開発・公開した [20, 21, 26, 31, 33, 37]

<報文>

(原著論文)

- [1] Yuichi Motoyama, Syngge Todo, Path-integral Monte Carlo method for the local Z_2 Berry phase, *Phys. Rev. E* **87**, 021301(R) (2013).
- [2] H. Nakano S. Todo, T. Sakai, Long-Range Order of the Three-Sublattice Structure in the $S = 1$ Heisenberg Antiferromagnet on the Spatially Anisotropic Triangular Lattice, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82**, 043715 (2013).
- [3] Kenji Harada, Takafumi Suzuki, Tsuyoshi Okubo, Haruhiko Matsuo, Jie Lou, Hiroshi Watanabe, Syngge Todo, Naoki Kawashima, Possibility of Deconfined Criticality in $SU(N)$ Heisenberg Models at Small N , *Phys. Rev. B* **88**, 220408(R) (2013).
- [4] Shinya Yasuda, Syngge Todo, Monte Carlo simulation with aspect ratio optimization: Anomalous anisotropic scaling in dimerized antiferromagnet, *Phys. Rev. E* **88**, 061301(R) (2013).
- [5] Akiko Masaki, Takafumi Suzuki, Kenji Harada, Syngge Todo, Naoki Kawashima, Parallelized Quantum Monte Carlo Algorithm with Nonlocal Worm Updates, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 140603 (2014).

(会議抄録)

- [6] 片桐孝洋, 大島聡史, 中島研吾, 米村崇, 熊洞宏樹, 樋口清隆, 橋本昌人, 高山 恒一, 藤堂眞治, 岩田潤一, 内田和之, 佐藤正樹, 羽角博康, 黒木聖夫, レイテンシコアの高度化・高効率化による将来の HPCI システムに関する調査研究のためのアプリケーション最適化と異機種計算機環境での性能評価, 情報処理学会研究報告 **HPC-139(4)**, 1-9 (2013).
- [7] 諏訪秀磨, 藤堂眞治, 詳細つりあいを満たさないマルコフ連鎖モンテカルロ法とその一般化, 数理解析研究所 講究録 **1848**, 93-107 (2013).
- [8] Syngge Todo, Hidemaro Suwa, Geometric Allocation Approaches in Markov Chain Monte Carlo, *J. Phys.: Conf. Ser.* **473**, 012013 (2013).
- [9] Shinya Yasuda, Syngge Todo, Numerical Analysis of Quantum Phase Transitions with Dynamic Control of Anisotropy, *JPS Conf. Proc.* **1**, 012127 (2014).
- [10] Yuichi Motoyama, Syngge Todo, Path-Integral Monte Carlo for the Gauge-Fixed Berry Connection and the Local Z_2 Berry Phase, *JPS Conf. Proc.* **1**, 012130 (2014).

(学位論文)

- [11] Yuichi Motoyama, Quantum Monte Carlo approach to the quantum phase transition in terms of the Berry phase in low-dimensional antiferromagnets (博士論文)

- [12] Toshiki Horita, Critical exponents and universality class of Ising model with long range interactions (修士論文)
(著書)
- [13] Syngé Todo, Loop Algorithm in Strongly Correlated Systems: Numerical Methods (Springer Series in Solid-State Sciences), ed. A. Avella, F. Mancini, pp. 153–184 (Springer-Verlag, Berlin, 2013).
- <学術講演>
(国際会議)
一般講演
- [14] Ryo Igarashi, Tatsuya Sakashita, Syngé Todo, “ALPS/diagonalization: Generic and Parallelized Exact Diagonalization for Quantum Lattice Models,” The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), July 2013, Chiba.
- [15] Yuichi Motoyama, Syngé Todo, “Path-Integral Monte Carlo for the Local Z_2 Berry phase,” The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), July 2013, Chiba.
- [16] Shinya Yasuda, Syngé Todo, “Numerical Analysis of Quantum Phase Transitions with Dynamic Control of Anisotropy,” The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), July 2013, Chiba.
- [17] Syngé Todo, Hidemaro Suwa, “Markov Chain Monte Carlo Sampling with Irreversible Kernel,” STATPHYS25 XXV IUPAP International Conference on Statistical Physics, July 2013, Seoul.
- [18] Ryo Igarashi, Tatsuya Sakashita, Syngé Todo, “ALPS/diagonalization: Parallel Implementation of Exact Diagonalization,” Fall school on advanced algorithms for correlated quantum matter, October 2013, Wurzburg.
- [19] Yuichi Motoyama, Syngé Todo, “Quantum Monte Carlo for Berry connection and local quantized Berry phase,” Fall school on advanced algorithms for correlated quantum matter, October 2013, Wurzburg.
- [20] Ryo Igarashi, Syngé Todo, Kanako Yoshizawa, Takeo Kato, Naoki Kawashima, Yusuke Konishi, Shusuke Kasamatsu, Kazuyoshi Yoshimi, Shoichi Sasaki, Shigehiro Tsuchida, Masashi Noda, Tsutomu Kawatsu, Yayoi Terada, “MateriApps - Portal site for Materials Science Simulation,” CMSI International Symposium 2013, October 2013, Tokyo.
- [21] Ryo Igarashi, Syngé Todo, Kanako Yoshizawa, Takeo Kato, Naoki Kawashima, Yusuke Konishi, Shusuke Kasamatsu, Kazuyoshi Yoshimi, Shoichi Sasaki, Shigehiro Tsuchida, Masashi Noda, Tsutomu Kawatsu, Yayoi Terada, “MateriApps - Portal site for Materials Science Simulation,” RIKEN-APW joint workshop: Highlights in condensed matter physics, January 2014, Wako.
- 招待講演
- [22] Syngé Todo, “Large-scale Monte Carlo Study for Exotic Phase Transitions of Strongly Correlated Quantum Magnets,” Collaborative Conference on Materials Research 2013, June 2013, Jeju.
- [23] Syngé Todo, “Geometric Allocation Approaches in Markov Chain Monte Carlo,” ICSG2013 International Meeting on Inference, Computation, and Spin Glasses, July 2013, Sapporo.
- [24] Syngé Todo, “Quantum Phase Transition and Universality of Quantum Spin Models with Strong Spatial Anisotropy,” Tappei Tensor Network Workshop 2013, December 2013, Taipei.
- (国内会議)
一般講演
- [25] 坂下 達哉, 五十嵐 亮, 大久保 毅, 藤堂 眞治, 「並列固有値計算ライブラリの統一的インターフェースの開発とベンチマーク」, ハイパフォーマンスコンピューティング研究会, 2013 年 5 月, 東京大学柏キャンパス.
- [26] 五十嵐 亮, 藤堂 眞治, 吉澤 香奈子, 加藤 岳生, 川島 直輝, 小西 優祐, 笠松 秀輔, 吉見 一慶, 佐々木 翔一, 土田 成宏, 野田 真史, 河津 励, 寺田 弥生, 「MateriApps - 物質科学シミュレーションのポータルサイト」, 元素戦略 4 拠点合同ポスターセッション, 2013 年 8 月, 東京.
- [27] 本山裕一, 藤堂眞治, 「二次元系における Z_2 ベリー位相のモンテカルロ計算 II」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月, 徳島大.
- [28] 坂下達哉, 五十嵐亮, 大久保毅, 藤堂眞治, 「並列固有値計算ライブラリの統一的インターフェイスを用いた厳密対角化パッケージについて」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月, 徳島大.
- [29] 安田真也, 藤堂眞治, 「量子臨界点における有効アスペクト比への非自明な有限サイズ補正」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月, 徳島大.
- [30] 堀田俊樹, 藤堂眞治, 「長距離相互作用のあるイジング模型の相関長とユニバーサルリティクラス」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月, 徳島大.
- [31] 五十嵐亮, 藤堂眞治, 吉澤香奈子, 加藤岳生, 川島直輝, 小西優祐, 笠松秀輔, 吉見一慶, 佐々木翔一, 土田成宏, 「MateriApps 物質科学シミュレーションのポータルサイト」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月, 徳島大.
- [32] 坂下達哉, 「量子統計物理に現れる密・スパース行列の高性能並列固有値計算について」, 研究集会「高次元量子トモグラフィにおける統計理論的なアプローチ」, 2013 年 10 月, 京都大学 RIMS.
- [33] 五十嵐 亮, 藤堂 眞治, 吉澤 香奈子, 加藤 岳生, 川島 直輝, 小西 優祐, 笠松 秀輔, 吉見 一慶, 佐々木 翔一, 土田 成宏, 野田 真史, 河津 励, 寺田 弥生, 「MateriApps - 物質科学シミュレーションのポータルサイト」, 第 7 回 物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会), 2013 年 12 月, 東大.

- [34] 堀田俊樹, 藤堂眞治, 「長距離相互作用のあるイジング模型の相関長とユニバーサリティクラス」, 物性研スパコン共同利用・第4回CMSI研究会, 2013年12月, 物性研.
- [35] 本山裕一, 藤堂眞治, 「ゲージ固定ベリ-接続の有限サイズスケーリング解析」, 物性研スパコン共同利用・第4回CMSI研究会, 2013年12月, 物性研.
- [36] 坂下達哉, 五十嵐亮, 大久保毅, 藤堂眞治, 「スピン系の厳密対角化パッケージの並列化と高精度化」, 物性研スパコン共同利用・第4回CMSI研究会, 2013年12月, 物性研.
- [37] 五十嵐亮, 藤堂眞治, 吉澤香奈子, 加藤岳生, 川島直輝, 小西優祐, 笠松秀輔, 吉見一慶, 佐々木翔一, 土田成宏, 野田真史, 河津励, 寺田弥生, 「MateriApps - 物質科学シミュレーションのポータルサイト」, 物性研スパコン共同利用・第4回CMSI研究会, 2013年12月, 物性研.
- [38] 安田真也, 藤堂眞治, 「量子臨界点における有効アスペクト比への有限サイズ補正とその起源」, 物性研スパコン共同利用・第4回CMSI研究会, 2013年12月, 物性研.
- [39] 藤堂眞治, 「空間異方性の強いスピン系の量子相転移とユニバーサリティ」, 統計物理の新展開2014, 2014年3月, 北大.
- [40] 藤堂眞治, 「統計物質科学広報の現状と課題」, 第2回TUT-CMSI見える化シンポジウム, 2014年3月, 秋葉原.
- [41] 藤堂眞治, 「モンテカルロとその周辺」, 物性理論・統計力学セミナー2014, 2014年3月, 修善寺.
- [42] 五十嵐亮, 坂下達哉, 大久保毅, 藤堂眞治, 「対角化インターフェース Rokko を用いたハバード模型対角化における各種ソルバの性能比較」, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月, 東海大.
- [43] 本山裕一, 藤堂眞治, 「ゲージ固定ベリ-接続の有限サイズスケーリング解析」, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月, 東海大.
- [44] 安田真也, 藤堂眞治, 「虚時間長制御を用いた動的臨界指数の測定」, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月, 東海大.

招待講演

- [45] 藤堂眞治, 「マルコフ連鎖と量子モンテカルロ」, 統計力学の最近の展開, 2014年3月, 東大.

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 spectroscopy: 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実験により強相関電子系の電子状態の研究を行っている。遷移金属酸化物, 化合物, 磁性半導体などが示す高温超伝導, 金属-絶縁体転移, スピン依存伝導, 界面新奇物性, 磁気異方性等の発現機構解明をめざしている。通常の実験室光源を用いた実験の他に, 紫外光から X 線に至る放射光源 (KEK フォトン・ファクトリー (PF), SPring-8, スタンフォード放射光, 広島大放射光, 台湾放射光), レーザー光源 (物性研) 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問である。近年発見された鉄系高温超伝導体は, 銅酸化物と多くの共通点を持つ一方で, 多くの相違点も有している。我々は, これらの超伝導物質における超伝導発現機構解明や, 擬ギャップ現象等の異常な物性の発現機構の解明を目指して, 角度分解光電子分光 (ARPES) を用いて電子状態を調べている。

鉄系超伝導体の Fe サイト置換効果

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ドーピングすることによって超伝導が発現する。しかし, Fe サイトを他の元素で置換することによっても超伝導が発現する点は, Cu サイトの原子置換が超伝導を壊してしまう銅酸化物超伝導体と対照的である。このように銅酸化物と全く異なるキャリアドーピング機構を明らかにするために, 母体反強磁性体 BaFe_2As_2 の Fe を様々な原子で置換して ARPES を測定を行った。昨年度は, 置換元素の原子番号を $\text{Co} \rightarrow \text{Ni} \rightarrow \text{Cu}$ と増加させるに従い, ARPES で観測される遍歴電子数が増加し, これが反強磁性転移温度 T_N を低下させ, 超伝導を誘起していることを見出した。一方, Zn 置換, Mn 置換では T_N が低下せず (図 4.1.1 左), 超伝導も起こらない。Zn, Mn 置換試料の ARPES 測定を行った

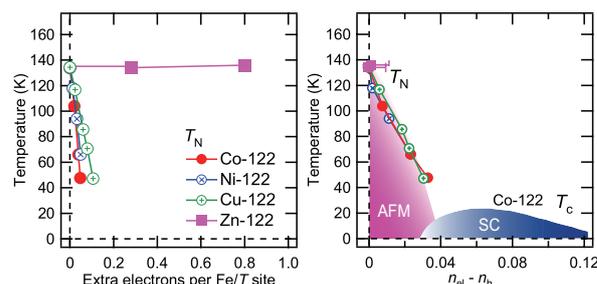


図 4.1.1: 鉄系高温超伝導体 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{M}_x)_2\text{As}_2$ ($M = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu}, \text{Zn}$) の低ドーピング領域における反強磁性転移温度 T_N [3]。左: ドープされた形式電子数を横軸にプロットした T_N 。右: ARPES で観測したフェルミ面の体積から求めた遍歴電子数 (電子型フェルミ面の体積からホール型フェルミ面の体積を引いたもの) の関数としてプロットした T_N 。AFM: 反強磁性相, SC: 超伝導相。Co, Ni, Cu 置換により遍歴電子数が供給されるのに対して, Zn 置換では遍歴電子数が供給されないために (右), T_N が変化しない (左) と考えられる。

ところ, Co, Ni, Cu 置換と異なり遍歴電子数が変化しないことがわかった (図 4.1.1 右)。その原因として, Zn^{2+} , Mn^{2+} の電子配置が安定で, 母体のバンドに電子が供給されないことが考えられる [3, 9]。

鉄系低温超伝導体のフェルミ面

KFe_2As_2 は鉄系超伝導体のなかでも転移温度が $T_c = 4 \text{ K}$ と低く, 超伝導ギャップにノードを持ち, 電子相関が強いと考えられている。 KFe_2As_2 の特徴的なフェルミ面の形状と, 電子相関によるバンド質量の増大を ARPES により明らかにした。非常に大きなホールドーピング量のため, 通常は電子型フェルミ面が形成されるブリルアン域四隅にホール型フェルミ面が形成されることを観測し, 質量増大がバンドに依存して 2 倍から 20 倍になることを見出した。スペクトル強度の偏光依存性により各バンドの軌道成分を調べ, 最近のレーザー光電子分光でノードを持つ超伝導ギャップが観測されたフェルミ面が, $d_{x^2-y^2}$ 成分を多く含むためにペアリングが弱いことがわかった [18]。

4.1.2 スピントロニクス, 界面

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るハーフメタル, 半導体に磁性原子をドーピングした希薄磁性半導体の極薄膜, 多層膜は, 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・試料における界面効果, 量子閉じ込め効果, 基板圧力効果を光電子分光およ

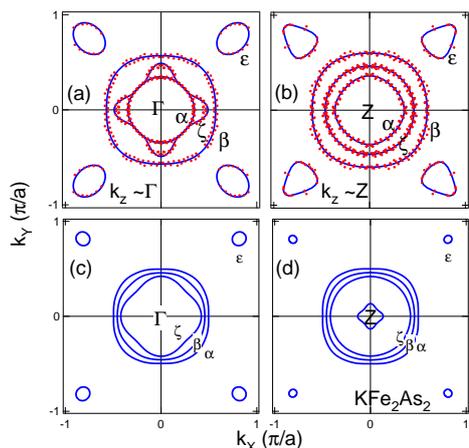


図 4.1.2: 鉄系超伝導体 KFe_2As_2 のフェルミ面。(a), (b): ARPES 測定により求めたフェルミ面。(c), (d): LDA バンド計算により求めたフェルミ面。閉じた曲線は全てホール型フェルミ面となっている。 Γ 点 ((a), (c)), Z 点 ((b), (d)) は、3 次元ブリルアン域の中心と上端面の中心 [18]。

び X 線磁気円二色性 (XMCD) を用いて調べている。とくに、元素選択的・局所的な磁性プローブである XMCD を、磁場方向、偏光方向を自由に換えられるベクトル型超伝導マグネット装置を用いて行っている。

保持力が増強された強磁性酸化物薄膜

典型的な強磁性酸化物 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (LSMO) は、室温以上のキュリー温度 T_C を持ち磁化も大きいですが、保持力が数 10 Oe と非常に小さいことが実用上問題となってきた。これに対して、LSMO の Mn の一部を Ru に置換することで、保持力が一桁増大することが報告されている。また、 $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ (PCMO, $x \sim 0.2$) も T_C は 100 K 程度と低いが、Co 置換により保持力が増大する。保持力増強の起源を探るために、 SrTiO_3 基板上に成長させた Ru 置換 LSMO 薄膜と Co 置換 PCMO 薄膜の Ru, Co 内殻 XMCD 測定を行ったところ、いずれの置換元素でも d 電子が有限の軌道磁気モーメントを持つことがわかり、基板圧力のもとで磁気異方性が誘起されるために保持力が増大すると説明できた [5, 10]。

強誘電体-強磁性体界面における電気-磁気結合

磁性と強誘電性が強く結合したマルチフェロイック材料を得る方法のひとつとして、強磁性体と強誘電体の複合材料が作製されてきた。 SrTiO_3 基板上にフェリ磁性体 NiFe_2O_4 (NFO) と強誘電体 BaTiO_3 (BTO) をナノスケールで交互に積層させた多層膜は、それぞれの膜厚を薄くし層数を増やすと磁気-電

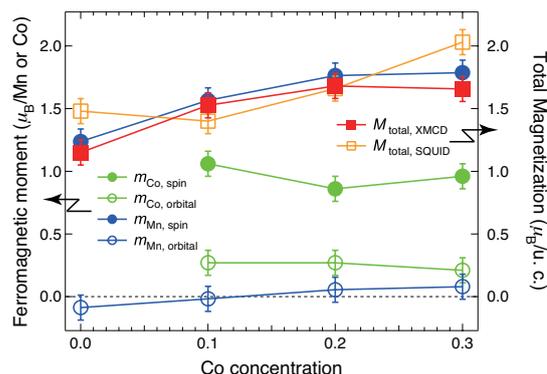


図 4.1.3: SrTiO_3 基板上に成長させた $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ (PCMO, $x \sim 0.2$) の元素選択的スピンおよび軌道磁気モーメント。Mn, Co $L_{2,3}$ 吸収端における XMCD から求めた。Co 3d 電子が大きな軌道磁気モーメントを持つ [10]。

気結合が増強される。この起源を探るために、様々な層数を持つ NFO/BTO 多層膜の Fe と Ni の局所的磁性を XMCD で調べた。界面の Ni 原子がもつ磁気モーメントの減少と磁気-電気結合の増強に相関があり、NFO 側の Ni 原子と BTO との軌道混成が磁気-電気結合の増強を助けていることが示唆された [16]。

<受賞>

- [1] 堀尾真史：物構研サイエンスフェスタ 2014 (つくば, 2014 年 3 月) ポスター発表奨励賞
- [2] 堀尾真史：理学系研究奨励賞 (2014 年 3 月)

<報文>

(原著論文)

- [3] S. Ideta, T. Yoshida, M. Nakajima, W. Malaeb, T. Shimojima, K. Ishizaka, A. Fujimori, H. Kimigashira, K. Ono, K. Kihou, Y. Tomioka, C.H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Ito, and S. Uchida: Effects of Zn substitution on the electronic structure of BaFe_2As_2 revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy, *Phys. Rev. B* **87**, 201110(R)-1-5 (2013); Selected for an Editor's Choice; arXiv:1304.5860.
- [4] 藤平潤一, 内田公, 藤平誠一, 古瀬充穂, 岡野真, 淵野修一郎, 門野利治, 吉松公平, 藤森淳, 小出常晴: 超高真空 3 軸ボア付伝導冷却型 YBCO ベクトルマグネット装置の開発, *低温工学* **48** 5 号 233-237 (2013).
- [5] T. Harano, G. Shibata, K. Ishigami, Y. Takahashi, V. K. Verma, V. R. Singh, T. Kadono, A. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, T. Koide, H. Yamada, A. Sawa, M. Kawasaki, Y. Tokura, and A. Tanaka: Role of doped Ru in coercivity-enhanced $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ thin film studied by x-ray magnetic circular dichroism, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 222404-1-4 (2013); arXiv:1309.2916.

- [6] D. Ootsuki, S. Pyon, K. Kudo, M. Nohara, M. Horio, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Arita, H. Anzai, H. Namatame, M. Taniguchi, N. L. Saini, and T. Mizokawa: Electronic structure reconstruction by orbital symmetry breaking in IrTe₂, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82**, 093704–1-4 (2013).
- [7] V. R. Singh, V. K. Verma, K. Ishigami, G. Shibata, Y. Yamazaki, A. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, Y. Nakamura, M. Azuma, and Y. Shimakawa: Enhanced ferromagnetic moment in Co-doped BiFeO₃ thin films studied by soft x-ray circular dichroism, *J. Appl. Phys.* **114**, 103905–1-6 (2013); arXiv:1308.5672.
- [8] T. Harano, G. Shibata, K. Yoshimatsu, K. Ishigami, V. K. Verma, Y. Takahashi, T. Kadono, T. Yoshida, A. Fujimori, T. Koide, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.-J. Huang, C.-T. Chen, P.-H. Xiang, H. Yamada, and A. Sawa: Phase diagram of Ca_{1-x}Ce_xMnO₃ thin films studied by x-ray magnetic circular dichroism, *Solid State Commun.* **174**, 30-33 (2013); arXiv:1310.6193.
- [9] H. Suzuki, T. Yoshida, S. Ideta, G. Shibata, K. Ishigami, T. Kadono, A. Fujimori, M. Hashimoto, D.H. Lu, Z.-X. Shen, K. Ono, E. Sakai, H. Kumigashira, M. Matsuo, and T. Sasagawa: Absence of Superconductivity in the “hole-doped” Fe pnictide Ba(Fe_{1-x}Mn_x)₂As₂: Photoemission and x-ray absorption spectroscopy studies, *Phys. Rev. B* **88**, 100501(R)–1-4 (2013); arXiv:1307.8200.
- [10] K. Yoshimatsu, E. Sakai, M. Kobayashi, K. Horiba, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Oshima, and H. Kumigashira: Determination of the surface and interface phase shifts in metallic quantum well structures of perovskite oxides, *Phys. Rev. B* **88**, 115308–1-5 (2013).
- [11] K. Yoshimatsu, H. Wadati, E. Sakai, T. Harada, Y. Takahashi, T. Harano, G. Shibata, K. Ishigami, T. Kadono, T. Koide, T. Sugiyama, E. Ikenaga, H. Kumigashira, M. Lippmaa, M. Oshima, and A. Fujimori: Spectroscopic studies on the electronic and magnetic states of Co-doped perovskite manganite Pr_{0.8}Ca_{0.2}Mn_{1-y}Co_yO₃ thin films, *Phys. Rev. B* **88**, 174423–1-6 (2013); arXiv: 1311.2652.
- [12] M. Oiwake, D. Ootsuki, T. Noji, T. Hatakeda, Y. Koike, M. Horio, A. Fujimori, N.L. Saini, and T. Mizokawa: Electronic structure and phase separation of superconducting and non-superconducting K_xFe_{2-y}Se₂ revealed by x-ray photoemission spectroscopy, *Phys. Rev. B* **88**, 224517–1-6 (2013).
- [13] T. Shimojima, T. Sonobe, W. Malaeb, K. Shinada, A. Chainani, S. Shin, T. Yoshida, S. Ideta, A. Fujimori, H. Kumigashira, K. Ono, Y. Nakashima, H. Anzai, M. Arita, A. Ino, H. Namatame, M. Taniguchi, M. Nakajima, S. Uchida, Y. Tomioka, T. Ito, K. Kihou, C.H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, K. Ohgushi, S. Kasahara, T. Terashima, H. Ikeda, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and K. Ishizaka: Pseudogap formation above the superconducting dome in iron pnictides, *Phys. Rev. B* **89**, 045101–1-10 (2014); arXiv:1305.3875.
- [14] D. Ootsuki, T. Toriyama, S. Pyon, K. Kudo, M. Nohara, K. Horiba, M. Kobayashi, K. Ono, H. Kumigashira, T. Noda, T. Sugimoto, A. Fujimori, N. L. Saini, T. Konishi, Y. Ohta, and T. Mizokawa: Te 5*p* orbitals bring three-dimensional electronic structure to two-dimensional Ir_{0.95}Pt_{0.05}Te₂, *Phys. Rev. B* **89**, 104506 (2014); arXiv:1312.0780.
- [15] M. Kobayashi, H. Niwa, Y. Takeda, A. Fujimori, Y. Senba, H. Ohashi, A. Tanaka, S. Ohya, P. N. Hai, M. Tanaka, Y. Harada, and M. Oshima: Electronic excitations of a magnetic impurity state in the diluted magnetic semiconductor (Ga,Mn)As, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 107203–1-5 (2014); arXiv:1306.1474.
- [16] V. K. Verma, V. R. Singh, K. Ishigami, G. Shibata, T. Harano, T. Kadono, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.-J. Huang, C. T. Chen, Y. Zhang, J. Liu, Y.H. Lin, C-W. Nan, and A. Tanaka: Origin of enhanced magnetoelectric coupling in NiFe₂O₄/BaTiO₃ multilayers studied by x-ray magnetic circular dichroism, *Phys. Rev. B* **89**, 115128–1-7 (2014).
- [17] S.-i. Fujimori, I. Kawasaki, A. Yasui, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagami, Y. Haga, E. Yamamoto, and Y. Onuki: Itinerant magnetism in URhGe revealed by angle-resolved photoelectron spectroscopy, *Phys. Rev. B* **89**, 104518–1-7 (2014); arXiv:1404.1324.
- [18] T. Yoshida, S. Ideta, I. Nishi, A. Fujimori, M. Yi, R. G. Moore, S. K. Mo, D.-H. Lu, Z.-X. Shen, Z. Hussain, K. Kihou, P.M. Shirage, H. Kito, C.H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, and H. Harima: Orbital character and electron correlation effects on two- and three-dimensional Fermi surfaces in KFe₂As₂ revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy, *Front. Phys.* **2**, 17–1-6 (2014); arXiv:1205.6911.
- (会議抄録)
- [19] M. Furuse, M. Okano, S. Fuchino, A. Uchida, J. Fujihira, S. Fujihira, T. Kadono, A. Fujimori, and T. Koide: HTS vector magnet for magnetic circular dichroism measurement, *Proceedings of Applied Superconductivity Conference 2012*; *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23**, 4100704 (2013).
- (綜説, 解説, その他)
- [20] 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, *Asia Pacific Physics News Letter* **2**, No.2, pp. 30-31 (April 2013).

- [21] 吉田鉄平, 出田真一郎, 藤森淳: 鉄系超伝導体の放射光 ARPES を用いた研究の進展: 元素置換効果と超伝導ギャップノード, 放射光 **26**, 159-167 (2013).
- [22] H. Wadati and A. Fujimori: Hard x-ray photoemission spectroscopy of transition-metal oxide thin films and interfaces, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **190**, 222-227 (2013).
- [23] A. Fujimori: Hund's metals: Beyond the Mott-Hubbard $U-t$ physics, *Journal Club for Condensed Matter Physics*, <http://www.condmatjournalclub.org/?p=1973>
- [24] A. Fujimori: Mott versus Slater: Nature of antiferromagnetism in the $J_{\text{eff}} = 1/2$ insulator Sr_2IrO_4 , *Journal Club for Condensed Matter Physics*, <http://www.condmatjournalclub.org/?p=2348>
- [25] 鈴木博人: 修士論文紹介コーナー: 鉄系超伝導体における不純物効果の光電子分光による研究, *PF ニュース* Vo.31, No.2, p.45 (2014).
- (編著書)
- [26] H. Wadati and A. Fujimori: X-ray spectroscopic studies of conducting interfaces between two insulating oxides, in *Functional Metal Oxides: New Science and Novel Applications* edited by S.B. Ogale, T.V. Venkatesan, and M. Blamire (Weiley-VCH Verlag, Weinheim, 2013), pp. 309-324.
- (学位論文)
- [27] 石上啓介: Photoemission and X-ray magnetic dichroism study of the transition-metal oxides $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ and SrRuO_3 thin films (新領域創成科学研究科, 博士論文) .
- [28] 劉亮: Electronic transport and angle-resolved photoemission studies of iron-based superconductors (博士論文) .
- [29] L. C. C. Ambolode II: Photoemission study of the iron-based superconductor $\text{FeTe}_{1-x}\text{Se}_x$ (博士論文) .
- [30] 高橋文雄: X-ray magnetic circular dichroism study of ferromagnetism on nano-scale (修士論文) .
- [31] 堀尾真史: Angle-resolved photoemission study of the electron-doped cuprate superconductor $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ (修士論文) .
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [32] A. Fujimori: Observation of superconducting gap anisotropies in Fe-based superconductors, *Quantum in Complex Matter: Superconductivity, Magnetism, and Ferroelectricity (Superstripes)* (Ischia, Italy, May 27- June 1, 2013).
- [33] A. Fujimori: Antiferromagnetic pseudogap and its suppression in electron-doped cuprates. *10th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS10)* (Advanced Light Source, Berkeley, June 24-28, 2013).
- [34] A. Fujimori: Antiferromagnetic pseudogap and its suppression in electron-doped cuprates, *Superconductivity Research Advanced by New Materials and Spectroscopies* (IMR, Tohoku University, July 23-25, 2013)
- [35] A. Fujimori: Self-energy from the low to high energy scales in the correlated metal SrVO_3 : *International Workshop on Strong Correlations and Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy (CORPES13)*, (DESY, Hamburg, July 29-August 2, 2013).
- [36] A. Fujimori: Spectroscopies of transition-metal oxide ultra-thin films, *Workshop on Quantum Materials* (Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart, December 9-11, 2013).
- [37] A. Fujimori: Self-energies in correlated metals SrVO_3 and SrMoO_3 , *Strongly Correlated Systems: From Models to Materials* (Bangalore, January 10-13, 2014).
- [38] A. Fujimori: Magnetism and superconductivity in the three-dimensional electronic structures of Fe pnictides, *14-th Korea-Japan-Taiwan Workshop on Strongly Correlated Electron Systems (KJT-14)/14th Quantum Materials Symposium (QMS14)* (February 22-26, 2014, Muju, Korea).
- [39] A. Fujimori: Photoemission and magnetic circular dichroism studies of $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ and related new diluted magnetic semiconductors, *3rd SUPERPIRE REIMEI Workshop on Frontiers of Condensed Matter Physics* (Institute of Physics, Beijing, March 17-21, 2014).
- [40] H. Suzuki, K. Zhao, G. Shibata, Y. Takahashi, S. Sakamoto, K. Yoshimatsu, H. Kumigashira, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.-J. Huang, C. T. Chen, B. Gu, S. Maekawa, Y. J. Uemura, and C. Q. Jin, *ibid.*
- [41] K. Okazaki: Laser-ARPES study of iron-based superconductors, *6th Indo-Japan Seminar "Physics and Design of Multi-Functional Correlated Materials"* (University of Tokyo, March 24-25, 2014).
- 一般講演
- [42] K. Yoshimatsu, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Yoshida, A. Fujimori, and M. Oshima: Metallic quantum well states of strongly correlated oxides, *8-th International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation (INC8)* (Tsukuba, May 5-8, 2013).
- [43] T. Kadono, V. K. Verma, K. Ishigami, G. Shibata, T. Harano, Y. Takahashi, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.-J. Huang, C. T. Chen, T.

- Seki, and K. Takanashi: Orbital magnetic moment anisotropy of FePt thin films with controlled L1₀ order studied by x-ray magnetic circular dichroism, *8th International Symposium on Metallic Multilayers (MML2013)* (Kyoto, May 19-24, 2013).
- [44] L. C. C. Ambolode II, M. Horio, H. Suzuki, S. Ideta, T. Yoshida, A. Fujimori, K. Ono, H. Kumigashira, L. Liu, T. Mikami, T. Kakeshita, S. Uchida, D.H. Lu, M. Hashimoto, S.-K. Mo, Z. Husain, and Z.-X. Shen: Electron correlation strength in FeTe_{1-x}Se_x, *12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12)* (Makuhari Messe, July 14-19, 2013).
- [45] 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, and Y. Koike: Suppression of antiferromagnetic pseudogap in the electron-doped cuprate superconductor Pr_{1.3-x}La_{0.7}Ce_xCuO₄ ($x=0.10$), *ibid.*
- [46] S. Ideta, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Hashimoto, D.H. Lu, Z.-X. Shen, M. Nakajima, K. Kihou, Y. Tomioka, C.H. Lee, I. Akihira, H. Eisaki, and S. Uchida: Anisotropy of the superconducting gap in Ba(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂ revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy, *International Workshop on Strong Correlations and Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy (CORPES13)* (DESY, Hamburg, July 29-August 2, 2013).
- [47] 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: Anisotropic spin polarization and orbital distortion in La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃ thin films studied by angle-dependent x-ray circular and linear dichroism, *International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES'13)*, (University of Tokyo, August 5-9, 2013)
- [48] L. C. C. Ambolode II, M. Horio, H. Suzuki, S. Ideta, T. Yoshida, A. Fujimori, K. Ono, H. Kumigashira, L. Liu, T. Mikami, T. Kakeshita, and S. Uchida: Electron correlation strength in FeTe_{1-x}Se_x revealed by photoemission spectroscopy, *ibid.*
- [49] M. Horio, T. Yoshida, H. Suzuki, L. C. C. Ambolode II, A. Fujimori, D. Ootsuki, T. Mizokawa, K. Ono, H. Kumigashira, H. Anzai, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, Y. Mori, A. Takahashi, T. Adachi, and Y. Koike: Suppression of antiferromagnetic pseudogap in the electron-doped cuprate superconductor Pr_{1.3-x}La_{0.7}Ce_xCuO₄ ($x=0.10$), *ibid.*
- [50] L. Liu, T. Mikami, M. Takahashi, T. Kakeshita, and S. Uchida: In-plane resistivity anisotropy of Cu-doped Fe_{1+x}Te, *ibid.*
- [51] T. Okane, K. Yano, Y. Takeda, H. Yamagami, A. Fujimori, K. Nishimura, Y. Isikawa, and K. Sato: X-ray magnetic circular dichroism study of Ce_{0.5}Gd_{0.5}Ni, *ibid.*
- [52] S.-i. Fujimori, I. Kawasaki, A. Yasui, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagami, Y. Haga, E. Yamamoto, and Y. Onuki: ARPES study on uranium superconductors, *ibid.*
- [53] 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.-i. Fujihira, A. Uchida, K. Watanabe, H. Fujihira, and S. Fujihira: Orbital and spin states of ferromagnetic La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃ thin films studied by angle-dependent x-ray magnetic circular/linear dichroism, *Light and Particle Beams in Materials Science 2013 (LPBMS2013)* (Tsukuba, August 29-31, 2013).
- [54] M. Horio, T. Yoshida, H. Suzuki, L. C. C. Ambolode II, A. Fujimori, D. Otsuki, T. Mizokawa, K. Ono, H. Kumigashira, H. Anzai, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, Y. Mori, A. Takahashi, T. Adachi, and Y. Koike: Suppression of antiferromagnetic pseudogap in the electron-doped cuprate superconductor Pr_{1.3-x}La_{0.7}Ce_xCuO₄ ($x=0.10$), *ibid.*
- [55] K. Yoshimatsu, E. Sakai, M. Kobayashi, K. Horiba, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Oshima, and H. Kumigashira: Behavior of metallic quantum well states of SrVO₃ ultrathin films near the thickness-dependent metal-insulator transition, *ibid.*
- [56] M. Kobayashi, I. Muneta, T. Schmitt, J. Krempasky, Y. Takeda, Y. Harada, A. Fujimori, S. Ohya, M. Tanaka, M. Oshima, and V. N. Strocov: Unveiling the impurity band inducing ferromagnetism in magnetic semiconductor (Ga,Mn)As, *ibid.*
- [57] E. Sakai, K. Yoshimatsu, M. Tamamitsu, K. Horiba, A. Fujimori, M. Oshima, and H. Kumigashira: Thickness-dependent metal-insulator-transition in PrNiO₃ films, *ibid.*
- [58] K. Yoshimatsu, E. Sakai, M. Kobayashi, K. Horiba, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Oshima, and H. Kumigashira: Determination of the surface and interface phase shifts of standing waves in metallic quantum well structures composed of SrVO₃ and SrTiO₃: *Workshop on Oxide Electronics 20 (WOE20)* (Singapore, September 22-25, 2013).
- [59] M. Kobayashi, K. Yoshimatsu, E. Sakai, M. Kitamura, K. Horiba, A. Fujimori, and H. Kumigashira: Origin of unusual mass enhancement of metallic quantum well subband in SrVO₃ ultrathin films, *ibid.*
- [60] S. Sakamoto, M. Kobayashi, G. Shibata, Y. Takahashi, A. Fujimori, T. Koide, Y. Takeda, Y. Saitoh, H. Yamagami, L. D. Anh, P. N. Hai, and M. Tanaka: XMCD study of the *n*-type high-*T_C*

- ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As:Be, *14-th Korea-Japan-Taiwan Workshop on Strongly Correlated Electron Systems (KJT-14)/14th Quantum Materials Symposium (QMS14)* (February 22- 26, 2014, Muju, Korea).
- [61] H. Suzuki, K. Zhao, G. Shibata, Y. Takahashi, S. Sakamoto, K. Yoshimatsu, H. Kumigashira, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.-J. Huang, C. T. Chen, B. Gu, S. Maekawa, Y. J. Uemura, and C. Q. Jin: Photoemission and x-ray magnetic circular dichroism study of a new diluted magnetic semiconductor $Ba_{1-y}K_y(Zn_{1-x}Mn_x)_2As_2$, *6th Indo-Japan Seminar "Physics and Design of Multi-Functional Correlated Materials"* (University of Tokyo, March 24-25, 2014).
- [62] G. Shibata, T. Kadono, K. Ishigami, T. Harano, K. Yoshimatsu, Y. Takahashi, J.-i. Fujihira, A. Uchida, K. Watanabe, H. Fujihira, S. Fujihira, M. Furuse, S. Fuchino, M. Okano, H. Kumigashira, T. Koide, and A. Fujimori: Observation of magnetic anisotropy and anisotropic spin distribution in strained $La_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$ by angle-dependent x-ray magnetic circular dichroism, *ibid.*
- [63] L. Liu, K. Okazaki, T. Yoshida, M. Horio, L. C. C. Ambolode II, H. Suzuki, J. Xu, H. Kumigashira, K. Ono, M. Nakajima, S. Ishida, K. Kihou4, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Mikami, T. Kakeshita, S. Uchida, and A. Fujimori: Anisotropic electronic structure of $Ba(Fe_{0.96}Ru_{0.04})_2As_2$ in the magneto-structurally ordered phase observed by angle-resolved photoemission spectroscopy, *ibid.*
- [64] L. C. C. Ambolode II, M. Horio, H. Suzuki, S. Ideta, T. Yoshida, K. Okazaki, A. Fujimori, L. Liu, T. Mikami, T. Kakeshita, S. Uchida, D. H. Lu, M. Hashimoto, Z.-X. Shen: Strength of electron correlation in $Fe_{1+y}Te_{1-x}Se_x$ revealed by ARPES, *ibid.*
- [65] S. Sakamoto, L. D. Anh, P. N. Hai, G. Shibata, Y. Takahashi, M. Kobayashi, T. Koide, Y. Takeda, H. Yamagami, Y. Saitoh, M. Tanaka, and A. Fujimori: XMCD study of the *n*-type high- T_C ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As:Be *ibid.*
- (国内会議)
一般講演
- [66] A. Fujimori: Observation of superconducting gap anisotropies in Fe-based superconductors, *Workshop on Lattice Anomalies, Nanoscale Disorder, and Orbital Fluctuations in Fe-based Superconductors* (University of Tokyo, July 19, 2013).
- [67] K. Yoshimatsu, H. Wadati, T. Harada, Y. Takahashi, T. Harano, G. Shibata, K. Ishigami, T. Kadono, T. Koide, M. Lippmaa, M. Oshima, and A. Fujimori: Electronic and magnetic states of Co-doped $Pr_{0.8}Ca_{0.2}MnO_3$ thin films studied by x-ray magnetic circular dichroism, 2013 JSAP-MRS ジョイントシンポジウム (同志社大, 2013年9月16-20日).
- [68] 芝田悟朗, 和達大樹, 田久保耕, 高橋文雄, 藤森淳, R. Sutarto, F. He, 吉松公平, 組頭広志: 強磁性金属 $La_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$ 薄膜の共鳴軟 X 線散乱, 日本物理学会秋季大会 (徳島大学, 2013年9月25-28日).
- [69] 石上啓介, 吉松公平, 芝田悟朗, 原野貴幸, 高橋文雄, 門野利治, V. K. Verma, V. R. Singh, 藤森淳, 小出常晴, 竹田幸治, 岡根哲夫, 斎藤祐児, 山上浩志, 組頭広志, 尾嶋正治: $SrRuO_3$ 薄膜の X 線磁気円二色性の軌道磁気モーメント, 同上.
- [70] 堀尾眞史, 吉田鉄平, 岡崎浩三, 藤森淳, 大槻太毅, 溝川貴司, N.L. Saini, A. Barinov, M. Yablonskikh, V. Kandyba, 野地尚, 畑田武宏, 小池洋二: 顕微角度分解光電子分光による $K_xFe_{2-y}Se_2$ の非均一な電子状態の観察, 同上.
- [71] 鈴木博人, 吉田鉄平, 岡崎浩三, 藤森淳, 橋本信, Donghui Lu, Z.-X. Shen, 小林達也, 宮坂茂樹, 田島節子: $SrFe_2(As_{0.65}P_{0.35})_2$ の超伝導状態におけるアニールの効果, 同上.
- [72] L. Liu, H. Suzuki, M. Horio, L. C. C. Ambolode II, J. Xu, S. Ideta, K. Okazaki, A. Fujimori, T. Yoshida, M. Hashimoto, D.H. Lu, Z.-X. Shen, M. Nakajima, K. Kihou, C.H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, and S. Uchida: Superconducting gap in isovalent-substituted $Ba(Fe_{0.65}Ru_{0.35})_2As_2$ observed by angle-resolved photoemission spectroscopy, 同上.
- [73] 坂本祥哉, 芝田悟朗, 高橋文雄, 藤森淳, 小出常晴, 小林正起, 竹田幸治, 山上浩志, 斎藤祐児, L. D. Anh, P. N. Hai, 田中雅明: 強磁性半導体 (In,Fe)As の XMCD 測定, 同上.
- [74] 吉田鉄平, 出田真一郎, 西一郎, L. C. C. Ambolode II, 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, 安齋太陽, 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: $BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$ のバンド分散, フェルミ面の組成依存性, 同上.
- [75] 出田真一郎, 吉田鉄平, 藤森淳, 下志万貴博, 石坂香子, 橋本信, D.H. Lu, Z.-X. Shen, 安齋太陽, 井野明洋, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 中島正道, 富岡泰秀, 伊藤利充, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 内田慎一: $Ba(Fe_{1-x}Co_x)_2As_2$ の超伝導ギャップの異方性, 同上.
- [76] 野田智博, 大槻太毅, 杉本拓也, 堀尾眞史, 藤森淳, 堀場弘司, 組頭広志, 小野寛太, 工藤一貴, 高須賀政哉, 野原実, 溝川貴司: $BaNi_2(As_{1-x}P_x)_2$ の光電子分光, 同上.
- [77] 追分美代子, 大槻太毅, 溝川貴司, N.L. Saini, 堀尾眞史, 藤森淳, 野地尚, 畑田武宏, 小池洋二: $K_xFe_{2-y}Se_2$ の X 線光電子分光 2, 同上.
- [78] 大槻太毅, 杉本拓也, N.L. Saini, 溝川貴司, 鈴木博人, 藤森淳, 堀場弘司, 組頭広志, 小野寛太, 卞舜生, 工藤一貴, 野原実: $Ir_{1-x}Pt_xTe_2$ の角度分解光電子分光, 同上.

- [79] 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, J. Mravlje, A. Georges, 高橋圭, 川崎雅司, 十倉好紀: 光電子分光で見た SrMoO₃ の電子相関とフロント結合の効果, 同上.
- [80] 鈴木博人, 岡崎浩三, 藤森淳, 吉田鉄平, 橋本信, D.H. Lu, Z.-X. Shen, 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, 基研研究会「鉄系高温超伝導の物理 ~スピンと軌道の協奏~」(京大基研, 2013年10月8-9日).
- [81] S. Sakamoto, M. Kobayashi, G. Shibata, Y. Takahashi, A. Fujimori, T. Koide, Y. Takeda, Y. Saitoh, H. Yamagami, L. D. Anh, P. N. Hai, and M. Tanaka: XMCD study of the ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As, 第18回半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS-18)(大阪大学, 2013年12月9-10日).
- [82] 劉亮, 岡崎浩三, 吉田鉄平, 堀尾眞史, L. C. C. Ambolode II, 鈴木博人, 徐健, 組頭広志, 小野寛太, 中島正道, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 三上拓也, 掛下照久, 内田慎一, 藤森淳: In-plane electronic anisotropy in the antiferromagnetic orthorhombic phase of Ba(Fe_{1-x}Ru_x)₂As₂ studied by transport and ARPES measurements, 第5回低温センター研究交流会(小柴ホール, 2014年2月27日).
- [83] 芝田悟朗, 和達大樹, 田久保耕, 高橋文雄, 藤森淳, R. Sutarto, R. Sutarto, F. He, 吉松公平, 組頭広志, 小出常晴: 共鳴軟 X 線散乱による強磁性金属 La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃ 薄膜中の正孔分布の推定, 第27回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム(広島国際会議場, 2014年1月11-13日).
- [84] 和達大樹, 山村周玄, 鈴木基寛, 田久保耕, 溝川貴司, 藤森淳, R. Sutarto, F. He, 松野丈夫, 高木英典: X 線吸収分光法による SrIrO₃/SrTiO₃ 超格子の軌道状態観測, 同上.
- [85] 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, 同上.
- [86] 劉亮, 岡崎浩三, 吉田鉄平, 堀尾眞史, L. C. C. Ambolode II, 鈴木博人, 徐健, 組頭広志, 小野寛太, 中島正道, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 三上拓也, 掛下照久, 内田慎一, 藤森淳: Anisotropic electronic structure of Ba(Fe_{0.96}Ru_{0.04})₂As₂ in the magnetostructurally ordered phase, 物構研サイエンスフェスタ2014(つくば, 2014年3月18,19日).
- [87] 芝田悟朗, 門野利治, 石上啓介, 原野貴幸, 吉松公平, 高橋文雄, 藤平潤一, 内田公, 渡邊和訓, 藤平秀幸, 藤平誠一, 古瀬充穂, 淵野修一郎, 岡野眞, 組頭広志, 小出常晴, 藤森淳: 角度依存 X 線磁気円二色性による基板応力下 La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃ の磁気異方性と異方的スピン分布の観測, 同上.
- [88] 堀尾眞史, 岡崎浩三, 片桐隆雄, 鈴木博人, 徐健, 石上啓介, 高橋文雄, 芝田悟朗, 坂本祥哉, 小野寛太, 組頭広志, 小出常晴, 笹川崇男, 藤森淳: 強磁性と超伝導が共存する Sr₂VFeAsO_{3-δ} の ARPES と XMCD, 同上.
- [89] 坂本祥哉, L. D. Anh, P. N. Hai, 芝田悟朗, 高橋文雄, 小林正起, 竹田幸治, 山上浩志, 斎藤祐児, 小出常晴, 田中雅明, 藤森淳: 強磁性半導体 (In,Fe)As:Be の磁化過程の XMCD による研究, 同上.
- [90] 小林正起, 宗田伊里也, 竹田幸治, 原田慈久, 藤森淳, J. Krempasky, Th. Schmit, 大矢忍, 田中雅明, 尾嶋正治, V. N. Strocov, 磁性半導体 (Ga,Mn)As における強磁性不純物バンドの解明, 第61回応用物理学会春季学術講演会(青山学院大学, 2014年3月17-20日).
- [91] 堀尾眞史, 岡崎浩三, 鈴木博人, 徐健, 石上啓介, 高橋文雄, 芝田悟朗, 坂本祥哉, 藤森淳, 組頭広志, 小野寛太, 小出常晴, 片桐隆雄, 笹川崇男: 強磁性と超伝導が共存する Sr₂VFeAsO_{3-δ} の ARPES と XMCD, 日本物理学会第69回年次大会(東海大学, 2014年3月27-30日).
- [92] 岡崎浩三, 堀尾眞史, 藤森淳, 大田由一, 山本遇哲, 幸埴, 渡部俊太郎, C. T. Chen, 笠原成, 芝内孝禎, 松田祐司, A. Bohmer, T. Wolf, P. Adelman, C. Meingast, H.v. Loehneysen: FeSe のレーザー角度分解光電子分光, 同上.
- [93] 鈴木博人, 芝田悟朗, 高橋文雄, 坂本祥哉, 吉松公平, 組頭広志, 藤森淳, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.-J. Huang, C. T. Chen, K. Zhao, C. Q. Jin, B. Gu, 前川禎通, Y.J. Uemura: 新規希薄磁性半導体 Ba_{1-y}K_y(Zn_{1-x}Mn_x)₂As₂ の光電子分光と磁気円二色性, 同上.
- [94] 高橋文雄, 山本真平, 門野利治, V. R. Singh, V. K. Verma, 石上啓介, 芝田悟朗, 原野貴幸, 竹田幸治, 岡根哲夫, 斎藤祐児, 山上浩志, 高野幹夫, 藤森淳: 巨大な保磁力を持つ SiO₂ 被覆 L1₀ 構造 FePt ナノ粒子の X 線磁気円二色性, 同上.
- [95] 和達大樹, 山村周玄, 鈴木基寛, 田久保耕, 溝川貴司, 藤森淳, R. Sutarto, F. He, 松野丈夫, 高木英典: X 線吸収分光法による SrIrO₃/SrTiO₃ 超格子の軌道状態観測, 同上.
- [96] 野田智博, 大槻太毅, 杉本拓也, 堀尾眞史, 藤森淳, 小林正起, 堀場弘司, 組頭広志, 小野寛太, 工藤一貴, 高須賀政哉, 野原実, 溝川貴司: BaNi₂(As_{1-x}P_x)₂ における電子相関の効果, 同上.
- [97] 大槻太毅, N.L. Saini, 溝川貴司, 大田由一, 幸埴, 岡崎浩三, 藤森淳, 鳥山達也, 小西健久, 太田幸則, 卞舜生, 工藤一貴, 野原実: Ir_{1-x}Pt_xTe₂ の角度分解光電子分光 II, 同上.
- [98] 小林正起, 吉松公平, 坂井延寿, 北村未歩, 堀場弘司, 藤森淳, 組頭広志: 強相関酸化物 SrVO₃ 金属量子井戸状態における異常な有効質量増大の起源, 同上.
- [99] 藤森伸一, 小島雅明, 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 UGa₃ の電子状態, 同上.

4.2 長谷川研究室

4月から博士課程1年生として一ノ倉聖が、修士課程1年生として久保高幸と中村友謙が新しくメンバーに加わった。3月には中東潤と白井皓寅が修士課程を修了して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。おもにシリコンや金属、トポロジカル絶縁体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な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とをめざしている。最近では、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、電子励起などを、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。

4.2.1 表面電子輸送

スピン偏極イオン散乱分光法による Bi 表面での電流誘起スピン偏極の検出

ビスマス (Bi) は強いスピン軌道相互作用を持ち、その表面では空間反転対称性の破れによってスピン分裂した金属的な表面状態が存在することが知られている (Rashba 効果)。この表面では、電場 (電流) 印加によって面内方向にマクロなスピン偏極が生じることが期待されている (電流誘起スピン偏極)。しかし、電流を流しながら表面敏感なスピン偏極測定が必要であるため、実験的な研究例は少なかった。我々は、スピン偏極イオン散乱分光を用い、Bi 超薄膜における電流誘起スピン偏極の発現を検証した。

Bi(111) 超薄膜は、分子線ビームエピタキシー (MBE) によって Si(111) 基板の上に作成し、同一の超高真空チャンバー内でスピン偏極イオン散乱分光測定を行い、スピン偏極度の電流依存性を測定した。その結果、電流に起因するスピン偏極度の変化を観測した。また、スピン偏極の向きが電流の向きと直交していることも確認し、Rashba 系における電流誘起スピン偏極のモデルと一致している。表面での電流誘起スピン偏極の測定方法が確立したので、今後はトポロジカル絶縁体表面などへ展開していく。(物質材料研究機構との共同研究)

Bi₂Se₃ 超薄膜でのスピンホール効果の測定

トポロジカル絶縁体 Bi₂Se₃ は、強いスピン軌道相互作用のために、電流を流すとスピンの向きに依存

して逆方向に偏向される (スピンホール効果) ことが期待される。この効果を検出すべく、Bi₂Se₃ 超薄膜を in situ で H 型構造に微細加工し、4 端子電気伝導測定を室温で行った。微細加工および電気伝導測定は、真空トンネルで接続された超高真空マルチチャンバーシステムで行われた。H 型構造は、図 1 挿入図に示すように、2 組のリード (電流および電圧リード) とその間をつなぐ架橋部からなる。電流リードに電流を流すとスピンホール効果によってスピン流が架橋部を流れ、逆スピンホール効果によって電圧リード間に電流が誘起されて電圧として検出される。図 1 は実際に測定された電圧を電流リードに流した電流で割った抵抗値であり、それは架橋部の幅 w と長さ L に依存する。黒実線はスピンホール効果を考えず電流の広がりによるオーム性抵抗のみを考えた場合の理論曲線であり、赤実線はスピンホール効果を取り入れた理論曲線である。実測値はスピンホール効果を考慮したほうがよく再現される。このフィッティングによってスピンホール角 (電場によって生まれるスピン流と電流との比) $\gamma = 0.032$ とスピン拡散長 $l_s = 230$ nm が得られた。 γ の値は白金などと同程度に大きい。また l_s は 1 K での先行研究と矛盾しない値になっている。この手法による表面系でのスピンホール効果検出が有効であることが示されたので、今後、膜厚や低温での測定などにより表面状態によるスピンホール効果の確証を得る予定である。

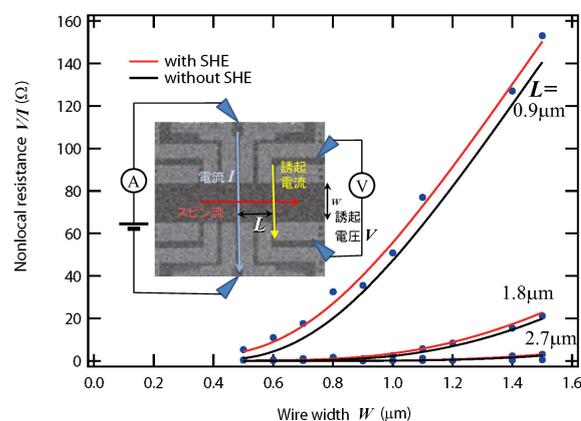


図 4.2.1: H 型構造の架橋部幅 w に対する抵抗 (V/I) の大きさ。黒実線はスピンホール効果がない場合の理論値。赤実線はスピンホール効果の存在を仮定した場合の抵抗の理論値。挿入図は試料の SEM 像および電気計測の模式図。

Si(110)2 × 5-Au 表面の 1 次元伝導

Si(110)2 × 5-Au 表面は、Si 基板表面上に金原子が一定方向に並んだ原子鎖が多数整列した構造であり、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次元金属表面系と比べるとAu原子鎖間の相互作用が弱いと、1次元性が強く表れることが期待される。そこでこの表面を4探針法によって電気伝導測定を行った。RHEEDパターンが不明瞭な低品質の試料では、直線4端子法での探針間隔依存性が小さく、異方性も観測されないなど、これまでに測定された異方的二次元系とみなせる擬1次元系と同様の結果が得られた。一方、RHEEDパターンが明瞭な高品質の試料では直線4端子法でも異方性が観測されたり端子間隔が約50 μm 以下で探針間隔依存性が観測され、これまでの擬1次元系とは異なる現象が見られた。これは1次元性が強く表れた結果だと考えられるので、低温での測定や加熱条件依存性などを系統的に調べて1次元性伝導の確証を得る予定である。

Si(111) $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面への磁性不純物添加

昨年度までにSi(111) $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In表面が2.5 Kで超伝導転移をする表面超構造であることを明らかにした。今回、超伝導と近藤効果などの他の基底状態との競合を明らかにするために、この表面に磁性不純物であるCoを極微量添加して電気伝導の温度依存性を測定した。装置の不具合のため20 Kまでしか冷却できなかったが、蒸着量を0.05原子層まで増やしても、不純物添加の影響が電気伝導特性に顕著に現れることはなかった。今後、より低温まで冷却して近藤効果の発現の有無および局在や超伝導への影響を観測する予定である。

4.2.2 表面ナノ構造

多層シリセンの構造解析

シリセンは単原子層のシリコンであり、その電子状態は、グラフェンと同様にディラック粒子系としての性質を持つと理論的には予言されている。しかし実験的にそれを確認できたかどうかは定かではない。単層シリセンは基板上に作成されるが、これまでの研究で基板とシリコンとの相互作用が強く、そのためにディラックコーンが消失することが示唆されていた。そこでこの単層シリセンをバッファ層として利用しようと、多層シリセンの研究が始まっており、やはりディラックコーンの存在の有無が議論されている。今回はこの議論に新たな知見を得るために多層シリセンの原子構造の解析を行った。試料はAg(111)基板表面上にSiを蒸着することで多層シリセンを作成し、低速電子回折(IV-LEED)測定を行った。その結果、多層シリセンのSi原子層はほぼダイヤモンド構造に近いものであり、表面にはSi(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag構造ができていることが分かった。これを踏まえてこれまで報告されているデータを解析し直すと、観測されていた特徴がほぼ全てSi(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag構造の金属的表面状態バンドの性質として説明される。よってAg上に成長させた多層シリセンと呼ばれているものは、今回の実験条件では作成できていない。

今後、別な基板を用いてディラックコーンが発現するシリセンの作成レシピを探索する必要がある。(東京大学物性研究所との共同研究)

Si(111) $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面のSTM観察

In原子をSi(111) 7×7 清浄表面に2原子層程度蒸着するとSi(111) $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In表面が得られる。この表面は蒸着量の微妙な違いによりhex相とrect相の二種類存在することが知られていたが、最近、実は一種類しか存在しないのではないかとということが議論されている。そこで本研究ではInの蒸着量を制御してSTM観察を行った。その結果、確かにInの蒸着量が少ないときは6回対称性のあるhex構造が観察され、多いときは2回対称性のrect構造が見られた。ただ両者の違いは非常に微妙なので注意深く見ないと間違える可能性がある。中間の蒸着量ではミクロスコピックに両者が共存している様子も分かり、確かに二種類の相があることが改めて確認された。

Si(111)上のBi(111)超薄膜の高分解能低エネルギー光電子分光

Si(111)上にBiを室温で蒸着するとBi(111)単結晶超薄膜が成長する。10年近くに渡ってこの系の表面状態の特異なバンド/スピン構造を研究してきたが、今回放射光施設(UVSOR)でこれまでより低温、高分解能、低エネルギーの直線偏光された放射光を用いて改めてその電子状態を測定した。その結果、次の2つことが明らかになった。(i) Γ 点近傍では低エネルギー励起でもP偏光の光を用いたときは表面状態が観測されるが、S偏光を用いるとバルク状態が観測された。両者とも金属的であり、50年前に理論的に予言されたバルクバンドの半金属半導体転移は見られなかった。(ii) 試料作成直後では表面状態にもバルク状態にも対応しないバンドがフェルミ準位近傍でブリルアンゾーンの広い範囲で見られた。今後更なる測定を行い、この状態の起源を探っていく。(分子科学研究所との共同研究)

トポロジカル絶縁体の近接磁場効果

トポロジカル絶縁体Bi₂Se₃(111)表面上に反強磁性体MnSe(111)を成長させると時間反転対称性を破ってディラックコーンにバンドギャップが開くとされている。これは理論上、Bi₂Se₃とMnSeとの界面の最隣接ユニット層(Quintuple layer, QL)のトポロジカルな性質が磁場によってその隣のQLに移動して最隣接QLが通常の絶縁体となるためである。この現象を確かめるべく、放射光施設UVSORで角度分解光電子分光測定を行った。その結果、Bi₂Se₃(111)上にMnSe(111)を成長させるにつれてフェルミ準位が下がってディラック点に近づくことがわかった。このことは、MnのみをBi₂Se₃上に蒸着しただけでは起こらず、また、Bi₂Se₃とMnSeが界面でSe原子

層どうしが接触しているためでもない。今回の実験では、分解能不十分だったためディラックコーンにバンドギャップが開いているかどうかはわからなかった。今後は、放射光施設 UVSOR の光電子分光装置が高分解能化されたので、再び実験する予定である。また、低速電子回折での I V 実験によって、Bi₂Se₃ と MnSe の界面の原子構造を調べる予定である。(分子科学研究所との共同研究)

トポロジカル絶縁体 Bi₂Te₃ の Sb ドープによるフェルミ準位制御

トポロジカル絶縁体は、バルク内部が絶縁体であるが表面にはスピン偏極した電流が流れる金属的な表面状態を持つ。理論上はディラック点近傍にフェルミ準位が位置するが、実際の試料では格子欠損のためにキャリアがドープされてディラックコーンの位置がシフトしている。トポロジカル絶縁体 Bi₂Te₃ は n 型となっているため、フェルミ準位以下にディラック点が位置している。一方、トポロジカル絶縁体 Sb₂Te₃ は p 型となっているため、フェルミ準位以上にディラック点が位置する。そのため、Bi₂Te₃ に Sb をドープし三元合金を作ることにより、フェルミ準位の位置を制御できることが期待できる。そこでこの現象を確かめるべく、実験を行った。Bi₂Te₃ 薄膜成長時に Sb をドープするにつれてフェルミ準位が下がることが角度分解光電子分光により確認できた。分解能が低いためディラックコーンは見えないが、Bi に対して Sb の比が約 95% になると、バルク伝導帯がフェルミ準位より上に上がりバルク価電子帯のみが残ったので、フェルミ準位をディラック点近傍に移動できたといえる。今回の実験はまったく同じ先行研究があり、追試の意味しかないが、トポロジカル絶縁体に磁性体をつけることによりギャップが開くとされているので、フェルミ準位をディラック点近傍に制御して磁性体をつけてバンドギャップが開くかどうか確認する予定である。

4.2.3 新しい装置・手法の開発

低温強磁場下で動作する走査トンネルポテンシオメトリ装置の開発

超高真空・低温・高磁場下で動作する走査トンネルポテンシオメトリ (Scanning Tunneling Potentiometry) 装置の開発を行っている。この装置では、試料に電流を流して電位勾配をつくった状態で STM 測定を行う。その際、トンネル・バイアル電圧に直流成分と交流成分を加えることでトンネル電流に直流・交流成分を持たせ、直流成分は試料の電位分布の測定、交流成分は試料・探針間の距離制御に用いる。これにより、試料表面の構造と電位分布の二次元イメージングが同時に可能となる。本年度は、STP 用フィードバック回路を自作し、既存の STM コントローラと組み合わせることで STP 制御系を製作し

た。それを用いて、Si 基板上にエピタキシャル成長させた Bi(111) 表面において常温での STP 測定に成功した。また、従来の STP では試料を固定するための両端のクランプから電流を導入する手法が主流だが、本装置では低温での測定を目的として、STM 探針とは別に、試料に直接コンタクトさせて電流を導入するためのプローブを STM 探針近傍に備えた探針ホルダーを使用できる。この電流導入プローブを用いた STP 測定にも成功した。来年度は、低温・強磁場下での測定を目指し研究を進めていく。

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 「トポロジカル表面およびそのエッジ状態による電子・スピン輸送の研究」(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ッ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オメトリ装置の開発と微細加工した表面ラッシュバ系のスピン伝導」(代表 平原徹)
- ・文部科学省 科研費 新学術領域研究 「分子アーキテクトにクス：単一分子の組織化と新機能創成」計画研究 「機能性 4 探針 STM による分子の電子・スピン輸送特性の研究」(代表 長谷川修司)

<受賞等>

- [1] 一ノ倉聖, 申東潤, 中村友謙: 表面科学技術者資格認定 (公益社団法人日本表面科学会, 2013 年 7 月)
- [2] 長谷川修司: Surface Science Highly Valued Reviewer (Elsevier)

<報文>

(原著論文)

- [3] 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. Hasegawa, M. C. Asensio, and G. Le Lay, *Evidence of Dirac Fermions in Multilayer Silicene*, Appl. Phys. Lett, **102**, 163106 (Apr, 2013).
- [4] M. Yamada, T. Hirahara, and S. Hasegawa, *Magnetotransport measurements of a superconducting surface state of In- and Pb-induced structures on Si(111)*, Phys. Rev. Lett. **110**, 237001 (Jun, 2013).
- [5] T. Tono, T. Hirahara, and S. Hasegawa, *In situ transport measurements on ultrathin Bi(111) films using a magnetic tip: Possible detection of current-induced spin polarization in the surface states*, New J. Phys. **15**, 105018 (Oct 2013).
- [6] M. Aitani, Y. Sakamoto, T. Hirahara, M. Yamada, H. Miyazaki, M. Matsunami, S. Kimura, and S. Hasegawa, *Fermi level tuning of topological insulator thin films*, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 110112 (Oct, 2013).

- [7] N. Nagamura, R. Hobara, T. Uetake, T. Hirahara, M. Ogawa, T. Okuda, K. He, P. Moras, P. M. Sheverdyayeva, C. Carbone, K. Kobayashi, I. Matsuda, and S. Hasegawa, *Anisotropic Electronic Conduction in Metal Nanofilms Grown on a One-Dimensional Surface Superstructure*, Phys. Rev. B **89**, 125415 (Mar, 2014).
- (国内雑誌)
- [8] 長谷川修司, 究極のナノマテリアル—表面超構造—, 自動車技術 **67** (11), 102 (Nov, 2013).
- (著書)
- [9] S. Hasegawa: "The Image is My Life.", in "In Memory of Akira Tonomura: Physicist and Electron Microscopist" (World Scientific, 2013), pp. 156-163.
- [10] 長谷川修司, 問題 4.30 「良い論文を書くには?」, in 問題と解説で学ぶ表面科学 (現代表面科学シリーズ 6) (共立, Nov 2013). p.177
- (その他)
- [11] 長谷川修司, 「求む異端児」—?, 理学部広報 (東京大学), (Jul, 2013).
- [12] 長谷川修司, 100年に一度の大改革?, 大学の物理養育 **19**, 134 (Nov, 2013).
- [13] 長谷川修司, 国際化いろいろ, 応用物理学会 薄膜・表面物理分科会 News Letters 巻頭言 (Sep, 2013).
- [14] 長谷川修司, 書評「だれが原子を見たか (江沢洋著)」, 日本物理学会 **69** (2), p. 117 (Feb, 2014).
- (学位論文)
- [15] 白井皓寅: 多層シリセンの構造、バンド分散 および輸送特性 (修士論文).
- [16] 申東潤: 磁性原子が吸着した表面状態での電子輸送 (修士論文).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [17] S. Hasegawa, *Surface Nanomaterials for Electronics and Spintronics*, Nanomeeting 2013 (Belarusian State University of Informatics and Radioelectric), 2013年5月28日 (Minsk, Belarus).
- [18] S. Hasegawa, *Charge and Spin Transport Topological at Surfaces with Strong Electron-Phonon and Spin-Orbit Couplings*, International Workshop and Final Conference on "Energy Dissipation at Surfaces", 2013年6月6日 (Bad Honnef, Germany).
- [19] S. Hasegawa, *Surface Nanomaterials for Sustainable Growth - Superconducting and Spin-split Surface States -*, The Second Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials (ASCO-NANOMAT 2013, Far Eastern Federal University), 2013年8月21日 (Vladivostok, Russia).
- [20] S. Hasegawa, *Spin Splitting and Spin Transport at Surface States of Non-Magnetic Materials with Strong Spin-Orbit Coupling*, 2013 NSFC-JSPS seminar on magnetic surface and films (Fudan University), 2013年10月22日 (Shanghai, China).
- [21] S. Hasegawa, *Spin at Crystal Surfaces*, Workshop on Quantum Materials (Max Planck Institute), 2013年12月9日 (Stuttgart, Germany).
- [22] T. Hirahara, *Topological Quantum Phase Transitions in Ultrathin Films*, The 14th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-14), 2013年7月2日 (Gyeongju, Korea).
- [23] T. Hirahara, *Ultrathin films of topological insulators*, IMS workshop on Advanced Spectroscopy of Correlated Materials (ASCM 13), 2013年8月6日 (分子研, 岡崎).
- 一般講演
- [24] T. Tono, N. Fukui, T. Hirahara, R. Hobara, and S. Hasegawa, *Spin-Resolved Transport at Surface States: Current-Induced Spin Polarization and Spin Hall Effect*, Symposium on Surface and Nano Sciences 2014, 2014年1月16日 (富良野, 北海道).
- [25] D. Y. Shin, T. Hirahara, and S. Hasegawa, *Electrical Conductivity of a Dilute Magnetic Surface Superstructure on Si(111)*, The 14th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-14), 2013年7月3日 (Gyeongju, Korea).
- [26] N. Fukui, T. Hirahara, and S. Hasegawa, *In situ FIB Etching and Conduction Measurement of Microstructures on a Topological Insulator Thin Film*, The 14th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-14), 2013年7月5日 (Gyeongju, Korea).
- [27] M. Yamada, T. Hirahara, R. Hobara, and S. Hasegawa, *Surface-State Superconductivity*, The 14th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-14), 2013年7月4日 (Gyeongju, Korea).
- [28] N. Fukui, T. Hirahara, and S. Hasegawa, *The modification of ultra-thin films and in situ electrical conduction measurements using a four-tip STM combined with FIB*, The 19th International Vacuum Congress (IVC-19), 2013年9月11日 (Paris, France).
- [29] T. Hirahara, *Ultrathin materials*, The 8th Japanese-French Frontiers of Sciences Symposium, 2014年1月28日 (Metz, France).
- (国内会議)
- 招待講演
- [30] 長谷川修司: 4探針型走査トンネル顕微鏡によるナノスケール計測, 精密工学会 2014年度春季大会, 2014年3月20日 (東京大学 本郷キャンパス).

- [31] 長谷川修司: トポロジカル絶縁体の表面電子状態とスピン伝導, 日本磁気学会 第 191 回研究会/第 45 回スピエレクトロニクス専門研究会 「ベリー位相とトポロジカル絶縁体」, 2013 年 7 月 9 日 (中央大学駿河台記念館).
- [32] 平原徹: ビスマスはトポロジカル物質か?, 科研費基盤研究 A 「固体中のディラック電子」 第 3 回研究会, 2013 年 12 月 (赤穂温泉, 兵庫).
- [33] 平原徹: シリセンに関する実験の現状, 日本物理学会 2013 年度秋季大会領域 4,6,7 合同シンポジウム 「トポロジカル絶縁体・超伝導体の新物質・新成長法・新構造」, 2013 年 9 月 (徳島大学, 徳島).
- 一般講演
- [34] 白井皓寅, 白澤徹郎, 平原徹, 高橋敏男, 長谷川修司: 多層シリセンの構造解析, 日本物理学会 第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 28 日 (東海大学, 神奈川).
- [35] 中村友謙, 保原麗, 長谷川修司, 平原徹: 低温強磁場下で動作する走査トンネルポテンシオメトリ装置の開発, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 29 日 (東海大学, 神奈川).
- [36] 一ノ倉聖, 平原徹, 鈴木拓, 長谷川修司: スピン偏極イオン散乱分光法を用いた Bi 超薄膜における電流誘起スピン偏極の検証, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 28 日 (東海大学, 神奈川).
- [37] 福居直哉, 平原徹, 長谷川修司: *In situ* FIB 加工微細構造を用いた Bi₂Se₃ のスピンホール効果測定, 日本物理学第 69 回会年次大会, 2014 年 3 月 30 日 (東海大学, 神奈川).
- [38] 平原徹, 松波雅治, 羽尻哲也, 木村真一, 長谷川修司, 小林功佳: ビスマス超薄膜における半金属半導体転移の検証, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 25 日 (徳島大学).
- [39] 申東潤, 平原徹, 長谷川修司: Si(111) 上の希薄磁性表面の電気伝導, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 27 日 (徳島大学).
- [40] 福居直哉, 平原徹, 長谷川修司: Bi₂Se₃ 超薄膜でのスピンホール効果検出の試み, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 26 日 (徳島大学).
- [41] 原田勲, 右近修治, 江尻有郷, 興治文子, 北原和夫, 近藤一史, 近藤泰洋, 長谷川修司, 波田野彰: 物理チャレンジ 2013 報告: I. プレチャレンジ活動, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 26 日 (徳島大学).
- [42] 岸澤眞一, 浅井吉蔵, 右近修治, 江尻有郷, 大嶋孝吉, 大塚洋一, 毛塚博史, 小牧研一郎, 近藤泰洋, 下田正, 真梶克彦, 鈴木功 K, 瀬川勇三郎 L, 武士敬一, 遠山潤志, 長谷川修司, 深津晋, 味野道信: 第 9 回全国物理コンテスト・物理チャレンジ 2013 実験問題, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 26 日 (徳島大学).
- [43] 白井皓寅, 平原徹, 長谷川修司: グラフェンの従兄弟シリセン, 平成 25 年度東北大学通研プロジェクト研究会, 2013 年 11 月 1 日 (ベルサンピアみやぎ泉, 宮城).
- [44] 福居直哉, 平原徹, 長谷川修司: Bi₂Se₃ 薄膜の *in situ* 微細加工と 4 探針測定によるスピンホール効果検出の試み, 表面科学学術講演会, 2013 年 11 月 26 日 (つくば国際会議場, 茨城).
- [45] 山田学, 平原徹, 保原麗, 長谷川修司: Si 結晶表面上の In および Pb モノレイヤー超伝導, 第 5 回低温センター研究交流会, 2014 年 2 月 27 日 (小柴ホール, 東京大学).
- (講義等)
- [46] 長谷川修司: 理科教育 (教育学部) 2013 年度夏学期 (本郷).
- [47] 長谷川修司, 溝川貴: 現代物理実験学 I, 2013 年度夏学期 (本郷).
- [48] 長谷川修司, 平原徹, 久保高幸 (TA), 中村友謙 (TA): 物理学実験 I (3 年生) 電子回折, 2013 年度冬学期 (本郷).
- [49] 長谷川修司, 小森文夫: 表面物理学 (物性物理学特論) (学部・大学院共通講義) 2013 年度冬学期 (本郷).
- [50] 長谷川修司: ナノサイエンスとナノテクノロジー, 東京大学エグゼクティブ・マネジメント・プログラム (東大 EMP), 2014 年 1 月 25 日 (東京大学伊藤国際ホール, 本郷).
- (アウトリーチ)
- [51] 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, 2013 年 12 月 24 日 (八王子セミナーハウス, 東京).
- [52] 長谷川修司: 実験・実習: 大気圧を測ろう, 平成 25 年度女子中高生夏の学校 2013, 2013 年 8 月 9 日 (国立女性教育会館, 埼玉).
- [53] 長谷川修司, 他: 実験レポートの書き方, 大気圧測定実験, ブランク定数測定実験等, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2014 年 3 月 22 日 (東北大学片平さくらホール, 仙台); 2014 年 3 月 15 日 (栃木県立宇都宮高等学校, 栃木); 2014 年 3 月 3 日 (熊本県立第二高等学校, 熊本).
- [54] 長谷川修司: 模擬授業 at 本郷, 2013 年 11 月 26 日 (栃木県立宇都宮高等学校); 2013 年 11 月 12 日 (群馬県立前橋高等学校); 2013 年 8 月 1 日 (神奈川県立湘南高等学校).

4.3 福山研究室

物質の温度を絶対零度に向けて下げてゆくと、それまで熱攪乱で覆い隠されていた相互作用の効果が顕わになり、物質固有の性質を反映した非日常的な量子現象や量子状態が出現する。我々は、極低温下で発現する超流動、超伝導、強相関効果、磁気フラストレーション、量子ホール効果などの研究を通じて、これまで知られていないまったく新しい物理概念を抽出し確立することを目標に研究している。その際、系の構成要素が単純であればあるほど明快にそして驚くほどの多様性をもって新奇な量子現象が表出するところが、多体系の妙である。その典型的な例が、液体や固体ヘリウム (He) などの量子凝縮系やグラフェンなどの電子系物質である。

4.3.1 2次元の量子凝縮相研究

ヘリウムは、不純物の混入がほとんどない超純粋な試料を容易に手に入れられる実験系である。しかも、ボース統計に従うスピン0の中性粒子であるヘリウム4(^4He)とフェルミ統計に従うスピン1/2の中性粒子であるヘリウム3(^3He)という2種類の安定同位体が存在し、それぞれの原子間相互作用はまったく同一である。He原子を極低温下でグラファイト表面に物理吸着させると、1~6原子層の超薄膜が容易に作成でき、理想的な2次元量子系が手に入る。2次元系の特異性は、突きつめれば、低次元化による量子ゆらぎの増大と下地層原子が作る周期ポテンシャルの存在に由来する。また、ミクロな理論的アプローチが可能な希薄極限から強相関領域まで、面密度によって粒子相関を広い範囲で制御できるのも3次元系にない特徴である。

我々はここ数年、(i) 2次元固体 ^3He のギャップレス量子スピン液体状態、(ii) 2次元固体 ^4He の超固体現象の探索、(3) 2次元 ^3He の自己凝集現象の確立、に集中的に取り組んでおり、量子相図の解明や2次元 ^3He の自己凝集現象の発見など、大きな成果があがっている。これらをベースに、今後の数年間、長い量子凝縮相研究の中でも最も興奮に満ちた時期の一つとなると確信している。

ギャップレス量子スピン液体状態の検証実験

グラファイト上吸着2層目 ^3He は、1層目He固体の作る周期ポテンシャルに助けられて、3次元系より格子間距離で20%も広い“C2相”とよばれる非常に低密度で1層目に対して整合な三角格子構造をもつ量子固体相を形成することが、最近の我々の比熱測定から決定的になった。その粒子密度は1層目の4/7しかない(図4.3.1(a))。C2相は、隣接する少なくとも6体までの高次の多体交換相互作用が競合するフラストレーションが非常に強い量子スピン系で、あたかも“ほとんど融けかかった固体”とも言える。その磁気基底状態がスピン励起にギャップのないギャップレス量子スピン液体であることは、1997年に我々

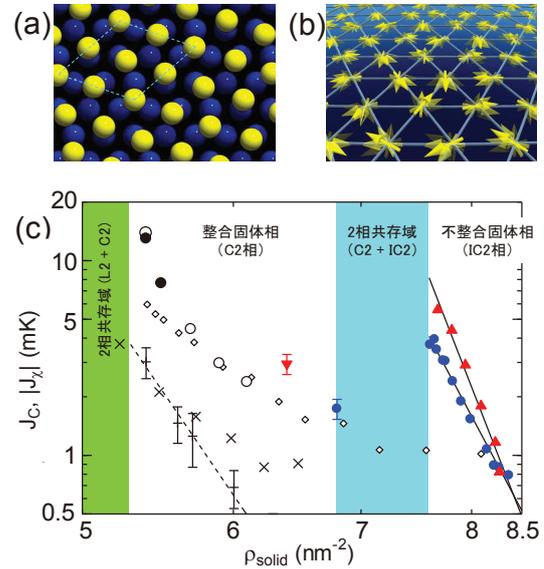


図 4.3.1: (a) グラファイト上吸着2層目の整合相 (C2相: 4/7相) の構造。(b) 量子スピン液体状態の概念図。(c) 2次元固体 ^3He の交換相互作用 (J_C と J_X) の面密度依存性。異なる系のデータは異なる色で表す: $^3\text{He}/^3\text{He}/\text{gr}$ 系 (▲▼、赤)、 $^3\text{He}/^4\text{He}/\text{gr}$ 系 (●、青)、 $^3\text{He}/\text{HD}/\text{HD}/\text{gr}$ 系 (その他、黒)。整合固相 (C2相) と不整合固相 (IC2相) では J の密度依存性がかなり異なる。

が最初に指摘した。量子スピン液体は、絶対零度でもスピン長距離秩序がなく、各サイトのスピン期待値もゼロにとどまる新奇な非磁性状態で、スピン自由度の“量子液体”とも見なせる(図4.3.1(b))。

今年度は、HD(重水素化水素)2層の上に形成される ^3He -C2相($^3\text{He}/\text{HD}/\text{HD}/\text{gr}$ 系)の核比熱を $0.3 \leq T \leq 80$ mKの温度範囲で測定し、磁気ピーク温度より高温側の温度依存性を高温展開とPadé近似でフィッティングして展開初項の交換相互作用パラメータ (J_C) を求めた。これを、下地層が ^3He 単原子層の $^3\text{He}/^3\text{He}/\text{gr}$ 系や、 ^4He 単原子層の $^3\text{He}/^4\text{He}/\text{gr}$ 系のC2相や、より高密度の不整合固相 (IC2相) で求まっている J_C と比較したのが図4.3.1(c)である。固体Heでは、低密度になるほど原子の量子トンネリングの頻度は急速に増し、交換相互作用も大きくなる。IC2相での $C \propto \rho^{-18}$ というべき則は、純粋2次元空間の経路積分モンテカルロ計算とよく一致することから、不整合固相では下地の周期ポテンシャルは均一化されていると考えられる。一方、C2相の

密度依存性は、IC2相と違って単純なべき則には従わず、依存性もより緩やかである。そして、IC2相のべき則を低密度まで外挿した値より J_C の絶対値は随分小さい。整合相では、粒子交換の際、越えるべきポテンシャル障壁が大きいためであろう。C2相は整合相でありながら圧縮性に富む(10~20%)という一見矛盾した性質をもつ。この“圧縮性に富む整合固相”という性質こそが、低温でフェルミオン系ではギャップレス量子スピン液体状態、ボソン系では超固体相を発現する源であろう。

2次元の秩序-無秩序転移における量子効果

グラファイト表面に He 原子を直接吸着させると、最も吸着ポテンシャルの大きいサイトは炭素ハニカム格子の六角形の中心である。He 原子数がこのサイト数のちょうど $1/3$ のとき、 $T \approx 3$ K 以下で3つの吸着サイトの1つが規則的に占有される三角格子の整合秩序相(C1相: $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相)への相転移が観測される(図4.3.2(a))。この秩序-無秩序転移のユニバーサルリティクラスは3状態 Potts 模型に属しており、例えば比熱の発散の臨界指数は $-1/3$ となることが知られている(図4.3.2(b))。

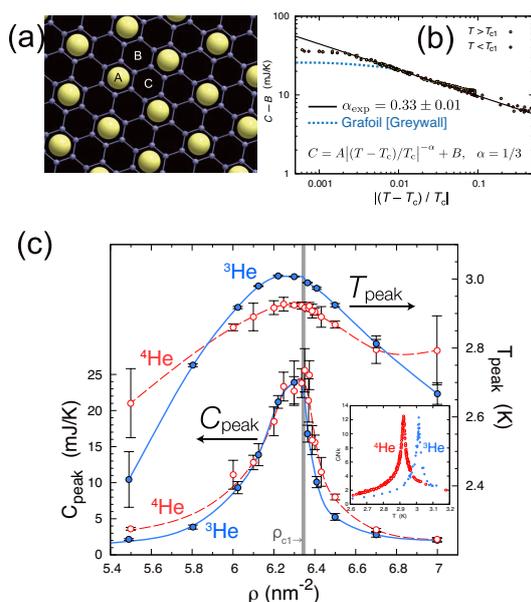


図 4.3.2: (a) グラファイト上吸着 1 層目の整合相 (C1 相: $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相) の構造。(b) C1 相への秩序-無秩序転移における比熱の発散の臨界プロット。(c) C1 相への秩序-無秩序転移における熱容量のピーク値 (C_{peak}) とピーク温度 (T_{peak}) の密度依存性。インセットは、整合密度 ρ_{c1} における、粒子 1 個あたりの比熱の温度依存性。—●—は ${}^3\text{He}$ 、--○--は ${}^4\text{He}$ 。

我々は、従来の実験で使われたグラファイト基板

(グラフォイル) より単結晶子サイズが約 10 倍大きい ZYX グラファイト基板 (100-300 nm) を使って、この秩序-無秩序転移に及ぼす量子効果 (質量効果) を詳細に調べた。実際、ZYX 基板を用いると転移温度 (T_{peak}) での比熱ピーク (C_{peak}) が 2 倍になって発散が鋭くなり、臨界温度域も拡張した。図 4.3.2(c) は、 ${}^4\text{He}$ と ${}^3\text{He}$ の転移温度と比熱ピークの密度依存性を調べた結果である。質量がより軽く量子効果がより大きい ${}^3\text{He}$ の方が、転移温度が 0.1 K (3%) 高いことが判明した。この結果はグラフォイル基板での過去の報告と一致するが、そこでは C_{peak} が最大となる密度 (ρ_{c1}) も ${}^3\text{He}$ の方が 4% 高いという不可思議な結果であったので、真偽がはっきりしていなかった。今回の我々のデータは、 ρ_{c1} については ${}^3\text{He}$ と ${}^4\text{He}$ で誤差の範囲で結果が一致しており、転移温度に対する量子効果の結果も信頼できる。

観測された量子効果は、零点振動が量子局在を促すという剛体球の量子固体に特徴的な現象として理解でき、経路積分モンテカルロ計算の結果とも一致する。なお、図 4.3.2(c) にあるように、 C_{peak} の密度依存性は $\rho = \rho_{c1}$ を中心に非対称である。これは、剛体球系の粒子-ホール非対称性と下地の周期ポテンシャルが強いことに関係していると考えられる。

2次元固体 ${}^4\text{He}$ における超固体性の探索

液体 ${}^4\text{He}$ は、 $T < 2.2$ K で、通常の液体状態 (常流動状態) から系全体に量子コヒーレンスがある超流動状態へと相転移する。この超流動現象が固体中でも実現する可能性が 45 年前から理論的に議論されている。これが、固体の結晶性と超流動性を併せもつ物質の全く新しい状態「超固体」であり、固体 ${}^4\text{He}$ が最有力の候補物質と考えられている。

一般に、液体 He の超流動性は 10^5 - 10^6 という高い Q 値をもつねじれ振子を使って確認できる。細いロッドで支えられた容器内の He 試料が超流動転移すると、回転ゼロの性質から慣性モーメントに寄与せず、ねじれ共振周波数が増加する。2004 年に米国の研究グループによって、3次元の hcp 固体 ${}^4\text{He}$ で超流動性を示唆する周波数シフトが報告された。その後、同様の観測が世界中で相次いだが、観測される周波数シフトが真に超流動由来のものか疑問視する結果も報告されており、完全な決着は未だついていない。

これに対して我々は、グラファイト上に吸着した ${}^4\text{He}$ の整合固相 (C2 相) に注目している。この 2次元量子固体は、前々節で述べたように、下地層の周期ポテンシャルの助けによって例外的に低密度で局在しているため、hcp 固体 ${}^4\text{He}$ よりも桁違いに量子性が強いと期待される (特に ${}^4\text{He}/\text{HD}/\text{HD}/\text{gr}$ 系)。これまで、我々自身を含む複数のグループが、グラフォイル基板を使ったねじれ振子実験で、 ${}^4\text{He}/{}^4\text{He}/\text{gr}$ 系の C2 相近傍密度で、超流動応答と考えられる周波数シフトを $T < 200$ mK で観測している。しかし、シフト量から換算した超流動成分は 2 層目原子の数 % しかなく、グループによって観測した密度範囲もかなり異なり、真に C2 相由来の超流動応答か判然

としない。これらの問題は、グラフォイルの単結晶子サイズが小さ過ぎるため、回転軸周りの超流動流の連結性が悪いことや平坦性や均一性の劣る部分が表面にかなり存在することが原因と考えられる。

そこで我々は、前節で述べた ZYX 基板を使ったねじれ振り子実験で、2次元固体 ^4He の超固体性の確認に取り組んでいる。前年度に製作したコインシルバ製の振り子のロッド材をベリリウム銅に変え、できるだけストレスを加えないよう振り子を組み立てることで、 $Q = 1.4 \times 10^6$ という高い Q 値と、 $2 < T < 4$ K の範囲で 1 mHz/K という十分小さな共振周波数の温度変化をもつ改良型の振り子を製作し、多層の液体 ^4He 膜試料に対して超流動転移の観測にも成功している。次年度は、いよいよ超固体性の本格的な探索実験に挑む予定である。

4.3.2 グラフェンの電子物性研究

グラフェンは炭素原子がハニカム格子を形成した単原子層物質である。そのバンド構造は、単位胞に含まれる 2 原子に対応した異なるカイラリティの二つの線形バンドがフェルミ面で交差する特異な性質をもつ。そのため、このハニカム格子上をホッピング伝導する電子は、ディラック方程式に従う質量ゼロのフェルミ粒子として振る舞い、半整数量子ホール効果など興味深い物性を示す。さらに、グラフェンは、特異な局在電子状態をもつジグザグ端とそれをもたないアームチェア端の 2 種類の端をもつ。ジグザグ端状態はフラットバンドなので容易にスピン偏極し、数 nm 幅のグラフェン・ナノリボンの両側のジグザグ端間には反強磁性的な電子相関が働き、印加磁場でバンドギャップを制御できると予想されている。このような、特異な電子状態に加えて、高い移動度、機械強度、柔軟性を併せもつため、グラフェンは次世代の電子デバイス材料として大きな注目を集めている。その際、(i) 1 eV 程度のバンドギャップをいかに持たせるか、(ii) 選択的にジグザグ端をもつナノスケールの試料加工ができるか、の 2 点が応用に向けたキーテクノロジーとなる。我々は、これらのキーテクノロジー実現に向けて二つのアイデアをもっており、その実証実験に取り組んでいる。

酸素分子修飾した劈開グラフェンの電気伝導特性

グラフェンはある意味、表面だけの物質とも言えるので、原子・分子を吸着させることで、容易にその物性を制御することができる。電荷注入や電気伝導率の変化の他、整合な吸着構造がバンド構造を変調してバンドギャップを生成する可能性が議論されている。我々は、前年度、劈開した単層・2層グラフェン試料に室温で酸素分子を吸着させたときのホールドープ効果とその時間依存性を詳しく調べた。今年度は、 $T = 1.8$ K までの極低温下でその電気伝導特性を調べた。微小電極の取り付けは、ウェットな微細加工で用いるレジストによる表面汚染を防ぐため、

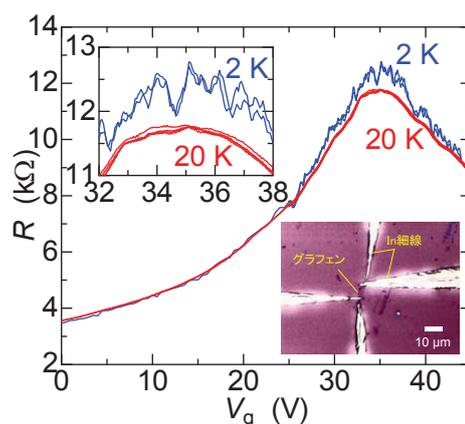


図 4.3.3: 酸素修飾グラフェンの $T = 2, 20$ K における電気抵抗のゲート電圧依存性。(左上) ディラック点近傍の拡大図。低温ほど抵抗が増大し、ゲート電圧に対してピーク構造が現れる。(右下) In の微小電極を取り付けたグラフェンの光学顕微鏡写真の例。

In 細線をグラフェン表面に直接融かし付ける方法で行った (図 4.3.3)。

室温で 51 時間 $P_{\text{O}_2} = 643$ Pa の酸素ガスに曝したグラフェン試料を真空排気した後、冷却して電気抵抗を 4 端子測定した結果が図 4.3.3 である。20 K 以下になると、抵抗のゲート電圧依存性には細かなピーク構造が現れ、低温になるほど顕著となる。このピーク構造の詳細は試料を冷却し続ける限り変わらないが、酸素修飾の前後や $T > 80$ K への熱サイクルによって変化することから、酸素分子その他の吸着子が散乱体となることで低温でパリスティックな量子伝導が現れたものと理解できる。ピーク構造を平滑化した平均的な抵抗のゲート電圧依存性からの差分として振動成分を評価すると、振動の大きさの 2 乗平均は、温度の減少と共にべき的に変化し、 $T < 1$ K 以下で一定値に近づくような振る舞いを見せる (図 4.3.4(a))。これは通常の半導体 2 次元電子系における磁気抵抗の普遍的伝導度揺らぎのそれと定性的に一致するが、その大きさは量子化コンダクタンス (e^2/h) より一桁小さい。

一方、平滑化した抵抗は、 $4 < T < 20$ K の温度範囲で、2次元の Variable Range Hopping (2D VRH) から期待される $\exp(T_0/T)^{1/3}$ に比例した温度依存性を示す (図 4.3.4(b))。実際、局在の強さを表すパラメータ ($T_0 < 20$ mK) は酸素修飾によって約 2 倍に増加した。酸素修飾前は、 $T < 3$ K の低温でも 2D VRH を示唆する温度依存性を示すが、酸素修飾後はほぼ一定となった。これは局在電荷間のトンネリング伝導が支配的になったためであろう。なお、図 4.3.4(b) で、 $3 < T < 4$ K で抵抗値にジャンプが見られるのは、電極に使用した In の超伝導転移 ($T_c = 3.4$ K) によるものである。

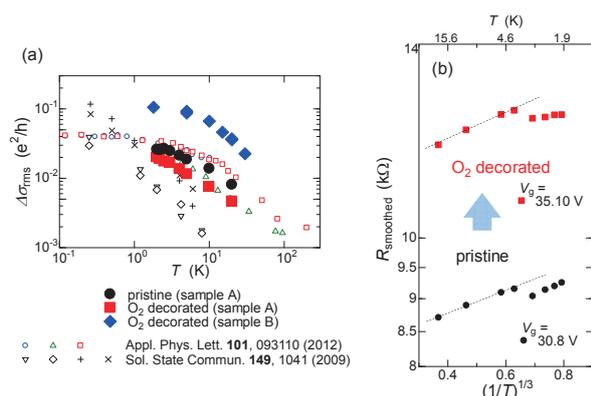


図 4.3.4: (a) 酸素修飾グラフェンの抵抗のゲート電圧依存性を平滑化したものの温度依存性。(b) 抵抗のゲート電圧依存性の振動成分の 2 乗平均の温度依存性。

スピン偏極ジグザグ端の STM/S 測定

これまで世界中で様々な方法によってジグザグ端ナノリボンの作成が試みられ、物性評価も行われてきたが、スピン偏極状態の決定的な実験結果はまだ得られていない。これは、ジグザグ構造のみからなる端の作成が困難で、ジグザグとアームチェアの混在した端しか得られていないためである。

グラフェンあるいはグラファイト表面に金属微粒子を散布し、水素ガス中で高温過熱すると、金属微粒子を触媒として炭素原子と水素分子が反応してメタンガスを発生する。その過程で、金属微粒子が表面上を移動した軌跡に沿って 4~20 nm 程度の幅の細いトレンチが残る。このとき、アームチェア構造とジグザグ構造の反応性の違いにより、トレンチの端のほとんどがジグザグ端になると言われている。もしこの方法でジグザグ端トレンチを高密度で作成できれば、トレンチに挟まれた領域にジグザグ端ナノリボンを生成できると考えている。本年度は、グラファイト表面でトレンチ作成を試み、STM/S 測定に適した試料作成の条件出しを行うとともに、トレンチの走査トンネル顕微/分光 (STM/S) 観測を行った。図 4.3.5 にその SEM 像と STM 像を示す。

<報文>

(原著論文)

- [1] Y. Kubota, R. Toda, M. Kamada, S. Nakamura, T. Matsui and Hiroshi Fukuyama: Experimental Apparatus to Search for Supersolidity in Monolayer ^4He on Graphite, *Journal of Low Temperature Physics* **175**, 160-166 (2014).
- [2] 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* **171**, 711-717 (2013).

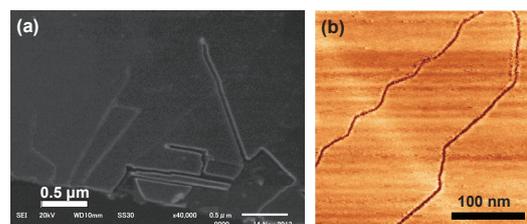


図 4.3.5: 鉄微粒子を触媒とした化学反応によって作成したグラファイト表面のナノトレンチの SEM 像 (a) と、室温大気中における STM 像 (b)。

(国内雑誌)

- [3] 福山 寛: ヘリウム 3 は 2 次元空間で液化するか? (パリティ **28**, 34-36 (2013-09): 翻訳).

(学位論文)

- [4] 鎌田 雅博: 熱容量測定による 2 次元固体ヘリウム 3 の磁気基底状態の研究 (修士論文).
- [5] 久保田 雄也: 単原子層ヘリウム 4 における超流動応答測定用ねじれ振りの開発 (修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [6] M. Kamada, D. Sato, Y. Kubota, S. Nakamura, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Specific Heat Measurement of the Gapless Spin Liquid State in 2D ^3He , *International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2013)*, (Matsue, Japan, August 1-6, 2013).
- [7] Y. Kubota, R. Toda, M. Kamada, S. Nakamura, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Search for Supersolidity in Monolayer ^4He on Graphite, *International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2013)*, (Matsue, Japan, August 1-6, 2013).
- [8] S. Nakamura, K. Matsui, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama: A New Heat-Capacity Anomaly at the Melting Transition in the Second Layer of ^3He on Graphite, *International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2013)*, (Matsue, Japan, August 1-6, 2013).
- [9] T. Matsui, J. R. Bindel, H. Hibino, and Hiroshi Fukuyama: Intercalation of Kr atoms into Graphene on SiC(0001), *Trends in Nano-Technology (TNT2013)*, (Sevilla, Spain, September 09-13, 2013).
- [10] T. Matsui, K. Nakayama, and Hiroshi Fukuyama: Transport Properties of Graphene Decorated with Oxygen Molecules, *Trends in Nano-Technology (TNT2013)*, (Sevilla, Spain, September 9-13, 2013).

- [11] K. Nakayama, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Transport Properties of Graphene Decorated with Oxygen Molecules, Recent Progress in Graphene Research (RPGR2013), (Tokyo, Japan, September 9-13, 2013).

招待講演

- [12] Hiroshi Fukuyama: Exotic Quantum Phases of ^3He and ^4He in Two Dimensions, International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2013), (Matsue, Japan, August 1-6, 2013).
- [13] S. Nakamura, K. Matsui, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Gas-Liquid Transition and Elementary Excitations in Monolayers of Helium-4, International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2013), (Matsue, Japan, August 1-6, 2013).
- [14] Hiroshi Fukuyama: Novel Phases in Fermionic/Bosonic Quantum Liquids and Solids in Two Dimensions, Workshop on Quantum Materials, (Stuttgart, Germany, December 9-11, 2013).

(国内会議)

一般講演

- [15] 戸田 亮、久保田 雄也、鎌田 雅博、中村 祥子、松井 朋裕、福山 寛: 2次元ヘリウム4における超固体の探索実験 II、日本物理学会 2013年秋季大会 (徳島大学、2013年9月25-28日).
- [16] 中村 祥子、松井 幸太、松井 朋裕、福山 寛: 単原子層液体ヘリウム4の素励起、日本物理学会 2013年秋季大会 (徳島大学、2013年9月25-28日).
- [17] 中村 祥子、松井 幸太、松井 朋裕、福山 寛: グラファイト上第2層目ヘリウム整合相の安定性と同位体効果、日本物理学会 2013年秋季大会 (徳島大学、2013年9月25-28日).
- [18] 松井 朋裕、Jan Raphael Bindel、日比野 浩樹、福山 寛、クリプトン原子でインタカレートした SiC グラフェンの STM/S 観測、日本物理学会 2013年秋季大会 (徳島大学、2013年9月25-28日).
- [19] 松井 朋裕、Jan Raphael Bindel、日比野 浩樹、福山 寛、グラファイト、グラフェンへの Kr 原子低温吸着の STM/S 観測、第7回 物性科学領域横断研究会 (東京大学、2013年12月1-2日).
- [20] 中村 祥子: 2次元空間におけるヘリウムの量子物性、第5回 低温センター研究交流会 (東京大学、2014年2月27日).
- [21] 鎌田 雅博、佐藤 大輔、久保田 雄也、中村 祥子、松井 朋裕、福山 寛: 2次元ヘリウム3のギャップレス量子スピン液体状態、第5回 低温センター研究交流会 (東京大学、2014年2月27日).
- [22] 久保田 雄也、戸田 亮、鎌田 雅博、中村 祥子、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、第5回 低温センター研究交流会 (東京大学、2014年2月27日).

- [23] 中山 和貴、松井 朋裕、福山 寛: 酸素修飾したグラフェンの電気伝導特性、第5回 低温センター研究交流会 (東京大学、2014年2月27日).

- [24] 鎌田 雅博: Quantum spin liquid in 2-dimensional helium-3、第2回統合物質科学リーダー養成プログラム (MERIT) 自主キャンプ (2014年3月10-12日).

- [25] 中山 和貴、松井 朋裕、福山 寛: 酸素修飾グラフェンの電気伝導度の温度依存性、日本物理学会 第69回年次大会 (東海大学、2014年3月27-30日).

- [26] 中村 祥子、松井 朋裕、福山 寛: 2層系ヘリウム薄膜における ^3He と ^4He の混合と相分離、日本物理学会 第69回年次大会 (東海大学、2014年3月27-30日).

招待講演

- [27] 福山 寛: 固体ヘリウム3の多体交換モデル: 実験家の視点、物性理論研究会 (久保健先生退職記念) (ホテル四季の里、2013年9月28-29日).

- [28] 福山 寛: 超低温の獲得と量子物質の世界、東京大学理学系研究科技術部シンポジウム (東京大学、2013年11月22日).

- [29] 福山 寛: 2次元空間でヘリウムが形成する新奇量子相、日本物理学会 第69回年次大会 (東海大学、2014年3月27-30日).

4.4 岡本 研究室

本研究室では、低次元電子系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。

4.4.1 劈開表面に形成された 2 次元電子系

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

走査トンネル分光顕微鏡と電子輸送特性の同時測定

現在までの電気伝導測定から吸着物質の種類や量、表面形態によって誘起された 2 次元電子系の輸送特性が大きく変化することがわかっているが、吸着物質の構造や表面形態についての知見は得られていない。

本年度、研富が主体となり走査トンネル分光顕微鏡 (STM/S) と電気伝導特性を同時に行える装置を構築した (図 4.4.1)。この装置は試料基板の劈開、蒸着による試料作成をしたその場で極低温 (4.2K)・高磁場 (14T) 環境下において STM/S と電気伝導測定を行えるものであり、世界的に見ても非常にユニークなものである。図 4.4.2 は InSb 劈開表面に鉄を 0.01 原子層つけた場合のトポ像 (20 nm × 20 nm) である。黒い輪郭を持った丸が Fe であり、明るい縞模様が Sb の副格子である。トポ像から得られた鉄原子の原子密度と電気伝導測定から得られる電子濃度を比較することにより、約 1/8 の鉄原子がドナーとなり InSb 表面に電子を供給していることが判った。

図 4.4.3 は図 4.4.2 と同じ試料における縦抵抗率とホール抵抗の磁場依存性である。縦抵抗率は明瞭なシュブニコフドハース振動を示し、ランダウ準位充填率 $\nu = 4$ と 5 で量子ホール効果が観測された。また、この系における電子移動度は約 $11 \text{ m}^2/\text{Vs}$ であり、吸着原子が誘起する 2 次元電子系で最も高い値になっている。

図は $100 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$ を 100 点に分割し、得られた局所状態密度を空間的に平均化した微分コンダクタンスである。ゼロ磁場のスペクトルにおいて $V = -50 \text{ mV}$ と -10 mV の位置に立ち上が



図 4.4.1: 走査トンネル分光顕微鏡と電子輸送特性の同時測定を行うための実験装置。

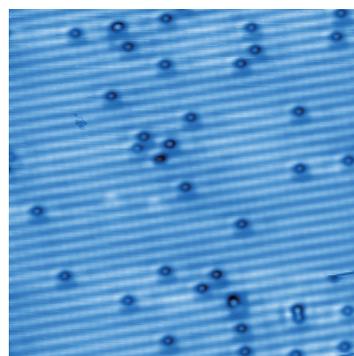


図 4.4.2: 鉄を 0.01 原子層つけた InSb 劈開表面のトポ像。測定条件は: $I = 100 \text{ pA}$, $V = 100 \text{ mV}$, $20 \text{ nm} \times 20 \text{ nm}$ 。

りが見られる。これは第一サブバンドと第 2 サブバンドのバンド端に相当する。磁場の増加とともにスピン分離を伴ったランダウ準位が観測されている。磁場 10 T おけるランダウ準位の間隔から求められる有効質量は $0.018m_e$ (m_e : 自由電子の質量)、ランダウの g 因子は 26 であり、バルクの InSb のそれら ($m^* = 0.014m_e$, $|g| = 51$) と若干違いが見られた。この要因はバンドの非放物線性による寄与が大きい。

今後、この装置を用いて単原子層磁性膜の磁気秩序状態の解明や下記する単原子超伝導体の研究を行

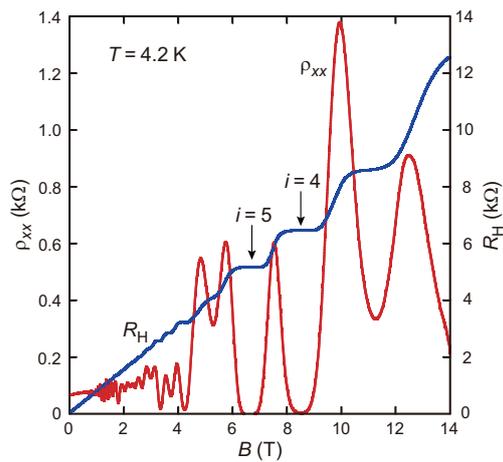


図 4.4.3: 吸着鉄原子により誘起された InSb 表面 2 次元電子系における縦抵抗率とホール抵抗。測定温度は 4.2 K。

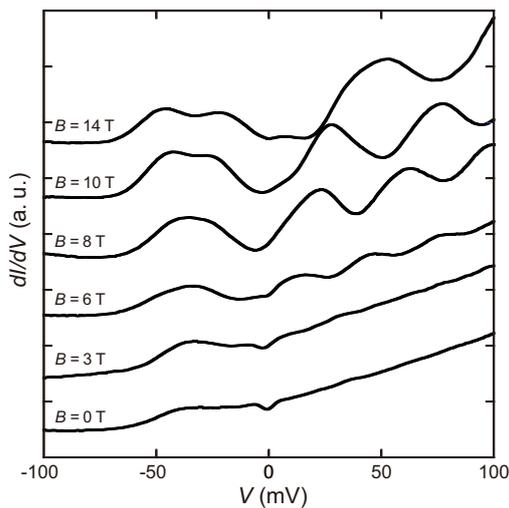


図 4.4.4: 空間的に平均化された微分コンダクタンス。測定条件: $I_{\text{stab}} = 100 \text{ pA}$, $V_{\text{stab}} = 100 \text{ mV}$, $V_{\text{mod}} = 2.0 \text{ mV}$ (図の縦軸はオフセット使用)。

うことが計画されている。

4.4.2 金属超薄膜の超伝導

近年、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が行ってきた。劈開表面の平坦さを反映して、Pb および In に対して単原子層領域で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。

これまでの 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。さらに、超伝導転移温度の平行磁場依存性を詳細に測定した結果、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。これらの実験結果は、大きな Rashba 分裂を有する 2 次元電子系に対して、散乱が強い場合に予想されていた、超伝導秩序変数の位相が空間変動する stripe 相と呼ばれる状態を仮定することにより定量的に説明することができた。また、In 単原子層膜においては、Pb 単原子層膜の場合よりも一桁程度大きな超伝導転移温度の平行磁場依存性が観測されたが、Rashba 分裂の強さの違いにより説明することができた。

Al の超薄膜に対する測定

Pb 単原子層超薄膜において観測された強い平行磁場下で生き残る超伝導状態が、Rashba 分裂に起因することを確認するために、空間反転対称性は破れているもののスピン軌道相互作用が非常に小さく、Rashba 効果が無視できると考えられる Al の超薄膜を用いた比較実験を三宅が中心となり行った。

薄膜において空間反転対称性が破れている効果が強く現れるためには、膜厚はできるだけ薄い方が望ましい。そこで、はじめに超伝導転移温度および常伝導抵抗値と膜厚の関係を調べた。他の基板を用いた先行研究よりも、半分程度の薄い膜で超伝導を観測することに成功したが、Pb や In の場合は異なり、単原子層領域に至る前に絶縁体的になった。

絶縁体的温度依存性を示す Al 超薄膜 ($d = 0.68 \text{ nm}$) に対して、シート抵抗の垂直磁場依存性 ($T = 0.58 \text{ K}$) を調べたところ、大きな負の磁気抵抗効果が観測された。これに対して、同程度のシート抵抗値と温度依存性を示す Pb 単原子層膜の絶縁体領域 (原子密度 5.4 nm^{-2}) では、正の磁気抵抗効果が観測される。この負の磁気抵抗効果の原因については現時点ではわかっていないが、一つの可能性として、島状構造が形成されて島間の準粒子トンネリングにより電気伝導が支配されることが挙げられる。負の磁気抵抗効果は、各島内の超伝導状態が壊れることによりエネルギーギャップが消滅した結果として説明される。一方で、Pb 超薄膜の絶縁体相では、負の磁気抵抗効果が観測されていないことから、均一な乱れを持つアモルファス状態が実現されていると考えられる。この違いは、基板への濡れやすさの違いなどに由来すると考えられるが、今後、Al においても、アモルファス状態が形成される条件を探索し、単原子層での超伝導をめざす。

最も薄い Al 超伝導超薄膜 ($d = 0.82 \text{ nm}$, 3 原子層程度の膜厚に相当) に対して、超伝導転移温度の

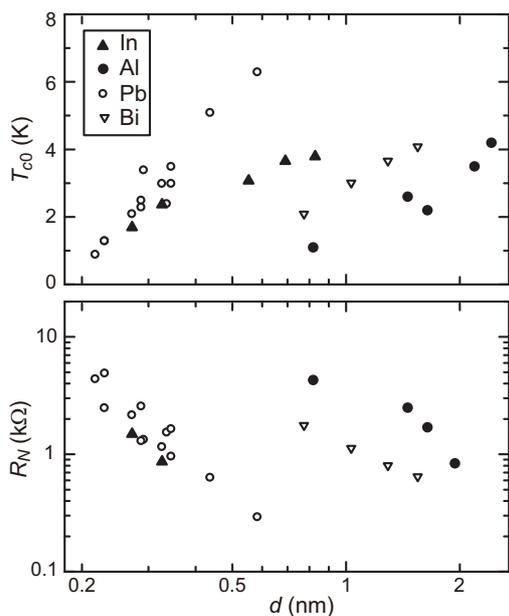


図 4.4.5: GaAs 劈開表面上に形成された金属超薄膜のゼロ磁場での超伝導転移温度と常伝導状態のシート抵抗値を膜厚 (d : nominal thickness) の関数としてプロットしたもの。

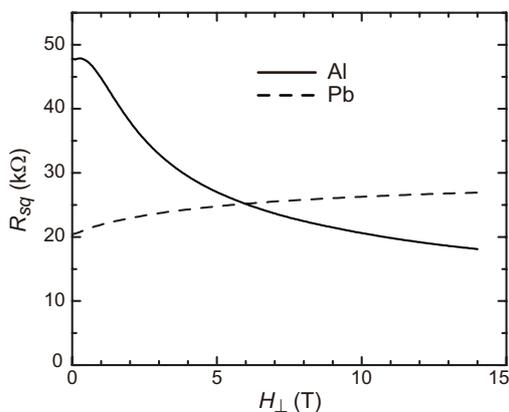


図 4.4.6: 絶縁体領域におけるシート抵抗の垂直磁場依存性。実線は Al 超薄膜 ($d = 0.68$ nm) に対する結果。破線は Pb 単原子層膜 (原子密度 5.4 nm⁻²) に対する結果。

平行磁場依存性を測定した。Pauli 常磁性による効果を考慮した計算結果と近い、振る舞いが観測された。

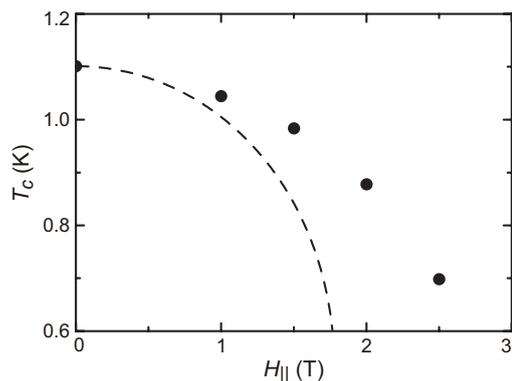


図 4.4.7: Al 超薄膜 ($d = 0.82$ nm) の超伝導転移温度の平行磁場依存性。破線は、Pauli 常磁性による効果を考慮した理論値。

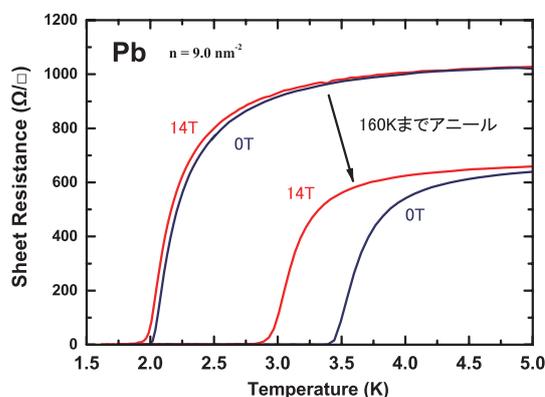


図 4.4.8: Pb 超薄膜における超伝導転移の平行磁場効果を、熱処理 (160 K) の前後で比較。

熱処理効果

温度を上げていくと、膜厚や物質にもよるが、およそ 30 K を超えると温度とともに抵抗が小さくなり始める。これは再び温度を下げても、元の抵抗値には戻らない不可逆変化である。そのため、電子局在などの物理現象ではなく、温度が上がったことにより薄膜の構造が変化した結果だと考えている。抵抗値の減少は、熱処理による乱れの減少として理解することができる。一方、Pb 超薄膜において、熱処理を行うことにより、超伝導転移温度の平行磁場依存性が大きく増大することが、関原により観測された。熱処理の前後で、ゼロ磁場での超伝導転移温度や常伝導状態のシート抵抗値はそれほど変化していないが、閉じ込めポテンシャルの非対称性が熱処理によって変化した可能性などが考えられるかもしれない。

走査トンネル顕微鏡を用いた Pb 超伝導超薄膜の研究

超薄膜においては、位相揺らぎがクーパー対間のコヒーレンスを壊すために超伝導状態は不安定になりやすいと考えられている。このため、クーパー対が形成される温度と巨視的な超伝導転移温度との間に違いが生じる可能性が指摘されている。実験的には、前者は走査トンネル分光より測定される超伝導ギャップの温度依存性より、後者は電気抵抗や磁化の温度依存性より求めることができる。

本年度、一ノ宮が中心となり、Pb 超薄膜に対して、予備実験を開始した。現有の走査トンネル顕微鏡の動作温度は 4.2 K であるため、超伝導転移温度を 4.2 K より高くするために、研究は単原子層膜ではなく、数原子層の膜厚に対して行われた。電気伝導測定において超伝導が観測された超薄膜に対して、トンネル分光の測定を行ったところゼロバイアスを中心としたディップ構造が観測された。しかし、同時に測定した電気伝導測定において超伝導が消失する強磁場中においても、ディップ構造が、深さは小さくなるものの生き残ることから、超伝導以外の要因が考えられる。いくつかのモデルを検討して、実験結果のとの比較を行った。

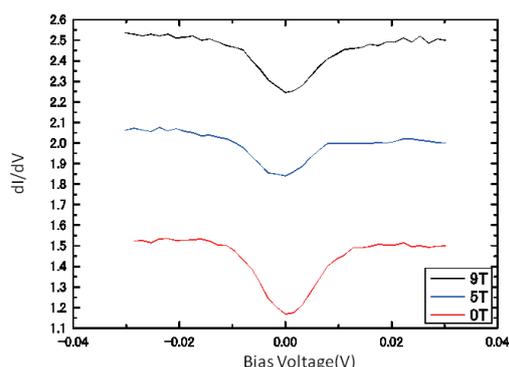


図 4.4.9: $d = 1.6$ nm の Pb 薄膜に対して、0, 5, 9 T の垂直磁場をかけたときのトンネル分光測定結果。0 T の結果には -0.5 、9 T の結果には $+0.5$ のオフセットを加えている。

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Sekihara, R. Masutomi, and T. Okamoto: Two-Dimensional Superconducting State of Monolayer Pb films on GaAs (110) in a Strong Parallel Magnetic Field, *Physical Review Letters* **111**, 057005 (2013).

(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* **1566**, 291 (2013).

- [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* **456**, 012027 (2013).
- [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* **456**, 012034 (2013).
- [5] T. Sekihara, T. Miyake, H. Ichinomiya, R. Masutomi, and T. Okamoto: Two-dimensional superconductivity with broken inversion symmetry in one-atomic-layer metal films on cleaved GaAs surfaces, *JPS Conference Proceedings* (in press).

(学位論文)

- [6] 関原貴之: 「GaAs 劈開表面に形成した金属単原子層膜における空間反転対称性の破れた超伝導」(博士論文)
- [7] 一ノ宮弘樹: 「走査トンネル顕微鏡を用いた GaAs 劈開表面における Pb 超伝導超薄膜の研究」(修士論文)
- [8] 三宅貴大: 「GaAs 劈開表面上への Al 超薄膜の作製と超伝導の研究」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [9] T. Sekihara, T. Miyake, H. Ichinomiya, R. Masutomi, and T. Okamoto: Two-dimensional superconductivity with broken inversion symmetry in one-atomic-layer metal films on cleaved GaAs surfaces, *The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems* (Tokyo, Japan), August 5-9, 2013.
- [10] R. Masutomi and T. Okamoto: STM/STS and transport measurements in adsorbate-induced two-dimensional electron systems, *International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology* (Hawaii, USA), December 8-13, 2013.
- [11] T. Sekihara, T. Miyake, H. Ichinomiya, R. Masutomi, and T. Okamoto: Two-dimensional superconductivity with broken inversion symmetry in one-atomic-layer metal films on cleaved GaAs surfaces, *The March Meeting 2014 of the American Physical Society* (Denver, USA), March 3-7, 2014.

(国内会議)

一般講演

- [12] 枅富龍一、一ノ宮弘樹、岡本徹: 吸着原子が誘起する 2 次元電子系における走査トンネル分光顕微鏡と電子輸送特性の同時測定、*日本物理学会 秋季大会* (徳島大学) 2013 年 9 月 25 日-28 日。

- [13] 関原貴之、三宅貴大、一ノ宮弘樹、柘富龍一、岡本徹：GaAs 劈開表面上の金属単原子層における空間反転対称性の破れた 2 次元超伝導、第 7 回 物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会) (東京大学武田先端知ビル) 2013 年 12 月 1 日.
- [14] 関原貴之、三宅貴大、一ノ宮弘樹、柘富龍一、岡本徹：GaAs 劈開表面上の金属単原子層における空間反転対称性の破れた 2 次元超伝導、第 5 回 低温センター研究交流会 (東京大学小柴ホール) 2014 年 2 月 27 日.
- [15] 柘富龍一、岡本徹：吸着原子が誘起する 2 次元電子系における走査トンネル分光顕微鏡と電子輸送特性の同時測定、第 5 回 低温センター研究交流会 (東京大学小柴ホール) 2014 年 2 月 27 日.

4.5 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。

4.5.1 半導体高密度電子正孔系

半導体中に高密度に光励起された電子正孔系が温度・密度によってどのような相を示すかは、半導体光物性では古くから議論が続く懸案問題の一つである。比較的高温域では、励起子ガス、電子正孔プラズマ、電子正孔液体といった多彩な相を示すことが知られているが、例えば、励起子気体から電子正孔プラズマへの移行、いわゆる励起子モット転移がどのように生じるかは現在でも完全には理解されていない。これは、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、実験でもこれまで行われていた発光やバンド間光吸収スペクトルからは励起子の密度が実際にどの程度なのかを評価することが困難であることが理由の一つである。極低温では、励起子ボース-アインシュタイン凝縮 (BEC) や電子正孔 BCS 状態（一種の励起子絶縁体相）の存在が古くから期待されてきたが、こちらもその実現条件や超流体としての振る舞いなど多くの面で未解明である。

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がテラヘルツ帯にあり、励起子密度や自由キャリア密度を定量的に評価することができる、クーロン力の遮蔽に寄与する誘電関数を直接観測する手法であることから励起子遮蔽の様子を定量的に調べることができる、などの利点があるからである。本年度は、モデル半導体として間接遷移型半導体 Ge、直接遷移型半導体 GaAs に注目し、励起子モット転移密度近傍での振る舞いを調べた。

間接遷移型半導体 Ge

Ge の電子正孔系は、長い対消滅寿命を持ち、寿命内に電子系が格子系と熱平衡に至ること、電磁場との結合が小さいこと、電子及び正孔の有効質量が軽いことなどから、準熱平衡状態下での量子凝縮相を調べるには適した系である。一方、間接遷移型半導体特有の問題として、伝導帯の底及び価電子帯の頂上での縮重が大きく、低温になると高密度にフェルミ縮退した電子正孔液滴が自発的に形成されてしまい、電子正孔系を中間的な密度領域に保つことが困難である。これは励起子 BEC や電子正孔 BCS 状態、あるいはその間のクロスオーバーといった問題を調べる上では本質的な障害である。

しかしこの電子正孔液滴の形成は、結晶に一軸性圧力を印加しバンド縮重を解消することによって抑制できることが知られている。そこで結晶に一軸性圧力を印加して電子正孔液滴の形成を抑制し、低温下で高密度に励起子を蓄積することを試みた。バンド間光吸収では観測することができない間接遷移型の励起子を可視化するため、テラヘルツ帯にある励起子内部遷移を観測する手法の開発を進めた。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を開発し、アンビル材料、構造の最適化など試行錯誤の上、実際に圧力印加により電子正孔液滴の形成が抑制される様子を、電子正孔液滴の表面プラズモン共鳴 (SPR) の観測から確認した。

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、その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、伝導帯のランダウレベル間隔が大きくなると、ゼロ磁場下の励起子 1S-2P 吸収から、強磁場下でのランダウレベル間遷移を伴う磁気励起子内部遷移へと移行する様子が明瞭に観測された (図 4.5.1)。磁気励起子が熱解離してできる自由キャリアのサイクロトロン共鳴も同時に観測された。この帯域の複素誘電率スペクトル計測から、圧力磁場下における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。

さらに、高密度励起下では、磁気励起子の共鳴において透過光の偏光が 90 度以上回転することを見出し、その結果として、通常の透過スペクトルの解析では正しくキャリア密度、励起子密度を評価できないことが明らかになった。そこで、透過スペクトルとファラデー回転スペクトルを同時計測し、非対角複素誘電率テンソルを決定し、総和則を用いて磁気励起子の密度やそのイオン化率を決定する解析手法を考案した。十分低温下で電子正孔液滴の形成を抑え、モット転移濃度に至る高密度の磁気励起子の生成に成功した。

直接遷移型半導体 GaAs

純粋な励起子モット転移、即ち励起子のみを光で共鳴的に生成しその密度を増加させた場合に絶縁体金属転移がどの様に生じるか、という問題は、モットの思考実験に始まる励起子モット転移の本来の間

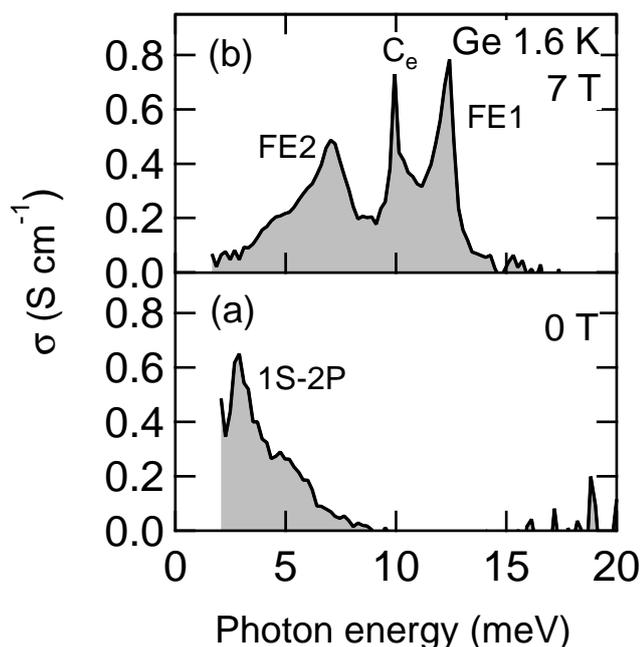


図 4.5.1: 1 軸性圧力下における Ge の励起子の内部遷移を示す光学伝導度スペクトル。(a) ゼロ磁場下における励起子 1S-2P 遷移のピーク。(b) 7 T における磁気励起子内部遷移。FE1, FE2 はそれぞれ電子、正孔のランダウレベル間遷移を伴う磁気励起子内部遷移。C_e は電子サイクロトロン吸収。

題設定であった。しかし我々がこれまで調べてきた間接遷移型半導体では、励起子はバンド間光励起による自由キャリア生成を通じてのみ間接的にしか生成できない。そこで、直接遷移型半導体バルク GaAs を対象に励起子モット転移を調べることとした。

GaAs を対象とした励起子モット転移については、過去に多くの実験が成されてきたが、そのほとんどは発光スペクトルやバンド間吸収スペクトルの測定によるものであった。しかし近年、励起子が完全にイオン化した電子正孔プラズマ状態であっても、クーロン多体相関効果によって発光スペクトルに励起子共鳴構造が現れることが理論的に示され、励起子のエネルギーで発光が観測されることと実際に励起子が存在することが必ずしも対応しないという問題が指摘されていた。そこで我々は、励起子の密度を定量的に評価できるテラヘルツ分光と、発光スペクトル、およびバンド間光吸収プローブ分光という 3 つの異なる手法で実験を行い、結果を比較した。

バルク GaAs ではテラヘルツ帯誘導吸収スペクトルにおいて、モット転移近傍での電子正孔プラズマのプラズマ周波数と励起子 1S-2P 共鳴エネルギー (3 meV) が近いこと、両者を明確に分離することが難しかったが、テラヘルツプローブパルスの電場強度を

強くすると、形成された励起子がプローブ電場によって解離し、電子正孔プラズマの応答となることが分かった。そこでこの効果を利用して、強い電場と弱い電場の場合のスペクトルの差をとることによって、スペクトル中の励起子の寄与を抽出することに成功した。モット密度以上の高密度励起領域では、イオン化率はほぼ 1 であり、バンド間光吸収でも励起子準位が完全に消失することがわかった。このような高密度の電子正孔プラズマ状態であっても、発光スペクトルには強い励起子共鳴構造が現れることを見出した。以上の結果は、励起子が完全に解離したプラズマ状態でも、電子正孔間の多体クーロン相互作用によって裸の励起子のエネルギーに発光 (バンド間の分極) が極を持つことを示唆する。

4.5.2 s 波超伝導体のヒッグスモードの観測

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、この開発した光源を用いて、s 波超伝導体 Nb_{1-x}Ti_xN のヒッグスモードの観測を行った。

ヒッグスモードとは、自発的な対称性の破れに伴って生じる、オーダーパラメーターの振幅の揺らぎに相当する集団励起モードである (図 4.5.2(a))。近年では様々な凝縮系においてヒッグスモードが研究され、対称性の破れた量子多体系の性質と非平衡状態のダイナミクスを理解する新たな手段として大きな注目を集めている。しかし、s 波 BCS 状態におけるヒッグスモードは線形応答の範囲では電磁場と直接結合しないためにこれまで観測されていなかった。

理論的には、オーダーパラメーターの逆数で与えられるような BCS 状態の応答時間よりも短い時間スケールで瞬時に (つまり非断熱的に) BCS 状態を励起することでヒッグスモードが現れることが予測されていた。BCS 状態のオーダーパラメーターを決定するギャップ方程式は対形成相互作用の大きさと準粒子分布関数に依存しているため、通常の金属超伝導体に超短パルスレーザーを照射して瞬時に準粒子を励起することでヒッグスモードが現れることが期待される。しかし、従来の超高速分光で用いられる可視-近赤外領域のフェムト秒パルスレーザーを使って励起してもヒッグスモードは観測されていない。これは、近赤外レーザーの光子エネルギー (~ eV) が金属超伝導体のギャップエネルギー (~ meV) よりも遥かに大きいため、光励起されたホットキャリアの膨大な余剰エネルギーによって格子系が加熱されるまでの間クーパー対が破壊され続けてしまうために非断熱的励起という条件を満たさなくなることが影響している。そのため、ヒッグスモードを誘起するためには、準粒子分布を大きく変えるほどの強度を持ち、パルス幅が十分短く、さらに光子エネルギー

ギーがBCSギャップエネルギーと同程度である光源が必要となる。

我々が近年開発してきた高強度モノサイクルテラヘルツパルス光源はこの条件を全て満たしており、格子系を加熱することなく瞬時に準粒子をギャップ端に励起することが可能である。これによりBCS状態を非断熱的に励起する状況を実現した。さらにもう1つのプローブテラヘルツパルスによってテラヘルツ帯光学伝導度の変化を時間分解して検出することで、非断熱的励起後の非平衡BCS状態の超高速ダイナミクスを観測する光学測定系を開発することに成功した。図4.5.2(b)は、このテラヘルツポンプ-テラヘルツプローブ測定によって観測された実験結果である。励起直後から数psの間、オーダーパラメーターがコヒーレントに振動する現象を観測した。この振動の周波数はポンプ強度の増加に対して著しく減少し、励起後の非平衡準安定状態におけるオーダーパラメーターの値と一致した。この結果は理論的に予測されるヒッグスモードの振る舞いと極めてよく一致する。また2次元時間領域テラヘルツ分光によって光学伝導度スペクトルの時間発展を調べることで、オーダーパラメーター振動をスペクトル領域でも確認することができた。

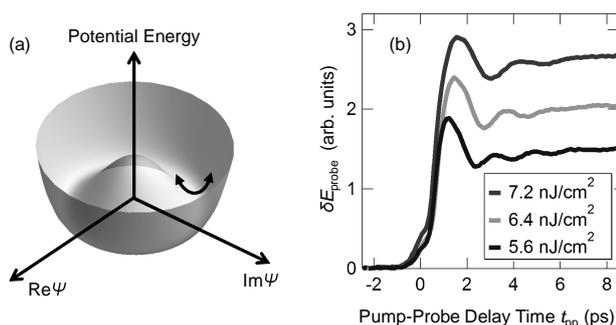


図 4.5.2: (a) 自発的な対称性の破れを表す複素オーダーパラメーター Ψ 平面上のポテンシャル曲線。矢印はヒッグスモードを示す。(b) テラヘルツポンプ-テラヘルツプローブ測定による実験結果。励起直後にオーダーパラメーターの減衰振動が現れている。

4.5.3 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。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、また大きなランダ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理論的に予測され、昨年度我々はSiC単結晶上にエピタキシャル成長した単層グラフェン試料を用いて、その実証実験に成功した。ファラデー回転角が強磁場領域で磁場に依らず一定の値に固定される振る舞いを観測し、占有率 $\nu = 2.6$ に対応する単層グラフェンに特徴的なプラトー構造がテラヘルツ帯におけるファラデー回転角に現れることを明らかにした。しかし、実験で観測されたプラトー領域における回転角（量子ファラデー回転角）は理論から予測される値の0.7倍となっていた。

この原因として単層グラフェンの面積充填率による影響を考え、面積充填率とファラデー回転角の関係について調べた。ラマン分光法を用いてグラフェン試料面上でラマンスペクトルの空間マッピングを行い、各点における2Dバンドの半値全幅より層数を決定することで、単層グラフェンの面積充填率を評価した。面積充填率が異なる試料のファラデー回転角を測定し、比較することにより、実験で得られた量子ファラデー回転角が理論値の0.7倍となる主な原因が、単層グラフェンの面積充填率であることを明らかにした。

4.5.4 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 ($1 \text{ THz} = 4 \text{ meV} = 300 \mu\text{m}$) は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時空間イメージングや種々の物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てきた。

近接場は光照射された際に物体近傍に形成される電場で、その分布は物質表面に誘起される分極電荷により決まるため、回折限界を超えた空間分解能を得られることが知られている。本顕微装置ではサンプル近傍に形成されるテラヘルツ波近接場を検出するため、非常に高感度な電気光学結晶であるLiNbO₃を厚さ $20 \mu\text{m}$ に加工して配置した (図4.5.3 (上))。これによりテラヘルツ波の回折限界を大きく超える、

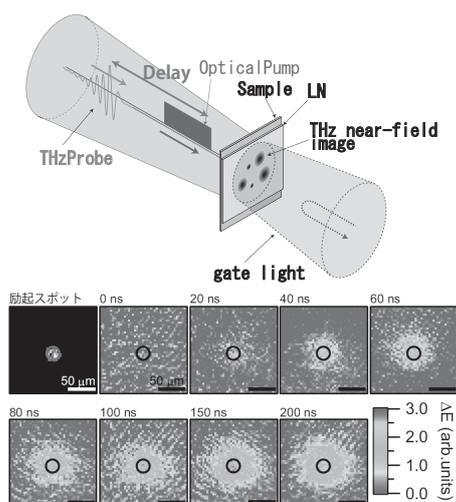


図 4.5.3: (上) 時間分解テラヘルツ近接場顕微鏡のサンプル近傍の図。(下) 半導体 Si 中に光励起されたキャリアの時間分解イメージ。

9 μm (波長の 1/50) の空間分解能を達成した。また時間分解測定には、フェムト秒パルス光を励起光として用いる方法と、連続 (CW) 光を音響光学素子を用いて変調する方法の二つを導入した。前者はナノ秒の時間スケールにおいて 2 ps の時間分解能を、後者はミリ秒の時間スケールにおいて 34 ns の時間分解能を達成しており、測定する現象の時間スケールに合わせて柔軟に対応可能な汎用性の高い装置を開発した。

実際に時間分解テラヘルツ近接場顕微鏡を用いて、室温下で測定可能な半導体 Si 中に光励起されたキャリアの拡散現象の観測を行った。図 4.5.3 (下) は 0 ns から黒破線部分に CW 励起を開始したときのキャリアダイナミクスを時空間分解して観測したもので、テラヘルツ電場の変化量がキャリア密度に対応している。0 ns ではほとんど励起されていないが、20 ns 後は励起スポットを中心にキャリアが拡散していき、200 ns では定常状態に達していることが確認できる。以上のように、Si 中に光励起されたキャリアの時間領域・空間領域でのダイナミクスを時間領域・空間領域同時に観測することに成功した。

<報文>

(原著論文)

- [1] R. Matsunaga, Y. I. Hamada, K. Makise, Y. Uzawa, H. Terai, Z. Wang, and R. Shimano: Higgs Amplitude Mode in the BCS Superconductors $\text{Nb}_{1-x}\text{Ti}_x\text{N}$ induced by Terahertz Pulse Excitation, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 057002 (2013).
- [2] 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.* **4**, 1841 (2013).

- [3] J. Y. Yoo and R. Shimano: Lifetime Measurement of Excitons in Si by Terahertz Time-domain Spectroscopy with High Spectral Resolution, *J. Infrared Milli. Terahz. Waves* **35**, 110 (2013).

(国内雑誌)

- [4] 島野亮、青木秀夫: グラフェンの量子ファラデー効果、*光アライアンス* 2013 年 11 月号

(学位論文)

- [5] 柳済允: 「テラヘルツ分光法による磁場下一軸性圧力下における Si および Ge の高密度電子正孔系の研究」(博士論文)
- [6] 柴垣和広: 「Si の励起子電子正孔液滴クロスオーバー密度領域における発光スペクトルの研究」(修士論文)
- [7] 濱田裕紀: 「時間分解テラヘルツ近接場顕微鏡の開発」(修士論文)
- [8] 湯本郷: 「テラヘルツ偏光分光法による単層グラフェンにおける量子ファラデー効果の研究」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [9] Fumiya Sekiguchi, Takeshi Suzuki, and Ryo Shimano: Terahertz study of exciton Mott transition in Ge, *International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013*, Kyoto, Japan, April 3, 2013.
- [10] Ryusuke Matsunaga, Yuki I. Hamada, Kazumasa Makise, Yoshinori Uzawa, Hiroataka Terai, Zhen Wang, and Ryo Shimano: Terahertz Pulse-Induced Higgs Mode in a BCS Superconductor $\text{Nb}_{0.8}\text{Ti}_{0.2}\text{N}$ Film, *CLEO:2013 QELS-Fundamental Science* (San Jose, USA) San Jose, USA, June 13, 2013.
- [11] Jeyoon Yoo, Fumiya Sekiguchi, and Ryo Shimano: Terahertz Spectroscopy Of Magnetoexciton In Ge Under An Uniaxial Stress, *The 38th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Mainz, Germany, September 6, 2013.

招待講演

- [12] Ryusuke Matsunaga, Yuki I. Hamada, Kazumasa Makise, Yoshinori Uzawa, Hiroataka Terai, Zhen Wang, and Ryo Shimano: Intense THz Pulse-Induced Higgs Amplitude Mode in a BCS Superconductor $\text{Nb}_{1-x}\text{Ti}_x\text{N}$ Film, *The 38th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Mainz, Germany, September 5, 2013.
- [13] Ryo Shimano: Photo-induced ultrafast nonequilibrium dynamics of superconductors, *Ecole Normal Superiure- Univ. of Tokyo Workshop*, Komaba, Tokyo, Dec.3, 2013.

(国内会議)

一般講演

- 2013 年日本物理学会秋季大会 (2013 年 9 月 25-28 日 徳島大学)
- [14] 松永隆佑、濱田裕紀、牧瀬圭正、鶴澤佳徳、寺井弘高、王鎮、島野亮: 非断熱的テラヘルツパルス励起による BCS 超伝導体 $Nb_{1-x}Ti_xN$ におけるヒッグスモードの観測
- [15] 関口文哉、鈴木剛、望月敏光、金昌秀、秋山英文、Loren N. Pfeiffer、Ken W. West、島野亮: バルク GaAs 励起子のテラヘルツ分光
- [16] 濱田裕紀、柳済允、松永隆佑、島野亮: 時間分解テラヘルツ近接場顕微鏡による半導体中の光励起キャリアの動的イメージング
- [17] 井尻吉洋、矢田祐之、須田理行、山本浩史、加藤礼三、島野亮、岡本博: 近赤外ポンプ-THz プロープ分光による κ 型 BEDT-TTF 塩の光誘起相転移の研究 II
 - 第 5 回東京大学低温センター研究交流会 (2014 年 2 月 27 日、東京大学)
- [18] 松永隆佑: s 波 BCS 超伝導体 $NbTiN$ におけるテラヘルツ波誘起ヒッグスモードの観測
- [19] 関口文哉: バルク GaAs の電子正孔プラズマ相からの励起子発光
- [20] 柳済允: 低温強磁場および一軸性圧力下における Ge の高密度電子正孔系の研究
 - 日本物理学会第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27-30 日、東海大学)
- [21] 柳済允、湯本郷、島野亮: 高圧低温強磁場下における Ge の高密度電子正孔系の光ポンプテラヘルツプロープ分光
- [22] 関口文哉、吉田正裕、伊藤隆、望月敏光、金昌秀、秋山英文、Loren N. Pfeiffer、Ken W. West、島野亮: バルク GaAs の電子正孔プラズマ相における励起子発光
- [23] 湯本郷、柳済允、松永隆佑、日比野浩樹、島野亮: 単層グラフェンの量子ファラデー回転角における面積充填率の影響
- [24] 濱田裕紀、柳済允、松永隆佑、島野亮: 時間分解テラヘルツ近接場イメージ計測による Si 中の光励起キャリアダイナミクスの定量評価
- [25] 井尻吉洋、矢田祐之、須田理行、山本浩史、加藤礼三、島野亮、岡本博: 赤外ポンプ-THz プロープ分光による κ 型 BEDT-TTF 塩の光誘起相転移の研究
- [27] 島野 亮: テラヘルツ波が拓く量子物性科学, 応用物理学会・テラヘルツ電磁波技術研究会主催研究討論会「新しいテラヘルツ科学が映し出すテラヘルツ応用の展望」名古屋大学, 2013 年 11 月 18 日
- [28] 島野 亮: 高強度テラヘルツ波パルスで駆動される s 波超伝導体の超高速非平衡ダイナミクス新学術領域「トポロジカル量子現象」第 4 回領域研究会, 名古屋大学, 2013 年 12 月 20 日
- [29] 松永隆佑: THz ポンプ-THz プロープ分光を用いた非平衡 BCS 超伝導状態の超高速ダイナミクスの研究, 第 2 回先進的観測技術研究会, 高エネルギー加速器研究機構, 2014 年 2 月 21 日
- [30] 島野 亮: 高強度テラヘルツ波パルスによる超伝導制御, 先端光量子科学アライアンスセミナー〜テラヘルツセンシング技術の最前線: デバイス開発から基礎・応用研究まで〜, 慶應義塾大学日吉キャンパス, 2014 年 3 月 1 日
- [31] 松永隆佑: BCS 状態におけるテラヘルツ波誘起ヒッグスモード, 日本物理学会第 69 回年次大会シンポジウム「限界駆動の物質光科学」, 東海大学, 2014 年 3 月 28 日

(セミナー)

- [32] 松永隆佑: テラヘルツパルスを用いた BCS 状態のヒッグスモードの観測と光制御, シリーズセミナー 極限コヒーレント光科学, 東京大学物性研究所, 2013 年 9 月 9 日
- [33] 島野 亮: テラヘルツ電磁波を用いた凝縮系物理学研究, 京都大学物理学教室談話会, 2013 年 11 月 28 日
- [34] 島野 亮: 低エネルギー光学量子物性, 京都大学物理学第一特別講義, 2013 年 11 月 27-29 日, 京都大学

招待講演

- [26] 島野 亮: グラフェンの量子ファラデー効果: 光に現れるトポロジカル量子現象, 物性研短期研究会「極限強磁場科学一場、物質、プロープのリンクから融合へ」, 東京大学物性研究所, 2013 年 10 月 31 日

4.6 高木研究室

物質中に新しい物理を創ることを目指し、固体中の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。平成 25 年度は、スピン軌道相互作用と電子相関、格子の対称性との協奏の結果生じるエキゾチックな電子相、特にスピン液体、エキゾチック超伝導、ディラック電子の創成に特に注力した。

4.6.1 イリジウム複合酸化物におけるスピン軌道相互作用に誘起された新奇電子相の開拓

5d 遷移金属であるイリジウム (Ir^{4+}) の酸化物では強いスピン軌道相互作用が、d 電子の状態を大きく変え、 $J_{eff} = 1/2$ 状態の電子が磁性や伝導を担っていることが明らかとなった。 $J_{eff} = 1/2$ 状態の電子の波動関数には軌道回転に伴う量子位相が内包されている。量子位相効果を体現するような新しい状態の探索を目指している。

ハイパーハニカム格子イリジウム化合物の発見と Kitaev 型量子スピン液体

Kitaev 型スピン液体状態にきわめて近い基底状態を有するハイパーハニカム型イリジウム酸化物を発見した。 $J_{eff} = 1/2$ 磁性体では、磁気モーメントの相互作用に波動関数の干渉効果が表れる。特に IrO_6 八面体が隣共有し、平面上の二つの Ir-O-Ir 90° 結合によって $J_{eff} = 1/2$ モーメントが相互作用する場合、干渉によって特定の方向のモーメントだけに強磁性相互作用が働くことが知られている。このような極めて異方的強磁性相互作用からなるハニカム格子を構築すると、Kitaev 模型で表現される量子計算の分野でよく知られた状態が実現する。その基底状態は新奇な量子スピン液体状態である。ハニカム格子 $\alpha\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ は Kitaev 模型の実現として興味を持たれてきた。実際には、反強磁性相互作用が共存し、かつ支配的なために $\alpha\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ は Kitaev 型スピン液体からは程遠い状態にある。これらの物質開発の過程でハイパーハニカム $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ を見出した。この物質は、ハニカム構造の三次元版と言うべき構造を有し、局所的には $\alpha\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ と同じ Ir-O-Ir の 90° 結合を有するが、その歪みは $\alpha\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ より小さい。磁化測定の結果は異方的な強磁性結合が支配的であることを示している。これらの結果を総合して Kitaev 型量子スピン液体に極めて近い状態が実現していると主張した。

キャリアドーピングされた量子スピン液体 $\text{Na}_3\text{Ir}_3\text{O}_8$

ハイパーカゴメ型 $\text{Na}_4\text{Ir}_3\text{O}_8$ は反強磁性量子スピン液体として当研究室が発信した物質である。量子

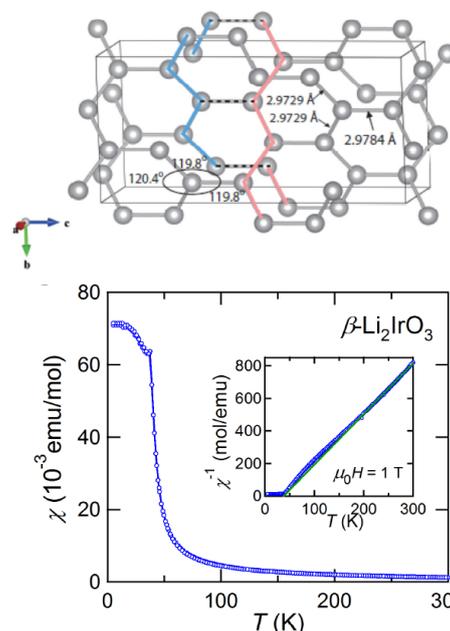


図 4.6.1: $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ における Ir のハイパーハニカム格子と磁化率の温度依存性

液体状態の詳細を探るために、単結晶試料の作成の努力を続けていたが、得られる単結晶は常に金属的な物性を示し、焼結体試料とは質的に異なることが問題であった。この単結晶について、精密構造解析を行った。この単結晶は $\text{Na}_3\text{Ir}_3\text{O}_8$ の組成を有することが判明した。 $\text{Na}_4\text{Ir}_3\text{O}_8$ と同じハイパーカゴメ格子からなるが、A サイトの Na が八配位位置でなく、四配位位置を占める秩序型スピネル構造を有する。この物質は $1/3$ 正孔ドーピングのスピン液体と見なすことができる。物性測定及び第一原理計算の結果から、ハイパーカゴメ格子の基本ユニットである Ir 三角形上の t_{2g} 電子が形成する分子軌道の結合-反結合分裂と強いスピン軌道相互作用による t_{2g} 軌道混成の競合によって、スピン軌道相互作用誘起半金属状態にあることが明らかにされた。

4.6.2 3次元ディラック電子の創成

アンチペロブスカイト Sr_3PbO の 3次元ディラック電子の実験的検証

グラフェン中の 2次元ディラック電子はよく知られている。その 3次元版のディラック電子の開拓を進めている。アンチペロブスカイト構造を有する Sr_3PbO において、ごくわずかに重なる伝導帯と価電子帯の波動関数の対称性と立方晶構造の高対称性の協奏によって、3次元のディラック電子が形成されることが、小形グループによって理論的に提唱された。化学的にきわめて不安定な Sr_3PbO 単結晶の作成に成

功し、ディラック電子の存在を実験的に検証した。極低温から室温まで磁場に対して極めて大きな磁気抵抗 (800%@2K) が観測された。極低温で飽和することなく線形に増加する 3 T 以上の磁気抵抗の振る舞いは、量子極限が実現したことを暗示している。実際、予備的な磁気トルク測定によって量子振動が観測され、その解析から自由電子質量の数%程度の驚くほど軽い質量と量子極限の実現が確認された。これらの結果から、 Sr_3PbO アンチペロブスカイトにおける 3次元ディラック電子の存在が実験的に確立された。

4.6.3 薄膜超格子構造を用いた新奇電子相の開拓

イリジウム酸化物超格子のバンドエンジニアリング

イリジウム複合酸化物のスピンの軌道相互作用誘起の電子相を薄膜超格子構造を用いて人工的に創成した。3次元ペロブスカイト SrIrO_3 は強いスピン軌道相互作用と格子変形の協奏により半金属である。その二次元版である層状 Sr_2IrO_4 は $J_{\text{eff}} = 1/2$ のスピン軌道モット絶縁体であるの対照的である。半金属性の起源は、フェルミ準位近傍にディラック点が存在するが、ディラック点での縮退が磁性のような時間反転対称性を破る摂動がないと解けないことによるとされている。したがって、超格子構造を用いて、 SrIrO_3 の実効的な次元性を低下させれば、いずれ弱い磁性の出現とともに金属絶縁体転移が生じると予想された。パルスレーザー堆積法により SrIrO_3 と SrTiO_3 からなる人工超格子 $[(\text{SrIrO}_3)_m, (\text{SrTiO}_3)_l]$ を $\text{SrTiO}_3(100)$ 基板上に作製したところ、 SrIrO_3 の層数が 3 以下で、弱い強磁性が観測され、同時に系は弱い絶縁体に転移した。この結果は、ディラック点の縮退と磁性によって系の伝導が支配されていることを指示すると同時に、薄膜超格子構造を用いた磁性の「設計」のモデルケースを提供した。

BaBiO_3 - BaPbO_3 超格子の超伝導

BaBiO_3 は Bi の電荷不均化による 3次元電荷密度波絶縁体、 BaPbO_3 はバンド絶縁体に近い半金属である。その固溶系は BaBiO_3 の電荷密度波状態と密接に関連した強い電子格子相互作用により $T_c = 13$ K の超伝導を示すことが知られている。 BaBiO_3 - BaPbO_3 超格子を作製し、その界面での電荷移動に伴うクリーンな超伝導の発現を探索した。界面の導入に伴い BaBiO_3 、 BaPbO_3 の厚さに強く依存することなく、 $T_c = 4$ K の超伝導が観測された。上部臨界磁場の角度依存性は膜に平行な磁場に対して明確なカスプ上の異常を示し、観測された超伝導が界面に起因する 2次元超伝導であることを示唆している。

<報文>

(原著論文)

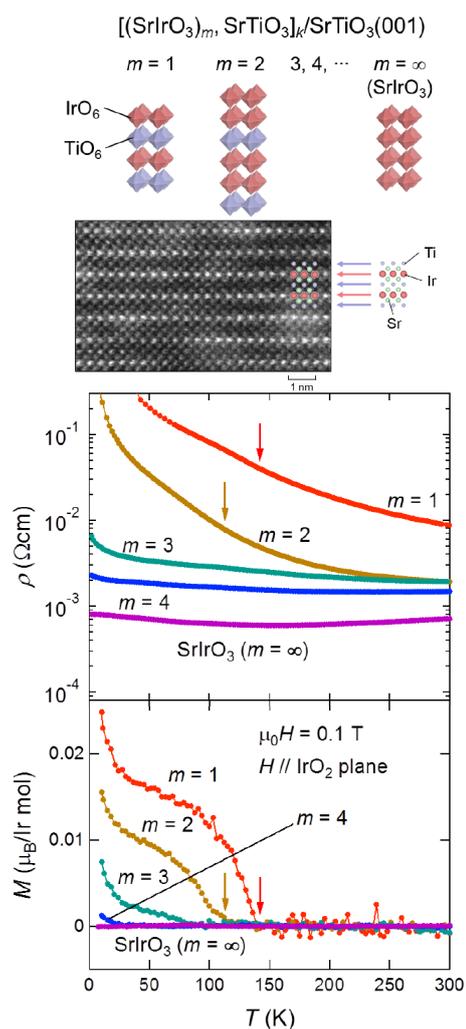


図 4.6.2: $\text{SrTiO}_3(100)$ 基板上の人工超格子 $[(\text{SrIrO}_3)_m, (\text{SrTiO}_3)_l]$ の模式図、原子分解能電子顕微鏡像、抵抗率・磁化率の温度依存性

- [1] T. Jin-no, Y. Shimizu, M. Itoh, S. Niitaka, and H. Takagi: Orbital reformation with vanadium trimerization in d^2 triangular lattice LiVO_2 revealed by ^{51}V NMR, *Physical Review B* **87**, 075135 (2013).
- [2] K. Ohgushi, J. Yamaura, H. Ohsumi, K. Sugimoto, S. Takeshita, A. Tokuda, H. Takagi, M. Takata, and T. Arima: Resonant X-ray Diffraction Study of the Strongly Spin-Orbit-Coupled Mott Insulator CaIrO_3 , *Physical Review Letters* **110**, 217212 (2013).
- [3] A. Dienst, E. Casandruc, D. Fausti, L. Zhang, M. Eckstein, M. Hoffmann, V. Khanna, N. Dean, M. Gensch, S. Winnerl, W. Seidel, S. Pyon, T. Takayama, H. Takagi, and A. Cavalleri: Optical excitation of Josephson plasma solitons in a

- cuprate superconductor, *Nature Materials* **12**, 535-541 (2013).
- [4] Y. Gu, K. Taniguchi, R. Tajima, S. Nishimura, D. Hashizume, A. Yamada, H. Takagi: A new "zero-strain" material for electrochemical lithium insertion, *Journal of Materials Chemistry A*, **1**, 6550 - 6552 (2013).
- [5] Y. Nii, H. Sagayama, H. Umetsu, N. Abe, K. Taniguchi, T. Arima: Interplay among spin, orbital, and lattice degrees of freedom in a frustrated spinel Mn_3O_4 , *Physical Review B*, **87**, 195115 (2013).
- [6] Y-S. Fu, T. Hanaguri, S. Yamamoto, K. Igarashi, H. Takagi, and T. Sasagawa: Memory Effect in a Topological Surface State of Bi_2Te_2Se , *Acs Nano* **7**, 4105 (2103).
- [7] P. D. C. King, T. Takayama, A. Tamai, E. Rozbicki, S. M. Walker, M. Shi, L. Patthey, R. G. Moore, D. Lu, K. M. Shen, H. Takagi, and F. Baumberger: Spectroscopic indications of polaronic behavior of the strong spin-orbit insulator $Sr_3Ir_2O_7$, *Physical Review B* **87**, 241106 (2013).
- [8] Y. Katsura and H. Takagi: MgSrSi-Type Compounds as a Possible New Family of Thermoelectric Materials, *Journal of Electronic Materials* **42**, 1365(2013).
- [9] M. A. Hossain, I. Zegkinoglou, Y-D. Chuang, J. Geck, B. Bohnenbuck, A. G. C. Gonzalez, H. H. Wu, C. Schuessler-Langeheine, D. G. Hawthorn, J. D. Denlinger, R. Mathieu, Y. Tokura, S. Satow, H. Takagi, Y. Yoshida, Z. Hussain, B. Keimer, G. A. Sawatzky, and A. Damascelli: Electronic superlattice revealed by resonant scattering from random impurities in $Sr_3Ru_2O_7$, *Scientific Reports* **3**, 02299 (2013).
- [10] Y. F. Lu, T. Takayama, A. F. Bangura, Y. Yukari, D. Hashizume and H. Takagi: Superconductivity and the Violation of Pauli Limit in $Ta_2Pd_xS_5$, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **83**, 023702 (2014).
- (学位論文)
- 博士論文
- [11] 大木栄幹: 電池用負極材料 $Y_2Ti_2O_5S_2$ の開発と応用展開 (2013年9月、東京大学大学院新領域創成科学研究科)
- [12] 谷雲鵬: マグネシウム及びリチウム二次電池正極材料の開発 (2013年9月、東京大学大学院新領域創成科学研究科)
- 修士論文
- [13] 加藤晃彦: ハイパーハニカム $\beta-Li_2IrO_3$ の三次元 Kitaev 磁性 (2014年3月、東京大学大学院新領域創成科学研究科)
- [14] 川上壘: Li_2TMSi_3 ($TM = Rh, Ir, Pt$) における超伝導体の発見 (2014年3月、東京大学大学院新領域創成科学研究科)
- [15] 中村真大: 低熱伝導率 Cu^+ 化合物における高効率熱伝変換 (2014年3月、東京大学大学院新領域創成科学研究科)
- [16] 吉野崇史: 充放電可能なマグネシウムイオン電池正極材料 (2014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
- [17] Y. Katsura, Y. Tashiro, M. Nakamura, T. Takayama, Y. Nakamura, K. Taniguchi, H. Takagi: Towards discovery of new thermoelectric materials: a calculation-aided search, The 32nd International Conference of Thermoelectrics, (Kobe, Japan, June-July, 2013).
- [18] A. Kato, T. Takayama, R. E. Dinnebier, H. Takagi: Magnetism of New iridates with a honeycomb lattice and related structure, Strongly Correlated Electron Systems 2013(Tokyo, Japan, August, 2013).
- [19] H. Kawasoko, J. Matsuno, H. Takagi: Superconductivity of $BaPbO_3/BaBiO_3$ superlattices, Strongly Correlated Electron Systems 2013(Tokyo, Japan, August, 2013).
- [20] D. Hirai, F. von Rohr, R. J. Cava: Emergence of superconductivity in $BaNi_2(Ge_{1-x}P_x)_2$ at a structural instability, Strongly Correlated Electron Systems 2013(Tokyo, Japan, August, 2013).
- [21] Y. F. Lu, T. Takayama, A. F. Bangura, Y. Yukari, D. Hashizume and H. Takagi: Superconductivity and upper critical field beyond Pauli limit in $Ta_2Pd_xS_5$, Strongly Correlated Electron Systems 2013(Tokyo, Japan, August, 2013).
- [22] A. Kato, T. Takayama, R. E. Dinnebier, H. Takagi: Hyper-honeycomb Iridate - playground for Kitaev physics? Workshop Strongly Correlated Electron Systems (Ringberg, Germany, November, 2013).
- 招待講演
- [23] H. Takagi: Search for new superconductors in the iron age - dream and reality, 2013 Gordon Research Conference on Superconductivity, (Les Diablerets, Switzerland, May, 2013).
- [24] H. Takagi: 5d transition metal oxides and chalcogenides - exotic magnetism, superconductivity and spin-orbit coupling, workshop on Enhanced Functionalities in 5d Transition-Metal Compounds from Large Spin-Orbit Coupling, (Montrose, USA, July, 2013).
- [25] H. Takagi: Novel 5d compounds - Exotic magnet, superconductor and excitonic insulator, Spin-Orbit Entanglement: Exotic States of Quantum Matter in Electronic Systems, (Dresden, Germany, July, 2013).

- [26] D. Hirai: New Superconductors with 4d and 5d Transition-Metal Elements, ICC-IMR International Workshop (Sendai, Japan, July, 2013).
- [27] T. Takayama: Quantum magnetism and spin-orbit induced semimetal in new iridates, New Opportunities to Study Magnetism and Related Phenomena in 4d and 5d Systems, (Tennessee, USA, September, 2013).
- [28] T. Takayama: Novel 4d and 5d based superconductors, The 8th International conference on Magnetism and Superconducting Materials, (Gammarth, Tunisia, September, 2013).
- [29] D.Coker, E. Atipov, H. Hsiono, and H. Takagi: Solid State Chemistry, Digital Design of Materials: the way forward for materials science?, (Boston, USA, September, 2013).
- [30] T. Takayama: Novel 5d Ir magnets with strong spin-orbit coupling, Advances in Quantum Magnets, (Crete, Greek, September, 2013).
- [31] H. Takagi: Electronic phase change and functionalities of correlated transition metal compounds, UTokyo Forum on Frontiers in Nano-Scale Physics, (Santiago, Chili, November, 2013).
- [32] H. Takagi: Otto Stern Lecture 2013" High Temperature Superconductors: Quo Vadis?, SFB 668 - Kolloquium, (Hamburg, Germany, December, 2013).
- [33] H. Takagi: Exotic electronic phases derived from semimetals, Quantum Materials Symposium in Conjunction with 14th Korea-Japan-Taiwan Workshop on SCES, (Muju, Korea, February, 2014).
- [34] H. Takagi: Exotic magnetism of $J_{eff} = 1/2$ isospins in complex Ir oxides, March Meeting, American Physical Society, (Denver, USA, March, 2014).
- [35] H. Takagi: Strongly spin-orbit coupled Mott insulators, March Meeting, American Physical Society, (Denver, USA, March, 2014).
- [36] H. Takagi: Exotic electronic matter derived from semimetals, The 6th Indo-Japan Seminar on Physics and Design of Multi-Functional Correlated Materials, (Tokyo, Japan, March, 2014).
- [40] 魯楊帆, 高山知弘, 高木英典: Ta₂NiSe₅ における半導体-絶縁体転移, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013 年 9 月
- [41] 桂ゆかり: バンド計算で比較する熱電変換材料 新規材料探索への応用, 日本金属学会研究分科会第 5 回熱電変換材料研究会. 「熱電変換材料の性能向上には何が必要なのか?」, 東京工業大学, 2013 年 11 月
- [42] 桂ゆかり, 高木英典: 第一原理計算を用いた熱電特性のキャリア濃度依存性の解析, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学, 2014 年 3 月
- [43] 河底秀幸, 平井大悟郎, 松野丈夫, 高木英典: BaPbO₃/BaBiO₃ 界面における二次元超伝導, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学, 2014 年 3 月
- [44] 中村明穂, 谷 雲鵬, 谷口耕治, 柴田直哉, 高木英典, 幾原雄一: ゼロ歪み LIB 正極材中における異相境界の ABF-STEM 解析, 日本セラミックス協会, 慶應義塾大学, 2014 年 3 月
- [45] 河野洋人, Andreas W.Rost, 竹下直, 魯楊帆, 高山知弘, 高木英典: 擬一次元カルコゲナイド Ta₂NiCh₅ (Ch = S, Se, and Te) における圧力効果日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014 年 3 月
- [46] 葉山慶平, A. W. Rost, J. Nuss, C.Muehle, 高木英典: 逆ペロブスカイト A₃EO (A = Ca, Sr, Ba; E = Pb, Sn) における三次元ディラック電子系の物性, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014 年 3 月
- [47] 魯楊帆, 高山知弘, A. W. Rost, 河野洋人, 桂ゆかり, 高木英典: 擬一次元化合物 Ta₂NiCh₅ (Ch = S, Se, and Te) における相転移と電子相図, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014 年 3 月

招待講演

- [48] 高木英典: 量子スピン液体の舞台としての無機遷移金属酸化物, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 2014 年 3 月

(国内会議)

一般講演

- [37] 加藤晃彦, 高山知, R. E. Dinnebier, 高木英典: 三次元ハニカム構造を持つ新規イリジウム酸化物 β -Li₂IrO₃ の磁性, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013 年 9 月
- [38] 河底秀幸, 松野丈夫, 平井大悟郎, 高木英典: BaPbO₃/BaBiO₃ 超格子の超伝導, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013 年 9 月
- [39] 平井大悟郎, M. Breholm, J. M. Allred, J. Krizan, L. M. Schoop, Q. Huang, J. Tao, R. J. Cava: CsW₂O₆ の金属絶縁体転移におけるジグザグ鎖の形成, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013 年 9 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み合わせることで、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1500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いかにして見出すか。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、銀河のクラスター解析、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

摂動論にもとづく宇宙大規模構造の非線形性の記述

宇宙大規模構造の非線形進化を精密に記述する方法の一つとして、摂動論にもとづく解析計算手法の研究が近年、急速に進展している。こうした手法は、銀河サーベイなどの観測から求まるパワースペクトルや相関関数の理論テンプレートの計算に有用で、将来の高精度観測に向けて、今後さらなる改良が必要である。本研究では、(1)ハローモデルと組み合わせ、通常、摂動論だけで記述できない小スケールの重力進化の影響を取り入れたダイナミックレンジの広い理論計算手法の開発、(2)多点プロパゲーター展開と呼ばれる摂動計算にもとづき、パワースペクトルの高次補正を高速計算するために必要なプロパゲーターのフィッティング公式を導出、(3)非局所的なバイアスの性質を考慮した多点プロパゲーター展開を銀河・ハローのバイスペクトルに応用し、原始非ガウス性がある場合の大スケールにおけるバイスペクトルの理論予言を行うなど、定量的かつ実用的な側面を中心に、精密理論テンプレートとしての摂動計算手法を発展させた。[15, 19, 21]

弱い重力レンズ効果のカール成分／B-モードパワースペクトル

遠方銀河の撮像データや宇宙マイクロ波背景放射のマップを使った重力レンズ観測は、今や宇宙論観測の重要な手段として確立し、さまざまな宇宙論的制限が得られるようになっていく。重力レンズ効果の主な原因は前景の宇宙大規模構造が作るスカラー型摂動だが、宇宙ひもや原始重力波などが作るベクトル／テンソル型摂動によっても重力レンズ効果が起きることが知られており、スカラー型摂動では作れないカール成分／B-モード成分と呼ばれる特徴的な空間相関が現れる。そのため、カール成分／B-モード成分をもつ重力レンズ効果が検出できれば、宇宙ひもや原始重力波などの決定的証拠となり得る。本研究では、スカラー／ベクトル／テンソル型摂動全てを考慮した重力レンズ効果の公式を導出し、全角運動量法と呼ばれるテクニックを使って、重力レンズ観測の基本観測量である角度パワースペクトルの表式を系統的に導いた。得られた表式をもとに、宇宙ひものネットワークが作る重力レンズ効果の角度パワースペクトルを理論計算し、それをテンプレートとして用いることで、Planck / Atacama Cosmology Telescope による宇宙マイクロ波背景放射の観測データから、宇宙ひもの存在に対して強い制限を得た。[17, 18]

弱非線形領域における赤方偏移歪みを用いた重力理論の検証法

宇宙論的スケールにおける重力理論の検証法の1つとして、近年、銀河サーベイを用いた赤方偏移歪みの測定が注目されている。赤方偏移ゆがみから密度ゆらぎの成長率がわかるため、バリオン音響振動などによる宇宙膨張の観測と組み合わせることで、宇宙論的スケールでの一般相対論の検証、および修正重力理論に対する制限が可能になるのである。ただし、重力進化や赤方偏移ゆがみ自身のもつ非線形性により、観測的に線形と呼べるスケールは限られており、重力理論の検証には非線形効果を取り入れた理論テンプレートが不可欠である。本研究では、摂動論にもとづく精密理論テンプレートをもとに、一般相対論の新たな検証方法として、赤方偏移ゆがみの観測から特異速度場を再構築する方法論を開発した他、 $f(R)$ 重力と呼ばれる修正重力理論の下で、非線形性を正しく取り入れた赤方偏移ゆがみの理論テンプレートを初めて構築した。後者については、 N 体シミュレーションのデータをベースに理論テンプレートの妥当性を検証した上で、赤方偏移ゆがみから重力理論に対してどれだけ強い観測的制限が得られるか調べた。その結果、従来のように、一般相対論にもとづく理論テンプレートでは、あまり強い制限が得られないばかりか、結果がバイアスされる可能性があることを突き止めた。将来観測から一般相対論の「ずれ」を正確に特徴づけるには、一般相対論を超える修正重力理論のフレームワークで精密な理論テンプレートの構築が不可欠になると予想される。[16, 20]

楕円銀河の平均的な星質量及びダークマター分布

これまで発見された 161 個の強い重力レンズ天体の統計解析により、楕円銀河の平均的な質量分布を求めた。総質量密度分布はおよそ等温球に近いものであり、これは他の方法で求めた密度分布と無矛盾である。観測された密度分布は星質量とダークマター分布の和であり、この両成分は星の初期質量関数 (IMF) の不定性を考慮した場合大きく縮退しそれぞれの成分の分離は非常に難しくなる。我々は重力レンズクエーサー系で観測されるマイクロレンズ現象に着目し、これが星質量の割合を直接制限し縮退をやぶることを見いだした。この方法により、楕円銀河の IMF は低質量星を多く含むいわゆる Salpeter 型のものでよく一致すること、またダークマター分布はバリオン効果の考慮しない単純な N 体計算から予測される NFW プロファイルとよく一致し、銀河形成に伴って起こると思われていた断熱収縮の効果がほとんどみられないことがわかった。このことは楕円銀河が典型的に複雑な星形成史を経て形成されたことを示唆するのかもしれない。[22]

銀河団の強い重力レンズ現象における視線方向の構造の寄与

10 個の強い重力レンズが観測されている銀河団に対する MMT 及びマゼラン望遠鏡による分光追観測の結果を詳しく再解析することで、強い重力レンズ現象における視線方向の構造の寄与を調べた。その結果銀河団中心方向の視線方向に有意に多数の銀河群が存在することがわかった。この視線方向効果は従来考えられていたよりもずっと大きく、重力レンズ銀河団の解析にさまざまな影響を及ぼするという意味において重要である。[23]

将来の弱重力レンズ観測における軽いグラビティーノの質量の決定可能性

重力が超対称的であるとすると、重力子 (グラビトン) の超対称性粒子であるグラビティーノの存在が予言される。グラビティーノの特徴的な点は、極めて寿命が長いことにある。これはグラビティーノが重力及び超対称性の破れを通してのみ相互作用することの帰結である。特に、ゲージ伝達型超対称性モデルではグラビティーノの寿命は宇宙年齢よりも長い場合、宇宙最初期に作られたグラビティーノは宇宙大規模構造にその痕跡を残す。グラビティーノが宇宙大規模構造に与える影響 (冷たい暗黒物質の予言からのずれ) はその質量に比例するため、弱重力レンズ効果の観測は質量の上限を与える。一方、加速器実験の超対称性粒子に対する発見能力はその質量が軽いほど高くなるため、加速器実験はグラビティーノの質量の下限を与える。つまり、弱重力レンズ効果の観測及び加速器実験を組み合わせることで、ゲージ伝達型超対称モデルを完全に調べることが可能である。特に、Large Hadron Collider (LHC) の 14 TeV 運

転により 5eV 以下のグラヴィティーノをもつゲージ伝達型超対称模型を発見可能であり、Subaru Hyper Suprime-Cam (HSC) はグラヴィティーノ質量が 4eV であった場合には ± 1 eV の精度で決定可能であることを示した [24, 48]。

スタック解析による銀河遠赤外放射量測定が与えるダスト分布への示唆

Ménard et al.(2010, 以下 MSFR) は SDSS 測光銀河の分布と遠方クエーサーの色との角度相関を用いて、銀河周辺での平均的なダスト赤化量を測定し、その結果銀河の中心から数 Mpc のスケールにまで、クエーサーの赤化が見られることを示した。この赤化が中心の銀河に付随するダストのみによるものとするれば、ダストの分布が普遍的に、銀河ディスク (~10kpc) をはるかに超えた銀河団スケールまで広がっていることを意味する。これは星間ダストの輸送過程に大きな示唆を与える発見であると同時に (Zu et al. 2011)、大規模構造の宇宙論的解析にも系統的誤差を生む可能性がある (Ménard, Kilbinger & Scranton 2010, Fang et al. 2010)。

我々は MSFR で用いられた SDSS 銀河サンプルを IRAS の全天遠赤外放射マップ上でスタックすることで、SDSS 銀河およびこれに付随する赤外放射量の測定を行った。遠赤外放射の主な寄与はダストによるものと考えられるため、MSFR とスタック解析はそれぞれダストの吸収量と放射量という独立な物理量を通して、本質的に同等の観測結果を示したものと期待される。MSFR によるダスト赤化と、スタック解析により得られたダスト放射のプロファイルを比較した結果、検出されたダストは典型的星間ダストの温度 (~20K) と整合的であった。また、MSFR で検出されたダストの約 50% は SDSS 銀河内の星間ダストのクラスタリングによる統計的重ねあわせとして説明可能であることを示した。[74, 101, 102]

弱重力レンズモルフォロジー統計

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。一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。そのため、多くの将来観測において重力レンズ解析は主要科学目的に位置づけられている。

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、二次元場に対しては、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。このマップを利用して、先行研究では考慮されていなかったいくつかの観測効果を含めた統計解析を行い、将来観測におけるミンコフスキー汎関数解析の適応性をテストした。第一段階として、実際の観測に含まれるマスク領域がどのようにミンコフスキー汎関数解析に影響するかを調べた。結果として、マスクの領域の有無によって、ミンコフスキー汎関数の値はバイアスされることがわかった。さらに、このバイアスの度合いは現段階ではシミュレーションによってのみ補正することが可能であることも明らかにした。これは、1000 平方度以上の広視野観測領域が予定される将来観測において、ミンコフスキー汎関数解析によって宇宙論的な制限をつけるためには、観測領域と同程度の広視野をカバーした数値シミュレーションが必要になることを意味する。[25]

これをうけて、現存する重力レンズデータである Canada–France–Hawaii Telescope Lensing Survey (CFHTLenS) にミンコフスキー汎関数解析を適応し、宇宙論パラメータ推定における系統的な研究を行った。CFHTLenS は合計 154 平方度をカバーする 4 つの領域からなる重力レンズデータである。CFHTLenS における観測効果を網羅するため、観測と同じ視野を確保する convergence マップを作成し、直接的に観測結果とシミュレーション結果を比較した。複数の観測効果を取り入れると、ミンコフスキー汎関数による宇宙論的な制限は、先行研究の予言する制限に比べ数倍悪化するが、依然として暗黒エネルギーの状態方程式パラメータをパーセントレベルの精度で決定できることを明らかにした。この結果から、すばる望遠鏡次世代観測 Hyper Suprime Cam での制限は、既存の宇宙論的な制限から大きく向上することが予測される。さらに、二点相関関数と同時にミンコフスキー汎関数を用いることで、よく知られる宇宙論パラメータ間の縮退を解くことに成功した。この結果は、重力レンズ観測だけで、宇宙モデルを厳しく制限できる可能性を示しており、応用上極めて重要である。[26, 49, 75, 76, 114]

非等方銀河クラスタリングの解析による重力理論の宇宙論的検証

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、重力理論の宇宙論的検証が可能となる。

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。

我々は、宇宙論的スケールに渡り 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を用いて、SDSS LRG 非等方パワースペクトル (非等方銀河クラスタリングの二点統計量) 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、一般相対論の検証を行った。[28, 29, 50, 52, 115] また、宇宙定数を導入することなく宇宙の加速膨張を説明し得る重力理論である $f(R)$ 重力理論に対しても、理論テンプレートを構築 [20] し、赤方偏移歪みによる構造成長の測定からこの理論への制限を得た。[77, 78, 51, 52, 115]

宇宙論的 N 体シミュレーションによる非等方銀河クラスタリングの解析

前述の SDSS LRG サンプルは、サンプルのうち 95% もの LRG が周囲に LRG を伴わず単独で存在するため、暗黒物質ハローの中心と対応していると考えられていた。しかし、 N 体シミュレーションを用いて、LRG の非等方クラスタリングを再現するためには、暗黒物質ハローの中心に LRG を対応づけるだけでは不十分であることを明らかにし、さらに、ハロー中のより局所的な重力束縛系であるサブハローと LRG を対応づけることで非等方クラスタリングを再現できることを示した。また、サブハローを用いた模擬銀河カタログは理論テンプレートとして使用することができ、宇宙論パラメータの推定がこれまでよりも高精度に行うことができる可能性を示した。[27]

非等方銀河クラスタリング解析における高次統計量が持つ情報量の評価

これまでの研究では、非等方銀河クラスタリングの解析にはパワースペクトル (二点統計量) が用い

られてきたが、非等方銀河クラスタリングをより精密に特徴付けるためにはより高次の統計量が必要となる。

我々は、銀河クラスタリングの三点統計量であるパワースペクトルを解析することで得られるパラメータの決定精度をフィッシャー解析により評価し、銀河クラスタリング解析におけるパワースペクトルの重要性を明らかにした。[80]

銀河団の X 線観測における静水圧平衡の正当性

銀河団の宇宙論的応用における最も重要な課題は、正確な質量測定である。X 線観測においては、静水圧平衡 (銀河団ガスの圧力勾配と全質量による重力の釣り合い) の仮定を用いて全質量が推定される。我々は宇宙論的シミュレーションから取り出した銀河団を用いて、静水圧平衡の仮定の下で得た質量と真の質量とを比較した。使用したシミュレーション銀河団は SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) シミュレーションから 5 つ、AMR (Adaptive Mesh Refinement) シミュレーションから 1 つの、計 6 つである。解析の結果、静水圧平衡によって求めた質量は真の質量を半径 r_{500} 付近で 1 割程度、 r_{200} 付近で 2 割程度過小評価することがわかった (r_{500} , r_{200} は、その内側の平均密度が宇宙の臨界密度のそれぞれ 500 倍、200 倍となるような半径)。また、その原因は主に銀河団ガスの加速度であることを初めて示した。これは、従来の銀河団の静的モデルの限界と、動的モデルの必要性を示唆するものである。

ダークマター分布におけるボイドを用いた幾何学的宇宙論

宇宙には非常に低密度なボイドと呼ばれる空間が数多く存在し多くの銀河はこのボイドを取り囲むようにして存在する。このボイドは宇宙の大規模構造において、ハローと相補的な観測対象になりうるとして注目を集めている。ボイドにおける基本的な統計量はボイドの体積分布関数であり、これはハローにおける質量関数に相当する。この体積分布関数についてはハローの質量関数と同様に宇宙の構造成形理論を基にした様々な理論予測がなされており、大規模構造のトレーサーとしてボイドを用いた宇宙論パラメータの制限可能性が議論されている。今回我々はボイドの体積分布関数の小スケールでの振る舞いが、宇宙論によらず純粋に幾何学的な考察のみから $n(V) \propto V^{-2}$ という関係式に従う事を発見した。

この研究では、これらの結果が実際に宇宙論的に実現されているかを確かめるために N 体シミュレーションを用いて宇宙論的スケールにおけるボイド分布を調べた。ここでのボイドとは、ダークマターの密度が疎な空間の事である。ボイド分布を計算するに際して、観測から示唆されるようにボイドは球状に広がっていると仮定した。結果としてボイドの体積分布関数は、小スケール ($< 1000 Mpc^3$) では幾何学的な考察から予測される $n(V) \propto V^{-2}$ に一致

し、それより大きなスケールでは指数関数的に落ちていく、という Schechter 関数的な振る舞いをする事が分かった。この結果は Sheth & Weygaert による extended Press-Schechter theory や Bond et al. の peak theory を応用した初期密度分布の極小値にボイドができると考えた場合のボイド分布と整合的である。また、過去の 3次元大規模赤方偏移サーベイから得られた銀河におけるボイドの体積分布関数とも一致している。このことは観測におけるボイド分布が Λ CDM モデルと整合することも同時に示唆している。 [32]

ALMA による遠方サブミリ波銀河観測の検出可能性

近年、高感度・高分解能のサブミリ波銀河観測が ALMA によって可能となり、とくに電離炭素輝線 ([CII] 輝線) による遠方サブミリ波銀河検出が盛んになされている。日本でも [CII] 輝線銀河をターゲットにしたサーベイが計画されており、我々は宇宙論的銀河形成シミュレーションを用いて、ALMA による [CII] 輝線銀河の検出可能性を調べた。本モデルでは赤外線光度を UV 光度のダスト減光量から計算し、これにより得られた赤外線光度関数は既存の観測結果とよく一致する。[CII] 輝線光度は近傍宇宙の観測で見積もられた赤外線光度との経験則を用いて計算した。さらに現実的な観測条件を ALMA observing tool を用いて設定した。

結果として、赤方偏移 6 - 7、視野 70 秒角で [CII] 輝線光度が $1.2 \times 10^8 L_{\odot}$ 以上の銀河が検出可能な観測条件では、1-3 天体程度が検出可能であることを明らかにした [58, 90]。また、2025 年打ち上げ予定の SPICA-SAFARI による高視野 (2 分角)、高感度 ($32 \mu\text{Jy}$, 5σ) の観測と、ALMA による高分解能 (1 秒角以下) の追観測を組み合わせる、電離酸素・電離窒素輝線の観測による金属量診断を提案した [59]。さらに ALMA cycle 2 における deep survey のための見積りでは総観測時間を 50 時間と設定し、[CII] 輝線検出に適した視野と感度を調べた。deep survey においては感度ではなく観測体積を優先する観測が適し、標準的なモデルに基づいた計算によると数天体程度の [CII] 輝線銀河が検出可能であると結論した。

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星生成銀河の性質を調べた。個々の銀河の星形成史、金属量、星質量から特に遠赤外線域の SED を計算し、電離酸素による輝線の明るさを推定した。ハッブル望遠鏡の UDF12 サーベイで見つかったような銀河には、酸素輝線で十分明るくなるものもあることを明らかにし、ALMA 望遠鏡により赤方偏移 8 以上の銀河を検出し、同定することが可能であると提唱した [10]。

5.1.2 系外惑星

トランジット時刻変動を用いた複数トランジット惑星系の探求

2009 年の打ち上げ以来、ケプラー宇宙望遠鏡が発見したトランジット惑星は、候補も含めて 3000 以上を数える。これらの惑星の質量を決定することは、惑星系の性質の統計的理解に欠かせない作業である。一方、ケプラーがターゲットとする主星の多くは暗いため、従来通りの視線速度法による質量の決定は困難である。そこで近年よく用いられるのが、複数トランジット惑星系におけるトランジット時刻変動 (惑星どうしの重力相互作用によるトランジットの一定周期からのずれ) の解析である。本研究では、この手法を視線速度法と比較しその信頼性と限界を明らかにするとともに、複数惑星系の性質を系統的に調べることを目的とし、ケプラーによって発見された 2 つの複数トランジット系 (KOI-94 および Kepler-51) においてトランジット時刻変動の解析を行った。その結果、1. KOI-94 系の 4 惑星候補のうち、3 つの質量を精密に決定し、これらが惑星であるという確証を得た。2. 特に、4 つのうち最大の惑星の質量は、視線速度法によって独立に得られた値の半分程度となった。この差異の原因は未だ不明だが、いずれかの質量決定法に系統誤差が含まれる可能性を示唆する。3. Kepler-51 系の 3 惑星すべてが、これまで発見された中で最も低密度の惑星であることを発見した。このような惑星の存在は現在の惑星形成理論では予想されておらず、標準モデルに対する観測的制限となる。4. 上記に加え、KOI-94 系の 3 惑星もまた平均と比べてかなり低密度であることを示した。これらの結果は、低密度惑星の存在が短周期の複数トランジット惑星系の普遍的な特徴であることを支持する。 [8, 33, 45, 56, 87, 89]

系外惑星系におけるスピン軌道傾斜角の潮汐進化

中心星自転軸と惑星公転軸のなす角 (スピン軌道傾斜角 λ) は、惑星系形成の初期条件およびその後の軌道進化の情報を持つ重要な観測量である。これまで行われたトランジット惑星に対するロスター・マクローリン効果の測定により、系外惑星系のスピン軌道傾斜角は太陽系のように必ずしも小さくはなく、幅広い分布をもつことが明らかにされている。今回我々は、太陽型星とホット・ジュピターからなる単純な系に対し、平衡潮汐と星内部での慣性波の散逸を同時に考慮してスピン軌道傾斜角の潮汐進化を調べた。その結果、系は瞬時に $\lambda = 0^\circ$ 、 $\lambda = 90^\circ$ 、 $\lambda = 180^\circ$ のいずれかの状態へと移行し、さらに後者 2 つはやがて $\lambda = 0^\circ$ に落ち着く準安定な状態であることを明らかにした。即ち、今回用いたモデルでは、観測で得られるような中間的な値のスピン軌道傾斜角を再現することは困難であった。従って、観測された幅広い軌道傾斜角の分布は、外惑星も含めたより複雑な相互作用の存在や、原始惑星系円盤と中心星の自転方向がそもそもずれている可能性を示唆する。 [9, 57, 88]

5.1.3 星形成

初代星の質量分布

宇宙最初の星形成はミニハロー中に生まれたガス雲の重力崩壊から始まり、その後誕生した原始星へのガス降着により星質量が増加する。我々はこれまで宇宙論シミュレーションとローカルな輻射流体計算を組み合わせてこの間の進化を追跡し、原始星からの紫外光フィードバックにより最終的にガス降着が遮断されて星質量が定まる描像を確立してきた。今年度は宇宙論シミュレーションから星形成ガス雲のサンプルを100例以上採り、全ての場合で最終星質量が定まるまでの進化を計算することで、初めて初代星の質量分布にせまる統計的な研究を行った。結果として、初代星の質量分布は数十から数百太陽質量にわたる幅広い分布を持つことを示した。この多様性の起源は星形成ガス雲の質量や角運動量の多様性を反映したものである。星質量のこれらの物理量に対する依存性も明らかにし、星形成のごく初期の進化から最終質量を与えるモデル化が可能であることを示した [12]。

超巨大ブラックホールの種としての超大質量星形成

最近の観測によると赤方偏移6より遠方の宇宙ですでに $10^9 M_{\odot}$ を超えるような超巨大ブラックホールが観測されており、ビッグバンから間もない頃にこんな巨大な天体がどうやってできたのか問題になっている。最近さかんに議論されているのは $10^5 M_{\odot}$ を超えるような超大質量星がごくまれに生まれ、この死後残された巨大なブラックホールが種になることで形成時間を短く済ますシナリオである (Direct Collapse シナリオ)。我々はこのとき予想される急速なガス降着の下での原始星進化を星内部構造を解いて調べている。今年度はこれまでの計算を拡張し、はじめて星質量が $10^5 M_{\odot}$ にいたる急速降着する超大質量星の進化を明らかにした。この間星の半径は非常に大きいまま進化し (supergiant protostar)、有効温度は1万度を上回ることがない。このため星の光度は非常に大きくなるにも拘らず、普通の初代星形成で予想されている紫外光フィードバックは働かない。ガス降着は阻害されずに進み、超大質量星形成が可能である道筋を示した。一方で星全光度は矮小銀河一つに匹敵するほど明るくなることから、JWST による将来観測でこうした天体を検出できることも予言した [13]。

低金属量のガス雲の重力収縮

大質量 (数10–1000太陽質量) の初代星 [12] から現在の星 (0.1太陽質量) への星質量の遷移の過程はまだよくわかっていない。本研究では、星質量遷移の最低限の条件として、ダストによる冷却の効果を調べる。ダスト冷却が効果的となる金属量を求めるため、我々は準解析的な計算により、ガス雲中心の

進化中の温度進化を求めた (ワンゾーン計算)。このとき、先行研究では無視されていたダスト成長 (気相中の金属原子がダストに降着する現象) を進化計算と整合的に扱った [31]。初期宇宙において、ダストは超新星によって供給される。本研究では、収縮初期のダスト量とサイズ分布は超新星噴出物の進化の計算から整合的に得られたモデルを用いた。その結果、低質量の星が形成される金属量は、超新星モデルに大きく依存することが分かった。先行研究では、星形成のモデルとして、ある金属量より大きい領域では低質量星形成モードに移行するとしているが、本研究では、遷移の条件がより複雑であることを詳細なモデルにより示した。

5.1.4 その他

2013年8月に須藤研助教の樽家篤史氏が、京都大学基礎物理学研究所准教授に転出した。後任の助教には大栗真宗氏が就いた。

<受賞>

- [1] 平野照幸、第30回井上研究奨励賞 「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」、井上財団、2014年2月4日
- [2] 成田憲保、第6回井上リサーチアワード 「スーパーアースとは何か? その組成と形成過程の解明」、井上財団、2014年2月4日
- [3] 成田憲保、日本天文学会研究奨励賞、日本天文学会、2014年3月21日
- [4] 増田賢人、平成25年度東京大学大学院理学系研究科研究奨励賞 (修士課程) 「トランジット時刻変動を用いた超低密度惑星の発見」、2014年3月24日
- [5] Akira Oka: Outstanding Presentation Award in The 23rd Workshop on General Relativity and Gravity in Japan (Hirotsaki University, 11/5/2013)

<報文>

(原著論文)

- [6] Toshiya Kashiwagi, Kazuhiro Yahata, & Yasushi Suto: “Detection of Far Infrared emission from Galaxies and Quasars in the Galactic extinction map”, Publication of Astronomical Society of Japan **65**(2013)43 (arXiv:1212.0307)
- [7] 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 **66**(2013)R1 (arXiv:1206.0737)

- [8] Kento Masuda, Teruyuki Hirano, Atsushi Taruya, Mikiko Nagasawa, & Yasushi Suto: “Characterization of the KOI-94 system with transit timing variation analysis: implication for the planet–planet eclipse”, *The Astrophysical Journal* **778** (2013) 185 (arXiv:1310.5771)
- [9] Yuxin Xue, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Teruyuki Hirano, Yuka Fujii, & Kento Masuda, “Tidal evolution of the spin-orbit angle in exoplanetary systems”, *The Astrophysical Journal* **784**(2014)66 (arXiv:1401.5876)
- [10] Akio Inoue, Ikkoh Shimizu, Yoichi Tamura, Hiroshi Matsuo, Takashi Okamoto, & Naoki Yoshida: “ALMA Will Determine the Spectral Redshifts of 8 Galaxies by OIII Lines”, *The Astrophysical Journal Letters*, **780** (2014) 18
- [11] Yuki Shiromoto, Hajime Susa, & Takashi Hosokawa: “Generation of Magnetic Field on the Accretion Disk around a Proto-first-star” *ApJ*, **782** (2014) 108
- [12] Shingo Hirano, Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida, Hideyuki Umeda, Kazuyuki Omukai, Gen Chiaki, & Harold W. Yorke: “One Hundred First Stars: Protostellar Evolution and the Final Masses” *ApJ*, **781** (2014) 60
- [13] Takashi Hosokawa, Harold W. Yorke, Kohei Inayoshi, Kazuyuki Omukai, & Naoki Yoshida: “Formation of Primordial Supermassive Stars by Rapid Mass Accretion” *ApJ*, **778** (2013) 178
- [14] Kohei Inayoshi, Koichiro Sugiyama, Takashi Hosokawa, Kazuhito Motogi, & Kei Tanaka: “Direct Diagnostics of Forming Massive Stars: Stellar Pulsation and Periodic Variability of Maser Sources” *ApJ*, **769** (2013) 20L
- [15] Patrick Valageas, Takahiro Nishimichi & Atsushi Taruya: “Matter power spectrum from a Lagrangian-space regularization of perturbation theory”, *Physical Review D* **87** (2013) 083522
- [16] Yong-Seon Song, Takahiro Nishimichi, Atsushi Taruya & Issha Kayo: “Chasing unbiased spectra of the Universe”, *Physical Review D* **87** (2013) 123510
- [17] Daisuke Yamauchi, Toshiya Namikawa & Atsushi Taruya: “Full-sky formulae for weak lensing power spectra from total angular momentum method”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **08** (2013) 051
- [18] Toshiya Namikawa, Daisuke Yamauchi & Atsushi Taruya: “Constraining cosmic string parameters with curl mode of CMB lensing”, *Physical Review D* **88** (2013) 083525
- [19] Francis Bernardeau, Atsushi Taruya & Takahiro Nishimichi: “Cosmic propagators at two-loop order”, *Physical Review D* **89** (2014) 023502
- [20] Atsushi Taruya, Kazuya Koyama, Takashi Hiramoto & Akira Oka: “Beyond consistency test of gravity with redshift-space distortions at quasilinear scales”, *Physical Review D* **89** (2014) 043509
- [21] Shuichiro Yokoyama, Takahiko Matsubara & Atsushi Taruya: “Halo/galaxy bispectrum with primordial non-Gaussianity from integrated perturbation theory”, *Physical Review D* **89** (2014) 043524
- [22] Masamune Oguri, Cristian E. Rusu & Emilio E. Falco: “The Stellar and Dark Matter Distributions in Elliptical Galaxies from the Ensemble of Strong Gravitational Lenses”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **439** (2014) 2494
- [23] Matthew B. Bayliss, Traci Johnson, Michael D. Gladders, Keren Sharon & Masamune Oguri: “Line-of-Sight Structure Toward Strong Lensing Galaxy Clusters”, *The Astrophysical Journal*, **783** (2014) 41
- [24] Ayuki Kamada, Masato Shirasaki & Naoki Yoshida: “Weighing the Light Gravitino Mass with Weak Lensing Surveys”, arXiv:1311.4323
- [25] Masato Shirasaki, Naoki Yoshida, & Takashi Hamana: “Effect of Masked Region on Weak-lensing Statistics”; *The Astrophysical Journal*, **774** (2013) 111
- [26] Masato Shirasaki, Naoki Yoshida “Statistical and Systematic Error in Measurement of Weak Lensing Minkowski Functionals: Application to Canada-France-Hawaii Telescope Lensing Survey”; *The Astrophysical Journal*, 査読済み印刷前
- [27] Takahiro Nishimichi, Akira Oka: “Simulating the Anisotropic Clustering of Luminous Red Galaxies with Subhalos: A Direct Confrontation with Observation and Cosmological Implications”, arXiv:1310.2672
- [28] Akira Oka, Shun Saito, Takahiro Nishimichi, Atsushi Taruya, Kazuhiro Yamamoto: “Simultaneous constraints on the growth of structure and cosmic expansion from the multipole power spectra of the SDSS DR7 LRG sample”, 2014, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* **439**, 2515
- [29] Akira Oka, Shun Saito, Takahiro Nishimichi, Atsushi Taruya, Kazuhiro Yamamoto: “Anisotropic Clustering of the SDSS LRG as a Dual Probe of Growth of Structure and Cosmic Expansion”, 2014, *Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12)*, 013096,
- [30] 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
- [31] Gen Chiaki, Raffaella Schneider, Takaya Nozawa, Kazuyuki Omukai, Marco Limongi, Naoki Yoshida, and Alessandro Chieffi: “Dust grain growth and the formation of the extremely primitive star SDSS J102915+172927”, *MNRAS*, **439** (2014) 3121

- [32] Gibbons, G. W.; Werner, M. C.; Yoshida, N. & Chon, S.: “On de Sitter geometry in cosmic void statistics”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 438, Issue 2, p.1603-1610
- [33] Kento Masuda: “Very low density planets around Kepler-51 revealed with transit timing variations and an anomaly similar to a planet–planet eclipse”, *The Astrophysical Journal* **785** (2014) 53 (arXiv:1401.2885)
- (国内雑誌)
- [34] 須藤靖: “注目の多い雑文 その二十三: 科学者の品格”, 東京大学出版会 UP **488**(2013)6月号, pp.24–31
- [35] 須藤靖: “注目の多い雑文 その二十四: We are “the” Nobody”, 東京大学出版会 UP **491**(2013)9月号, pp.31–37.
- [36] 須藤靖: “解き尽くせないから面白い 宇宙原理と人間原理”, *MOKU* **260**(2013)11月号, pp.62–71.
- [37] 須藤靖: “もうひとつの地球から眺める我が地球”, *HUMAN* **5**(2013)12月号, pp.123–130.
- [38] 須藤靖: “注目の多い雑文 その二十五: つれづれなるまま: プリンストン雑感”, 東京大学出版会 UP **494**(2013)12月号, pp.24–32.
- [39] 須藤靖: “考える冬: 世界は法則に支配されている (のだろうか?)”, *考える人* **47**(2013)冬号, pp.288–289.
- [40] 須藤 靖: “天文学は invaluable”, *MOKU* **262**(2014)1月号, pp.34–37.
- [41] 須藤靖: “注目の多い雑文 その二十六: 人生に悩んだらモンテニー・ホールに学べ”, 東京大学出版会 UP **497**(2014)3月号, pp.12–21.
- [42] 須藤靖 朝日新聞 asahi.com webronza 科学・環境論説 2013年4月10日、6月4日、6月27日、8月6日、9月10日、10月1日、11月5日、12月26日、2014年1月16日、3月5日、3月21日
- [43] 須藤靖 読売新聞 書評 2013年4月14日、4月21日、4月28日、5月12日、5月26日、6月2日、6月16日、7月7日、7月14日、7月28日、8月4日、8月18日、9月1日、9月22日、10月6日、10月13日、10月27日、11月10日、12月8日、12月22日、2014年1月5日、1月12日、1月19日、2月2日、3月2日、3月16日、3月23日、3月30日
- (学位論文)
- [44] 鄭昇明: “初期宇宙における始原ガス雲と巨大ブラックホール” (修士論文)
- [45] Kento Masuda: “Characterization of multi-transiting planetary systems with transit timing variations” (修士論文)
- (著書)
- [46] 須藤靖・伊勢田哲治: “科学を語るとはどういうことか 科学者、哲学者にモノ申す”, 河出ブックス河出書房新社 (2013年6月刊行、304ページ)
- [47] 日本評論社編集部編: “物理学ガイドランス”, 日本評論社 (2014年2月刊行) (第2章 吉田直紀担当)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [48] Ayuki Kamada: “Cosmological constraint on light gravitino mass from cosmic shear”; CosPA 2013, (Hawai’i, USA, 11/12-15, 2013)
- [49] Masato Shirasaki: “Weak Lensing Morphological Analysis in CFHTLenS”; ANISOTROPIC UNIVERSE FROM MICROWAVE TO ULTRA-WAVE LENGTH ENEGIES (Amsterdam, Nederland, 9/26, 2013)
- [50] Akira Oka: “Anisotropic Clustering of the SDSS LRG as a Dual Probe of Growth of Structure and Cosmic Expansion”; The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPs (Oral, Chiba, 7/15/2013)
- [51] Akira Oka: “Cosmological Upper-Bound for $f(R)$ Gravity through Redshift-Space Distortion”; The 23rd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (Oral, Hirosaki University, 11/5/2013)
- [52] Akira Oka: “Detectability of Deviation from General Relativity through Redshift-Space Distortions”; Essential Cosmology for Next Generation (Poster, Mexico, 1/13/2014)
- [53] Gen Chiaki: “Growth of dust grains in a low-metallicity gas and its effect on the cloud fragmentation”, EWASS 2013 - Symposium 5, (Turku, 7/8–9, 2013)
- [54] Gen Chiaki: “Growth of dust grains in a low-metallicity gas and its effect on the cloud fragmentation”, PROTOSTARS & PLANETS VI, (Heidelberg, 7/15–20, 2013)
- [55] Gen Chiaki: “Collapsing low-metallicity gas clouds with the growth of dust grains”, The Life Cycle of Dust in the Universe, (Taipei, 11/18–22, 2013)
- [56] Kento Masuda, Teruyuki Hirano, Atsushi Taruya, Mikiko Nagasawa, & Yasushi Suto: “Characterization of the KOI-94 system with photometric light curves and transit timing variation analysis: implication for the planet–planet eclipse”; Protostars & Planets VI, Heisenberg, 7/15–20, 2013)
- [57] Yuxin Xue, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Teruyuki Hirano, Yuka Fujii, Hajime Kawahara, & Kento Masuda, “Numerical study of spin-orbit misalignment and realignment”; Protostars & Planets VI, Heisenberg, 7/15–20, 2013)
- [58] Natsuki Hayatsu, Naoki Yoshida, & Yuichi Matsuda: “Disribution of IR and submillimeter line emitting galaxies in cosmological simulations”; SPICA conference 2013 (Tokyo, 6/18-6/21, 2013)
- [59] Natsuki Hayatsu, Naoki Yoshida, & Yuichi Matsuda “Disribution of CO and [CII] emitting galaxies in cosmological simulations”; East Asia ALMA Development Workshop 2013 (Tokyo, 7/8-7/9, 2013)

招待講演

- [60] Yasushi Suto: “Message from Science Council of Japan”; invited opening address at SPICA Science Conference “From Exoplanets to Distant galaxies: SPICA’s New Window on the Cool Universe” (Univ. of Tokyo; June 18, 2013)
- [61] Naoki Yoshida: “Direct Integration of the Collisionless Boltzmann Equation”; Exascale Computing in Astrophysics (Ascona, Switzerland, September 2013)
- [62] Naoki Yoshida: “Low-mass Stars, Massive Blackholes, and Luminous Supernovae in the Early Universe”; IoA Conference “Mind the Gap” (Cambridge, UK, July 2013)
- [63] Naoki Yoshida: “Cosmic Dawn: Conference Summary”; Cosmic Dawn (Ringberg, Germany, June 2013)
- [64] Naoki Yoshida: “Hunting for the First Supernovae”; Cosmos Meeting 2013 (Kyoto, May 2013)
- [65] Takashi Hosokawa: “UV feedback in the high-mass star formation”; workshop “Birth and death of high-mass stars: Lesson on newly explored phases of the interstellar medium” (Nagoya univ., 1/9, 2014)
- [66] Masamune Oguri: “Gravitational lensing science with WISH”; WISH Science Workshop “Exploring the Darkness”, (NAOJ, December 2013)
- [67] Ayuki Kamada: “Dark Matter Halos in Warm Dark Matter Models”; Workshop Meudon CIAS 2013 Warm Dark Matter Galaxies in agreement with observation: formation, evolution and supermassive black holes, (CIAS Observatoire de Paris, France, 6/5-7, 2013)

(国内会議)

一般講演

- [68] 細川隆史, Harold W. Yorke, 稲吉恒平, 大向一行, 吉田直紀: “超急速ガス降着による超大質量原始星の進化”; 天文学会 2013 年秋季年会 (東北大学, 9/11, 2013)
- [69] 細川隆史, Rolf Kuiper, Harold W. Yorke 他: “初代星形成質量降着期の 3D 計算”; 初代星・初代銀河研究会 2014 (鹿児島大学, 1/22, 2014)
- [70] 細川隆史, Rolf Kuiper: “初代星形成質量降着期の 3次元シミュレーション”; 天文学会 2014 年春季年会 (国際基督教大学, 3/21, 2014)
- [71] 鎌田歩樹: “暗黒物質の運動学的脱結合が物質密度揺らぎの成長に与える影響”; 日本天文学会 2013 年秋季年会 (東北大学, 9/10-12, 2013)
- [72] 鎌田歩樹: “暗黒物質の運動学的脱結合が物質密度揺らぎの成長に与える影響”; 第 26 回理論懇シンポジウム (東京大学柏キャンパス, 12/25-27, 2013)
- [73] 鎌田歩樹: “暗黒物質の運動学的脱結合が物質密度揺らぎの成長に与える影響とその荷電重粒子への応用”; 日本物理学会第 69 回年次大会 (東海大学湘南キャンパス, 3/27-30, 2014)
- [74] 柏木俊哉, 須藤靖: “スタック解析による銀河遠赤外放射量測定が与えるダスト分布への示唆”; 日本天文学会 2013 年秋季年会 (東北大学, 9/10-9/12, 2013)
- [75] 上崎正人: “Weak Lensing Minkowski Functionals in CFHTLenS”; RESCEU サマースクール (山形県蔵王, 7/26, 2013)
- [76] 上崎正人, 吉田直紀: “CFHTLenS データを用いた重力レンズカタログとモルフォロジー統計”; 日本天文学会 (東北大学, 9/10, 2013)
- [77] 岡アキラ: “SDSS LRG 非等方クラスタリングを用いた $f(R)$ 重力理論に対する制限”; 天文学会 (口頭発表, 東北大学, 9/10/2013)
- [78] 岡アキラ: “Cosmological Test of $f(R)$ Gravity with Anisotropic Galaxy Clustering”; 第二回観測的宇宙論ワークショップ (口頭発表, 国立天文台, 12/4/2013)
- [79] 岡アキラ: “Simulating the Anisotropic Clustering of Luminous Red Galaxies with Subhalos: A Direct Confrontation with Observation and Cosmological Implications”; 第 26 回理論懇シンポジウム (ポスター発表, Kavli IPMU, 12/25/2013)
- [80] 岡アキラ: “バイスペクトルにおける AP 効果の影響”; 天文学会 (口頭発表, 国際基督教大学, 3/20/2014)
- [81] Daichi Suto, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, Yasushi Suto, Klaus Dolag & Renyue Cen “X 線および SZ 効果観測を用いた銀河団質量推定の信頼性” 日本天文学会 2013 年秋季大会, 東北大学 (仙台), 2013 年 9 月 12 日
- [82] 千秋元 “ダスト成長を考慮した低金属量の星形成ガス雲の進化 2” 天文学会 (東北大学, 9/11, 2013)
- [83] 千秋元 “低金属量重力収縮ガス雲中でのダスト成長” 初代星・初代銀河研究会 (鹿児島大学, 1/23, 2014)
- [84] 千秋元 “低金属量ガス雲の重力収縮シミュレーション I” 天文学会 (国際基督教大学, 3/21, 2014)
- [85] 鄭昇明, 平野信吾, 細川隆史, 吉田直紀: “初期宇宙における始原ガス雲と巨大ブラックホール”; 日本天文学会 2014 年春季年会 (国立天文台, March 19–22, 2014)
- [86] 鄭昇明, 平野信吾, 細川隆史, 吉田直紀: “宇宙論的シミュレーションにおける超巨大ブラックホールの種形成”; 初代星・初代銀河研究会 2014 (鹿児島大学, Jan 22–24, 2014)
- [87] 増田賢人, 平野照幸, 樽家篤史, 長沢真樹子, 須藤靖: “TTV を用いた複数トランジット惑星系のパラメータ推定”; 日本天文学会 2013 年秋季年会 (東北大学, 9/11, 2013)
- [88] Yuxin Xue, 須藤靖, 樽家篤史, 増田賢人: “Numerical study of spin-orbit misalignment and realignment II”; 日本天文学会 2013 年秋季年会 (東北大学, 9/12, 2013)

- [89] 増田賢人: “Kepler-51 系における低密度惑星の発見”; 日本天文学会 2014 年春季年会 (国際基督教大学, 3/21, 2014)
- [90] 早津夏己, 吉田直紀, 松田有一: “ミリ波・サブミリ波観測と数値シミュレーションで探る星生成銀河”; 日本天文学会 2013 年秋季年会 (東北大学, 9/12, 2013)
- 招待講演
- [91] 須藤靖: “天文学の心”、プラズマ科学のフロンティア 2013 研究会 (核融合研究所、2013 年 8 月 22 日)
- [92] 須藤靖: “系外惑星研究から宇宙生物学へのロードマップ”、最新の天文学の普及をめざすワークショップ「宇宙論」(Kavli IPMU、2013 年 11 月 19 日)
- [93] 須藤靖: “バイオマーカー研究の現状: from the Pale Blue Dot to beyond a pale blue dot”、生命概念の普遍化—宇宙の生命研究会 (湘南国際村、2013 年 12 月 21 日)
- [94] 吉田直紀: “暗黒宇宙の揺らぎから生まれる星、銀河、ブラックホール”; 第 2 回 NINS コロキウム (静岡県ヤマハリゾートつまこい, 12/16, 2013)
- [95] 吉田直紀: “初代銀河形成”; 初代星初代銀河研究会 (鹿児島大学理学部, 1/22, 2014)
- [96] 細川隆史: “現在と初期宇宙での星形成”; 天文・天体物理 第 43 回若手夏の学校 (8/1, 2013)
- [97] 細川隆史: “初代天体”; SKA 研究会 (東京大学、3/23, 2014)
- [98] 大栗真宗: “宇宙論で期待されるサイエンス”; 2020 年代の銀河サーベイとすばる望遠鏡とのシナジー, (国立天文台, 1/11, 2014)
- [99] 大栗真宗: “光赤外サーベイの将来計画”; 第 2 回銀河進化と遠方宇宙, (東京大学, 3/25, 2014)
- [100] 須藤大地: “銀河団の質量測定バイアス”; 「銀河団の物理」ワークショップ (東京理科大学 (東京)、2013 年 12 月 28 日)
- (セミナー)
- [101] Yasushi Suto: “Far-Infrared Emission from Galaxies and Quasars in the Galactic Extinction Map by Stacking Analysis”; Cosmology lunch talk at Princeton University, September 30, 2013
- [102] Yasushi Suto: “Anomaly in the SFD extinction map and discovery of FIR emission of galaxies by stacking analysis of the SDSS DR7 sample”; CAS seminar at Johns Hopkins University, October 22, 2013
- [103] Yasushi Suto: “Different Cultures, Same Science”; Joint seminar organized by East Asian Studies Program, History of Science Program and Department of Astrophysical Sciences, Princeton University, October 23, 2013
- [104] Naoki Yoshida: “Low-mass Stars, Massive Black-holes, and Luminous Supernovae in the Early Universe”; Star Formation Thursday Seminar (Princeton, USA, November 2013)
- [105] 細川隆史: “High-Mass Star Formation in the Early Universe”; 東京大学天文教室セミナー (6/11, 2013)
- [106] 細川隆史: “High-Mass Star Formation in the Early Universe”; 国立天文台談話会 (7/5, 2013)
- [107] Takashi Hosokawa: “Radiative Feedback from Primordial Protostars and Mass Distribution of the First Stars”; Astrophysikalisches Seminar (Tubingen Univ., Germany, 7/22, 2013)
- [108] 細川隆史: “大質量星の形成”; 九州大学天文セミナー (11/9, 2013)
- [109] Takashi Hosokawa: “The First Stars: their diversity and beyond”; IPMU seminar (1/15, 2014)
- [110] 千秋元: “The first low-mass stars in the universe” (東京理科大学, 9/27, 2013)
- [111] 千秋元: “ダスト成長を考慮した低金属量ガス中の星形成” (甲南大学, 10/9, 2013)
- [112] Masamune Oguri: “Finding and Characterizing Gravitationally Lensed Quasars”; Seminar at Pontificia Universidad Catolica de Chile (Santiago, Chile, October 18, 2013)
- [113] 大栗真宗: “銀河団および銀河内のダークマター分布”; C 研セミナー (名古屋大学, 11/14, 2013)
- [114] Masato Shirsaki: “Weak Lensing Morphological Analysis in CFHTLenS”; Cosmology seminar at Yale University (New Haven, USA, 11/24, 2013)
- [115] Akira Oka: “Cosmological Test of Gravity with Anisotropic Galaxy Clustering”; Observational Cosmology Seminar (京都大学基礎物理学研究所, 12/20/2013)
- (講演)
- [116] 須藤靖: “多重トランジット惑星系 KOI-94 の planet-planet eclipse の発見と TTV 解析”、大阪大学宇宙地球科学教室セミナー (大阪大学、2013 年 6 月 21 日)
- [117] 須藤靖: “夜空を通して世界を知る”、駿台予備学校講演会 (2013 年 6 月 29 日)
- [118] 須藤靖: “もうひとつの地球の色: ペイルブルードットを超えて”、東京大学基金講演会 (東京大学、2013 年 7 月 10 日)
- [119] 須藤靖: “もうひとつの地球の色は何色?”、日本学術会議東北地区会議公開学術講演会サイエンストーク「宇宙ファミリー」(八戸、2013 年 9 月 14 日)
- [120] 須藤靖: “第二の地球の色を解説する”、日本物理学会市民講演会 (高知、2013 年 9 月 20 日)
- [121] 須藤靖: “もうひとつの地球を探す”、日本学術会議サイエンスカフェ (高知、2013 年 9 月 21 日)
- [122] 須藤靖: “宇宙の境界、地球の境界”、東京大学 朝日講座 知の冒険ももっともって考えたい 世界は謎に満ちている「境界線をめぐる旅」(東大法文 2 号館 2 階一番大教室、2014 年 2 月 3 日)
- [123] 吉田直紀: “おほしさま”; 幼稚園児向け講演会 (明石市 Kansai International School, 8/24, 2013)

- [124] 吉田直紀: “シミュレーションによる宇宙進化の研究”; 国立天文台主催 「最新の天文学の普及をめざすワークショップ」 (東京大学柏キャンパス, 11/17, 2013)
- [125] 吉田直紀: “宇宙暗黒の時代”; 第 24 回 東京大学理学系研究科公開講演会 (東京大学, 11/24, 2013)
- [126] 大栗真宗: “すばる望遠鏡で『見る』暗黒宇宙”; SSH 講演会 (出雲高校, 9/28, 2013)

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イ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、添田彬仁助教、博士課程大学院生の仲山将順氏、若桑江友里氏、秋笛清石氏、修士課程大学院生の加藤晃太郎氏、中郷孝祐氏、宮崎慈生氏、新保厚氏、森祐樹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、量子アルゴリズム、エンタングルメント理論、連続変数量子系の量子情報処理、分散型量子情報処理、基底状態を利用した量子情報処理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 量子アルゴリズム

ランダム状態生成アルゴリズム

位相ランダムユニタリアンサンプルは、与えられた基底に関して対角なユニタリ行列のランダムサンプリングを与えるアンサンプルである。我々は、実装が比較的容易な対角量子ゲートのみを用いて、位相ランダムユニタリアンサンプルの t 次までの統計的性質を再現する近似アンサンプル (t -design) を生成する量子アルゴリズムを構築した。そして、量子ビット数の大きな系については、この量子アルゴリズムを用いることによって、状態のランダムサンプリングを与えるランダム状態アンサンプルの t -design に漸近するアンサンプルを生成することが可能であることを示した。本研究は、ドイツ Hannover 大学の中田芳史博士と東京大学工学系研究科の小芦雅斗教授との共同研究である。[担当：村尾]

未知量子ゲート制御化の可能性と不可能性

通常のプログラミングにおける if 構文に相当する量子計算のコマンドが、「制御化された量子ゲート」と呼ばれる量子操作である。制御化された量子ゲートでは、ある量子系に作用するユニタリ量子操作（量子ゲート）が別の量子ビットの状態によって外から制御されている。if 構文は内部でコールするサブルーチンの詳細に依存しないという意味で「汎用的」であり、対応する未知な量子ゲートの制御化は、既存の量子アルゴリズムの汎用性を向上する。

if 構文を量子ゲートの汎用的制御化に単純に拡張すると、「量子ゲートのコール回数を1回に制限し、制御化が正確かつ決定論的に実行されること」を要求することになる。だが、量子ゲートが未知な場合、このような制御化は不可能なことが知られている。

本研究では、決定論性および正確性への制限を緩めて相対位相の自由度を付与し、さらに量子ゲートを複数回コールすることを許しても、未知量子ゲートの制御化は不可能なことを示した。また、さらに量子ゲートの n 乗根のコールを許すと、1量子ビット未知量子ゲートが制御化可能なことを示した。この条件は、多くの量子シミュレーション・アルゴリズムで満たされているため、この制御化方法は有効である。[担当：添田、仲山、村尾]

エネルギーの射影測定の実装とその性能評価の指標の構築

エネルギーの演算子であるハミルトニアンは閉鎖系の時間発展を記述し、また熱浴と接する量子系の平衡状態の性質も決定する基本的な量である。フォン・ノイマンによる量子力学の公理では、すべての可観測量には対応する量子測定が存在するとされるが、一方でハミルトニアンは一般に非局所的な演算子であり、対応するエネルギーの量子測定をどのように実行するかということは自明ではない。このエネルギーの測定の実行方法に関しては、量子力学の黎明期からおよそ 80 年間にわたってさまざまな議論がされてきた。これらの基礎論的な興味加えて、近年、エネルギーの測定のうち“射影測定”と呼ばれるクラスの測定は、揺らぎの定理の実験的検証や、重力波検出といった様々な応用が期待されている。

そこで我々は、測定時間の増加に従い漸近的にエネルギーの射影測定を可能にする量子アルゴリズムを構成し、さらに十分な性能に必要な測定時間を解析した。このアルゴリズムは対象となる系のハミルトニアンを知らなくても実装が可能であり、先行研究からの大きな発展を導いた。さらに、エネルギー射影測定についての性能評価の指標も新たに定式化した。この指標は実装された射影測定による固有値の取得の誤差と、それに伴う状態変化の理想的な射影測定との差を定量化したものであり、計算しやすい量であることが特徴である。我々は指標を定義するのみにとどまらず、計算しやすい指標で既存の操作論的な量の上限を与える関係式を導出した。[担当：仲山、添田、村尾]

5.2.2 エンタングルメント理論

対称性と典型的エンタングルメント

量子系の全ヒルベルト空間でランダムサンプリングをして得られた純粋状態の典型的エンタングルメントは、系のサイズを大きくするに従って非常に大きくなることが知られており、多体量子系のシミュレーションが一般的には困難である要因となっている。一方、物理系においては、何らかの対称性を持つことによって、とりうる状態に制限が加わることが多い。そこで、対称性が典型的エンタングルメントに与える影響を解明するために、置換対称性または並進対称性を持つ状態の典型的エンタングルメン

トがどのようになるかを解析した。その結果、対称性の種類によって、状態集合の典型的エンタングルメントに与える影響の現れ方が異なるという興味深い結果を得た。本研究は、ドイツ Hannover 大学の 中田芳史博士との共同研究である。[担当：村尾]

測定ベース量子計算における因果律とエンタングルメント構造

測定ベース量子計算とは、入力・出力の指定されたグラフで記述されるグラフ状態に単一量子ビット測定を施すことで、入力状態に対するユニタリ変換を実装する量子計算のモデルである。測定の結果によらず特定のユニタリ変換を実装するためには、因果関係に注意して量子ビット測定の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ていることが知られている。Causal flow を持つグラフによって実装されるユニタリ変換は、star pattern transformation と呼ばれる方法を使って量子回路に書き換えることができる。しかし gflow を持ち causal flow を持たないグラフに対して star pattern transformation を適用すると、演算の順序に矛盾のある非因果的な量子回路が得られてしまう。

我々は gflow を持つグラフ状態に対して特定の局所量子操作を行うと、causal flow を持つグラフ状態へと変換されることを示した。gflow を持つグラフ状態を causal flow を持つグラフ状態に変換した後に star pattern transformation を適用することで、gflow を持つグラフによって実装されるユニタリ変換を、演算順序に矛盾のない通常の量子回路で書き表せるようになった。さらに、我々がグラフ状態を変換する際に用いた局所量子操作が、非因果的な量子回路上で非因果的演算を打ち消し合わせる過程と等価であることを示した。よって gflow を持つグラフ状態に直接 star pattern transformation を適用して得られる非因果的な量子回路は、非因果的演算を打ち消し合わせて通常の量子回路へと変換できることが示された。[担当：宮崎、Hajdušek、村尾]

幾何学的エンタングルメント測度の数値的解析

量子情報分野において多体エンタングルメントの解析は重要な課題であるが、その複雑さゆえに一般的に解析を行うのは困難である。本研究では、純粋状態の多体エンタングルメントの大きさを定量的に表す測度の1つとして広く知られている幾何学的エンタングルメント測度に対して、2つの数値計算法(半正定値計画法、滑降シンプレックス法)を利用して値を近似的に評価する手法を新たに考案した。この手法は原理的には任意の多体系の純粋状態に適用することができるが、多くの場合で非常に高精度な計算結果を与える。さらに考案手法を用いて少数量子ビット系についての数値解析を行った。その結果、ほとんどの場合で対象とする状態に内積の意味で最も近

い分離可能状態が1つしか存在しないこと、また量子ビット数が増加するにつれて、ハール測度の上での平均幾何学的エンタングルメント量が増大していくことを発見した。[担当：森、添田、村尾]

5.2.3 連続変数量子系の量子情報処理

測定と擾乱のエントロピー関係式

ハイゼンベルクは彼の論文の中で非可換なオブザーバブルの物理的な影響を初めて議論し、測定の精度と引き起こされる擾乱との間の相補的なトレードオフ関係を明らかにした。この測定と擾乱の関係式には様々なアプローチから研究が成されており、それらは誤差や擾乱のある状態に依存した形で定義するものと、状態に独立な形で定義するものに大別される。我々は前者の状態に依存するアプローチで、誤差と擾乱の操作論的に意味のある統計的測度の間のトレードオフ関係を明らかにした。我々の定義した測定誤差は測定後にも残ったオブザーバブルの不確定な部分を表しており、擾乱は、測定による相互作用が存在する時としない時の、出力の確率分布間の統計的な距離により求められる。本研究はシンガポール国立大学 CQT の P. Coles 氏との共同研究である。[担当：Furrer]

量子メモリが存在する時の、連続変数不確定性関係

ハイゼンベルクの不確定性原理で最も一般的な定式化では、2つの相補的なオブザーバブルが常に確定的な値を取るような状態が存在しない。つまり、2つのオブザーバブルの統計的なゆらぎにはトレードオフの関係が存在する。近年、観測者が被測定系とエンタングルした量子メモリを持っていた場合、不確定性に新しい振る舞いが生じることが理解されつつある。これらの振る舞いに対するこれまでの定式化は、系が有限次元の場合に限られていたが、我々は無限次元の系で測定結果の値も連続変数の場合において定式化を行った。我々は特に運動量と位置の間に関する不確定性をより詳細に解析し、ある条件下での状況設定と測定では導いた不確定性の不等式が等号達成可能であることを明らかにした。本研究はチューリッヒ工科大学の M. Berta 氏、V. Scholz 氏と M. Christandl 氏及びシンガポール国立大学 CQT の M. Tomamichel 氏との共同研究である。[担当：Furrer]

連続変数量子鍵配送

一般的な攻撃に対して安全性が保証された連続変数量子鍵配送を実装することは、量子暗号分野の大きな挑戦である。近年、我々は十分にスクイーズされた2モード状態の強度を測定するプロトコルを用いれば、そのような実装は可能である事を理論的に示した。このようなケースでは古典相関が強く表れ

るため、古典的な事後処理を上手く適応することが出来る。我々は事後処理の為、この状況設定下で表れる同時分布に適したエラー訂正の方法を開発した。更に、通信距離をより長くするため、このプロトコルの理論的な安全性の証明を逆方向の情報整合を行うプロトコルに拡張する事に取り組んでいる。本研究の理論部分はハノーヴァー大学の J. Duhme 氏、T. Franz 氏と R.F. Werner 氏およびオーストラリア工科大学の C. Pacher 氏、実験部はハノーヴァーのアルバート・アインシュタイン研究所の T. Eberle 氏、V. Haendchen 氏、R. Schnabel 氏との共同研究である。[担当：Furrer]

5.2.4 分散型量子情報処理

2体ユニタリ演算の LOCC 実装における資源圧縮

エンタングルメントと LOCC (局所操作と古典通信) を用いた 2 者間での 2 体ユニタリゲートの実装について、情報理論を用いて解析した。従来の研究では、1 ペアの入力に対する実装のみが扱われていたが、我々は情報理論の手法にならない、 n ペアの独立な入力に対して同じユニタリをまとめてかける、という状況を考えた。 $n \rightarrow \infty$ でエラーがゼロに収束するという条件で、必要な古典通信量・エンタングルメント量の 1 ペアあたりの最適レートの下限と上限を求めた。下限については、ユニタリのエンタングルメントエントロピーによって解析的に与えられることを示した。上限については、量子 State Merging と呼ばれるプロトコルを用いた実装方法を構成することで、ユニタリによって決まる 3 体のある量子状態の相関を切るために必要なランダム性のコストで与えられることを示した。一般化クリフォードと呼ばれる種類の 2 体ユニタリについては、下限と上限が一致することを示し、最適レートを具体的に求めた。

また、「分散圧縮」と呼ばれる問題との関連について考察した。分散圧縮とは、多者間に分散された量子状態を、各者から 1 人の受信者への量子通信のみを用いて 1 カ所に集めるというタスクである。このとき量子通信のレートをできるだけ減らすことが目標となる。この問題は、Slepian と Wolf によって完全に解かれている有名な古典情報の分散圧縮問題の量子版であるが、多体の場合についてはほとんどわかっていなかった。我々は、ある特殊なケースでは、分散圧縮での最適な量子通信レートの下限と上限が、上で求めた下限と上限からそれぞれ導けることを示した。[担当：若桑、村尾]

バタフライネットワーク、グレイルネットワーク、クラスターネットワークにおけるユニタリ演算の実装可能性

ネットワーク符号化は限られた通信容量や通信方向があるネットワークにおいて効率的な通信を達成するために研究されてきた。ネットワーク符号化を

量子計算へ応用するために、ネットワーク上の離れた入出力ノード間でのユニタリ演算の分散的な実装可能性を解析した。本研究では、ネットワークの通信容量が 1 量子ビットに制限されているが、古典通信は自由に行えるという条件下で解析を行う。まず、クラスターネットワークを量子回路へ変換する方法を提唱し、それを用いてクラスターネットワーク上で実装可能な k 量子ビットユニタリ演算のクラスを定式化した。次に、古典ネットワーク符号化で基本ネットワークとして知られているバタフライネットワークとグレイルネットワーク上では任意の 2 量子ビットユニタリ演算が実装可能であることを示した。最後に、クラスターネットワーク上での確率的なユニタリ演算の実装可能性も解析した。

本研究は、多者間通信を目的に解析されてきたネットワーク符号化を多者間分散量子計算に用いるという新しい方法を与えることに加え、一般に多者間の量子情報処理の研究において有用である多者間の確率的量子情報処理の解析方法を提示する。[担当：秋笛、村尾]

局所操作を用いた量子状態に対する古典情報の符号化と復号化

量子力学的な状態の特徴の一つは、エンタングルメントに代表される非局所的な性質を持つことである。古典情報から量子状態への符号化・復号化は、量子情報処理の中でも最も基本的なタスクであり、量子状態の非局所性が符号化・復号化に与える影響を解明することは、量子情報処理の特性を理解するために重要である。古典情報が符号化された量子状態を局所的操作のみを用いて復号化する局所的復号化に関しては、量子状態の距離的エンタングルメント測度との関係が知られている。しかし、与えられた量子状態を古典情報によってラベルされる互いに直交した状態へ局所的操作のみで変換する局所的符号化については、量子ビット系以外の多準位系に関する解析はこれまで行われていなかった。我々は、多体多準位量子系に対して古典通信を用いない局所的符号化の解析を行い、このような局所的符号化の操作がランダムネスを制限した局所的ランダムユニタリ通信路で記述できることを示した。この結果を用いることにより、多体 d 準位系においては、常に少なくとも $\log d$ ビットの局所符号化が古典通信を用いずに可能であることが判明した。さらに、このように局所符号化された量子状態からの復号化は、2 体系の場合には常に可能であるが、3 体以上の場合には一般的には不可能であることを証明した。[担当：新保、添田、村尾]

5.2.5 基底状態を利用した量子情報処理

エニオン系におけるエンタングルメント・エントロピーの解析

2次元空間においては、ボソンでもフェルミオンでもない統計性を持つことが可能であり、そのような統計性を持つ粒子はエニオンと呼ばれる。エニオンはトポロジカル秩序相と呼ばれる相に準粒子として表れることが理論的に予想されており、量子情報の観点からは、ノイズ耐性のあるトポロジカル量子計算への応用が注目されている。このエニオンの状態を記述するヒルベルト空間は量子ビット系等とは異なり、空間的に局所的な部分空間のテンソル積では表せないことが知られている。

本研究では、このような特殊な構造を持つエニオン系において、量子情報処理のリソースとして有用なエンタングルメント測度の解析を行った。我々はエニオン系の2体純粋状態に注目し、エンタングルメント測度の1つであるエンタングルメント・エントロピーをエニオン系に拡張することを試みた。通常の量子系においてエンタングルメント・エントロピーは計算しやすいというだけでなく、エンタングルメント蒸留、希釈という2つの量子情報処理プロトコルの最適値を特徴付けるという操作論的に重要な性質を持つ。我々はエニオン系で同じ操作論的性質を持つような関数を定義し、それが従来のエンタングルメント・エントロピーに相当する量と、物性物理学においてトポロジカル・エンタングルメント・エントロピーと呼ばれる量の和で書けることを示した。本研究の手法は、トポロジカル秩序相にある背景の状態を記述する事なく、エニオン間のエンタングルメントを情報理論的に扱う普遍的な方法を提供する。[担当：加藤、Furrer、村尾]

並列断熱ゲートテレポーテーション

断熱ゲートテレポーテーションは量子テレポーテーションと断熱量子計算モデルを組み合わせた量子計算モデルである。本研究では、断熱ゲートテレポーテーションを拡張することにより、因果的順序の決められた量子ゲート列を並列化して実装可能な並列断熱ゲートテレポーテーションを提案した。元々の断熱ゲートテレポーテーションで量子ゲート列を実装する場合には、各量子ゲートを実装するツイストハミルトニアンを用いた断熱量子計算を一つずつ順序に従って計算を進めていく必要がある。これに対して並列断熱ゲートテレポーテーションでは、時間的な順序関係を直接相互作用する量子ビットの組み合わせという空間的順序関係に対応させることで、複数のハミルトニアンを同時に用いた1ステップの断熱量子計算として量子ゲート列を実装することができる。並列化をすることにより、断熱量子計算に必要な総時間はももとの断熱ゲートテレポーテーションの場合よりもゲート数の二乗に比例して長くなる一方で、ゲート列の順序に対する制約が緩和されるために、各量子ゲートに対応するツイストハミ

ルトニアンを1回のみ用いて量子ゲートのかかる順序を制御ビットにより操作することが可能となることを示した。[担当：中郷、Hajdušek、仲山、村尾]

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Eberle, V. Haendchen, J. Duhme, T. Franz, F. Furrer, R. Schnabel and R. F. Werner, *Gaussian Entanglement for Quantum Key Distribution from a Single-Mode Squeezing Source*, *New J. Phys.* **15**, 053049 (2013)
- [2] A. J. P. Garner, O. C. O. Dahlsten, Y. Nakata, M. Murao and V. Vedral, *A general framework for phase and interference*, *New J. Phys.* **15**, 093044 (2013)
- [3] Y. Nakata and M. Murao, *Diagonal-unitary 2-designs and their implementations by quantum circuits*, *International Journal of Quantum Information* **11**, 1350062 (2013)
- [4] T. Sugiyama, P. S. Turner, and M. Murao, *Precision-guaranteed quantum tomography*, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 160406 (2013)
- [5] A. Soeda, P. Kurzyński, R. Ramanathan, A. Grudka, J. Thompson, and D. Kaszlikowski, *On the problem of contextuality in macroscopic magnetization measurements*, *Phys. Lett. A* **377**, 2856 (2013)
- [6] S.-Y. Lee, J. Thompson, P. Kurzyński, A. Soeda, and D. Kaszlikowski, *Coherent states of composite bosons*, *Phys. Rev. A* **88**, 063602 (2013)
- [7] P. Kurzyński, A. Soeda, J. Thompson, and D. Kaszlikowski, *Contextuality in Bosonic Bunching*, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 020403 (2014)
- [8] M. Mhalla, M. Murao, S. Perdrix, M. Someya and P. S. Turner, *Which graph states are useful for quantum information processing?*, in *Theory of Quantum Computation, Communication, and Cryptography, Lecture Notes in Computer Science* **6745**, Springer, pp. 174-187 (2014)

(会議抄録)

- [9] 宮崎慈生、Michal Hajdušek、村尾美緒、gflowを用いた測定ベース量子計算から量子回路モデルへの変換、電気情報通信学会第二種研究会資料量子情報技術研究会 QIT2013-52~101 4-9 (2013)

(学位論文)

- [10] 仲山将順, *The theory of quantum measurement of energy –Quantum algorithm and its evaluation–*, 博士論文
- [11] 加藤晃太郎 *Information theoretical analysis of entanglement in anyonic systems*, 修士論文
- [12] 宮崎慈生, *Entanglement structure and causal order in measurement-based quantum computation*, 修士論文

- [13] 中郷孝祐, *Parallelization of quantum gate ordering in adiabatic gate teleportation*, 修士論文
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [14] M. Berta, M. Christandl, F. Furrer, V. Scholz and M. Tomamichel, *Continuous Variable Entropic Uncertainty Relations in the Presence of Quantum Memory*, 3rd International Conference on Quantum Cryptography, Waterloo (Canada), August 2013
- [15] M. Berta, M. Christandl, F. Furrer, V. Scholz and M. Tomamichel, *Continuous Variable Entropic Uncertainty Relations in the Presence of Quantum Memory*, 13th Asia Quantum Information Science Conference, Chennai (India), August 2013
- [16] M. Hajdušek and M. Murao, *Multipartite entanglement quantification in weighted graph states*, 13th Asian Quantum Information Science Conference, Chennai (India), August 2013
- [17] S. Nakayama, A. Soeda, and M. Murao, *Universal implementation of energy eigenbasis measurement*, 13th Asian Quantum Information Science Conference, Chennai (India), August 2013
- [18] R. Ramanathan, A. Soeda, P. Kurzynski, and D. Kaszlikowski, *Generalized monogamy of contextual inequalities from the no-disturbance principle*, 13th Asian Quantum Information Science Conference, Chennai (India), August 2013
- [19] S. Akibue and M. Murao, *Implementability of two-qubit unitary operators over the ladder network with free classical communication*, 1st Workshop on Parallel Quantum Computing, Edinburgh (United Kingdom), September 2013
- [20] J. Miyazaki, M. Hajdušek, and M. Murao, *Cancellation of acausal loops in MBQC implies deterministic computation*, 1st Workshop on Parallel Quantum Computing, Edinburgh (United Kingdom), September 2013
- [21] E. Wakakuwa and M. Murao, *The chain rule implies Tsirelson's bound*, Noise, Information and Complexity @ Quantum Scale, Erice (Italy), October 2013
- [22] Y. Nakata and M. Murao, *Quantum circuit implementations of diagonal-unitary 2-designs*, Noise, Information and Complexity @ Quantum Scale, Erice (Italy), October 2013
- [23] S. Akibue and M. Murao, *Implementability of unitary operations over the butterfly, grail and cluster networks with free classical communication*, 17th Conference on Quantum Information Processing, Barcelona (Spain), February 2014
- [24] K. Kato, F. Furrer and M. Murao *Operational Meaning of Entanglement Entropy in Anyonic Systems*, 17th Conference on Quantum Information Processing, Barcelona (Spain), February 2014
- [25] J. Miyazaki, M. Hajdušek, and M. Murao, *Translating measurement-based quantum computation with gflow into quantum circuit*, 17th Conference on Quantum Information Processing, Barcelona (Spain), February 2014
- [26] K. Nakago, M. Hajdušek, S. Nakayama and M. Murao, *Parallelized adiabatic gate teleportation*, 17th Conference on Quantum Information Processing, Barcelona (Spain), February 2014
- [27] E. Wakakuwa and M. Murao, *Resource Compression for Distributed Quantum Computation*, 17th Conference on Quantum Information Processing, Barcelona (Spain), February 2014
- [28] E. Wakakuwa and M. Murao, *The chain rule of the mutual information implies Tsirelson's bound*, JFLI meeting on quantum information and computation, Tokyo (Japan), March 2014
- 招待講演
- [29] P. Coles and F. Furrer, *Entropic Formulation of Heisenberg's Measurement-Disturbance Relation*, JFLI meeting on quantum information and computation, Tokyo (Japan), March 2014
- [30] M. Murao, *Causal order manipulation in quantum computation*, JFLI meeting on quantum information and computation, Tokyo (Japan), March 2014
- [31] M. Murao, *Causal order manipulation in adiabatic and measurement-based quantum computation*, Workshop on Quantum Metrology, Interaction, and Causal Structure 2013, Beijing (China), December 2013
- (国内会議)
- 一般講演
- [32] F. Furrer, M. Berta, M. Christandl, V. Scholz, M. Tomamichel, *Continuous Variable Entropic Uncertainty Relations with Quantum Side Information and Application to QKD*, 第28回量子情報技術研究会、北海道、2013年5月
- [33] R. Ramanathan, 添田彬仁、P. Kurzyński, D. Kaszlikowski, *No-disturbance 原理によるコンテキスト依存性不等式の一般化されたモノガミー性*, 第28回量子情報技術研究会、北海道、2013年5月
- [34] 中郷孝祐, M. Hajdušek, 仲山将順, 村尾美緒, *Manipulating Causal Order of Unitary Operations using Adiabatic Quantum Computation*, 第18回量子情報関東 Student Chapter, 東京, 2013年8月
- [35] F. Furrer, *Finite-Key Analysis for Continuous Variable QKD Protocols: Security vs. Feasibility*, Quantum ICT Forum, 東京, 2013年10月

- [36] 加藤晃太郎、F. Furrer、村尾美緒、エニオン系におけるエンタングルメント・エントロピーの操作論的意味、第 29 回 量子情報技術研究会、東京、2013 年 11 月
 - [37] 中郷孝祐、M. Hajdušek、仲山将順、村尾美緒、Parallelized adiabatic gate teleportation、第 29 回量子情報技術研究会、東京、2013 年 11 月
 - [38] 宮崎慈生、M. Hajdušek、村尾美緒、gflow を用いた測定ベース量子計算から量子回路モデルへの変換、第 29 回 量子情報技術研究会、東京、2013 年 11 月
 - [39] 加藤晃太郎、F. Furrer、村尾美緒、Operational Meaning of Entanglement Entropy in Anyonic Systems、第 6 回 基礎物理セミナー合宿、神奈川、2013 年 12 月
 - [40] 中郷孝祐、M. Hajdušek、仲山将順、村尾美緒、Parallelized adiabatic gate teleportation、第 6 回 基礎物理セミナー合宿、神奈川、2013 年 12 月
 - [41] 秋笛清石、D. Markham、非因果的多者間相関、量子情報の新展開、京都、2014 年 3 月
 - [42] 加藤晃太郎、F. Furrer、村尾美緒、Operational Meaning of Entanglement Entropy in Anyonic Systems、量子情報の新展開、京都、2014 年 3 月
 - [43] 中郷孝祐、M. Hajdušek、仲山将順、村尾美緒、Parallelized adiabatic gate teleportation、量子情報の新展開、京都、2014 年 3 月
- (セミナー)
- [44] 仲山将順、添田彬仁、村尾美緒、量子ゼノン効果および動的デカップリングの量子情報への応用、芝浦工業大学、2013 年 7 月 31 日
 - [45] 若桑江友里、情報因果律にもとづく非局所相関の解析、芝浦工業大学大宮キャンパス、2014 年 2 月 20 日

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個のレベルで精密に測定し、制御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の解明と、その基礎となるナノスケールの熱力学・統計力学の構築を目指して理論研究を行っている。特に近年の中心的テーマとなっているのは、冷却原子気体の研究、および、量子論・統計力学と情報論の融合である。レーザー冷却により絶対零度近くまで冷却された原子系においては、高い制御性のもとで、ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) などの巨視的量子現象や、固体物理、宇宙物理とも類似した現象を創り出し、その普遍的性質と新しい量子多体物理の可能性を探究することができる。近年の実験技術と（固体物理、統計力学も含む）理論概念の進展を背景に、私たちは、スピノル BEC におけるトポロジカル励起や相関効果、原子間相互作用の強さを制御するもとの BCS-BEC クロスオーバーや Efimov 状態、人工ゲージ場中での量子ホール状態、孤立量子系の熱平衡化などについて研究を行っている。同時に私たちは、情報をキーワードとして量子論や統計力学の基礎概念を捉え直し、物理と情報を融合させた新分野の構築を目指す研究にも取り組んでいる。特に測定やフィードバック制御を行うもとの情報の流れに着目し、熱力学の第二法則や揺らぎの定理の一般化、波束収縮のダイナミクスなどの研究を行っている。

5.3.1 冷却原子気体

磁場勾配パルスによる人工スピン・軌道相互作用

一般の内部スピン F を持つ原子系において、磁場勾配パルスを用いて、Rashba 型、Dresselhaus 型およびそれらの任意の線形結合のスピン・軌道相互作用を動的に誘起する方法を提案した。従来の方法ではレーザー照射のもとで原子の内部状態が空間依存したドレスト状態の部分空間に制限されることを利用していたのに対し、我々の方法では原子の磁気モーメントと外部磁場の直接的なゼーマン結合を利用し、内部状態の全空間でスピン・軌道相互作用を生成することができる。空間勾配を持った磁場パルスにより、粒子が位置、スピン状態双方に依存した摂動を受けることが、ここでのスピン・軌道結合の起源である。この方法は冷却原子の様々な実験系で実現でき、特に核スピンのゼロの原子に適している。[3]

スピンと軌道の結合した BEC 中の量子渦

対称性による量子渦の分類理論は、超流動ヘリウム 3 の研究において Salomaa と Volovik によって初めて導入された。彼らの議論では固定された境界条件の下での渦芯構造を扱っていたが、我々は任意の境界条件を持つ場合に分類理論を拡張した。拡張された分類理論を用いて、Rashba 型スピン・軌道相互

作用のある BEC において、ゲージ、スピン、空間回転の結合した対称性が自発的に破れることで現れる量子渦を解析した。我々は数値計算を併用することにより、この系において先行研究では取り扱えなかった非自明な境界条件を持つ量子渦が現れること、我々の分類理論によってこの系の量子渦の完全な分類ができることを示した。これら新奇な量子渦の境界においては、非自明な量子数で特徴づけられる複雑なスピン・テクチャーが形成されていることも明らかにした。[5]

ボソンの整数量子ホール状態

中性電荷を持つ原子系において光学的に人工ゲージ場を発生させる技術が近年、急速に進展している。我々は人工磁場中の二成分ボース気体を厳密対角化法により解析し、 $U(1)$ 対称性で守られたボソン版の整数量子ホール状態が現れることの数値的証拠を提示した。フェルミオンの整数量子ホール状態は相互作用のないもとで現れるのに対し、この状態は二成分が強く相互作用することで初めて現れる。この状態のエンタングルメント・スペクトルを計算することで、電荷モード、スピンモードが逆向きに伝搬する特異な端状態の存在を示した。この結果は、二次元以上のボソン系において、対称性で守られたトポロジカル相の存在を数値的に示した数少ない例の一つである。[6]

スピノル BEC の量子相転移における揺らぎの効果

弱く相互作用する希薄原子気体の BEC の今までの研究では、様々な現象が平均場理論によって精度良く記述されていた。我々は、スピノル BEC において平均場理論では記述できない現象が現れることを発見した。スピン 2 BEC の基底状態には、スピンに依存する相互作用の大小関係によっていくつかの相が存在する。これらの相の秩序パラメータはスピン空間内で異なる対称性を持つため、相転移はすべて一次になり、相境界の回りに準安定状態が存在するのが自然である。しかし、Bogoliubov 理論によって得られる励起スペクトルには準安定状態が見られない。この矛盾を解決するために、我々はこの準安定状態は量子揺らぎの効果によって現れることを指摘し、Bogoliubov 理論を超える Beliaev 理論をスピノル BEC に拡張することで初めて準安定状態が実際に存在することを証明した。準安定状態から基底状態への巨視的なトンネリングに要する時間スケールも見積もった。更に、どの近似オーダーでも準安定状態が存在しない一次相転移のクラスを見出した。ここでは相境界において系が高い対称性を持つことによって準安定状態は禁止されることがわかった。[8]

トポロジカル励起共存系にけるトポロジカルチャージ保存則

トポロジカル励起とは量子渦や点欠陥などのトポロジカルチャージによって特徴づけられる励起状態のことであり、自発的対称性が破れた系において普遍的に存在する。ここで定義されるトポロジカルチャージは一般に非可換群で記述される。そのため複数のトポロジカル励起が共存する状況下ではトポロジカルチャージ間に影響が存在する。例えば、スピン1ポラー相中の半整数量子渦と点欠陥が非可換であり、チャージ+1の点欠陥が半整数量子渦の周りを一周回るとチャージ-1の点欠陥へ連続変形する。しかし、ここで点欠陥が半整数量子渦の周りを回る前と後で点欠陥のチャージが保存していないという問題が存在する。我々はこの問題に焦点を当て、量子渦の捻じれによるトポロジカルチャージを考慮することで問題が解決されることを発見した。スピン1ポラー相の場合、点欠陥が一周回ると同時に回転中心にある半整数量子渦にも捻じれが生じ、チャージ+2の半整数量子渦輪が形成される。結果として、全トポロジカルチャージは $2 + (-1) = 1$ で初期状態と一致している。我々はこの現象が非可換チャージを持つ他の秩序相においても一般的に現れることを代数的に示した。[14]

クラスター展開法によるBCS-BECクロスオーバーの研究

T. D. Lee と C. N. Yang が1958年に開発した量子統計力学のクラスター展開の方法を用いて、冷却フェルミ原子気体のBCS-BECクロスオーバーを解析した。クラスター展開法でBCS-BECクロスオーバーを解析する先行研究のほとんどが高温領域に関するものであるが、本研究では低温の超流動相転移温度まで記述する試みを行った。主な結果としては、相互作用が弱い極限 (BCS 極限) と強い極限 (BEC 極限) における超流動相転移温度が Lee-Yang の方法を用いて正しく導出できることを示した。また、Nozières と Schmitt-Rink の BCS-BEC クロスオーバー理論と、Lee-Yang の方法の関係を明らかにした。本研究は、ユニタリティ極限における BEC-BCS クロスオーバーの問題を解明するための準備研究と位置付けられる。[15]

Efimov 状態における3体パラメータの普遍性

散乱長が大きな3粒子系では、離散スケリング則を示す3粒子束縛状態が普遍的に現れ、Efimov 状態とよばれる。Efimov 状態のエネルギースケールを決定する重要なパラメータとして3体パラメータがあり、近年3体パラメータが普遍的に振る舞うことが冷却原子気体の実験で発見された。我々は冷却原子系特有の van der Waals 型相互作用以外の様々な相互作用をする3粒子問題を解き、この3体パラメータの普遍性が原子系以外の様々な系について普遍的

に成立することを見出した。また、相互作用の遠方での減衰の速さに依存して、3体パラメータの普遍クラスの分類が可能であることを発見した。Efimov 状態は冷却原子気体以外にも、 ^4He クラスタ、中性子過剰原子核、マグノン等で現れる可能性が示唆されており、これら様々な系での少数系の理解に本研究が大きく貢献するものと期待される。[16]

5.3.2 量子論・統計力学と情報理論の融合

光子数計数とホモダイン検波の同時測定過程

量子連続測定とは時間的に連続的な量子測定であり、連続的量子フィードバック理論の基礎にもなっている。量子連続測定では、光子数計数測定に代表される離散的なジャンプによって測定出力と系の波束の収縮が記述されるものと、ホモダイン検波などのブラウン運動的な連続量を測定出力にもつものの二つが主として研究されてきた。本研究では、こうした二つの特徴を同時に具えた連続測定過程として光子数計数とホモダイン検波の同時測定過程を考察し、測定出力が与えられたときの条件付き波動関数と、測定出力の確率分布を解析的に導き、実際に光子が具える粒子-波動二重性が見出された。また、本研究で用いた解析的手法は、量子光学系の時間連続的フィードバックへ応用できる可能性があり、光学系のフィードバックの理論的発展へ貢献するものと期待される。[7]

測定とフィードバック制御を行うもとの量子版揺らぎの定理

揺らぎの定理や Jarzynski 等式は平衡から離れたところでも成り立つ関係式であり、非平衡統計力学の分野で多くの関心を集めてきた。近年、これらの関係式を測定やフィードバックの元でも適用できる形に拡張する試みがなされており、測定で獲得した情報量を含めた形の非平衡等式が (古典系で) 導かれている。我々は量子系においてフィードバック制御されるシステムと測定を行う装置 (メモリー) の両方を統一的に扱い、それぞれに対して成立する量子版揺らぎの定理を導出した。また、導出した等式に現れる情報量が量子測定の反作用の効果を含んでいることを見出した。これらの等式は超伝導 qubit 等の実験系で量子計算を行うときの熱力学的コストの見積りに活用できる可能性があり、量子情報処理に対する熱力学的な理解への発展が期待される。[9]

量子もつれを利用した熱機関

量子もつれは量子テレポーテーション等の情報処理を行うためのリソースとして活用できることが知られている。一方、量子もつれを利用することで、photo-carnot エンジンと呼ばれるモデルにおいてカ

ルノー効率を超えた熱機関が作れることが提案されている。本研究では量子もつれと熱力学の関係を明らかにするために、量子もつれをリソースとしたときに測定とフィードバックを用いることでシステムから取り出せる仕事の上限を求めた。特に、測定とフィードバックを行う各ステップでシステム間の相関がどのように移り替わっていくかを特定し、系全体で取り出せる仕事は量子もつれがある部分系 A、B と測定器の三体相関に依存することを見出した。これらの結果はシステムを測定し、その測定結果を基にしてフィードバックを行う、いわゆるマクスウェルの悪魔の理論を量子もつれがある場合に拡張し、量子版マクスウェルの悪魔の理論の発展へとつながることが期待される。[10]

<受賞>

- [1] Takahiro Sagawa: Young Scientist Prize of the C3 Commission (Statistical Physics) of IUPAP, 2013.7.24.
- [2] グエン タン フク: 平成 25 年度理学系研究科研究奨励賞 (博士課程) (東京大学、2014 年 3 月).

<報文>

(原著論文)

- [3] Z.-F. Xu, L. You, and M. Ueda: Atomic spin-orbit coupling synthesized with magnetic-field-gradient pulses, *Phys. Rev. A* **87**, 063634 (2013).
- [4] D. M. Stamper-Kurn and M. Ueda: Spinor Bose gases: Symmetries, magnetism, and quantum dynamics, *Rev. Mod. Phys.* **85**, 1191 (2013).
- [5] Z.-F. Xu, S. Kobayashi, and M. Ueda: Gauge-spin-space rotation invariant vortices in spin-orbit coupled Bose-Einstein condensates, *Phys. Rev. A* **88**, 013621 (2013).
- [6] S. Furukawa and M. Ueda: Integer quantum Hall state in two-component Bose gases in a synthetic magnetic field, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 090401 (2013).
- [7] Y. Kuramochi, Y. Watanabe, and M. Ueda: Simultaneous continuous measurement of photon-counting and homodyne detection on a free photon field: dynamics of state reduction and the mutual influence of measurement backaction, *J. Phys. A: Math. Theor.* **46**, 425303 (2013).
- [8] N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, and M. Ueda: Fluctuation-induced and symmetry-prohibited metastabilities in spinor Bose-Einstein condensates, *Physical Review A* **88**, 043629 (2013).
- [9] K. Funo, Y. Watanabe, and M. Ueda: Integral quantum fluctuation theorems under measurement and feedback control, *Phys. Rev. E* **88**, 052121 (2013).
- [10] K. Funo, Y. Watanabe, and M. Ueda: Thermodynamic work gain from entanglement, *Phys. Rev. A* **88**, 052319 (2013).

- [11] R. Lundgren, Y. Fuji, S. Furukawa, and M. Oshikawa: Entanglement spectra between coupled Tomonaga-Luttinger liquids: Applications to ladder systems and topological phases, *Phys. Rev. B* **88**, 245137 (2013).
- [12] S. Watabe and Y. Ohashi: Comparative studies of many-body corrections to an interacting Bose-Einstein condensate, *Phys. Rev. A* **88**, 053633 (2013).
- [13] S. Watabe and Y. Kato: Stability criterion for superfluidity based on the density spectral function, *Phys. Rev. A* **88**, 063612 (2013).
- [14] S. Kobayashi, N. Tarantino, and M. Ueda: Topological influence and backaction between topological excitations, *Phys. Rev. A* **89**, 033603 (2014).
- [15] N. Sakumichi, Y. Nishida, and M. Ueda: Lee-Yang cluster expansion approach to the BCS-BEC crossover: BCS and BEC limits, *Phys. Rev. A* **89**, 033622 (2014).
- [16] P. Naidon, S. Endo, and M. Ueda: Microscopic origin and universality classes of the Efimov three-body parameter, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 105301 (2014).

(学位論文)

- [17] Shimpei Endo: Theoretical Study on Efimov Physics in Ultracold Atoms (博士論文).
- [18] Nguyen Thanh Phuc: Beliaev Theory of Spinor Bose-Einstein Condensates and Its Applications (博士論文).
- [19] Yusuke Horinouchi: Functional Renormalization-Group Study of Few-Body Systems in Ultracold Atoms (修士論文).

(著書)

- [20] 上田正仁: 東大物理学者が教える「考える力」の鍛え方、ブックマン社、2013.7.
- [21] Yu Watanabe: Formulation of Uncertainty Relation Between Error and Disturbance in Quantum Measurement by Using Quantum Estimation Theory (Springer Theses), Springer, 2014.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [22] T. N. Ikeda, Y. Watanabe, and M. Ueda: Finite-size scaling of the Eigenstate Thermalization Hypothesis in the Lieb-Liniger model, The 11th US-Japan Joint Seminar, Nara, Japan, 2013.4.4-12.
- [23] E. Kaminishi, J. Sato, and T. Deguchi: Recurrence time of dark soliton in the interacting 1D Bose gas with small number of particles, The 11th US-Japan Joint Seminar, Nara, Japan, 2013.4.4-12.

- [24] S. Endo, P. Naidon, and M. Ueda: Crossover trimers connecting continuous and discrete scaling regimes, International Conference on Few-body Physics in Cold Atomic Gases, Beijing, China, 2013.4.11-14.
- [25] T. N. Ikeda, N. Sakumichi, A. Polkovnikov, and M. Ueda: The second law of pure state thermodynamics, Stellenbosch Workshop on Equilibration and Thermalization in Quantum Systems, Stellenbosch, South Africa, 2013.4.15-19.
- [26] S. Endo and M. Ueda: Screening of the interaction between fermionic polarons, Joint Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics and the CAP Division of Atomic, Molecular and Optical Physics, Quebec City, Canada, 2013.6.3-7.
- [27] S. Furukawa and M. Ueda: Quantum Hall states in two-component Bose gases in a synthetic magnetic field, 7th ISSP International Symposium “Emergent Quantum Phases in Condensed Matter”, Kashiwa, 2013.6.12-14.
- [28] T. N. Ikeda, N. Sakumichi, A. Polkovnikov, and M. Ueda: The second law of pure state thermodynamics, Boulder Summer School 2013: Disorder and Dynamics in Quantum Systems, Boulder, US, 2013.7.8-2013.8.2.
- [29] K. Funo, Y. Watanabe and M. Ueda: Integral quantum fluctuation theorem under measurement and feedback control, Frontier of Statistical Physics and Information Processing, Kyoto, 2013.7.11-14.
- [30] E. Kaminishi, J. Sato, and T. Deguchi: Evaluation of recurrence time for a localized many-body state dynamics in the 1D Bose gas, 22nd International Laser Physics Workshop, Prague, Czech Republic, 2013.7.15-19.
- [31] E. Kaminishi, J. Sato, and T. Deguchi: Recurrence time of a localized many-body state dynamics in the 1D Bose gas, The 25th International Conference on Statistical Physics, Seoul, Korea, 2013.7.22-26.
- [32] S. Furukawa and M. Ueda: Quantum Hall states in two-component Bose gases in a synthetic magnetic field, YITP workshop “Mathematical Statistical Physics”, Kyoto, 2013.7.29-8.3.
- [33] E. Kaminishi, J. Sato, and T. Deguchi: Recurrence time of a localized many-body state dynamics in the 1D Bose gas, YITP workshop “Mathematical Statistical Physics”, Kyoto, 2013.7.29-8.3.
- [34] T. N. Ikeda, N. Sakumichi, A. Polkovnikov, and M. Ueda: The second law of pure state thermodynamics, Quantum Many Body Systems out of Equilibrium, Dresden, Germany, 2013.8.12-30.
- [35] S. Furukawa and M. Ueda: Global phase diagram of two-component Bose gases in antiparallel magnetic fields, RIKEN-APW joint workshop “Highlights in condensed matter physics”, Wako, 2014.1.23-25.
- [36] S. Furukawa and M. Ueda: Global Phase Diagram of Two-Component Bose Gases in a Time-Reversal-Invariant Gauge Field, FIRST International Symposium on Topological Quantum Technology, Tokyo, 2014.1.27-30.
- [37] T. N. Ikeda and Y. Watanabe: Random matrix study of the time scale of thermalization after a quantum quench, APS March Meeting 2014, Denver, US, 2014.3.3-7.
- [38] E. Kaminishi, T. Ikeda, T. Mori, and M. Ueda: Exact analysis of prethermalization of a coherently split one-dimensional Bose gas, APS March Meeting 2014, Denver, US, 2014.3.3-7.
- 招待講演
- [39] M. Ueda: Where does the Bogoliubov theory go qualitatively wrong?, The 11th US-Japan Joint Seminar, Nara, 2013.4.4-12.
- [40] M. Ueda: First-order quantum phase transition in spinor Bose-Einstein condensates, The 7th Cross-Strait and International Conference on Quantum Manipulation, Beijing, China, 2013.6.28-30.
- [41] M. Ueda: Spinor Beliaev theory and first-order phase transition in spinor condensates, The 22th International Laser Physics Workshop (LPHYS'13), Prague, Czech Republic, 2013.7.15-19.
- [42] M. Ueda: Spinor Beliaev theory, The 2013 Summer Program of the Aspen Center for Physics, Aspen, US, 2013.8.4-24.
- [43] T. N. Ikeda: Thermodynamics in Unitary Time Evolution, Summer Workshop on “Physics, Mathematics, And All That Quantum Jazz” Osaka, Japan, August 2013.8.7-9.
- [44] S. Furukawa: Entanglement spectra in topological phases and coupled Tomonaga-Luttinger liquids, International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries, Ginowan, 2013.10.23-26
- [45] M. Ueda: Thermodynamic Gain from Entanglement, Workshop on Information theoretic approaches to thermodynamics, Singapore, 2013.9.2.
- [46] M. Ueda: Information Thermodynamics: How the Maxwell’s demon was exorcised, Workshop on Quantum Materials, Stuttgart, Germany, 2013.12.9-11.
- [47] M. Ueda: How Maxwell’s demon was exorcised: the minimum energy cost for measurement and erasure of information, RIKEN-APW joint workshop “Highlights in condensed matter physics”, Wako, 2014.1.23-25.

- [48] M. Ueda: Two Different Classes of Universality in the Three-Body Parameter in Efimov Physics, CIFAR Meeting on Cold Atoms, Banff, Canada, 2014.2.18-21.
- (国内会議)
- 一般講演
- [49] 遠藤晋平, Pascal Naidon, 上田正仁: Physical origin of the universal three-body parameter in Efimov physics, 第10回 AMO 討論会、電気通信大学、2013.6.14-15.
- [50] 上西慧理子, 池田達彦, 上田正仁: 一次元ボース気体における非平衡緩和過程の厳密な解析、日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013.9.25-28.
- [51] N. T. Phuc, 川口由紀, 上田正仁: Emergent energy gap of Quasi-Nambu-Goldstone modes in spinor Bose-Einstein condensates, 日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013.9.18-21.
- [52] Pascal Naidon, 遠藤晋平, 上田正仁: Efimov 状態のユニバーサルな 3 体パラメータの物理的起源、日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013.9.25-28.
- [53] 布能謙, 渡辺優, 上田正仁: 量子フィードバック制御下でのゆらぎの定理、日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013.9.18-21.
- [54] 古川俊輔, 上田正仁: 人工ゲージ場中の二成分ボース気体における整数量子ホール状態、日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013.9.18-21.
- [55] 渡部昌平, 上田正仁: Spinor BEC in Kagome Lattice, 日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013.9.18-21.
- [56] 古川俊輔, 上田正仁: 人工ゲージ場中の二成分ボース気体における量子ホール状態、第7回物性科学領域横断研究会、東京大学、2013.12.1-2.
- [57] 堀之内裕理, 上田正仁: 冷却原子気体少数多体系における 3 体パラメータの普遍性のくりこみ群的理解、第7回物性科学領域横断研究会、東京大学、2013.12.1-2.
- [58] 渡部昌平, 上田正仁: 人工ゲージ場を伴う非立方格子型光学格子中のスピノール BEC、第7回物性科学領域横断研究会、東京大学、2013.12.1-2.
- [59] 古川俊輔, 上田正仁: 時間反転対称ゲージ場中の二成分ボース気体のグローバル相図、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4回領域研究会、名古屋大学、2013.12.19-21.
- [60] 布能謙: 量子フィードバック制御下でのゆらぎの定理、量子論の諸問題と今後の発展、高エネルギー加速器研究機構、2014.3.10-11.
- [61] 池田達彦: 孤立量子系における熱力学第二法則、基研研究会「量子情報の新展開」、京都大学、2014.3.23-25.
- [62] 布能謙: 量子フィードバック制御下でのゆらぎの定理、基研研究会「量子情報の新展開」、京都大学、2014.3.23-25.
- [63] 古川俊輔: 結合した朝永・ラッティンジャー流体間のエンタングルメント・スペクトル: 梯子系および二次元トポロジカル相への応用、基研研究会「量子情報の新展開」、京都大学、2014.3.23-25.
- [64] 村下湧音: Lebesgue 分解に基づく非平衡等式、基研研究会「量子情報の新展開」、京都大学、2014.3.23-25.
- [65] 遠藤晋平, Pascal Naidon, 上田正仁: 異核原子混合系における Efimov 状態の 3 体パラメータ、日本物理学会第 69 回 (2014 年) 年次大会、東海大学、2014.3.27-30.
- [66] 上西慧理子, 池田達彦, 森貴司, 上田正仁: 一次元ボース気体における非平衡緩和過程の厳密な解析 II、日本物理学会第 69 回 (2014 年) 年次大会、東海大学、2014.3.27-30.
- [67] 倉持結, 上田正仁: 量子測定における相対エントロピーを用いた情報の読み出しと測定の反作用の特徴付けについて、日本物理学会第 69 回 (2014 年) 年次大会、東海大学、2014.3.27-30.
- [68] 古川俊輔, 上田正仁: 時間反転対称ゲージ場中の二成分ボース気体の基底状態相図、日本物理学会第 69 回 (2014 年) 年次大会、東海大学、2014.3.27-30.
- [69] 堀之内裕理, 上田正仁: Efimov 状態における 3 体パラメータの普遍性: 汎関数くりこみ群による理解、日本物理学会第 69 回 (2014 年) 年次大会、東海大学、2014.3.27-30.
- [70] 村下湧音, 布能謙, 上田正仁: Lebesgue 分解に基づく非平衡等式、日本物理学会第 69 回 (2014 年) 年次大会、東海大学、2014.3.27-30.
- [71] 渡部昌平, 上田正仁: 光学格子中の Raman 補助トンネリングを有するスピノール BEC、日本物理学会第 69 回 (2014 年) 年次大会、東海大学、2014.3.27-30.
- 招待講演
- [72] 池田達彦: 孤立量子系における熱力学第二法則、日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013.9.25-28.
- [73] 布能謙: マクスウェルの悪魔: 量子情報と熱力学 ~ 量子フィードバック制御下でのゆらぎの定理~, 基研研究会「量子情報物理学」、京都大学、2013.12.4-6.
- [74] 古川俊輔: トポロジカル秩序と量子エンタングルメント、基研研究会「量子情報物理学」、京都大学、2013.12.4-6.
- [75] 布能謙: 量子フィードバック制御下でのゆらぎの定理、若手研究会「ゆらぎの定理: 現在と未来」、東京大学、2014.3.14.
- [76] 村下湧音: Lebesgue 分解に基づく非平衡等式、若手研究会「ゆらぎの定理: 現在と未来」、東京大学、2014.3.14.
- (セミナー等)
- [77] N. T. Phuc: Fluctuation-induced and symmetry-prohibited metastabilities in spinor Bose-Einstein condensates, RCAST, The University of Tokyo, Japan, 2013.6.
- [78] 設楽智洋: 量子推定理論を用いた不確定性関係の定式化、第58回物性若手夏の学校、白浜荘、2013.8.12-16.
- [79] 村下湧音: 熱機関の有限時間効率向上の可能性、第58回物性若手夏の学校、白浜荘、2013.8.12-16.

- [80] 遠藤晋平: Screening of the interaction between fermionic polarons、第6回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2013.12.7-9.
- [81] 上西 慧理子: Prethermalization in a coherently split one-dimensional Bose gas、第6回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2013.12.7-9.
- [82] 倉持結: 量子測定における相対エントロピーを用いた情報-反作用間トレードオフ関係、第6回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2013.12.7-9.
- [83] 設楽智洋: 適応的測定による測定の最適化、第6回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2013.12.7-9.
- [84] 布能謙: 量子フィードバック制御下でのゆらぎの定理、第6回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2013.12.7-9.
- [85] 古川俊輔: 人工磁場中の二成分ボース気体における量子ホール状態、第6回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2013.12.7-9.
- [86] 村下湧音: Lebesgue 分解より導かれる非平衡等式、第6回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2013.12.7-9.
- [87] 吉田周平: 2成分 Fermi 気体で普遍的に成り立つ Tan の関係式とその p 波系への拡張、第6回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2013.12.7-9.
- [88] 渡部昌平: 人工ゲージ場を伴う非立方格子型光学格子中のスピノール BEC、第6回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2013.12.7-9.
- [89] N. T. Phuc: Beliaev theory of spinor Bose-Einstein condensates and its applications, RIKEN, Japan, 2014.1.
- [90] 村下湧音: Lebesgue 分解に基づく非平衡等式、基礎物理学研究所、2014.3.5.
- [91] Y. Murashita: Optimizing Feedback Protocols, MERIT Colloquium 1, University of Tokyo, 2013.3.8.
- [92] Y. Murashita: Optimizing Feedback Protocols, 2nd MERIT Camp, Yuzawa Grand Hotel, 2013.3.10-12.

6 一般物理実験

6.1 牧島研究室 + 中澤研究室

6.1.1 科学衛星の運用と稼働状況

○ 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 8 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、さらに 2014 年 1 月には 2 台ある二次電池の一方が大幅に劣化した。節電運用の方策が功を奏し、搭載された X 線 CCD カメラ (XIS; X-ray Imaging Spectrometer) と、我々が設計製作に貢献した硬 X 線検出器 (HXD; Hard X-ray Detector) は、当面これまでと同様に運用することが可能である。我々は本年度も、衛星および HXD の運用を支援し、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、運用が続けられている。その運用は JAXA により 2014 年度末まで認可されており、延長申請も計画されている。牧島は引き続き、理研 MAXI チームの責任者を非常勤で兼務した。東大物理学教室としては、MAXI に直接に参加してはいるが、「すざく」と MAXI の連携などを支援している。

○ 後継機 ASTRO-H

「すざく」後継機 ASTRO-H は、2015 年度後半に打ち上げが設定され、建造が進んでいる。§6.1.7 に詳述するように、我々はそれに全面的に参加している。

6.1.2 強磁場中性子星と超新星残骸の研究

○ 中性子星と超新星残骸 [118]

中性子星 (NS) は原子核物理学と関係が深い [119]。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)。多種多様な NS の中でも、とくに興味深いのは、 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「マグネター」天体で [33, 57, 3, 119]、銀河系やマゼラン雲に約 30 個が知られている。

NS は重力崩壊型の超新星で作られると考えられ、後に残った超新星残骸 (SNR) は、NS の形成現場の証人として重要である [19, 50, 64, 80]。SNR はまた、重い星の進化の終点、重元素の合成とその星間空間への還元現場、宇宙での衝撃波の典型例、それい伴うプラズマ加熱や宇宙線加速源などの面からも、重要な研究対象となる。我々は、飛躍的な軟 X 線のエネルギー分解能や硬 X 線での撮像能力をもつ ASTRO-H (§6.1.7) への継承を念頭に、ビッグバンセンターの平賀と協力し、「すざく」により NS および SNR の研究を進めている。

その一環として村上らは昨年(2014)に続き、G330.2+1.0 と呼ばれる SNR の研究を進めた [49]。この SNR は不完全なシェルをもち、その X 線で明るい部分は非熱的スペクトル (おそらくシンクロトロン放射) を示すほか、中心よりやや東側の明るいスポットは、熱的 X 線放射を放射する。さらにその中心には、X 線の点源が存在し (パルスは未発見)、SNR と起源を同じくする NS である可能性がある。

○ 超新星残骸 CTB109 とマグネター 1E 2259+586 [56, 64, 80, 123]

中野らは昨年(2014)に続き、マグネター 1E2259+586 に付随する、CTB109 と呼ばれる SNR の研究を進めた。「すざく」による X 線分光の結果、その爆発エネルギー ($\sim 10^{51}$ erg s^{-1}) も元素組成も、重力崩壊型 SNR として典型的であった。またその特異な半月形の形状は、膨張する SNR シェルの中に巨大分子が食い込んでいるとして説明できた。このようにマグネターを生んだ手掛かりとなる特異性は乏しいが、X 線分光から得られた CTB109 の推定年齢は約 1.3 万年で、1E2259+586 の特性年齢 (23 万年) より大幅に若いという問題が残る。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ことを明らかにし、論文として投稿した。これは、マグネターが真の磁気駆動 NS であることを支持するとともに、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 $\sim 10^{12}$ 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している。ASTRO-H による高精度・広帯域の X 線観測により、研究の多角的な進展が期待される。

中野らはまた、6.7 h という超長周期の中心天体を擁する類似した SNR、RCW103 も研究した [73]。

○ マグネターの自由歳差運動の発見 [28, 82, 45, 88, 114, 118, 119]

マグネターのスペクトルは一般的に、黒体放射的な軟 X 線成分ときわめて硬い硬 X 線成分から成る。牧島らは理研の榎戸らと協力し、昨年(2014)に続き、マグネター 4U 0142+61 の 2009 年の「すざく」データを解析した。その結果、硬 X 線成分の 8.69 秒パルスの位相が、15 時間の周期で ± 0.7 秒ほど前後に動く効果を確立した。これは NS の自由歳差運動の発現と考えられ、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直交軸回りに比べ $\sim 1.6 \times 10^{-4}$ だけ小さい (レモン型変形) として説明できる。マグネターのトロイダル磁場を観測から推定した最初の結果である。

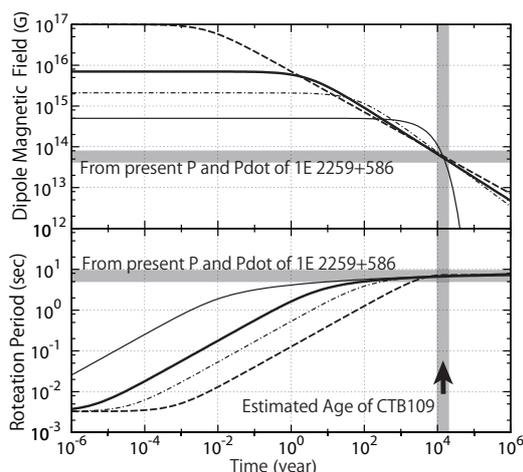


図 6.1.1: Allowed evolution tracks of the dipole magnetic field B (top panel) and the spin period (bottom) of the magnetar 1E 2259+586, assuming a power-law decay of B and spin-down due to magnetic dipole radiation. The system age, ~ 13 kyr, refers to that of CTB109, rather than the characteristic age of 1E 2259+586. Different line symbols specify different power-law indices of the field decay [80, 123]

2007 年のデータではこの位相変調は有意に検出されず、他方 2013 のデータでは変調振幅が ~ 1.2 秒に増大していた。これは NS の幾何学的対称軸に対し、硬 X 線の発生領域が移動したことを示唆する。この位相変調は、軟 X 線領域では検出されず (振幅 < 0.3 秒)、硬 X 線成分と軟 X 線成分が、異なる放射領域をもつ可能性も明らかになった。他のマグネターの「すざく」データ解析を進めるとともに、*ASTRO-H* による高感度な硬 X 線観測を計画中である。

○ 中性子星の磁場とサイクロトロン共鳴

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。笹野らは理研の山本や三原とともに、MAXI の増光検出にもとづき再帰パルサー GRO J1008-57 を「すざく」で観測し、HXD データの ~ 80 keV に CRSF を発見し (図 6.1.2)、この方法で測定された磁場の最高記録 7×10^{12} G を得た [25]。

CRSF 以外にも、スペクトル連続成分の形、鉄輝線の形状、パルス周期と変化率などから、降着 NS の磁場を総合的に推定する方法を、開発しつつある。特に有望なのは、*ASTRO-H* の高分解能分光により、Aldven 半径付近で降着物質が NS と共回転する際の、鉄輝線のドップラー効果を検出することである。

笹野らは、周期的ディップを示す 0.6 秒の X 線パルサー 4U 1822-37 (図 6.1.2) から ~ 32 keV に CRSF を発見し、この天体が強磁場 NS であることを示した [24, 58, 69]。さらに 2014 年 3 月、約 20 年ぶりに X 線増光した、バーストとパルスの両方を示す稀な天体 GRO J1744-28 が「すざく」で観測された。笹野らの解析で得られた図 6.1.2 のスペクトルは、強磁

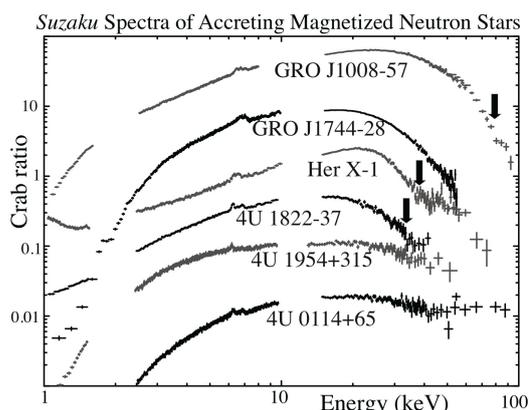


図 6.1.2: *Suzaku* $\nu F\nu$ spectra of 6 magnetized accreting NSs. GRO J1008-57 [25] is a transient Be binary pulsar. GRO J1744-28 (a transient), Her X-1, and 4U 1822-37 (a dipping binary; [24]) have low-mass companions. 4U 1954+315 (with an M-giant companion; [26]) and 4U 0114+65 (with a B-type companion) are long-period pulsars with the pulse periods of 5.1 hours and 2.6 hours, respectively. Arrows indicate CRSFs.

場 NS の特徴をもつ。これら 2 天体はともに、低質量星と強磁場 NS が連星をなす稀な連星系と考えられ、そうした系の形成シナリオに興味もたれる。

○ 長周期パルサーの研究

一群の X 線パルサーは数百秒 \sim 1 万秒の長いパルス周期をもち、降着物質との相互作用が強いこと、よって $B \sim 10^{13}$ G の強磁場をもつ可能性が示唆される。図 6.1.2 の 4U 1954+315 と 4U 0114+65 に代表されるように、それらのスペクトルは、折れ曲がりを見せず高エネルギーまで延び、これも磁場が強いことを支持する [58, 81, 125]。榎戸らは 4U 1954+315 の「すざく」データを解析し、わりに強めの磁場をもつ NS に、ほぼ球対称な降着が置いているという描像を導いた [26]。これらは、マグネターが連星を成したものかもしれない。*ASTRO-H* による > 100 keV での CRSF 探査が鍵となろう。

6.1.3 質量降着する弱磁場中性子星 [33]

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。降着流は NS 磁場にあまり影響されないため、その挙動は強磁場 NS の場合とは異なり、むしろ降着 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。

○ 光度変化に伴う降着流幾何の変化

昨年に続き、櫻井らはトランジェント LMXB の代表例である Aql X-1 の「すざく」データ解析を続け [7, 52, 59, 96]、また小野らは GS 1826-238 の「すざく」のデータ解析を進めた [32, 70, 99]。その結果、質量降着率が減少して系がソフト状態からハード状態へと遷移するさい、降着流や X 線放射領域がどう

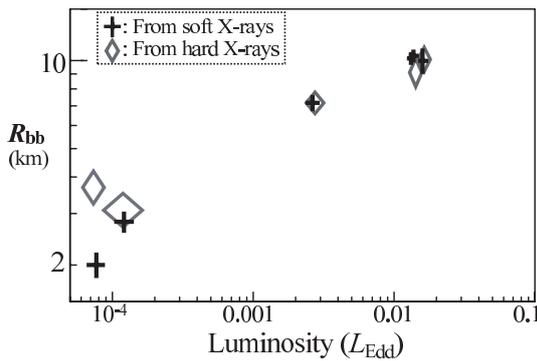


図 6.1.3: The effective radius of black-body source on the NS surface in Aql X-1 measured with *Suzaku*, shown as a function of the Eddington luminosity ratio. Crosses show values measured directly from the disk emission in soft X-rays, while diamonds those estimated from the optical depth of the Comptonizing corona [7, 52, 59].

変化するか明らかになって来た。たとえば図 6.1.3 の十字印は、スペクトルのソフト側に見られる黒体放射 (NS 表面からの放射) の等価半径を求めたもので、降着率が下がるにつれて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と解釈できる。同じ図の菱形は、観測スペクトルの硬 X 線部分から、高温コロナ流が NS 表面に降着する足下領域の等価半径を求めたものである。黒体放射半径と良く一致することから、弱い磁場による降着流の絞り込みが起きることは、より確実にされた。

○ Dipping 天体の研究 [53, 71, 98]

学振外国人研究員の Zhang Zhongli (張仲莉) は、LMXB のコロナ形状を測定すべく、それらのうち周期的ディップを示す (円盤を横から見る) ものを研究している。典型例 4U 1916-053 の「すぎく」スペクトルを図 6.1.4 に示す。これは一般的な LMXB ソフト状態のモデルである、標準降着円盤からの多温度黒体放射と NS 表面からの黒体放射がコンプトン化されたものの和で再現できるが、通常の LMXB (図の 4U 1820-30) に比べ、 > 10 keV でより強くコンプトン化されている。ソフト状態 LMXB の高温コロナが、円盤に沿って扁平に広がるためと考えられる。

○ 熱的コンプトン散乱の統一的解釈

牧島、小野、小林、Zhang、理研の杉崎らは、LMXB や降着ブラックホールに広汎に見られる熱的コンプトン過程の、統一的な解釈に挑戦している [46, 94, 97, 124, 51, 47]。その結果、電子コロナの温度 T_e と種光子温度 T_s の比 $Q \equiv T_e/T_s$ が、 y パラメータ ($y \equiv 4kT_e/m_e c^2 \times$ 光子散乱回数) を補間する、新しい良いパラメータになることがわかった。結果は図 6.1.5 の (Q, y) プロットにまとめられており、以下のように多くの結果が読み取れる。ASTRO-H でさまざまな展開が期待される。

1. LMXB のハード状態は $Q > 7$ (T_e が高く τ が低い)、ソフト状態は $Q < 5$ (T_e が低く τ が大) に現れ、 Q は状態のよい指標になる。

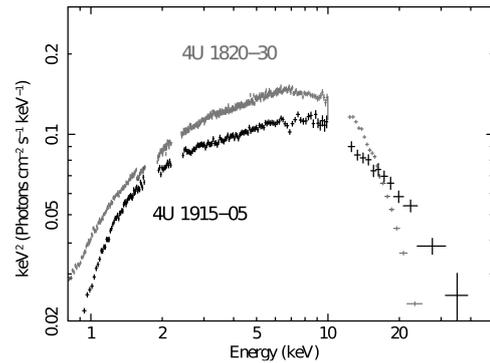


図 6.1.4: A *Suzaku* νF_ν spectrum of the dipping source 4U 1916-05, compared with that of the normal LMXB 4U 1820-30 [53, 71, 98].

2. 多くの LMXB が、図上で共通の軌跡を描く。これは LMXB の自由度が質量降着率 (と inclination) のみであることを意味する。
3. LMXB が状態遷移するさい、図上での動きはひじょうに急激だが、軌跡は連続的につながる。
4. ブラックホール (BH) 天体は 2 次元分布する。これは降着率に加え、BH 質量、降着エネルギーの分岐比など、自由度が多いためであろう。
5. ULX と AGN に関しては項を改める (§6.1.4)。

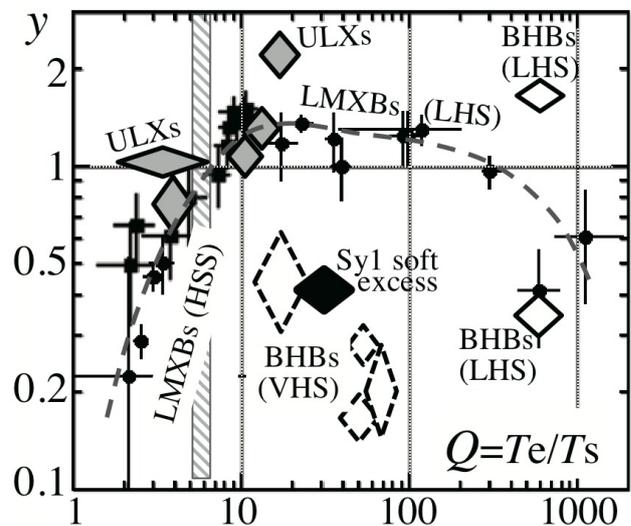


図 6.1.5: A *Suzaku* compilation of thermal Comptonization, on the plane of the new parameter $Q \equiv T_e/T_s$ and the y -parameter. Filled circles with crosses are weak-field neutron-star binaries (LMXBs), while diamonds represent accreting black holes, including black-hole binaries, ULXs, and a Seyfert galaxy. The vertical strip at $Q \sim 6$ indicates a boundary between the Low/Hard state (LHS) and the High/Soft state (HSS).

6.1.4 質量降着するブラックホール

ブラックホール (BH) に物質が降着する際、解放さ

れる重力エネルギーは、放射や運動エネルギー(ジェットなど)に変換されたり、BHに吸い込まれたりする。放射に行く分は最大で静止質量エネルギーの $\sim 10\%$ と考えられるが、この比は降着の仕方により、かなり変動する。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5桁以上の広帯域にわたる。

「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。今年度も理研の山田らと協力し、その研究を続けた[5, 10, 11]。

○ ULX 天体 [29, 47, 72]

近傍銀河に見られるULX(Ultra-Luminous X-ray Sources)天体は、恒星質量BHと巨大BHを結ぶ、「中質量BH」の有力候補である(Makishima+2000)。それらは図6.1.6のように、Power-Law的なスペクトルを示すPL状態と、多温度黒体放射的なスペクトルを示す円盤的状态の間を遷移し、後者の方が光度が高い。小林らは、いくつかのULXの「すざく」データを解析し、以下を明らかにした。

1. どちらの状態でも、0.5–10 keV スペクトルは、多温度黒体放射と、その熱的コンプトン化($T_e \sim 3$ keV, $\tau \sim 10$)との和で説明できる。円盤的状态は従来、Slim 円盤モデルで表されていた。
2. 円盤内縁温度を種光子温度 T_p に採り §6.1.3 の Q を求めると(図6.1.5)、LMXBと同様、PL状態は $Q > 7$ 、円盤状態は $Q < 6$ となる。
3. 状態遷移の光度はULX間で1桁半もばらつく。よって遷移が同じEddington比で起きるなら、ULX間でEddington光度は1桁半も異なり、最も軽いULXが $\sim 10 M_\odot$ だとしても、最も重いULXは数百 M_\odot と推定される。

これらは特定の理論モデルに頼らず、ULXの中質量BH説を強化するもので、ASTRO-Hの高感度な広帯域観測により、さらなる強化が期待される。

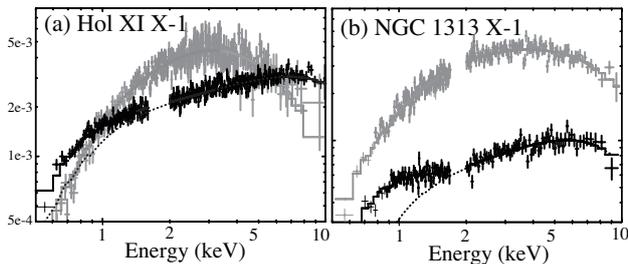


図 6.1.6: Spectra (in $\nu F\nu$ form) of the two ULXs, Hol IX X-1 (panel a) and NGC 1313 X-1 (panel b), obtained in the PL state (black) and the Disk-like state (gray). The PL state data of Hol IX X-1 were taken with the ASCA GIS, while the others with the *Suzaku* XIS. [47]

○ 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。その円盤放射は真空紫外領

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。野田らは昨年(2013)に続き、「すざく」で得た広帯域のAGNスペクトルを、変動を手掛かりに成分分解する“C3PO”法を開発し、謎だったAGNの「軟X線超過現象」が、熱的コンプトン現象であることを立証した[38]。この結果は図6.1.5のように、他の降着天体と同列に論じられる。

さらに野田らはこの方法を約10個のセイファート銀河の「すざく」データに適用した結果、3–45 keVの広帯域放射が、次の三成分に分解できることを明らかにした[14, 34, 43, 60, 74, 76, 95]。

1. 光子指数 $\Gamma \approx 2.3$ と柔らかく変動の激しい、power-law(PL)的な一次成分。光度(Eddington比)が高くなると卓越する。
2. 光子指数 $\Gamma \approx 1.4$ と硬く、吸収が強く、変動の遅い、第2のpower-law(PL)的な一次成分。光子指数は $\Gamma \approx 1.4$ と硬い。光度(Eddington比)が低い時に優勢となる。
3. 遠方の中性物質で発生する反射成分。硬X線コンプトンハンプ、幅の狭い鉄輝線、吸収された連続成分から成る。

この描像は、AGNの一次放射を単一成分として扱う長年の通説に根底から見直しを迫る重要性をもち、三宅らによるセイファート銀河IC 4329Aの解析でも確認された[75, 31, 54, 101]。野田はこの新描像を進展させることで、修業年齢特例で博士学位を早期取得し[35]、理学系研究科奨励賞を受賞し[1]、多くのセミナーでこの成果を講演した[133, 131, 137, 138]。AGNのセントラルエンジンの全貌を解明することは、ASTRO-Hの最重要テーマの1つになる。

○ 活動銀河核のX線-可視光同時観測

野田らは東大天文センターなどの協力を得て、名古屋「ピリカ」、東大木曾シュミット、東工大MIT-SuME、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、2013年度に6回にわたり、NGC 3516の「すざく」と可視光の同時観測を実行した[41, 100, 131, 137, 138]。どの観測でもNGC 3516は、X線でも可視光でも、過去にないほど暗かったが、結果として図6.1.7のように、両者の間に良い相関が得られた。これは暗い時に卓越する $\Gamma \approx 1.4$ の成分が、降着円盤からの可視光と強く相関することを意味する。従来NGC 3516でX線と可視光の相関が悪いとされたのは、 $\Gamma \approx 2.3$ のX線成分が可視光と無相関に変動するためと解釈できる。

6.1.5 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。

○ 銀河団の宇宙論的進化の新しい描像

牧島らは「あすか」のX線観測により、銀河団に関し独創的な磁気流体的描像(Makishima+2001)を

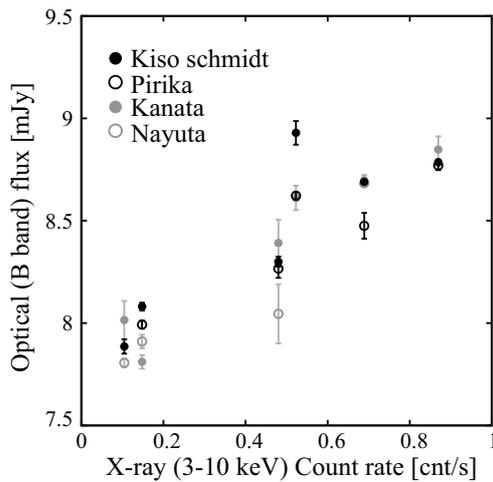


図 6.1.7: X-ray (abscissa) to optical (ordinate) intensity correlation of the Seyfert galaxy NGC 3516, obtained with simultaneous observations using *Suzaku* and 5 medium-size domestic telescopes. The optical data includes contribution from the host galaxy.

構築してきた。それは「銀河団のメンバー銀河たちは、ICM 中を運動するさい抵抗を受け、渦巻から楕円へと形態を変化させつつ中心に落下し、その解放エネルギーが 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できる威力をもつ。

この予言を証明すべく我々は、ビッグバンセンターの Gu (雇 力意)、奈良高専の稲田直久らと協力し、近傍 ($z \sim 0.1$) から遠方 ($z \sim 0.9$) までの 34 個の銀河団を「サンプル 1」と定義し、それらをハワイ大学 88 インチ望遠鏡で観測した。その多色画像からメンバー銀河を同定し、それらの空間分布を求め、X線公開データ (*Chandra*, *XMM-Newton*) から計算した高温プラズマの空間分布と比較した。その結果、図 6.1.8 に離散データ点として示すように、遠方銀河団では ICM 周辺部まで銀河が分布するのにに対し、近傍の系では、ICM 球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でき [13, 23]、牧島の予言を検証することに成功した。これは、宇宙最大級のエネルギー流の新発見を意味する。

Gu らは中国人研究者の協力を得て、Sloan Digital Sky Survey のデータを 2 次処理した、 $z = 0 \sim 0.5$ の 340 個の銀河団のデータ (多色測光でメンバーを選定済み) を入手できた。それらを「サンプル 2」と名付け、対応する X 線公開データと合わせて同様に解析した結果、図 6.1.8 に実線として示すように、サンプル 1 と同様、銀河が宇宙年齢かけて中心へ落下するという進化を検出できた。成果は国際学会や国内学会・研究会 [78, 42, 102, 117, 120, 121, 84, 87]、国内外でのセミナー [127, 128, 130, 132, 134, 135, 136] など広く公表し、また 2014 年 3 月に新聞記者発表を行った [142]。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 線放射のドップラーシフトを検出できれば、動かぬ証拠となろう。

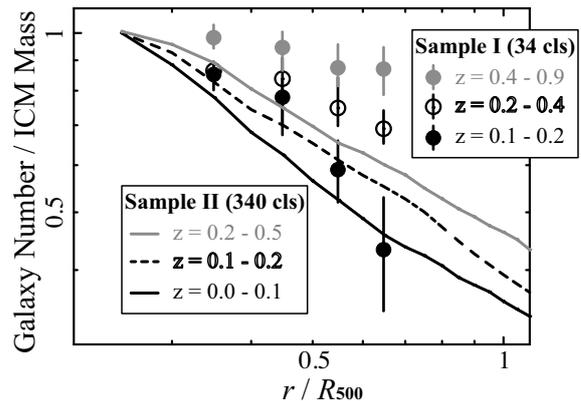


図 6.1.8: Circularly integrated galaxy light profiles of clusters of galaxies, normalized to circularly integrated mass of their X-ray emitting plasmas. Discrete data points represent results on Sample 1 (34 clusters), while the three curves Sample 2 (340 clusters), averaged into three separate subgroups with different redshifts,

○ 銀河ガスの動圧剥ぎ取り

上記の結果は、銀河と ICM が強く相互作用することを意味する。流入する ICM の動圧により、銀河自身のガスが下流へ変位し、それが銀河の星や暗黒物質に重力を及ぼすのであろう。この動圧が限界を越えると、銀河ガスは重力ポテンシャルを乗り越えて銀河から剥ぎ取られ、それに伴い重元素が、銀河間空間に運ばれると考えられる。その現場を明らかにすべく、Gu らは昨年(2013)に続き、国立天文台の八木らと協力し、「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」望遠鏡などで明らかにできた [102, 15]。剥ぎ取られたガスが銀河団の中で星を形成するという、驚くべき兆候も得た [16]。

○ 衝突銀河団 CIZA J1358.9 – 4750 の研究

CIZA は銀河面の背後にある銀河団のカタログで、加藤、中澤らは、その中から $z = 0.07$ の標記天体を選び「すざく」により観測した。山形大の滝沢、阪大の藤田、シドニー大の赤堀らと協力してデータを解析した結果、図 6.1.9 のように、この天体は 2 つの銀河団に対応する X 線ピークと、その中間をつなぐ X 線放射とから成り、中間部では ICM の加熱が起きていること、よってこの天体は、2 つの銀河団がまさに衝突しかかっている、貴重な系であることが判明した [30, 48, 61, 77, 85, 112]。XMM-Newton の X 線画像では、衝撃波も同定できた。ICM の温度上昇とランキン=ユゴニオの関係から、衝突速度は $\sim 1800 \text{ km s}^{-1}$ と推定される。「すざく」の追観測および電波観測が採択され、*Chandra* の観測にも応募した。

6.1.6 雷雲ガンマ線の研究

○ GROWTH 実験 [21, 63, 67, 115]

我々は身近な天然の加速器として、雷雲中での粒子の静電加速を理解すべく、原子力機構の土屋、理研

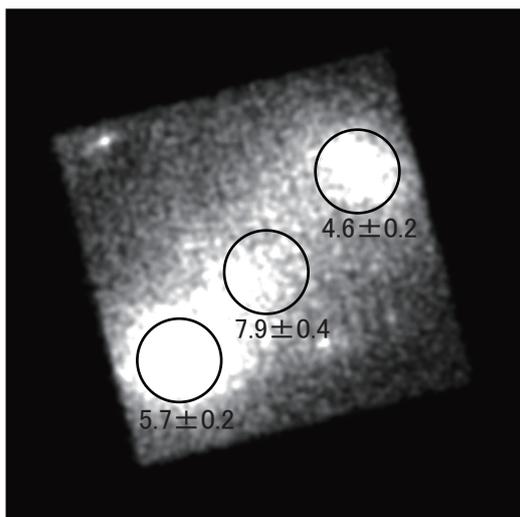


図 6.1.9: The 1–10 keV image of CIZA J1358.9 – 4750, on which the ICM temperatures (in units of keV) at three locations are indicated.

の榎戸などと協力し 2006 年度より、新潟県柏崎刈羽原子力発電所にて、冬期雷雲から飛来するガンマ線の検出実験 GROWTH (Gamma-Ray Observation of Winter Thunderclouds) を行っている。これは結晶シンチレータを用いた自律型の検出器で、今年度は博士 1 年の榎本が参加し、体制が強化された。

7 冬にわたる GROWTH 観測で、おもに 12 月～1 月に、十数例のガンマ線放射が検出された。うち 1/3 ほどは、雷放電に同期した短い (< 0.1 秒) 「短バースト」、残りは雷放電に同期せず 1 分～数分間も続く「長バースト」である。雷雲中には $\sim 0.2 \text{ MeV m}^{-1}$ の静電場があり、宇宙線などで $> 100 \text{ keV}$ の電子が生じると逃走電子機構により、電子が雪崩増幅されつつ、相対論的領域にまで加速され、制動放射でガンマ線を出すと考えられる。バーストの長短によらずガンマ線スペクトルは $\sim 10 \text{ MeV}$ まで延びるので、電子が $> 10 \text{ MeV}$ まで加速されていることは疑いない。しかし長バーストで、いかにして加速が 1 分以上も維持されるかは、まだ大きな謎である。

○ 雷放電に伴うガンマ線放射の途絶 [21]

長バーストの中でも興味深いのが、2010 年 12 月 30 日のイベントである。3 分ほど続く長バーストがほぼピークに達したとき落雷があり、その $\sim 800 \text{ msec}$ 前に、ガンマ線放射が突如として途絶したのである。落雷により静電場が解消されたため、電子加速が止まったと解釈されるが、詳細は未解明である。

○ 511 keV ラインの検出 [63, 67, 115]

2013–2014 年の冬にはあいにく、GROWTH でバーストが検出されなかったが、2012–2013 年の冬には 3 例が検出され、その 1 例 (2012 年 1 月 13 日 UT 00:27 に発生) は 2 つの点で特異である。1 点は、短バーストと同時に長バーストが起きたこと、もう 1 点は図 6.1.10 のように、長バーストのスペクトルの $508 \pm 5 \text{ keV}$ に顕著な輝線が検出されたことである。

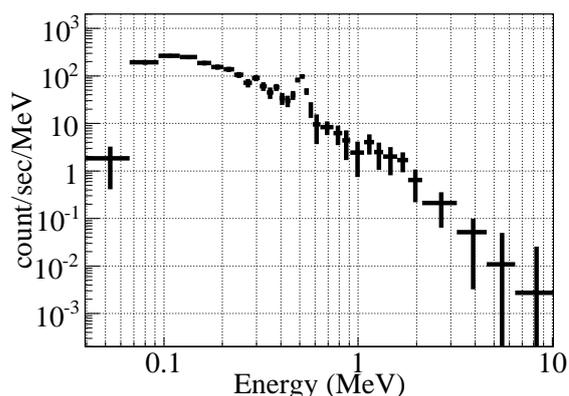


図 6.1.10: A background-subtracted spectrum of burst like gamma-ray emission from thunderclouds, on 2012 January 13, 00:27:00 UT, detected for about 1 minute with the GROWTH experiment placed at Niigata Kariwa Nuclear Plant. A clear 511 keV line is seen.

これは電子陽電子対消滅線と解釈でき、フェルミガンマ線宇宙望遠鏡による宇宙空間からの検出例を除くと、雷ガンマ線から地上で初めて対消滅線が検出された事例である。ラインは等価幅にして $\sim 80 \text{ keV}$ で、これは過去の GROWTH イベントにおける上限値より 1 桁以上も強い。電子陽電子対は数 MeV のガンマ線により生成されうるが、どうやって連続成分に対しラインをここまで強くできるか、また短バーストと長バーストの複合がそれに関係しているかなど、きわめて興味深い。

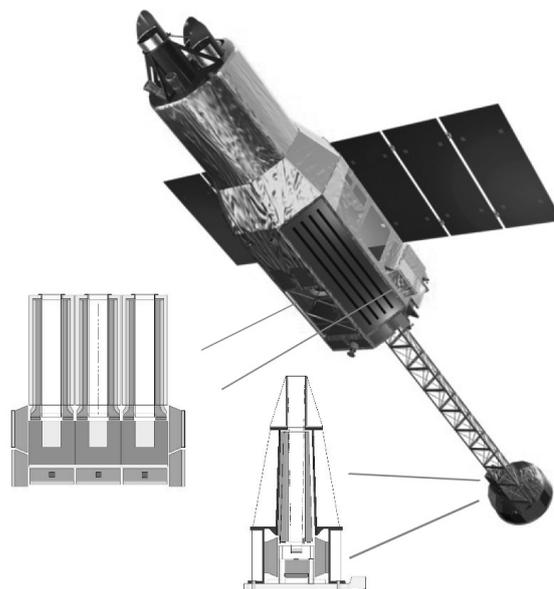


図 6.1.11: Drawing of the *ASTRO-H* satellite, to be launched in 2015. The overall length is 14 m, and the weight is 2.7 t. Also plotted are cross sectional views of the HXI (right: 40 cm tall) and SGD (left: 50 cm tall). Two identical units of each instrument are mounted.

6.1.7 ASTRO-H 衛星計画

○ ASTRO-H 衛星とその搭載装置

ASTRO-H 衛星は、国内の多くの大学研究機関、米国 NASA および欧州 ESA などの国際協力の下で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、0.5–10 keV 域で X 線エネルギーを数 eV の精度で測定する X 線マイクロカロリメータ、38' の広視野を持つ X 線 CCD カメラに加え、5–80 keV を集光結像する 2 台のスーパーミラー硬 X 線望遠鏡 (HXT) とその焦点面に置かれる硬 X 線イメージャー (HXI)、60–600 keV で動く軟ガンマ線検出器 (SGD) が搭載される。これら 4 種 6 個の検出器の組み合わせにより、ASTRO-H は広帯域、高感度、高精度での X 線分光観測を得意とし、ブラックホールや銀河団の研究などに飛躍的な進展をもたらす。この衛星は長さ 14 m、重さ 2.7 t と日本の科学衛星として最大で、HIIA ロケットにより 2015 年に打ち上げられる予定である。我々は、JAXA、広島大、理研ほか国内外の大学研究機関、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。

HXI は、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、エネルギー分解能 1.5 keV の精度で分光する。その検出器部は図 6.1.11 に示すように、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 ストリップ検出器を重ねたイメージャーを搭載する。HXT と HXI の組み合わせは、従来装置より 2 桁よい感度を実現する。

SGD は図 6.1.11 のように、3×2 台の「コンプトンカメラ」と、それらを取り囲む 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 より感度を一桁上げる。

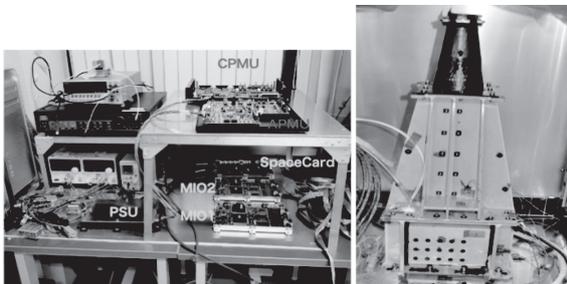


図 6.1.12: HXI “full EM” test photo. Full system made of FPGA electronics and power supplies (left) are put out side the thermostatic chamber, within which the sensor part is located (right).

○ HXI の開発試験 [66, 68, 79, 89, 110, 36, 37]

2013 年度は図 6.1.12 に示すように、HXI 検出器システムのフルセットの試作機 (通称 “full EM”) を立ち上げ、半導体イメージャ部、シールド部、データ処理部、ソフト部、地上系のすべてを通した形態で、多くの機能試験、性能確認試験を実施した。試験には、衛星の主コンピュータのシミュレータから、HXI 検出器および全回路系、さらに地上解析/運用システムのシミュレータが含まれる。作業は相模原の JAXA 宇宙科学研究所において半年にわたって行われ、イメージャの試験には中野の指導の下で小林が [103]、シールド系の試験には笹野の支援の下で村上が、それぞれ中心的に参加した [106, 104, 109]。試験に必要なソフトウェアの整備には、櫻井が大きく貢献した [68]。最終的に図 6.1.13 に示すようなスペクトルを取得し、 -20° 環境で要求性能を満たすことを実証した。小林と村上は、この成果をそれぞれ修士論文にまとめた [36, 37]。

今年度はまた衛星搭載品 (flight model = FM) の開発・製造も進められ、4 月現在、5 層のイメージャと 9 個の BGO シールドから成る、検出器部 (HXI-S) の 1 台目が完成している。イメージャの性能試験は、小林らが JAXA と共同で、また BGO の性能確認は、笹野らが静岡大などと共同で完遂した [105]。HXI-S の 2 台目は現在、構造体と 9 個の BGO シールド製造が終了し、イメージャの完成を待って、全体の組み立てに向かう。

検出器の読み出し回路系は、すべての基板の最終試作品 (Engineering Model = EM) が製造された。開発製造を担当する三菱重工の社内試験を経て、我々も性能試験を実施した。いくつかの改良を経て、最終的に性能を満たす設計が確立され、これを受けて、FM の製造が完了した。

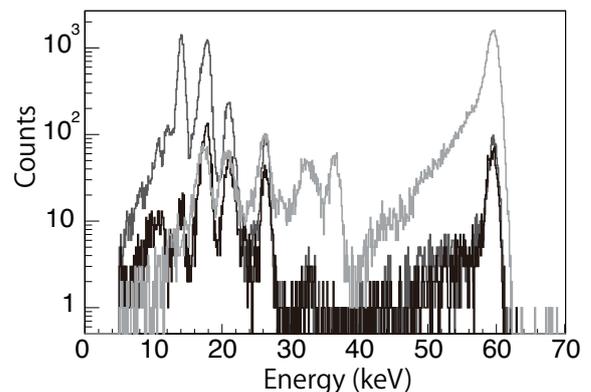


図 6.1.13: ^{241}Am spectra obtained in the “HXI full EM” test. All radio active lines are clearly observed. For clarity, the top and bottom DSSD and the CdTe spectra are shown. Energy resolution meets the requirement of < 2 keV (FWHM).

○ SGD の開発試験 [65, 90]

SGD の開発でも今年度は、衛星搭載品に準ずる装置を用い、中澤は主に検出器の構造の視点から、野田がその熱設計の視点から、そして村上らがシールド

ド部の視点から、性能評価と環境試験をリードした。

JAXA の筑波宇宙センターで行われた、SGD 検出部の構造開発の最終試験では、大面積のラジエータの支持構造に大きな負荷がかかり、開発は難航したが、いくつかの方策により問題を解決した。SGD の主検出部である Si/CdTe コンプトンカメラ部に対しても、熱と構造の観点から、最終確認試験を行った。シールド部に関しては、HXI のそれと共通性が高いため、あわせて開発を進め、すでに 2012 年度内に基本設計は完成している。これらをもって SGD 検出部の設計が確定した。

これを受けて 2013 年度の後半では、FM 品の製造が開始された。SGD 1 台あたり 25 個の BGO モジュールの製造では、HXI と同様に三菱重工で製造されたものに対し、笹野らが静岡大や名古屋と協力し、評価試験を行った。1 号機用の 25 個は性能検証が済み、現在は 2 号機用の製造に入っている。

HXI に準じ、SGD も試作機と一部 FM を組み合わせた全系の試験を行っている。いくつか課題が見られ、対策の検討を進めた。ここでは、シールド担当として村上らが大きく貢献した。

○ ASTRO-H 衛星全体の環境試験と組み上げ

2013 年度には、図 6.1.14 のように全体構造を用い、ASTRO-H 衛星の機械環境と熱環境の試験が実施された。その結果、振動や衝撃レベルが更新され、熱設計のチューニングが行われた。これらの結果は、HXI および SGD の最終設計にフィードバックされた。

2013 年末から 2014 年 5 月にかけては、衛星全体の「一次噛合わせ試験」が実施されており、HXI は 2 セット (一部 EM 品で代用)、SGD は 1 セット (一部 EM 品で代用) とダミー 1 セットをもって参加している。衛星構体にすべてのサブシステムを取り付け、配線し、電源供給とデータ収集を確認する作業で、多くの課題を洗い出し対策を講じつつ、作業を進めている。熱構造系の試験では中澤や野田らが、データ処理系では櫻井らが、また HXI の試験では小林や村上らが、大きく貢献している。

今後はいったん衛星を分解後し、各サブシステムの環境試験、打ち上げに向けての最終艀装、装置の較正作業などを実施する。衛星は 2014 年の 11 月より、最終組み上げと最終試験に突入し、2015 年秋には種子島へ移送し、2015 年度内の打ち上げに臨む。

6.1.8 将来計画

○ sub-MeV ガンマ線全天探査衛星 CAST の検討 [91, 107]

MeV 帯域の宇宙観測は、原子核からの輝線が現れる帯域であると同時に、宇宙の粒子加速の研究において、 γ が最も小さい電子の逆コンプトン散乱が見られ、今なお人類にとって未開のフロンティアである。しかし 2000 年の COMPTEL の停止以降、その観測に進展は乏しい。近年の *Fermi* 衛星による GeV 帯域の全天観測の成果に照らすと、MeV 帯域においても 1 mCrab レベル感度での広視野 (or 全天) 観測の実現が重要である。

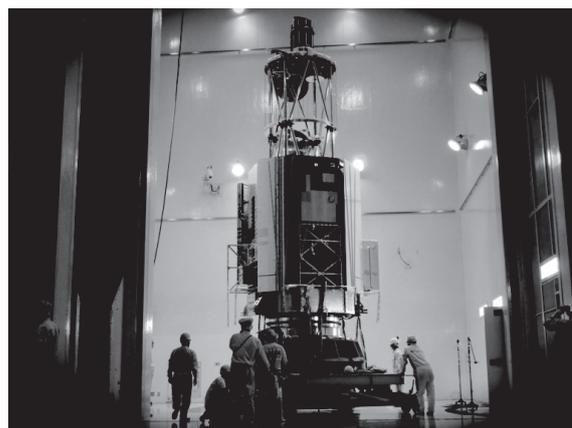


図 6.1.14: ASTRO-H in its mechanical test configuration, being transferred to the acoustic test facility at the Tsukuba Space Center.

ここを担うべく我々が検討を進めているのが、CAST (Compton Telescope for Astro and Solar Terrestrial) 計画である。これは ASTRO-H 衛星の SGD 検出器に搭載される Si/CdTe 半導体コンプトン望遠鏡の技術を発展させ、将来の小型衛星もしくは国際宇宙ステーション (ISS) の搭載機器として、全天を撮像観測する計画である。0.2–2 MeV の “sub-MeV” 帯域に集中することで、小型で高性能な観測装置を目指している。また CAST の発展として、欧州やアメリカの MeV 研究者と連携し、将来の MeV 大型衛星の計画の検討も進めている。

○ その他の実験開発

将来の宇宙観測を目指し、三宅や小野は、高速中性子を判別できる新型のプラスチックシンチレータの評価を進めた。笹野らはビッグバンの平賀と協力し、時間分解能が乏しいという X 線 CCD の欠点を補うべく、CMOS 型半導体撮像センサーを用いた、X 線単一光子の撮像分光の技術開発を進めた [62, 93]。これまで OB の奥山や西岡が着手し、笹野らが受け継いだ、BGO 結晶シンチレータの集光率の実験結果を、論文にすることができた [22]。

○ 次期 X 線観測衛星の計画検討

2015 年に打ち上げ予定の ASTRO-H は、その時期に宇宙にあがる唯一の国際宇宙天文台であるが、その次の大型ミッションとして本年に ESA 主導の ATHENA 計画が採択され、2028 年の打ち上げを目指して動き始めた。本計画には日本も参加を検討しており、国際調整が進められている。一方で、その打ち上げ以前に ASTRO-H は想定寿命を迎えることから、両者の間をつなぐ次世代ミッションも検討に着手している。

<受賞>

[1] 野田博文、東京大学理学系研究科研究奨励賞 (博士の部、天文学専攻)、2014 年 3 月 25 日。

<報文>

(原著論文 (Refereed))

- [2] Fujita, Y. Okabe, (5 co-authors), Matsushita, K., Nakazawa, K. & Takizawa, M.: “Discovery of an Outstanding Disk in the cD Galaxy of the Hydra A Cluster”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **65**, Art., No.L.15 (2014)
- [3] 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**, Art. No. 52 (2013)
- [4] 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**, Art. No. 74 (2013)
- [5] 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**, Art.No. 80 (2013)
- [6] Nakajima, M., Mihara, T., Sugizaki, M., Serino, M., Matsuoka, M., Kawai, N., & Makishima, K.: “Precursors and outbursts of A 0535+26 in 2009-2011 observed by the MAXI/GSC and the Swift/BAT”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, Art., No. 9 (2014)
- [7] Sakurai, S., Torii, S., Noda, H., Zhang, Z., Ono, K., Nakazawa, K., Makishima, K., Takahashi, H., Yamada, S. & Matsuoka, M.: “Suzaku studies of luminosity-dependent changes in the low-mass X-ray binary Aquila X-1”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, Art. No. 66 (2014)
- [8] Burke M.J., Raychaudhury S., (20 co-authors), & Zhang, Z.: ”Spectral properties of X-ray binaries in Centaurus A” *Astrophys. J.* **766**, id 80 (2013)
- [9] Ichikawa, K., Matsushita, K., (7 co-authors), Nakazawa, K. et al.: “Suzaku Observations of the Outskirts of A1835: Deviation from Hydrostatic Equilibrium”, *Astrophys. J.* **766**, id 90 (2013)
- [10] 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”, *Astrophys. J. Lett.* **767**, id 34 (2013)
- [11] 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”, *Astrophys. J. Lett.* **767**, id 35 (2013)
- [12] Odaka, H., Khangulyan, D., Tanaka, Y. T., Watanabe, S., Takahashi, T. & Makishima, K.: “Short-term Variability of X-Rays from Accreting Neutron Star Vela X-1. I. Suzaku Observations”, *Astrophys. J.* **767**, id 70 (2013)
- [13] 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**, id 157 (2013)
- [14] Noda, H., Makishima, K., Nakazawa, K. & Yamada, S., “A Suzaku Discovery of a Slowly Varying Hard X-ray Continuum from the Type I Seyfert Galaxy NGC 3516”, *Astrophys. J.* **771**, id100(2013)
- [15] Gu, L., Yagi, M., Nakazawa, K., Yoshida, M., Fujita, Y., Hattori, T., Akahori, T. & Makishima, K.: “Multi-wavelength Studies of Spectacular Ram Pressure Stripping of a Galaxy: Discovery of an X-Ray Absorption Feature”, *Astrophys. J. Lett.* **777**, id L36 (2013)
- [16] Yagi, M. Gu, L., Fujita, Y., Nakazawa, K., Akahori, T., Hattori, T., Yoshida, M. & Makishima, K.: “Multi-wavelength Studies of Spectacular Ram-pressure Stripping of a Galaxy. II. Star Formation in the Tail”, *Astrophys. J.* **778**, id 91 (2013)
- [17] Odaka, H., Khangulyan, D., Tanaka, Y. T., Watanabe, S., Takahashi, T. & Makishima, K.: “Short-term Variability of X-Rays from Accreting Neutron Star Vela X-1. II. Monte Carlo Modeling”, *Astrophys. J.* **780**, id 38 (2013)
- [18] Tamura, T., Yamasaki, N. Y., Iizuka, R., Fukazawa, Y., Hayashida, K., Ueda, S., Matsushita, K., Sato, K., Nakazawa, K., Ota, N. & Takizawa, M.: “Gas Bulk Motion in the Perseus Cluster Measured with Suzaku”, *Astrophys. J.* **782**, id 38 (2013)
- [19] Yamaguchi, H., Badenes, C., Petre, R., Nakano, T., Castro, D., Enoto, T., Hiraga, J. S., et al.: “Discriminating the Progenitor Type of Supernova Remnants with Iron K-shell Emission”, *Astrophys. J. Lett.* **785**, id L27 (2014)
- [20] Doroshenko, V., Santangelo, A., Nakahira, S., Mihara, T., Sugizaki, M., Matsuoka, M., Nakajima, M. & Makishima, K.: “Footprints in the wind of Vela X-1 traced with MAXI”, *Astron. Ap.* **554**, id A37 (2013)
- [21] Tsuchiya, H., Enoto, T., Iwata, K., Yamada, S., Yuasa, T., Kitaguchi, T., Kawaharada, M., Nakazawa, K., Kokubun, M., Kato, H. “Hardening and Termination of Long-Duration γ Rays Detected Prior to Lightning”, *Phys. Rev. Lett.* **111**, id 015001 (2013)
- [22] 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.* **715**, 105 (2013)

- [23] 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* **334**, 453 (2013)
- [24] Sasano, M., Makishima, K., Sakurai, S., Zhang, Z. & Enoto, T.: “Suzaku View of the Neutron Star in the Dipping Source 4U 1822–37”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, in press (2014)
- [25] Yamamoto, T., Mihara, T., Sugizaki, M., Nakajima, M., Makishima, K. & Sasano, M.: *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, in press (2014)
- [26] Enoto, T., Sasano, M., Yamada, S., Tamagawa, T., Makishima, K. et al.: “Spectral and Timing Nature of the Symbiotic X-ray Binary 4U 1954+319: The Slowest Rotating Neutron Star in an X-ray Binary System”, *Astrophys. J.*, in press (2014)
- [27] Su, Y., Gu, L., White, R. & Irwin, J.: “Joint XMM-Newton and Chandra Observations of NGC 1407/1400 Complex: A Tail of an Early-Type Galaxy and a Tale of a Nearby Merging Group”, *Astrophys. J.*, in press (2014)
- [28] Makishima, K., Enoto, T., Hiraga, J.S., Nakano, T., Nakazawa, K., Sakurai, A., Sasano, M. & Murakami, H.: “Possible Evidence for Free Precession of a Strongly Magnetized Neutron Star in the Magnetar 4U 0142+61”, *Phys. Rev. Lett.*, in press
- (会議抄録)
- 天文・天体物理若手夏の学校 (宮城蔵王: 2013年7月29日~8月1日) 収録
- [29] 小林翔悟ほか: 『『すざく』による ULX 天体 Holmberg IX X-1 のスペクトルの時間変動解析』
- [30] 加藤 佑一ほか: 『衝突銀河団 CIZA J1358.9-4750 の『すざく』による観測』。銀河 44c
- [31] 三宅 克馬ほか: 『Sy1 活動銀河核 IC4329A における新たな硬 X 線成分の発見』、コンパクト天体 09a
- [32] 小野光ほか: 『『すざく』を用いた GS 1826-238 のハード状態のスペクトル解析』、コンパクト天体 10a
- その他の収録
- [33] Makishima, K.: “From Sco X-1 to magnetars: Past, present, and future of X-ray studies of neutron stars” *Mem. S.A. Italy*, vol. 84, p.547 (2013)
- [34] Noda, H., Makishima, K., Nakazawa, K. & Yamada, S.: “Model-Independent Decomposition of Broad-Band *Suzaku* Spectra of AGNs into Primary Continua and Secondary Components”, *ibid.*, p.707
- (学位論文)
- [35] Noda, Hirofumi: “X-ray Studies of the Central Engine in Active Galactic Nuclei with *Suzaku*” 博士学位論文 (天文学専攻; 2013年9月、修業年限特例早期取得)
- [36] 小林翔悟: 『*ASTRO-H* 衛星搭載の硬 X 線撮像検出器の応答特性』、修士学位論文
- [37] 村上浩章: 『*ASTRO-H* 搭載硬 X 線検出器のアクティブシールド機能の検証』、修士学位論文
- <学術講演>
- (国際会議招待講演)
- [38] Noda, H.: “Soft and Hard X-ray Excess Variability in Type I AGNs”, *The restless nature of AGNs: variability as a probe of the central engine*, (Napoli, Italy; 2013 May 20-23)
- [39] Makishima, K.: “Plasma Astrophysics in Clusters of Galaxies”, *The 12th Int’l WS on the Interrelationship between Plasma Experiments in Laboratory and Space (IPELS013)* (白馬; 2013 Jul. 1–5)
- [40] Makishima, K.: “AGN Studies from *Suzaku* to *ASTRO-H*”, *Int’l Conf. on “Black holes, jets and outflows”* (Kathmandu, Nepal; 2013 Oct. 14–18)
- [41] Noda, H.: “X-ray Astronomy at University of Tokyo”, *UTokyo Forum: Global Emergence of Frontier Knowledge* (Santiago; 2013 November 7–8)
- [42] Gu, Liyi: “Probing of Interactions between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters over a Cosmological Timescale” *Suzaku-MAXI conference 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe*, (愛媛大学; 2014 February 19–22)
- [43] Noda, H.: “A Novel *Suzaku* View of the Central Engine in Active Galactic Nuclei”, *ibid.*
- [44] Noda, H.: “AGN Emission Decomposition with Time Variability”, *HXI/SGD Science Work Shop* (広島大学; 2014 February 24–25)
- [45] Makishima, K.: “Some Novel Results from Recent X-ray Observations”, *Fujihara Seminar: X-raying the Gamma-Ray Universe – CTA-X-ray LINK Meeting* – (箱根; 2013 November 4–6)
- (国際会議一般講演/ポスター)
- *Suzaku-MAXI Conference: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe* (愛媛大学; 2014 Feb. 19–22)
- [46] Makishima, K., Zhang, Z., Noda, H., Toii, S., Skurrai, S., Kobayashi, S., Ono, K., Nakazawa, K., Sugizaki, M., Yamada, S. & Kawaguchi, T.: “A Unified Compilation of Thermal Comptonization Processes in Accreting Objects” (Oral)
- [47] Kobayashi, S., Makishima & K., Nakazawa, K.: “A Unified Interpretation of the ULXs Spectra in Terms of the Te/Tin Ratio” (Oral)
- [48] Kato, Y., Nakazawa, K., Gu, L., Akahori, T., Fujita, Y., Okabe, N & Makishima, K.: “Observation of nearby early merging clusters of galaxies CIZA J1358.9-4750 with *Suzaku*” (Poster VI-3)

- [49] Murakami, H.: “Suzaku study of X-ray emission from the high-latitude supernova remnant G332.5-5.6” (Poster VI-9)
- [50] Nakano, T.: Statistical studies of supernova remnants with Suzaku toward the ASTRO-H era (Poster VI-10)
- [51] Ono, K.: ”Towards a Unification of the Hard and the Soft states of LMXBs” (Poster VII-45)
- [52] Sakurai, S.: “Luminosity-Dependent Changes in the Accretion Geometry in Aquila X-1” (Poster VII-50)
- [53] Zhang, Z.: “Probing the Geometry of the Comptonizing Coronae of LMXBs” (Poster VII-81)
- [54] Miyake, K., Noda, H., Yamada, S. & Makishima, K.: “The New Primary Radiation from Seyfert 1 AGNs” (Poster VIII-12)
- [55] Nakazawa, K.: “Magnetic fields in cluster radio relic as observed with Suzaku and to be with *ASTRO-H*” (Poster IX-10)
- その他の国際会議
- [56] Nakano, T. & Makishima, K.: “*Suzaku* Studies of the Supernova Remnant CTB109 and its Central Magnetar 1E 2259+586” (Poster), *The Fast and the Furious: Energetic Phenomena in Isolated Neutron Stars, Pulsar Wind Nebulae and Supernova Remnants* (Madrid, 2013 May 22–24)
- [57] Enoto, T., Makishima, K., Shibata, S., Nakagawa, Y. & Sakamoto, T.: “*Suzaku* View of Recent Magnetar and Magnetar-related Objects” (Poster) *ibid.*
- [58] Sasano, M., Makishima, K., Sakurai, S. & Zhang, A.: “Suzaku studies of 4U 1822-37: an LMXB involving a strongly magnetized neutron star” (Poster), *Physics at the Magnetospheric Boundary* (University of Geneva; 2013 June 25)
- [59] Sakurai, S.: ”Evolution of the accretion geometry through an outburst decay phase of the NS-LMXB Aquila X-1” (Poster) *ibid.*
- [60] Noda, H.: “A Novel Picture for the Central Engine of Seyfert Galaxies Established with Suzaku” (Poster), *East-Asia AGN Workshop 2013* (札幌; 2013 August 20–23)
- [61] Kato, Y., Nakazawa, K., Gu, L. & Makishima, K.: “Observation of merging clusters of galaxies with ASTRO-H” *The 4th ASTRO-H Summer School* (修善寺; 2013 September 5–7)
- [62] Sasano, M., Hiraga, J. & Makishima, K.: ”X-ray photon detection with a newly developed CMOS image sensor” (Poster), *The 12th Symposium on X-ray imaging optics* (阪大; 2013 November 20)
- [63] Umemoto, D., Tsuchiya, H., Enoto, T. et al.: ”Observations of radiation bursts from winter thunderclouds and lighting over the Japan sea coast” (Oral), *American Geophysics Union Fall Meeting 2013* (San Francisco; 2013 December 9-13)
- [64] Nakano, T., Makishima, K., Enoto, T. & Uchiyama, H.: “Clues to the formation and evolution of magnetars from X-ray observations of the associated supernova remnants” (Oral), *The Structure and Signals of Neutron Stars, from Birth to Death* (Firenze, Italy; 2014 March 25)
- (国内会議/招待講演/一般講演/ポスター講演)
- 日本物理学会・秋季分科会 (2013年9月20~23日、高知大学; 口頭)
- [65] 田島宏康、深沢泰司、渡辺伸、内山秀樹、(17名)、中澤知洋、牧島一夫ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器の衛星搭載器開発」、21pSP-1
- [66] 佐藤悟朗、国分紀秀、中澤知洋、内山秀樹ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の開発の現状」、21pSP-4
- [67] 榎本大悟、土屋晴文、榎戸輝揚、山田真也、湯浅孝行、川原田円、北口真雄、中澤知洋、玉川徹、牧島一夫ほか: 「2012 年中における日本海沿岸の冬季雷雲からのガンマ線観測」、21pSP-14
- [68] 櫻井壮希、中澤知洋、小高裕和、国分紀秀ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線イメージャ用の機上オンラインイベント選別処理の効率的検証」、22aSL-7
- 日本天文学会・秋季年会 (2012年9月10日~12日、東北大学; 口頭)
- [69] 笹野 理、牧島 一夫、櫻井 壮希、Zhang Zhongli、榎戸輝揚、「すざくによる低質量星中性子星連星 4U 1822-37 の観測」、J116a
- [70] 小野光、牧島一夫、中澤知洋、櫻井壮希、鳥井俊輔: 「『すざく』でみたハード状態の中性子星連星 GS 1826-238」、J117a
- [71] Zhang, Z., Sakurai, S., Sasano, M. & Makishima, K.: “Suzaku observation of the non-dip spectrum of the dipping source XB 1916-053”, J119a
- [72] 小林翔悟、牧島一夫、中澤知洋: 「『すざく』による近傍 ULX 天体 M33 X-8 のスペクトルとその時間変動」、J147a
- [73] 中野俊男、牧島一夫: 「『すざく』衛星による長周期パルサーに付随する超新星残骸 RCW103」、K01a
- [74] 牧島一夫、野田博文、中澤知洋、三宅克馬、山田真也: 「活動銀河核のセントラルエンジンの理解に向けて」、S27a
- [75] 三宅克馬、野田博文、山田真也、牧島一夫: 「IC4329A における時間変動を用いたモデル依存しない手法による成分分解」、S28a
- [76] 野田博文、牧島一夫、三宅克馬、山田真也: 「『すざく』で調べる活動銀河核セントラルエンジンからの硬 X 線信号」、S29a
- [77] 加藤佑一、中澤知洋、Gu Liyi、西田瑛量、牧島一夫: 「『すざく』による衝突初期銀河 CIZA J1358.9-4750 の観測」、T02a
- [78] Gu, L., Nakazawa, K., Makishima & Jinlin Han: ”Investigation of Interactions between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters IV”, T09a

- [79] 中澤知洋、牧島一夫ほか HXI team: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の現状 ~FM 製造の現状と予想性能~」, W140a
- マグネター研究交流会 (理研仁科ホール、2013 年 12 月 13 日; 口頭)
- [80] 中野俊男: “Magnetar-SNR association”
- [81] 笹野 理: “Searching for strong-magnetic-field neutron stars in X-ray binaries”
- [82] Makishima, K.: ”Possible Magnetic Deformation of Magnetars”
- X 線銀河団研究会 (東京理科大学、2013 年 12 月 28 日; 口頭)
- [83] Makishima, K.: “Plasma-Physical View of Central Regions of Clusters of Galaxies”
- [84] Gu, L.: “Probing of Interactions between Galaxies and Hot Plasmas in Clusters”
- [85] 加藤佑一、中澤知洋、Gu Liyi、赤堀卓也、滝沢元和、藤田裕、中西裕之、小澤武揚、岡部信広、牧島一夫: “Observation of nearby early merging clusters of galaxies CIZA J1358.9-?4750 with SUZAKU”
- RESCEU 新年交流会 (2014 年 1 月 6 日; 口頭)
- [86] Nakazawa, K.: “Sub-MeV all sky survey with a compact Si/CdTe Compton telescope and beyond”
- [87] Gu, L.: “Cosmological Co-Evolution of Member Galaxies and Hot Plasmas in Galaxy Clusters”,
- [88] Makishima, K.: “Measuring aspherical deformation of neutron stars”,
- 第 14 回宇宙科学シンポジウム (宇宙科学研究所、2014 年 1 月 9~10 日; ポスター)
- [89] 国分紀秀、(7 名)、中澤知洋、牧島一夫 ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の開発」, P2-4
- [90] 渡辺伸、田島宏康、深沢泰司、(17 名)、中澤知洋、牧島一夫、内山秀樹ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器 (SGD) の開発」, P2-5
- [91] 中澤知洋、高橋忠幸、田島宏康、釜江常好ほか: 「MeV/sub-MeV 全天サーベイ CAST 計画」, P2-37
- [92] 玉川 徹、早藤麻美、北口貴雄、榎戸輝揚、(8 名)、田原 讓、高橋忠幸、牧島一夫ほか: 「X 線偏光観測衛星 GEMS の現状と今後」, P2-39
- [93] 平賀純子、笹野理、牧島一夫: CMOS イメージセンサーを用いた X 線の直接検出」, P2-249
- [94] 牧島一夫、Zhongli Zhang、野田博文、鳥井俊輔、櫻井壮希、小林翔悟、小野光、中澤知洋、山田真也: 「『すざく』で観測した降着型天体における熱的コンプトン過程の系統的解析」, P3-4
- [95] 野田博文、牧島一夫、山田真也: 「『すざく』が確立した活動銀河核セントラルエンジンの新描像」, P3-5
- 日本天文学会・春季年会 (2014 年 3 月 19 日~22 日、国際基督教大学; 口頭)
- [96] 櫻井壮希、小野光、Zhongli Zhang、中澤知洋、牧島一夫: 「ハード状態の LMXB における光学的に薄い降着流の収束」, J103a
- [97] 牧島一夫、Zhang, Z., 野田博文、鳥井俊輔、櫻井壮希、小林翔悟、小野 光中澤知洋、杉崎 睦、山田真也、川口俊宏: 「降着コンパクト天体の熱的コンプトン過程の新しい考察: 『すざく』の結果」, J104a
- [98] Zhang, Z., Makishima, K., Sakurai, S., Ono, K. & Sasano, M.: ”Understanding Dipping LMXBs in the Same Scheme as Normal LMXBs”, J105a
- [99] 小野光、櫻井壮希、鳥井俊輔、Zhang Zhongli、中澤知洋、牧島一夫: 「『すざく』によるハード状態における LMXB の統一的な研究」, J106a
- [100] 野田博文、峰崎岳夫、牧島一夫、諸隈智貴、小久保充、土居守、山田真也ほか: 「X 線と可視光の同時観測で迫る NGC 3516 セントラルエンジンの構造」, S27a
- [101] 三宅克馬、野田博文、山田真也、牧島一夫: 「IC4329A における時間変動を用いたモデル依存しない成分分解 (2)」, S28a
- [102] Gu, L. & Makishima, K.: “Investigation of Interactions between the Hot Plasmas and Galaxies in Galaxy Clusters V”, T04a
- [103] 小林翔悟、村上浩章、笹野理、櫻井壮希、中澤知洋、牧島一夫ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の統合試験における半導体両面ストリップ主検出部の応答調査」, W124a
- [104] 大野雅功、田島宏康、深沢泰司、渡辺伸、(15 名)、中澤知洋、野田博文、牧島一夫ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器 (SGD) 開発の現状」, W125a
- [105] 内山秀樹、山岡和貴、(6 名)、笹野理、三宅克馬、村上浩章、中澤知洋、牧島一夫ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載検出器 (HXI/SGD) のアクティブシールド BGO ユニットフライト品の受け入れ試験」, W126a
- [106] 徳田伸矢、大野雅功、高橋弘充、深沢泰司、村上浩章、小林翔悟、櫻井壮希、笹野理、中澤知洋、牧島一夫ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器の End-to-End 試験によるアクティブシールドの機能検証」, W127a
- [107] 中澤知洋、高橋忠幸、渡辺伸、国分紀秀ほか: 「Si/CdTe 半導体コンプトンカメラによる sub-MeV 全天観測構想」, W130a
- 日本物理学会・春季大会 (2013 年 3 月 27~30 日、東海大学 (平塚); 口頭)
- [108] 大野雅功、(4 名)、村上浩章、小林翔悟、櫻井壮希、笹野理、中澤知洋、牧島一夫ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線軟ガンマ線検出器における BGO アクティブシールドの開発状況」, 29pTK-1
- [109] 村上浩章、小林翔悟、櫻井壮希、笹野理、鳥井俊輔、中澤知洋ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器のアクティブシールド機能の検証」, 29pTK-2
- [110] 川原田円、国分紀秀、中澤知洋ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の開発状況」, 29pTK-6

- [111] 太田方之、田島宏康、深沢泰司、渡辺伸、(17名)、中澤知洋、野田博文、牧島一夫ほか:「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器の開発状況」、29pTK-8
- [112] 加藤佑一、中澤知洋、Gu Liyi、赤堀卓也、滝沢元和、藤田裕、牧島一夫:「『すざく』による近傍の初期衝突銀河団 CIZA J1358.9-4750 の観測」、29pTK-11
- [113] 山岡和貴、田代信、(22名)、牧島一夫、中澤知洋、田島宏康:「すざく衛星搭載硬 X 線検出器広帯域全天モニター (HXD-WAM) の現状 (VIII)」、29pTK-12
- [114] 牧島一夫、榎戸輝揚、平賀 S. 純子、中野俊男、中澤知洋、櫻井壮希、笹野理:「『すざく』で探るマグネター 4U 0142+61 における中性子星の自由歳差運動と磁気変形」、29pTK-13
- [115] 榎本大悟、土屋晴文、榎戸輝揚、山田真也、湯浅孝行、川原田円、北口貴雄、中澤知洋、国分紀秀、加藤博、岡野真治、玉川徹、牧島一夫:「2012 年以降の日本海沿岸の冬季雷雲からの粒子線観測」、30aTK-13
- [116] 玉川徹、早藤麻美、北口貴雄、榎戸輝揚、山田真也、岩切渉、阿佐美、吉川瑛文、武内陽子、金子健太、幸村孝由、田原謙、高橋忠幸、牧島一夫ほか:「X 線偏光観測衛星 GEMS 開発の現状 (III)」、30aTK-16
- その他の国内研究会
- [117] Gu, L.: “Galaxy vs. Plasma Interactions in Clusters of Galaxies: Results, Implications, and Prospects”, RESCEU 研究交流会 (2013 年 6 月 26)
- [118] 牧島一夫:「中性子星に関するトピックス」、ビッグバンセンター第 13 回サマースクール (山形蔵王温泉; 2013 年 7 月 24-27 日)
- [119] 「X 線によるマグネターの研究」、新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」公募研究交流会 (仙台; 2013 年 9 月 12 日)
- [120] Makishima, K. & Gu, L.: “Interactions between Galaxies and Magnetized Plasmas in Clusters of Galaxies (1)” (Invited), 日本 SKA サイエンス会議「宇宙磁場」2013 (水沢; 2013 年 9 月 13 日)
- [121] Gu, L. & Makishima, K.: “Interactions between Galaxies and Magnetized Plasmas in Clusters of Galaxies (2)” (Invited), 同上
- [122] Gu, L. & Makishima, K.: “X 線と電波観測による銀河団プラズマ中の磁場測定の実況” (Invited), 同上
- [123] 中野俊男:「マグネターに付随する超新星残骸の観測的研究」、新学術研究領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」第二回中性子星核物質研究会 (理化化学研究所; 2013 年 12 月 25 日)
- [124] 小野光、鳥井俊輔、櫻井壮希、中澤知洋、牧島一夫:「Low-mass X-ray Binary のソフト状態とハード状態の関係」(ポスター)、同上
- [125] 笹野理:「磁場強度から見た中性子星と恒星の連星系」、連星天文学研究会 (京都大学; 2014 年 2 月 12 日)
- [126] 牧島一夫、顧力意:「銀河団における銀河とプラズマの宇宙論スケールでの相互作用」、SKA ワークショップ「銀河進化と遠方宇宙」(東大; 2014 年 3 月 24 日)
- (セミナー、談話会、集中講義)
- [127] Gu, Liyi: “Probe of Galaxy-ICM Interaction in Rich Clusters of Galaxies”, 天文学教育研究センター談話会 (三鷹; 2013 年 5 月 16 日)
- [128] Gu, Liyi: “Probing of the Galaxy-Hot Plasma Interactions in Galaxy Clusters”, 地球惑星物理学専攻 横山研究室セミナー (2013 年 7 月 10 日)
- [129] Gu, Liyi: “The Hot Universe: Intracluster Medium and the Related Plasma Physics”, RESCEU 夏の学校招待講義 (蔵王; 2013 年 7 月 25 日)
- [130] Gu, Liyi: “Towards a Deeper Understanding of the Hot Plasma in Galaxy Clusters”, ISAS/JAXA プラズマグループセミナー (相模原; 2013 年 8 月 19 日)
- [131] 野田 博文:「X 線観測で迫る活動銀河核セントラルエンジンの新描像」、広島大学 高エネルギー宇宙・可視赤外天文研究室 談話会 (2013 年 10 月 2 日)
- [132] Gu, L.: “Interactions between Galaxies and Magnetized Hot Plasmas in Clusters of Galaxies”, Seminar at Durham university, Group of Astronomy and Astrophysics (UK: 2013 October 25)
- [133] Noda, H.: “X-ray Studies of the AGN Central Engine by Suzaku”, Seminar at Durham university, Group of Astronomy and Astrophysics (*ibid.*)
- [134] Gu, Liyi: “Towards a Deeper Understanding of Plasma Astrophysics in Galaxy Clusters”, 千葉大学セミナー (千葉; 2013 年 11 月 18 日)
- [135] Gu, Liyi: “Interactions between Galaxies and Hot Plasmas in Clusters of Galaxies”, IPMU セミナー (柏; 2013 年 12 月 3 日)
- [136] Gu, L.: “Electro-Magnetic Interactions between Galaxies and Hot Plasmas in Clusters of Galaxies”, 国立天文台談話会 (三鷹; 2013 年 12 月 4 日)
- [137] 野田博文: “X-ray Studies of the Central Engine in Active Galactic Nuclei”, 京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 談話会 (京都; 2013 年 12 月 10 日)
- [138] 野田博文:「X 線と可視光の同時観測で迫る AGN セントラルエンジンの新たな描像」、東京大学理学系研究科 天文学専攻 談話会 (2014 年 1 月 21 日)
- (一般向け講演、新聞記者発表)
- [139] 牧島一夫:「宇宙の謎をいっしょに考えよう」、文京区子ども科学カレッジ (文京区; 2013 年 4 月 18 日)
- [140] 牧島一夫:「大気圏外から宇宙を見る」、東大理学部 高校生のための夏休み講座 2013 (2013 年 8 月 20 日)
- [141] Zhang Zhongli: “An introduction to X-ray Astronomy and International Research”, 日本学術振興会サイエンス・ダイアログ講演 (山梨県立日川高校; 2013 年 10 月 10 日)
- [142] 牧島一夫、Gu Liyi、稲田直久ほか: 新聞記者発表「銀河団における巨大なエネルギーの流れを発見～巨大な銀河たちも、低きに流れていた～」、(日本天文学会、東京大学、奈良国立工業専門高校、理研、JAXA、国立天文台; 2014 年 3 月 19 日)

6.2 高瀬研究室

高瀬研究室では、核融合発電の実現を目標に磁場閉じこめ型トラスプラズマの研究を行っている。柏キャンパスに設置された TST-2 装置を用いた球状トカマク (ST) プラズマの基礎研究を行うと共に、日本原子力研究機構で建設中の JT-60SA 装置、核融合科学研究所の LHD 装置、京都大学の LATE 装置、九州大学の QUEST 装置、米国 MIT の Alcator C-Mod 装置、英国カラム研究所の MAST 装置等を使った共同研究も進めている。

6.2.1 TST-2 実験の概要

TST-2 は ST 型の装置であり、主なパラメータはプラズマ大半径 0.38 m、小半径 0.25 m、最大プラズマ電流 120 kA、最大磁場 0.3 T である。ST は高い規格化圧力を安定に維持できる方式として近年注目を浴びており、当研究室では早い時期からその基礎研究を行ってきた。

ST 研究で現在最も重要な課題は、電磁誘導によらない電流駆動とそれによるプラズマ電流の立ち上げである。TST-2 は様々な種類の高周波 (RF) 波動を用いた電流駆動実験を行ってきたが、ここ数年は低域混成波 (Lower-Hybrid Wave: LHW) を用いた電流駆動研究を行っている。2013 年度は主としてグリルアンテナを用いて励起波動の波数を制御した実験を行い、駆動電流などの波数依存性を明らかにした。また、新たに静電結合型進行波励起 (Capacitively Coupled Compline: CCC) アンテナを設置し、実験を開始した。これらおよび過去に使用していた誘導結合型進行波励起 (Inductively Coupled Compline: ICC) アンテナの三種類のアンテナ性能を比較し、それぞれの特徴を明らかにした。また、励起された LHW の波数測定のため、RF 静電プローブの開発を行った。ICC アンテナは 2013 年に東京大学総合研究博物館で開催された宇宙資源展において展示された。

RF 立ち上げプラズマは密度が低く、波に加速された高速電子が平衡配位に大きな影響を与えるので、従来型トカマクプラズマとは全く異なる性質を持つと考えられる。このようなプラズマの性質を明らかにするため、先進的トムソン散乱法、電流を局所的に測定するためのロゴスキープローブを開発し、初期的な結果を得た。また、プラズマの乱流および輸送特性を明らかにするための新型プローブの開発も行っている。

6.2.2 RF プラズマ立ち上げ実験

LHW は従来型トカマクで高い電流駆動効率が実証されている波であるが、ST では磁場が低いため波がプラズマ内部に到達できず、効率的な電流駆動は望めないと考えられてきた。しかし、TST-2 ではプラズマ生成直後の低密度プラズマにおいては LHW が伝搬可能であることに着目し、LHW を用いた効率的なプラズマ電流立ち上げを目指した実験を行っ

ている。発振器の周波数は 200 MHz で、4 系統からそれぞれ 100 kW 程度 (合計約 400 kW) の出力能力がある。

グリルアンテナ実験

2013 年度は LHW を直接励起可能なアンテナとして誘電体充填型導波管列 (グリル) アンテナを用いた実験を前年度に引き続き行った。導波管列 LHW アンテナは種々のトカマク実験で用いられているが、200 MHz の基本導波管は TST-2 の真空ポートより大きいいため、小型化するために比誘電率 10 のアルミナを充填している。

グリルアンテナにおいては、励起する LHW の磁場に平行方向の波数 (k_{\parallel}) を変化させ、加熱・電流駆動効率を変化させることができる。この特徴を生かし、TST-2 においてプラズマ電流立ち上げに最適な k_{\parallel} を探索する実験を行った。同程度のパワーを入射した時のプラズマ電流値の違い、そしてその時の硬 X 線放射エネルギースペクトルから、TST-2 では $n_{\parallel} = ck_{\parallel}/\omega = 1-6$ 程度が最適であることがわかった。

現在 TST-2 で得られている電流駆動効率は、単純な理論予測より二桁程度小さい。波により生成される高速電子の閉じ込めを調べるため、LHW のパワー変調実験を行い、軟 X 線強度の応答を観測し、X 線強度変調の位相遅れから、高速電子の閉じ込め時間を推定した。その結果、高速電子の損失は、バルク粒子との衝突から予想されるよりもずっと速いことが分かった。CQL3D フォッカープランクコードを用いた計算より、これは電子の軌道が直接真空容器壁にぶつかること (軌道損失) によると推定された。同コードを用いた計算から、プラズマ電流を 50 kA 程度まで増加させれば、高速電子の閉じ込めは改善され、電流駆動効率も改善されると予測された。

これらの実験においては、入射パワー数 100 W 以上で 50% を超える反射率が観測された。これは RF 電場のポンデロモーティブ力により、アンテナ前面のプラズマ密度が減少したことによると考えられる。実際、新たにアンテナ前面のプラズマ密度を測定するための静電プローブ列を導入したところ、反射率の変化と同期したプラズマ密度の変化が観測された。さらに、LHW の全波計算にポンデロモーティブ効果を取り入れた非線形シミュレーションを行ったところ、電子温度を 5-10 eV と仮定すると、実験において反射率の増加が起こるパワーの閾値を再現できることがわかった (図 6.2.1)。この電子温度は静電プローブで計測された値と矛盾しない。

TST-2 におけるポンデロモーティブ力の効果は他の大型トカマク装置で観測されているよりもずっと深刻である。その要因としては、誘電体を用いたことによる真空、ないしカットオフ密度以下のプラズマとのインピーダンス不整合の増加が考えられる。また、TST-2 では他の装置に比べて 1 ケタ以上低い周波数である $f = 200$ MHz を用いているので、ポンデロモーティブ力 ($\propto 1/f^2$) そのものが大きい。この高い反射率のために 50 kW 以上の高パワー入射は

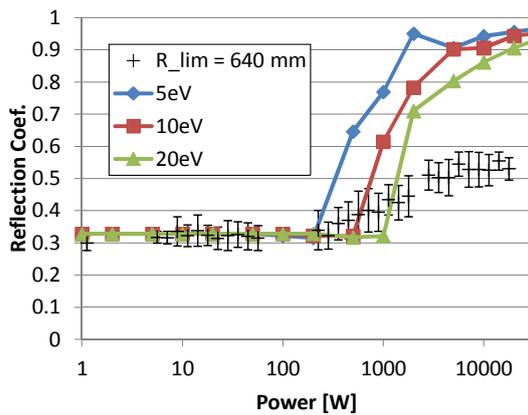


図 6.2.1: 計測された反射率のパワー依存性 (黒十字) とボンデロモーティブ力の効果を取り入れた非線形シミュレーションの結果 (実線付シンボル)。

難しく、低い周波数帯域でのグリルアンテナの運用は困難であることがわかった。

CCC アンテナ実験

上記グリルアンテナに加えて、米国 General Atomics 社と共同で開発した CCC アンテナを用いた LHW プラズマ電流立ち上げ実験を開始した。CCC アンテナは電流ロッド間の静電結合によって波が次々と隣の電流ロッドへ伝播していくことによりプラズマ中に LHW 進行波を励起する。アンテナにより励起される電場はトロイダル方向であり、LHW の偏波方向と一致するため、LHW の直接励起が可能である。アンテナ特性は 200 MHz で最適化されており、隣のロッドへ伝播する際に位相が約 60° ずつ遅れた場合、 $n_{\parallel} \simeq 5$ の波が励起される。

これまでに CCC アンテナを用いて最大 12 kA のプラズマ電流立ち上げに成功している。プラズマ電流値はトロイダル磁場に大きく依存するが、その依存性は他の 2 つのアンテナ (ICC アンテナ、グリルアンテナ) と同程度であった。一方、CCC アンテナの電流駆動効率 ($\eta = I_p R n_e / P_{LH}$ 、但し I_p はプラズマ電流、 R はプラズマ大半径、 n_e は電子密度、 P_{LH} は入力 RF パワー) は ICC アンテナと比べて 2-3 倍高いことがわかった (図 6.2.2)。これは、ICC アンテナの場合、励起される電場の偏波方向がトロイダル方向であるため、LHW の直接励起効率が低いことに起因すると考えられる。

6.2.3 OH プラズマ実験

トムソン散乱による分布関数非対称性計測

高温の核融合プラズマにおいては、閉じ込め磁場の方向に対して非等方にプラズマを加熱する場合、

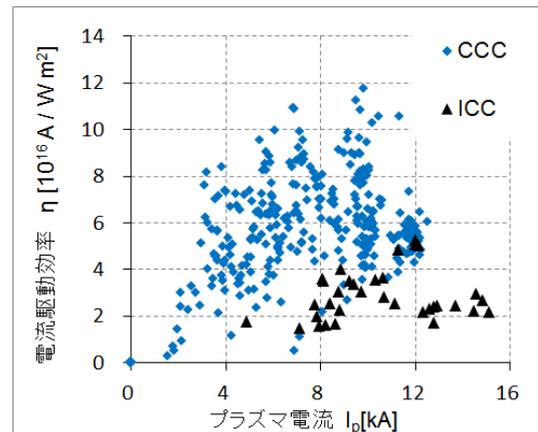


図 6.2.2: CCC アンテナと ICC アンテナの電流駆動効率の比較。

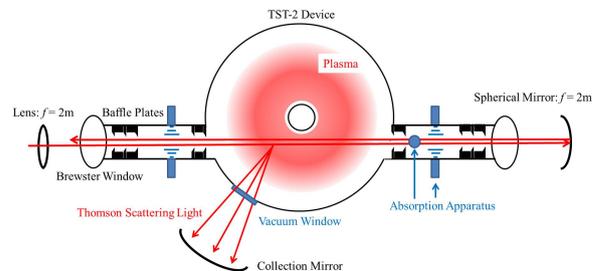


図 6.2.3: ダブルパストムソン散乱システムの模式図。

プラズマ圧力の磁場に平行成分 (p_{\parallel})・垂直成分 (p_{\perp}) に差が生じ得る可能性がある。このような圧力非等方性によりプラズマ不安定性が起こる懸念もあるが、その測定手法は確立していない。そこで、TST-2 においてダブルパストムソン散乱計測の開発を行った。トムソン散乱計測ではプラズマ中にレーザーを入射し、その散乱光スペクトルより電子の速度分布を推定する。ダブルパス構成では入射レーザーを往復させ、散乱スペクトルを往路・復路で 2 度測定することで、プラズマ中の 2 方向の圧力成分をほぼ同時に測定することができる (図 6.2.3)。

測定誤差 4% 程度のシステムを構築し、OH プラズマ (電子密度 $\simeq 1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度 $\simeq 100 \text{ eV}$) の測定を行った。その結果、中心部・周辺部においてそれぞれ 30%、100% の圧力非等方性 ($p_{\parallel} > p_{\perp}$) が観測された (図 6.2.4)。これは、磁場に平行方向の OH 電場により生じた圧力非等方性であると推測され、密度が低く緩和の遅い周辺部で特に強い非等方性が生じていると考えられる。また、電子の速度分布関数としてはシフトしたマクスウェル分布が単純であるが、磁場に平行な 2 方向 (co/counter) と垂直方向の計 3 方向で異なる温度を持つ 3 温度モデルがより実際の分布に近いことが示された。

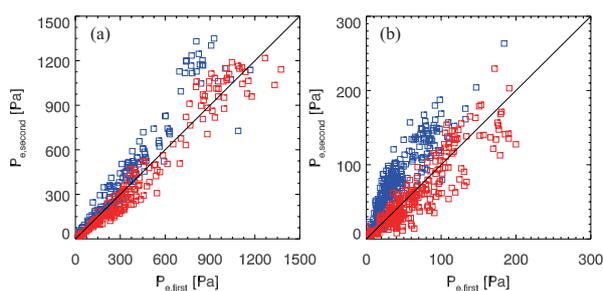


図 6.2.4: ダブルパストムソン散乱計測による OH プラズマ中心部 (a)、周辺部 (b) での圧力非等方性。 $P_{e,first} \simeq p_{\perp}$ 、 $P_{e,second} \simeq p_{\parallel}$ 。青：プラズマ電流順方向、赤：逆方向。

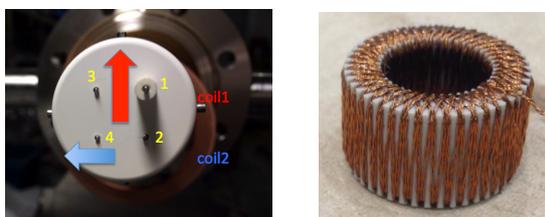


図 6.2.5: (左) 乱流計測用新型プローブ。(右) 小型多層巻ログスキーコイル。

静電プローブによる乱流測定

トカマクプラズマにおいて、プラズマフローの生成は乱流輸送の抑制に大きく寄与するが、これには速度揺動によるレイノルズ応力や磁場揺動によるマクスウェル応力が重要な役割を果たす考えられる。そこで、フロー、レイノルズ応力、マクスウェル応力が同時に計測可能な新型プローブ(図 6.2.5、左)を開発し、TST-2 の誘導立上げ (OH) プラズマの弱磁場側の広い領域において測定を開始した。

6.2.4 計測器開発

LHW 計測用静電プローブ

RF 波動によるプラズマポテンシャル揺動は、浮遊電位の揺動として静電プローブで測定することができる。TST-2 において用いられている LHW の周波数は 200 MHz であり、このような高周波数帯域では計測器直前に 50 Ω のインピーダンス整合が必要となるため、従来のプローブ回路では浮遊電位計測に必要な高インピーダンスを確保することができない。そこで、100 k Ω の抵抗をプローブ電極の直後に配置して、プラズマ中の LHW による浮遊電位の揺動をより正確に測定できる高抵抗内蔵型静電プローブを開発した(図 6.2.6)。計測された LHW の波数は $20 \pm 20 \text{ m}^{-1}$ であり、アンテナから励起された LHW の波数 15–30 m^{-1} と矛盾しない。

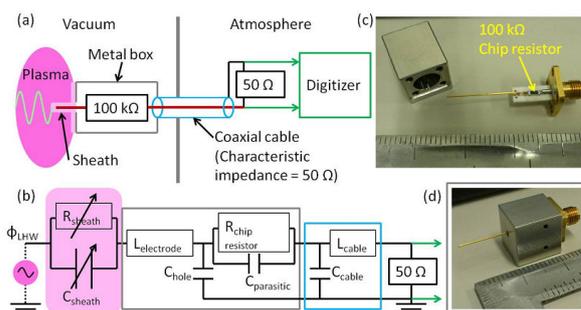


図 6.2.6: (a) 概念図、(b) 等価回路、(c) チップ抵抗と金属シールド、(d) プローブユニット。

小型ログスキーコイルによる局所電流計測

ST における RF 立ち上げプラズマでは、弱磁場側最外殻磁気面の外側に無視できない電流が流れている可能性が指摘されており、この場合、従来の OH プラズマにおける平衡モデルは適用できない。本研究では、小型ログスキーコイルによって電流分布を直接計測し、適切な平衡モデルを開発することを目指している。

ログスキーコイルとは、ソレノイドコイルをトロイダル状に巻いたものであり、その中心穴を貫通する電流の時間微分を測定する。ログスキーコイルの信号強度は巻き線密度 n とコイル断面積 S に比例する。トロイダル方向に沿って n と S が常に一定であるのが理想的であるが、そうでない場合、コイルの外側を流れる電流が生成する磁場にも感度を持ってしまう。局所電流計測にログスキーコイルを適用するには、できるだけ均一な n と S 、小型化を実現すること、また十分な信号強度を得るためには n の増加が大きな課題である。

本研究では、これらの条件をクリアする小型多層巻ログスキーコイルを開発した(図 6.2.5、右)。均一な n と S を実現するため、コイル芯に溝を設けた。特に、1 ターンにわたってケーブルを固定できるように、溝パターンを芯外側はすべて同相、内側の片側は外側の溝に対して同相、もう片側は位相を半分ずらしたものとした。小型コイル芯に大きな巻き線密度を実現するため、多層 (8 層) 巻きを採用した。また、耐久性を向上させるため、巻線には撚り線を使い、極細の線 ($\phi 0.12 \text{ mm}$) でコイルを製作した。このログスキーコイル (外形 20 mm) を用い、 $S/N > 10$ での OH プラズマの局所電流計測に成功した。

マルチパストムソン散乱計測

これまで TST-2 に設置されていたトムソン散乱計測では、信号強度の問題で、RF により生成された低密度プラズマの計測は困難である。そこで、一回のレーザー入射でレーザーパルスがプラズマ中を複数回往復することで散乱光強度を稼ぐ、マルチパストムソン散乱計測法の開発を行っている。図 6.2.7 は、

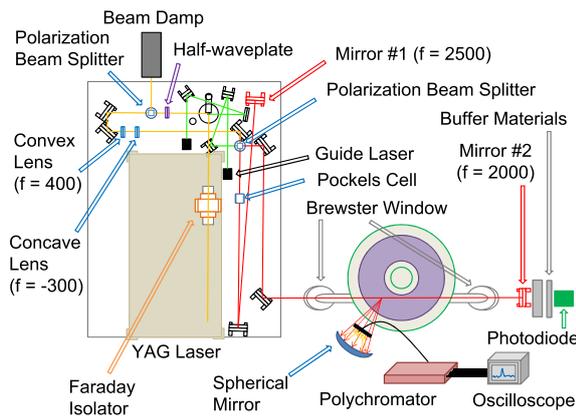


図 6.2.7: TST-2 マルチパストムソン散乱計測システムの概略図 [Rev. Sci. Instrum に投稿中]。

本研究で設計・開発した光学キャビティと性能試験に用いた測定器、集光・計測システムの概略図である。ポッケルスセルへの印加電圧をレーザーの発振タイミングと同期して高速に制御することで、10 往復分以上のレーザーパルスが図 6.2.7 におけるミラー間の赤い線上に閉じ込められていることを確認した [2]。この光学系を用いて高密度プラズマを対象に実験を行い、複数往復分の散乱信号が得られることを確認した。

マルチパス計測で電子温度・密度を見積もる際は、往復ごとに得られる信号を積算するため、同時にノイズも加わる。 n 往復分の積算信号は往復ごとの効率 q の等比級数として表すことができ、本実験において主なノイズである熱雑音は n 回の積算によってその平方根で増加していく。つまり、効率が 100% でない場合、S/N の改善に有効な往復回数には限界がある。実験データから見積もられた積算数ごとの規格化 S/N 比と、実験時の光学系の効率 $q = 70\%$ における計算結果は同様の傾向を示しており、3 往復分の信号の積算で最大 30% 程度 S/N が改善されることが示された。

6.2.5 共同研究

LHD における反射計計測

RF 波動はプラズマの加熱や電流駆動に用いられるが、その理解のために、プラズマ中で RF 波動を計測する手段の確立が求められている。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測定するものであり、微小な電子密度揺動を測定できることから、RF 波動計測手法として注目されている。本研究室では核融合科学研究所の LHD 装置においてイオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) における波動 (38.47 MHz) の計測を行っている。2013 年度の計測では波動由来の密度揺動レベルが小半径位置、ICRF 入射パワー、少数イオン密度比に依存することが確認された。また、入射パワーに対する

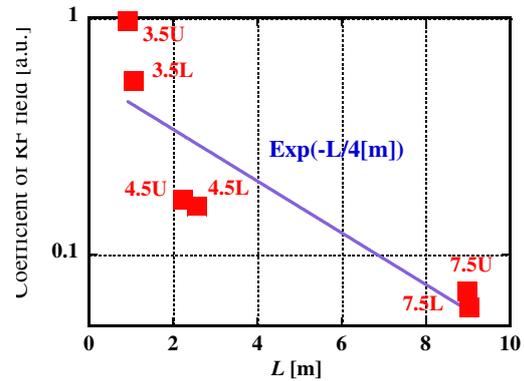


図 6.2.8: RF 電場強度のアンテナからの距離依存性。

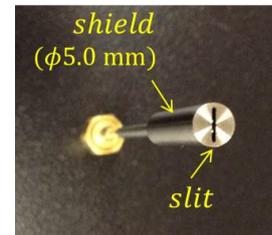


図 6.2.9: 4.6 GHz 用 RF 磁気プローブ。

波動電場強度依存性から、線形性が満たされる場合とそうでない場合があることが分かった。LHD 装置には 3 セット、合計 6 本のアンテナが設置されており、反射計測定位置から各アンテナまでの距離が異なる。そこで、各アンテナからパワーを入射した時に計測される波動揺動の大きさを比較した。図 6.2.8 は波動揺動の大きさを、磁力線に沿った距離の関数としてプロットしたものであり、距離とともに揺動レベルが小さくなることがわかる。指数関数的依存性を仮定すると、その減衰長はおおよそ 4 m で、この特性長は波動の吸収を反映すると考えられる。

MIT における LHW 計測用プローブ開発

Alcator C-Mod において LHW (4.6 GHz) 計測用磁気プローブの開発を行った (図 6.2.9)。磁気信号は、シールドの先端にあるスリットから浸みこみ、2 ターンコイルで検出される。ベンチテストでは 1.5% の精度で波数計測が可能であることが分かった。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Takase, A. Ejiri, H. Kakuda, T. Oosako, T. Shinya, T. Wakatsuki, T. Ambo, H. Furui, T. Hashimoto, J. Hiratsuka, H. Kasahara, K. Kato, R. Kumazawa, C.P. Moeller, T. Mutoh, A. Nakanishi, Y. Nagashima, K. Saito, T. Sakamoto,

T. Seki, M. Sonehara, R. Shino, H. Togashi, O. Watanabe, and T. Yamaguchi: Non-inductive plasma initiation and plasma current ramp-up on the TST-2 spherical tokamak, *Nucl. Fusion* **53** (2013) 063006.

- [2] H. Togashi, A. Ejiri, M. Hasegawa, J. Hiratsuka, Y. Nagashima, K. Nakamura, K. Narihara, Y. Takase, H. Tojo, N. Tsujii, I. Yamada, T. Yamaguchi, and the TST-2 Team: Injection and Confinement of a Laser Pulse in an Optical Cavity for Multi-Pass Thomson Scattering Diagnostics in the TST-2 Spherical Tokamak Device, *Plasma Fusion Res.* **9** (2014) 1202005.

(会議抄録)

- [3] A. Ejiri, T. Tokuzawa, K. Saito, T. Seki, H. Kasahara, T. Mutoh, R. Kumazawa, I. Yamada, and Y. Takase: Measurement of Radio Frequency Wave Induced Electron Density Fluctuations by a Microwave Reflectometer on LHD, *JPS Conf. Proc.* **1** (2014) 015038.
- [4] A. Ejiri: Analysis of Office/Laboratory Staying Hour and Home Working Hour of Japanese Scientists and Engineers, *JPS Conf. Proc.* **1** (2014) 018004.

(学位論文)

- [5] 平塚淳一: A Study of Electron Velocity Distribution Function in TST-2 Spherical Tokamak Plasma by Double-Pass Thomson Scattering Diagnostics (博士論文)
- [6] 若月琢馬: A Study of Non-Inductive Plasma Current Start-Up Using the Lower Hybrid Wave in the TST-2 Spherical Tokamak (博士論文)
- [7] 中西綾香: TST-2 球状トカマクにおける高周波生成プラズマの電子密度の挙動 (修士論文)
- [8] 富樫央: Development of a Multi-pass Thomson Scattering System on the TST-2 Spherical Tokamak (修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [9] Y. Takase, C. P. Moeller, T. Shinya, T. Wakatsuki, A. Ejiri, H. Furui, J. Hiratsuka, K. Imamura, T. Inada, H. Kakuda, K. Nakamura, A. Nakanishi, T. Oosako, M. Sonehara, H. Togashi, S. Tsuda, N. Tsujii, and T. Yamaguchi: Characteristics of a novel lower hybrid wave antenna for the TST-2 spherical tokamak, 20th Topical Conference on RF Power in Plasmas, Sorrento, Italy, Jun. 25–28, 2013.
- [10] T. Wakatsuki, A. Ejiri, T. Shinya, Y. Takase, H. Furui, J. Hiratsuka, K. Imamura, T. Inada,

H. Kakuda, H. Kasahara, Y. Nagashima, K. Nakamura, A. Nakanishi, T. Oosako, K. Saito, T. Seki, F. Shimpo, M. Sonehara, H. Togashi, S. Tsuda, N. Tsujii, and T. Yamaguchi: Results of lower hybrid wave experiments using a dielectric loaded waveguide array antenna on TST-2, 20th Topical Conference on RF Power in Plasmas, Sorrento, Italy, Jun. 25–28, 2013.

- [11] Y. Takase, A. Ejiri, C. P. Moeller, T. Shinya, N. Tsujii, T. Wakatsuki, H. Furui, J. Hiratsuka, K. Imamura, T. Inada, H. Kakuda, H. Kurashina, K. Nakamura, A. Nakanishi, T. Oosako, Y.-K. M. Peng, M. Sonehara, H. Togashi, S. Tsuda, and T. Yamaguchi: Plasma Current Start-up and Self-Formation of Toroidal Configuration in Spherical Tokamak Devices, Workshop on “Research on Advanced material systems In Joint collaboration: RAIJIN under PIRE,” Rhiga Royal Hotel, Kyoto, Japan, Jul. 4–5, 2013.
- [12] M. Sonehara, Y. Nagashima, A. Ejiri, Y. Takase, H. Furui, H. Kakuda, T. Oosako, T. Yamaguchi, J. Hiratsuka, T. Wakatsuki, H. Togashi, A. Nakanishi, T. Inada, K. Imamura, S. Tsuda, and K. Nakamura: Observation of edge fluctuations with a composite probe system in the TST-2 spherical tokamak 3rd East-Asian School and Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas, National Olympics Memorial Youth Center, Yoyogi, Japan, Jun. 8–12, 2013.
- [13] H. Furui, Y. Nagashima, Y. Takase, A. Ejiri, H. Kakuda, M. Sonehara, T. Oosako, T. Shinya, H. Togashi, A. Nakanishi, J. Hiratsuka, T. Yamaguchi, T. Wakatsuki, T. Inada, K. Imamura, S. Tsuda, and K. Nakamura: Development of a local plasma current diagnostic using small Rogowski coil in the TST-2 spherical tokamak, East-Asian School and Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas, National Olympics Memorial Youth Center, Yoyogi, Japan, Jun. 8–12, 2013.
- [14] T. Shinya, A. Ejiri, Y. Takase, T. Oosako, H. Kakuda, T. Wakatsuki, T. Yamaguchi, J. Hiratsuka, M. Sonehara, H. Furui, H. Togashi, A. Nakanishi, T. Inada, K. Imamura, S. Tsuda, K. Nakamura, K. Saito, T. Kasahara, T. Seki, and F. Shinbo: Identification of Waves by Magnetic Probes during Lower Hybrid Wave Injection Experiments on the TST-2 Spherical Tokamak 3rd East-Asian School and Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas, National Olympics Memorial Youth Center, Yoyogi, Japan, Jun. 8–12, 2013.
- [15] C. P. Moeller, R. Prater, Y. Takase, and T. Shinya: Traveling Wave Antenna Developments, Workshop on RF Heating Technology of Fusion Plasmas 2013, Speyer, Germany, Sep. 9–11, 2013.
- [16] N. Tsujii, A. Ejiri, H. Furui, J. Hiratsuka, K. Imamura, T. Inada, H. Kakuda, K. Nakamura, A. Nakanishi, T. Oosako, T. Shinya, M. Sonehara,

- Y. Takase, H. Togashi, S. Tsuda, T. Wakatsuki, T. Yamaguchi, C. P. Moeller, and Y. K. M. Peng: Studies of Lower-hybrid Startup Scenario on TST-2, US-Japan Workshop on Physics of RF Heating of Fusion Plasmas 2013, MIT PSFC, Cambridge, MA, USA, Sep. 24–26, 2013.
- [17] T. Shinya, C. P. Moeller, Y. Takase, T. Wakatsuki, A. Ejiri, N. Tsujii, T. Oosako, H. Kakuda, T. Yamaguchi, J. Hiratsuka, M. Sonehara, H. Furui, H. Togashi, A. Nakanishi, T. Inada, K. Imamura, S. Tsuda, and K. Nakamura: Performance of the newly developed electrostatically-coupled combine antenna for TST-2, US-Japan Workshop on Physics of RF Heating of Fusion Plasmas 2013, MIT PSFC, Cambridge, MA, USA, Sep. 24–26, 2013.
- [18] S. G. Baek, P. T. Bonoli, R. R. Parker, S. Shiraiwa, G. M. Wallace, M. Porkolab, Y. Takase, D. Brunner, I. C. Faust, A. E. Hubbard, B. LaBombard, and C. Lau: Study of parametric decay instability of lower hybrid waves on Alcator C-Mod, US-Japan Workshop on Physics of RF Heating of Fusion Plasmas 2013, MIT PSFC, Cambridge, MA, USA, Sep. 24–26, 2013.
- [19] N. Tsujii, A. Ejiri, H. Furui, J. Hiratsuka, H. Ikeuchi, K. Imamura, T. Inada, H. Kakuda, K. Nakamura, A. Nakanishi, T. Oosako, T. Shinya, M. Sonehara, Y. Takase, H. Togashi, S. Tsuda, T. Wakatsuki, S. Yajima, T. Yamaguchi, and C. P. Moeller: Measuring Lower-Hybrid Waves with Microwave Scattering on the TST-2 Spherical Tokamak, 55th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Denver, Colorado, Nov. 11–15, 2013.
- [20] S. G. Baek, P. T. Bonoli, R. R. Parker, S. Shiraiwa, G. M. Wallace, M. Porkolab, Y. Takase, D. Brunner, I. C. Faust, A. E. Hubbard, B. L. Labombard, and C. Lau: Characterization of onset of parametric decay instability of lower hybrid waves in ITER-relevant high-density plasmas, 55th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Denver, Colorado, Nov. 11–15, 2013.
- [21] T. Shinya, A. Ejiri, Y. Takase, T. Wakatsuki, T. Oosako, N. Tsujii, H. Furui, J. Hiratsuka, T. Inada, K. Imamura, H. Kakuda, K. Nakamura, A. Nakanishi, M. Sonehara, H. Togashi, S. Tsuda, T. Yamaguchi, T. Kasahara, K. Saito, T. Seki, F. Shimpo, Y. Nagashima, O. Watanabe, T. Yamada: Identification of Waves by RF Magnetic Probes during Lower Hybrid Wave Injection Experiments on the TST-2 Spherical Tokamak, 23rd Int. Conf. (ITC-23) on Large-Scale Simulation and Fusion Science, Toki, Nov. 18–21, 2013.
- [22] H. Furui, Y. Nagashima, Y. Takase, A. Ejiri, H. Kakuda, M. Sonehara, T. Oosako, N. Tsujii, J. Hiratsuka, K. Imamura, T. Inada, A. Nakanishi, T. Shinya, H. Togashi, T. Yamaguchi, T. Wakatsuki: Development of a local current diagnostic using small Rogowski coil for a spherical tokamak TST-2, 23rd Int. Conf. (ITC-23) on Large-Scale Simulation and Fusion Science, Toki, Nov. 18–21, 2013.
- [23] H. Togashi, A. Ejiri, J. Hiratsuka, K. Nakamura, Y. Takase, T. Yamaguchi, H. Furui, K. Imamura, T. Inada, H. Kakuda, A. Nakanishi, T. Oosako, T. Shinya, M. Sonehara, S. Tsuda, N. Tsujii, T. Wakatsuki, M. Hasegawa, Y. Nagashima, K. Narihara, I. Yamada, H. Tojo: Development of coaxial multi-pass Thomson scattering diagnostic system on the TST-2 spherical tokamak, 23rd Int. Conf. (ITC-23) on Large-Scale Simulation and Fusion Science, Toki, Nov. 18–21, 2013.
- [24] Y. K. M. Peng, A. Ishida, Y. Takase, A. Ejiri, N. Tsujii, T. Maekawa, M. Uchida, H. Zushi, K. Hanada, M. Hasegawa: Two-Fluid MHD Equilibrium Considerations of $Te/Ti \gg 1$, Collisionless Plasmas Sustained by RF Electron Heating, 23rd Int. Conf. (ITC-23) on Large-Scale Simulation and Fusion Science, Toki, Nov. 18–21, 2013.
- [25] H. Tojo, I. Yamada, R. Yasuhara, E. Yatsuka, H. Funaba, H. Hayashi, T. Hatae, K. Itami, A. Ejiri, J. Hiratsuka, H. Togashi, and Y. Takase: Validities in measurements of electron temperature and relative transmissivity in Thomson scattering systems on LHD and TST-2, 23rd Int. Conf. (ITC-23) on Large-Scale Simulation and Fusion Science, Toki, Nov. 18–21, 2013.
- [26] T. Shinya, C. P. Moeller, Y. Takase, T. Wakatsuki, T. Inada, H. Kakuda, N. Tsujii, T. Oosako, A. Ejiri, H. Furui, J. Hiratsuka, K. Imamura, A. Nakanishi, K. Nakamura, M. Sonehara, S. Tsuda, H. Togashi, and T. Yamaguchi: Non-inductive plasma current start-up using the lower hybrid wave excited by an electrostatically-coupled combine antenna on TST-2, The Second A3 Foresight Workshop on Spherical Torus, Tsinghua University, Beijing, China, Jan. 6–8, 2014.
- [27] H. Furui, Y. Nagashima, Y. Takase, A. Ejiri, H. Kakuda, M. Sonehara, T. Oosako, N. Tsujii, J. Hiratsuka, K. Imamura, T. Inada, A. Nakanishi, T. Shinya, H. Togashi, T. Yamaguchi, and T. Wakatsuki: Development of a local current diagnostic using small Rogowski coil for a spherical tokamak TST-2, The Second A3 Foresight Workshop on Spherical Torus, Tsinghua University, Beijing, China, Jan. 6–8, 2014.
- [28] K. Imamura, Y. Takase, A. Ejiri, T. Wakatsuki, N. Tsujii, T. Oosako, J. Hiratsuka, T. Yamaguchi, H. Kakuda, M. Sonehara, H. Furui, T. Shinya, H. Togashi, A. Nakanishi, T. Inada, S. Tsuda, and K. Nakamura: Radial X-ray profile measurement on TST-2, The Second A3 Foresight Workshop on Spherical Torus, Tsinghua University, Beijing, China, Jan. 6–8, 2014.
- [29] T. Inada, Y. Takase, T. Wakatsuki, T. Shinya, A. Ejiri, N. Tsujii, T. Oosako, T. Yamaguchi,

- H. Kakuda, J. Hiratsuka, M. Sonehara, H. Furui, H. Togashi, A. Nakanishi, K. Imamura, S. Tsuda, and K. Nakamura: Performance evaluation of the TST-2 electrostatically-coupled combline antenna using COMSOL, The Second A3 Foresight Workshop on Spherical Torus, Tsinghua University, Beijing, China, Jan. 6–8, 2014.
- [30] S. Tsuda, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, T. Oosako, T. Yamaguchi, T. Wakatsuki, H. Kakuda, J. Hiratsuka, M. Sonehara, T. Shinya, H. Furui, H. Togashi, A. Nakanishi, T. Inada, K. Imamura, and K. Nakamura: Measurement of ion temperature and flow in RF-start up plasmas on TST-2, The Second A3 Foresight Workshop on Spherical Torus, Tsinghua University, Beijing, China, Jan. 6–8, 2014.
- [31] K. Nakamura, A. Ejiri, J. Hiratsuka, Y. Takase, H. Togashi, N. Tsujii, T. Yamaguchi, and TST-2 member: Measurement of the internal reconnection event using a double-pass Thomson scattering system on TST-2, The Second A3 Foresight Workshop on Spherical Torus, Tsinghua University, Beijing, China, Jan. 6–8, 2014.
- [32] A. Ejiri: Diagnostic results and needs of flowing plasma equilibrium in TST-2, 2nd workshop on QUEST and related ST RF startup and sustainment research, Kyushu University, Kasuga, Feb. 24–26, 2014.
- [33] Y. Takase: Key issues, results and next research of TST-2 RF-only plasma experiments, 2nd workshop on QUEST and related ST RF startup and sustainment research, Kyushu University, Kasuga, Feb. 24–26, 2014.
- 招待講演
- [34] S. G. Baek, P. T. Bonoli, R. R. Parker, S. Shiraiwa, G. M. Wallace, M. Porkolab, Y. Takase, D. Brunner, I. C. Faust, A. E. Hubbard, B. L. LaBombard, and C. Lau: Characterization of onset of parametric decay instability of lower hybrid waves, 20th Topical Conference on RF Power in Plasmas, Sorrento, Italy, Jun. 25–28, 2013.
- [35] Y. Takase, A. Ejiri, C. P. Moeller, T. Shinya, N. Tsujii, T. Wakatsuki, H. Furui, J. Hiratsuka, K. Imamura, T. Inada, H. Kakuda, H. Kurashina, K. Nakamura, A. Nakanishi, T. Oosako, Y.-K. M. Peng, M. Sonehara, H. Togashi, S. Tsuda, and T. Yamaguchi: RF Plasma Start-up and Plasma Current Ramp-up Studies on TST-2, 17th International Spherical Torus Workshop, University of York, York, UK, Sep. 16–19, 2013.
- (国内会議)
- 一般講演
- [36] 辻井直人, TST-2 グループ: TST-2 における低域混成波立ち上げプラズマ, 第8回 QUEST 研究会, 九州大学筑紫キャンパス, 2013年6月29–30日.
- [37] T. Shinya, C. P. Moeller, Y. Takase, T. Wakatsuki, A. Ejiri, T. Oosako, H. Kakuda, T. Yamaguchi, J. Hiratsuka, M. Sonehara, H. Furui, H. Togashi, A. Nakanishi, T. Inada, K. Imamura, S. Tsuda, K. Nakamura, K. Saito, T. Kasahara, T. Seki, and F. Shinbo: TST-2 球状トカマクにおける静電結合型コムラインアンテナを用いた電流立ち上げ実験, ST 研究会, 核融合科学研究所, 土岐, 2013年8月5–6日.
- [38] 富樫央, 江尻晶, 平塚淳一, 山口隆史, 中村京春, 高瀬雄一, 稲田拓真, 今村和宏, 大迫琢也, 角田英俊, 新屋貴浩, 曾根原正晃, 辻井直人, 津田慎太郎, 中西綾香, 古井宏和, 若月琢馬, 永島芳彦, 長谷川真, 成原一途, 山田一博, 東條寛: TST-2 における同軸マルチパストムソン散乱システムの開発, ST 研究会, 核融合科学研究所, 土岐, 2013年8月5–6日.
- [39] 古井宏和, 永島芳彦, 高瀬雄一, 江尻晶, 角田英俊, 曾根原正晃, 大迫琢也, 辻井直人, 新屋貴浩, 富樫央, 中西綾香, 平塚淳一, 山口隆史, 若月琢馬, 今村和弘, 稲田拓真, 津田慎太郎, 中村京春: 小型ロゴスキーコイルを用いた局所電流計測の開発, ST 研究会, 核融合科学研究所, 土岐, 2013年8月5–6日.
- [40] M. Sonehara, Y. Nagashima, A. Ejiri, Y. Takase, H. Furui, H. Kakuda, T. Oosako, T. Yamaguchi, J. Hiratsuka, T. Wakatsuki, H. Togashi, A. Nakanishi, T. Inada, K. Imamura, S. Tsuda, and K. Nakamura: TST-2 球状トカマク装置における静電プローブによる運動量輸送計測, 日本物理学会 2013年秋季大会, 徳島大学 常三島キャンパス, 2013年9月25–28日 (28pKB-3)
- [41] 富樫央, 江尻晶, 高瀬雄一, 平塚淳一, 山口隆史, 中村京春, 永島芳彦, 長谷川真, 山田一博, 成原一途: TST-2 球状トカマクにおける偏光制御型同軸マルチパストムソン散乱計測システムの開発, 日本物理学会 2013年秋季大会, 徳島大学 常三島キャンパス, 2013年9月25–28日 (28pKB-5)
- [42] 出射浩, 関子秀樹, 花田和明, 假家強, 今井剛, Mishra Kishore, 渡邊理, 山口隆史, 江尻晶, 高瀬雄一, 恩地拓己, 鈴木慎一郎, 三浦弘貴, 中村一男, 長谷川真, 藤澤彰英, 永島芳彦, 吉田直亮, 渡辺英雄, 徳永和俊, 東島亜紀, 川崎昌二, 中島寿年, 御手洗修, 前川孝, 福山淳, QUEST グループ: QUEST 装置における電子バンシュタイン波加熱・電流駆動実験に向けた非誘導電流駆動実験, プラズマ・核融合学会 第30回年会, 東京工業大学 大岡山キャンパス, 2013年12月3–6日 (04pC07).
- [43] 富樫央, 江尻晶, 平塚淳一, 山口隆史, 中村京春, 高瀬雄一, 稲田拓真, 今村和宏, 大迫琢也, 角田英俊, 新屋貴浩, 曾根原正晃, 辻井直人, 津田慎太郎, 中西綾香, 古井宏和, 若月琢馬, 永島芳彦, 長谷川真, 成原一途, 山田一博, 東條寛: TST-2 球状トカマク装置における同軸マルチパストムソン散乱計測法の開発, プラズマ・核融合学会 第30回年会, 東京工業大学 大岡山キャンパス, 2013年12月3–6日 (05aE07P).
- [44] 古井宏和, 永島芳彦, 高瀬雄一, 江尻晶, 角田英俊, 曾根原正晃, 大迫琢也, 辻井直人, 平塚淳一, 今村和弘, 稲田拓真, 中村京春, 中西綾香, 新屋貴浩, 富樫央, 津田慎太郎, 若月琢馬, 山口隆史: TST-2 における小型

- ログスキーコイルを用いた局所電流計測の開発, プラズマ・核融合学会 第 30 回年会, 東京工業大学 大岡山キャンパス, 2013 年 12 月 3-6 日 (05aE08P).
- [45] 三瓶明希夫, 政宗貞男, 田中裕之, 西村香苗, 石井豪, 上羽涼太, 小寺良典, 比村治彦, 秋山毅志, 大館暁, 水口直紀, 川端一男, 江尻晶, 小口治久, D. J. Denhartog, K. J. McCollam, R. Paccagnella: RELAX における球状 RFP プラズマ研究の現状と今後の展開, プラズマ・核融合学会 第 30 回年会, 東京工業大学 大岡山キャンパス, 2013 年 12 月 3-6 日 (05pE56P).
- [46] 上羽涼太, 政宗貞男, 三瓶明希夫, 田中裕之, 西村香苗, D. J. Denhartog, 小口治久, 江尻晶, 秋山毅志, 川端一男, 比村治彦: 球状 RFP 装置 RELAX におけるトムソン散乱測定による電子温度計測, プラズマ・核融合学会 第 30 回年会, 東京工業大学 大岡山キャンパス, 2013 年 12 月 3-6 日 (05pE57P).
- [47] 福本直之, 花田和明, 永田正義, 鈴川慎一郎, 恩地拓己, Santanu Banerjee, Kishore Mishra, 山口隆史, 平塚淳一, 関子秀樹, 御手洗修, 松岡啓介, 出射浩, 長谷川真, 中村一男, 藤澤彰英, 江尻晶, 高瀬雄一, 永島芳彦, 川崎昌二, 中島寿年, 東島亜紀, 菊池祐介, Roger Raman: QUEST における燃料粒子補給のためのコンパクト・トラス入射実験, プラズマ・核融合学会 第 30 回年会, 東京工業大学 大岡山キャンパス, 2013 年 12 月 3-6 日 (05pE61P).
- [48] 江尻晶: LHD における精密科学を目指した計測, プラズマ・核融合学会 第 30 回年会, 東京工業大学 大岡山キャンパス, 2013 年 12 月 3-6 日 (SIV-3).
- [49] 高瀬雄一: インフォーマルミーティング I: ITPA 及び物理クラスターの現状「ITER 研究計画の現状および ITER リサーチニーズ」, プラズマ・核融合学会 第 30 回年会, 東京工業大学 大岡山キャンパス, 2013 年 12 月 3-6 日.
- [50] 江尻晶, 徳澤季彦: 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, 九州大学応用力学研究所, 春日, 2014 年 1 月 28-29 日.
- [51] T. Wakatsuki, A. Ejiri, T. Shinya, Y. Takase, H. Furui, J. Hiratsuka, K. Imamura, T. Inada, H. Kakuda, Y. Nagashima, K. Nakamura, A. Nakanishi, T. Oosako, M. Sonehara, H. Togashi, S. Tsuda, N. Tsujii, and T. Yamaguchi: 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プラズマ電流立ち上げ, 第 3 回 ICRF 加熱研究会「ICRF 加熱装置の高性能化と将来応用」, 核融合科学研究所, 2014 年 2 月 21 日.
- [52] 江尻晶, 徳澤季彦: LHD におけるマイクロ波反射計を用いた波動計測, 第 3 回 ICRF 加熱研究会「ICRF 加熱装置の高性能化と将来応用」, 核融合科学研究所, 2014 年 2 月 21 日.
- [53] 平塚淳一, 江尻晶, 高瀬雄一, 山口隆史, 富樫央, 中村京春, 東條寛, 長谷川真, 永島芳彦, TST-2 グループ: ダブルバستمソン散乱計測を用いた 2 方向圧力同時計測, 第 17 回若手科学者によるプラズマ研究会, 日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所, 那珂, 2014 年 3 月 5-6 日.
- [54] 古井宏和, 永島芳彦, 高瀬雄一, 江尻晶, 角田英俊, 曾根原正晃, 大迫琢也, 辻井直人, 平塚淳一, 今村和宏, 稲田拓真, 中西綾香, 新屋貴浩, 富樫央, 山口隆史, 若月琢馬: TST-2 球状トカマクにおける小型ログスキーコイルを用いた局所電流計測, 第 17 回若手科学者によるプラズマ研究会, 日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所, 那珂, 2014 年 3 月 5-6 日.
- [55] 江尻晶, 徳澤季彦, 斎藤健二, 関哲夫, 笠原寛史, 武藤敬, 關良輔, 神尾修治, 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 69 回年次大会, 平塚, 東海大学 湘南キャンパス, 2014 年 3 月 27-30 日 (28pAX-1).
- [56] 平塚淳一, 江尻晶, 高瀬雄一, 山口隆史, 富樫央, 中村京春, 東條寛, 長谷川真, 永島芳彦, TST-2 グループ: ダブルバستمソン散乱計測を用いたプラズマ電流密度計測手法の開発, 日本物理学会第 69 回年次大会, 平塚, 東海大学 湘南キャンパス, 2014 年 3 月 27-30 日 (28pAX-5).
- [57] 古井宏和, 永島芳彦, 高瀬雄一, 江尻晶, 角田英俊, 曾根原正晃, 大迫琢也, 辻井直人, 平塚淳一, 今村和宏, 稲田拓真, 中西綾香, 新屋貴浩, 富樫央, 山口隆史, 若月琢馬: TST-2 球状トカマクにおける小型ログスキーコイルを用いた局所電流計測の開発, 日本物理学会第 69 回年次大会, 平塚, 東海大学 湘南キャンパス, 2014 年 3 月 27-30 日 (28aAE-4).

6.3 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非線形力学系の一般的性質として学問体系が再編成されつつある。我々はそのような観点から、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、生命システムまでを含む様々な自然現象を捉えなおし、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共通した特徴に注目しながら、系の詳細によらない統一的な記述に迫ることを目標としている。また、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する著しい進展が見られ、一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、普遍性だけではな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。

6.3.1 巨視的非平衡系の物理

成長する界面ゆらぎの普遍性

森林火災の拡がりや癌細胞の成長など、何らかの界面の成長過程にはスケール不変な非平衡ゆらぎが現れることが多く、基礎科学・応用科学の双方で重要な現象である。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 6.3.1)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た [1, 11, 14, 29, 34, 38, 41, 43, 52, 70, 78, 79, 82, 85]。今年度は昨年度に引き続き、KPZ クラス界面ゆらぎの様々な統計的性質のうち、解析的に計算できない物理量、特に時間相関に注目し、実験と数値計算によってその特異性と普遍性を報告した。特に、平面界面サブクラスと定常界面サブクラス間のクロスオーバー現象を数値的・実験的に報告する [3, 34] とともに、KPZ 界面成長がエルゴード性を弱く破っていることも示した [60]。我々はまた、界面成長だけでなく非平衡臨界現象にも注目し、両者の関係や他の実験系との比較なども行いながら [11, 34, 39, 43, 78, 79, 82]、非平衡スケーリング則の更なる実験研究を進めている。

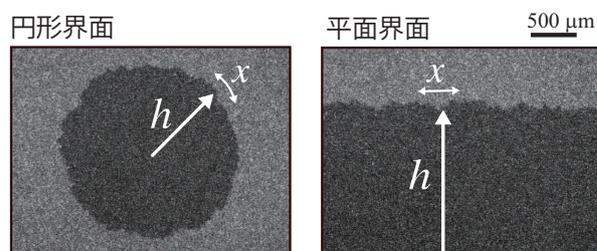


図 6.3.1: 液晶位相欠陥乱流の界面成長。界面高さ h のゆらぎは KPZ クラスのスケーリング指数と普遍ゆらぎ分布を示し、円形界面・平面界面で異なる普遍サブクラスに属する。

チャンネル流における乱流への遷移現象

パイプ中や平板間を流れる流体の流れは、層流が線形不安定となる“臨界 Reynolds 数”よりも低い Reynolds 数で乱流に遷移することが知られている。その背後にある物理の理解は基礎物理学としても乱流制御などの工学的観点からも重要であるにも拘わらず、100 年以上の間未解決問題として残されている。当研究室では、乱流遷移を非平衡系の相転移として理解することを目指し、“乱流への遷移が Directed Percolation (DP) 普遍クラスに属する”という仮説の実験的検証への試みを始めた。

本年度はまず、横方向の流れと、活性壁という境界条件がある場合の DP クラス相転移の様相を、directed bond percolation モデルの数値計算によって調べた。特に、相関長やオーダーパラメータの値から、通常の DP クラスの臨界指数が得られることを確認した。この数値計算結果を踏まえて、実験では、2 枚のアクリル平板で出来たチャンネルの入り口に乱流を起こす格子を導入し、フレーク粒子によって可視

化された乱れの様子を撮影し、解析を行った。入り口から十分離れた領域での乱流状態の占める割合は DP 仮説と矛盾していないように見られ、現在、より高い精度での臨界指数の測定に向け、実験系の改良に取り組んでいる。

非ブラウン粒子懸濁液のレオロジー

懸濁液のような分散系は、その複雑性から水のようない純粋な粘性流体とは大きく異なる性質を示す。懸濁液の性質の研究・解明は工学上極めて重要であり、基礎科学的にも非常に興味深い系である。懸濁液の粘性の研究は、高充填率では実験を元にした、現象論的な理解が中心である。近年、非ブラウン粒子懸濁液において、系の粘弾性と粒子の運動の可逆・不可逆が強く結びついていることが示唆された。当研究室ではこれを受けて、ミクロな粒子の運動から、系の粘弾性というマクロな応答の性質を説明することを目的にし、懸濁液のシミュレートを行っている。「KAPSEL」と呼ばれる懸濁液をシミュレートするためのオープンソースのシミュレーターを改良し、粒子の軌跡と周囲の応力場を詳細に調べることが可能になった。現在、細かい調整を行っているが、準備ができ次第実際に粘弾性測定を行い、粒子の軌道と懸濁液の粘弾性について議論を行う予定である。

また、詳細は省くが、重力波検出装置における非平衡熱雑音の定量的な見積りに関してのモデル化についても研究を進めている。先行研究では運動量が保存しないモデルを用いていたが、それを改良し物理的に正しい意味を持つモデルを作り、数値的にノイズを計算した [57, 75]。

カイラルな液晶の温度勾配によるレーマン効果

コレステリック液晶はカイラリティをもっているため、温度勾配をかけると thermo-mechanical coupling により液晶の模様が回転することが知られている (レーマン効果)。しかし、現象の発見以降 100 年以上経た現在も、そのメカニズムはほとんど理解されていない。特に、「ミクロな分子のカイラリティ」と「マクロならせん構造のカイラリティ」のどちらがレーマン効果の起源なのかという点については議論がわかれている。

そこで我々は、この議論に答えを出すため、等方相-コレステリック液晶相の二相共存状態でレーマン効果の観察を行った。その結果、先行研究で報告されている縞模様をもつ液滴とは異なった模様をもつ 2 種類の液滴を見つけた。さらに、蛍光共焦点偏光顕微鏡観察 (FCPM) を行うことで、3 種類の液滴の三次元構造を決定した。それぞれの液滴は、内部構造としては同じらせん構造をもつが、らせん軸と温度勾配の傾きが異なっているということがわかった。また、その三次元構造を考慮し、液晶の流体理論である Ericksen-Leslie 理論に基づき、レーマン係数の定量評価をおこなったところ、同じ組成の液晶材料に対しても、それぞれの液滴でレーマン係数の値が異

なることがわかり、レーマン効果は Ericksen-Leslie 理論では説明することのできない現象である可能性を示唆する結果を得た [18, 46, 63]。

6.3.2 小さな非平衡系の物理

情報流れを用いた部分系の熱力学の構築

コロイド粒子系や生体内のシグナル伝達系などの「小さい系」において、熱力学が近年構築され、具体的な応用を含めて注目されている。近年、その小さい系において、情報処理の観点から熱機関に関する研究や、第二法則の拡張などの研究が盛んに行われている。我々は今までになされていた情報を含んだ熱力学第二法則の拡張の研究を、小さい部分系における熱力学第二法則と位置づけ、ほぼ全ての物理現象を表現可能な因果律をもつ確率過程のクラス (Causal Network) を用いて、情報流れを用いた部分系の熱力学を構築した [7, 32, 23, 28, 65, 50, 69, 80, 84]。また、大腸菌 (*E. coli*) の走化性のシグナル伝達において、情報流れを用いた部分系の熱力学を適用することで、シグナル伝達の正確性と情報の関係を調べ、通常の情報理論では議論できない領域まで、情報流れを用いた部分系の熱力学が適用可能で、生体内における情報理論として利用可能なことを明らかにした [47, 56, 65, 77]。

ゆらぐ熱力学のスケール依存性と定常状態熱力学

ゆらぐ熱力学は、着目系の確率的なダイナミクスを仕事や熱といった熱力学的な量と関連づける枠組みである。ところが、一般に非平衡状態においてはどのようなスケールにおいて系の運動を記述するかに応じてゆらぐ熱力学の枠組みの与える結果が変わりうるということが分かってきた。この事実は、ゆらぐ熱力学に基づくさまざまな理論的知見の基盤を危うくする [21, 26] のみならず、最近行なわれている生体分子モーターの効率を実験的に測定する試みにおいても、その結果の解釈に曖昧さを生じさせ得る。

当研究室では特にエントロピー生成のスケール依存性に着目して、定常状態熱力学の構築で用いられるエントロピー生成の過剰部分を使うことでこの問題が避けられることを示した。具体的には、粗視化しかスケールで着目する自由度とそれ以外の自由度それぞれの時間スケールが十分に分離している時、エントロピー生成から定常状態におけるその値を差し引くことで定義される過剰エントロピー生成と定常状態エントロピーの変化分との和が、一定の (無視できる大きさの) 誤差の範囲内で一致することを示した [76, 53, 67]。

6.3.3 生命現象の物理・アクティブマター

短距離のネマチック相互作用によるアクティブマターの群れ運動

魚や鳥などの自発的に運動する粒子の集団に規則だった群れ運動が生じる。Vicsek らの研究により短距離の運動方向を揃える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。ここで鳥のように大きな粒子を考えると慣性があるため、回転速度を急には変えられない。また低レイノルズ数の流れによって遊泳する粒子を考えると、形状の対称性がその運動様式と密接に関係する。そのため粒子がゆっくりと変形する時、回転速度が長時間維持されると考えられる [13]。そこで我々は短距離の運動方向を揃える相互作用によって生じる群れ運動に関して、個々の粒子の方向変化率の履歴に注目して研究を行っている。

我々はガラスに吸着したダイニンに駆動される微小管を用いて、短距離のネマチック相互作用による群れ運動を実験的に実現した [15, 71, 72, 73, 81]。実験の結果、微小管の群れ運動は微小管の重合時間やダイニンの密度に依存することを発見した。重合時間が 20 分の時、図 6.3.2(a) のように一様なネマチック相を形作る。一方、重合時間が 30 分の時、図 6.3.2(b) のように微小管が渦状に並び、微小管の渦状構造が六角格子状に並ぶ。また渦状構造ができる時、ダイニンの密度が濃いほうが渦の大きさが小さくなる。

これまでの数理モデルを用いた研究により、個々の粒子の運動方向変化率の相関時間の変化によって図 6.3.2 に見られる群れ運動の相変化が起こることがわかっている。そこで、微小管の群れ運動の相変化の原因を探るため、微小管の密度を下げ孤立した微小管の運動方向変化率の相関時間を解析した。その結果、群れ運動の相と相関時間の対応関係が数理モデルと同様であることが明らかになった [25, 61]。

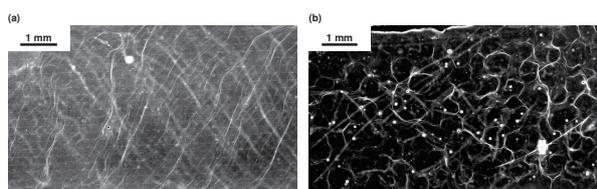


図 6.3.2: 微小管の群れ運動。(a)20 分間微小管を重合させた場合。微小管は一様なネマチック相を形作る。(b)30 分間微小管を重合させた場合。微小管は渦上に並び、渦が六角格子状に整列する。

自己駆動する粒子を用いたアクティブマターの研究

魚群れやバクテリア懸濁液に見られる渦構造などのような、自ら動き回る粒子（自己駆動粒子）の集

団が作る構造を調べるために、我々は駆動力や相互作用を制御できる人工的な粒子を用いて実験を行った。使用したのは、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）である。これに水中で交流電場を加えると、自己誘導電気泳動という現象によって、Janus 粒子は自発的に運動を始める。電場の強度や周波数を変えることで、駆動力と相互作用を制御できる。

密度が高く混み合った状態で Janus 粒子が動き回っている状態（図 6.3.3）において実験をおこなった結果、Janus 粒子の作る速度場のスペクトルにべき乗則を得た。このべき乗則は、異なる構造間でのエネルギーの移り変わりが存在することを示唆している。その構造とは何かを詳しく調べた結果、Janus 粒子が局所的に向きを揃えて進んでいることが明らかになった [17, 30, 62, 55]。また、昨年引き続き、駆動力をもつ Janus 粒子が鎖状に結合して推進していく複合体の実験もおこなった。先頭粒子を固定したときに鎖状構造の示す鞭毛のような鞭打ち運動の解析をおこない、鞭打ちの振動数と駆動力の関係性を検証した [2, 17, 22, 27, 44, 45]。

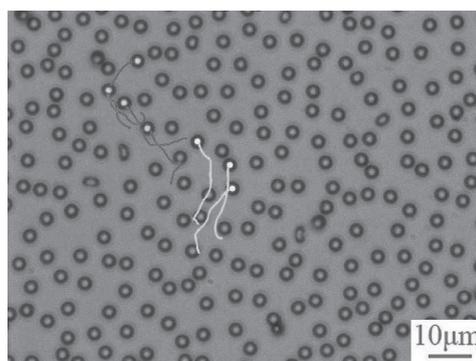


図 6.3.3: Janus 粒子のつくる乱流状態。粒子が局所的に向きをそろえて進んでいく構造が見られる。

我々はさらに、Janus 粒子に関する数値計算も行っている。Janus 粒子の運動は印加電圧によってランダムウォークだったり規則的な回転運動だったりするが、これは Langevin 方程式に一定の自己推進力とトルクを加えることで記述できる。Janus 粒子系では、他の自己駆動粒子系でしばしば見られる集団運動が今のところ観察されていないが、我々はその原因が Janus 粒子間の流体相互作用にあると考え、この仮説を数値的に検証した。その結果、Janus 粒子の流体相互作用は、“pusher” と呼ばれる種類の自己駆動粒子の、集団運動を示さないパラメータ領域の結果と類似していることが判明した。数値計算の結果は実験観察とよく一致している。

なお、高密度の Janus 粒子系では、集団運動はなくとも、アクティブ乱流やアクティブジャミングなど、様々な興味深い現象が観察できる。また、最近の理論研究では、Janus 粒子を用いたラチェットが通常のラチェットと桁違いの非常に高い効率を示すことが予言された。この予言を実験的に検証するため、我々は微小流体系でラチェットを構成し、実験を始

めている。

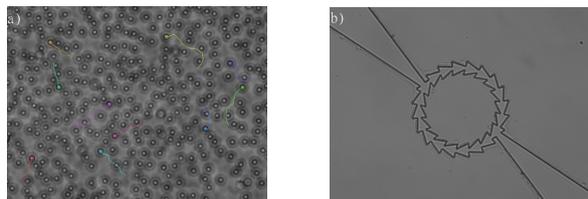


図 6.3.4: (a) 高密度のヤヌス粒子とその軌道。(b) 微小流体系で作成したラチェット。

F₁-ATP-ase の現象論的モデル

生体分子モーター F₁-ATPase(F₁) は世界最小の回転モーターであり、そのエンジンとしての高効率性や可逆性などの性質から広く興味を集めている。近年の詳細な測定により、F₁ は熱力学的効率が非常に高くだけでなく、有限速度回転に伴う内部散逸が非常に小さいということが明らかになってきた。これは、回転運動の源である化学自由エネルギーのうち、ほぼすべてが回転自由度を通して外部に散逸していることを意味しているが、この効率的なエネルギー変換がどのように行われているのかが理論的に未解明であった。

こうした状況を踏まえ、われわれは、分子モーターにおいて低内部散逸を実現するための仮説モデルを提唱した [20, 48, 51, 66, 58]。ラチェットモデルを基礎に、化学エネルギー源の分子 (ATP, ADP) のモーター結合確率の回転角度依存性を順・逆回転方向で完全非対称にしたアロステリック機構を仮定することにより、実験結果が良く再現されることを発見した。この設計により内部散逸が小さくなる理由として、モデルに内在する離れた 2 つの時間スケールの、中間的領域が大きな役割を担うことが分かり、低内部散逸を支える非自明な理論的背景の存在が明らかになった。本モデルにより、F₁ に関する知られている実験結果のほぼすべてが再現される他、将来 F₁ に外部トルクをかけ ATP 合成方向回転をさせる状況での熱測定が可能になった場合の実験結果への予言も与えられた [20, 48, 51, 66, 58]。

<受賞>

- [1] K. A. Takeuchi, Young Scientist Prize, IUPAP (C3 commission), July 24, 2013, Seoul, Korea.
- [2] 西口大貴, 第 58 回物性若手夏の学校 ポスターセッション デザイン賞, 2013 年 8 月 12-16 日, 滋賀.

<報文>

(原著論文)

- [3] K. A. Takeuchi: Crossover from Growing to Stationary Interfaces in the Kardar-Parisi-Zhang Class, *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 210604 (2013).

- [4] K. A. Takeuchi and H. Chaté: Collective Lyapunov modes, *J. Phys. A: Math. Theor.*, **46**, 254007 (2013).
- [5] M. Y. Matsuo, H. Tanimoto and M. Sano: Large fluctuation and Lévy movement of an active deformable particle, *Europhys. Lett.* **102**, 40012 (2013).
- [6] J.-B. Delfau, C. Coste, and M. Saint Jean: Noisy zigzag transition, fluctuations, and thermal bifurcation threshold, *Phys. Rev. E*, **87**, 062135 (2013).
- [7] S. Ito and T. Sagawa: Information Thermodynamics on Causal Networks, *Phys. Rev. Lett.*, **111**, 180603 (2013).
- [8] I. Imayoshi, A. Isomura, Y. Harima, K. Kawaguchi, H. Kori, H. Miyachi, T. Fujiwara, F. Ishidate, and R. Kageyama: Oscillatory control of factors determining multipotency and fate in mouse neural progenitors, *Science*, **342**, 1203-1208 (2013).
- [9] K. Kawaguchi and Y. Nakayama: Fluctuation theorem for hidden entropy production, *Phys. Rev. E*, **88**, 022147 (2013).
- [10] H. Ebata and M. Sano: Bifurcation from stable holes to replicating holes in vibrated dense suspensions, *Phys. Rev. E*, **88**, 053007 (2013).
- [11] K. A. Takeuchi: Experimental approaches to universal out-of-equilibrium scaling laws: turbulent liquid crystal and other developments, *J. Stat. Mech.*, **2014**, P01006 (2014).
- [12] H. Tanimoto and M. Sano: A Simple Force-Motion Relation for Migrating Cells Revealed by Multipole Analysis of Traction Stress, *Biophys. J.* **106**, 16-25 (2014).

(会議抄録)

- [13] M. Hayakawa, H. Onoe, K. H. Nagai, M. Takinoue: Rapid formation of anisotropic non-spherical hydrogel microparticles with complex structures using a tabletop centrifuge-based microfluidic device, The 17th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (micro-TAS2013), 630-632 (2013).

(国内雑誌)

- [14] 竹内一将: 目で見るランダム行列理論の統計則 — 界面ゆらぎでの実例, *応用数理*, **23**, 58-67 (2013).
- [15] 永井健, 住野豊, 大岩和弘: ダイニンに駆動された微小管の集団運動, *生物物理*, **53**, 149-152 (2013).
- [16] 佐野雅己: 力学的エネルギー, *数理科学*, **51**(8), 7-13 (2013).

(学位論文)

- [17] 西口大貴: 自己駆動する非対称なコロイド粒子の集団運動, 修士論文, 2014 年 3 月.
- [18] 山本尚貴: キラルな液晶の温度勾配によるレーマン効果, 修士論文, 2014 年 3 月.

- (著書)
- [19] 佐野雅己 (共著): キリンの斑論争と寺田寅彦 (岩波科学ライブラリー, 2014年1月).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [20] K. Kawaguchi, S.-i. Sasa, and T. Sagawa: Internal dissipation-free model for F_1 -ATPase, *Frontier of Statistical Physics and Information Processing -Perspectives from Nonequilibrium Behaviors-*, July 11-14, 2013, Kyoto, Japan.
- [21] Y. Nakayama and K. Kawaguchi: Relation between Entropy Production and Path Probability in the Presence of Hidden Degrees of Freedom, *Frontier of Statistical Physics and Information Processing -Perspectives from Nonequilibrium Behaviors-*, July 11-14, 2013, Kyoto, Japan.
- [22] D. Nishiguchi and M. Sano: Flagella-like Beating Motions of Chains formed by Active Brownian Particles, *Frontier of Statistical Physics and Information Processing -Perspectives from Nonequilibrium Behaviors-*, July 11-14, 2013, Kyoto, Japan.
- [23] S. Ito: Information Thermodynamics on Causal Networks, *IUPAP International Conference on Statistical Physics, STATPHYS25*, July 22-26, 2013, Seoul, Korea.
- [24] K. Kawaguchi and Y. Nakayama: Increase and decrease of entropy production after reducing variables, *IUPAP International Conference on Statistical Physics, STATPHYS25*, July 22-26, 2013, Seoul, Korea.
- [25] K. H. Nagai and I. S. Aranson: Vortex lattice formation of self-propelled particles, *IUPAP International Conference on Statistical Physics, STATPHYS25*, July 22-26, 2013, Seoul, Korea.
- [26] Y. Nakayama and K. Kawaguchi: Consistency of Stochastic Thermodynamics in the Different Scales of Description, *IUPAP International Conference on Statistical Physics, STATPHYS25*, July 22-26, 2013, Seoul, Korea.
- [27] D. Nishiguchi and M. Sano: Wriggling Motions of Chains formed by Self-Propelled Particles, *IUPAP International Conference on Statistical Physics, STATPHYS25*, July 22-26, 2013, Seoul, Korea.
- [28] S. Ito and T. Sagawa: Information Thermodynamics on Causal Networks, *Mathematical Statistical Physics*, July 29 - Aug. 3, 2013, Kyoto, Japan.
- [29] K. A. Takeuchi: Emergence of random-matrix statistics as universal properties of growing interfaces, *Mathematical Statistical Physics*, July 29 - Aug. 3, 2013, Kyoto, Japan.
- [30] D. Nishiguchi and M. Sano: Turbulent State of Janus Particles in a Crowded Situation, *International Workshop on Spatiotemporal Pattern Formation in Biological and Active Matters*, Mar. 2, 2014, Tokyo, Japan.
- 招待講演
- [31] M. Sano: Controlling Collective Behavior of Active Colloids through a Dipole-Quadrupole Transition, *7th International Conference on Engineering Chemical Complexity*, June 10-13, 2013, Rostock-Warnemünde, Germany.
- [32] S. Ito: Information Thermodynamics on Causal Networks, *Frontier of Statistical Physics and Information Processing -Perspectives from Nonequilibrium Behaviors-*, July 11-14, 2013, Kyoto, Japan.
- [33] M. Sano: Detecting Symmetry Breaking in Traction Force Dynamics of Amoeboid Cells, *Patterns & waves in populations of cells and active particles*, July 19-20, 2013, Seoul, Korea.
- [34] K. A. Takeuchi: Exploring universal out-of-equilibrium scaling laws with turbulent liquid crystal, *IUPAP International Conference on Statistical Physics, STATPHYS25*, July 22-26, 2013, Seoul, Korea.
- [35] M. Sano: Collective Dynamics of Active Colloids, *Gordon Research Conferences, Bio-Soft Matter: Dynamical and Structural Complexity*, Aug. 18-23, 2013, New London, USA.
- [36] M. Sano: Self-Organization Dynamics of Active Colloids, *Diffusion Fundamentals V: Basic Principles of Diffusion Theory, Experiment and Application*, Aug. 26-28, Leipzig, Germany.
- [37] M. Sano: Research on Non-equilibrium Systems Aims at Protolife, *International Workshop "From Soft Matter to Protocell"*, Sep. 18-20, 2013, Sendai, Japan.
- [38] K. A. Takeuchi: Powerful and geometry-dependent universality in growing interfaces, *Small Systems far from Equilibrium: Order, Correlations, and Fluctuations*, Oct. 14-18, 2013, Dresden, Germany.
- [39] K. A. Takeuchi: Critical phenomena out of equilibrium probed by liquid-crystal turbulence, *East Asia Joint Seminars on Statistical Physics 2013*, Oct. 21-24, 2013, Kyoto, Japan.
- [40] M. Sano: Thermal Nonequilibrium Transport in Colloids and Liquid Crystals, *Hot Nanostructures*, Oct. 21-25, 2013, Leiden, Netherlands.
- [41] K. A. Takeuchi: Experimental evidence for universal fluctuation properties of growing interfaces, *12th Workshop on Stochastic Analysis on Large Scale Interacting Systems*, Nov. 21-23, 2013, Tokyo, Japan.
- [42] M. Sano: From Brownian Dynamics to Driven and Active Dynamics of Colloids: Energetics and Fluctuation, *IAS Tutorials and Lectures, IAS program*

- on Frontiers of Soft Matter Physics: From Non-Equilibrium Dynamics to Active Matter, Jan. 5-10, 2014, Hong Kong, China.
- [43] K. A. Takeuchi: Exploring universal scaling laws far from equilibrium with turbulent liquid crystal, APS March Meeting, Mar. 3-7, 2014, Denver, USA.
- (国内会議)
- 一般講演
- [44] 西口大貴, 佐野雅己: アクティブなブラウン粒子の鎖のムチ打ち運動, 第 58 回物性若手夏の学校, 2013 年 8 月 12-16 日, 滋賀.
- [45] 西口大貴, 佐野雅己: 駆動力を持つブラウン粒子の多体現象, 第 58 回物性若手夏の学校, 2013 年 8 月 12-16 日, 滋賀.
- [46] 山本尚貴, 佐野雅己: コレステリック液晶の温度勾配によるレーマン効果, 第 12 回関東ソフトマター研究会, 2013 年 8 月 24 日, お茶の水大学.
- [47] 伊藤創祐, 沙川貴大: 走化性モデルにおける情報流とエントロピー生成, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 25-28 日, 徳島大学.
- [48] 川口喬吾, 佐々真一, 沙川貴大: Nonequilibrium dissipation-free transport of F_1 -ATPase and the thermodynamic role of asymmetric allostereism, 日本生物物理学会年会, 2013 年 10 月 28-30 日, 京都.
- [49] 佐野雅己: 領域レビュー: ゆらぎと構造, 第 7 回物性科学領域横断研究会: 凝縮系科学の最前線, 2013 年 12 月 1-2 日, 東京大学.
- [50] 伊藤創祐, 沙川貴大: ネットワーク上の情報熱力学, 新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」第 1 回領域研究会, 2013 年 12 月 25-27 日, 熱海.
- [51] 川口喬吾, 佐々真一, 沙川貴大: F_1 -ATPase の現象論的モデル: 低内部散逸と非対称な遷移ルール, 新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」第一回領域研究会, 2013 年 12 月 25-27 日, 熱海.
- [52] 竹内一将: ゆらぎ界面成長にひそむ非平衡普遍法則, 新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」第一回領域研究会, 2013 年 12 月 25-27 日, 熱海.
- [53] 中山洋平, 川口喬吾: 異なるスケールにおけるゆらぎ世界の熱力学と定常状態熱力学, 新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」第一回領域研究会, 2013 年 12 月 25-27 日, 熱海.
- [54] 佐野雅己: ゆらぎの定理: チートリアル, 若手研究会「ゆらぎの定理: 過去」, 2014 年 3 月 4 日, 東京大学.
- [55] 西口大貴: 自己駆動する非対称なコロイド粒子の集団運動, サマーチャレンジ 6 期生 4 期生合同研究発表会, 2014 年 3 月 10-11 日, 高エネルギー加速器研究機構, 茨城.
- [56] 伊藤創祐, 沙川貴大: 多体 Langevin 系の情報流, 日本物理学会 2014 年年次大会, 2014 年 3 月 27-30 日, 東海大学.
- [57] 柴田和憲, 乙村浩太郎, 出野雄也, 徳田順生, 麻生洋一, 宗宮健太郎, 安藤正樹: 非平衡定常状態系における熱雑音, 日本物理学会 2014 年年次大会, 2014 年 3 月 27-30 日, 東海大学.
- [58] 川口喬吾, 佐々真一, 沙川貴大: F_1 -ATPase の現象論的モデル: 非対称な遷移ルールによる内部散逸の低減, 日本物理学会 2014 年年次大会, 2014 年 3 月 27-30 日, 東海大学.
- [59] 佐野雅己: 趣旨説明, 日本物理学会 2014 年年次大会, 領域 11, 12 合同シンポジウム, 量子・生命・ソフトマターにおける動的揺らぎの普遍法則の現在と未来, 2014 年 3 月 27-30 日, 東海大学.
- [60] 竹内一将: KPZ 界面成長における弱いエルゴード性の破れ, 日本物理学会 2014 年年次大会, 2014 年 3 月 27-30 日, 東海大学.
- [61] 永井健, 大岩和弘, 小嶋寛明: ガラス板に固定したダイニンに駆動される微小管の群れ運動, 日本物理学会 2014 年年次大会, 2014 年 3 月 27-30 日, 東海大学.
- [62] 西口大貴, 佐野雅己: 交流電場下で駆動する非対称なコロイド粒子の集団挙動, 日本物理学会 2014 年年次大会, 2014 年 3 月 27-30 日, 東海大学.
- [63] 山本尚貴, 佐野雅己: カイラルな液晶の温度勾配によるレーマン効果, 日本物理学会 2014 年年次大会, 2014 年 3 月 27-30 日, 東海大学.
- 招待講演
- [64] 佐野雅己: アクティブマターとは何か: 自走コロイドから細胞運動まで, 分子ロボティクス研究会 4 月定例会, 2013 年 4 月 27 日, 名古屋大学.
- [65] 伊藤創祐: 部分系に対して熱力学第二法則をどのように一般化するか, 若手研究会「ゆらぎの定理: 現在と未来」, 2014 年 3 月 14 日, 東京大学.
- [66] 川口喬吾: 生体分子モーターのための微小系熱力学, 若手研究会「ゆらぎの定理: 現在と未来」, 2014 年 3 月 14 日, 東京大学.
- [67] 中山洋平: ゆらぎの定理で捉えられないエントロピー生成とそれでも不変に保たれる構造, 若手研究会「ゆらぎの定理: 現在と未来」, 2014 年 3 月 14 日, 東京大学.
- (セミナー)
- [68] 佐野雅己: 非平衡物理現象: ミクロからマクロまで, 東京理科大学 塚原・川口研セミナー, 2013 年 4 月 8 日.
- [69] 伊藤創祐: フィードバック冷却と熱力学第三法則, 東京大学 福島研究室セミナー, 2013 年 5 月 8 日.
- [70] 竹内一将: 界面成長の普遍法則をめぐって - 物理と数学の不思議な関係, 早稲田大学 数物コロキウム, 2013 年 5 月 17 日.
- [71] K. H. Nagai: Vortex lattice of self-propelling microtubules, ESPCI, Laboratory Gulliver, May 17, 2013, France.
- [72] K. H. Nagai: Vortex lattice of self-propelled microtubules driven by axonemal dynein, Institut Jacques Monod, Minc's Laboratory, May 21, 2013, France.
- [73] K. H. Nagai: Vortex lattice of self-propelling microtubules, Ludwig-Maximilians University Munich, Systems Biophysics Laboratory, May 28, 2013, Germany.

- [74] 佐野雅己：アクティブマターとは何か：自走コロイドから細胞運動まで，明治大学 第1回 CIMAA/MIMS 自己組織化セミナー，2013年7月5日。
- [75] 乙村浩太郎：Langevin系としての Suspension Thermal 温度勾配をどう取り扱うか，東京大学 安藤研究室セミナー，2013年8月28日。
- [76] 中山洋平：モデルの粗視化とエントロピー生成，京都大学 佐々研究室セミナー，2013年9月11日。
- [77] 伊藤創祐：走化性モデルにおける情報流とエントロピー生成，京都大学 佐々研究室セミナー，2013年9月17日。
- [78] K. A. Takeuchi: Exploring universal out-of-equilibrium scaling laws with turbulent liquid crystal, Université Paris 7, Laboratoire MSC, Oct. 9, 2013, France.
- [79] K. A. Takeuchi: Exploring universal out-of-equilibrium scaling laws with turbulent liquid crystal, Max Planck Institute for Dynamics and Self-Organization, Oct. 11, 2013, Germany.
- [80] S. Ito: Information Thermodynamics on Causal Networks, Stuttgart University, Udo Seifert Group Seminar, Oct. 29., 2013, Germany.
- [81] 永井健：ダイニンに駆動された微小管の形作る渦の格子模様，東北大学 村田・野村研セミナー，2013年12月12日。
- [82] 竹内一将：非平衡臨界現象の理論と液晶乱流による実験検証，数理物理・物性基礎論セミナー，2013年12月14日。
- [83] 佐野雅己：細胞運動における力と速度の単純な関係－応力測定と多重極展開による運動予測－，広島大学 第8回 NLPMP コロキウム，2013年12月19日。
- [84] S. Ito: Information Thermodynamics on Causal Networks, Kyoto University, Nonlinear Dynamics Group Seminar, Feb. 3. 2014, Japan.
- [85] K. A. Takeuchi: Interface fluctuations and KPZ: experimental approach to mathematical sciences, New York University, Courant Institute of Mathematical Sciences, Special Probability Seminar, Mar. 11, 2014, USA.

(他学科講義)

- [86] 佐野雅己：不安定性をてなずける：自己組織化とは何か，東京大学 EMP 講義，2013年5月24日，東京大学伊藤学術センター。
- [87] 佐野雅己：創発性とは何か，東京大学 EMP 講義，2013年11月23日，東京大学伊藤学術センター。

6.4 山本研究室

6.4.1 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 10 K 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他、 CH , H_2D^+ , HD_2^+ 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、テラヘルツ分子観測を進めている。

6.4.2 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、 $HCOOCH_3$ 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 CH_4 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。さらに重要なことは、このような分子組成の違いがどのように惑星系へ伝播されるかである。本研究室では、これらの点を中心に、ALMA などの先端的観測装置を用いて幅広い研究を進めている。

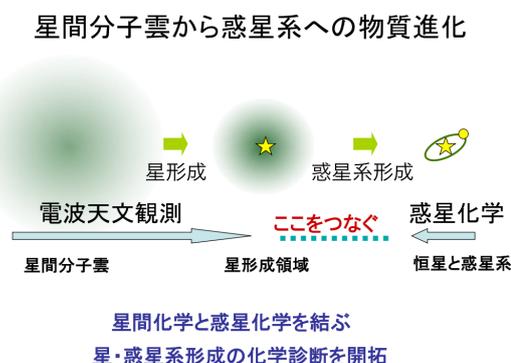


図 6.4.1: A schematic illustration of our goal

【原始惑星系円盤外縁部で劇的な化学変化】ALMA を用いて、おうし座分子雲にある原始星 L1527 の高感度・高空間分解能観測を行い、惑星系円盤が形成される様子を調べた。いくつかの分子のスペクトル線観測から、中心星から半径 100 AU の位置よりも内側で、炭素鎖分子やその仲間の分子が急激にガス中からなくなってしまうことを見出した。ドップラー効果の精密な測定から、100 AU という

半径は、落ち込んでくるガスが遠心力のために滞留し（遠心力バリア）、惑星系円盤に移り変わっていく半径であることがわかった（図2, 3）。即ち、惑星系円盤形成の「最前線」を同定したといえる。一方、SO分子の分布を調べたところ、この分子は遠心力バリア付近でリング状に局在していることがわかった。SO分子の温度が落ち込んでくるガスの温度に比べて高いことから、落ち込むガスが遠心力バリアに突っ込むときに、弱ながらも衝撃波が生じていると考えられる。その結果、ガス中に含まれる塵（星間塵）の表層に凍りついていたSO分子がガス中に放出され、リングのように観測されたと見られる。惑星系円盤内では密度が非常に高いので、遠心力バリアを通過した後はほとんどの分子が星間塵に凍りついてしまう。円盤形成に伴って激しい化学変化がおこることは予想すらされていなかったため、惑星系の物質的起源の研究に大きなインパクトを与えた。また、惑星系円盤が周囲のガスから形成される過程の理解は、太陽系の起源の理解にもつながる重要な研究課題であるが、これまで行われてきた、直接、構造や運動を調べる物理的アプローチでは、惑星系円盤と周囲のガスとの区別が難しかった。これに対し、本研究では、構造変化に伴う化学変化に着目したことで、円盤との境界を捉えることに成功した。このような観測はALMAによって初めて可能になったものであり、今後さらなる発展が期待される。

L1527の速度場の詳細解析のため、計算機シミュレーションを行った。モデルとして、回転しながら落下するガス円盤を採用した（図3）。このモデルでは、エネルギーと角運動量の保存則のため、粒子は遠心力バリアより内側には落ち込むことができない。ガスの速度場は、遠心力バリアまでの落下を粒子の運動で近似した。この運動は、中心星の質量と遠心力バリアの位置によって決定される。また、ガスの分布は中心星からの距離の1.5乗に反比例するものとし、放射強度の計算は光学的に薄い状態を仮定した。スペクトル線の熱的拡がりや望遠鏡の解像度の効果も取り入れた。このモデルは、ガスの圧力や自己吸収などを無視し単純化したものであるが、図2の観測結果をよく再現している。

【低質量原始星 IRAS15398-3359 の高分解能観測】IRAS 15398-3359 は、おおかみ座にある Class 0 天体であり、L1527 に次ぐ WCCC 天体として知られている。今回、ALMA の初期運用 Cycle 0 の観測において、 H_2CO 、 CCH 、 $\text{c-C}_3\text{H}_2$ 、 CH_3OH などの分子が検出され、中心の原始星から北東-南西方向に噴き出すアウトフローの存在が確認された。このアウトフローにおけるガスの速度場の解析から、視線方向に対する天体の傾き角は 20° と推定された。この角度はこれまで 75° と報告されており、face-on であると考えられていたが、今観測によりむしろ edge-on に近いことがわかった。一方、原始星近傍の構造については、今観測の分解能では L1527 のような遠心力バリアは確認されなかった。また edge-on であるにも関わらず、ガスの視線速度の幅は $\pm 1 \text{ km s}^{-1}$ と小さいことがわかった。これらは、この天体では L1527 に比べてガスの比角運動量が小さく、また原始星の質量が低いことを示唆する。実際、L1527 と同じモデルを用いた解析により、原始星の質量は $0.04 M_\odot$ 以

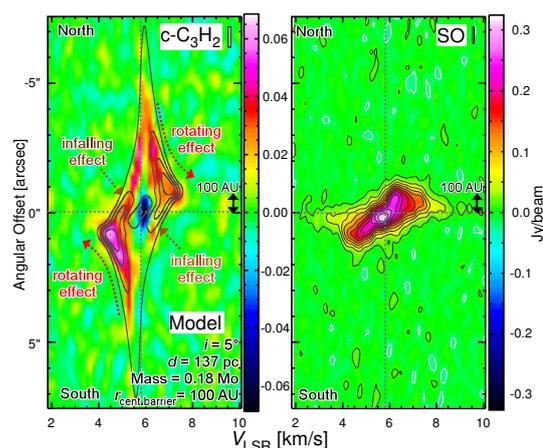


図 6.4.2: Position-velocity diagrams of $\text{c-C}_3\text{H}_2$ and SO observed toward L1527. Contours in the left panel represent the model simulation.

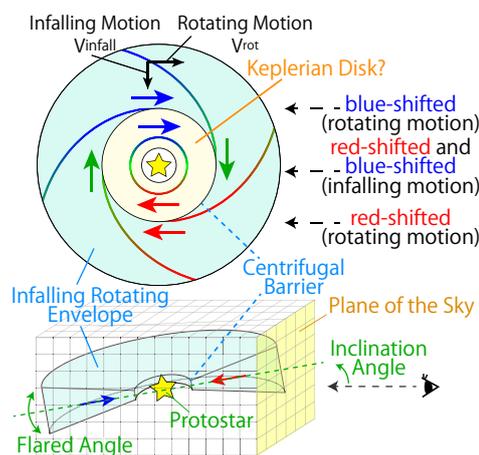


図 6.4.3: A model of an infalling rotating envelope

下と見積もられた。しかし、原始星の位置では H_2CO の高速度成分が確認されており、遠心力バリア内でケプラー回転するガス円盤の存在が示唆される。以上から、この天体は進化初期の低質量な段階にあるが、既に円盤構造を形成している可能性がある。

【TMC-1 における有機分子の起源】星間空間で検出される分子の中にはかなり複雑な飽和有機分子 (CH_3CHO , HCOOCH_3 , CH_3OCH_3 など) も含まれている。それらは、主に原始星近傍の温かい領域で検出され、星間塵上で生成したものが星形成に伴う温度上昇で蒸発してきたものと考えられている。しかし、近年の観測研究で、複雑な飽和有機分子は冷たい星なしコアの時代から既に存在していることが明らかになってきた。それらの生成過程を調べるため、化学組成がよく知られている星なしコアである TMC-1 について野辺山 45 m 望遠鏡などで観測を行った。こ

の天体では、気相反応によって生成する炭素鎖分子 C_3S と、星間塵上でのみ生成される CH_3OH のそれぞれのラインプロファイルが大きく異なる。このことを利用し、個々の分子のラインプロファイルを上記の2つのものと比較することで生成過程を調べた。その結果、分子種によって星間塵由来、気相反応由来、その両方に由来するものがあることがわかってきた。これまで気相における飽和有機分子の生成はあまり議論されてこなかったが、その寄与を再考する必要がある。

【 ^{13}C 同位体種の異常存在量比率】 米国国立電波天文台の望遠鏡 GBT を用いて、 C_3S 分子と C_4H 分子の ^{13}C 同位体種のスペクトル線を観測し、 $^{12}C/^{13}C$ 比率を求めた。その際、 $CC^{13}CS$ のスペクトル線の周波数は不明であったため、FTMW 分光計を用いて分光測定を行い、その回転遷移スペクトル線の周波数を調べた。おうし座分子雲 TMC-1 を観測したところ、3つ(あるいは4つ)の同位体種間で $^{12}C/^{13}C$ 比率が異なることが明らかになった。このことから、それぞれの分子が星間分子雲中で生成される反応において、分子中の3つ(あるいは4つ)の炭素が非等価であることを示し、その生成過程を絞り込むことができた。また、 $^{12}C/^{13}C$ 比率が通常知られている60より有意に高いこともわかった。他の様々な分子での $^{12}C/^{13}C$ 比率の値を比較することにより、CO 分子経路ではなく C^+ を起源として分子が生成されると比率が高くなることを示した。これにより、 $^{12}C/^{13}C$ 比の測定が分子の生成過程を調べる手段として非常に有効であることがわかった。

【重水素化分子の精密観測】 低温の星間分子雲において、重水素化分子の通常分子に対する存在比(重水素濃縮度)は分子雲の進化とともに高まるため、進化段階の指標として用いられている。太陽系近傍にある代表的な分子雲中で、重水素濃縮度を正確に求めておくことは、今後の分子雲研究の基礎となる。このような観点から、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、分子雲中で基本的な分子である HCN、HNC と、その重水素化合物 DCN、DNC の基本遷移の観測を行った。高い速度分解能で観測したことで、各スペクトル線の超微細構造を分解して観測することができた。この超微細構造を利用し各分子の励起温度を求めたところ、どの天体でも系統的に DNC の励起温度が他の分子よりも高いことがわかった。これを検証するため、Large Velocity Gradient 法による分子励起計算を行ったところ、上記の結果を説明するには DNC の空間分布が他の分子よりもコアの中心に集中している必要があることが示された。重水素濃縮度の正確な評価にはこのことを考慮する必要がある。

【星形成領域における重水素濃縮度】 原始星形成に伴う重水素濃縮度の変化を確立する目的で、低質量原始星形成領域 L1551 IRS5、IRAS16293-2422 に対して重水素濃縮度の分布を観測した。原始星形成に伴う温度上昇のため、原始星近傍では重水素濃縮度が減少する。イオン種と中性分子種では減少速度が違い、中性分子種の場合の減少のタイムスケールは 10^5 年程度と予想される。観測の結果、L1551 IRS5 に対しては DCO^+/HCO^+ 比がディスク方向で減少

していた。一方で、DNC/HNC 比も同様に減少していた。L1551 IRS5 の年齢は $(3-10) \times 10^4$ 年であるため、イオン種の重水素濃縮だけでなく、中性分子の重水素濃縮度も下がっていると考えられる。一方、L1551 IRS5 (Class I) よりも進化段階の若い原始星、IRAS16293-2422 (Class 0) に対しては、イオン種、中性分子ともに原始星方向での重水素濃縮の減少は見られなかった。これは、原始星周囲の低温のエンベロープの影響が卓越しているためであり、こ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重要と考えられる。

【大質量星形成領域 NGC 2264 ラインサーベイ】 NGC 2264 C 領域はオリオン星雲に次いで太陽系に近い大質量星形成領域である。その中で最も重い CMM3 は、最終的に $8M_{\odot}$ の主系列星に進化すると予測されており、力学年齢が 140-2000 年の分子流が付随する非常に若い段階の原始星である。これまで我々は CMM3 に対して ASTE 望遠鏡を用いて 330-366 GHz の分子輝線サーベイを実施し、典型的な Hot Core 天体である Orion KL とは違う化学組成を持つことを明らかにしてきた。2013 年度は、国立天文台野辺山 45 m 鏡を用いて、68.0-98.6 GHz 及び 104.4-110.6 GHz のサーベイを実施した(図4)。観測の結果、 DCO^+ 、DCN、DNC、 NH_2D などの重水素化合物に加え、 C_4H 、 HC_5N 、 C_3S などの炭素鎖分子の輝線を数多く検出した。炭素鎖分子は、分子雲中の化学進化の初期段階で豊富に存在する分子であるので、CMM3 が大質量星形成の初期段階にあることを化学組成の観点からも示す結果である。

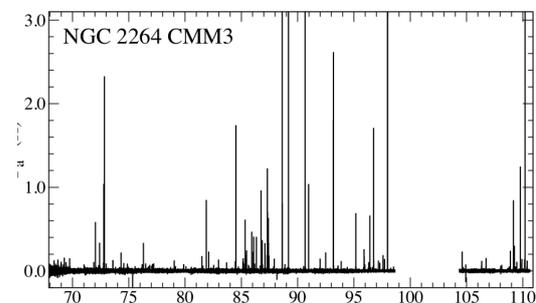


図 6.4.4: The 3 mm Band Spectrum of NGC2264

【超新星残骸 IC443 のラインサーベイ】 IC 443 はふたご座にある超新星残骸であり、太陽系から 1.5 kpc の距離にある。年齢は 3×10^4 年とである。本研究では超新星残骸の高密度クランプである GI 領域について、国立天文台 45 m 電波望遠鏡を用いて 78-116 GHz 帯でのスペクトル線サーベイを行った。その結果、14 種類の分子の 44 本のスペクトル線を検出した。CS、HCN、SO、SiO などの基本的分子の他に、この領域で初めて CH_3OH および HC_3N を検出した。 CH_3OH の強度は星形成に伴う分子流で生じた衝撃波領域 L1157B1 と比べて非常に弱く、また CH_3OH 以外の飽和有機分子も検出されなかった。このことは、衝撃波発生以前のこの領域の分子雲が比較的低密度の環境にあり、星間塵マントル上での飽

和有機分子生成があまり進行しなかったためと考えられる。

【HCL2 領域における OH 吸収線の解析】おうし座の分子雲 HCL2 に対して、Effelsberg 100 m 望遠鏡を用いて OH 分子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 50 K 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。HCL2 の東側の希薄な星間雲と HCL2 本体についてストリップスキャン観測で温度分布を調べたところ、いずれも雲の中心部分で温度が下がり、OH 分子の柱密度が上昇することがわかった。分子雲をとりまく希薄な星間雲の温度分布は、分子雲形成の理解につながる重要な知見であり、OH 分子の観測でその測定ができることを示したことは大きな意義がある。

6.4.3 系外銀河の化学組成

系外銀河における化学組成は主に活動銀河核や爆発的星形成領域をもつ中心核を観測対象として、中心核活動性と化学組成の関連がこれまで議論されてきた。ALMA 時代に突入した現在、系外銀河の円盤部分に存在する通常の分子雲においても様々な分子の検出が可能になりつつある。一方で、ALMA の空間分解能であっても、多くの系外銀河では数 pc を切る空間分解能で観測することは不可能である。1 pc 程度を超える系の化学組成を議論する場合、力学進化のタイムスケールに比べて化学進化のタイムスケールが短くなり、系内の分子雲コアで議論されてきた化学進化の概念は成立しない。そのため、活動銀河核などを伴わない通常の分子雲の大きなスケールで観測される化学組成の持つ意味と起源を再考することが、系外銀河における化学組成を議論する上で求められている。このような現状を踏まえ、本研究室では近傍の円盤銀河や大マゼラン雲に存在する中心核活動性の影響を受けていない分子雲に対して、10 pc-1 kpc スケールの化学組成の観測研究を推進している。

【NGC 3627 における化学組成】棒渦巻銀河である NGC 3627 のパーエンドに対して、野辺山 45m 鏡を用いて 3 mm 帯の 12 種の分子輝線 (CCH, HNC, HCN など) の観測を行った。観測したパーエンドは、渦状腕と比較して星形成効率が 5 倍高い領域であり、星形成活動が kpc スケールの分子ガス化学組成に及ぼす影響を探るのに適している。観測の結果、M51 の渦状腕と比較して CS や HCO⁺ が増加している一方で、M51 では比較的強い輝線強度で検出できた HNC は検出されなかった。このような化学組成の違いの原因として、活発な星形成に伴う様々なフィードバックの影響が考えられる。一方で、比較対象が NGC 3627 とは別の銀河であるため、重元素の組成

の違いを反映している可能性も否定できない。そこで、単一鏡及び干渉計を用いた NGC 3627 の渦状腕での観測を計画している。

【大マゼラン雲におけるラインサーベイ】大マゼラン雲 (Large Magellanic Cloud: LMC) は、太陽系の最も近く (48.5 kpc) にある系外銀河であり、重元素量が太陽系近傍の 1/2-1/3 程度であることが知られている。この LMC における分子雲を対象に、我々は 2013 年 6 月から 10 月にかけて、Mopra 22 m 望遠鏡を用いて 85-116 GHz のラインサーベイを行った。観測対象には、赤外線衛星「あかり」のサーベイ結果をもとに、大質量星形成領域が付随している分子雲と付随していない分子雲の中から HCO⁺, HCN の強度が最も強い天体である ST2 と CO Peak 1 をそれぞれ選んだ。さらに HII 領域まとった活発な大質量星形成領域 N113 を比較のために観測した。雑音温度が 8mK 程度の高感度観測を行い、3 つの天体において、CO, ¹³CO CS, HCO⁺, SO, HCN, HNC の 7 本の輝線、星形成を伴う ST2 ではさらに、CCH, c-C₃H₂, N₂H⁺ の 3 本の輝線を検出した (図 5)。これらの輝線強度の比を見ると、3 つの天体は星形成活動の規模が異なるにもかかわらず、巨大分子雲サイズ (10 pc) のスケールでは同じ化学組成に見えることがわかった。即ち、このスケールの化学組成には個々の星形成活動の影響は顕著に現れていない。また、3 天体を詳しく比較すると、星形成活動のない CO Peak 1 で CS, SO などの硫黄を含む分子の存在比が、他と比べてやや高い特徴が見られた。その原因としては重元素量の少なさから紫外線放射の影響の可能性と、領域ごとに硫黄の depletion の程度が異なっている可能性が考えられる。

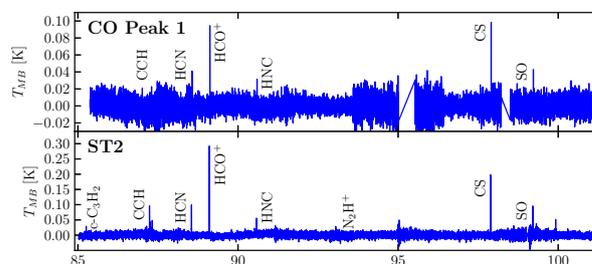


図 6.4.5: Spectral line survey of two molecular clouds in LMC

6.4.4 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 (ヘテロダインミキサ) の開発が不可欠である。サブミリ波帯においては、SIS ミキ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發揮している。しかし、750 GHz 以上の周波数では、超伝導キャップ間の吸

取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・ポロメータ (HEB) ミキサ素子の開発を行っている。HEB ミキ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 ミキサ素子の開発研究を進めている。

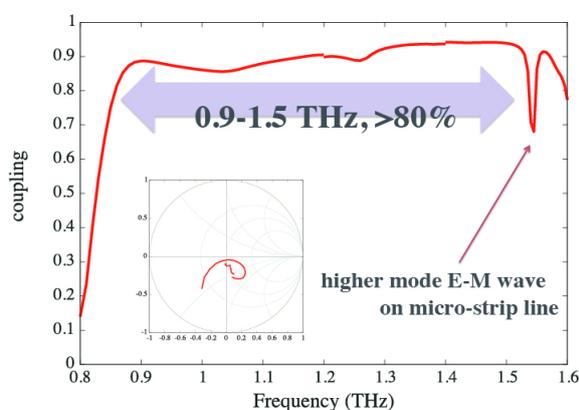


図 6.4.6: Coupling efficiency of the wide-band waveguide-type HEB mixer

【ワイドバンド導波管ミキサの設計】我々のグループで作成、開発を進めている THz 帯の電波受信機は、望遠鏡への試験搭載・観測を行う段階まで来ている。今後の更なる性能向上として、受信周波数帯域を大幅に広げた新型受信機の開発を進めている。現在の受信機は、ターゲットとしている 0.9 THz、1.3-1.5 THz の観測帯域に対し別々の受信素子を使っている。この周波数帯を単一受信素子でカバーする受信機を開発し、最終的に ASTE に搭載ことを目標としている。本年度、設計した導波管回路、評価光学系をもとに HEB 素子の評価系を構築した。今後、この評価系を用いて素子の作成、性能評価を行っていく予定である。このような設計の受信機を作成・運用することにより、効率よく天体を観測することが可能になる。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。

【2013 年度の ASTE 望遠鏡への搭載実験】我々のグループでは、自作した超伝導ホットエレクトロンポロメータ (HEB) を用いたカートリッジ型 THz 帯受信機を作成し、2011 年度より ASTE 望遠鏡へ搭載・観測実験を行っている。これまでに、0.9 THz 帯における月・木星からの連続波と分子雲からの CO(8-7) の輝線の受信に成功している。今年度は科学観測を

目指し、ASTE 望遠鏡への受信機搭載実験を行った。本年度の実験では、受信機立ち上げの際にいくつかのトラブルが発生した。最終的に、デュワー外部から準光学的に入射している基準周波数信号 (LO) の強度が十分に入らず、観測に至ることができなかった。前年度以前にはこの問題は生じておらず、本年度の実験において LO 信号を導入するための光学系の調整になんらかの問題があった可能性が高い。この問題の解決のためには、LO 信号をデュワー側壁窓から導入するのではなく、他の低い周波数向けの受信機と同様にデュワー内部の冷却ステージに設置した周波数通倍器から導入する方法が有効である。これにより、これまでのような受信機搭載後の光学系調整が不要となるため確実に動作させることができる。上記のような手法へと変更するため、受信機カートリッジの改造を行った上で、ASTE 望遠鏡への搭載実験に挑戦する予定である。

【冷却中間周波増幅器の製作】HEB ミキサでダウンコンバートした中間周波を低雑音で増幅することは、受信機雑音の低減のために重要である。これまで市販の冷却増幅器を用いてきたが、バンド幅が低周波側に伸びていないこと、入力インピーダンスが 50 Ω に規格化されているので、HEB ミキサとのマッチングのためにアイソレータが必要であるなどの問題があった。そこで、中間周波増幅器を HEB ミキサに最適化して設計できるよう、冷却増幅器の開発を国立天文台の鶴澤佳徳准教授と小嶋崇文助教との共同研究で進めている。本年度は、SiGe を用いた Heterojunction Bipolar Transistor による増幅器の設計製作と冷却実験を行い、初期性能として満足できる結果を得た。

【準光学型 THz 帯 HEB ミキサの開発】超伝導 HEB 細線を形成する際に誘導性結合プラズマエッチングの前工程として酸素クリーニングを導入することで、エッチング時の再付着などを軽減し、超伝導転移を示す素子の歩留りを著しく向上させた。また、超伝導 HEB 細線の電流-電圧特性のモデル化を行い、抵抗-温度特性とセルフコンシステントに解くことで、電流-電圧特性の複雑な変化を再現させた。これにより、中間周波出力の利得-電圧依存の多様なパターン/利得性能を再現することが可能になると期待される。さらに、開いた空間での無限遠の放射を計算するのに適した、仮想境界/近似を用いない有限境界要素法を導入して、準光学ツインスロットアンテナのシミュレーションを実施し、受光感度を約 25 % 改善する設計改良を行った。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>

- [1] 山本智、日本天文学会林忠四朗賞、日本天文学会、2014 年 3 月 20 日。

<報文>

(原著論文)

- [2] Sakai, N., Takano, S., Sakai, T., Shiba, S., Sumiyoshi, Y., Endo, Y. & Yamamoto, S. “Anomalous ^{13}C Isotope Abundances in C_3S and C_4H Observed toward the Cold Interstellar Cloud, Taurus Molecular Cloud-1”, *J. Phys. Chem. A*, 117, 9831 (2013)

- [3] Sakai, N. & Yamamoto, S. “Warm Carbon-Chain Chemistry”, *Chem. Rev.*, 113, 8981 (2013).
- [4] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Kahane, C., Bottinelli, S., Caux, E., Demyk, K., Vastel, C., Coutens, A., Taquet, V., Ohashi, N., Takakuwa, S., Yen, H.-W., Aikawa, Y., & Yamamoto, S. “Change in the Chemical Composition of Infalling Gas Forming a Disk around a Protostar”, *Nature*, 507, 78 (2014).
- [5] Sakai, T., Sakai, N., Foster, J. B., Sanhueza, P., Jackson, J. M., Kassis, M., Furuya, K., Aikawa, Y., Hirota, T., & Yamamoto, S. “ALMA Observations of the IRDC Clump G34.43+00.24 MM3: Hot Core and Molecular Outflows”, *ApJ*, 775, L31 (2013).
- [6] Jorgensen, J. K., Visser, R., Sakai, N., Bergin, E., Brinch, C., Harsono, D., Lindberg, J. E., van Dishoeck, E. F., Yamamoto, S., Bisschop, S., & Persson, M. V. “A Recent Accretion Burst in the Low-mass Protostar IRAS 15398-3359: ALMA Imaging of Its Related Chemistry”, *ApJ*, 779, L22 (2013).
- [7] Fontani, F., Sakai, T., Furuya, K., Sakai, N., Aikawa, Y., & Yamamoto, S. “DNC/HNC and N_2D^+/N_2H^+ Ratios in High-Mass Star-Forming Cores”, *MNRAS*, 440, 448 (2014).
- [8] Watanabe, Y., Sakai, N., Sorai, K., Yamamoto, S., “Spectral Line Survey toward Spiral Arm of M51 in the 3 mm and 2 mm Bands”, *ApJ*, in press.

(国内雑誌)

- [9] 坂井 南美, 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, 日本天文学会 天文月報, Vol. 106, No. 2, 2013.

(学位論文)

- [10] 山口貴弘, “Classification of Shock Chemistry by Pre-shocked Conditions” (博士論文)
- [11] 猪熊宏士, 「暗黒星雲における OH 吸収線の発見とその物理的意味」 (修士論文)
- [12] 西村優里, 「重水素濃縮に注目した星間分子雲の物質進化の探求」 (修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [13] Sakai, N. “Astrochemistry in Star/Planet Forming Regions”, ALMA Development Workshop, NAOJ, Mitaka, Tokyo, Japan, Jul. 7-8, 2013.
- [14] Sakai, N. “New carbon-chain chemistry found in solar-type star-forming regions”, 247th American Chemical Society National Meeting 2014, Dallas Convention Center, Dallas, US, Mar. 16-21, 2014.

(国内会議)

一般講演

【天文学会 2013 年秋季年会、東北大学、2013 年 9 月 10 - 12 日】

- [15] 柴田大輝, 坂井南美, 渡邊祥正, 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」、P116a
- [16] 大屋瑠子, 坂井南美, 渡邊祥正, 山本智, 酒井剛, 廣田朋也, Lindberg, J., Bisschop, S., Jorgensen, J.K., van Dishoeck, E.F., 「ALMA によるおおかみ座 Class 0 原始星 IRAS 15398-3359 の観測」、P126c
- [17] 山口貴弘, 高野秀路, 坂井南美, 渡邊祥正, 山本智, 「超新星残骸 IC443 の衝撃波化学」、Q04a
【天文学会 2014 年春季年会、国際基督教大学、2014 年 3 月 19 - 22 日】
- [18] Sakai, N., Sakai, T., Oya, Y., Yamamoto, S.(Univ. Tokyo), Hirota, T., Ohashi, N. (NAOJ), Takakuwa, S., Yen, H-W. (ASIAA), Aikawa, Y. (Kobe Univ.), Ceccarelli, C. (IPAG), and IPAG group members(France), 「A Drastic Chemical Change in Protostellar-Disk Formation: IRAS 04368+2557 in L1527」、B07a
- [19] 大屋瑠子, 坂井南美, 渡邊祥正, 山本智, 酒井剛, 廣田朋也, Lindberg, J., Bisschop, S., Jorgensen, J.K., van Dishoeck, E.F., 「ALMA によるおおかみ座 Class 0 原始星 IRAS 15398-3359 の観測」、P111a
- [20] 渡邊祥正, 古屋隆太, 坂井南美, 山本智, 酒井剛, 「若い大質量原始星 NGC 2264 CMM3 における 0.8 mm 帯分子輝線サーベイ」、P131a
- [21] 相馬達也, 坂井南美, 渡邊祥正, 山本智, 「Non-thermal Desorption in the Cold Molecular Cloud: TMC-1」、P132a
- [22] 下西隆, 西村優里, 渡邊祥正, 坂井南美, 相川祐理, 河村晶子, 山本智, 「大マゼラン雲の分子雲に対する 3 mm 帯スペクトルラインサーベイ 1. 高密度ガス探査」、Q14a
- [23] 西村優里, 下西隆, 渡邊祥正, 坂井南美, 相川祐理, 河村晶子, 山本智, 「大マゼラン雲の分子雲に対する 3 mm 帯スペクトルラインサーベイ 2. 高感度観測」、Q15a
- [24] 猪熊宏士, 坂井南美, 前澤裕之, Karl Menten, 山本智, 「OH 基底状態遷移の吸収線の発見と統計平衡計算による解析」、Q18a

招待講演

- [25] 坂井 南美, 「A Drastic Chemical Change in Protostellar Disk Formation」、原始惑星系円盤研究会、国立天文台、2013 年 8 月 19-22 日
- [26] Satoshi Yamamoto, 「Astrochemistry with ALMA」、日本天文学会 2014 年春季年会、国際基督教大学、2014 年 3 月 20 日、B05r

公開講演

- [27] 坂井 南美, 「電波観測で探る星の誕生 - 太陽系の奇跡-」、東京大学理学部公開講演会、東京大学、2013 年 4 月 20 日
- [28] 坂井 南美, 「分子の誕生と星間物質」、日本物理学会 科学セミナー、東京大学、2013 年 8 月 22-23 日

6.5 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次元制御と呼び、三つとも制御することを3次元制御と呼ぶ。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。

6.5.1 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、 I_2 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次元および3次元の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、レーザー強度に追従して高くなり、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、 C_6H_5I 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 C_6H_5I 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束器 (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 (C_6H_5I) 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。さらに、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次元配向制御に世界で初めて成功した。プラズマシャ

ターで整形したナノ秒パルスの立下りは、約 150 fs であった。分子が配列・配向している様子は、フェムト秒プローブパルスで生成された多価イオンからクーロン爆裂で生成されたフラグメントイオンを 2 次元イオン画像化法で観測した。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、5–10 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、検出器面の側面に観測されるものの割合 $N_{\text{up}}/N_{\text{total}}$ を配向度の指標とした場合には、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。配列度 $\langle \cos^2 \theta_{2D} \rangle$ の dephasing 時間と総合すると実質的に高い配向度が維持できるのは 5–10 ps と考えるのが妥当である。この 5–10 ps という時間スケールは、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。

本年度は、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の 3 次元配向制御の実現に世界で初めて成功した。実験試料として分子偏向器で初期回転量子状態を選別した 3,4-ジプロモチオフェン分子 ($\text{C}_4\text{H}_2\text{Br}_2\text{S}$) を用いた。楕円偏光を用いると Br^+ フラグメントの角度分布が楕円偏光面によく沿う様子を観測でき、フラグメントイオンの上下の非対称性と併せて 3 次元配向が実現している様子を確認することができた。先の 3 次元配向制御の原理実証実験のときに、2 次元イオン画像の観測により 3 次元配列の確認をし、TOF スペクトルの forward イオンと backward イオンの非対称性の観測により分子が配向していることを確認し、両者の組み合わせにより 3 次元配向の証拠としたのに対し、今回は配向度が十分高いため、2 次元イオン画像だけで 3 次元配向制御の様子を直接的に観測することができた。この 3 次元配向制御の直接的観測自体も世界初の成果である。さらに、プラズマシャッター技術でナノ秒パルスを急峻に遮断すると、1 次元配向制御に用いたヨードベンゼン分子のときの dephasing ダイナミクスよりは若干速いものの、 ~ 5 ps 程度は十分高い配向度を維持できることを確認した。また、ナノ秒パルス内で、プラズマシャッターを掛けるタイミングを変えると、パルスの遮断後の dephasing ダイナミクスが異なることを確認することができた。特にナノ秒パルスのピーク強度の前後の瞬時強度がほぼ等しいタイミングでパルスを遮断した後の dephasing ダイナミクスが異なることは、1 次元配向制御に用いたヨードベンゼン分子のときと同様に、3,4-ジプロモチオフェン分子に対しても、ナノ秒パルスの立ち上がり時間 6 ns が分子とレーザー電場の純粋に断熱的な相互作用を保証するほど十分に長くはないことを示唆している。

年度の後半には、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験を推進した。2 波長レーザー電場を用いた全光学的な配向制御の実験は、静電場とレーザー電

場を併用する手法と比べると、光学系の構成は複雑となる。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) を使用するが、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構成で、第 2 高調波の出力を高めるための光学系の調整と 2 波長レーザーパルスとプローブパルスの空間的重なりをよくするための調整を地道に行った結果、当初の目標であった配向度 $\langle \cos \theta \rangle > 0.1$ を達成できる目処をつけることに成功した。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 次元配向制御が可能である。さらに、2 波長レーザーパルスにプラズマシャッター技術を適用すれば、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が可能となる。

6.5.2 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。本研究室では、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 $\tau \sim 25$ 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と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、 N_2 分子の最高被占分子軌道 (Highest Occupied Molecular Orbital: HOMO) が σ_g の対称性をもつのに対し、 CO_2 分子のそれが π_g 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))。

その後、CEP の制御されたパルス幅 10 fs 程度以下の数サイクルパルスを用いた実験を行うために、真空チャ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。数サイクルパルスは、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。高調波発生用の数サイクル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。

昨年度までに、非断熱的に配列した N_2 分子や CO_2 分子を試料とし、CEP を制御した 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。今年度、高調波スペクトルをフーリエ解析して考察した結果、観測された干渉縞は、高次高調波発生用のプローブパルス中で時間差 $\Delta T = T/2, T, 3T/2$ (T はプローブ光の 1 周期) だけ離れたアト秒パルス間の干渉によるものであることが明らかになった。また、時間差 $\Delta T = T/2$ で干渉して発生する高調波の位相は CEP に依存しないのに対し、時間差 $\Delta T = T$ 、及び $3T/2$ で干渉して発生する高調波の位相は CEP の変化に対し、slope 2 の依存性をもつことが分かった。高調波チャープ (harmonic chirp) の効果を取り入れたモデルによる考察の結果、上記の CEP (非) 依存性を示すためのチャープ係数 b に対する条件として $b > 0.6 \text{ fs}^{-2}$ を決めることもできた。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 (あるいはランダム配向のとき) 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には、本実験で使用した数サイクルパルスの様に、搬送波の強度変化が急な場合に重要となりうる continuum evolution phase に加え、HOMO-1 の様な励起状態が高調波発生に寄与する場合には、電子波束がレーザー電場中で駆動される間の親イオンの電子状態の時間発展に関連する位相やイオン化の際の位相 (ionization phase) が寄与していることを考察した。

6.5.3 原子、及び配列した N_2 分子から発生する高次高調波の隣り合う次数間の位相差の観測

昨年度、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。開発した装置では、高調波の位相スペクトルの観測に関し

て、より豊富な情報が得られる 2 次元光電子画像化法を採用した。

今年度、Ar、Kr、及び配列した N_2 分子から発生する高次高調波の隣り合う次数間の位相差の観測を行った。今回は、原子や分子のクーロン電場の影響を強く受けるため、原子軌道や分子軌道の情報を得る観点から近年注目されている媒質のイオン化ポテンシャル近傍のエネルギー領域、いわゆる near-threshold 領域の高調波に着目して実験を行った。観測した範囲では、隣り合う次数間の位相差は、Kr 中から発生する高調波のそれの方が、Ar や配列した N_2 分子中から発生する高調波のそれよりも大きいこと、Ar と配列した N_2 分子中から発生する高調波については、サイドバンド次数 12 の位相差は N_2 分子中から発生する高調波の位相差が Ar 中から発生する高調波のそれよりも有意に大きいことが明らかになった。クーロンポテンシャルの性質の差が表れている可能性があり、理論モデルを用いた考察を進めている。

6.5.4 配列した分子中から発生する高次高調波の偏光特性

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 N_2 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、 N_2 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 CO_2 分子を試料とした場合、再結合過程における電子のド・ブroy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roy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 $S(\omega)$ 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 $S(\omega)$ 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で、必要な情報を得ることができると考えられる。

特に、分子から発生する高次高調波の楕円率依存性は、最外殻軌道の形状や対称性の影響を強く受けることが知られている (T. Kanai *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 053002 (2007))。しかし、これまで高次高調波スペクトルの楕円率依存性を系統的に調べた例はない。分子軌道に関する詳細な情報を得るためには、多くの次数について系統的に調べることが重要である。そこで今年度は、配列した N_2 、 O_2 、 CO_2 分子について高次高調波の楕円率依存性をイオン化ポテンシャル近傍の 9 次高調波からカットオフ近傍まで系統的に観測した。

分子を配列させるため、Ti:sapphire レーザーパルス (中心波長 ~ 800 nm、パルス幅 ~ 50 fs) の一部を pump 光として試料分子に照射し、一定の遅延時間後、分子が配列した状態で probe 光 (ピーク強度 $\sim 2.5 \times 10^{14}$ W/cm²) を照射して高次高調波を発生させた。ここで、 $\lambda/2$ 波長板と $\lambda/4$ 波長板の組み合わせにより probe 光の楕円率を制御した。また、 $\lambda/2$ 波長板により pump 光の偏光方向を変え、配列した分子の分子軸と楕円偏光した probe 光の長軸が平行または垂直になるようにした。発生した高次高調波スペクトルは、斜入射型真空紫外分光器と電子増倍管により観測した。

高次高調波の強度は、基本波の楕円率が大きくなるにしたがって、一般に単調に減少する。これは、高次高調波の発生メカニズムを説明する 3 ステップモデルに基づいて考えると、楕円率を大きくするほどレーザー電場中で電子波束の重心が横方向にずれ、再衝突する際に親イオンとの重なりが小さくなるためである。また、楕円率が同じであれば、高次の高調波ほどレーザー電場中で駆動される電子波束の重心のずれが大きくなるため、一般に楕円率依存性がより急激になる傾向がある。実際、希ガス (Kr) や N_2 分子 (最高被占軌道 HOMO の対称性が σ_g) を試料として測定すると、次数が高くなるにつれて楕円率依存性が急になる様子が観測された。また、 N_2 分子では、分子軸と楕円偏光した基本波の長軸が平行

な時の方が、垂直な時よりも楕円率依存性がより急であった。これは、窒素分子の HOMO の形状を反映した結果であると考えられる。

それに対し、HOMO の対称性が π_g である O_2 分子や CO_2 分子では、3 ステップモデルから直観的には予測できない楕円率依存性が観測された。一つは、イオン化ポテンシャル近傍の次数 (9 次および 11 次) において、楕円率を大きくしても高調波強度は単調には減少せず、特定の楕円率で極大を示した後に緩やかに減少することである。もう一つは、プラトーからカットオフ近傍の領域において、次数が高くなっても楕円率依存性が殆ど変化せず、ほぼ一定となることである。特に CO_2 分子では、分子軸と楕円偏光の長軸が平行な時の方が垂直な時よりも楕円率依存性が緩やかであり、3 ステップモデルから直観的に予測される結果と逆になっている。このような楕円率依存性は、電子波束の破壊的干渉効果と関連していると考えており、詳細なメカニズムを解明するために、probe 光の強度の効果、試料の圧力効果、及び、probe 光の集光条件の影響を受ける位相整合効果などを総合的に調べている。

6.5.5 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

昨年度まで調べてき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、昨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を進めている。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。

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、スペクトルに現れる干渉信号から信号光の位相を抽出する方法である。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。

本年度は、前年度までに開発した干渉計をさらに安定化させた。その結果、数分で $\pi/2$ 程度あった位相ドリフトを、30分の観測でも $\pi/5$ 以下に抑制することに成功した。また、短時間の安定度も向上させ、1分当たりの位相ゆらぎは $\pi/20$ 以下を達成した。

開発した干渉計を評価するために、直線偏光した基本波を用い、配列したCO₂分子から発生する第3高調波の偏光状態を観測した。位相整合の様子が異なると考えられる2つの圧力条件で測定したところ、試料ガスの圧力が低い(20 kPa)時にはパルス全体に渡って0.1以下の小さな楕円率であるのに対して、圧力が高い(80 kPa)時にはメインパルスにおいて0.3程度の比較的大きな楕円率を持つことがわかった。このことは、基本波の偏光に垂直な方向の偏光成分は位相整合の効果で現れていることを示唆している。今後、基本波の偏光の楕円率を変えながら第3高調波の(時間に依存する)偏光状態を調べ、第3高調波の発生メカニズムを明らかにしていく予定である。

6.5.6 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土屋竣君、林佑樹君(夏学期)、及び、小森健太郎君、羅恒宇君(冬学期)の活躍によるものである。このうち、小森健太郎君は、特別実験IIで取り組んだ研究課題「配列したCO₂分子中から発生する高次高調波の楕円率依存性」での活躍などが高く評価され平成25年度の理学部学修奨励賞を受賞した。おめでとう。

なお、今年度の研究活動のうち項目6.5.1-6.5.4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6.5.5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エネルギー化」(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。

<受賞>

- [1] 小森健太郎、理学部学修奨励賞(学部)、2014年3月。

<報文>

(原著論文)

- [2] Je Hoi Mun, Daisuke Takei, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Laser-field-free orientation of

state-selected asymmetric top molecules," to appear in Physical Review A as a Rapid Communication (2014).

- [3] Yusuke Sakemi, Shinichirou Minemoto, Kosaku Kato, and Hirofumi Sakai, "High-order harmonics generation from aligned molecules with carrier-envelope-phase-stabilized 10-fs pulses," submitted to Physical Review A.

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [4] Hirofumi Sakai, "Laser-field-free alignment and orientation of state-selected asymmetric top molecules," 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 1st, 2013.
- [5] Hirofumi Sakai, "(tentative) Laser-field-free three-dimensional molecular orientation," to be presented at Stereodynamics 2014, St. Petersburg, Russia, August, 2014.
- [6] 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.
- [7] Yusuke Sakemi, "High-order harmonic generation from aligned molecules with carrier-envelope-phase-stabilized femtosecond pulses," 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, 2nd, 2013.
- [8] Je Hoi Mun, "Laser-field-free orientation of asymmetric top molecules," The First ALPS (Advanced Leading Graduate Course for Photon Science) Symposium on Photon Science, Tokyo, Japan, December 26th, 2013.

一般講演

- [9] Yusuke Sakemi, Shinichirou Minemoto, Kosaku Kato, and Hirofumi Sakai, "High-order harmonics generated from aligned molecules with carrier-envelope-phase-stabilized 10-fs pulses," 4th International Conference on Attosecond Physics (ATTO2013), Paris, France, July 8th, 2013.
- [10] Shinichirou Minemoto, Kentaro Komori, Kou Ra, and Hirofumi Sakai, "Ellipticity dependence of high-order harmonics generated from aligned CO₂ molecules," High-Intensity Lasers and High-Field Phenomena (HILAS), Berlin, Germany, March 19th, 2014.

- [11] Kosaku Kato, Shinichirou Minemoto, Yusuke Sakemi, and Hirofumi Sakai, "Observation of phase difference of near-threshold high-order harmonics generated in nitrogen molecules," to be presented at The Forefront of Ultrafast Spectroscopy, Saitama, Japan, May, 2014.
- (国内会議)
- 一般講演
- [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気体分子のレーザー電場のない状況下での3次元配向制御」、2013年第74回応用物理学会秋季学術講演会、同志社大学京田辺キャンパス、2013年9月19日.
- [13] 中川桂、峰本紳一郎、酒井広文、「配列した分子から発生する高次高調波強度の楕円率依存性」、2013年第74回応用物理学会秋季学術講演会、同志社大学京田辺キャンパス、2013年9月19日.
- [14] 加藤康作、峰本紳一郎、酒見悠介、酒井広文、「高次高調波の位相測定装置の開発」、2013年第74回応用物理学会秋季学術講演会、同志社大学京田辺キャンパス、2013年9月19日.
- [15] 加藤康作、峰本紳一郎、酒見悠介、酒井広文、「二光子イオン化を用いた高次高調波の位相測定」、レーザー学会創立40周年記念学術講演会第34回年次大会、北九州国際会議場、2014年1月20日.
- [16] 峰本紳一郎、中川桂、酒井広文、「配列した分子から発生する高次高調波の楕円率依存性に対するレーザー強度の効果」、レーザー学会創立40周年記念学術講演会第34回年次大会、北九州国際会議場、2014年1月20日.
- [17] 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における3次元配向制御」、レーザー学会創立40周年記念学術講演会第34回年次大会、北九州国際会議場、2014年1月21日.
- [18] 峰本紳一郎、酒井広文、「配列した分子から発生する第三高調波の時間依存偏光特性」、レーザー学会創立40周年記念学術講演会第34回年次大会、北九州国際会議場、2014年1月22日.
- [19] 羅恒宇、小森健太郎、峰本紳一郎、酒井広文、「配列したCO₂分子中から発生する高次高調波の楕円率依存性」、2014年(平成26年)第61回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学相模原キャンパス、2014年3月17日.
- [20] 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3次元配向制御」、2014年(平成26年)第61回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学相模原キャンパス、2014年3月17日.
- [21] 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完全にフィールドフリーな状況下での配向制御」、2014年(平成26年)第61回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学相模原キャンパス、2014年3月17日.
- セミナー
- [22] Hirofumi Sakai, "Laser-field-free alignment and orientation of state-selected asymmetric top molecules," Center for Free Electron Laser Science (CFEL), Hamburg, Germany, September 24th, 2013.
- [23] Hirofumi Sakai, "Laser-field-free alignment and orientation of state-selected asymmetric top molecules," University of Aarhus, Aarhus, Denmark, September 26th, 2013.

6.6 五神研究室

本研究室では、光と物質の物理学の新たな側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、BEC の直接的観測法を開発した。また、微細加工技術を駆使して物質系の対称性を制御し、新たな光をコントロールする手法を開拓している。具体的には、キラ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。また、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、高効率高分解能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整備」プログラムののもとで、理化学研究所との共同で高輝度高繰り返し型の新型コヒーレント光源（“フォトンリング”施設）の開発に取り組んだ。本年度に進めた研究を以下に紹介する。

6.6.1 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束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 (Cu_2O) 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 (10^{17} 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、 10^{16} 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 転移に必要な 10^9 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。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 [8]。この超低温の領域においてのみ、励起子発光強度の特徴的な励起パワー依存性が発見され、発光の過程における運動量保存則により凝縮体からの発光は禁制となることとの関係を慎重に調べている。また、凝縮体そのものを直接観測するために、1s-2p 遷移に伴う誘導吸収スペクトル測定法を用いてトラップした励起子の誘導吸収イメージを 2.3 K において捉えることに成功した [61] (図 6.6.1)。現在、これを 100mK の極低温領域で実現する実験系の構築を進めている。

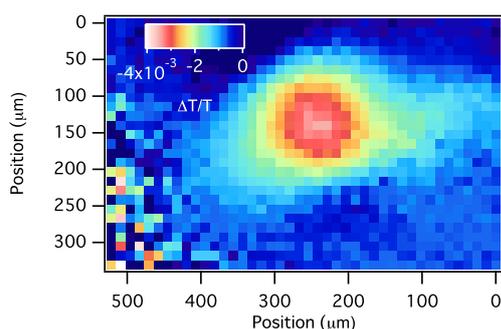


図 6.6.1: 4.3 K においてトラップされた亜酸化銅 $1s$ 励起子の、 $1s-2p$ 遷移を用いた誘導吸収イメージ。[61]

極低温原子気体を用いた強相関多体系の研究

極低温フェルミ原子気体系が有する普遍性を利用し、中性子星や中性子過剰原子核中の低密度中性子物質の状態方程式 (EOS) の決定、金属超伝導やヘリウム超流動で見られる二流体現象の観測、高温超電導体で議論になっている擬ギャップ相の探索を目指している。いずれの研究もフェルミ粒子系が超流動転移以下の極低温な領域に達する必要がある。我々はレーザー冷却されたリチウム原子を、200W の高強度レーザーで直接捕獲する実験手法に挑戦してきている。熱レンズ効果等の技術的な問題解決が進み、冷却原子を磁気光学トラップから光トラップへ5%の効率で移行できるようになった。これは先行研究の5倍の高い効率である。この実験手法を用いる事によりフェルミ超流動実現への実験手順が簡素化され、研究の加速が期待される。光トラップ中での蒸発冷却後、 10^5 個のフェルミ原子が $T/T_F=0.05$ 程度まで冷却され、フェルミ対の重心運動量を確認する事により超流動転移が確認された [64]。得られた相互作用しているフェルミ超流動の物性を定量的に評価する為、高い S/N と $1\ \mu\text{m}$ の空間分解能で撮像できるシステムを構築した。また撮像条件や CCD カメラの仕様を取り入れた高精度な原子数評価も行った [51]。さらに相互作用しているフェルミ粒子系の温度を決定する為、温度計として用いる原子の導入を行った。BCS 極限においてフェルミ粒子系と温度計原子の温度を比較し、測定誤差の範囲で同じ温度を示すことが確認された [52]。今後 BCS-BEC クロスオーバー全域で EOS の測定を行い、中性子物質の EOS を構築する。また本装置を用い、局所的な加熱による二流体現象の探索、相関長測定による臨界現象の探索、スピン揺らぎ観測による擬ギャップ相の探索、相互作用の高速変化によるヒッグスモードの探索、強い閉じ込めによる原子核シェルモデルの再現現象等を狙っていく [45]。

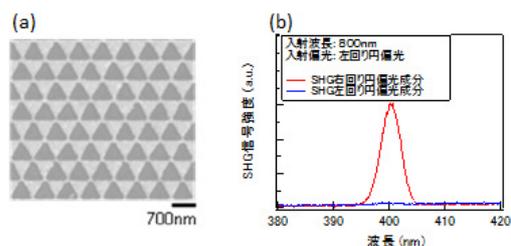


図 6.6.2: (a) 三回回転対称金属周期構造の電子顕微鏡画像 (b) SHG スペクトルの円偏光依存性

6.6.2 非自明な光学現象の探索とその応用

三回回転対称性を有する金属ナノ周期構造からの円偏光第二次高調波発生

非線形光学応答の発現の可否と構造の対称性は密接な関係を有している。特定の対称性を持つナノ構造を金属薄膜に作製することで、通常金属薄膜では生じ得ない非線形光学効果が生じることが明らかになり、“非線形メタマテリアル”として注目されている。第二次高調波発生 (SHG) を生じさせるためには反転対称性の有無が重要となるが、さらに偏光を制御するためには、構造の回転対称性が重要である。結晶からの SHG において三回回転対称性が果たす役割については、Bloembergen らが角運動量保存則に基づいた議論を行っているが、同様の円偏光選択則が人工構造において成り立つかどうかは明らかになっていなかった。今回我々は、三回回転対称性を有する金属薄膜周期構造において、円偏光励起によって、円偏光のヘリシティが変換された SHG が生じることを実証した [14]。

試料は、サファイア基板の厚さ 50nm の金薄膜に対し、収束イオンビームを用いて三角孔を周期的に作製したものを用いた (図 6.6.2(a))。基板垂直方向より左回り円偏光の励起光 (波長 800nm) を入射し、基板裏面から垂直方向に放射される SHG の左右円偏光成分を測定した。この結果、三回回転対称構造の効果によって、励起光の円偏光と逆のヘリシティの円偏光 SHG が観測されることが明らかになった (図 6.6.2(b))。この結果は、これまでに結晶で知られていた SHG における偏光選択則と回転対称性との関係が、人工ナノ周期構造でも成立することを意味しており、非線形メタマテリアルの新たな設計指針を与えるものであると考えられる [43]。

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

時空間パルス波形整形技術を用いた、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」を活用し、物質中の分極や磁化の振動の向きを自在に制御することに取り組んでいる。これを用いて、任

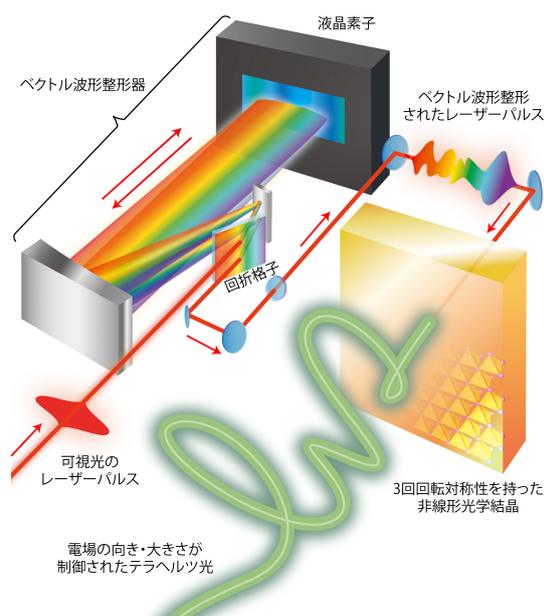


図 6.6.3: ねじれ偏光パルス励起によるベクトル任意波形テラヘルツ発生実験の模式図

意のテラヘルツ (THz) 波形整形を可能にする手法を開発した。ねじれ偏光パルスの場合、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とができる。我々は、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 波発生を可能にするねじれパルスの設計手法を確立した。さらに、実際にこれらのベクトル任意波形 THz 発生が可能であることを実験で示すことに成功した(図 6.6.3)[9]。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 波の光源としても画期的なものであると言える。

また、THz 波の偏光を実空間で自在に制御する手法の開拓も進めている。ビーム内で軸対称な偏光分布を持つシリンダカルベクトルビームを THz 領域で広帯域に実現する手法を開発し、THz 導波路として理想的な特性を示す金属ワイヤーに高い効率で結合できることを実証した [15]。さらに、高強度 THz パルス発生法と、独自に開発した広帯域 THz 波長板を用いることによって、ビームの集光点において 20kV/cm を超える THz 縦電場を発生させることに成功した [17]。

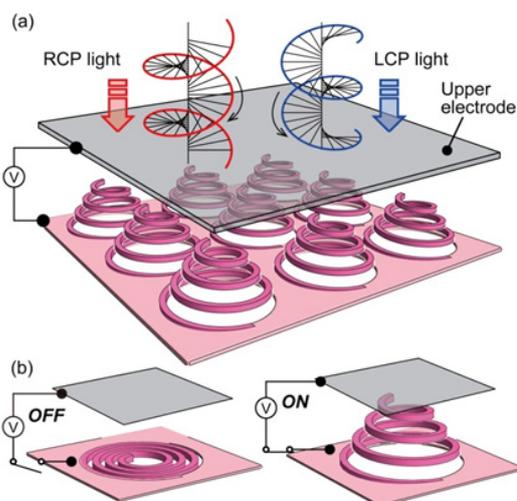


図 6.6.4: MEMS スパイラル人工構造 (a) と電圧印加による構造変化 (b) の模式図 [5]

スパイラル人工構造を用いたテラヘルツ旋光性の動的制御

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った。我々は、Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 技術を用いて、電圧印加によって縦方向の変位量を制御できるスパイラル構造を作製した(図 6.6.4(a))。この構造は、電圧を印加しない場合はアキラルな構造であるが、電圧印加によって構造にキラリティが生じ、その大きさを電圧の印加量で制御できるという特徴を有する(図 6.6.4(b))。この構造に対して、テラヘルツ時間分解分光法を用いて透過テラヘルツ波の偏光状態を計測することにより、電圧印加によって構造の三次元キラリティーに起因する偏光回転(旋光性)が生じ、その大きさは電圧印加量によって制御可能であることを実証した [5]。構造の最適化等によってさらに旋光性を増大させることによって、テラヘルツ領域における新たな偏光変調デバイスとしての応用が期待される。

6.6.3 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装置のエネルギー分解能が向上し、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。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 [3]。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。

半球型光電子アナライザーを用いる場合、光電子スペクトルの取得時間を短くするには光電子イベント数を増すため単位時間あたりの入射光子数を上げる必要がある。一方で、高いパルス強度の光を入射すると、一般に空間電荷効果によって光電子スペクトルの分解能が損なわれる。そのため通常、積算時間の長さを許容しながらパルス強度を十分に落として測定が行われる。従って、高い分解能と短い測定時間を両立するためには、なるべく高い繰り返し周波数で微弱な狭線幅深紫外パルスを照射することが最適な実験条件となる。これを現状の光源を用いながら実現するために、深紫外ファブリーペロー (FP) 共振器による高繰り返し化を進めた。繰り返し周波数 74 MHz、パルス幅 10 ps、中心波長 209 nm のビームを繰り返し周波数が 15 倍となるような FP 共振器に導入し、レーザーの縦モード周波数の変化に FP 共振器の共振器長が追尾するようにフィードバック制御を行った。この結果、比較的低フィネスの共振器においては 6 時間以上安定化を維持し、8 K におけるアモルファス金の光電子スペクトルを、形状変化なく従来よりも 2 桁以上短い測定時間で取得できることを実験的に証明した [1][47]。

また、高分解能飛行時間型角度分解電子分析器と繰り返し周波数可変狭線幅 5.9 eV 光源の組み合わせによる光電子分光システムの開発を進めた。光電子分光チャンバー内の残留磁場が低速の光電子の飛行軌道を歪めることから、磁性体の排除や実験室の磁場分布測定を行い対策を進めることで、分解能を向上させたり正確に角度分布を測定できるよう調整を進めた。

一方、繰り返し周波数 1 kHz 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、内殻遷移に伴う真空紫外領域の分散を高次高調波を利用して精密に測定するため、Young の干渉縞を応用した四重スリットの干渉計を用いて、高次高調波の次数毎の物質の位相シフトを高感度に捉える方法を開発した [49]。固体系の過渡応答をこの新しい波長域で探るため、ポンププローブ分光系の構築も進めた。

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。現在、繰り返し周波数 2.85MHz、共振器内パルスエネルギー 1mJ での超短パルス光源 (中心波長 1032nm、パルス幅 520fs) のモードロック動作の確認に成功している [31, 60]。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。テラヘルツイメージングのキーデバイスとなるテラヘルツカメラの高感度化も進めており、その感度特性の詳細な評価手法を開発した [25]。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。

フォトンサイエンス研究機構

最先端光科学を通して既存の学術分野を横断する融合科学を創ることを目的とし、2013 年 10 月より理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構が発足した。学内の最先端研究を連携させながら国内外の諸機関とも連携し、フォトンサイエンスの世界拠点を東京大学に形成することを目指すと同時に、産業界との連携も進め、基礎研究の成果を活用した技術を社会に波及浸透させたいと考えている。これによって、真理を探究する基礎科学の活動が人類社会の課題を解決し、さらに社会の変革をもたらすイノベーション創出につながるものであることを示し、基礎科学の新たな役割を社会に発信していく。

この活動を進めるため、文部科学省の「革新的イノベーション創出プログラム」拠点のひとつとして、「コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点」を、本機構のもとに創設することになった。この事業では「個を活かす持続可能な社会」実現のため、最新のレーザー技術を駆使して、光を使ったものづくりの革新を目指すと共に、その技術を支えるための新しい光と物質の科学を創って行く。

<受賞>

- [1] 大間知潤子: 2013 年秋季応物講演奨励賞, 2013 年
- [2] 池町拓也: 日本物理学会: 第 2 回 (2013 年秋季大会) 学生プレゼンテーション賞, 2013 年

<報文>

(原著論文)

- [3] 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, *Optics Express* **20**, 23542 (2012).
- [4] Z. Zheng, N. Kanda, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami: Efficient coupling of propagating broadband terahertz radial beams to metal wires, *Optics Express*, **21**, 10642 (2013).
- [5] T. Kan, A. Isozaki, N. Kanda, N. Nemoto, K. Konishi, M. Kuwata-Gonokami, K. Matsumoto, and I. Shimoyama: Spiral metamaterial for active tuning of optical activity, *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 221906 (2013).
- [6] T. Higuchi, M. Kuwata-Gonokami: Microscopic origin of magnetic linear dichroism in the anti-ferromagnetic insulator MnF_2 , *Phys. Rev. B*, **87**, 224405 (2013).
- [7] J. Omachi, T. Suzuki, K. Kato, N. Naka, K. Yoshioka, and M. Kuwata-Gonokami: Observation of excitonic N-body bound states: Polyexcitons in diamond, *Phys. Rev. Lett.*, **111**, 026402 (2013).
- [8] K. Yoshioka, Y. Morita, K. Fukuoka, and M. Kuwata-Gonokami: Generation of ultracold paraexcitons in cuprous oxide: A path toward a stable Bose-Einstein condensate, *Phys. Rev. B*, **88**, 041201(R) (2013). Editors' Suggestion
- [9] M. Sato, T. Higuchi, N. Kanda, K. Konishi, K. Yoshioka, T. Suzuki, K. Misawa, and M. Kuwata-Gonokami: Terahertz polarization pulse shaping with arbitrary field control, *Nature Photonics*, **7**, 724 (2013). Selected for the issue cover
- [10] K. Kitano, N. Ishii, N. Kanda, Y. Matsumoto, T. Kanai, M. Kuwata-Gonokami, J. Itatani: Orientation of jet-cooled polar molecules with an intense single-cycle THz pulse, *Phys. Rev. A*, **88**, 061405 (2013).
- [11] Y. Hazama, N. Naka, M. Kuwata-Gonokami, K. Tanaka: Resonant creation of indirect excitons in diamond at the phonon-assisted absorption edge, *Euro Phys. Lett.*, **104** 47012 (2013).
- [12] P. A. Obraztsov, T. Kaplas, S. V. Garnov, M. Kuwata-Gonokami, A. N. Obraztsov, Y. P. Svirko: All-optical control of ultrafast photocurrents in unbiased grapheme, *SCIENTIFIC REPORTS*, **4**, 4007 (2013)
- [13] K. Yoshioka, K. Miyashita, and M. Kuwata-Gonokami: Stability of ultracold high-density 1s orthoexcitons in Cu_2O studied by resonant two-photon excitation with phase-modulated pulse, *Optics Express* **22**, 3261 (2014)
- [14] K. Konishi, T. Higuchi, J. Li, J. Larsson, S. Ishii, and M. Kuwata-Gonokami: Polarization-controlled circular second-harmonic generation from metal hole arrays with threefold rotational symmetry, *Phys. Rev. Lett.*, **112**, 135502 (2014) (博士論文)
- [15] Zheng Zhu: Terahertz vector beams: generation and application, (2013年9月、東京大学工学系研究科) (修士論文)
- [16] 森田悠介: 亜酸化銅における 100mK 励起子系の生成と統計的性質の研究, (2014年3月、東京大学大学院理学系研究科)
- [17] 根本夏紀: 界面のピコ秒電界制御に向けた高強度テラヘルツベクトルビームの発生, (2014年3月、東京大学大学院理学系研究科)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [18] M. Kuwata-Gonokami: Exciton Bose-Einstein condensation in a bulk semiconductor crystal, The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy "Ultimate Quantum Systems of Light and Matter- Control and Applications", Nara Prefectural New Public Hall, Nara, Japan (10, April, 2013) (invited)
- [19] K. Yoshioka, Y. Morita, K. Fukuoka, and M. Kuwata-Gonokami: Towards a stable Bose-Einstein condensate of excitons in a bulk semiconductor, The International Conference on Quantum Fluids and Solids 2013, Matsue, Japan (5, Aug., 2013)(invited)
- [20] M. Kuwata-Gonokami: Production of ultracold bulk excitons for stabilizing a trapped Bose-Einstein condensate, FIRST-QS 2C WS on "Emergent Phenomena of Correlated Materials", Shinagawa, Japan (15, Nov., 2013) (invited)
- [21] M. Kuwata-Gonokami: Bose-Einstein Condensation of Excitons in a bulk semiconductor crystal, Max Planck-UBC-U-Tokyo Workshop on Quantum Materials, Stuttgart, Germany (10, Dec., 2013) (invited)
- [22] M. Kuwata-Gonokami: Exciton Bose-Einstein condensation in a bulk semiconductor crystal, German-Japanese Symposium 2014, Germany (17, Jan., 2014) (invited)
- [23] M. Kuwata-Gonokami: Bose-Einstein Condensation of trapped Excitons in a bulk crystal at dilution temperature, FIRST International Symposium on Topological Quantum Technology, Hongo, Japan (29, Jan., 2014) (invited)
- [24] M. Kuwata-Gonokami: Polarization control using nonlinear materials with threefold rotational symmetry, UK-Japan Workshop on Photonics and Metamaterials Research, The British Embassy in Tokyo, (11, March, 2014) (invited)
- 一般講演 (口頭)

- [25] N. Nemoto, N. Kanda, K. Konishi, S. Kurashina, T. Sasaki, N. Oda, M. Kuwata-Gonokami: Development and evaluation of high-sensitivity terahertz camera, The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/EUROPE-IQEC), Munich, Germany, (12, May, 2013) (oral)
- [26] M. Sato, T. Higuchi, N. Kanda, K. Konishi, K. Yoshioka, T. Suzuki, K. Misawa, M. Kuwata-Gonokami: The Terahertz Polarization Pulse Shaping, CLEO/EUROPE-IQEC, Munich, Germany, (12, May, 2013) (oral)
- [27] J. Omachi, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami: High-power, narrow-width, high-repetition-rate, 5.9 eV light source using a passive optical cavity for laser-based photoelectron spectroscopy, CLEO/EUROPE-IQEC, Munich, Germany, (14, May, 2013) (oral)
- [28] Y. Morita, K. Yoshioka, K. Fukuoka, M. Kuwata-Gonokami: Realization of sub-100 mK excitons in cuprous oxide for a stable Bose-Einstein condensate, CLEO: QELS - Fundamental Science is a descendent of the Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS), San Jose, USA, (10, June, 2013) (oral)
- [29] Y. Hazama, N. Naka, M. Kuwata-Gonokami, and K. Tanaka: Influence of the carrier lifetime on the phase diagram of electron-hole systems in diamond, The 18th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures, Matsue, Shimane, Japan, (23, July, 2013) (oral)
- [30] T. Kan, A. Isozaki, N. Kanda, N. Nemoto, K. Konishi, M. Kuwata-Gonokami, K. Matsumoto, I. Shimoyama: Fabrication and Experimental Evaluation of MEMS Spiral Metamaterial for Tunable THz Optical Activity, Metamaterials 2013, 7th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Bordeaux, France, (19, Sep., 2013)(oral)
- [31] N. Kanda, A. A. Eilanlou, T. Imahoko, T. Sumiyoshi, Y. Nabekawa, M. Kuwata-Gonokami, K. Midorikawa: High-Pulse-Energy Yb:YAG Thin Disk Mode-Locked Oscillator for Intra-Cavity High Harmonic Generation, 2013 Advanced Solid State Lasers (ASSL) Congress, Paris, France, (1, Nov., 2013) (oral)
- 一般講演 (ポスター)
- [32] K. Yoshioka, Y. Morita, T. Inoue and M. Kuwata-Gonokami: Creation of Bose Einstein condensates of excitons in a bulk semiconductor -Towards Exploration of the Ground States of Electron-Hole Systems, The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy "Ultimate Quantum Systems of Light and Matter- Control and Applications", Nara Prefectural New Public Hall, Nara, Japan, (10, April, 2013) (poster)
- [33] Z. Zheng, N. Kanda, K. Konishi, M. Kuwata-Gonokami: Efficient Coupling of Broadband Terahertz Radial Beams to Metal Wires, CLEO/EUROPE-IQEC, Munich, Germany, (12, May, 2013) (poster)
- [34] R. Imai, N. Kanda, T. Higuchi, Z. Zheng, K. Konishi, M. Kuwata-Gonokami: Generation of broadband terahertz Laguerre-Gaussian beam, CLEO/EUROPE-IQEC, Munich, Germany, (12, May, 2013) (poster)
- [35] S.V.Lobanov, E.G.Lobanova, N.A.Gippius, S.G.Tikhodeev, T.Weiss, K.Konishi, M.Kuwata-Gonokami: Control of quantum dots emission polarization via chiral photonic crystal, Fundamental optical processes in semiconductors (FOPS), Kodiak Island, Alaska, USA, (12-16, Aug., 2013) (poster)
- [36] A. Isozaki, T. Kan, H. Takahashi, N. Kanda, N. Nemoto, K. Konishi, M. Kuwata-Gonokami, K. Matsumoto, and I. Shimoyama: Tunable Metamaterials by Controlling Sub-Micron Gap for the THz Range, The 26th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2014), W-251, San Francisco, USA, (29, Jan.,2014) (poster)
- [37] M. Horikoshi, T. Ikemachi, A. Ito: Determination of the EOS of neutron matter using ultracold Fermi gases, 7th International conference on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA 2014), Miraikan, Japan, (14-16, March, 2014) (poster)
- 国際会議主催
- [38] M. Kuwata-Gonokami Recent Advances in Laser Based Coherent Photon Technology and Science, CLEO-PR, 2013 Workshop on C-Special: Photon Frontier Network, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, (30, June, 2013)
- (国内会議)
- 招待講演
- [39] 五神真: 時空間モルフォロジー制御による能動メゾ光学第1回超梗塞エレクトロニクス研究会, 東京農工大学小金井キャンパス, (2013/4/13)
- [40] 五神真: 若手研究人材の育成～フォトンサイエンス分野での取り組み～, JST 研究開発戦略センター (CRDS) セミナー (CRDS: Center for Research and Development Strategy), (2013/5/16)
- [41] 五神真: レーザー技術革新と光物質科学の展開, 理化学研究所, 理研シンポジウム: 第1回「光量子光学研究」, (2013/10/31)
- [42] 五神真: テラヘルツ波時空間制御の新展開, 応用物理学会・テラヘルツ電磁波技術研究会「新しいテラヘルツ科学が映し出すテラヘルツ応用の展望」, 名古屋大学, (2013/11/18)

- [43] 小西邦昭: 構造の三回回転対称性を活用した波長変換技術とその応用, レーザー学会第 34 回年次大会, 北九州国際会議場, (2014/1/22)
- [44] 五神真: 最先端コヒーレントフォトン技術展開とものづくり革新への期待, 光機能材料研究会第 46 回講演会「光を利用するー創る、造る、防ぐ」, 東京大学先端研, (2014/1/23)
- [45] 堀越宗一: 冷却原子実験による核物理へのアプローチ 基研研究会「量子情報の新展開」(招待講演), 京都大学 基礎物理学研究所 湯川記念館 Panasonic 国際交流ホール, (2014/3/25)
- [46] 五神真: 対称性と偏光制御第 4 回電磁メタマテリアル講演会, 東京大学伊藤国際学術研究センター伊藤謝恩ホール, (2014/3/7)
- [47] 大間知潤子, 吉岡孝高, 五神真: (講演奨励賞受賞記念講演) 高効率高分解能角度分解光電子分光のための超高線り返し 5.9 eV 光源の開発, 第 61 回応用物理学学会春季学術講演会, 青山学院大学相模原キャンパス (2014/3/18)
- 一般講演
- [48] 小西邦昭: テラヘルツベクトルビーム発生とその応用, 第 3 回光科学異分野横断萌芽研究会, 強羅静雲荘, (2013/8/10)
- [49] 平野大輔, 永久保祐紀, 大間知潤子, 吉岡孝高, 五神真: 高次高調波を用いた二重スリット干渉計によるアルミニウム L 殻吸収端近傍の位相敏感屈折率測定 日本物理学会 2013 年秋季大会プログラム, 徳島大学, (2013/9/25)
- [50] 坂野昌人, 大間知潤子, 吉岡孝高, 五神真, 下志万貴博, 石坂香子: 高線り返し狭線幅 5.9 eV レーザー角度分解光電子分光装置の開発, 日本物理学会 2013 年秋季大会プログラム, 徳島大学, (2013/9/26)
- [51] 伊藤亜紀, 池町拓也, 堀越宗一, 五神真, 小芦雅斗: Atomic shot noise 観測による実効的な撮像分解能の評価, 日本物理学会 2013 年秋季大会プログラム, 徳島大学, (2013/9/27)
- [52] 池町拓也, 伊藤亜紀, 堀越宗一, 五神真: 相互作用する極低温フェルミ多体系の温度評価, 日本物理学会 2013 年秋季大会プログラム, 徳島大学, (2013/9/27)
- [53] 佐藤正明, 樋口拓也, 五神真, 三沢和彦: ベクトル波形整形パルスを用いた α -石英結晶格子の円軌道運動制御, 日本物理学会 2013 年秋季大会プログラム, 徳島大学, (2013/9/27)
- [54] 根本夏紀, 神田夏輝, 小西邦昭, 五神真: 広帯域テラヘルツ波長板を用いた高強度テラヘルツベクトルビームの発生, 第 74 回応用物理学学会秋季学術講演会, 同志社大学京田辺キャンパス, 京都府, (2013/9/17)
- [55] 神田夏輝, 小西邦昭, 根本夏紀, 緑川克美, 五神真: 高感度テラヘルツカメラを用いたマルチチャンネル分光装置の開発, 第 74 回応用物理学学会秋季学術講演会, 同志社大学京田辺キャンパス, 京都府, (2013/9/18)
- [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 5.9eV 光源のファブリーペロー共振器を用いた高線り返し化第 74 回応用物理学学会秋季学術講演会, 同志社大学京田辺キャンパス, 京都府, (2013/9/19)
- [57] 小西邦昭, 五神真: テラヘルツ時空間偏光制御の新技術, 第 22 回先端量子科学アライアンスセミナー「テラヘルツセンシング技術の最前線: デバイス開発から基礎・応用研究まで」慶應義塾大学, (2014/3/1)
- [58] 小野寺宏, 高島健太, 池田わたる, 西岡恵理, 今井俊夫, 関谷毅, 染谷隆夫, 小西邦昭, 五神真: 新しい組織透明化技術 LUCID による 3D 臓器構造解析, 再生医療学会, 京都, (2014/3/6)
- [59] Zhigang Zhao, 小澤陽, 五神真, 小林洋平: A fiber-CPA laser system using nonlinear-PCF compression for intra-cavity high harmonics generation at 10MHz repetition rate, 第 61 回応用物理学学会春季学術講演会, 青山学院大学相模原キャンパス (2014/3/17)
- [60] 神田夏輝, アマニイランル, 今鉢友洋, 住吉哲実, 鍋川康夫, 五神真, 緑川克美: 共振器内高次高調波発生のための Yb:YAG Thin Disk 高強度超短パルス共振器の開発, 第 61 回応用物理学学会春季学術講演会, 青山学院大学相模原キャンパス (2014/3/17)
- [61] 吉岡孝高, 五神真: 3 次元トラップした亜酸化銅 1s パラ励起子の吸収イメージングの実現, 日本物理学会 69 回年次大会, 東海大学, (2014/3/27)
- [62] 鈴木博祐, 森田悠介, 吉岡孝高, 五神真: サブケルビン領域の量子縮退した亜酸化銅パラ励起子の発光ダイナミクス, 日本物理学会 69 回年次大会, 東海大学, (2014/3/27)
- ポスター
- [63] 大間知潤子: 高分解能レーザー光電子分光のための受動共振器を用いた高線り返し狭線幅 5.9 eV 光源の開発 日本学術会議公開シンポジウム「第三回先端フォトンクスシンポジウム」, 日本学術会議, 東京 (2013/4/4) (poster)
- [64] 池町拓也, 伊藤亜紀, 堀越宗一, 五神真: 強相関フェルミ多体系の普遍的な熱力学の実験的探求, 新学術領域研究「中性子星核物質」第二回ウィンタースクール & 研究会ポスターセッション, 理研, (2013/12/27) (セミナー他)
- [65] 五神真: 光科学の最前線と新技術, 東京大学エグゼクティブマネジメントプログラム (東大 EMP), 東京大学伊藤国際学術研究センター伊藤謝恩ホール, (2013/7/26)
- [66] 五神真: 研究人材確保の課題ー大学の活用に向けてー, 2013 一橋大学政策フォーラム「経済成長と科学技術イノベーション政策」, 如水会館, 東京, (2013/9/25)
- [67] 五神真: 私のキャリアパス「新しい光物質科学への挑戦」, 慶應義塾大学 博士過程教育リーディングプログラム「超成熟社会発展のサイエンス」, My Career Path 講演, 慶應義塾大学, (2013/11/2)
- [68] 五神真: 最先端レーザー技術による光物質科学の新展開「ものづくり革新への期待」サイエンステクノロジーフォーラム, 東京大学駒場キャンパス (2013/12/07)
- [69] 鈴木博祐, 森田悠介, 吉岡孝高, 五神真: 亜酸化銅中の量子縮退した励起子の発光ダイナミクス FIRST「量子情報処理プロジェクト」全体会議, (2013/12/11)

- [70] 五神真：H23 年度博士課程教育リーディングプログラム (H23-H29) フォトンサイエンス・リーディング大学院, APLS 座談会, (2013/12/27)
- [71] 五神真：光科学の最前線と新技術, 東京大学エグゼクティブマネジメントプログラム (東大 EMP), 東京大学伊藤国際学術研究センター伊藤謝恩ホール, (2014/2/14)
- [72] 五神真：フォトンサイエンス研究機構コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点の紹介東京大学大学院理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構開所式コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点発足記念シンポジウム (2014/2/21)
- [73] 五神真：コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点の紹介, COI キックオフシンポジウム～日本発のイノベーションで未来を創る～, 日本未来館, (2014/2/24)

6.7 安東研究室

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いる。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が前年度までにほぼ完了し、2014 年度からは本格的なインストールが開始される。KAGRA の 2017 年からの本格的な重力波観測開始への期待が高まっている。また、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、それらで必要とされる技術を用いた関連研究も進めている。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。

6.7.1 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 6.7.1)。2010 年 10 月よりプロジェクトがスタートし、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。



図 6.7.1: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の概念図。

KAGRA 主干渉計の全体設計

大型レーザー干渉計の設計に於いては、その原理的感度を高めるだけではなく、十分に SN 比の高い制御信号が得られるか、各光学素子パラメーターの許容誤差が現実的な値であるか、誤差によって生じる高次光モードの影響が十分小さく抑えられるか、等複数の観点から設計の最適化を行う必要がある。KAGRA 主干渉計設計チームのチーフである麻生を中心に、安東研ではこれらの検討を進めてきた。その結果、KAGRA 主干渉計の主要パラメータを決定し、また大型干渉計の設計を系統的に行う手法をまとめた論文として出版した [3]。

光学系のアライメント制御

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 400 kW 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決定や姿勢制御系の設計を行ってきた。今年度は鏡の姿勢制御に用いる wave-front sensor (WFS) 法の原理的な雑音であるショットノイズに着目し、その要求値の計算を行った。また、干渉計シミュレーションにより、重力波に対する感度を悪化させない姿勢信号の取得方法や分離方法を検討した。これにより、ほぼ要求値を満たす方法を見出すことができたが、15 Hz 以下の帯域では、干渉計の重力波に対する感度を悪化させてしまうことがわかった。15 Hz 以下の低周波帯域では地面振動による雑音によってそもそも干渉計の重力波に対する感度は低いため、連星中性子星合体の観測可能距離 (inspiral range) に対する影響は小さい。

さらに、原理的な雑音以外の雑音も干渉計シミュレーションに加え、より実的な雑音評価を行うことも進めている。特に、基線長 3 km のメインの光共振器の透過光を用いて、その共振器を構成する鏡の姿勢制御を行うと、透過光を受ける光検出器の振動が、干渉計の重力波に対する感度に大きく影響を与えてしまうことがわかった。この振動は主に地面振動から来るものであるため、光検出器を懸架するなどして防振を行うか、光検出器の振動に感度のない光学系配置を考えなくてはならず、現在検討を進めている。

光学系のパラメータ設計

光学系のパラメータ設計の際に考慮すべき問題として「パラメトリック不安定性」という問題がある。安東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で、かつ不安定性が発生した後の振る舞いについて取り扱うことができるものにした。また、この結果を実際に KAGRA に対して適用し、その光学設計におけるパラメトリック不安定性のリスクを評価した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。

非平衡系熱雑音の研究

微小な変位信号を取り扱う実験においては、熱雑音が測定の精度を制限することが多い。特に干渉計型重力波検出器においては、鏡およびその懸架系の熱雑音が測定帯域において主要な雑音源となっているため、KAGRA では鏡を冷却することによって熱雑音を抑え込むことを試みる。しかし、冷却後の温度勾配のついた系での熱雑音の振る舞いは、その系が非平衡系であるために取り扱いが単純ではない。安東研究室ではこうした非平衡系、その中でも非平衡定常系における熱雑音のモデリングに取り組み、KAGRA の懸架系に対してこれを適用し熱雑音の評価を行った。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。

向の共振周波数が小さいことから、地上においても 1 Hz 付近の低周波数帯に良い感度を持つことである。これによって、地上の干渉計型重力波検出器では捉える事が難しい、中間質量ブラックホール連星合体や背景重力波などといった低周波重力波源の探査を行う事を目標とする。

Phase-II TOBA の開発

現在までに、最初のプロトタイプによって原理検証・観測が行われてきたが、今後は感度向上の為、更なる技術検証が求められている。そこで現在、最終的な大型 TOBA と既存のプロトタイプの間をつなぐ段階として、Phase-II TOBA の開発を進めている(図 6.7.2)。

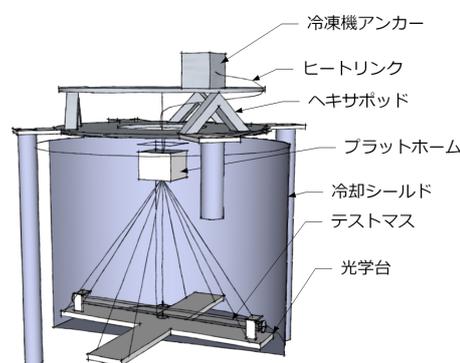


図 6.7.2: Phase-II TOBA の概念図

6.7.2 宇宙空間レーザー干渉計

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 10 Hz 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_{μν} 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。

この装置では大きく、2本のテストマスによる同相雑音除去及び自由度分離による感度向上の検証、低温共振器でも使用する Hexapod 型能動防振装置の導入による地面振動雑音除去、低温システムの導入による熱雑音の低減の3点を柱として開発を進める。

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同時に観測する新たな解析手法も採用する。この手法によって3つの独立な重力波信号が1つの実験装置から取り出すことができるため、TOBA1 台でも重力波の波源方向などといったパラメータが精度よく決定できる事も明らかにした。

現在までに、これらの技術が実現できるような振り子の設計・製作、Hexapod 型能動防振装置の開発、低温システムの初期評価までが終了しており、今後はこれらのパーツを組み合わせ、総合的な評価を行っていく予定である。

6.7.3 ねじれ型重力波検出器 TOBA

Torsion-bar Antenna (TOBA) とは、ねじれ振り子を用いた新しい重力波検出器である。TOBA は2本の棒状のテストマスを持ち、これらが重力波による潮汐力を受けて差動回転するのを読み取ることで、重力波を検出する。TOBA の大きな特徴は、回転方

光ファイバーセンサの開発

Phase-II TOBA ではテストマスの回転変位が 1 Hz で 10^{-15} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ となるように設計されており、セ

ンサーにはマイケルソン干渉計を用いる予定である。このとき、テストマス 2 本の回転運動と並進運動を同時に読み取る必要があるため、多数のマイケルソン干渉計が必要となる。しかし、空間にレーザー光を通した場合ミラーなどの光学部品が真空槽内で密集するために、すべてを配置することが困難になると考えられる。そこで光ファイバーを用いてマイケルソン干渉計を構成することにより、余分な光学部品を排除してコンパクト化し、問題の解決を目指している。現在までに、試験的に 1 辺 30 cm のブレッドボード上に干渉計を組み上げ、1 Hz で 10^{-11} m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の感度が達成されている。今後は雑音源を特定し、その除去を目指していく。[30]

電磁誘導型アクチュエーターの開発

現在 PhaseII TOBA の開発が進行中である。プロトタイプ TOBA において、低周波帯で感度を制限していた雑音として環境磁場による雑音が挙げられ、その由来は、アクチュエーターとして用いていたコイルマグネットアクチュエーターの、テストマスに貼り付けていた磁石が環境磁場の影響を受けるためだということが分かっている。そこで、特に低周波帯での感度向上のために新型のアクチュエーターが必要となり、我々はテストマス側にもコイルを用いるコイルコイルアクチュエーターの開発を行った。まずは変位を読み取るセンサーとしてフォトセンサーを用いてテストマスをロックし、openloop 伝達関数やアクチュエーターのゲインを測定した。現段階で、コイルコイルアクチュエーター用いてテストマスの制御が可能であることを実証し、アクチュエーターの出す力が、同じ面積の標準的な静電型アクチュエーターより格段に大きいだけでなく、コイルマグネットアクチュエーターと比較しても同等かそれ以上であることが分かった。今後はマイケルソンファイバー干渉計を用いてテストマスを制御し、アクチュエーター自身の雑音を評価していきたいと考えている [31]。

直交位相法 TOBA の開発

以前開発された TOBA では棒状のテストマスを超伝導ピン止め効果によって浮上させ、回転をコイル-マグネットアクチュエーターで制御しその回転の読み取るセンサーとしてマイケルソン干渉計を用いていた。この TOBA では磁石をテストマスに取り付けており約 0.1 Hz 以下において磁場雑音によって重力波に対する感度が制限されていた。そのため我々は新しくセンサとして直交位相干渉計を用いた TOBA を開発した。直交位相干渉計を用いることによってテストマスを制御する必要がなくなり、さらにテストマスをワイヤーで懸架しているため磁場雑音が原理的になくなっている。新しい TOBA の重力波に対する感度は 0.01Hz において 2×10^7 [1/Hz^{1/2}] となっており、この周波数において超伝導磁気浮上を用いた TOBA と比べ雑音レベルが 1/35 程度に低減された。今後は雑音を低減させより良い感度の実現を目指す。

6.7.4 低温光共振器を用いた超高安定化レーザー光源

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。

低温光共振器の評価実験

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、地面振動の防振による弾性変形の抑制や温度安定化による熱膨張の低減も必要となる。

2013 年度は光共振器の冷却試験および低温で光共振器へのレーザーの安定化を行った。冷却試験では光共振器の温度を 4.05 K まで冷やすことができ、極低温でのオペレーションが可能であることを確認した。また、光共振器にレーザーをロックして周波数安定化を行い、in loop 評価で 10^{-18} を下回る結果を得た。さらに今年度は開発したレーザーの応用を見据えて、光の伝送によって導入される周波数雑音の評価を行い 10^{-17} レベルの安定度で光を伝送する光学系を構築した。

今後は、ヘキサポッドステージを用いた能動防振装置のインストールや out of loop でのレーザーの周波数安定度の評価を行っていく。

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、台上部の振動を能動的に抑える。

これまでに装置開発、及び並進 3 軸の同時制御に成功しており、直径約 40cm 以内、高さ約 20cm と非常に小型でありながら 1~10Hz という低周波数帯において約 1/10 の防振比を持つ防振台を完成させた。

これは現在低温共振器の防振台としてインストールされており、今後は防振によるレーザー周波数安定度の向上が期待される。

6.7.5 相対論・量子光学精密実験

三角光共振器を用いた異方性検出実験

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索が行われている。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索となっており、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。

これまで異方性探索実験では、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索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い。

今年度は昨年度の 8 月に開始した長期測定を 9 月まで続け、合計 393 日分、約 170 万回転分の異方性信号データを得た。この 1 年以上に渡るデータの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^{-15} のオーダーの上限値をつけた。これ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。また、拡張標準理論の枠組みで解析を行い、光子の高次の Lorentz 不変性の破れパラメータに世界初の上限値をつけた。高次の破れとは電磁場のラグランジアンに光子の運動量依存性がある項を加える事で表現される破れのことである。運動量依存性の次数が上がると、光速の異方性を球面調和関数で展開した場合、高次の成分が出てくることになる。これまでは異方性の双極子成分に対応する単純な片道光速の異方性しか測定されてこなかったが、今回我々は六重極成分に着目し、解析を行った。

量子論的輻射圧の測定

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かった。その原因の一つとして、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 不安定性と呼ばれる) ために、光共振器に十分な光量を溜められない問題が存在する。そこで我々は、Siddles-Sigg 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装置を開発し、輻射圧揺らぎの影響を評価することに成功した。

光学浮上鏡を用いた巨視的量子実験

超高精密測定においては測定に擾乱が問題となる。例えば、重力波検出器のような機械光学系では懸架した鏡にレーザー光を当てることで位置を測定するが、光子数の揺らぎによって鏡に揺らいだ運動量が与えられてしまうことに起因する雑音が存在する。この量子輻射圧雑音は、光子の位相揺らぎによって生じる散射雑音と相関を持たせることで打ち消すことができ、標準量子限界を超えた鏡の位置測定 (量子非破壊計測) ができることになる。そのため盛んに研究が行われているが、プランク質量を超えるような巨視的な領域では量子輻射圧雑音に到達した例がこれまで存在しなかった。今年度の本研究室の実験により、これが達成されたが、量子非破壊計測を行うためには直近にある熱雑音をさらに低減する必要がある。

熱雑音にはさまざまな種類が存在するが、KAGRA のような重力波検出器やこれまでの実験で最も問題となっているのは鏡を懸架する際に生じる散逸に伴うサスペンション熱雑音である。これをなくすためには重力に逆らって鏡を浮上させる必要があり、その一つの方法が光の輻射圧のみによって鏡を支える光学浮上である。磁気浮上などの方法には熱雑音となる散逸が存在するが、光学浮上では光子の有効温度が環境に比べて十分高いため、熱雑音となる散逸が存在しない。

今年度はこの光学浮上の安定性について検討を行った。その結果、鏡の曲率が鉛直下方向に凸でないと安定な光学浮上が実現できないことがわかった。また、3 本の Fabry-Perot 共振器による光輻射圧を用いて支えるという、既に提案がされている三脚構造の方式より簡便な構成で安定な浮上が可能であることがわかった。その構成は Fabry-Perot 共振器を浮上鏡の上下に 1 本ずつ作る方式であり、我々が新しく発見した構成である。また、初期アラインメントへの要求値の計算や、1.6 mg の鏡や実験に用いる真空設備の準備を進めている。

<受賞>

- [1] 松本 伸之, 2013 年度 理学系研究科 研究奨励賞 (博士課程).

<報文>

(原著論文)

- [2] A. Shoda, M. Ando, K. Ishidoshiro, K. Okada, W. Kokuyama, Y. Aso, K. Tsubono: Search for a stochastic gravitational-wave background using a pair of torsion-bar antennas, *Phys. Rev. D*, 89, 027101 (2014)
- [3] Y. Aso, Y. Michimura, et al.: Interferometer Design of the KAGRA Gravitational Wave Detector, *Phys. Rev. D* 88, 043007 (2013)
- [4] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, Kimio Tsubono: New Limit on Lorentz Violation Using a Double-Pass Optical Ring Cavity, *Phys. Rev. Lett.* 110, 200401 (2013)
- [5] Yuta Michimura, Matthew Mewes, Nobuyuki Matsumoto, Yoichi Aso, Masaki Ando: Optical cavity limits on higher order Lorentz violation, *Phys. Rev. D* 88, 111101(R) (2013)
- [6] J. Harms, BJJ. Slagmolen, RX. Adhikari, MC. Miller, M. Evans, YB. Chen, H. Muller, M. Ando: Low-frequency terrestrial gravitational-wave detectors, *Phys. Rev. D* 88, 122003 (2013)
- [7] Masaki Ando: DECIGO Pathfinder Int. J. Modern. Phys. D 22, 1341002 (2013)

(会議抄録)

- [8] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, Kimio Tsubono: Testing Lorentz Invariance with a Double-Pass Optical Ring Cavity, *Proceedings of the Sixth Meeting on CPT and Lorentz Symmetry*, edited by V. A. Kostelecký, pp.216-219 (World Scientific, Singapore, 2014)

(学位論文)

- [9] 松本 伸之: Direct Measurement of Quantum Back-Action in a Macroscopic System, 博士論文, 2013 年 3 月.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: WFS Shot Noise Requirement, 8th KAGRA Face to Face Meeting (Aug 2013, Toyama)
- [11] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: Alignment Sensing and Control for KAGRA Interferometer, 2013 International School on Numerical Relativity and Gravitational Waves (Aug 2013, Toyama)

- [12] A. Shoda, M. Ando, K. Ishidoshiro, K. Okada, Y. Aso, K. Tsubono: A New Setup for Torsion-bar Antenna, Amaldi10/GR20 (Warsaw University, July 2013)
- [13] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, Kimio Tsubono: New Limit on Lorentz Violation Using a Double-Pass Optical Ring Cavity, Sixth Meeting on CPT and Lorentz Symmetry (June 2013, Indiana University)
- [14] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: Alignment Sensing and Control for KAGRA, ELiTES Bilateral Italy-Japan Workshop (Apr 2013, Tokyo)

招待講演

- [15] N. Matsumoto: Direct measurement of quantum back-action in a macroscopic system, IWQD2014, (March 2014, NII, Japan)
- [16] Masaki Ando: Observation of Gravitational Waves, Multi-Messengers from Core-Collapse Supernovae (December 2nd, 2013, Fukuoka Univ.)
- [17] Masaki Ando: Gravitational-Wave Telescopes, 6th OECD Meeting of the Astroparticle Physics International Forum (Oct. 29, Toyama)
- [18] Masaki Ando: KAGRA, Large-scale Cryogenic Gravitational-Wave Telescope, Workshop on Scientific Project Management (Oct. 16, Fukuracia Tokyo Station, Tokyo)
- [19] A. Shoda: Torsion-bar Antenna and Its Collaboration with Interferometers, 2013 International School on Numerical Relativity and Gravitational Waves, (August 2013, Pohang, Korea)
- [20] Masaki Ando: KAGRA and Gravitational-Wave Experiments, APPC12, The 12th Asia Pacific Physics Conference (July 17, 2013, Makuhari Messe, Chiba, Japan)
- [21] Masaki Ando: Recent News from KAGRA, PAC34, The 34th Program Advisory Committee Meeting (June 4th 2013, Hanford, USA)
- [22] A. Shoda: Torsion-bar Antenna and Its Collaboration with Interferometers, Italy-Japan Workshop (Tokyo, Japan, April 2013)

(国内会議)

一般講演

- [23] 安東正樹, 他: 大型低温重力波望遠鏡 (KAGRA) プロジェクトの現状, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学, 神奈川)
- [24] 麻生洋一, 他: 重力波検出器 KAGRA の主干渉計開発 III, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学, 神奈川)
- [25] 松本伸之, 道村唯太, 麻生洋一, 安東正樹: 輻射圧雑音の直接測定, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学, 神奈川)

- [26] 道村唯太, 松本伸之, 麻生洋一, 安東正樹: 鏡の光学浮上, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学, 神奈川)
- [27] 正田亜八香, 手嶋航大, 桑原祐也, 小森健太郎, 麻生洋一, 安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器 (Phase-II TOBA) の開発, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学, 神奈川)
- [28] 柴田和憲, 乙村浩太郎, 出野雄也, 徳田順生, 麻生洋一, 宗宮健太郎, 安東正樹: 非平衡定常状態における熱雑音, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学, 神奈川)
- [29] 牛場崇文, 麻生洋一, 大前宣昭, 正田亜八香: 低温シリコン光共振器を用いた狭線幅光源の開発 II, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学, 神奈川)
- [30] 桑原祐也, 小森健太郎, 正田亜八香, 麻生洋一, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 (TOBA) に向けたファイバー干渉計の開発, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学, 神奈川)
- [31] 小森健太郎, 桑原祐也, 正田亜八香, 麻生洋一, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 (TOBA) のためのアクチュエーターの開発, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学, 神奈川)
- [32] 安東正樹: 小型重力波観測衛星 DECIGO パスファインダーイプシロン搭載宇宙科学ミッション・シンポジウム (2014 年 1 月 24 日, 東京大学)
- [33] 安東正樹: DECIGO Pathfinder, 宇宙科学シンポジウム (2014 年 1 月 8 日, 宇宙科学研究所, 相模原)
- [34] 安東正樹: DECIGO/DPF の概要, 第 12 回 DECIGO ワークショップ (2013 年 10 月 27 日, 東京大学)
- [35] 安東正樹, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (44): DECIGO/DPF の概要日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月 23 日, 高知大学)
- [36] 正田亜八香, 安東正樹, 石徹城晃司, 岡田健志, 麻生洋一, 坪野公夫: 「次世代ねじれ振り子型重力波検出器 (Phase-II TOBA) の基本概念設計」, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月 23 日, 高知大学)
- [37] 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光子のローレンツ不変性検証, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月 23 日, 高知大学)
- [38] 柴田和憲, 麻生洋一, 山元一広, 安藤正樹: 任意の光学系におけるパラメトリック不安定の評価, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月 23 日, 高知大学)
- [39] 牛場崇文, 麻生洋一, 大前宣昭, 正田亜八香, 坪野公夫: 低温シリコン光共振器を用いた狭線幅光源の開発, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月 23 日, 高知大学)
- [40] 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 II, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月, 徳島大学)
- [41] 阿久津 智忠, 安東正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (23), 日本天文学会 2013 年 秋季年会 (2013 年 9 月 10 日, 東北大学)
- 招待講演
- [42] 安東正樹: 重力波の観測, 日本天文学会 年会 企画セッション 「r プロセスと重力波天文学」 (2014 年 3 月 19 日, 国際基督教大学)
- [43] 安東正樹: DECIGO Pathfinder, CRC 将来計画タウンミーティング (2014 年 3 月 14 日, 東京大学 宇宙線研究所)
- [44] 麻生洋一: 重力波で拓く新しい天文学・KAGRA の技術と建設の現状, CRC 将来計画タウンミーティング (2014 年 3 月 14 日, 東京大学 宇宙線研究所)
- (セミナー)
- [45] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, and Kimio Tsubono: Testing Lorentz Invariance with an Optical Ring Cavity, LHO Journal Club (Mar 2014, Richland, WA)
- [46] Masaki Ando: Current status of KAGRA, RESCEU 交流会 (Jan. 8th, 2014, RESCEU)
- [47] 安東 正樹: 重力波検出に挑む KAGRA, 朝日カルチャーセンター講演 (2013 年 11 月 16 日, ルミネ横浜, 横浜)
- [48] 安東 正樹: 重力波望遠鏡「かぐら」で切りひらく新しい天文学, 駿台天文講座 (2013 年 10 月 19 日, 駿台学園, 東京)
- [49] 安東 正樹: 重力波望遠鏡「かぐら」で探る宇宙, ビッグバン宇宙国際研究センター 講演会, Open Campus 2013 (2013 年 8 月 8 日, 東京大学)
- [50] 安東 正樹: 重力波望遠鏡 KAGRA が切り拓く天文学, 富山大学 談話会 (2013 年 7 月 31 日, 富山大学)
- [51] 安東 正樹: 低周波数重力波の探査, 第 13 回 RESCEU サマースクール 「宇宙における時空・物質・構造の進化」 (2013 年 7 月 26 日, 蔵王, 山形)
- [52] 安東 正樹: 重力と重力波で探る宇宙, 2013 年度 ビッグバン宇宙国際研究センター 研究者交流会 (2013 年 6 月 26 日, 東京大学)
- [53] 安東 正樹: 重力波望遠鏡で観測する新しい宇宙の姿, 平成 25 年度 物理学教室ガイダンス・オープンラボ (2013 年 6 月 7 日, 小柴ホール, 東京大学)
- [54] 安東 正樹: 重力波で解き明かす宇宙の謎平成 25 年度 物理学科進学ガイダンス講演会 「物理学の新たな地平」 (2013 年 5 月 27 日, 東京大学駒場キャンパス)
- [55] 安東 正樹: 重力波望遠鏡 KAGRA でみる新しい宇宙の姿, 東京大学 物理学教室談話会 (2013 年 5 月 31 日, 東京大学)
- [56] 安東 正樹: 重力波望遠鏡 KAGRA が拓く宇宙の地平線 2013 年 総研大特別公開講演 (2013 年 5 月 25 日, 国立天文台, 三鷹)

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のが、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 optogenetics とよばれる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進んでいる。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。

本年度は以下の研究を進めるとともに、国際学会「ショウジョウバエ幼虫の神経行動遺伝学：分子、回路、計算原理、そしてロボティクス」を主催した。国内外から多数の参加者（国内 25 名・日本国外 47 名）を迎え、神経回路の解明に向けた活発な議論を行った。また、堀田研究室、桑島研究室、当研究室において長年に亘り研究に携わった高須助教が本年 3 月に退職した。

7.1.1 運動パターン生成の基盤となる神経細胞及び遺伝子の同定と機能解析

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、介在神経細胞の機能や結合様式に関する知見は、運動神経細胞や感覚神経細胞に比して著しく少ない。これまで我々は遺伝学的手法を駆使し、ショウ

ジョウバエ幼虫の運動回路を構成する介在神経細胞群を同定し、その機能解析を進めている。

ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動を制御する新規介在神経細胞群の探索（長谷川恵理、丸田祥樹、坂巻裕美、能瀬聡直）

我々は、ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動をモデルとして、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。ぜん動運動時の運動神経細胞の活動を制御する介在神経細胞群を同定するために、抗体染色法などを用いてぜん動運動を制御する神経細胞で発現している Gal4 系統を探索した。ショウジョウバエでは特定の神経細胞の可視化や活動操作に Gal4/UAS システムが用いられており、Janelia Farm 研究所で配布されている様々な神経細胞で Gal4 を発現するシステムを利用した。探索の結果いくつかの候補系統が得られた。その中の一つ R47E12-Gal4 系統は各神経分節にぜん動運動と関連した波状の活動を示す 2 種類の介在神経細胞（W neuron）を含んでおり、これらの神経細胞の活動を強制的に亢進させると筋収縮が誘導されることがわかった。さらに W neuron と運動神経細胞との間にシナプス結合があることが示唆された。以上の結果から、W neuron は蠕動運動の際に運動神経細胞を活性化する介在神経細胞である可能性が高いと考えている。今後は他の候補系統についても神経細胞の形態および活動パターン、さらにお互いの神経細胞同士や運動神経細胞に対する結合様式を明らかにすることで、蠕動運動を制御する神経回路を明らかにしていきたいと考えている。

介在神経細胞 R1 の機能解析（板倉由季、高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直）

本研究では、前年度までに新規に同定した介在神経細胞 R1 の機能解析を行った。ぜん動運動は体の尾端から頭端へと各体節の筋肉が順番に収縮することで体を前進させる運動であり、これと一致して、対応する運動神経細胞の活動が腹部神経節の尾側から頭側に向けて伝播することが確認されている。R1 は腹部神経節の分節 A1 から A7 に一対ずつ、計 14 個存在し、運動神経細胞の波状の活動に 2,3 分節遅れて同じく波状の活動パターンを示す。このため R1 はぜん動運動に関わる機能をもつと考えられる。また、R1 が運動神経細胞に対して直接抑制性の入力を行うことを示唆する解剖学的な実験結果が得られていた。しかし、神経細胞の機能解析をするうえで近年盛んに行われている活動操作実験を R1 特異的に行うのに適した Gal4 系統がなく、R1 の機能解析は困難であった。

本年度は米国 Janelia Farm Research Campus に所属する Pulver 博士と共同研究を開始し R1 特異的な Gal4 系統が利用可能になったため、R1 の神経活動を操作し、行動に異常が見られるかを観察した。結

果として、R1の神経活動亢進がぜん動運動を抑制することがわかった。これはR1が運動神経細胞を抑制することを示唆するそれまでの結果と一致する。一方R1の神経活動抑制は顕著な行動上の異常を引き起こさなかった。この理由としては、活動抑制が不十分である可能性や、R1の機能が他のニューロンなどによって補われる可能性がある。

以上の結果より、R1は同じ神経分節内の運動神経細胞の活動をそのピークより遅れて抑制し、下がりつつある運動神経細胞の活動を完全に終わらせる役割を担っている可能性がある。

本研究は、米国 Janelia Farm Research Campus 研究所の Dr. Stephan Pulver との共同研究である。

運動回路における GABA 作動性神経細胞の機能解析 (伏木彬、高坂洋史、能瀬聡直)

動物の歩行や遊泳といった定型的な運動は、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によって制御されている。この周期的な活動を維持するためには、興奮性神経細胞と抑制性神経細胞の調和の取れた活動が必要であり、特に抑制性神経細胞は回路における活動の調節及び同期に対して働き、CPGのような周期的な運動出力を行う回路において重要な役割を担っていると考えられている。

ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動は、尾部から頭部へ向けて各体節の筋肉が収縮と弛緩を繰り返すことで生じる。この逐次的な筋肉の波の伝播は、中枢神経系内の興奮性及び抑制性の介在神経細胞が、規則正しいリズムで互いに調和を保ちながら活動することで実現されると考えられている。しかし、ショウジョウバエ幼虫の介在神経細胞の働きについては不明なところが多く、特に運動回路における役割についてはほとんど明らかにされていない。そこで本研究では、抑制性神経細胞の一種である GABA 作動性神経細胞に着目して、ショウジョウバエ幼虫の運動回路の機能解析を行った。

ショウジョウバエ幼虫の中枢神経系内では GABA 作動性神経細胞は多数存在する。まず、少数の GABA 作動性神経細胞において発現する系統を免疫染色法により探索し、いくつか候補を選定した。その中でもより特異的に発現する系統を用いて神経細胞の形態を詳しく調べたところ、腹部神経節の側部に細胞体また神経突起が腹側の領域に伸びている GABA 作動性神経細胞の一つを同定した。本研究ではこの神経細胞を GDLs (GABAergic dorsolateral neurons) と名づけた。この GDLs に蛍光カルシウムセンサー (GCaMP) 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蛍光強度が強くなり、運動神経細胞の活動と同期していることが分かった。

次に GDLs の運動制御における働きを調べた。三齢幼虫期に GDLs の活動を亢進させると、幼虫の腹部の筋肉を弛緩して動けなくなることが分かった。一方で、神経伝達を一時的に阻害すると幼虫のぜん動運動が速くなることが分かった。また、GDLs の

活動を胚期から三齢幼虫期を通して抑制したところ、ぜん動運動に著しい機能障害が見られた。以上の結果から、GDLs はぜん動運動を制御する介在神経細胞であり、運動回路の機能発達においても主要な役割を担っていることが示唆された。

最後に、GDLs が運動神経細胞とシナプスを形成しているかを GRASP (GFP reconstitution across synaptic partners)-technique を用いて検証したところ、GDLs のシナプス前終末に GFP シグナルは検出されなかった。これは GDLs と運動神経細胞は直接シナプス結合をしていないことを示唆する。次に、ショウジョウバエ幼虫の腹部神経節の電子顕微鏡連続切片画像を用いて GDLs を再構築し下流の神経細胞を探索したところ、いくつか介在神経細胞を同定した。この下流の神経細胞のうち一つは、当研究室の先行研究により同定されている PMSI (period-positive median segmental interneurons) 神経細胞であり、運動神経細胞と直接シナプスを結び、ぜん動運動の制御に関与していることが分かった。このように GDLs と下流の細胞との機能的な結合を調べることにより、ぜん動運動における新たな制御機構が明らかになった。

本研究は、米国 Janelia Farm Research Campus 研究所の Dr. Albert Cardona との共同研究である。

運動速度制御の回路機構解析 (高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直)

本研究では、ショウジョウバエ幼虫の運動系をモデルとして、神経回路内で時空間活動パターンが生み出されるしくみの解明を進めた。特に、昨年度までに同定した抑制性介在神経細胞群 (PMSIs, per-Gal4 positive median segmental interneurons) に着目して、運動回路内を神経活動が伝播していく速さが PMSIs によってどのように制御されているのかを解析した。

これまでに、PMSIs の神経活動を抑制すると、ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動が遅くなることを見出している。そこで、PMSIs と運動神経細胞との機能的関係を調べるために、2種のカルシウム感受性タンパク質を用いて、PMSIs と運動神経細胞の活動を同時に測定した。すると、PMSIs はそれがシナプス結合している運動神経細胞の活動よりも遅れて活動した。このことから、PMSIs は、運動神経細胞が活動する時間的長さを短く調節していると考えられる。そこで、PMSIs の活動が運動出力に与える影響を調べるために、筋収縮の経時測定、及び、運動神経の電位変化測定を行なった。すると、PMSIs を抑制することで、筋収縮の時間的長さ、及び運動神経のバースト活動の長さが長くなった。このことは、PMSIs が運動神経細胞の活動長さを短くして運動速度を調節していることを示唆する。

PMSIs がどのような神経支配を受けているかを調べるために、上流の介在神経細胞の探索を行なった。PMSIs で遺伝子発現を誘導する per-lexA 系統を作成し、PMSIs とシナプスを形成する介在神経細胞の候補を探索したところ、下行性の神経線維を持つ介在神経細胞の同定に成功した。この介在神経細胞の

活動を抑制したところ、ぜん動運動速度が遅くなったことから、この新規介在神経細胞がPMSIsを介して運動制御を担っている可能性が示唆される。今後、このような介在神経細胞の同定を網羅的に進めることにより、神経回路内における活動伝播速度がどのように生み出されているのかが明らかにできると期待できる。

本研究は、東京薬科大学生命科学部の森本高子博士との共同研究である。

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出す。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。

光による神経細胞の活動可視化及び活動制御（松永光幸、宮本道人、高坂洋史、能瀬聡直）

運動回路内の特定のニューロン群の活動を、光による神経活動制御（オプトジェネティクス）を用いて亢進または抑制したときの、下流のニューロン群の時空間的な発火パターンを、カルシウムイメージングを用いて観測できる実験系の立ち上げ、評価を行った。

ニューロン群の活動を亢進しながら、同時に活動をイメージングする実験系の評価には運動神経細胞(MNs)に光感受性陽イオンチャネルChR2(Channelrhodopsin2)とカルシウム感受性蛍光タンパク質RCaMPを発現した系統を用いた。490 nm付近のレーザー光によってChR2を励起しながら、580 nm付近の光によってRCaMPを励起し、RCaMPの蛍光測光を実現する実験系を構築した。このようにして、MNsの活動亢進によって生じたMNsの活動変化を蛍光強度変化として検出することに成功した。

ニューロン群の活動を抑制しながら、同時に活動をイメージングする実験系の評価にはMNsに光感受性塩化物イオンポンプNpHR3(Halorhodopsin3)とカルシウム感受性蛍光タンパク質GCaMPを発現した系統を用いた。560 nm付近のレーザー光によってNpHR3を励起しながら、490 nm付近の光によってGCaMPを励起し、GCaMPの蛍光測光を行なった。このようにして、MNsの周期発火の抑制によって生じたMNsの活動変化を蛍光強度変化として検出した。

これらの結果から、オプトジェネティクスを用いてニューロンの活動を亢進または抑制したときの、下

流のニューロン群の時空間的な発火パターンを、カルシウムイメージングを用いて観測することが可能になった。

また、より限局した空間領域に一過的な神経活動操作を行なう手法の開発を進めた。レーザーを直径5マイクロメートルほどの平行光にすることで、単一のニューロン（細胞体は直径10マイクロメートルほど）だけを効率よく光刺激することに成功した。

このようにして一ニューロンを0.1秒間活動亢進し、同時に他のニューロン群の活動をRCaMPでイメージングすると、活動亢進直後に一部のニューロン群で蛍光強度が一過的に上昇する現象が観察された。このことは、これらのニューロン群が、活動亢進を行ったニューロンから神経伝達を受けたことを示唆している。

現在、特定のニューロン群のすべての細胞に本手法を順に適用し、神経回路の入出力関係を調べる実験を行っている。今後は本手法を様々な種類のニューロン群に用いて、回路レベルでの解析を行うことを計画している。

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し、ニューロン同士のつながりを調べている。我々は特に、PMSIsと名付けた介在ニューロンに注目し、PMSIs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。介在ニューロンはニューロン同士をつなぐニューロンであり、運動回路の構成要素として重要であるが、その多くが未同定である。PMSIsは当研究室で同定した介在ニューロンであり、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PMSIs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、PMSIsにChannelrhodopsin 2(ChR2)を発現させた幼虫を用い、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で、青色光照射によってChR2を発現する細胞は陽イオンが細胞内に流入し、活動が亢進する。実験の結果、PMSIs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。さらに、glutamate-gated chloride channelの阻害剤であるpicrotoxinを用い、同様の実験を行ったところ、PMSIsの活動亢進による運動ニューロンのスパイク発火率の減少は見られなくなった。これらの結果を合わせて、PMSIsから運動ニューロンへの入力、運動ニューロンのglutamate-gated

chloride channel を開き、運動ニューロンを抑制していることを見出した。

さらに、我々はパッチクランプ法による電気記録と同時に、カルシウムイメージングによる腹部神経節内の運動ニューロン全体の活動の様子を記録した。カルシウムイメージングでは、幼虫のぜん動運動に対応する、運動ニューロンの活動の伝播が蛍光強度の変化として観測できる。この同時記録を用いて、一つのぜん動運動の周期の中で単一の運動ニューロンがどのように活動しているのかを調べている。

本研究は、東京薬科大学生命科学部の森本高子博士、理化学研究所の風間北斗博士との共同研究である。

神経細胞集団のカルシウムイメージングデータの定量解析 (尹永択、高坂洋史、能瀬聡直)

神経細胞群の集団現象を定量的に調べるために、本研究では統計的かつ回路レベルでの神経活動解析を目指す。神経細胞は3次元空間に分布していることから、従来の特定の焦点面のみの経時的イメージングでは、神経回路に含まれるすべての神経細胞を撮影することはできない。それを克服するために、従来の共焦点顕微鏡と圧電素子を組み合わせて焦点面を高速で切り替えるようにした4Dイメージング技術を使い、ほぼ同時刻での3次元空間の撮影を可能にした。

4Dカルシウムイメージングで取得した、およそ100個程度の細胞集団の時系列データを解析するため、まず、機械学習を用いて蛍光画像から細胞を自動検出する手法を構築した。また、自動検出から得られた時系列データを使いぜん動運動を反映した神経回路の活動を統計的に扱うため、ぜん動運動の向き(前向き、後ろ向き)を時系列データから自動的に分けることを試みた。すべての細胞からの時系列データ列を多様体上の点列と考え、クラスタリングすることにより二つの向きを綺麗に分けることに成功した。

今後は神経細胞の位置情報と活動情報を合わせ4次元(3次元の位置情報+活動の位相)の空間におとし、その空間内での細胞のグループ分けすることにより細胞を機能単位に分類することと、活動中の位相情報から細胞間の相互作用を議論する予定である。

本研究は、京都大学情報学研究科の石井信博士、中江健博士との共同研究である。

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。

胚期の神経回路の協調的活動の発達機構の研究 (川崎達平、能瀬聡直)

動物の脳は、多数の神経細胞が互いに繋がって機能的な神経回路を構成し、その神経回路が多数集まること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神経回路の設計図を調べることに繋がり、神経回路の動作機構を明らかにするのに重要である。

今年度、我々は解剖したショウジョウバエの胚において、様々な神経細胞群のカルシウムイメージングを行い、運動神経回路、GABA作動性神経回路、コリン作動性神経回路、神経回路全体における、神経活動の発達の様子を観察した。その結果、これら全ての系統で、腹部神経節(以下VNC)において、初めは散発的に活動していた神経細胞群が徐々に同時に活動する部分を広げていき、VNCにおける波状の活動に統合されていく様子が観察された。また、それぞれの神経細胞群において、まずは運動神経細胞群、次にコリン作動性神経細胞群、次にGABA作動性神経細胞群の順番で、神経活動が統合されていき、VNC全体としての活動に発展していく発達過程が明らかになった。

今後は、より高感度のカルシウム感受性蛍光タンパク質を使い、観察条件を整えるなどして、より詳細に発達に伴う神経活動の時間発展を明らかにするつもりである。また、神経活動の操作を行って、運動回路における神経活動の発達機構の解明を目指す予定である。

<報文>

(原著論文)

- [1] Matsunaga, T., Fushiki, A., Nose, A. and Kohsaka, H.: Optogenetic Perturbation of Neural Activity with Laser Illumination in Semi-intact *Drosophila* Larvae in Motion. *J. Vis. Exp.* 2013 Jul 4;(77), e50513 (2013).
- [2] Fushiki, A., Kohsaka, H. and Nose, A.: Role of sensory experience in functional development of *Drosophila* motor circuits. *PLoS One.* 2013 Apr 19;8(4), e62199 (2013).
- [3] Okusawa, S., Kohsaka, H. and Nose, A.: Serotonin and downstream leucokinin neurons modulate larval turning behavior in *Drosophila*. *J Neurosci.* 34, 2544-2558 (2014).

(総説)

- [4] 能瀬聡直: ショウジョウバエ幼虫を用いて定型運動の制御機構を探る *細胞工学* 33, 249-254 (2014).

(学位論文)

- [5] 伏木彬: Dissecting the motor circuits of *Drosophila* larvae: the role of sensory experience and GABAergic interneuronal regulation (博士論文、新領域創成科学研究科)
- [6] 尹永扱: 4D カルシウムイメージングと細胞自動検出による運動回路の解析 (修士論文)
- [7] 川崎達平: ショウジョウバエ胚を用いた神経細胞集団の協調的活動の発生メカニズムに関する研究 (修士論文、新領域創成科学研究科)
- [8] 坂佳祐: ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動制御における GABA-B-R3 発現神経細胞の役割 (修士論文、新領域創成科学研究科)
- [9] 森竜太: ショウジョウバエ幼虫における振動活動性神経細胞と運動神経細胞の時空間活動パターン解析 (修士論文、新領域創成科学研究科)
- (著書)
- [10] 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研究、「オプトジェネティクス」、エヌ・ティー・エス、141-153 (2013). (著書、分担執筆)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [11] Kohsaka, H. and Nose, A.: Innate speed of larval locomotion is generated by segmental pre-motor inhibitory interneurons. 2nd Asia-Pacific *Drosophila* research conference (APDRC), 2013.5.13-16, Seoul National University, Seoul, Korea
- [12] Itakura, Y., Kohsaka, H., Pulver S. and Nose, A.: Identification and functional analyses of interneurons in the neural network that regulates the peristaltic locomotion of *Drosophila* larvae. International symposium Optogenetics 2013. 2013.9.26-27 Tokyo, Japan
- [13] Hasegawa, E. and Nose, A.: Search for cholinergic interneurons that regulate larval locomotion. Neurobiology of *Drosophila*, CSHL Meeting, 2013.10.1-5, Cold Spring Harbor, USA
- [14] Itakura, Y., Kohsaka, H., Pulver S. and Nose, A.: Identification and functional analyses of interneurons in the neural network that regulates the peristaltic locomotion of *Drosophila* larvae. Neurobiology of *Drosophila*, CSHL Meeting, 2013.10.1-5, Cold Spring Harbor, USA
- [15] Kohsaka, H., Takasu, E. and Nose, A.: Mapping neural connections with PMSIs a group of premotor inhibitory interneurons. Behavioral Neurogenetics of Larval *Drosophila*: Molecules, Circuits, Computation and Robotics, 2014.3.9-12, Atami, Japan
- [16] Hasegawa, E and Nose, A: Search for cholinergic interneurons that regulate larval locomotion. Behavioral Neurogenetics of Larval *Drosophila*: Molecules, Circuits, Computation and Robotics, 2014.3.9-12, Atami, Japan
- [17] Itakura, Y., Kohsaka, H., Pulver S. and Nose, A.: Identification and functional analyses of interneurons in the neural network that regulates the peristaltic locomotion of *Drosophila* larvae. Behavioral Neurogenetics of larval *Drosophila*: Molecules, Circuits, Computation and Robotics. 2014.3.9-12, Atami, Japan
- [18] Fushiki, A. Kohsaka, H. Takasu, E. and Nose, A.: Identification and functional analysis of a class of local GABAergic interneurons in the *Drosophila* larval motor circuits. Behavioral Neurogenetics of Larval *Drosophila*: Molecules, Circuits, Computation and Robotics. 2014.3.9-12, Atami, Japan
- [19] Takagi, S., Kohsaka, H., Kazama, H., Nose, A.: Optogenetic and electrophysiological dissection of *Drosophila* neural networks that regulate larval locomotion. Behavioral Neurogenetics of larval *Drosophila*: Molecules, Circuits, Computation and Robotics. 2014.3.9-12, Atami, Japan
- 招待講演
- [20] 能瀬聡直: Optogenetic dissection of motor circuits in *Drosophila*. Developmental Neurobiology Course 2013, 沖縄科学技術大学院大学 Okinawa Institute of Science and Technology 2013.7.26, Okinawa
- [21] Nose, A.: Functional dissection of the central circuits that regulate larval locomotion. Behavioral Neurogenetics of larval *Drosophila*: Molecules, Circuits, Computation and Robotics. 2014.3.9-12, Atami, Japan
- 主催学会
- Behavioral Neurogenetics of larval *Drosophila*: Molecules, Circuits, Computation and Robotics. 2014.3.9-12, KKR Atami, Atami, Japan
- (国内会議)
- 一般講演
- [22] Kohsaka, H. and Nose, A.: Segmental control of motor output by pre-motor inhibitory interneurons for generating innate speed of larval locomotion in *Drosophila*. 第 36 回日本神経科学大会, 2013.6.20-23 京都
- [23] Fushiki, A. Kohsaka, H., and Nose, A.: Identification and functional analysis of a class of local GABAergic interneurons in the *Drosophila* larval motor circuit. 第 36 回日本神経科学大会, 2013.6.20-23 京都

- [24] Matsunaga T., Kohsaka H., Nose A.: Simultaneous application of optogenetics and Ca²⁺ imaging for system-level analyses of motor circuits. 第 36 回日本神経科学大会, 2013.6.20-23 京都
- [25] Takagi, S., Kohsaka, H., Kazama, H., Nose, A.: Optogenetic and electrophysiological dissection of *Drosophila* neural networks that regulate larval locomotion. 第 36 回日本神経科学大会 2013.6.20-23 京都

招待講演

- [26] 高坂洋史: ショウジョウバエ幼虫の運動制御. 第 7 回 Motor Control 研究会, 2013.9.5-7, 東京大学農学部
- [27] 高坂洋史, 能瀬聡直: 可視光線と遺伝学で神経回路のはたらきを調べる. 日本遺伝学会 第 85 回大会, 2013.9.19-21, 慶応義塾大学日吉キャンパス
- [28] Kohsaka, H., Takasu, E. and Nose, A.: Normal locomotion speed requires pre-motor inhibitory interneurons in *Drosophila* larva. 第 91 回日本生理学会, 2014.3.16-18, 鹿児島大学

(講義等)

- [29] 能瀬聡直, 高坂洋史: "Calcium imaging in *Drosophila*" Developmental Neurobiology Course 2013, 沖縄科学技術大学院大学 Okinawa Institute of Science and Technology 2013.7.27-28, Okinawa
- [30] 能瀬聡直, 学習院大学大学院 集中講義 2013.9.3-4

7.2 樋口研究室

本年度の研究の進展は、ダイニン分子の機能や性質が次第に明らかになってきたことと、マウスを用いた非侵襲イメージングが完成して、それを応用した好中球およびがん細胞のイメージングを行った点である。さらに、マウス内筋線維に見られる微小管に関する興味ある研究が進展した点である。

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、組換え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 細胞質ダイニンの力発生

細胞質ダイニンは ATP 加水分解のエネルギーを使って微小管上を移動する分子モーターである。2 つの細胞骨格モーター「細胞質ダイニン」と「キネシン」は微小管上を移動しながらオルガネラやタンパク質を輸送する役割を担っており、ダイニンは細胞膜から核付近まで輸送し、キネシンは反対方向核から細胞膜まで輸送を行う。細胞内では、この逆方向に移動するモータータンパク質をうまく調節して正確に輸送を行っていると考えられるが、その制御機構は分かっていない。この制御機構のモデルの 1 つに「綱引きモデル」がある。このモデルは輸送する荷物に結合しているダイニンとキネシンの数によって移動する方向が決定されるというものであり、荷物に結合する分子数と 1 分子が発生する事ができる最大力が重要な要素となる。ダイニンが発生する力に関しては我々のグループが天然ダイニンを用いて 7pN であると主張しているのに対し、1 - 2pN しか出さないと主張するグループもあり、未だに論争が続いている。そこで我々はどちらが正しいかを確かめるために運動を制御する可能性のある尾部を切り取った

モーター部位のみヒト細胞質ダイニンを発現し、運動と力測定を行った。ダイニンを結合した 220nm のビーズを光ピンセットを用いて捕捉してガラス上にある微小管上に結合させ、ATP を加えてダイニンを運動させた時のビーズの変位を計測する事により最大発生力を見積もった。その結果、ダイニンのモーター部位の最大力は約 7pN であり、我々のグループが以前に報告したブタ精製ダイニンの最大力と同程度であった。

7.2.3 ダイニン分子の力発生機構

ダイニン分子は細胞内の輸送や分裂にかかわる重要なタンパク質である。ダイニンが運動するためには、ダイニンが ATP を加水分解して、パワーストロークを行うと考えられている。したがって、ダイニンの運動メカニズムを理解する上で重要である。ダイニン 1 分子のパワーストローク測定を目的として、ダイニンの精製やその他の試料を作製し、顕微鏡装置を構築した。単頭ヒトダイニンをヴァキュロウイルスにて、SF9 細胞に感染をさせて、ダイニンを発現・精製を行った。このダイニン分子をポリスチレンビーズに結合して、子のダイニンと微小管を相互作用させるために、微小管の両端にレーザートラップされたポリスチレンビーズを結合した。

測定の結果、トラップビーズの変位の標準偏差の値を定量的に評価することで、ダイニンと微小管が結合する位置を特定できた。本実験では、ダイニンはパワーストロークにより運動する距離を $2.1 \pm 1.0\text{nm}$ (誤差は SE) と算出した。ダイニンと微小管が結合する時間は、 $5\mu\text{M}$ ATP 存在下で 65 ミリ秒であり、ATP 濃度がミカエリスメンテン式な依存を示すと仮定した場合のダイニンの ATP 結合に関する 2 次の反応速度定数は $3.1 \times 10^6 / \text{M} \cdot \text{sec}$ と算出された。

本研究の実験結果より、ダイニンは以下のような歩行運動モデルで運動すると推定した。一方のダイニン head が微小管から解離している間に、他方のダイニン head はパワーストロークを発生し、微小管のマイナス方向に 2.1nm 運動する。その後、微小管から解離してブラウン運動するダイニン head は、微小管と結合する位置までさらに 6.1nm 運動したのち結合する。このサイクルがダイニン 1 ステップに伴う重心移動、つまり歩幅 $8.2\text{nm} = 2.1\text{nm} + 6.1\text{nm}$ に相当すると考えられる。本研究で得られたダイニンのパワーストローク発生に伴う運動は、ダイニンの運動機構をさらに深く理解する上で今後重要となるであろうと思われる。

7.2.4 好中球内小胞の高速輸送

これまでに我々が開発した非侵襲 *in vivo* 観察技術を用いることで、マウス耳介内において、活性化した好中球内部の小胞輸送速度は、しばしば $4\mu\text{m}/\text{sec}$ にも達することが明らかとなった (Kikushima et al. Scientific reports (2013))。精製された単一のモーター

タンパク質（細胞質ダイニンやキネシン）の運動速度は $\sim 1\mu\text{m}/\text{sec}$ でしかないことから、これには、複数のモータータンパク質が協調して働くといった未知の機構によってなされていると予想される。

この高速小胞輸送のより詳細な特徴を明らかにするために、我々は、QDを内包した明るい小胞を持つ、活性条件の良い好中球を精製する手法を編み出した。この精製した好中球内部における小胞の速度を解析したところ、マウス耳介内で観測された際と同様に、 $2\mu\text{m}/\text{sec}$ を超える高速小胞輸送が頻繁に観測されることが確認された。

このようにして精製された好中球に微小管重合阻害剤であるノコダゾールを作用させたところ、 $2\mu\text{m}/\text{sec}$ 以上での高速小胞輸送が観測されなくなった。一方で、アクチンのモータータンパク質である myosin II の阻害剤である blebbistatin や、myosin II の上流で活性制御を行っている ROCK の阻害剤である Y-27632 を作用させた際にも、 $2\mu\text{m}/\text{sec}$ 以上での高速小胞輸送の頻度は大きく減少することが観測された。



図 7.2.1: 多くの QD を内包した明るい小胞を持つ、精製した好中球の蛍光画像。画面横幅: $35.6\mu\text{m}$

7.2.5 がん細胞の非侵襲 *in vivo* イメージング

マウス内がん細胞の非侵襲 *in vivo* イメージングを行うために、厚さが $150\sim 200\mu\text{m}$ と薄いマウスの耳介に着目し、マウス耳介を「非侵襲 *in vivo* イメージングのための生体チャンバー」と位置付け、非侵襲 *in vivo* イメージングツールとしての開発に成功した。

今年度はさらに、がん組織形成率データの信頼性を向上させるために検体数を増やし再検討を行った。なお、その際、昨年度までの KPL4-EB1-GFP, U87MG, MDA-MB-231 (WT), MDA-MB-231-GFP-tub の 4 株の他に MDA-MB-231-EB1-GFP を加え、計 5 株における接種細胞数の再検討を行った。その結果、「ある一定以上の接種細胞数があれば高確率 (100%) でゼノグラフトモデルが作製できる」という昨年度と同じ結果が得られ、データの信頼性を確認することができた。また、さらに、昨年度までは蛍光ナノ粒子 (QD) を用いてイメージングを行っていたが今年度は GFP 発現細胞 MDA-MB-231-GFP-tub 細胞を用い、耳介内のがん組織作製し、スピンドイスクタイ

プの共焦点顕微鏡により非侵襲下で観察したところ、細胞分裂直後と思われる GFP 発現細胞を捉えることに成功した (図 7.2.2)。さらに GFP 発現がん組織全域 (約 $2\text{mm}\times 2\text{mm}\times 0.15\text{mm}$) の 3 次元像を非侵襲にて捉えることにも成功した。

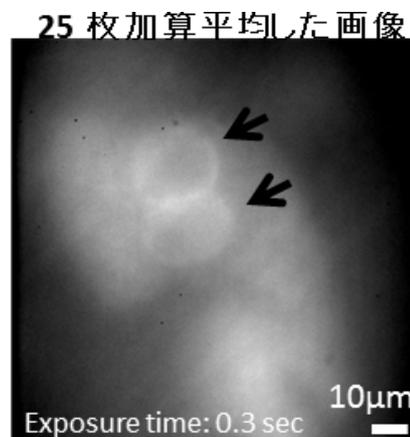


図 7.2.2: GFP 発現乳がん細胞由来がん組織の非侵襲 *in vivo* イメージング

7.2.6 筋肉内微小管とダイニンのダイナミクス

筋肉では、主にミオシンとアクチンの 2 種類のタンパク質によって収縮が担われ、これらのタンパク質とその他の収縮系タンパク質が主な構成タンパク質と考えられてきた。しかしながら近年の研究により、微小管も筋肉の構造維持に深く関わっていることがわかってきた。但しこれらの結果は、免疫染色による静的な画像に基づくものであり、微小管の役割を明らかにするためには、その分子動態を把握することが必要である。そこで本研究では、筋肉内における微小管やダイニンの動態を明らかにし、筋肉構造維持におけるこれらタンパク質の機能的な解釈を得ることを目的としている。具体的には、3 週齢マウスにエレクトロポレーションにより GFP を融合させたチューブリンやダイニン中間鎖を骨格筋内に発現させて、その動態を *in vivo* ライブイメージングする。まず微小管重合端に局在する EB3-GFP を発現させたところ、筋線維の長軸方向に沿った運動が観測された。一方、ダイニン中間鎖 (IC)-GFP を発現させたところ、単軸方向に沿って分布する様子が観測された。また筋線維によっては、長軸方向に移動する IC-GFP も観察された。これらの結果をまとめると、微小管重合は主に筋線維の長軸方向に沿って起きる。一方、ダイニン中間鎖の動態観察から、ダイニンは筋線維の単軸方向に沿って停留するものが大半であるが、筋線維によっては、長軸方向にそって移動するダイニンも存在し、その速度は微小管重合速度の 10 倍近く速いことから、微小管重合による

運動ではないことが明らかである。今後は、こうした動態メカニズムを明らかにしていき、微小管やダイニンの機能的役割について検討にしていく。

<報文>

(論文)

- [1] Yasuhiro Suzuki, Chandra Nath Roy, Warunya Promjunyaku, Hiroyasu Hatakeyama, Kohsuke Gonda, Junji Imamura, Biju Vasudevan Pillai, Noriaki Ohuchi, Makoto Kanzaki, Hideo Higuchi, and Mitsuo Kaku. Single quantum dot tracking reveals that an individual multivalent 2 HIV-1 Tat-protein transduction domain can activate machinery for 3 lateral transport and endocytosis. *Mol. Cell Biol.* 33: 3039-3049 (2013).
- [2] Kaya. M. and H. Higuchi. Stiffness, working stroke and force of single myosins in skeletal muscle: Elucidation of these mechanical properties by nonlinear elasticity. *Cell and Mol. life Sci.* 70: 4275-4292 (2013).
- [3] Kenji Kikushima, Sayaka Kita and Hideo Higuchi. A non-invasive imaging for the in vivo tracking of high-speed vesicle transport in mouse neutrophils. *Scientific reports* 3: doi:10.1038/srep01913 (2013).
- [4] Ryoma Nakao, Kenji Kikushima, Hideo Higuchi, Nozomu Obana, Nobuhiko Nomura, Bai DongYing, Makoto Ohnishi, and Hidenobu Senpuku. Novel Approach for Purification and Selective Capture of Membrane Vesicles of Periodontopathic Bacteria, *Porphyromonas gingivalis*. *PLoS One* 2014 In press

<学術講演>

(国際会議)

招待講演、シンポジウム

- [5] Hideo Higuchi, Kenji Kikushima, Sayaka Kita: Noninvasive in vivo imaging of neutrophil and tumor in mouse auricles. *Dynein 2013 International Workshop*, Kobe (2013.11)
- [6] Hideo Higuchi, Kenji Kikushima and Sayaka Kita "Noninvasive in vivo imaging of neutrophil and tumor in mouse auricles" *Molecules view The International Symposium on Multi-Scale Muscle Mechanics.*, Kitakyusyu Fukuoka (2013.11)
- [7] Hideo Higuchi, Kenji Kikushima and Sayaka Kita. Biophysics toward noninvasive imaging. *International Symposium on Nanomedicine molecular Science*, Nagoya (2014.1)

(国内会議)

招待講演、シンポジウム

- [8] Hideo Higuchi and Norio Fukuda. Symposium on Biophysics toward In Vivo work. *Biophysical society of Japan, Kyoto* (2013.10)

- [9] Motoshi Kaya, Hideo Higuchi Molecular properties and dynamics of single skeletal myosins designed for force generations in ensemble of myosin molecules. *Biophysical society of Japan, Kyoto* (2013.10)
- [10] Kenji kikushima, Sayaka Kita, Hideo Higuchi. A non-invasive technique for the in vivo tracking of high-speed vesicle transport in mouse neutrophils. *Symposium on Biophysics toward In Vivo work.* *Biophysical society of Japan, Kyoto* (2013.10)

一般講演

- [11] 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11回大会, 東京 (2013.6)
- [12] 菊島健児 非侵襲 in vivo イメージング技術を用いたマウス好中球内における高速小胞輸送の解析 第3回分子モーター討論会, 東京大学農学部 (2013.7)
- [13] 樋口秀男, 菊島健児, 喜多清 Noninvasive in vivo imaging of neutrophil and tumor in mouse auricles *International Symposium on Nanomedicine Molecular Science 2013*, Tokyo University (2013.10)
- [14] 神原丈敏, 木下慶美, 中山貴之, 樋口秀男 *Biophysical and Biochemical characterization of human cytoplasmic dynein.* 第51回日本生物物理学会年会, 京都 (2013.10)
- [15] 木下慶美, 神原丈敏, 池田諭史, 樋口秀男 *Power Stroke Measurement of Human Cytoplasmic Dynein* 第51回日本生物物理学会年会, 京都 (2013.10)
- [16] 池田諭史, 茅元司, 樋口秀男 *Contribution of S1 and S2 portion of myosin to nonlinear elasticity of skeletal myosin molecules* 第51回日本生物物理学会年会, 京都 (2013.10)
- [17] 佐々木一夫, 樋口秀男 *Mechanism of backward stepping in myosin V* 第51回日本生物物理学会年会, 京都 (2013.10)
- [18] 喜多清, 樋口秀男 *Noninvasive in vivo imaging of tumor cells in mouse auricle* 第51回日本生物物理学会年会, 京都 (2013.10)
- [19] 喜多清, 樋口秀男, マウス内ヒトがん細胞を非侵襲イメージングする技術の開発. *Vivid Workshop*, 加賀 (2014.2)

<その他>

(社会活動関連)

- [20] 樋口秀男「細胞の謎をさぐる」東大理学部高校生のための夏休み講座 2013 東大(本郷)東京 (対象 高校生・中学生) 2013.7.25
- [21] 菊島健児 日本免疫学会主催「免疫ふしぎ未来 2013」協力員 日本科学未来館 2013.8.11
- (新聞報道)
- [22] 日刊工業新聞「東北大、ウイルス由来のペプチド利用し細胞内移動「ナノロボット」作製」2013.6.14
- [23] 河北新報「東北大、ナノ粒子のロボット化成功 薬剤導入技術向上に期待」2013.6.20

8 技術部門

(佐伯、八幡、柏葉、南野、大塚、*南城、*阿部、*千葉)

*技術補佐員

技術部門では、実験装置試作、安全衛生、IT、学生実験、学生実習、研究支援などの業務を行っている。実験装置試作室では、12月に阿部が退職し、1月に千葉が採用になった。技術部門の担当教員(福山、長谷川、岡本、須藤)と月に1度の物理技術室ミーティングを行った。また、試作室担当の地感専攻教員のゲラー、化学専攻教員の長谷川も加え、試作室ミーティングを4回行った。

8.1 実験装置試作室

(大塚、南城、阿部、千葉)

8.1.1 利用状況

2013年4月から2014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(356件)
- 設計及び部品等の問い合わせ(外注を含む)
- 外注発注(112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、地球惑星科学船森研、小林技術職員、西田助教、吉川研、田中研、小沢研、飯塚、高橋、鈴木、生物科学寺島研、化学 長谷川研、山内研、岩崎研、鍵研、永田研、松尾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

8.1.2 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:21名(物理16名、化学2名、地感3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. 安全衛生上の注意事項、旋盤、フライス盤、シャーリング(切断機)、の使用方法の概略

<報文>

(原著論文)

- [1] 平成25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、2014年3月)。

8.2 技術室

(佐伯、八幡、南野)

8.2.1 安全衛生

(八幡)

- 理学系環境安全管理室員として労働安全に関する業務を行った。特に高圧ガス管理マニュアルの改訂を起案した。
- 理学系防災連絡会のメンバーとして、コアとなる防災WGに参加し、災害時対応の高度化、特に災害時の飲み水確保用に理1号館の受水槽に取り出し用の水栓設置を起案した。

8.2.2 IT

(南野)

- 専攻サーバ運用管理(ウェブサーバ、メールサーバ、教務データベースサーバ)
一昨年のウェブサーバに引き続き、メールサーバ及び、教務データベースサーバを仮想環境に移行した。
- 理学系研究科情報システムチーム業務
メディアコンテンツの有効利用のため、Moodleを用いた共有サイトを構築し、男女共同参画アンケート、入学試験担当業務の説明資料の公開などを実施した。
理学系研究科ネットワーク管理の一環として、サブネットへのアクセスや情報コンセントなどの管理、理学系研究科認証システムアカウントの発行管理を担当した。

- テレビ会議システムの管理及びユーザサポート
テレビ会議システムの利用サポートやシステムのメンテナンスを行った。
- ヘルプデスク業務
研究室の IT トラブル対応及び、月例の教授会でのヘルプデスクを行った。

8.2.3 学生実験

- 物理学実験全体 (佐伯)
グループ編成、スケジューリング
- 物理学実験 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。今年度から新たに Field Programmable Gate Array (FPGA) を導入した。
- 物理学実験 I (南野)
3 年生夏学期の物理学実験 I の「計算機実験」の技術指導を行った。実験用サーバの管理を担当した。
- 物理学実験 II (佐伯)
3 年生冬学期の物理学実験 II の「生物物理学」を指導した。
蛍光タンパク質の変性とリフォールディングの実験および運動タンパク質の滑り運動測定の実験を検討し、導入した。
- 物理学実験機器更新 (佐伯、八幡)
「真空技術」の機器更新を行った。老朽化していた質量分析計は、パソコン制御の精密測定が可能なものについて性能検討の上、更新した。老朽化していた油拡散ポンプは、ターボ分子ポンプへの変更を企画した。

8.2.4 研究支援

(八幡)

学生実験用に引き続き、大学院生向けの FPGA 教材、カリキュラムを開発し講習会 (3 日間) を 3 セット実施した。

- 全参加人数 15 名
- 実習内容
講義: FPGA の仕組み、応用範囲
実習: FPGA を使ったデジタル回路の基礎、IP(ライブラリー) を使った回路設計、広帯域多チャンネルの Mixed Signal オシロスコープを使った信号観測

8.2.5 全学技術研修

東京大学の教室系技術職員を対象として、9 月 17 日から 9 月 19 日まで、エレクトロニクス研修 (初級コース) を地惑専攻の吉田英人技術専門員と一緒に行った。

- 参加人数 5 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

8.2.6 各種委員会

- 全学高圧ガスワーキンググループ (八幡)
- 技術職員研修企画委員会 (佐伯)
- 全学技術発表会準備委員会 (佐伯)
- 寒剤管理連絡担当者 (八幡)
- 理学系研究科技術委員会 (佐伯)
- 理学系研究科運営委員会 (佐伯)
- 理学系寒剤管理委員会 (八幡)
- 理学系環境安全管理室 (八幡)
- 理学系防災連絡会 (八幡)
- 自衛消防中核要員 (八幡)
- 理学系研究科・理学部 技術部シンポジウム実行委員 (南野)

<報文>

(原著論文)

- [1] 平成 25 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、2014 年 3 月).

(会議抄録)

- [2] K. Yawata: FPGA Material for the Undergraduate School, JPS Conf. Proc. 1, 017035 (2014).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [3] Kazushi Yawata : FPGA Material for the Undergraduate School, The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPs (APPC12), (Makuhari, Japan, July 14-19, 2013).

(国内会議)

一般講演

- [4] 八幡和志：液体窒素 CE タンクの安全対策と設備改善、平成 25 年度 機器・分析技術研究会 (鳥取大学、2013 年 9 月).
- [5] 八幡和志：学生実験授業への FPGA の導入、平成 25 年度 機器・分析技術研究会 (鳥取大学、2013 年 9 月).
- [6] 佐伯喜美子：物理学生実験における生物物理学実験の紹介、第 27 回理学系研究科・理学部 技術シンポジウム (東京大学、2013 年 11 月).
- [7] 八幡和志：Development of FPGA Material for Digital Electronics Education、第 27 回理学系研究科・理学部 技術シンポジウム (東京大学、2013 年 11 月).
- [8] 佐伯喜美子、吉田英人：東京大学大学院理学系研究科技術部の組織について、第 25 回生物学技術研究会 (岡崎コンファレンスセンター、2014 年 2 月).
- [9] 佐伯喜美子、八幡和志：物理学生実験における真空装置の更新、平成 25 年度 実験・実習技術研究会 in イーハトープいわて (岩手大学、2014 年 3 月).
- [10] 八幡和志：大学院生向け FPGA 教材の開発、平成 25 年度 実験・実習技術研究会 in イーハトープいわて (岩手大学、2014 年 3 月).
- [11] 南野真容子：Moodle を用いたメディアコンテンツ共有サイトの構築、第 9 回情報技術研究会 (九州工業大学、2014 年 3 月).
- [12] 八幡和志：大学院生向け FPGA 教材の開発、日本物理学会 第 69 回年次大会 (東海大学、2014 年 3 月 27-30 日).

II

Summary of group activities in 2013

1 Theoretical Nuclear Physics Group

Subjects: Structure and reactions of unstable nuclei, Monte Carlo Shell Model, Shell Evolution, Mean Field Calculations, Quantum Chaos

Member: Takaharu Otsuka, Kenji Fukushima 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, with particular emphasis on the shell evolution
- (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 dilute neutron system, 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 (called shell evolution for brevity) 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. The most important topic of the year 2013 was the first experimental confirmation of the new magic number 34 in an exotic nucleus ^{54}Ca [2], while striking effect of three-body force has been shown [1] for the first time.

The structure of such unstable nuclei has been calculated by Monte Carlo Shell Model, for instance to Ni isotopes [3]. Their applications have been made in collaborations with experimentalists internationally spread, *e.g.*, [4]. Collaborations with many groups produce various interesting results, for instance [5, 6, 7, 8].

We have studied the effective nucleon-nucleon interaction from a new viewpoint such as the EKK method, and have obtained a new framework for this interaction involving more than one major shell [9]. Before this work, there has been no single framework to derive effective interactions with more than two major shells, which are crucial in studying neutron-rich exotic nuclei. Thus, this is a breakthrough.

The Monte Carlo Shell Model has been improved with further developments, and we have carried out a number of calculations on the K computer.

The mean-field based formulation of the Interacting Boson Model has been developed by this group, and is now studied in somewhere else.

We are studying on dilute neutron systems, time-dependent phenomena like fusion and multi-nucleon transfer reactions in heavy-ion collisions.

Associate Professor Kenji Fukushima has arrived at the Hadron Physics group on October 1.

References

- [1] 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] D. Steppenbeck et al., “Evidence for a new nuclear ‘magic number’ from the level structure of ^{54}Ca ”, Nature, **502**, 207-210 (2013).
- [3] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, Y. Utsuno, “Novel shape evolution in exotic Ni isotopes and configuration-dependent shell structure”, Phys. Rev. C **89**, 031301(R) (2014).
- [4] S. Suchyta, S. N. Liddick, Y. Tsunoda, T. Otsuka, M. B. Bennett, A. Chemey, M. Honma, N. Larson, C. J. Prokop, S. J. Quinn, N. Shimizu, A. Simon, A. Spyrou, V. Tripathi, Y. Utsuno, J. M. VonMoss, “Shape coexistence in ^{68}Ni ”, Phys. Rev. C **89**, 021301(R) (2014).

- [5] Y. Ohkubo et al., “Magnetic moment of the 2083 keV level of ^{140}Ce ”, Phys. Rev., C **87**, 044324 (2013).
- [6] J. Papuga et al., “Spins and Magnetic Moments of ^{49}K and ^{51}K : Establishing the $1/2(+)$ and $3/2(+)$ Level Ordering Beyond $N=28$ ”, Phys. Rev. Lett., **110**, 172503 (2013).
- [7] Y. Fujita et al., “High-resolution study of $T_z = +2 \rightarrow +1$ Gamow-Teller transitions in the $\text{Ca-44}(3\text{He,t})\text{Sc-44}$ reaction”, Phys. Rev., C **88**, 014308 (2013); Y. Fujita et al., “Observation of Low- and High-Energy Gamow-Teller Phonon Excitations in Nuclei”, Phys. Rev. Lett., **112**, 112502 (2014).
- [8] G. Burgander et al., “Experimental Study of the Two-Body Spin-Orbit Force in Nuclei”, Phys. Rev. Lett., **112**, 042502 (2014).
- [9] N. Tsunoda, K. Takayanagi, M.Hjorth-Jensen and T. Otsuka, “Multi-shell effective interactions”, Phys. Rev. C., **89**, 024313 (2014).

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

In our group, we study both phenomenological and formal aspects of theoretical high energy physics. In the field of high energy phenomenology, we investigate supersymmetric unified theories and cosmological problems extensively. On the more formal side, we study string theory, supersymmetric field theories, and conformal field theories from both physical and mathematical points of view.

We list the main subjects of our researches below.

1. High Energy Phenomenology
 - 1.1 Collider Phenomenology
 - 1.2 SUSY Phenomenology [1]
 - 1.3 Flavor Physics [2]
 - 1.4 CP Violation [3]
 - 1.5 Anomalous magnetic moment [4] [5] [6]
 - 1.6 Direct Detection of Dark Matter
 - 1.7 High Energy Cosmic Ray [9] [7] [8]
 - 1.8 Cosmological constraints on superconducting cosmic strings [10]
 - 1.9 Cosmology of axion [12]
 - 1.10 Anomaly mediation deformed by axion [13]
 - 1.11 Inflation models in supergravity [11] [14] [17] [22]
 - 1.12 Dynamics of scalar field [15] [20] [21]
 - 1.13 Moduli problem and axionic dark radiation [16] [18]
 - 1.14 Inflationary Gravitational Waves and the Evolution of the Early Universe [19]
 - 1.15 Modified supergravity [23] [24]
2. Superstring Theory
 - 2.1 Structure of the instanton partition function [25]
 - 2.2 Quantization of self-dual form fields [26]
 - 2.3 Supersymmetric theories on curved manifolds
 - 2.4 Superstring perturbation theory [27]
 - 2.5 Various quantum field theories in 4d [28] [29] [30] [31] [32]
 - 2.6 Supersymmetric theories in 2d [33] [34]

References

- [1] T. Kitahara and T. Yoshinaga, “Stau with Large Mass Difference and Enhancement of the Higgs to Diphoton Decay Rate in the MSSM,” *JHEP* **1305** (2013) 035.
- [2] T. Moroi, M. Nagai and T. T. Yanagida, “Lepton Flavor Violations in High-Scale SUSY with Right-Handed Neutrinos,” *Phys. Lett. B* **728** (2014) 342.
- [3] T. Abe, J. Hisano, T. Kitahara and K. Tobioka, “Gauge invariant Barr-Zee type contributions to fermionic EDMs in the two-Higgs doublet models,” *JHEP* **1401** (2014) 106.
- [4] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto and T. Yoshinaga, “Muon $g - 2$ vs LHC in Supersymmetric Models,” *JHEP* **1401**, 123 (2014) [arXiv:1303.4256 [hep-ph]].
- [5] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto, T. Kitahara and T. Moroi, “Reconstructing Supersymmetric Contribution to Muon Anomalous Magnetic Dipole Moment at ILC,” *Phys. Lett. B* **728** (2014) 274.
- [6] M. Endo, K. Hamaguchi, T. Kitahara and T. Yoshinaga, “Probing Bino contribution to muon $g - 2$,” *JHEP* **1311**, 013 (2013) [arXiv:1309.3065 [hep-ph]].
- [7] S. P. Liew, “Gamma-ray line from radiative decay of gravitino dark matter,” *Phys. Lett. B* **724** (2013) , pp. 88 [arXiv:1304.1992 [hep-ph]].
- [8] Y. Ema, R. Jinno and T. Moroi, “Cosmic-Ray Neutrinos from the Decay of Long-Lived Particle and the Recent IceCube Result,” arXiv:1312.3501 [hep-ph].
- [9] M. Ibe, S. Iwamoto, S. Matsumoto, T. Moroi and N. Yokozaki, “Recent Result of the AMS-02 Experiment and Decaying Gravitino Dark Matter in Gauge Mediation,” *JHEP* **1308** (2013) 029.
- [10] K. Miyamoto and K. Nakayama, “Cosmological and astrophysical constraints on superconducting cosmic strings,” *JCAP* **1307**, 012 (2013) [arXiv:1212.6687 [astro-ph.CO]].
- [11] M. Kawasaki, N. Kitajima, K. Nakayama and T. T. Yanagida, “Heavy gravitino in hybrid inflation,” *JCAP* **1306**, 037 (2013) [arXiv:1301.6281 [hep-ph]].
- [12] M. Kawasaki and K. Nakayama, “Axions: Theory and Cosmological Role,” *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **63**, 69 (2013) [arXiv:1301.1123 [hep-ph]].
- [13] K. Nakayama and T. T. Yanagida, “Anomaly mediation deformed by axion,” *Phys. Lett. B* **722**, 107 (2013) [arXiv:1302.3332 [hep-ph]].
- [14] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “Polynomial Chaotic Inflation in the Planck Era,” *Phys. Lett. B* **725**, 111 (2013) [arXiv:1303.7315 [hep-ph]].
- [15] T. Moroi, K. Mukaida, K. Nakayama and M. Takimoto, “Scalar Trapping and Saxion Cosmology,” *JHEP* **1306**, 040 (2013) [arXiv:1304.6597 [hep-ph]].
- [16] T. Higaki, K. Nakayama and F. Takahashi, “Moduli-Induced Axion Problem,” *JHEP* **1307**, 005 (2013) [arXiv:1304.7987 [hep-ph]].
- [17] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “Polynomial Chaotic Inflation in Supergravity,” *JCAP* **1308**, 038 (2013) [arXiv:1305.5099 [hep-ph]].
- [18] T. Higaki, K. Nakayama and F. Takahashi, “Cosmological constraints on axionic dark radiation from axion-photon conversion in the early Universe,” *JCAP* **1309**, 030 (2013) [arXiv:1306.6518 [hep-ph]].
- [19] R. Jinno, T. Moroi and K. Nakayama, “Inflationary Gravitational Waves and the Evolution of the Early Universe,” *JCAP* **1401**, 040 (2014) [arXiv:1307.3010].
- [20] K. Mukaida, K. Nakayama and M. Takimoto, “Fate of Z_2 Symmetric Scalar Field,” *JHEP* **1312**, 053 (2013) [arXiv:1308.4394 [hep-ph]].
- [21] R. Jinno, K. Mukaida and K. Nakayama, “The universe dominated by oscillating scalar with non-minimal derivative coupling to gravity,” *JCAP* **1401**, 031 (2014) [arXiv:1309.6756 [astro-ph.CO]].
- [22] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “Chaotic Inflation with Right-handed Sneutrinos after Planck,” *Phys. Lett. B* **730**, 24 (2014) [arXiv:1311.4253 [hep-ph]].
- [23] S. V. Ketov and T. Terada, “New Actions for Modified Gravity and Supergravity,” *JHEP* **1307** (2013) 127 [arXiv:1304.4319 [hep-th]].
- [24] S. V. Ketov and T. Terada, “Old-minimal supergravity models of inflation,” *JHEP* **1312** (2013) 040 [arXiv:1309.7494 [hep-th]].

- [25] S. Kanno, Y. Matsuo and H. Zhang, “Extended Conformal Symmetry and Recursion Formulae for Nekrasov Partition Function,” JHEP **1308e**, 028 (2013) [arXiv:1306.1523 [hep-th]].
- [26] W. -M. Chen, P. -M. Ho, H. -c. Kao, F. S. Khoo and Y. Matsuo, “Partition function of a chiral boson on a 2-torus from the Floreanini-Jackiw Lagrangian,” PTEP **2014e**, no. 3, 033B02 [arXiv:1307.2172].
- [27] K. Ohmori and Y. Tachikawa, “Notes on reductions of superstring theory to bosonic string theory,” JHEP **1308e**, 024 (2013) [arXiv:1303.7299, arXiv:1303.7299 [hep-th]].
- [28] A. Gadde, K. Maruyoshi, Y. Tachikawa and W. Yan, “New N=1 Dualities,” JHEP **1306e** (2013) 056 [arXiv:1303.0836 [hep-th]].
- [29] K. Maruyoshi, Y. Tachikawa, W. Yan and K. Yonekura, “N=1 dynamics with T_{N^e} theory,” JHEP **1310e** (2013) 010 [arXiv:1305.5250 [hep-th]].
- [30] K. Maruyoshi, Y. Tachikawa, W. Yan and K. Yonekura, “Dynamical Supersymmetry Breaking with T_N Theory,” Phys. Rev. D **88e**, 085037 (2013) [arXiv:1308.0064 [hep-th]].
- [31] O. Aharony, N. Seiberg and Y. Tachikawa, “Reading between the lines of four-dimensional gauge theories,” JHEP **1308e** (2013) 115 [arXiv:1305.0318, arXiv:1305.0318 [hep-th]].
- [32] L. Bhardwaj and Y. Tachikawa, “Classification of 4d N=2 gauge theories,” JHEP **1312e**, 100 (2013) [arXiv:1309.5160, arXiv:1309.5160 [hep-th]].
- [33] K. Hori, C. Y. Park and Y. Tachikawa, “2d SCFTs from M2-branes,” JHEP **1311e** (2013) 147 [arXiv:1309.3036 [hep-th]].
- [34] F. Benini, R. Eager, K. Hori and Y. Tachikawa, “Elliptic genera of two-dimensional N=2 gauge theories with rank-one gauge groups,” Lett. Math. Phys. **104e** (2014) 465 [arXiv:1305.0533 [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

Development of electrostatic beam lines for low energy antiproton beams At the Antiproton Decelerator (AD) in CERN, experimental collaborations measure antimatter’s properties and test the CPT theorem. Antiprotons with kinematic energy of 5.3 MeV are ejected from AD and decelerated to from a few to hundreds kiloelectronvolts by using a series of degraders and/or a radio frequency quadrupole decelerator (RFQD) in order to produce antihydrogen or antiprotonic helium and to do precise experiments. During that deceleration processes from 70 percent to over 90 percent of antiprotons are lost by annihilation with the degraders or the walls of experimental setups, and the survived antiproton beam’s six-dimensional phase-space volumes are expanded, which makes the experimental precision worse. So as to improve the efficiency and precision, a new storage ring with a diameter of 10 m, ELENA (Extra Low ENergy Antiproton storage ring), which cools antiprotons from AD by electron cooling and decelerates them to 100 keV, is designed and constructed. With accelerator technicians at CERN, we simulated electric fields and beam trajectories in electrostatic quadrupoles, which focus and defocus the beam, spherical deflectors, which bend the beam trajectory, and a five-way switchyard which are placed at a cross section of beam lines, and contributed to the designs. Beam profile monitors which measure the position of the beam trajectory with precision of 0.5–1.5 mm are also developed. These results will be published in a technical design report at early 2014 fiscal year.

\bar{p} -nucleus annihilation cross section at ultra-low energies The antiproton is absorbed by the nucleus and annihilates with a surface nucleon. At high energies, it is known that the \bar{p} -nucleus annihilation cross sections scale as $\sigma_{ann} \propto A^{\frac{2}{3}}$ where A is the nuclear mass number. On the other hand, at very low energies where the wave length of the 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 σ_{ann} measurements at 130 keV. In 2012, we carried out the measurement using carbon, palladium, and platinum targets, and observed the antiproton annihilations in the targets for the first time at this low energy region. In 2013, we mainly worked for analyzing the data, carrying out simulations, and measuring the thicknesses of the target foils. We determined the number of antiprotons annihilated in the targets by analyzing the waveforms of the plastic scintillators. We also determined the number of incident antiprotons by using the number of scattered antiprotons to the lateral wall of the target chamber by means of the Rutherford scattering formula, and it was found that $10^4 \sim 10^5$ antiprotons were contained in each pulsed beam. In addition, a simulation was performed to estimate the systematic errors caused by the geometry of the experiment. The thicknesses of the targets foils were measured by the Rutherford backscattering spectroscopy, and they were consistent with the nominal values. We are going to report these results in 2014. From the results of the analyses we found some improvements in the experiment, such as reducing the dust on the surfaces of the targets and increasing the efficiencies of the detectors. We are now planning the next experiment in which these problems will be solved.

2) 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. In 2013, we reanalyzed the result of a pilot experiment performed in 2010. More realistic optical effect and acceptance of the beam line were estimated and applied to Q-value spectrum. Now the calibration of the spectrum is being finalized. In RIKEN, we were asked to resubmit the proposal, which was already accepted as NP0802-RIBF54, according to RIBF new policy. Then we renewed our proposal based on the result of the pilot experiment, and succeeded to be accepted again. Our experiment is allocated from end of May, 2014. Now we are preparing detectors such as MWDCs and scintillators, establishing the experimental procedure, developing new method to tune the optics, and improving DAQ system.

Pionic atom spectroscopy with inverse kinematics Spectroscopy of deeply bound pionic atoms is useful to study chiral symmetry at finite density. We are planning a spectroscopy of pionic atoms with unstable nuclei to investigate the density dependence of restoration of chiral symmetry breaking. In the experiment, missing mass spectroscopy of inverse kinematics of ($d, {}^3\text{He}$) reaction will be performed with a setup using deuterium gas active-target TPC and silicon detectors. In this year, we studied the performance of 300 μm -thick silicon detector using an α source. In order to achieve high resolution, we tried to reduce electronic noise. As a result, the resolution was estimated to be 0.7% (FWHM) using 5.5 MeV α source. We will study the resolution using higher energy particle. We also joined an experimental group at CNS (Center for Nuclear Study, University of Tokyo) for a deuterium gas active-target TPC. We studied the properties of GEM under low pressure deuterium gas and searched suitable conditions to achieve high gain of 10^4 . In addition, properties of deuterium gas detector such as electron drift velocity and diffusion were measured using an alpha source and compared with calculation based on literature data. We will carry out further measurement with higher statistics.

3) Study of η' mesic nuclei

η' meson has a large mass of 958 MeV/ c^2 , which is understood by the $U_A(1)$ anomaly effect. Since the magnitude of this effect on η' mass is considered to be related to the chiral condensate in nuclear medium, where chiral symmetry is partially restored, the mass of η' meson may be reduced and η' meson-nucleus bound states (η' mesic nuclei) may exist.

We will perform a spectroscopy experiment to search for η' mesic nuclei at GSI in Germany. We will inject a 2.5 GeV proton beam to a carbon target, and create η' meson by the ${}^{12}\text{C}(p, d)$ reaction. Then, the energy of the η' mesic nuclei will be obtained by measuring the momentum of the ejectile deuteron with a spectrometer.

In FY2013, we developed an ion optics of the spectrometer, prepared a data acquisition system, and tested multi-wire drift chambers and aerogel Cherenkov detectors. We designed the ion optics for this

experiment using GICOSY simulation. The data acquisition system and all detectors were tested together using a proton beam at COSY accelerator of Forschungszentrum Jülich in Germany.

The main experiment at GSI is scheduled in July 2014. We will test the spectrometer optics with an ion beam, perform the main experiment, and analyze the data in 2014.

4) Study of internal exposures of Fukushima residents

Since 2011, we have been cooperating with medical institutions in Fukushima to investigate the internal radiation exposures of Fukushima residents using whole body counters (WBCs). Our study, based on some 30,000 measurements (published in ref.[3]) showed that the internal exposure level is kept much lower than initially feared.

Since the existing WBCs are unsuitable for measuring the internal exposures of small children, we developed a special device called a BABYSCAN, which was installed in a hospital in Fukushima in December 2013. So far, no child was found to have detectable level of radiocesium (detection limit being 50 Bq/body) [31].

4 Sakurai Group

Research Subjects: Nuclear structure and dynamics of exotic nuclei, Origin of elements in universe

Member: Hiroyoshi Sakurai and 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) at RIKEN. The RIBF is a leading facility where RI beam intensities are the highest in the world. We maximize RIBF utilization to access nuclei very far from the β -stability line as well as to exploit new types of experiments and new methods of spectroscopy via new ideas and detector developments.

β -decay and isomeric-decay spectroscopies

Unstable nuclei is, by definition, decaying to the stable one by a β -ray emission. Since the β -decay process is well known, β -decay spectroscopy is efficient way to investigate the structures of parent and daughter nuclei. We performed decay spectroscopy studies at RIBF as a part of the EURICA project, which is aiming to exploring new isomers, half-lives, and β - γ spectroscopies in the wide region of the nuclear chart.

We measured 14 new half-lives in the region of ^{78}Ni for the first time. The new half-lives together with data from literature allowed us for a systematic study and our result indicates the existence of the doubly-magic character in neutron-rich nucleus: ^{78}Ni . We also discovered new micro seconds isomers in $^{126,128}\text{Pd}$. The isomerism is understood as a seniority scheme and is an evidence for robustness of the neutron magic number at $N = 82$.

The β -decay is important for the nucleosynthesis in the rapid neutron capture process (r-process). The probability of β -delayed neutron emission (P_n) plays an crucial role in the “freeze-out era” of the r-process to understand the solar abundance. We established BRIKEN collaboration to measure the P_n values of the nuclei in the r-process path by using ^3He neutron detector array. We have performed a design study for the ^3He base neutron detector array by using simulation code (Monte-Carlo N-Particle 5, MCNP5) to obtain the highest efficiency without initial neutron-energy dependence.

In-beam γ -ray spectroscopy with fast secondary beams

An in-beam gamma-ray experiment on ^{35}Mg was performed at the RIBF at RIKEN in 2010. ^{35}Mg was made by one-neutron knock-out reaction from ^{36}Mg which was sensitive to the neutron single-particle configuration and may reveal the microscopic mechanism of the large deformation in the $N > 22$ neutron-rich Mg isotopes. Doppler corrected gamma-ray energies were measured with DALI2 γ -ray detector. The nature of the excited states emitting these γ -rays has been discussed by comparison with the previous work. The analysis on the cascade gamma decay of ^{35}Mg will be done in the future aiming to reveal the energy level of the excited states.

We are also developing a new generation γ -ray detector array called SHOGUN (Scintillator based High-resolution Gamma-ray spectrometer for Unstable Nuclei). To compensate the doppler broadening owing to the fast beam at the RIBF, the shape of the scintillator should be narrow and long. In this year, we introduced a semi-empirical formula to understand the relationship between the shape and the energy resolution. Energy resolutions of several $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ scintillators with different shapes were measured to test the universality of the new formula.

Nuclear structure study with direct reactions

We performed an experiment using the distinct Coulomb and nuclear 1n-removal reaction at RIBF. The present work addresses the spectroscopy of neutron-rich nuclei around the island of inversion, specifically, the halo, shell and deformation properties of Ne and Mg isotopes. The analysis exploits the different sensitivities of these reaction mechanisms to obtain the ground state separation energy, spin parity and the spectroscopic factors of these projectiles. The Coulomb- and nuclear-dominated 1n-removal cross sections of $^{29,31}\text{Ne}$ and $^{33,35,37}\text{Mg}$ on Pb and C targets as well as their parallel momentum distributions were measured and interpreted in terms of their shell structure and halo properties.

^8C nucleus is one of the most proton rich nuclei existing outside of the proton drip-line. While the mass and decay modes of ^8C have been studied before, the excited states have never been measured. We performed the experiment to investigate the excited states of ^8C nuclei by using the missing mass method of $^{10}\text{C}(p, t)^8\text{C}$ reaction in inverse kinematics on November in 2013. The analysis is now in progress.

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 short range force using ultra-cold and 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 discovery of a new particle, the Higgs Boson at LHC. The details of the observed Higgs Boson and other new particles will be studied in the 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 upon 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 and published in 2013. 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 chairman is Sachio 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 $O(10)[\text{nm}]$ beam sizes, using a high power laser interferometer. Also we have been studying possible physics scenarios and the large detector concept (ILD) for an experiment at ILC. Since 2012 autumn, a new postdoctoral fellow who is an expert on the silicon electro-magnetic calorimeter joined from UK. Since then hardware and simulation studies of silicon-tungsten sandwich electromagnetic calorimeters for ILC detector have been performed.

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 has been developed. We decided to use CCDs for the position measurement of the UCNs. The CCD is going to be covered by a ^{10}B layer to convert neutrons to charged nuclear fragments. The UCNs are going through a neutron guide of 100 $[\mu]$ 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 sub-micron spacial resolution. This result was published in PRL. In 2013 we have started a new experiment to search for a new short range force using cold neutron beams scattered with Xe atom. The experiment was performed in HANARO, KAERI, Korea.

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, the Higgs Boson was discovered by the ATLAS and CMS experiments at LHC. We call this the "2012 July Revolution". Our students have been working on data analysis in search for a Higgs Boson in the very important decay mode of $H \rightarrow \gamma\gamma$. Also, other students searched for supersymmetric partners of gluon and quarks with the missing transverse energy and these results have already been published in journals.

4) One of our graduate student worked on the possibility to study the EPR paradox using decays J/ψ , η_c , or $\chi_{c0} \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda} \rightarrow p\pi^-\bar{p}\pi^+$. The results were published in PTEP.

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.

We developed a segmented reactor-antineutrino detector made of plastic scintillators for application as a tool in nuclear safeguards inspection and performed mostly unmanned field operations at a commercial power plant reactor with a 360-kg prototype called PANDA36. PANDA is an acronym for plastic anti-neutrino detector array. At a position outside the reactor building, we measured the difference in reactor antineutrino flux above the ground when the reactor was active and inactive. This was the world's first aboveground antineutrino detection of a nuclear reactor.

Unexpected gamma ray bursts were detected with the PANDA36 detector during the operation at the power plant reactor. The largest burst lasted for 180 s and the detection rate amounted to $5.5 \times 10^2/\text{s}$ at its peak. The energy spectrum is continuous and extends upto 10–15 MeV. The bursts are most probably due to electromagnetic showers of relativistic electrons created in thunder clouds. Indeed, we found thunder cloud activities at the time of the bursts in the meteorological data. The detailed mechanisms of the burst generation is under the study.

An R and D study is still ongoing and a larger prototype PANDA64 of 640 kg mass is now ready. A test running has been completed in the university campus with a newly installed 24-cm thick water shield surrounding it. We are now waiting for the power plant reactor to go online. We also started a construction of an ultimate 100-module detector, PANDA100.

There is yet another motivation of PANDA. With its mobility and compactness, PANDA could be used to verify the existence of sterile neutrinos. The existing cosmological data indicate that the energy density of the Universe may contain dark radiation composed of one or two sterile neutrinos, which have been invoked for the explanation of short-baseline reactor antineutrino anomalies. We shall bring PANDA into a compact-core research reactor which fits the short oscillation length of the proposed sterile neutrinos. While almost all the compact-core reactors in Japan are in shutdown, we might consider foreign reactors as possible sites of the experiment.

One of us also contributes to a similar project called Nucifer in CEA Saclay, France. Nucifer is a small antineutrino detector made of liquid scintillator installed at the research reactor Osiris with a standoff of 7m from its core.

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 one of the candidates for the cold dark matter of the Universe. It would be converted into an ordinary photon at a surface of conductive material with a conversion probability depending on its mixing parameter with the ordinary photon. There have been an idea to use a spherical mirror to focus thus generated photons onto a photon sensor to enhance the detection efficiency of the hidden sector photon detector. We try to realize this kind of hidden photon search experiments in two wavelength bands. Hidden sector photons of \sim eV mass could be searched for using an optical concave mirror and a photon counting PMT. We are now running the search experiment with a mirror of 50cm diameter. On the other hand, dish antenna for Ku-band microwave reception could be used to search for hidden sector photons of lower mass in the range of $10^{-5} - 10^{-4}$ eV. We are also preparing a hidden sector photon detector with a dish antenna of 2.2m diameter.

7 Aihara & Yokoyama Group

Research Subjects: (1) Study of CP -violation and search for physics beyond the Standard Model in the B meson and the τ lepton systems (Belle & Belle II); (2) Dark energy survey at Subaru telescope (Hyper Suprime-Cam); (3) Long baseline neutrino oscillation experiment (T2K); (4) R&D for the next generation neutrino and nucleon decay experiment (Hyper-Kamiokande); (5) R&D of 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 cutting-edge 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 and precise alignment procedures 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 have been involved in building a 1.2 Giga pixel CCD camera (Hyper Suprime-Cam) mounted on the prime focus of the Subaru telescope. With this wide-field camera, we plan to conduct extensive wide-field deep survey to investigate weak lensing. This data will be used to develop 3-D mass mapping of the universe. It, in turn, will be used to study Dark Energy. This year, the wide-field survey has been 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. Based on the data taken before the summer 2013, we reported a firm observation of the electron neutrino appearance from a muon neutrino beam, and placed the first-ever constraint on the CP asymmetry parameter in the lepton sector. We also reported the world best constraint on the mixing parameters from the measurement of muon neutrino disappearance.

5. Next generation large water Cherenkov detector: Hyper-Kamiokande project

In order to pursue the study of neutrino properties 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 the 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 the photo-electron multiplier. This year, we started the evaluation of HPD in a large water Cherenkov detector using a 200-ton water tank at Kamioka. Also, we developed and tested high quantum efficiency 50 cm diameter photomultipliers.

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 1.1 and 1.8TeV, 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, Naoto Tsuji

Our main interests are many-body and topological effects in electron and cold-atom systems, i.e., **superconductivity, magnetism and topological phenomena**, for which we envisage a **materials design for correlated systems** and novel **non-equilibrium** phenomena should be realised. Studies in the 2013 academic year include:

- **Superconductivity**
 - High-Tc cuprates: material- and pressure-dependence [1-3]
 - Coexisting electron-electron and electron-phonon interactions
 - Retardation effects, supersolid phases [4]
 - Organic and carbon-based superconductors [1]
 - Fermion and boson systems on flat-band systems [5]
 - Superconductivity induced in non-equilibrium:
- **Topological systems**
 - Topological and chiral properties of graphene [6-8]
 - Optical (THz) quantum Hall effect in graphene [9]
 - Graphene quantum dot [10]
- **Non-equilibrium phenomena**
 - Non-equilibrium dynamical mean field and dynamical cluster theories[11,12]
 - Dynamical phase transitions in correlated and topological systems
 - Floquet topological insulator
 - Non-thermal fixed points
 - Nonequilibrium quantum spin systems[13]
 - Higgs modes in superconductors in intense laser [11]

- [1] H. Aoki and T. Kariyado: Pressure effects and orbital characters in cuprate and carbon-based superconductors, *J. Superconductivity and Novel Magnetism* **27**, 995 (2014).
- [2] H. Sakakibara, K. Suzuki, H. Usui, S. Miyao, I. Maruyama, K. Kusakabe, R. Arita, H. Aoki, and K. Kuroki: Orbital mixture effect on the Fermi surface-Tc correlation in the cuprate superconductors — bilayer vs single layer, arXiv:1403.2497.
- [3] K. Nishiguchi, K. Kuroki, R. Arita, T. Oka and H. Aoki: Superconductivity assisted by inter-layer pair hopping in multi-layered cuprates, *Phys. Rev. B* **88**, 014509 (2013).
- [4] Y. Murakami, P. Werner, N. Tsuji and H. Aoki: Ordered phases in the Holstein-Hubbard model: Interplay of strong Coulomb interaction and electron-phonon coupling, *Phys. Rev. B* **88**, 125126 (2013); Supersolid phase accompanied by a quantum critical point in the intermediate coupling regime of the Holstein model, arXiv:1402.6456.
- [5] S. Takayoshi, H. Katsura, N. Watanabe and H. Aoki: Phase diagram and pair Tomonaga-Luttinger liquid in a Bose-Hubbard model with flat bands, *Phys. Rev. A* **88**, 063613 (2013).
- [6] Hideo Aoki and Mildred S. Dresselhaus (eds.): *Physics of Graphene* (Springer-Verlag, 2014).
- [7] Y. Hamamoto, T. Kawarabayashi, H. Aoki and Y. Hatsugai: Spin-resolved chiral condensate as a spin-unpolarized $\nu = 0$ quantum Hall state in graphene, *Phys. Rev. B* **88**, 195141 (2013).
- [8] H. Aoki and Y. Hatsugai: Polarization as a topological quantum number in graphene, arXiv:1403.1648.

- [9] 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.* **4**, 1841 (2013).
- [10] P. A. Maksym and H. Aoki: Magnetic field controlled vacuum charge in graphene quantum dots with a mass gap, *Phys. Rev. B* **88**, 081406(R) (2013).
- [11] H. Aoki, N. Tsuji, M. Eckstein, M. Kollar, T. Oka and P. Werner: Nonequilibrium dynamical mean-field theory and its applications, *Rev. Mod. Phys.*, to be published (arXiv:1310.5329).
- [12] N. Tsuji, P. Barmettler, H. Aoki and P. Werner: Nonequilibrium dynamical cluster theory, arXiv:1307.5946.
- [13] S. Takayoshi, H. Aoki and T. Oka: Many-body Floquet theory of laser-induced phase transition 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.

Systems with bistable local electric states, such as the spin-crossover, Jahn-Teller system, and martensite systems, have been attracted interests as seminal candidates of the so-called functional material because the bistable states can be switched by the temperature, pressure, magnetic field, and photo-irradiation. In the last year, we studied the nature of phase transitions in a system with short-range antiferromagnetic interaction and the effective long range interaction among spin states due to difference of local bistable structures of the lattice.[3] We also found that the system has two different domain walls for the spin degree of freedom and lattice degree of freedom, and they behave differently with ratio of time scales of the degree of freedoms.[5] The stress distribution of lattice during the switching was also studied. [6]

We also studied mechanisms of magnetization process of frustrated rare-earth compound.[2] And also we studied mechanisms of coercive force of real magnets, joining to the project 'The Elements Strategy Initiative Center for Magnetic Materials'.

We also studied an itinerant ferromagnetism in a system where the electron density can be controlled, and the system exhibits both the Mott singlet and Nagaoka ferromagnetism. We studied detailed phase diagram of magnetic properties.

Stochastic process

Brownian motion of particles interacting with long range force has been formulated by the Dunkl operator. We have studied dynamics of the distribution of the particles from a view point of the intertwining operator.[13]. We studied the time scale of relaxation into an steady states of the scaled distribution. [36, 37, 29]

Quantum dynamics

Quantum dynamics under time dependence field is also important subject in our group. In these years, we have studied properties of quantum systems in periodically driven systems. We studied phase transitions in a cavity system in which strong interaction between spins and photons exists. When the interaction becomes strong, the ground state of the system exhibits a phase transition called Dicke transition. Beside this transition, a nonequilibrium phase transition called optical bistability has been known. We found cooperative phenomena in the region with strong driving force and strong coupling. In order to study such a region we developed a new master equation for the thermodynamic limit properties 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. In the Dicke model, we found a new type symmetry-broken phase. We explained mechanism of this phase by making use of the concept of coherent destruction of tunneling.[7, 20, 25, 26]

We also studied dynamics of magnetization under sweeping field in a uniaxial systems quantum mechanically, where we studied the relation to the classical Stoner-Wohlfarth phenomena.

Fundamental properties of Statistical mechanism

We studied properties of statistical mechanics in long-range interacting systems. As we have mentioned above, there are many realistic systems which exhibit effective long-range interactions, We showed that the elastic models for the spin-crossover system can be expressed by an effective long-range interaction, and that the extensivity is effectively satisfied, but the additivity is violated. [8]

As we also mentioned, the atoms in a cavity have an effective long range interaction due to the common cavity photon. We gave a proof that in some condition a mean-field dynamics gives the exact results. [10]

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]
 - Flux states in high- T_c superconductivity.
- Organic conductors
 - Thermoelectric transport coefficients for massless Dirac electrons in organic compounds.[2]
 - Effect of tilting on the in-plane conductivity of Dirac electrons in organic compounds.[3]
 - Spin liquid states realized in organic compounds and spin systems.
 - Zero-energy localized state induced by impurity in Dirac electron system of organic conductor.[4]
- Dirac electron systems in solids [5]
 - Spin-Hall effects and large diamagnetism in Dirac fermion systems.[6]
 - Electronic states in a new Dirac system: Ca_3PbO and related materials.[7]
- Theories on heavy fermion systems and multi-band electron systems
 - Charge Kondo effect due to pair-hopping mechanism.
 - Spin triplet superconductivity in UPt_3
 - Theory of Ru oxides: heavy fermion behavior and spin fluctuations.[8]
- Chiral magnets and spin-orbit interaction
 - Effective model and Dzyloshinskii-Moriya interaction for chiral magnet, CrNb_3S_6 . [9]
 - Spin-orbit interaction in $4d^3$ and $5d^3$ electron systems.[10]
 - Superexchange interactions from the j-j coupling.[11]

- [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] I. Proskurin, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 063712-1-4 (2013). “Thermoelectric Transport Coefficients for Massless Dirac Electrons in Quantum Limit”
- [3] Y. Suzumura, I. Proskurin, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 023701-1-4 (2014). “Effect of Tilting on the In-Plane Conductivity of Dirac Electrons in Organic Conductor”
- [4] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: in preparation. “Defect-induced zero-energy localized state in massless Dirac electron system α -(ET) $_2$ I $_3$ ”

- [5] Y. Fuseya, M. Ogata, and H. Fukuyama: Review article in preparation. “Transport Phenomena and Diamagnetism of Dirac Electrons in Bismuth”
- [6] Y. Fuseya, M. Ogata, and H. Fukuyama: submitted to J. Phys. Soc. Jpn. “Spin-Hall Effect and Diamagnetism of Anisotropic Dirac Electrons in Solids”
- [7] T. Kariyado and M. Ogata: in preparation. “Twin Dirac electrons and diamagnetism in Ba₃SnO”
- [8] N. Arakawa and M. Ogata: Phys. Rev. B **87**, 195110-1-11 (2013). “Competition between spin fluctuations in Ca_{2-x}Sr_xRuO₄ around $x = 0.5$ ”
- [9] H. Matsuura, T. Shishidou, and M. Kishine: in preparation. “Derivation of Dzyaloshinskii-Moriya Interaction on Metallic Chiral Magnet CrNb₃S₆”
- [10] H. Matsuura and K. Miyake: J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 063709-1-4 (2013). “Effect of Spin-Orbit Interaction on (4d)³- and (5d)³-Based Oxides”
- [11] H. Matsuura, and M. Ogata: in preparation. “Superexchange Mechanism Based on J-J Coupling Scheme”

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 ultra-high 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 FY2013, we applied the second-order perturbation theory (MP2) to improve the accuracy of the band gap and total energy. We also used configuration interaction single (CIS) to calculate photo-absorption spectra considering excitonic effect.

We are also developing various schemes for first-principles simulation and are applying them to the study of structural, electronic and thermal properties of materials. Our research subjects in FY2013 were as follows:

- New methods of first-principles calculation of material properties
 - First-principles wavefunction theory for solids based on the transcorrelated method and its connection to the diffusion Monte Carlo method
 - Improved tetrahedron method for the Brillouin-zone integration applicable to response functions
 - Density functional theory for superconductors
 - A new efficient method to find potential energy minima in configuration space
- Applications of first-principles calculation
 - Interfaces in Nd₂Fe₁₄B sintered magnet
 - Thermal transport and the role of host-guest interaction in type-I clathrate compounds
 - Diversity of hydrogen configuration and its roles in SrTiO₃
 - ¹H NMR in BaTiO_{3-x}H_x

13 Todo Group

Research Subjects: Novel state and critical phenomena in strongly correlated systems,
 Development of new simulation algorithms for quantum many body systems,
 Development of open-source software for next-generation parallel simulation

Member: Synge Todo

We study novel phases and critical phenomena in strongly correlated many-body systems, such as quantum magnets and Bose-Hubbard model, by using the state-of-the-art computational physics techniques like the quantum Monte Carlo method. We also develop new computational algorithms for quantum many-body systems, such as the tensor-network method, study the parallelization technique for supercomputers, and develop open-source software for next-generation parallel simulations.

Novel state and critical phenomena in strongly correlated systems

Analysis of quantum phases and quantum phase transitions by local Z_2 Berry phase: we have developed a new quantum Monte Carlo technique for calculating the overlap of two wave functions (including phase factor), and applied it to the local Z_2 Berry phase that is a topological order parameter for low-dimensional quantum magnets [1].

Critical phenomena of long-range interacting spin model: using the $O(N)$ cluster algorithm, we have precisely studied the critical exponents and critical amplitudes of the long-range interacting spin model on the square lattice, and revealed that the critical exponents vary smoothly as a function of the exponent of interaction σ .

Quantum phase transition of $SU(N)$ J - Q model: by using the parallelized loop cluster algorithm for the $SU(N)$ J - Q model, which is proposed as a candidate that exhibits the deconfined critical phenomena, we have studied its critical phenomena and found a systematic drift of the critical exponents as the system size increases. It may suggest a first-order phase transition [3].

Development of new simulation algorithms for quantum many body systems

Irreversible Markov chain Monte Carlo: we have developed a novel geometric approach that can construct an irreversible kernel with minimum rejection rate for the Markov chain Monte Carlo. It is demonstrated that the auto-correlation time of the Markov chain is greatly reduced by our proposed method.

Simulation method for systems with strong spatial anisotropy: we have developed a generic method that can automatically optimize the aspect ratio of the system by the combination of the quantum Monte Carlo method and the machine learning technique, and applied to the Néel-dimer transition of two-dimensional quantum Heisenberg model [4].

Development of open-source software for next-generation parallel simulation

Parallelization of worm algorithm quantum Monte Carlo method: we have developed a domain decomposition parallelization method of the worm algorithm for the path-integral quantum Monte Carlo for the massively parallel supercomputers [5].

We have also developed the parallel exact diagonalization package “Rokko” (<https://github.com/t-sakashita/rokko>), the portal site for materials science simulation “MateriApps” (<http://ma.cms-initiative.jp>), Live USB Linux system “MateriApps LIVE!” The performance evaluation and optimization of application software for future HPCI systems have been conducted as well.

- [1] Yuichi Motoyama, Synge Todo, Path-integral Monte Carlo method for the local Z_2 Berry phase, *Phys. Rev. E* **87**, 021301(R) (2013).
- [2] H. Nakano S. Todo, T. Sakai, Long-Range Order of the Three-Sublattice Structure in the $S = 1$ Heisenberg Antiferromagnet on the Spatially Anisotropic Triangular Lattice, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82**, 043715 (2013).
- [3] Kenji Harada, Takafumi Suzuki, Tsuyoshi Okubo, Haruhiko Matsuo, Jie Lou, Hiroshi Watanabe, Synge Todo, Naoki Kawashima, Possibility of Deconfined Criticality in $SU(N)$ Heisenberg Models at Small N , *Phys. Rev. B* **88**, 220408(R) (2013).
- [4] Shinya Yasuda, Synge Todo, Monte Carlo simulation with aspect ratio optimization: Anomalous anisotropic scaling in dimerized antiferromagnet, *Phys. Rev. E* **88**, 061301(R) (2013).
- [5] Akiko Masaki, Takafumi Suzuki, Kenji Harada, Synge Todo, Naoki Kawashima, Parallelized Quantum Monte Carlo Algorithm with Nonlocal Worm Updates, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 140603 (2014).

14 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 (ARPES) and soft x-ray magnetic circular dichroism (XMCD) using synchrotron radiation. We investigate the mechanisms of high-temperature superconductivity, metal-insulator transitions, giant magnetoresistance, and spin/charge/orbital ordering in strongly correlated systems such as transition-metal compounds [1], magnetic semiconductors [2], and their interfaces [3].

[1] H. Suzuki, T. Yoshida, S. Ideta, G. Shibata, K. Ishigami, T. Kadono, A. Fujimori, M. Hashimoto, D.H. Lu, Z.-X. Shen, K. Ono, E. Sakai, H. Kumigashira, M. Matsuo, and T. Sasagawa: Absence of Superconductivity in the “hole-doped” Fe pnictide $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{As}_2$: Photoemission and x-ray absorption spectroscopy studies, *Phys. Rev. B* **88**, 100501(R)-1-4 (2013).

[2] M. Kobayashi, H. Niwa, Y. Takeda, A. Fujimori, Y. Senba, H. Ohashi, A. Tanaka, S. Ohya, P. N. Hai, M. Tanaka, Y. Harada, and M. Oshima: Electronic excitations of a magnetic impurity state in the diluted magnetic semiconductor (Ga,Mn)As, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 107203-1-5 (2014).

[3] V. K. Verma, V. R. Singh, K. Ishigami, G. Shibata, T. Harano, T. Kadono, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.-J. Huang, C. T. Chen, Y. Zhang, J. Liu, Y.H. Lin, C-W. Nan, and A. Tanaka: Origin of enhanced magnetoelectric coupling in $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{BaTiO}_3$ multilayers studied by x-ray magnetic circular dichroism, *Phys. Rev. B* **89**, 115128-1-7 (2014).

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 low-dimensionality 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 ultra-high 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 magneto-optical Kerr effect measurements. Main results in this year are as follows.

(1) Surface electronic/spin transport:

- Detection of current-induced spin polarization at Bi(111) surface by using spin-polarized ion scattering spectroscopy
- Detection of spin Hall effect on Bi_2Se_3 (111) surface by using *in situ* FIB-fabrication and four-tip STM
- Quasi-one-dimensional electronic transport on $\text{Si}(110)\text{-}2\times 5\text{-Au}$ surface by using linear/square micro-four-point probe method
- Effect of magnetic impurities on surface electronic transport of $\text{Si}(111)\text{-}\sqrt{7}\times\sqrt{3}\text{-In}$

(2) Surface phases, ultra-thin films, and phase transitions:

- Structure determination of multi-layer Silicene by using I-V low-energy electron diffraction
- Discrimination between the hexagonal phase and rectangular phase of $\text{Si}(111)\text{-}\sqrt{7}\times\sqrt{3}\text{-In}$ by STM observation

- High-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy of Bi(111) ultrathin films
- Proximity effect at Bi₂Se₃/MnSe interface
- Tuning of Fermi-level position of a topological insulator Bi₂Se₃ by Sb doping

(3) Construction of new apparatuses: Low-temperature strong-magnetic-field scanning tunneling microscope and scanning tunneling potentiometry.

- [1] 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, **102**, 163106 (Apr, 2013).
- [2] M. Yamada, T. Hirahara, and S. Hasegawa, *Magnetotransport measurements of a superconducting surface state of In- and Pb-induced structures on Si(111)*, Phys. Rev. Lett. **110**, 237001 (Jun, 2013).
- [3] T. Tono, T. Hirahara, and S. Hasegawa, *In situ transport measurements on ultrathin Bi(111) films using a magnetic tip: Possible detection of current-induced spin polarization in the surface states*, New J. Phys. **15**, 105018 (Oct 2013).
- [4] M. Aitani, Y. Sakamoto, T. Hirahara, M. Yamada, H. Miyazaki, M. Matsunami, S. Kimura, and S. Hasegawa, *Fermi level tuning of topological insulator thin films*, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 110112 (Oct, 2013).
- [5] N. Nagamura, R. Hobara, T. Uetake, T. Hirahara, M. Ogawa, T. Okuda, K. He, P. Moras, P. M. Sheverdyaeva, C. Carbone, K. Kobayashi, I. Matsuda, and S. Hasegawa, *Anisotropic Electronic Conduction in Metal Nanofilms Grown on a One-Dimensional Surface Superstructure*, Phys. Rev. B **89**, 125415 (Mar, 2014).
- [6] S. Hasegawa: "The Image is My Life.", in "In Memory of Akira Tonomura: Physicist and Electron Microscopist" (World Scientific, 2013), pp. 156-163.

16 Fukuyama Group

Research Subjects: Low Temperature Physics (Experimental):

Quantum fluids and solids with strong correlations and frustration,
Novel electronic states in graphene.

Member: Hiroshi Fukuyama, Tomohiro Matsui

We are currently interested in (i) quantum phases with strong correlations and frustration in two dimensional (2D) helium three (³He), four (⁴He) and their mixture, (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, torsional oscillator, scanning tunneling microscopy and spectroscopy (STM/S), and electronic transport measurement, *etc.*

1. Self-bounded Ground-state of two dimensional ³He at low areal densities:

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. In our experiments, we succeeded to evaluate the amount as $\sim 5\%$ 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 amorphous ^3He on graphite.

2. The commensurate (C2) 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 substrate (Grafoil). 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 (C1) phase more clearly than that observed on Grafoil.

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 (C2 phase) and then incommensurate solid (IC2 phase). In addition, a clear evidence of the C2 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 C2 phase is occurred before the promotion of the third layer from the density dependence of the isosteric heat. Our experimental results clearly show the existence of the C2 commensurate phase which had been denied in Path Integral Monte Carlo simulations.

The C2 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. We have started a measurement to find this novel super-solid state with a torsional oscillator.

3. Novel electronic properties of graphene:

Graphene, a single layer of graphite, had been attracting considerable attention owing to its remarkable electronic and structural properties, and its possible applications in many emerging fields such as graphene-based electronic devices. The charge carriers in graphene behave as massless Dirac fermions, and graphene shows ballistic charge transport, turning it into an ideal material for circuit fabrication.

One of a superior property of graphene is that, it can be obtained on the surface of a substrate and it is exposed to the outside. Therefore, one can shape a graphene into desired structure, and can modify its electronic property by adsorbing atoms or molecules. Recently, we studied the electronic property of graphene decorated with O_2 . By measuring the time evolution of the gate voltage (V_g) dependence of the resistance, we found the time dependent change of the Dirac point (carrier doping), the maximum resistance, and the mobility. In addition, the initial electronic property can not be restored perfectly by vacuum annealing at about 100°C . The temperature dependence of the resistance for O_2 decorated graphene suggests the variable range hopping in 2D due probably to the increase of disorder by O_2 adsorption. In addition, the conductance starts to fluctuate depending on the carrier density at $T < 20$ K. Since the fluctuation pattern changes by O_2 adsorption and by thermal cycle above 80 K, this fluctuation is related to the disorder and the conduction path of carriers. It should be noted that this fluctuation is different from the universal conductance fluctuation appears in magneto-resistance for conventional 2D electrons in some senses, i.e., the fluctuation is induced by carrier density, the fluctuation amplitude is much smaller than the quantum conductance and it is robust to much high temperature of about 20 K.

It is also characteristics of graphene that it has two edge structures with much different electronic properties, i.e. zigzag and armchair. At the edge of zigzag structure, electrons are localized along the edge to form a zigzag edge state. We had confirmed such state experimentally at the monatomic step edge of graphite. Moreover, it is expected that the spin degeneracy would be lifted and ferromagnetically spin polarized edge state appears under an electron-electron interaction. The ferromagnetic

edge state is stabilized in a nano-ribbon between two zigzag edges (zigzag nanoribbon) through anti-ferromagnetic interaction between edges. This year, we have started an attempt to make such zigzag edges and the zigzag nanoribbon, and the study of their novel electronic properties.

The measurements are performed mainly with the scanning tunneling microscopy and spectroscopy (STM/S) and the electronic transport measurement. Especially, we are using an STM/S which can be operated at temperatures down to 30 mK, in magnetic fields up to 13 T, and in ultra-high vacuum lower than 10^{-8} Pa with the energy resolutions down to 100 μeV and atomic spatial resolution.

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 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 2013, an adsorbate-induced two-dimensional electron system at cleaved surfaces of InSb has been investigated by a low-temperature scanning tunneling microscope and spectroscopy combined with transport measurements in magnetic fields up to 14 T. The magnitude of potential disorder obtained from the spatially-averaged density of states (DOS) agrees with that deduced from damping of the Shubnikov-de Haas oscillations. A dip indicating the Coulomb gap was observed in the spatially-averaged DOS at the Fermi level.

2. Superconductivity of ultrathin films on cleaved GaAs surfaces:

Recently, we studied the effect of the parallel magnetic field H_{\parallel} on superconductivity of monolayer Pb films on GaAs(110). Superconductivity was found to occur even for $H_{\parallel} = 14$ T, which is much higher than the Pauli paramagnetic limiting field H_P . The observed weak H_{\parallel} dependence of the superconducting transition temperature T_c is explained in terms of an inhomogeneous superconducting state predicted for 2D metals with a large Rashba spin splitting.

In 2013, we have extended our studies to ultrathin films of indium and aluminum. In the case of indium films, superconductivity was observed in the monolayer regime. The H_{\parallel} dependence of T_c is one order of magnitude stronger than that in the Pb films. Since Δ_R is expected to be small in the indium films, we also extended the analysis to the case where Δ_R is comparable to or smaller than $\hbar\tau^{-1}$. The experimental results are well reproduced by the calculation with $\Delta_R \approx 0.04$ eV, which is much smaller than that expected for the Pb films.

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~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 high-density excitation phenomena in an indirect gap semiconductor Ge and in a direct gap semiconductor GaAs. In Ge, aiming at the realization of quantum degenerated phases, we have succeeded in the formation of high-density magnetoexcitons by suppressing the formation of electron-hole(e-h) droplet with applying uniaxial-stress to the crystal. In GaAs, we have investigated the origin of excitonic photoluminescence(PL) observed above the Mott density by comparing the optical pump and terahertz probe spectroscopy, optical pump-optical probe spectroscopy, and time-resolved PL measurements.
2. **Higgs amplitude mode in a BCS superconductor $Nb_{1-x}Ti_xN$:** Higgs amplitude mode is a collective excitation mode accompanied with spontaneous symmetry breaking. While the Higgs mode in condensed matters has recently attracted much attention, the Higgs mode in *s*-wave BCS states has evaded experimental detection due to the absence of coupling with electromagnetic wave. By using terahertz pump-terahertz probe spectroscopy, we investigated the Higgs mode in *s*-wave BCS superconductor $Nb_{1-x}Ti_xN$ films. After the nonadiabatic excitation with strong monocycle THz pump pulse, we observed a transient oscillation in the electromagnetic response of the BCS state. The oscillation frequency coincides with the BCS gap energy, which is in excellent agreement with the theoretically-anticipated Higgs mode.
3. **Quantum Faraday effect in graphene:** Graphene is a monolayer sheet of carbon atoms tightly bound in a form of honeycomb lattice. Graphene offers a unique arena to study the fundamental physics in condensed matter because of the presence of Dirac cones in the band structure. 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 in monolayer graphene epitaxially grown on SiC. With increasing the magnetic field, the rotation angle exhibits plateau structures at the quantum Hall steps. We have investigated systematically the effect of finite coverage of monolayer graphene on SiC substrate.
4. **Development of terahertz near-field spatio-temporal microscope:** We have developed a near-field terahertz spectroscopy system combined with the optical pump-terahertz probe spectroscopy. With the developed system, we have demonstrated the observation of spatio-temporal dynamics of free carriers photoexcited in Si.

References

- [1] R. Matsunaga, Y. I. Hamada, K. Makise, Y. Uzawa, H. Terai, Z. Wang, and R. Shimano: Higgs Amplitude Mode in the BCS Superconductors $Nb_{1-x}Ti_xN$ induced by Terahertz Pulse Excitation, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 057002 (2013).
- [2] 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.* **4**, 1841 (2013).
- [3] J. Y. Yoo and R. Shimano: Lifetime Measurement of Excitons in Si by Terahertz Time-domain Spectroscopy with High Spectral Resolution, *J. Infrared Milli. Terahz. Waves* **35**, 110 (2013).

19 Takagi Group

Research Subjects: Physics of Correlated Electron Systems

Member: Hidenori Takagi

We are exploring novel quantum phases of correlated electrons in transition metal oxides. In FY2013, main focus was placed on the spin-orbit coupling induced phases and Dirac electrons.

1. **Novel electronic phases produced by spin-orbit coupling in complex Ir oxides:** In $5d$ Ir oxides, very strong spin-orbit coupling modifies the landscape of electronic structure and electrons with $J_{eff} = 1/2$ state are responsible for conduction and magnetism. $J_{eff} = 1/2$ wave function accommodate quantum phase arising from the orbital motion. We are aiming to explore exotic phase which represent the existence of such quantum phase and recently discovered hyper-honeycomb Ir oxides, with ground state critically close to quantum spin liquid state.
 - (a) **Discovery of complex Ir oxide with hyper-honeycomb structure - playground for Kitaev physics:** In the $J_{eff} = 1/2$ magnet, an interference effect of wave function may emerge in the interaction of moments. In particular, when IrO_6 octahedra are connected by edges and Ir moments interact via the planer two Ir-O-Ir 90° bonds, the interference gives rise to a ferromagnetic coupling only for the specific orientation perpendicular to the plane. A honeycomb lattice with such anisotropic interactions is known as Kitaev model of which ground state is quantum spin liquid. Honeycomb $\alpha\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ attracted attention as a materialization of Kitaev model. In reality, however, there exists an antiferromagnetic interaction in addition to the anisotropic ferromagnetic interaction and $\alpha\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ turned out to be far away from Kitaev physics. During the course of the exploration, we discovered $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$. This compound has a lattice which can be viewed as a three dimensional analogue of honeycomb and the local coordination is essentially the same as that of $\alpha\text{-Li}_2\text{IrO}_3$, with 90° Ir-O-Ir bonds but less distorted. The result of magnetization measurement indicated that the anisotropic ferromagnetic coupling is dominant in contrast to $\alpha\text{-Li}_2\text{IrO}_3$. From those results, we concluded that the ground state should be critically close to Kitaev-type quantum spin liquid.
 - (b) **1/3 hole-doped quantum spin liquid $\text{Na}_3\text{Ir}_3\text{O}_8$:** $\text{Na}_4\text{Ir}_3\text{O}_8$ hyperkagome was discovered as a quantum liquid by the present group. To further investigate the spin liquid state, we have been working on the growth of single crystal. However, the obtained single crystal was always metallic and apparently distinct from spin liquid $\text{Na}_4\text{Ir}_3\text{O}_8$. The detailed structural analysis on the single crystal was recently performed. The result indicated that it is not $\text{Na}_4\text{Ir}_3\text{O}_8$ but $\text{Na}_3\text{Ir}_3\text{O}_8$. The crystal structure is an ordered spinel. It contains the same hyper-kagome network but A-site Na occupies not octahedral site but tetrahedral site. This compound can be viewed as 1/3 hole doped hyper-kagome spin liquid. From physical property measurements and first principle calculations, we have shown that it is a spin-orbit coupling induced semimetal as a consequence of a competition of the bonding and anti-bonding splitting of molecular orbitals on Ir_3 triangles and the orbital mixture due to the strong spin-orbit coupling.
2. **Three dimensional Dirac electrons in solid:** Three dimensional Dirac electrons in antiperovskites Two-dimensional Dirac electrons in graphene are well known. We are aiming to develop a three-dimensional analogue of Dirac electrons in graphene. Due to the interplay of symmetry of lattice and wave functions, the presence of three dimensional Dirac electrons were theoretically proposed for a family of Sr_3PbO related compound with anti-perovskite structure. Single crystals of chemically unstable Sr_3PbO were successfully grown and the presence of Dirac electrons was examined by transport measurements. An extremely large and linear magneto-resistance was observed from a low temperature to room temperature, which support for the presence of Dirac electrons. Quantum oscillation measurements are now in progress.
3. **Designing novel electronic phases in this film superstructure:**
 - (a) **Tailoring spin-orbital Mott insulator using $\text{SrIrO}_3/\text{SrTiO}_3$ super-lattice:** SrIrO_3 perovskite is a three-dimensional analogue of spin-orbital Mott insulator. The ground state is a semimetal due to the presence of symmetrically protected Dirac nodes in the band structure. We had successfully reduced the effective dimension of SrIrO_3 by slicing it with a monolayer of SrTiO_3 . With reducing the number of SrIrO_3 layer m , the system undergoes a metal-insulator transition and simultaneously magnetic transition to a weak ferromagnet. The results are consistent with that the lifting the degeneracy of Dirac nodes by breaking the time reversal symmetry with magnetic moments triggers the transition to a magnetic insulator.
 - (b) **Superconductivity at the interface of $\text{BaPbO}_3/\text{BaBiO}_3$ super-lattice:** $\text{BaPbO}_3/\text{BaBiO}_3$ super-lattice structure was fabricated by Pulsed Laser Deposition (PLD) technique. Superconductivity at $T_c = 4$ K was observed. The angular dependence of upper critical field H_{c2} indicated the two-dimensional superconductivity, which might support for the presence of interfacial superconductivity due to a charge transfer.

20 Theoretical Astrophysics Group

Research Subjects: Observational Cosmology, Extrasolar Planets, First Star Formation

Member: Yasushi Suto, Naoki Yoshida, Takashi Hosokawa, Atsushi Taruya, & Masamune Oguri

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;

2013

- Giant primordial gas clouds and massive blackholes in the early universe
- Characterization of Multi-transiting Planetary Systems with Transit Timing Variations

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

21 Murao Group

Research Subjects: Quantum Information Theory

Faculty Members: Mio Murao, Akihito Soeda

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), Akihito Soeda (Assistant Professor), two postdoctoral fellows, Michal Hajdušek (JSPS foreign postdoctoral fellow), Fabian Furrer (JSPS foreign postdoctoral fellow), and 8 graduate students, Shojun Nakayama (D3), Eyuri Wakakuwa (D2), Seiseki Akibue (D1), Kotaro Kato (M2), Kosuke Nakago (M2), Jisho Miyazaki (M2), Yuki Mori, and Atsushi Shimbo. We investigate several aspects of theoretical quantum information. Our projects worked in the academic year of 2013 were the following:

Quantum algorithm

- Random states generating algorithm [7] by Murao in collaboration with Y. Nakata (Leibniz University of Hannover) and M. Koashi (University of Tokyo)
- Possibility and impossibility of controllizing unknown quantum gates by Soeda, Nakayama, and Murao
- Implementation of projective measurement of energy and measure of implementation quality [8] by Nakayama, Soeda, and Murao

Entanglement theory

- Symmetry and typical entanglement by Murao in collaboration with Y. Nakata (Leibniz University of Hannover)
- Entanglement structure and causal order in measurement-based quantum computation [11] by Miyazaki, Hajdušek, and Murao
- Numerical analysis of geometric measures of entanglement by Mori, Soeda, and Murao

Quantum information processing in continuous variable systems

- Entropic measurement-disturbance relations [1] by Furrer in collaboration with M. Berta (ETH Zurich), V. Scholz (ETH Zurich), M. Christandl (ETH Zurich) and M. Tomamichel (CQT, National University of Singapore)
- Continuous variable uncertainty relation in the presence of a quantum memory [2] by Furrer in collaboration with M. Berta (ETH Zurich), V. Scholz (ETH Zurich), M. Christandl (ETH Zurich) and M. Tomamichel (CQT, National University of Singapore)
- Continuous variable quantum key distribution [4] by Furrer in collaboration for theory with J. Duhme (Leibniz University Hannover), T. Franz (Leibniz University Hannover), R.F. Werner (Leibniz University Hannover), and C. Pacher (Austrian Institute of Technology) and for experiments with T. Eberle (Albert Einstein Institute Hannover), V. Haendchen (Albert Einstein Institute Hannover), and R. Schnabel (Albert Einstein Institute Hannover)

Distributed quantum information processing

- Resource compression for LOCC implementations of bipartite unitary gates [9] by Wakakuwa and Murao
- Implementability of unitary operations over the butterfly, grail and cluster networks with free classical communication by Akibue and Murao
- Encoding and decoding of classical information onto quantum state by LOCC by Shimbo, Soeda, and Murao

Quantum information processing using ground states

- Entanglement theory in anyonic systems [10] by Kato, Furrer, and Murao
- Adiabatic gate teleportation [12] by Nakago, Hajdušek, Nakayama, and Murao

Please refer our webpage: <http://www.eve.phys.s.u-tokyo.ac.jp/indexe.htm>

References

1. P. Coles and F. Furrer, *Entropic formulation of Heisenberg's measurement-disturbance relation*, arXiv:1311.7637 (2013)
2. M. Berta, M. Christandl, F. Furrer, V. Scholz and M. Tomamichel, *Continuous Variable Entropic Uncertainty Relations in the Presence of Quantum Memory*, arXiv:1308.4527 (2013)
3. K. Kato, F. Furrer and M. Murao, *Operational Meaning of Entanglement Entropy in Anyonic Systems*, arXiv:1310.4140 (2013)

4. T. Eberle, V. Haendchen, J. Duhme, T. Franz, F. Furrer, R. Schnabel and R. F. Werner, *Gaussian Entanglement for Quantum Key Distribution from a Single-Mode Squeezing Source*, *New J. Phys.* **15**, 053049 (2013)
5. J. Miyazaki, M. Hajdušek and M. Murao, *Translating measurement-based quantum computation with gflow into quantum circuit*, arXiv:1310.4043
6. K. Nakago, M. Hajdušek, S. Nakayama and M. Murao, *Parallelized adiabatic gate teleportation*, arXiv:1310.4061
7. Y. Nakata and M. Murao, *Diagonal-unitary 2-designs and their implementations by quantum circuits*, *International Journal of Quantum Information* **11**, 1350062 (2013)
8. S. Nakayama, A. Soeda and M. Murao, *Universal implementation of projective measurement of energy*, arXiv:1310.3047 (2013)
9. E. Wakakuwa and M. Murao, *Resource Compression for Distributed Quantum Computation*, arXiv:1310.3991 (2013)
10. K. Kato, F. Furrer and M. Murao *Operational Meaning of Entanglement Entropy in Anyonic Systems*, arXiv:1310.4140 (2013)
11. J. Miyazaki, M. Hajdušek, and M. Murao, *Translating measurement-based quantum computation with gflow into quantum circuit*, arXiv:1310.4043 (2013)
12. K. Nakago, M. Hajdušek, S. Nakayama and M. Murao, *Parallelized adiabatic gate teleportation*, arXiv:1310.4061 (2013)

22 Ueda Group

Research Subjects: Bose-Einstein condensation, fermionic superfluidity, cold molecules, measurement theory, quantum information, information thermodynamics

Member: Masahito Ueda and Shunsuke Furukawa

With recent advances in nanoscience, it has become possible to precisely measure and control atoms, molecules, and photons at the level of a single quantum. We are interested in theoretically studying emergent quantum many-body problems in such highly controlled systems and developing nanoscale thermodynamics and statistical physics that lay the foundations of such problems. Our particular focuses in recent years include many-body physics of ultracold atomic gases and unification of quantum and statistical physics and information theory. Atomic gases which are cooled down to nearly zero temperature by laser cooling techniques offer unique opportunities for studying macroscopic quantum phenomena such as a Bose-Einstein condensation (BEC) in controlled manners. Unprecedented controllability of such gases also enables us to simulate phenomena analogous to condensed matter and astronomical physics, to investigate their universal properties, and to explore unknown quantum many-body physics. In our recent works, we have studied topological excitations and correlation effects in spinor BECs, BCS-BEC crossover and Efimov physics under the control of an atomic interaction strength, quantum Hall states in synthetic gauge fields, and thermalization of isolated quantum systems. We are also interested in relating fundamental concepts of quantum and statistical physics with information theory and exploring interdisciplinary fields that unify physics and information. In particular, we have recently worked on generalizations of the second law of thermodynamics and fluctuation theorems and the formulation of the dynamics of state reduction in light of information flow under measurements and feedback controls. We list our main research subjects in FY2013 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms
 - Synthesis of spin-orbit coupling with magnetic-field-gradient pulses [1]
 - Quantized vortices in spin-orbit-coupled BECs [2]

- Integer quantum Hall state of bosons [3]
- Fluctuation effects in quantum phase transitions in spinor BECs [5]
- Topological influence and backaction between topological excitations [8]
- Cluster expansion study of BCS-BEC crossover [9]
- Universality of three-body parameter in Efimov states [10]
- Quantum Information, Quantum Measurement, and Foundation of Statistical Mechanics
 - Simultaneous continuous measurement of photon-counting and homodyne detection [4]
 - Integral quantum fluctuation theorems under measurement and feedback control [6]
 - Thermodynamic work gain from entanglement [7]

- [1] Z.-F. Xu, L. You, and M. Ueda, Phys. Rev. A **87**, 063634 (2013).
[2] Z.-F. Xu, S. Kobayashi, and M. Ueda, Phys. Rev. A **88**, 013621 (2013).
[3] S. Furukawa and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **111**, 090401 (2013).
[4] Y. Kuramochi, Y. Watanabe, and M. Ueda, J. Phys. A: Math. Theor. **46**, 425303 (2013).
[5] N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, and M. Ueda, Physical Review A **88**, 043629 (2013).
[6] K. Funo, Y. Watanabe, and M. Ueda, Phys. Rev. E **88**, 052121 (2013).
[7] K. Funo, Y. Watanabe, and M. Ueda, Phys. Rev. A **88**, 052319 (2013).
[8] S. Kobayashi, N. Tarantino, and M. Ueda, Phys. Rev. A **89**, 033603 (2014).
[9] N. Sakumichi, Y. Nishida, and M. Ueda, Phys. Rev. A **89**, 033622 (2014).
[10] P. Naidon, S. Endo, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **112**, 105301 (2014).

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*.

Neutron Stars (NSs) and Super-Nova Remnants (SNRs): We conduct *Suzaku* studies of NSs with various magnetic field strengths, B , believing that their magnetism is a manifestation of nuclear ferromagnetism. Our research targets include X-ray bursters with $B < 10^9$ G, canonical pulsars 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. Through an apparent age discrepancy between a magnetar and an SNR associated to it, we reinforced the view that magnetars are indeed losing its magnetic energy. From one magnetar, free precession was detected, and was interpreted as evidence for NS deformation by very high toroidal magnetic fields reaching 10^{16} G [1].

Mass Accreting Black Holes: Mass accretion onto black holes provides an efficient way of X-ray production. In active galactic nuclei (massive black holes), our new variability-assisted spectroscopy technique revealed that the primary X-ray emission in fact consists of two distinct components [2]. This is expected to settle several long-lasting issues as to AGNs, including the mechanism of their “central engines”.

Unification of thermal Comptonization process: Thermal Comptonization is a process widely seen among mass-accreting objects [3]. In addition to the y -parameter, we discovered that a new parameter, $Q \equiv (\text{electron emperature})/(\text{seed photon temperature})$ provide good description of these processes.

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 in clusters of galaxies. We obtained novel evidence that member

galaxies in each cluster have been falling, over the Hubble time, to its potential center [4]. This is presumably due to magneto-hydrodynamic interactions between the hot plasma and the galaxies moving through it. We also found an excellent example of merging cluster at its early merger phase.

GROWTH (Gamma-Ray Observation of Winter Thunder clouds) experiment: This is a semi-automated gamma-ray experiment placed at Kasiwazaki, Niigata, to watch for bursts of gamma-rays from winter thunderclouds. Over 7 winters, we have detected altogether more than a dozen bursts, with their energies extending to ~ 10 MeV. One of them exhibits clear 511 keV line in its spectrum.

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 [5] and their read-out electronics, double-strip silicon detectors, and onboard/ground software systems.

1. Makishima, K., Enoto, T., Hiraga, J.S., Nakano, T., Nakazawa, K., Sakurai, A., Sasano, M. & Murakami, H.: "Possible Evidence for Free Precession of a Strongly Magnetized Neutron Star in the Magnetar 4U 0142+61", *Phys. Rev. Lett.*, in press (2014)
2. Noda, H., Makishima, K., Nakazawa, K. & Yamada, S., "A *Suzaku* Discovery of a Slowly Varying Hard X-ray Continuum from the Type I Seyfert Galaxy NGC 3516", *Astrophys.J.* **771**, id100(2013)
3. Sakurai, S., Torii, S., Noda, H., Zhang, Z., Ono, K., Nakazawa, K., Makishima, K., Takahashi, H., Yamada, S. & Matsuoka, M.: "Suzaku studies of luminosity-dependent changes in the low-mass X-ray binary Aquila X-1", *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, Art. No. 66 (2014)
4. 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**, id 157 (2013)
5. Sasano, M., Nishioka, H., Okuyama S., Nakazawa K., Makishima K., Yamada S., Yuasa T., et al.: "Geometry dependence of the light collection efficiency of BGO crystal scintillators read out by Avalanche Photo Diodes", *Nuc. Ins. Meth. A.* **715**, 105 (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, Naoto Tsujii

We perform experiments on the TST-2 spherical tokamak at the Kashiwa Campus in order to develop physics understanding and technology to realize nuclear fusion power. The current focus of our group is the study of non-inductive plasma start-up using the lower hybrid wave (LHW) on TST-2. We have four 200 MHz transmitters with ~ 100 kW source power each.

In FY2013, current drive experiments were performed using the dielectric loaded waveguide array (grill) antenna which has the capability to vary the wavenumber spectrum of the excited LHW. It was found that the optimum wavenumber is around $n_{\parallel} = 1-6$ ($n_{\parallel} = ck_{\parallel}/\omega$) on TST-2. Power modulation experiments were carried out and the fast electrons generated by LHW were found to be promptly lost, much faster than the collisional slowing down time. Analysis using numerical simulations show that this is due to orbit loss of fast electrons with large banana widths, which should be mitigated once the plasma current reaches ~ 50 kA. A new high impedance probe was developed to measure the floating potential fluctuations of LHW. The measured wavenumber was found to be around 20 m^{-1} , consistent with the wavenumber of the LHW excited by the antenna.

Experiments using the capacitively coupled comblin (CCC) antenna, newly developed in collaboration with General Atomics (US), have started. Plasma current ramp-up up to 12 kA has been achieved so far. Including the previously used inductively coupled comblin (ICC) antenna, three types of antennas were

compared. The dependence of the maximum current on parameters such as the magnetic field was similar for the three antennas. On the other hand, the new CCC antenna had the highest current drive efficiency among the three antennas.

Pressure anisotropy in inductively formed TST-2 plasmas was measured using a double-pass Thomson scattering diagnostic. Parallel and perpendicular pressures were measured with the plasma current in the co/counter direction. Anisotropies of up to 100% were observed. The three temperature model (co, counter, perpendicular) fits the experimental data better than the simpler shifted-Maxwellian model. The Reynolds stress and the Maxwell stress arising from turbulent fluctuations, and the plasma flow were also measured using a new probe over a wide region in the low field side edge of the torus.

For studies of plasma equilibrium created inductively or non-inductively, new diagnostics are being developed. A small Rogowski probe was developed to measure the local current density. Pick-ups from external magnetic fields were successfully eliminated by optimizing the cable winding pattern. Local current measurements with S/N of 10 are now possible in inductively formed plasmas.

A multi-pass Thomson scattering system is being developed to measure electron temperature and density in low density plasmas created non-inductively. Ten round trips of a laser pulse were observed after optimization of the optical system. With the present efficiency of the optical system, the improvement in S/N was found to be around 30%.

Our group also collaborate with other fusion experiments in Japan and abroad, including JT-60SA, LHD, LATE, QUEST, Alcator C-Mod (US), and MAST (UK).

Thomson scattering of RF driven steady-state plasmas is being developed on the QUEST spherical tokamak at Kyushu University. This fiscal year, plasmas were created with 28 GHz electron cyclotron heating. With additional injection of 8.2 GHz, mode conversion to the electron Bernstein wave (EBW) is expected. Thomson scattering measurements provided useful profile data to help with the optimization of mode conversion to EBW.

Measurements of density fluctuations associated with the ICRF (ion cyclotron range of frequencies) fast wave on LHD using a microwave reflectometer. Dependences of the RF fluctuation levels on parameters such as the minor radius, RF power, and ion species concentration, were investigated. Comparing the RF fluctuation levels for waves excited by antennas at six different toroidal locations, the decay length of the wave intensity was determined to be around 4 m.

In FY2013, a new RF magnetic probe was developed for measurements of LHW at 4.6 GHz on Alcator C-Mod at MIT. Prototypes of the probe were fabricated, and bench tests showed the wavenumber of the wave can be measured with an accuracy of 1.5%.

25 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 thermal effects, (ii) small systems, in which non-equilibrium and thermal fluctuations have comparable effects, (iii) biological phenomena, as important instances where non-equilibrium dynamics plays the essential role. More specifically, our current research topics include:

1. Macroscopic systems out of equilibrium

- (1) Universal fluctuations of growing interfaces [1, 9]
- (2) Laminar-turbulence transition in channel flow
- (3) Rheology of non-Brownian particle suspensions
- (4) Lehmann effect of cholesteric liquid crystal under temperature gradient

2. Small systems out of equilibrium

- (1) Formulation of thermodynamics of subsystems in terms of information transfer [5]
- (2) Scale dependence of stochastic thermodynamics and steady state thermodynamics [7]

3. Biological systems and active matter

- (1) Collective motion of active matter due to short-range nematic interactions
- (2) Investigations of active matter using self-propelled particles
- (3) Phenomenological model of F₁-ATP-ase

References

1. K. A. Takeuchi: Crossover from Growing to Stationary Interfaces in the Kardar-Parisi-Zhang Class, *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 210604 (2013).
2. K. A. Takeuchi and H. Chaté: Collective Lyapunov modes, *J. Phys. A: Math. Theor.*, **46**, 254007 (2013).
3. M. Y. Matsuo, H. Tanimoto and M. Sano: Large fluctuation and Lévy movement of an active deformable particle, *Europhys. Lett.* **102**, 40012 (2013).
4. J.-B. Delfau, C. Coste, and M. Saint Jean: Noisy zigzag transition, fluctuations, and thermal bifurcation threshold, *Phys. Rev. E*, **87**, 062135 (2013).
5. S. Ito and T. Sagawa: Information Thermodynamics on Causal Networks, *Phys. Rev. Lett.*, **111**, 180603 (2013).
6. I. Imayoshi, A. Isomura, Y. Harima, K. Kawaguchi, H. Kori, H. Miyachi, T. Fujiwara, F. Ishidate, and R. Kageyama: Oscillatory control of factors determining multipotency and fate in mouse neural progenitors, *Science*, **342**, 1203-1208 (2013).
7. K. Kawaguchi and Y. Nakayama: Fluctuation theorem for hidden entropy production, *Phys. Rev. E*, **88**, 022147 (2013).
8. H. Ebata and M. Sano: Bifurcation from stable holes to replicating holes in vibrated dense suspensions, *Phys. Rev. E*, **88**, 053007 (2013).
9. K. A. Takeuchi: Experimental approaches to universal out-of-equilibrium scaling laws: turbulent liquid crystal and other developments, *J. Stat. Mech.*, **2014**, P01006 (2014).
10. H. Tanimoto and M. Sano: A Simple Force-Motion Relation for Migrating Cells Revealed by Multipole Analysis of Traction Stress, *Biophys. J.* **106**, 16-25 (2014).

26 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

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 an 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 CH₄ which is evaporated from ice mantles. This has recently been confirmed by our detection of CH₃D 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 protoplanetary disks by using ALMA. In L1527, we have found that carbon-chain molecules only exist in an infalling-rotating envelope outside the centrifugal barrier ($r = 100$ AU), while SO preferentially exists around the centrifugal barrier. Hence, chemical compositions drastically changes across the centrifugal barrier of the infalling gas. Further analyses are 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 ¹³CO $J = 8 - 7$ line emission. We are expecting the scientific run from 2015.

[1] 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).

[2] 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).

[3] Sakai, N. and Yamamoto, S., “ Warm Carbon-Chain Chemistry ”, *Chemical Reviews*, **113**, 8981 (2014).

[4] Sakai, N. et al., “ Change in the Chemical Composition of Infalling Gas Forming a Disk around a Protostar ”, *Nature*, **507**, 78, 2014.

27 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) Laser-field-free orientation of state-selected asymmetric top molecules [1]

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 is maintained in the laser-field-free condition for 5–10 ps, which is long enough to study femtosecond-attosecond dynamics in molecules, after the rapid turn off of the laser pulse. The observation of the slow dephasing time of 5–10 ps ensures future prospects in molecular orientation techniques. 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 spectroscopic technique to investigate ultrafast rotational dynamics of molecules.

(2) High-order harmonics generation from aligned molecules with carrier-envelope-phase-stabilized 10-fs pulses [2]

Clear interference fringes are observed in the high-order harmonic spectra generated from aligned molecules with carrier-envelope-phase-stabilized 10-fs pulses. A detailed Fourier analysis successfully reveals that the fringes are dependent on the carrier-envelope-phase and are formed by the interference between attosecond pulses *when the harmonic chirp is significantly large*. We further examine the possibility of observing the harmonic phase change in the harmonic spectra generated from aligned CO₂, which is associated with the destructive interference in the recombination process, and in those from aligned N₂, which is associated with the contributions from multiple orbitals, HOMO and HOMO-1.

- [1] Je Hoi Mun, Daisuke Takei, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Laser-field-free orientation of state-selected asymmetric top molecules,” to appear in *Physical Review A* as a Rapid Communication (2014).
- [2] Yusuke Sakemi, Shinichirou Minemoto, Kosaku Kato, and Hirofumi Sakai, “High-order harmonics generation from aligned molecules with carrier-envelope-phase-stabilized 10-fs pulses,” submitted to *Physical Review A*.

28 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"). Institute for Photon Science and Technology was established in 2013 with the mission to create new interdisciplinary science through the developments and applications of state-of-the-art photon science and technologies. This Institute is hosting "Innovative Center for Coherent Photon Technology" that aims to paradigm-shift the concept of "manufacturing" using coherent phonon technologies and works to create new sciences needed to support the future vision of our society and the industry.

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) Polarization-controlled circular second-harmonic generation from metal hole arrays with three-fold rotational symmetry
 - (b) Terahertz polarization pulse shaping with arbitrary field control
 - (c) Control of THz optical activity with active spiral metamaterials
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

-
- [1] Z. Zheng, N. Kanda, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami: Efficient coupling of propagating broadband terahertz radial beams to metal wires, *Optics Express*, **21**, 10642 (2013).
- [2] T. Kan, A. Isozaki, N. Kanda, N. Nemoto, K. Konishi, M. Kuwata-Gonokami, K. Matsumoto, and I. Shimoyama: Spiral metamaterial for active tuning of optical activity, *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 221906 (2013).
- [3] T. Higuchi, M. Kuwata-Gonokami: Microscopic origin of magnetic linear dichroism in the antiferromagnetic insulator MnF_2 , *Phys. Rev. B*, **87**, 224405 (2013).
- [4] J. Omachi, T. Suzuki, K. Kato, N. Naka, K. Yoshioka, and M. Kuwata-Gonokami: Observation of excitonic N-body bound states: Polyexcitons in diamond, *Phys. Rev. Lett.*, **111**, 026402 (2013).
- [5] K. Yoshioka, Y. Morita, K. Fukuoka, and M. Kuwata-Gonokami: Generation of ultracold paraexcitons in cuprous oxide: A path toward a stable Bose-Einstein condensate, *Phys. Rev. B*, **88**, 041201(R) (2013). Editors' Suggestion
- [6] M. Sato, T. Higuchi, N. Kanda, K. Konishi, K. Yoshioka, T. Suzuki, K. Misawa, and M. Kuwata-Gonokami: Terahertz polarization pulse shaping with arbitrary field control, *Nature Photonics*, **7**, 724 (2013). Selected for the issue cover
- [7] K. Kitano, N. Ishii, N. Kanda, Y. Matsumoto, T. Kanai, M. Kuwata-Gonokami, J. Itatani: Orientation of jet-cooled polar molecules with an intense single-cycle THz pulse, *Phys. Rev. A*, **88**, 061405 (2013).
- [8] Y. Hazama, N. Naka, M. Kuwata-Gonokami, K. Tanaka: Resonant creation of indirect excitons in diamond at the phonon-assisted absorption edge, *Euro Phys. Lett.*, **104** 47012 (2013).
- [9] P. A. Obraztsov, T. Kaplas, S. V. Garnov, M. Kuwata-Gonokami, A. N. Obraztsov, Y. P. Svirko: All-optical control of ultrafast photocurrents in unbiased grapheme, *SCIENTIFIC REPORTS*, **4**, 4007 (2013)
- [10] K. Yoshioka, K. Miyashita, and M. Kuwata-Gonokami: Stability of ultracold high-density 1s orthoexcitons in Cu_2O studied by resonant two-photon excitation with phase-modulated pulse, *Optics Express* **22**, 3261 (2014)
- [11] K. Konishi, T. Higuchi, J. Li, J. Larsson, S. Ishii, and M. Kuwata-Gonokami: Polarization-controlled circular second-harmonic generation from metal hole arrays with threefold rotational symmetry, *Phys. Rev. Lett.*, **112**, 135502 (2014)

29 Ando Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Gravitational Wave, Laser Interferometer

Member: Masaki Ando 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
- Space laser interferometer, DECIGO
- 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
- Study of space isotropy

Reference

- [1] A. Shoda, M.Ando, K. Ishidoshiro, K. Okada, W. Kokuyama, Y. Aso, K. Tsubono: Search for a stochastic gravitational-wave background using a pair of torsion-bar antennas, *Phys. Rev. D*, 89, 027101 (2014)
- [2] Y. Aso, Y. Michimura, et al.: Interferometer Design of the KAGRA Gravitational Wave Detector, *Phys. Rev. D* 88, 043007 (2013)
- [3] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, Kimio Tsubono: New Limit on Lorentz Violation Using a Double-Pass Optical Ring Cavity, *Phys. Rev. Lett.* 110, 200401 (2013)
- [4] Yuta Michimura, Matthew Mewes, Nobuyuki Matsumoto, Yoichi Aso, Masaki Ando: Optical cavity limits on higher order Lorentz violation, *Phys. Rev. D* 88, 111101(R) (2013)
- [5] J. Harms, BJJ. Slagmolen, RX. Adhikari, MC. Miller, M. Evans, YB. Chen, H. Muller, M. Ando: Low-frequency terrestrial gravitational-wave detectors, *Phys. Rev. D* 88, 122003 (2013)
- [6] Masaki Ando: DECIGO Pathfinder Int. *J. Modern. Phys. D* 22, 1341002 (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 fruit fly, *Drosophila*. A part of our recent research activity is summarized below.

1. Role of Sensory Experience in the Development of Motor Circuits

Neuronal circuits are formed according to a genetically predetermined program and then reconstructed in an experience dependent manner. While the existence of experience-dependent plasticity has been demonstrated for the visual and other sensory systems, it remains unknown whether this is also the case for motor systems. Here we examined the effects of eliminating sensory inputs on the development of peristaltic movements in *Drosophila* embryos and larvae. The peristalsis is initially slow and uncoordinated, but gradually develops into a mature pattern during late embryonic stages. We tested whether inhibiting the transmission of specific sensory neurons during this period would have lasting effects on the properties of the sensorimotor circuits. By using Shibire-mediated inhibition, we showed that inhibition of chordotonal organs during specific period during embryonic development led to a lasting decrease in the speed of larval locomotion. The results suggest that neural activity mediated by specific sensory neurons is involved in the maturation of sensorimotor circuits in *Drosophila* and that there is a critical period for this plastic change.

2. Neural Circuits Modulating the Larval Turning Behavior

Serotonin (5-HT) is known to modulate motor outputs in a variety of animal behaviors. However, the downstream neural pathways of 5-HT remain poorly understood. We studied the role of 5-HT in directional change, or turning, behavior of fruit fly (*Drosophila melanogaster*) larvae. We analyzed light- and touch-induced turning and found that turning is a combination of three components: bending, retreating, and rearing. Serotonin transmission suppresses rearing; when we inhibited 5-HT neurons with Shibire or Kir2.1, rearing increased without affecting the occurrence of bending or retreating. We identified a class of abdominal neurons called the abdominal LK neurons (ABLKs), which express the 5-HT1B receptor and the neuropeptide leucokinin, as downstream targets of 5-HT that are involved in the control of turning. Increased rearing was observed when neural transmission or leucokinin synthesis was inhibited in these cells. Forced activation of ABLKs also increased rearing, suggesting that an appropriate level of ABLK activity is critical for the control of turning. Calcium imaging revealed that ABLKs show periodic activation with an interval of ~ 15 s. The activity level of ABLKs increased and decreased in response to a 5-HT agonist and antagonist, respectively. Our results suggest that 5-HT modulates larval turning by regulating the activity level of downstream ABLK neurons and secretion of the neuropeptide leucokinin.

References

- [1] Matsunaga, T., Fushiki, A., Nose, A. and Kohsaka, H.: Optogenetic Perturbation of Neural Activity with Laser Illumination in Semi-intact *Drosophila* Larvae in Motion. *J. Vis. Exp.* 2013 Jul 4;(77), e50513 (2013).
- [2] Fushiki, A., Kohsaka, H. and Nose, A.: Role of sensory experience in functional development of *Drosophila* motor circuits. *PLoS One.* 2013 Apr 19;8(4), e62199 (2013).
- [3] Okusawa, S., Kohsaka, H. and Nose, A.: Serotonin and downstream leucokinin neurons modulate larval turning behavior in *Drosophila*. *J Neurosci.* 34, 2544-2558 (2014).

31 Higuchi Group

Research Subjects: Motor proteins in in vitro, cells and mice

Member: Hideo Higuchi and Motoshi Kaya

Biophysical and Biochemical characterization of human cytoplasmic dynein

Dynein is a molecular motor that moves toward the minus-end of microtubules, and responsible for transporting various cargos, positioning the Golgi complex and mitotic spindles in cells. The motor properties of dynein are relatively well understood for yeast dynein, while those of human dynein are still obscure. Here, we performed biophysical and biochemical characterization of human cytoplasmic dynein. The maximum microtubule gliding velocity of the motor domain of dynein was 976 $\mu\text{m/s}$ with K_m of 49 μM for ATP. ADP was competitive inhibitor with $K_i=135\mu\text{M}$. When nucleotide was depleted from dynein, dynein was unable to bind to microtubules in the absence of ATP. Furthermore, dynein movement was rescued when ATP was added to nucleotide-depleted dynein, unlike kinesin.

Power Stroke Measurement of Human Cytoplasmic Dynein

Cytoplasmic dynein is a motor protein moving along microtubules toward the minus-end, and plays an important role in cellular processes. Previously we reported that dynein moves continuously along microtubule, and takes dominantly 8 nm step. The mechanism of dynein movement remains unknown. Here, we used dumbbell dual-trap optical tweezers instrument to measure the size of power stroke driven by conformational changes of single-headed dynein. We expressed the motor domain of human cytoplasmic dynein in SF9 cells and purified by Flag-tag affinity. Mutant kinesin, T93N, was used for adhesion between microtubule and bead. We finished setting up the dumbbell instrument and started to measure the power stroke distance.

A non-invasive technique for the in vivo tracking of high-speed vesicle transport in mouse neutrophils

Neutrophils play an essential role in the innate immune response. We developed a new non-invasive technique for the in vivo imaging of neutrophils labeled with quantum dots, up to 100 μm below the skin surface of mice. The quantum dots were endocytosed into vesicles in the neutrophils, allowing us to track the vesicles at 12.5 msec/frame with 15-24 nm accuracy. Most intriguingly, the vesicles containing quantum dots were transported at higher speed than the in vitro velocity of a molecular motor such as kinesin or dynein. This is the first report in which non-invasive techniques have been used to visualize the internal dynamics of neutrophils. In this symposium, I'll report recent progress in the molecular mechanism of the vesicle transport in the neutrophil.

Noninvasive in vivo imaging of tumor cells in a novel xenograft model

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 μm) 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 was 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.

III

2013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

1. 特殊相対性理論
2. 相対論的運動学
3. 電場
4. 磁場
5. 電磁誘導と Maxwell の方程式
6. 電磁場中での荷電粒子の運動方程式
7. 準定常電磁場と交流理論
8. 相対論的な電磁気学の形式

1.2 解析力学/量子力学 I : 吉田 直紀, 村尾 美緒

1. 解析力学
 - 1.1 ニュートンの法則からラグランジュ形式へ
 - 1.2 ラグランジュ方程式とその応用
 - 1.3 最小作用の原理
 - 1.4 対称性と保存則
 - 1.5 ハミルトン形式と正準変換
 - 1.6 ハミルトン-ヤコビの偏微分方程式
2. 量子力学 I
 - 2.1 量子力学の導入と波動関数
 - 2.2 シュレディンガー方程式と定常状態
 - 2.3 矩形ポテンシャルとトンネル効果
 - 2.4 調和振動子と不確定性原理
 - 2.5 ヒルベルト空間と状態ベクトル
 - 2.6 ハミルトニアン動力学と量子測定

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
 - 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
5. 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

1.5 物理数学 II : 立川 裕二

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

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

3.3 回転群と四元数

2 3年生 夏学期

2.1 電磁気学 II : 島野 亮

1. 電磁場の基本法則

1.1 真空中の Maxwell 方程式

1.2 微視場と巨視場

1.3 分極と磁化

1.4 連続媒体 (物質) 中の Maxwell 方程式

1.5 電磁場とポテンシャル

2. 静電場

2.1 静電場の方程式

2.2 境界値問題とグリーン関数の方法

2.3 極座標における境界値問題

2.4 誘電体

3. 静磁場と定常電流

3.1 静磁場の方程式とアンペールの法則

3.2 境界値問題

3.3 磁性体

4. 電磁波

4.1 真空中と物質中の電磁波

4.2 電磁波の伝搬

4.3 電磁波の性質

4.4 電磁波のエネルギーと運動量

2.2 量子力学 II : 浜口 幸一

0. はじめに

1. 3次元・球対称ポテンシャル内での粒子

1.1 この章でやること

1.2 可換な演算子の固有状態

1.3 角運動量演算子

1.4 角運動量演算子の固有状態

1.5 角運動量の固有状態を座標表示すると球面調和関数

1.6 動径方向

1.7 水素原子

A. 運動量 P は並進の生成子、角運動量 L は回転の生成子A.1 P は並進A.2 L は回転

2. 角運動量とスピン

2.1 角運動量の合成と Clebsch-Gordan 係数

2.2 スピン

2.3 $s=1/2$ のとき：パウリ行列

2.4 スピンと磁気モーメント

3. 様々な近似法

3.1 摂動論（定常状態）

3.2 摂動論（時間発展）

3.3 WKB 近似

4. 対称性と保存則

5. オマケ

2.3 現代実験物理学 I : 長谷川 修司, 溝川 貴司

4学期の「物理実験学」に引き続いて、主として物性物理学に関連する実験手法について、「物理実験 I」および「物理実験 II」で行う実験を中心に、物理的な原理や歴史的な背景とともに最近の話題も含めて概説する。

1. X線

1.1 X線の発見

1.2 特性X線と連続X線

1.3 Moseleyの法則

1.4 Thomson 散乱と Compton 散乱

1.5 X線回折結晶学

1.6 X線研究の拡がり

1.7 CT

1.8 リソグラフィ

1.9 宇宙X線

2. 電子

2.1 粒子性と波動性

2.2 電子回折と顕微鏡

2.3 Aharonov-Bohm 効果

2.4 トンネル効果と走査トンネル顕微鏡

3. 多様な実験手法

3.1 顕微鏡

3.2 分光法

3.3 伝導

4. 低温を利用する実験手法

- 4.1 低温技術
- 4.2 超流動
- 4.3 超伝導
- 5. 磁場を利用する実験手法
 - 5.1 磁場の発生
 - 5.2 SQUID と MEG
 - 5.3 NMR と MRI
- 6. 電磁波を利用する実験手法

- 6.1 光源技術
- 6.2 ポンプ・プローブ分光
- 6.3 X線散乱
- 7. 粒子線を利用する実験手法
 - 7.1 電子線散乱
 - 7.2 光電子分光
 - 7.3 中性子散乱
 - 7.4 μ SR

2.4 統計力学 I : 佐野 雅己

- 1. 熱力学再考
 - 1.1 熱力学第二法則
 - 1.2 熱力学関数と変分原理
- 2. 統計力学の基礎と適用
 - 2.1 統計力学の原理
 - 2.2 ミクロカノニカル分布
 - 2.3 カノニカル分布
 - 2.4 グランドカノニカル分布
 - 2.5 理想気体 (単原子分子、2原子分子)

- 2.6 物性への適用 (磁性、固体の比熱、高分子鎖とゴム弾性、生物物理)
- 3. 量子統計力学
 - 3.1 量子統計の考え方
 - 3.2 理想フェルミ気体
 - 3.3 理想ボース気体
 - 3.4 縮退したフェルミ気体
 - 3.5 量子統計の適用 (固体の比熱、黒体放射)
 - 3.7 ボース・アインシュタイン凝縮

3 3年生 冬学期

3.1 物理数学 III : 松尾 泰

- 1. 群論
 - 1.1 物理学と対称性
 - 1.2 基礎概念
 - 1.3 指標とその直交性
 - 1.4 点群
 - 1.5 分子振動への応用
 - 1.6 同一粒子の取り扱い

- 1.7 リー群とリー代数
- 2. 微分形式
 - 2.1 外積代数
 - 2.2 微分形式とその基本的な性質
 - 2.3 ベクトル解析との関係
 - 2.4 電磁気学への応用
 - 2.5 積分定理

3.2 量子力学 III : 福嶋 健二

- 1. 多体系の量子論
 - 1.1 同種2粒子系

- 1.2 同種多粒子系
- 1.3 第二量子化
- 1.4 Hartree-Fock 近似
- 1.5 電磁場との相互作用
- 2. 散乱問題
 - 2.1 波束とポテンシャル散乱
 - 2.2 中心力ポテンシャルと部分波展開
- 3.3 固体物理学 I : 岡本 徹
 - 1. 原子構造
 - 1.1 水素原子
 - 1.2 多原子分子
 - 1.3 イオン化エネルギー
 - 2. 結晶の結合力
 - 2.1 イオン結合
 - 2.2 共有結合
 - 2.3 金属結合
 - 2.4 ファンデルワールス結合
 - 3. 結晶構造
 - 3.1 空間格子と単位胞
 - 3.2 空間格子の分類
 - 3.3 代表的な結晶構造
 - 4. 逆格子
 - 4.1 逆格子の求め方
 - 4.2 X線回折
 - 4.3 ブリルアン域
 - 5. 結晶中の電子
 - 5.1 ブロッフ状態
 - 5.2 ポテンシャルが小さい場合
 - 5.3 エネルギーバンド
 - 5.4 束縛が強い場合
 - 6. 電子の運動
 - 6.1 電子の速度
 - 6.2 運動方程式
 - 6.3 有効質量
 - 6.4 磁場中の運動
 - 7. 金属中の伝導電子
 - 7.1 比熱
 - 7.2 電気伝導と散乱機構
 - 7.3 ボルツマン方程式と輸送係数
 - 8. 半導体
 - 8.1 電子と正孔
 - 8.2 不純物ドーピング
 - 8.3 pn 接合
 - 8.4 量子ホール効果
 - 8.5 メゾスコピック系
- 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
 - 2. 単位系とスケール
 - 2.1 自然単位系
 - 2.2 エネルギーと距離のスケール
 - 3. 相対論的運動学
 - 3.1 相対論的エネルギー・運動量
 - 3.2 粒子の生成, 崩壊
 - 4. 反応断面積と遷移確率
- 2.3 Lippmann-Schwinger 方程式と Born 近似
- 2.4 Eikonal 近似
- 2.5 光子の吸収・放出
- 2. 非平衡場の量子論入門
 - 2.1 Wigner 関数の性質
 - 2.2 Schwinger-Keldysh 形式

- 4.1 反応断面積
- 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
- 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

3.5 電磁気学 III : 櫻井 博儀

- 1. 電磁波の基礎
 - 1.1 真空中の電磁場
 - 1.2 電磁波のスペクトル
- 2. 電磁波の伝播
 - 2.1 物質中の電磁波
 - 2.2 分散
 - 2.3 反射と屈折
 - 2.4 導波管
 - 2.5 空洞共振器
- 3. 電磁波の放射
 - 3.1 遅延ポテンシャルと先進ポテンシャル
 - 3.2 遅延ポテンシャルの多重極展開
- 4. 荷電粒子の出す電磁波
 - 4.1 リエナール-ヴィーヘルトのポテンシャル
 - 4.2 運動する荷電粒子の作る電磁場
 - 4.3 制動放射
 - 4.4 点電荷による電磁波の散乱
 - 4.5 チェレンコフ放射

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、生命現象の基本原則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. 蛋白質の構造と機能
- 4. 細胞内タンパク質のダイナミクス
- 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クス
- 7. バイオイメーjing、生体分子計測

8. 脳・神経系の生物物理

3.7 統計力学 II : 青木 秀夫

1. 相転移

- 1.1 秩序パラメータと対称性の破れ
- 1.2 二次相転移と 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

- 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

3.8 固体物理学 I : 岡本 徹

1. 原子構造

- 1.1 水素原子
- 1.2 多原子分子
- 1.3 イオン化エネルギー

2. 結晶の結合力

- 2.1 イオン結合
- 2.2 共有結合
- 2.3 金属結合
- 2.4 ファンデルワールス結合

3. 結晶構造

- 3.1 空間格子と単位胞
- 3.2 空間格子の分類
- 3.3 代表的な結晶構造

4. 逆格子

- 4.1 逆格子の求め方
- 4.2 X線回折
- 4.3 ブリルアン域

5. 結晶中の電子

- 5.1 ブロッドホ状態

- 5.2 ポテンシャルが小さい場合

- 5.3 エネルギーバンド

- 5.4 束縛が強い場合

6. 電子の運動

- 6.1 電子の速度

- 6.2 運動方程式

- 6.3 有効質量

- 6.4 磁場中の運動

7. 金属中の伝導電子

- 7.1 比熱

- 7.2 電気伝導と散乱機構

- 7.3 ボルツマン方程式と輸送係数

8. 半導体

- 8.1 電子と正孔

- 8.2 不純物ドーピング

- 8.3 pn 接合

- 8.4 量子ホール効果

- 8.5 メゾスコピック系

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

2. 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

4.2 サブアトム物理学 : 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

2. 核子の性質

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. サブアトム物理学の研究手段

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

4.3 統計力学特論 : 宮下 精二

1. 相転移と臨界現象

2. 平均場理論

3. くりこみ群とスケーリング

4. 厳密解

5. いろいろなタイプの相転移

6. 非平衡現象

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れた星

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

4.5 固体物理学 II : 高木 英典

1. 金属と半導体 (復習)

1.1 バンド構造

1.2 金属のフェルミ面

2. 格子振動

2.1 フォノン

2.2 デバイ模型

2.3 比熱と熱伝導

3. 電子相関と磁性

3.1 電子相関

3.2 反磁性と常磁性

3.3 磁気秩序

3.4 磁気デバイス

4. 超伝導

4.1 超伝導現象概観

4.2 電子格子相互作用とクーパー対

4.3 BCS理論

4.4 量子磁束

5. 低次元電子系の量子現象

5.1 量子ホール効果

5.2 電荷密度波

4.6 量子光学 : 五神 真

1. 光と物質

1.1 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

2. 光の量子論

2.1 輻射場の量子性

2.2 輻射場の量子状態

2.3 量子化された輻射場と物質の相互作用

4.7 生物物理学特論 : 豊島 近, 新井 宗仁, 樋口 秀男

1. 蛋白質の生物物理学

1.1 生体内のタンパク質機能とは。

1.2 蛋白質や生体膜とはどのようなものか。そこで働いている原理は何か。

1.3 蛋白質はイオンをどのように見分け、使い分けるか

1.4 蛋白質はどのようにして反応を触媒するか - 酵素反応の構造生物学

1.5 蛋白質はエネルギーをどのように変換し、利用するか

1.6 蛋白質はどのようにして立体構造を形成する

のか

1.7 蛋白質の構造と機能を予測する

1.8 蛋白質のダイナミクスと機能発現

1.9 蛋白質と病気の関わり

1.10 蛋白質の進化とデザイン

1.11 蛋白質 1 分子の機能をいかに測定し、理解するか。

1.12 細胞内蛋白質機能をイメージングしてわかること。

1.13 個体内蛋白質の役割の多様性

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

2. クォークモデル

3. Dirac 方程式：反物質、スピン

4. 反応の運動学

5. 不連続対称性

6. 連続対称性

7. ゲージ原理

8. 電磁相互作用

9. 弱い相互作用

10. 隠れた対称性とヒッグス機構

5.3 原子核物理学：大塚 孝治

1. 原子核のスケールと単位

2. 原子核の大きさや密度

3. 原子核の質量と結合エネルギー

4. フェルミガス模型

5. 平均ポテンシャル

6. 調和振動子ポテンシャル

- | | |
|---------------------|----------------|
| 7. 殻構造 | 10. 原子核の崩壊と放射線 |
| 8. シェルモデル、アイソスピンと核力 | |
| 9. 原子核の形 | 11. エキゾチックな原子核 |

5.4 物性物理学特論：長谷川 修司, 小森 文夫

- | | |
|----------------------------|----------------------|
| 1. 概論 ーナノサイエンス・ナノテクと表面ー | 4.2 表面原子構造観察 |
| 2. 表面構造 | 4.3 局所電子状態測定 |
| 2.1 表面超構造と相転移 | 4.4 表面バンドの観測 |
| 2.2 回折法 | 4.5 表面電子定在波 |
| 2.3 顕微鏡法 | 4.6 原子マニピュレーション |
| 2.4 動的過程 | 5. 表面電子輸送 |
| 3. 表面電子状態 | 5.1 表面空間電荷層の2次元電子系 |
| 3.1 表面電子状態・トポロジカル表面状態 | 5.2 表面電子バンドの2、1次元電子系 |
| 3.2 (逆)光電子分光法 | 5.3 表面スピン輸送 |
| 3.3 トンネル分光法 | 6. 表面超薄膜磁性 |
| 3.4 光電子分光によるバンド分散・原子結合状態測定 | 6.1 磁気モーメントと相転移 |
| 3.5 時間分解測定 | 6.2 強磁性超薄膜 |
| 4. 走査トンネル顕微鏡 | 6.3 表面ナノ強磁性体 |
| 4.1 走査トンネル顕微鏡の原理 | 6.4 スピンダイナミクス |

5.5 電子回路論：福山 寛, 横山 将志

- | | |
|----------------|------------------|
| 1. 線型応答システム | 3.3 ナイキストの安定条件 |
| 1.1 フーリエ変換 | 4. デジタル信号処理 |
| 1.2 インパルス応答 | 4.1 デジタル信号の基礎 |
| 1.3 ステップ応答 | 4.2 サンプリングとデジタル化 |
| 1.4 伝達関数 | 4.3 アンチエイリアシング |
| 2. 基礎的な電子素子と回路 | 4.4 D/A変換とA/D変換 |
| 2.1 半導体の基礎 | 4.5 FFT |
| 2.2 ダイオード | 4.6 デジタルフィルター |
| 2.3 トランジスタ | 5. 回路の設計 |
| 2.4 オペアンプと増幅器 | 5.1 回路設計論 |
| 3. 回路の安定性 | 5.2 現実の回路の等価回路 |
| 3.1 フィードバック制御 | 5.3 プログラマブルデバイス |
| 3.2 ボーデ線図 | |

5.6 現代物理学入門：安東 正樹, 福嶋 健二

1. 重力波天文学（担当：安東）

1.1 相対論と重力波

1.2 重力波源と観測

1.3 観測手法とレーザー干渉計

1.4 感度と要素技術・制御

1.5 観測とデータ解析

1.6 観測・解析結果 1

1.7 観測・解析結果 2

2. ハドロン物理学（担当：福嶋）

2.1 ハドロン物理：クォークとグルーオン

2.2 物質と質量の起源：カラー閉じ込めとカイラル対称性

2.3 高温物質：カイラル対称性の回復と相転移の理論

2.4 人類の作った最も熱い物質：クォーク・グルーオン・プラズマ

2.5 高密度物質：中性子星の諸問題

2.6 理論が導く高密度極限：カラー超伝導

2.7 「強い相互作用」の未解決問題

10 各賞受賞者紹介

1 堀田凱樹 名誉教授：瑞宝中綬章

堀田凱樹名誉先生は行動遺伝学、生物物理学、神経発生遺伝学等の分野において数多くの顕著なご業績を挙げられました。特に、モザイク解析という手法を用いて、動物行動を遺伝子と発生現象に結びつけ、さらに数理統計学的に解析した一連のご研究は極めて独創的なもので、内外の研究者に大きな影響を与えました。一方、我が国においてショウジョウバエ、ゼブラフィッシュなどのモデル生物を用いた分子遺伝学を普及するのに大学等の組織の枠を越えてご尽力され、分野の発展に大きく貢献されました。1997年に本学をご退官後も、国立遺伝学研究所所長、情報・システム研究機構機構長などの要職を歴任されました。以上の多岐にわたる輝かしいご業績が評価され今回の受章となりました。

2 佐藤勝彦名誉教授：日本学士院新会員

平成25年12月12日開催の日本学士院第1074回総会において佐藤勝彦名誉教授が新日本学士院会員に選ばれました。米国のアラン・グースと独立に、宇宙初期にインフレーションと呼ばれる指数関数的加速膨張期があったとする理論を提唱し、現代宇宙論のパラダイムを開拓した業績が評価されたものです。佐藤先生が学士院会員としてますますご活躍されることをお祈り致します。

3 浅井祥仁 教授：仁科記念賞

2013年のノーベル物理学賞が、ヒッグス粒子の理論的予言をしたアンダレール・ヒッグス両氏に贈られました。2012年の発表からこの様なスピード受賞となったのは、ヒッグス粒子の重要性を示すものです。特筆すべきは、ノーベル賞・受賞理由のかなりの部分を、「ヒッグス粒子発見」の実験的な成果の部分に費やしている点です。これが示す様に、ヒッグス粒子発見の実験成果が極めて重要です。

浅井祥仁教授は、東京大学素粒子物理国際研究センターと協力して、このヒッグス粒子を探すべく、LHC・ATLAS実験の構想段階から参加し、実験の準備・推進してこられました。浅井氏は、研究グループ責任者として、東京大学ばかりでなく、日本の若手研究者や世界各国の若手研究者を束ねて研究を推進してこられました。また、地域解析センターの立ち上げなどに尽力されています。激しい国際競争が繰り広げられているヒッグス粒子探索において、日本の研究者が大きな貢献が出来たのは、たゆまぬ新しい研究方法の開発や、その指導力です。これらの点が評価されての受賞となりました。ヒッグスの発見は「真空」の意味を変えるパラダイムシフトであり、素粒子のみならず、宇宙の研究などに大きな影響のある成果であります。今後の益々の発展が大きく期待されます。

4 山本智 教授：第 18 回 日本天文学会 林忠四郎賞

山本教授は、星間分子雲で見られる天体ごとの化学組成の違いの原因を観測的に探求し、それが星間分子雲の進化に伴う化学組成の系統的な変化にあることを見出しました。さらに、それを支配する要因が炭素原子が一酸化炭素に変換される化学過程にあることを、富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いた炭素原子の広域観測によって確かめました。炭素の主要な形態変化による化学進化の法則性は、その後、星間塵への吸着課程と併せて、星間分子雲の化学進化の概念を確立する基礎となるものです。この新しい方法論により、原始星が形成される以前の星間分子雲コアの年齢が推定できるようになり、恒星の形成過程の理解に大きく貢献されました。これらの業績により、第 18 回日本天文学会林忠四郎賞が授与されました。

5 竹内一将氏 (佐野研助教)：C3 Commission (Statistical Physics) of IUPAP: Young Scientist Prize in Statistical Physics

竹内一将助教が、成長界面のゆらぎの性質に関する顕著な研究業績により、IUPAP の C3 Commission (Statistical Physics) の Young Scientist Prize を受賞しました。竹内氏は、液晶の乱流界面の実験系を用いて、これまで実験的に検証するのが困難と思われていたランダムな成長界面のゆらぎの統計的性質を極めて精密に測定し、ゆらぎ分布に関する普遍的な性質 (KPZ 普遍クラス) を明らかにしました。本成果は、非平衡ゆらぎについて厳密解と実験が定量的に一致する希少な例であるだけでなく、ランダム行列や可積分系など広範な学問分野との関係が明らかになっています。Young Scientist Prize は、3 年に 1 度、統計物理に携わる世界の若手研究者の中から選ばれます。今回が第 3 回目となる賞であり、これまでの全受賞者 5 名のうちの 1 人に加わることとなりました。

6 沙川貴大氏 (上田研：現 総合文化研究科広域科学専攻)：C3 Commission (Statistical Physics) of IUPAP: Young Scientist Prize in Statistical Physics

沙川貴大氏 (2011 年博士取得 (上田研), 現 総合文化研究科広域科学専攻) が StatPhys25 において、”C3 Commission (Statistical Physics) of IUPAP: Young Scientist Prize in Statistical Physics” を受賞されました。この賞は、統計力学の分野で傑出した業績を上げた若手に送られる賞で、young Boltzmann 賞とも呼ばれています。受賞理由は ”for developing a comprehensive theoretical framework to characterize the thermodynamics of nonequilibrium systems with feedback control” です。この仕事は、沙川氏の博士論文においてなされたもので、フィードバック制御下にある非平衡系を記述する理論的枠組みを構築し、150 年来の懸案であった Maxwell の悪魔のパラドックスを解決したものでした。

7 森貴司氏 (宮下研)：第 8 回 日本物理学会 若手奨励賞

熱統計力学は、主に分子間の相互作用が近接である場合に有効な体系であり、全体の枠組みから多様な手法まで整備されています。一方、遠方との相互作用が無視できない長距離相互作用系に対する統計力学の有効性は重要な懸案であり研究が進められています。そこでは熱力学極限の存在や、加法性の存在など統計力学基本的な要請まで怪しくなります。長距離相互作用は、光や弾性波のような系内に広がっている非局在モードを介しても現れることが知られています。森氏はこうした非局在モードによる長距離相互作用系のふるま

いが平均場モデルによって記述されることを証明し、熱平衡状態の安定性や非加法性など興味深い諸性質を明らかとしました。この研究成果は、新しい実験系やデバイスの開発にもつながるものと考えられ、単に数理学上の業績に留まらない重要な成果と高く評価され、今後の発展にも大いに期待されます。

8 橋本直氏（早野研）：International Nuclear Physics Conference (INPC 2013) Best Young Speaker Award

橋本直氏（早野研 D3）は、2013年7月2日～7日にイタリアのフィレンツェで開催された、原子核物理学では最も大きな国際会議 International Nuclear Physics Conference (INPC 2013) において、“A search for the K^-pp bound state in the ${}^3\text{He}(\text{in-flight } K^-, n)$ reaction at J-PARC” というタイトルで講演を行い、Best Young Speaker Award を受賞されました。

9 平成 25 年度 理学部・理学系研究科奨励賞

以下の方々が受賞が、平成 25 年度 理学部・理学系研究科奨励賞を受賞されました。

- 理学系研究科 研究奨励賞 (博士課程)
風間 慎吾君、グエン タン フク君、松本 伸之君、宮崎彬君、野田 博文君 (天文学専攻)
- 理学系研究科 研究奨励賞 (修士課程)
枝 和成君、堀尾 真史君、増田 賢人君、山本 真吾君
- 理学部 学修奨励賞
小森 健太郎君、杉岡 新君、藤田 浩之君

今後の更なるご活躍を期待します。

11 人事異動

[物理学教室にいられた方々]

安東 正樹	准教授	H25 年 4 月 1 日	採用 (自然科学研究機構国立天文台・准教授)
岡崎 浩三	助教	H25 年 4 月 1 日	採用 (物性研究所・特任研究員)
添田 彬仁	助教	H25 年 4 月 1 日	採用 (シンガポール国立大学量子技術センター カシュリコウスキー・グループ・リサーチフェロー)
朝倉 良夫	主任	H25 年 4 月 1 日	配置換え (医学部附属病院管理課・主任)
中村 千佳子	事務補佐員	H25 年 4 月 1 日	採用
平川 真奈美	派遣職員	H25 年 5 月 1 日	採用
大槻 朋子	特任教授	H25 年 6 月 1 日	採用
小澤 綾子	一般職員	H25 年 7 月 1 日	復帰 (独立行政法人日本学術振興会)
田中 京子	事務補佐員	H25 年 7 月 16 日	採用
大栗 真宗	助教	H25 年 7 月 16 日	採用 (カブリ数物連携宇宙研究機構・特任助教)
仁井田 和子	事務補佐員	H25 年 9 月 1 日	採用
福嶋 健二	准教授	H25 年 10 月 1 日	採用 (慶應義塾大学理工学部物理学科・准教授)
千葉 三代治	技術補佐員	H26 年 1 月 1 日	採用
藤堂 眞治	准教授	H26 年 1 月 16 日	採用 (物性研究所計算物質科学研究センター・特任教授)

[物理学教室から移られた方々]

田中 明子	主任	H25 年 6 月 30 日	配置換え (工学系研究科・総務課・主任)
葭本 智美	事務補佐員	H25 年 7 月 15 日	辞職
平川 真奈美	派遣職員	H25 年 8 月 31 日	任期満了退職
阿部 武	技術補佐員	H25 年 11 月 30 日	任期満了退職
島野 亮	准教授	H26 年 3 月 31 日	配置換え (低温センター・教授、引き続き物理学専攻を兼務)
谷口 耕二	講師	H26 年 3 月 31 日	辞職 (東北大学金属材料研究所・准教授)
麻生 洋一	助教	H26 年 3 月 31 日	辞職 (自然科学研究機構国立天文台・准教授)
合田 義弘	助教	H26 年 3 月 31 日	辞職 (東京工業大学大学院総合理工学研究科・准教授)
高須悦子	助手	H26 年 3 月 31 日	辞職
今堀 正代	事務補佐員	H26 年 3 月 31 日	任期満了退職

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, 田寄
幹事	福山, 須藤, 五神	
専攻主任	常行	
専攻副主任	藤森	
常置委員	上田, 駒宮	
優先配置	村尾	
教務	小形, 諸井 (大学院), 松尾, 島野	
学生実験	長谷川, 浅井, 岡本, 山本	佐伯, 八幡
就職	櫻井	横山
奨学金	青木	
卓越した大学院	佐野, 濱口	
部屋割	駒宮	熊崎, 朝倉
安全衛生	岡本	八幡
放射線	蓑輪	
管理技術室	福山 (総括, 試作室)	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	上田, 樋口, 中澤, 酒井	内村
コロキウム	須藤, 佐野, 青木, 櫻井	小林, 田寄
年次報告	松尾, 山野	横山, 八幡
記録係	立川, 谷口, 横山	
物品供用官	早野	
事務分室	第1: 長谷川, 第2: 大塚	

*太字は責任者

12. 役務分担

役務	担当教員	技術職員・事務職員
理交会	高木	熊崎
親睦会	横山	
進学指導	宮下, 浅井, 安東, 島野	物理教務
進振委員	酒井	
ホームページ, IT	須藤, 早野	南野
オープンキャンパス	樋口	
リーディング大学院	五神, 高木, 吉田, (常行)	物理事務, 物理教務
アーカイブ室	宮下, 牧島, 山本	
駒場対策	大塚, 吉田, 濱口, 立川, 長谷川, 五神, 中澤, 小形 (教務), 進学指導委員 (宮下, 浅井, 安東, 島野)	

*太字は責任者

13 教室談話会

- 2013年5月31日(金) 16:30 - 18:00
安東 正樹 (物理学専攻)
重力波望遠鏡 KAGRA でみる新しい宇宙の姿
- 2013年6月21日(金) 16:30 - 18:00
緒方 芳子 (東大数理)
量子系における統計力学とその数学的解析
- 2013年6月28日(金) 16:30 - 18:00
山崎 典子 (宇宙科学研究所)
宇宙プラズマの精密撮像分光に向けて
- 2013年7月12日(金) 16:30 - 18:00
石坂 香子 (東大物工)
レーザー光電子分光で観る物質の電子構造
- 2013年7月19日(金) 16:30 - 17:30
肥山 詠美子 (理化学研究所 仁科加速器研究センター)
少数量子系の世界へのいざない ~ 新しい計算法の確立と原子核物理学への応用 ~
- 2013年8月9日(金) 16:30-18:00
田中 博 (東京医科歯科大学システム情報生物学)
iPS細胞とがん転移のシステム分子医学
- 定量的 Waddington エピゲノム地形 (qWEL) 理論について -
- 2013年10月28日(月) 16:30-18:00
Karsten Danzmann (Max Planck Institute for Gravitational Physics (Albert-Einstein-Institut)
and Institute for Gravitational Physics, Leibniz Universität Hannover)
Listening to the Universe: Gravitational Wave Detection on the Ground and in Space
- 2013年11月1日(金) 16:30-18:00
関口 仁子 (東北大学 理学研究科)
古くて新しい核力”三体力”へのアプローチ

- 2013年11月15日(金) 16:30-18:00
御手洗 菜美子 (Niels Bohr Institute, University of Copenhagen)
Emergence of diversity in a model ecosystem with mutually exclusive interactions
- 2013年11月22日(金) 16:30-18:00
Iulia Georgescu (Associate editor Nature Physics, Nature Publishing Group.)
Beyond publication
- 2013年12月4日(水) 16:30-17:50 Sir Martin Wood Prize Lecture
柴田 直哉 (東京大学工学系研究科総合研究機構; (独) 科学技術振興機構さきがけ)
先端的走査透過電子顕微鏡の開発と物質材料科学研究への展開
- 2013年12月20日(金) 16:30-18:00
所 裕子 (筑波大学大学院数理物質科学研究科)
双安定性を利用した機能性相転移物質の創製
- 2014年1月31日(金) 18:00-19:30
和達 大樹 (東京大学物性研究所 極限コヒーレント光科学研究センター 軌道放射物性研究施設)
放射光X線で見る強相関電子系
- 2014年3月6日(木) 15:30-17:30
Shiraz Minwalla (Tata Institute for Fundamental Research)
The Fluid-Gravity Correspondence

14 物理学教室コロキウム

- 2013年4月1日(金) 16:30 - 18:00
John Doyle (ハーバード大学物理学科)
Cold Molecules: Science and Applications
- 2013年5月17日(金) 16:30 - 18:00
上田 泰己 (理化学研究所生命システム研究センター)
生物の『時間』の理解に向けて
- 2013年6月14日(金) 16:30 - 18:00
田村 元秀 (天文学専攻)
系外惑星観測の現状と展開：直接観測と地球型惑星
- 2013年7月5日(金) 16:30 - 18:00
橋本 幸士 (大阪大学大学院理学研究科；理化学研究所)
超弦理論で物性を解く
- 2013年11月8日(金) 16:30 - 18:00
C. Bäuerle (CNRS ネール研究所)
Manipulating Individual Electrons in the Solid State: present state of the art and future challenges
- 2013年12月6日(金) 16:30 - 18:00
森田 浩介 (九州大学理学研究院；理化学研究所)
新元素の探索－現代の錬金術
- 2014年1月10日(金) 16:30 - 18:00
中西 友子 (農学生命科学研究科)
放射線が拓く生命の謎
- 2014年2月21日(金) 16:30 - 18:00
福嶋 健二 (物理学専攻)
強い相互作用の物理：クォーク・グルーオン・プラズマからブラックホールまで

15 金曜ランチトーク

- 2013年4月5日 高木 英典 「スピン軌道相互作用が拓く新しい相関電子物理」
- 2013年4月12日 立川 裕二 「場の量子論の量子異常の話」
- 2013年4月26日 吉田 直紀 「ダークマターはどのように分布しているの」
- 2013年5月24日 青木 秀夫 「超伝導最前線」
- 2013年5月31日 浅井 祥仁 「アレって結局ヒッグスだったの？」
- 2013年6月14日 須藤 靖 「多重トランジット惑星系 KOI94 から学ぶ」
- 2013年6月28日 佐野 雅己 「アクティブマターと乱流」
- 2013年7月5日 藤森 淳 「高温超伝導体の新しい相図？」
- 2013年7月19日 松尾 泰 「ゲージ理論と無限次元対称性」
- 2013年10月4日 酒井 広文 「ここまでできる分子配向制御」
- 2013年10月11日 島野 亮 「光でみる・ゆする・つくる固体中のマクロ量子現象」
- 2013年10月25日 樋口 秀男 「生体小宇宙のなぞにせまる」
- 2013年11月1日 常行 真司 「計算機にできること、できないこと」
- 2013年11月8日 大塚 孝治 「原子核の進化の道と魔法の島」
- 2013年11月22日 山本 智 「Why Chemistry in Astrophysics」
- 2013年12月6日 福山 寛 「量子の液体と固体のはざままで」
- 2014年1月10日 高瀬 雄一 「日本の核融合研究開発戦略」
- 2014年1月24日 蓑輪 眞 「その後の PANDA」
- 2014年1月31日 早野 龍五 「私が不要な測定装置をあえて作った理由」
- 2014年2月14日 上田 正仁 「エクソシスト」
- 2014年2月28日 岡本 徹 「原子一層での超伝導と空間反転対称性の破れ」
- 2014年3月20日 横山 将志 「What's ν ?