

Department of Physics
School of Science
The University of Tokyo

Annual Report

2015

平成27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

Department of Physics
School of Science
The University of Tokyo

Annual Report

2015

平成27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: 宇宙 X 線観測衛星「ひとみ」の打ち上げ前の試験時の写真 (JAXA 提供)。「ひとみ」は日本の 6 代目の宇宙 X 線観測衛星で、重さ 2.7 t、打ち上げ時の高さ 8 m、軌道上での高さ 14 m と、日本で最大級の科学衛星である。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。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きた。(中澤研究室)

Space X-ray Observatory Hitomi. (copy-right from JAXA) (Nakazawa Group)



図 2: 2016 年 2 月 17 日、「ひとみ」衛星は H-IIA 30 号機で打ち上げられた。3 月 26 日に通信異常が発生し、現在に至るも復旧していない。それまでに得られたデータの解析はすでに進められており、間もなく論文化される予定である。

Launch of the Hitomi X-ray observatory, on 17 Feb. 2016. (Nakazawa Group)

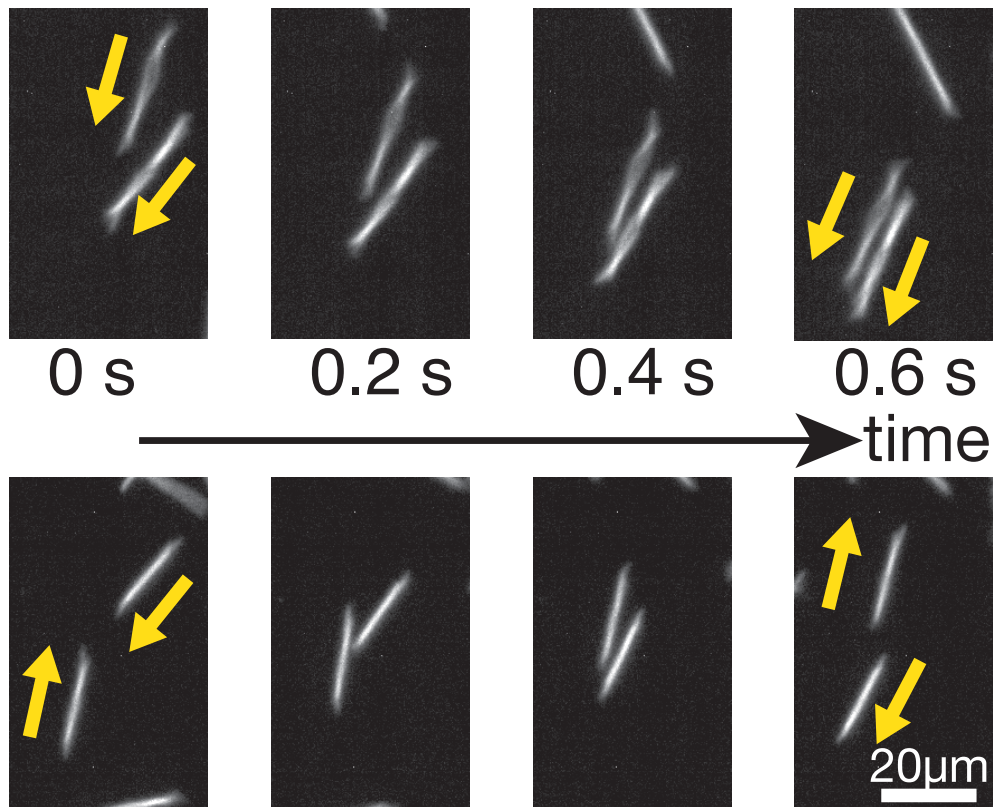


図 3: フィラメント状に伸長させたバクテリアの衝突時のネマチック相互作用。鋭角で衝突したときは平行に、鈍角で衝突したときは反平行に揃う。このような衝突を繰り返すことで、高密度の条件下ではバクテリアの向きが次第に揃い、大域的な長距離ネマチック秩序相を示すことを発見した。(佐野研究室)

Collision events between two filamentous bacteria induce nematic interactions. Acute angle collision leads to parallel alignment, and obtuse angle collision leads to anti-parallel alignment. We experimentally found that, at high density, successive collisions gradually align bacteria, resulting in a global long-range nematically-ordered phase. (Sano group)

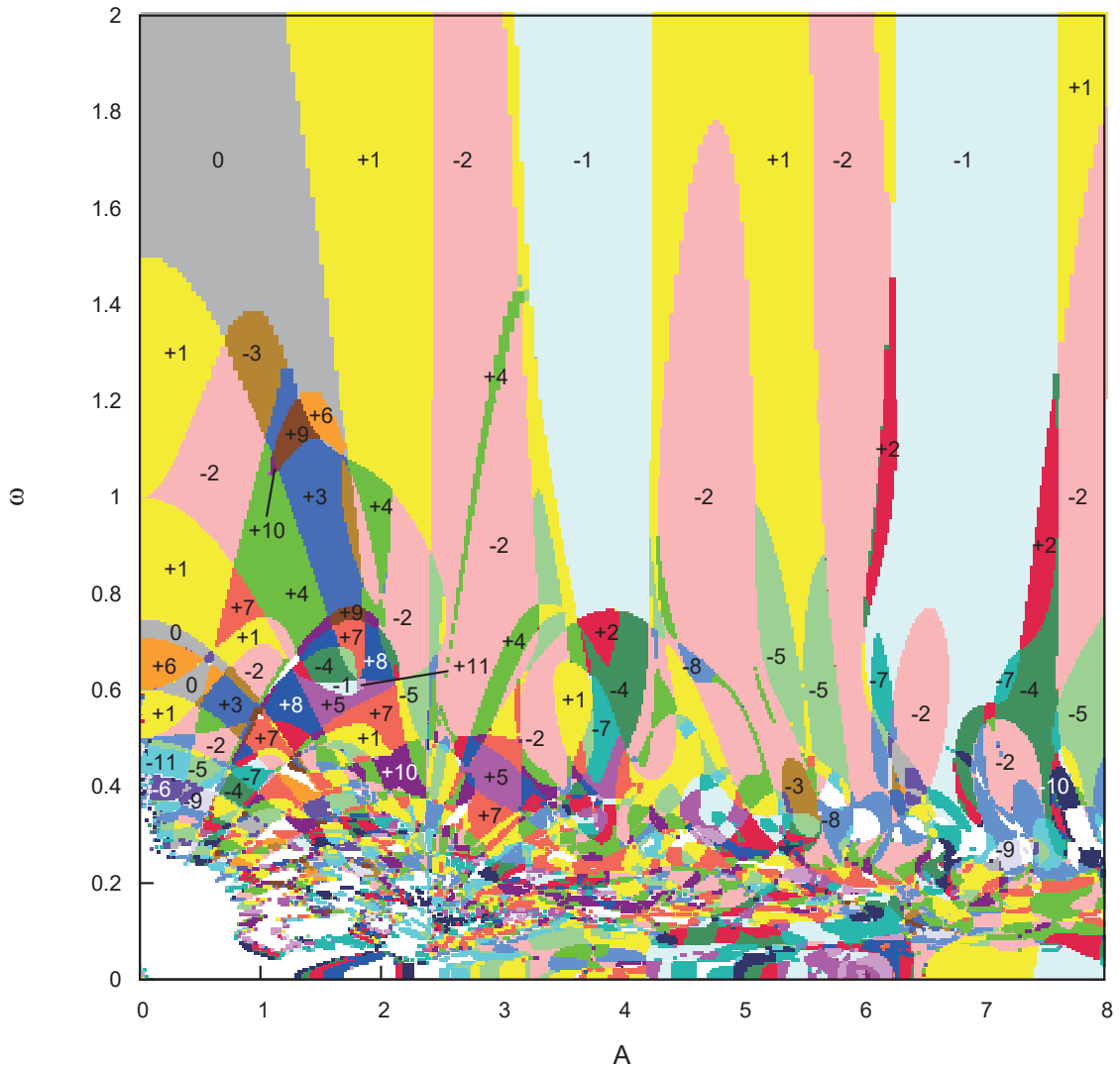


図 4: 蜂の巣格子に円偏光を当てると、質量ゼロの Dirac 電子の分散にトポロジカル・ギャップが開き、「フロケ (Floquet) トポロジカル絶縁体」となることは理論的に提案され、実験検証もされていた。円偏光の周波数が小さい場合も含めた全体像がどうなるかが新たに理論的に求められた。この図は、光の振動数 (ω) と強度 (A) に対する相図で、色や数字で示された Chern 数 (トポロジカルな性質の指標) は、多数の Floquet バンドの交叉を反映して精細な構造を示す。(青木研究室)

It has been theoretically predicted that a circularly-polarised light illuminated on a honeycomb lattice will make the massless Dirac system into a “Floquet topological insulator”. Now, a full picture including a smaller frequency regime of the circularly-polarised light is revealed, and the resulting phase diagram against the frequency (ω) and amplitude (A) of the light exhibits an tantalizingly intricate structure for the (topological) Chern number indicated by numbers and colours, which come from a larger number of crossings of the Floquet bands. (Aoki group).

序

平成 27 年度（2015 年 4 月-2016 年 3 月）東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・理学部物理学科の年次研究報告をお届けします。この小冊子が物理学教室で広く行われている多彩で活発な研究・教育の現状を知っていただく手がかりになれば幸いです。

最初に、教員の異動についてですが、助教として、太田奈緒香氏（高木・北川研）、赤城裕氏（桂研）が着任されました。また、青木秀夫先生、蓑輪眞先生が本年度定年を迎えられました。他に転出として、立川裕二准教授がカブリ数物連携宇宙研究機構教授に、吉岡孝高講師が工学系研究科附属光量子科学研究センター准教授に、遠藤基助教（濱口研）が高エネルギー加速器研究機構准教授に、高吉慎太郎助教（青木研）がジュネーブ大学ポスドク研究員として転出されました。

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。島野亮教授、松永隆佑助教（島野研）、辻直人助教（元青木研）、青木秀夫教授が第 19 回超伝導科学技術賞を、立川裕二准教授が 2016 New Horizons in Physics Prize を、櫻井博儀教授が仁科記念賞を、島野亮教授が第 32 回井上學術賞を、藤井友香氏（元須藤研、現 NASA Goddard Institute for Space Studies）が第 32 回井上研究奨励賞を、加藤康作氏（元酒井研、現大阪大学）が原子衝突学会第 16 回若手奨励賞を、道村唯太助教（安東研）が第 10 回日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。また、大塚孝治教授がヨーロッパアカデミー（Academia Europaea）の会員に選出されました。若い方々では、栗原貴之君、一ノ倉聖君、関口文哉君、谷崎佑弥君が平成 27 年度理学系研究科研究奨励賞（博士課程）を、蘆田祐人君、池内光希君、大里健君、藤田浩之君が研究奨励賞（修士課程）を、佐藤遼太郎君、董青秀雄君、小松原航君が平成 27 年度理学部学修奨励賞を受賞しました。

ご存知のように、2015 年 12 月、当物理学専攻の現役教員である梶田隆章教授（宇宙線研究所所長）がノーベル物理学賞を受賞されたことは、専攻としても大変な名誉であり、多くの学生や若手研究者たちを大いにエンカレッジしたことと思います。当物理教室では、引き続き、さまざまな形で若手のサポートの強化に努めています。博士課程研究遂行協力制度や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、修士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、残りあと 2 年となりましたが、学生サポートの柱となっています。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。これらによって、海外インターンシップ制度で学生を海外研究室に派遣するなどのプログラムを実施しています。また、奨学金つき外国人大学院生を受け入れる Global Science Graduate Course (GSGC) の募集を始め、大学院生レベルでの本格的な国際化を始めました。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の研究教育拠点として、その卓越性を維持・発展させていきたいと考えています。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、桂法称准教授、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。

2016 年 5 月 1 日
物理学専攻 専攻長・物理学科 学科長
長谷川 修司

目次

I	研究室別 2015 年度 研究活動報告	1
1	原子核・素粒子理論	3
1.1	原子核理論 (大塚・福島) 研究室	3
1.2	素粒子論研究室	12
1.2.1	現象論	12
1.2.2	重いクォークonium	13
1.2.3	弦理論、場の理論全般	14
2	原子核・素粒子実験	20
2.1	原子核実験グループ 【早野・櫻井・Wimmer】	20
2.1.1	反物質の研究 (早野研究室)	20
2.1.2	陽子ビームを用いたパイ中間子原子の分光実験 (早野研究室)	21
2.1.3	インビームガンマ線分光による核構造研究 (櫻井研究室)	21
2.1.4	不変質量法による中性子過剰核のクラスター構造研究 (櫻井研究室)	22
2.1.5	検出器開発 (櫻井研究室)	22
2.1.6	直接反応を用いたエキゾチック核の核分光 (ウィマー研究室)	23
2.2	駒宮研究室	28
2.2.1	電子・陽電子リニアコライダー ILC 計画	29
2.2.2	LHC 実験	30
2.2.3	中性子実験	31
2.3	蓑輪 研究室	34
2.3.1	原子炉ニュートリノモニター	34
2.3.2	雷雲ガンマ線	34
2.3.3	Hidden photon 暗黒物質探索	35
2.4	相原・横山研究室	37
2.4.1	(スーパー) B ファクトリー実験	37
2.4.2	HSC 暗黒エネルギー研究	38
2.4.3	加速器ニュートリノ実験	39
2.4.4	陽子崩壊の探索	41
2.4.5	次世代大型水チェレンコフ検出器・ハイパーカミオカンデ	41
2.5	浅井研究室	45
2.5.1	LHC・ATLAS 実験での研究	45
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	47
3	物性理論	54
3.1	青木研究室	54
3.1.1	超伝導	54
3.1.2	トポロジカル系	54
3.1.3	非平衡	56
3.1.4	その他	57
3.2	宮下研究室	60

3.2.1	量子ダイナミクス	60
3.2.2	協力現象の統計力学	61
3.2.3	局所格子構造のちがう双安定系での協力現象の研究	61
3.2.4	確率過程	62
3.2.5	統計力学の基礎的研究	62
3.3	小形研究室	65
3.3.1	高温超伝導の理論	65
3.3.2	ディラック電子系	65
3.3.3	反磁性	67
3.3.4	有機導体に関する理論	67
3.3.5	トポロジカル物質の理論	67
3.3.6	重い電子系および多軌道電子系理論	68
3.3.7	磁性体およびスピン軌道相互作用	68
3.4	常行研究室	72
3.4.1	シミュレーション手法の開発	72
3.4.2	シミュレーション手法の応用	73
3.5	藤堂研究室	79
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	79
3.5.2	強相関多体系に対する新たな計算手法の開発	80
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	81
3.6	桂研究室	82
3.6.1	強相関系	83
3.6.2	トポロジカル系	83
3.6.3	可解模型・統計力学	83
3.6.4	その他	84
4	物性実験	87
4.1	藤森研究室	87
4.1.1	高温超伝導	87
4.1.2	スピントロニクス, 界面	88
4.2	長谷川研究室	94
4.2.1	表面電子・スピン輸送	94
4.2.2	表面ナノ構造	96
4.2.3	新しい装置・手法の開発	97
4.3	福山研究室	100
4.3.1	2次元ヘリウムの量子相研究	100
4.3.2	グラフェンの電子物性研究	101
4.3.3	1次元硫黄鎖を内包したカーボンナノチューブの低温物性	102
4.4	岡本 研究室	104
4.4.1	劈開表面に形成された2次元電子系	104
4.4.2	金属超薄膜の超伝導	106
4.5	島野研究室	108
4.5.1	半導体高密度電子正孔系	108
4.5.2	超伝導体の光励起非平衡ダイナミクス	109
4.5.3	ランダウ量子化したグラフェンの非線形光学応答	111
4.6	高木・北川研究室	113
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	113
4.6.2	エキゾチック半金属の探索	114
4.6.3	薄膜超格子構造を用いた新奇電子相の開拓	114
5	一般物理理論	118

5.1	宇宙理論研究室 (須藤・吉田)	118
5.1.1	観測的宇宙論	118
5.1.2	系外惑星	122
5.1.3	星形成	123
5.1.4	超新星爆発	125
5.2	村尾研究室	132
5.2.1	分散型量子情報処理	132
5.2.2	多体量子状態の量子情報の解析	133
5.2.3	量子力学基礎論	134
5.2.4	量子アルゴリズム	134
5.3	上田研究室	136
5.3.1	冷却原子気体	136
5.3.2	量子論・統計力学と情報理論の融合	137
5.4	横山 (順) 研究室	142
5.4.1	初期宇宙論	142
5.4.2	観測的宇宙論	143
5.4.3	曲がった時空の場の量子論	144
5.4.4	重力理論	144
5.4.5	重力波	145
6	一般物理実験	150
6.1	高瀬研究室	150
6.1.1	TST-2 実験の概要	150
6.1.2	高周波プラズマ立ち上げ実験	150
6.1.3	OH プラズマ実験	153
6.1.4	計測器開発	153
6.1.5	共同研究	153
6.2	佐野研究室	158
6.2.1	非平衡系の動力学・統計力学	158
6.2.2	アクティブマターの動力学	159
6.2.3	非平衡系としての生命現象	160
6.3	山本 研究室	163
6.3.1	星形成の観測研究	164
6.3.2	系外銀河の分子組成	166
6.3.3	テラヘルツ帯観測技術の開拓	167
6.4	酒井広文 研究室	169
6.4.1	レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展	169
6.4.2	フェムト秒 2 波長レーザーパルスによる CO 分子の配向度の検証	171
6.4.3	フェムト秒 X 線自由電子レーザーパルスを用いた高強度レーザー電場中での分子構造の決定	172
6.4.4	その他	173
6.5	中澤研究室	174
6.5.1	はじめに	174
6.5.2	科学衛星の運用と稼働状況	174
6.5.3	中性子星とその親星の研究	174
6.5.4	ブラックホールの X 線研究	175
6.5.5	白色矮星への質量降着	177
6.5.6	銀河団の衝突・合体	177
6.5.7	雷雲ガンマ線の研究	177
6.5.8	宇宙 X 線衛星「ひとみ」の開発・運用	178
6.5.9	将来衛星計画へ向けた装置開発	178

6.6	五神－湯本－吉岡研究室	181
6.6.1	物質系の巨視的量子現象の探索	181
6.6.2	非自明な光学現象の探索とその応用	183
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	184
6.7	安東研究室	188
6.7.1	大型重力波望遠鏡 KAGRA	188
6.7.2	宇宙重力波望遠鏡	189
6.7.3	ねじれ型重力波検出器 TOBA	189
6.7.4	低温光共振器を用いた超高安定化レーザー光源	190
6.7.5	相対論・量子光学精密実験	190
7	生物物理	194
7.1	能瀬研究室	194
7.1.1	神経回路の活動ダイナミクス	194
7.1.2	運動神経回路を構成する神経細胞の同定	195
7.2	樋口研究室	198
7.2.1	分子研究	199
7.2.2	細胞研究	199
7.2.3	個体研究	200
8	技術部門	203
8.1	実験装置試作室	203
8.1.1	利用状況	203
8.1.2	工作実習	203
8.2	技術室	203
8.2.1	安全衛生	203
8.2.2	IT 関連業務	203
8.2.3	学生実験	203
8.2.4	研究支援	204
8.2.5	各種委員会	204
II	Summary of group activities in 2015	205
1	Theoretical Nuclear Physics Group	207
2	Theoretical Particle and High Energy Physics Group	208
3	Hayano Group	210
4	Sakurai Group	211
5	Wimmer Group	212
6	Komamiya group	213
7	Minowa Group	214
8	Aihara-Yokoyama Group	215
9	Asai group	216
10	Aoki Group	217
11	Miyashita Group	218
12	Ogata Group	219
13	Tsuneyuki Group	220
14	Todo Group	221
15	Katsura Group	222
16	Fujimori Group	223
17	Hasegawa Group	223
18	Fukuyama Group	224

19	Okamoto Group	225
20	Shimano Group	226
21	Takagi-Kitagawa Group	227
22	Theoretical Astrophysics Group	228
23	Murao Group	230
24	Ueda Group	231
25	Yokoyama(J) Group	232
26	Takase Group	233
27	Sano Group	234
28	Yamamoto Group	235
29	Sakai (Hirofumi) Group	236
30	Nakazawa Group	236
31	Gonokami, Yumoto and Yoshioka Group	237
32	Ando Group	238
33	Nose Group	239
34	Higuchi Group	240

III 2015年度 物理学教室全般に関する報告 243

1	学部講義概要	245
1.1	2年生 A セメスター	245
1.1.1	電磁気学 I : 早野 龍五	245
1.1.2	解析力学 : 吉田 直紀	246
1.1.3	量子力学 I : 村尾 美緒	246
1.1.4	物理実験学 : 福山 寛, 山本 智	246
1.1.5	物理数学 I : 常行 真司	246
1.1.6	物理数学 II : 桂 法称	247
1.2	3年生 S セメスター	247
1.2.1	電磁気学 II : 島野 亮	247
1.2.2	量子力学 II : 立川 裕二	247
1.2.3	現代実験物理学 I : (前半) 松田 巖, (後半) 樋口 秀男	248
1.2.4	流体力学 : 江尻 晶	248
1.2.5	統計力学 I : 佐野 雅己	248
1.2.6	計算機実験 : 藤堂 眞治	249
1.3	3年生 A セメスター	249
1.3.1	物理数学 III: 上田 正仁	249
1.3.2	量子力学 III: 福嶋健二	249
1.3.3	固体物理学 I : 岡本 徹	249
1.3.4	現代物理実験学 II : 駒宮幸男、安東正樹	250
1.3.5	電磁気学 III : 櫻井 博儀	250
1.3.6	生物物理学 : 樋口 秀男, 能瀬 聡直	250
1.3.7	統計力学 II : 小形 正男	251
1.4	4年生 S セメスター	251
1.4.1	場の量子論 I : 松尾 泰	251
1.4.2	サブアトム物理学 : Kathrin Wimmer	251
1.4.3	一般相対論 : 須藤 靖	251
1.4.4	宇宙物理学 : 中澤 知洋	252
1.4.5	プラズマ物理学 : 高瀬 雄一	253
1.4.6	固体物理学 II : 高木 英典	253
1.4.7	量子光学 : 酒井広文	253

1.4.8	生物物理学特論：樋口 秀男, 酒井 邦嘉, 陶山 明	254
1.4.9	統計力学特論：宮下 精二	254
1.5	4年生 A セメスター	254
1.5.1	化学物理学：藤森 淳	254
1.5.2	素粒子物理学：横山 将志	255
1.5.3	場の量子論 II：諸井 健夫	255
1.5.4	原子核物理学：大塚 孝治	255
1.6	4年生 冬学期	255
1.6.1	固体物理学 III：青木 秀夫	255
1.6.2	物性物理学特論 (大学院「表面物理学」共通)：長谷川修司, 小森文夫、	256
1.6.3	電子回路論：勝本 信吾	256
1.6.4	現代物理学入門：吉岡 孝高, 北川 健太郎	257
1.6.5	普遍性生物学：金子 邦彦	257
2	各賞受賞者紹介	258
2.1	櫻井博儀 教授	258
2.2	島野亮 教授	258
2.3	島野亮 教授、松永隆佑 助教 (島野研)、辻直人 氏 (元青木研助教、現 理化学研究所)、青木 秀夫 教授	258
2.4	立川裕二 准教授	259
2.5	道村唯太 助教 (安東研)	259
2.6	藤井友香 氏 (須藤研、現 NASA Goddard Institute for Space Studies)	259
2.7	加藤康作 氏 (酒井広文研、現 大阪大学)	260
2.8	川口喬吾 氏 (佐野研、現 Department of Systems Biology, Harvard Medical School)	260
2.9	平成 27 年度 理学系研究科 研究奨励賞・理学部 学修奨励賞	260
3	人事異動	261
4	役務分担	262
5	教室談話会	263
6	物理学教室コロキウム	265
7	金曜ランチトーク	266

I

研究室別 2015年度 研究活動報告

1 原子核・素粒子理論

1.1 原子核理論(大塚・福嶋)研究室

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、山本新助教、博士研究員と大学院生ら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(大塚研)

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2013年に雑誌Natureに論文発表された。

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、ドリフトライン(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。[4, 11, 13, 34, 35, 40, 41, 45, 46, 48, 49, 50, 53]

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イクスルーとなり、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、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

これは旧来の平均ポテンシャル描像や Warburton らの「Island of Inversion」模型では理解できないもので、重要なものである。さらに、通常の考えでは二重閉殻原子核のはずの ^{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。最近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。[11, 13, 21, 32, 33, 34, 35, 37, 40, 41, 44, 49, 53, 58]

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による計算を行い、次世代スーパーコンピュータ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、二重ベータ崩壊核行列要素など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。[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。

また、全くランダムな相互作用から発生する対称性についても引き続き研究を進めている。[38]

軽い核でのモンテカルロ殻模型による第一原理計算

近年の計算機性能の向上と核子多体系における数値計算手法の発展により、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を広げることに成功し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, sd 殻核領域の原子核を主に対象として、さらに計算規模を広げた計算を京コンピュータなどで行った。相互作用は、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。さらに、3 体核力を 2 体有効核力に近似して取り入れた計算にも着手した。物理量については、主に基底状態のエネルギーを系統的に解析し、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った。[24, 27, 28, 52, 54, 59, 60] 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や中性子過剰核などのエキゾチック原子核へと適用できれば、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。

Nuclear structure calculations with 3N forces

Nuclear structure calculations were performed based on nuclear interactions including two- and three-nucleon forces from chiral effective field theory, a low-energy effective theory of QCD. An overview of results was published in Annual Reviews of Nuclear and Particle Science [7], and a comprehensive study of sd-shell nuclei including theoretical uncertainties was published in Physical Review C [9]. In addition, a conference proceedings article focused on calcium isotopes was published [16]. The main results of these publications were presented in an international conference [39] and seminars [61, 65, 66].

Neutrinoless double-beta decay

The nuclear matrix elements of neutrinoless double-beta decay were studied. First, the role of collective correlations was studied, identifying the importance of isoscalar pairing correlations for a reliable description of the process, as published in Physical Review C [10]. In addition, a detailed shell model analysis of the matrix element of the ^{48}Ca

decay was performed, including for the first time two harmonic-oscillator shells. This breakthrough calculation was published in Physical Review Letters [8]. The main results of these works were presented in several international conferences [31, 36, 43, 47, 51] and seminars [61, 64, 65, 66, 67].

Extended Krenciglowa-Kuo 法と Q-box

原子核多体問題ではヒルベルト空間の次元が非常に大きくなるためハミルトニアンを直接対角化するのは不可能な場合がほとんどである。そのため取り扱可能なモデル空間内で系を記述する有効相互作用の概念が導入される。特に殻模型のアプローチを使った原子核構造計算では、有効相互作用は重要な役割を果たしている。本研究では微視的な有効ハミルトニアンの構築法である Extended Krenciglowa-Kuo (EKK) 法に焦点を当てた。Q-box を代数的に扱う事で、高次の項まで取り込む事が出来る。この点を考慮し、モデル計算で EKK 法の収束性について調べた。

ユニタリ模型演算子法による中重核の基底状態

原子核物理の基本的な目標の一つは核力に基づいて原子核の構造を理解する事である。近年、主に計算機技術の発展により、この目標に向けた理論的なアプローチが可能になりつつある。我々が用いる計算手法、ユニタリ模型演算子法 (UMOA) は中重核までに適用可能な第一原理的な数値計算手法の一つである。これまでの研究では、2核子間に働く核力の一つである CD-Bonn ポテンシャルを用いて基底状態のエネルギーと半径を計算し、両者の関係性を議論し、論文などにまとめた。[5, 18] その際、原子核のエネルギーと半径を同時に再現する事は出来なかった。このことは古くから知られている問題であり、2体力に加えて、3体力の導入が必要であると考えられている。また、最近の研究結果でも、原子核の定量的理解のためには3体力の効果が重要である事がわかってきた。現在、2体力と3体力を系統的に取り扱える核力として、カイラル有効場の理論による核力が注目を集めている。このような背景から、2015年度は、カイラル有効場の理論により得られる核力を用いた UMOA による研究を主に行った。3体力を導入する前に、まずは2体力のみによる計算を実行した。並行して、エキゾチック核を含む副殻閉殻な酸素同位体の計算を初めて UMOA で行った。得られた結果と他の第一原理的な計算手法による結果と比較する事で、より広範囲の原子核に対して他の手法同様に UMOA が適用できる事を確認した。[22, 23, 25, 29, 30, 55, 63]

カイラル有効場の理論に基づく核力と、殻模型有効相互作用の基本的性質

原子核の構造や諸性質を議論する上で不可欠となるのが、核力に対する理解である。近年、量子色力学 (QCD) のもつカイラル対称性およびその破れとコンシステントな、カイラル有効場の理論に基づく核力の記述が大きく発展している。さらに、このカイラル有効場の理論を出発点とした、軽い核や二重閉殻近傍の原子核における第一原理計算の発展には目覚ましいものがある。しかしながら、質量数の増加に伴う爆発的な、計算コストの上昇を鑑みると、中重核領域において、3体力を陽に扱うのは現実的とは言えず、3つの核子のうちの一つの足を畳み込んで有効2体化して扱う必要が生じる。そこで、こうした中重核領域において、広く開殻の原子核を記述する方法としては、有効2体化した3体力を加えた殻模型計算が考えられる。そうした計算の実現に向け、殻模型の観点から、カイラル有効場の理論に基づく核力の基本的性質を調べた。具体的には、スピンテンソル分解と呼ばれる手法によって、不安定核でその効果が顕著になるテンソル力の、3体力由来の効果を検証した。これらの研究成果については、国内学会や、国際会議の一般講演で紹介した [26, 56, 57]。こうした核力の基本的な性質の理解によって、今後、具体的な原子核の性質がより明らかになっていくと期待される。

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Suzuki, T. Otsuka, C. Yuan, and N. Alfari, "Two-neutron "halo" from the low-energy limit of neutron-neutron interaction: Applications to drip-line nuclei ^{22}C and ^{24}O ", Phys. Lett. B **753** 199 (2016).
- [2] C. J. Chiara, D. Weisshaar, R. V. F. Janssens, Y. Tsunoda, T. Otsuka, et al., "Identification of deformed intruder states in semi-magic ^{70}Ni ", Phys. Rev. C **91**, 044309 (2015).
- [3] Y. Iwata, T. Ichikawa, N. Itagaki, J. A. Maruhn, and T. Otsuka: "Examination of the stability of a rod-shaped structure in ^{24}Mg ", Phys. Rev. C **92** 011303(R) (2015).
- [4] D. Steppenbeck, S. Takeuchi, N. Aoi, P. Doornenbal, M. Matsushita, H. Wang, Y. Utsuno, H. Baba, S. Go, J. Lee, K. Matsui, S. Michimasa, T. Motobayashi, D. Nishimura, T. Otsuka, H. Sakurai, Y. Shiga, N. Shimizu, P. -A. Soderstrom, T. Sumikama, R. Taniuchi, J.J.Valiente-Dobon, K. Yoneda: "Low-Lying Structure of ^{50}Ar and the $N=32$ Subshell Closure", Phys. Rev. Lett. **114**, 252501 (2015).
- [5] T. Miyagi, T. Abe, R. Okamoto, and T. Otsuka, "Ground-state energies and charge radii of ^4He , ^{16}O , ^{40}Ca , and ^{56}Ni in the unitary-model-operator approach", Prog. Theor. Exp. Phys. **2015**, 041D01 (2015).

- [6] K. Tsukiyama, T. Otsuka and R. Fujimoto: “Low-lying continuum states of drip-line oxygen isotopes”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2015**, 093D01 (2015).
- [7] K. Hebeler, J. D. Holt, J. Menéndez and A. Schwenk, “Nuclear Forces and Their Impact on Neutron-Rich Nuclei and Neutron-Rich Matter”, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **65** 457 (2015).
- [8] Y. Iwata, N. Shimizu, T. Otsuka, Y. Utsuno, J. Menendez, M. Honma, and T. Abe: “Large-scale shell-model analysis of the neutrinoless $\beta\beta$ decay of ^{48}Ca ”, *Phys. Rev. Lett.* **116** 112502 (2016).
- [9] J. Simonis, K. Hebeler, J. D. Holt, J. Menéndez and A. Schwenk, “Exploring sd -shell nuclei from two- and three-nucleon interactions with realistic saturation properties”, *Phys. Rev. C* **93** 011302(R) (2016).
- [10] J. Menéndez, N. Hinohara, J. Engel, G. Martínez-Pinedo and T. R. Rodríguez, “Testing the importance of collective correlations in neutrinoless $\beta\beta$ decay”, *Phys. Rev. C* **93** 014305 (2016).
- [11] Y. Shiga, K. Yoneda, D. Steppenbeck, N. Aoi, P. Doornenbal, M. Matsushita, S. Takeuchi, H. Wang, H. Baba, P. Bednarczyk, Zs. Dombradi, Zs. Fulop, S. Go, T. Hashimoto, M. Honma, E. Ideguchi, K. Ieki, K. Kobayashi, Y. Kondo, R. Minakata, T. Motobayashi, D. Nishimura, T. Otsuka, H. Otsu, H. Sakurai, N. Shimizu, D. Sohler, Y. Sun, A. Tamii, R. Tanaka, Z. Tian, Y. Tsunoda, Zs. Vajta, T. Yamamoto, X. Yang, Z. Yang, Y. Ye, R. Yokoyama, and J. Zenihiro: “Investigating nuclear structure in the vicinity of ^{78}Ni : Low-lying excited states in the neutron-rich isotopes $^{80,82}\text{Zn}$ ”, *Phys. Rev. C* **93** 024320 (2016).
- [12] N. Shimizu, Y. Utsuno, Y. Futamura, T. Sakurai, T. Mizusaki and T. Otsuka: “Stochastic estimation of nuclear level density in the nuclear shell model: An application to parity-dependent level density in ^{58}Ni ”, *Phys. Lett. B* **753** 13 (2016).
- [13] T. Otsuka, and Y. Tsunoda: “The role of shell evolution in shape coexistence”, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **43** 024009 (2016).
- (会議抄録)
- [14] N. Shimizu, T. Abe, M. Honma, T. Otsuka, Y. Tsunoda, Y. Utsuno and T. Yoshida: “Frontier of nuclear shell-model calculations and high performance computing”, *JPS Conf. Proc.* **6** 010021(2015).
- [15] Y. Utsuno, T. Otsuka, Y. Tsunoda, N. Shimizu, M. Honma, T. Togashi, T. Mizusaki, “Recent Advances in Shell Evolution with Shell-Model Calculations”, *JPS Conf. Proc.* **6** 010007 (2015).
- [16] J. Menéndez, “Shell Structure and Spectroscopy of Neutron-Rich Calcium Isotopes Studied with Chiral Three-Nucleon Forces”, *JPS. Conf. Proc.* **6** 020020 (2015).
- [17] T. Yoshida, N. Shimizu, T. Abe, T. Otsuka: “Cluster structure of Be isotopes based on Monte Carlo shell model”, *JPS Conf. Proc.* **6** 030028 (2015).
- [18] T. Miyagi, T. Abe, R. Okamoto, and T. Otsuka, “Many-Body Calculations for Medium-Mass Nuclei by the Unitary Transformation Method”, *JPS Conf. Proc.* **6**, 030037 (2015).
- [19] T. Togashi, N. Shimizu, Y. Utsuno, T. Otsuka, and M. Honma: “Shell-Model Calculation of High-Spin States in Neutron-Rich Cr and Fe Isotopes”, *JPS Conf. Proc.* **6** 030046 (2015).
- [20] Y. Iwata, N. Shimizu, Y. Utsuno, M. Honma, T. Abe, T. Otsuka: “Ingredients of nuclear matrix element for two-neutrino double-beta decay of ^{48}Ca ”, *JPS Conf. Proc.* **6** 030057(2015).
- (国内雑誌)
- [21] 大塚孝治, 阿部喬, “原子核物理における大規模数値計算の進展” *パリティ* Vol.30 (2015年6月号) p.24-28 (丸善出版社)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [22] T. Miyagi, T. Abe, R. Okamoto, and T. Otsuka, “Role of one-body correlation operator to ground-state energies and radii in the unitary-model-operator approach”, The 25th TRIUMF Summer Institute, Vancouver, Canada, July, 2015. (poster)
- [23] T. Miyagi, T. Abe, R. Okamoto, M. Kohno, and T. Otsuka, “Ground-state energies and radii for double closed-shell nuclei with chiral nucleon-nucleon interactions in the unitary-model-operator approach”, The 14th CNS International Summer School, Wako, Japan, August, 2015.
- [24] T. Abe, P. Maris, T. Otsuka, N. Shimizu, Y. Utsuno and J. P. Vary, “Infinite basis-space extrapolation of ground-state energies of light nuclei in the no-core Monte Carlo shell model”, YITP Long-term Workshop on Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics (CANHP2015), Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan, September 28 - October 2 (second week), 2015.
- [25] T. Miyagi, T. Abe, R. Okamoto, M. Kohno, and T. Otsuka, “Calculations for medium-mass nuclei with chiral EFT interactions in the unitary-model-operator approach”, Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics, Kyoto, Japan, October, 2015.
- [26] S. Yoshida, N. Tsunoda, T. Abe, T. Otsuka, M. Kohno, T. Suzuki, “Spin-tensor decomposition of nuclear forces from chiral Effective Field Theory”, YITP Long-term Workshop on Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics

- (CANHP2015), Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan, September 28 - October 2 (second week), 2015.
- [27] T. Abe, P. Maris, T. Otsuka, N. Shimizu, Y. Utsuno and J. P. Vary, “Infinite basis-space extrapolation of ground-state energies of light nuclei in the no-core Monte Carlo shell model”, YITP Long-term Workshop on Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics (CANHP2015), Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan, October 12-16 (fourth week), 2015.
- [28] T. Abe, P. Maris, T. Otsuka, N. Shimizu, Y. Utsuno and J. P. Vary, “Infinite basis-space extrapolation of ground-state energies in no-core Monte Carlo shell model”, Symposium on ‘Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015)’, Nara Kasugano International Forum, Nara, Japan, November 5-8, 2015.
- [29] T. Miyagi, T. Abe, R. Okamoto, M. Kohno, and T. Otsuka, “Calculations for medium-mass nuclei with chiral EFT interactions in the unitary-model-operator approach”, Quarks to Universe in Computational Science, Nara, Japan, November, 2015.
- [30] T. Miyagi, T. Abe, R. Okamoto, M. Kohno, and T. Otsuka, “Applications of the unitary-model-operator approach to the closed sub-shell nuclei”, TRIUMF workshop on Progress in Ab Initio Techniques in Nuclear Physics, Vancouver, Canada, February, 2016. (poster)
- 招待講演
- [31] J. Menéndez: “Double-beta decay and nuclear structure correlations”, Conference on Neutrinos and Dark Matter in Nuclear Physics (NDM15), Jyväskylä (Finland), June 1-5, 2015.
- [32] T. Otsuka, “Recent progress in the shell model and nuclear collectivity”, CRC 634 Concluding Conference, TUD, Darmstadt, June 11 (9-13), 2015.
- [33] T. Otsuka, “Collectivity and the shell model for exotic nuclei”, Int. Conf. “Nuclear Structure and Dynamics III”, Protoroz - Portorose, June 18 (14-19), 2015.
- [34] T. Otsuka, “Proton-neutron correlations in the shell model”, 2nd Int. Workshop & 12th RIBF Discussion on Neutron-Proton Correlations, Hong Kong, July 6 (6-9), 2015.
- [35] T. Otsuka, “Dual quantum liquid picture of nuclei and its implication to reflection asymmetry”, “Reflections on the atomic nucleus”, University of Liverpool, July 30 (28-30), 2015.
- [36] J. Menéndez: “Matrix Elements for Fundamental Symmetries”, 2015 European Nuclear Physics Conference Groningen (Netherlands), August 31-September 4, 2015.
- [37] T. Otsuka, “Shell-model perspectives for quantities of astrophysical interests in medium and heavy nuclei”, Numazu Workshop 2015: “Challenges of modeling supernovae with nuclear data”, Mishima, September 2 (1-4), 2015.
- [38] T. Otsuka, “ 0^+ dominance in ground states - Ultimacy of “More is Different” - ” Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics (CANHP 2015) YITP, Kyoto, September 29 (September 28 - October 2 , 2015.
- [39] J. Menéndez: “Progress in microscopic shell model for medium-mass nuclei and nuclear matrix elements”, Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics (CANHP 15) workshop, Kyoto (Japan), September 21-October 30, 2015.
- [40] T. Otsuka: “Dual quantum liquid picture of atomic nuclei”, International Symposium “Frontier of γ -ray spectroscopy” (Gamma15), Osaka, Oct. 1 (1-3), 2015.
- [41] T. Otsuka: “Perspectives of nuclear structure studies on exotic nuclei”, ANPhA Symposium, Gyeongju, Korea, Oct. 23, 2015.
- [42] T. Otsuka, K. Tsukiyama and R. Fujimoto, “Feshbach’s doorway-state resonances, heavy-ion induced nucleon transfer reactions and exotic nuclei” Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics (CANHP 2015) YITP, Kyoto, October 28, (25-30), 2015.
- [43] J. Menéndez: “Constraining double-beta decay matrix elements”, Annual Fall Meeting of the APS Division of Nuclear Physics workshop “Theory and Computation for Neutrinos and Fundamental Symmetries”, Santa Fe (USA), October 28-31, 2015.
- [44] T. Otsuka, “Report on Large-scale Quantum Many-body Calculation on Nuclear Properties and its Applications”, Symposium on “Quarks to Universe in Computational Science” (QUCS 2015), Nara, Nov. 4 (4-8), 2015.
- [45] T. Otsuka, “10 years of the shell evolution by nuclear forces and beyond”, 9th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium (JCNP 2015), Osaka, Nov. 10 (7-12), 2015.
- [46] T. Otsuka, “Ten years of the shell evolution driven by the tensor forces - from magic numbers to dual quantum liquid picture -”, 9th Int Symposium on High-Resolution Spectroscopy & Tensor Interaction (HST15), Osaka, Nov. 18 (16-19), 2015.
- [47] J. Menéndez: “Two-body (meson-exchange) currents and Gamow-Teller quenching”, International Symposium on High-resolution Spectroscopy and Tensor interactions (HST15), Osaka (Japan), November 16-19, 2015.
- [48] T. Otsuka, “Shape coexistence, fission and tensor force”, 27th ASRC International Workshop “Nuclear Fission and Exotic Nuclei”, Ibaraki Quan-

- tum Beam Research Center, Tokai, Dec. 1-2 (2), 2015.
- [49] T. Otsuka, “Some Perspectives from RIPS and RIBF Eras”, RIPS25 Symposium, Shonan, Dec. 6-7 (6), 2015.
- [50] T. Otsuka, “Shell evolution and nuclear forces”, 1st Gogny Conference, Bruyères-le-Châtel, France, Dec. 8-11 (9), 2015.
- [51] J. Menéndez: “What do we know about neutrinoless double-beta decay and its matrix elements?”, Neutrino Physics 2015 (NuPhys15): Prospects in Neutrino Physics, London (United Kingdom), December 16-18, 2015.
- [52] T. Abe, “No-core MCSM calculations in light nuclei”, TRIUMF Workshop on Progress in Ab Initio Techniques in Nuclear Physics, TRIUMF, Vancouver, Canada, Feb. 23-26, 2016.
- [53] T. Otsuka, “Chiral EFT forces, shell evolution, shape coexistence and fission: are they in the same cup of tea?”, IEA Workshop on Structure and Reactions of Exotic Nuclei, Sao Paolo, Mar. 22 (21-24), 2016.
- (国内会議)
一般講演
- [54] 阿部喬, P. Maris, 大塚孝治, 清水則孝, 宇都野穰, J. P. Vary, “Infinite basis-space extrapolation of ground-state energies of light nuclei in the no-core Monte Carlo shell model”, 日本物理学会秋季大会, 大阪市立大学, 2015年9月25-28日.
- [55] 宮城宇志, 阿部喬, 岡本良治, 河野通郎, 大塚孝治, 「カイラル有効場の理論に基づく相互作用を用いたユニタリ模型演算子法による中重核基底状態の計算」, 日本物理学会2015年秋季大会, 大阪市立大学, 杉本キャンパス, 2015年9月.
- [56] 吉田聡太, 角田直文, 阿部喬, 大塚孝治, 河野通郎, 鈴木俊夫, “カイラル有効場の理論から得られる有効相互作用の基本的性質”, 日本物理学会秋季大会, 大阪市立大学, 2015年9月25-28日.
- [57] 吉田聡太, 角田直文, 阿部喬, 大塚孝治, 河野通郎, 鈴木俊夫, “殻模型相互作用における有効2体化3体力の効果”, 日本物理学会第71回年次大会, 東北学院大学, 2016年3月19-22日.
- [58] 大塚孝治, “HPCIからポスト京へ”, 素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム, ワテラスコモンホール, 東京, 2016年3月30日 (30-31日).
- [59] 阿部喬, “軽い核の第一原理計算と核力”, 素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム, ワテラスコモンホール, 東京, 2016年3月30, 31日.
- 招待講演
- [60] 阿部喬, “No-core shell model and no-core Monte Carlo shell model”, KEK 理論センター研究会「原子核・ハドロン物理の課題と将来」, 高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所, 2015年11月24-26日.
- (セミナー)
- [61] Javier Menéndez: “From nuclear structure to double-beta decay”, University of Tsukuba, Japan, May 22, 2015.
- [62] T. Otsuka, “Structure evolutions in exotic nuclei and nuclear forces”, Nuclear Physics Seminar 2-Slot Series Plus!, RIKEN, July 1-2 July 2015, Tokyo, Japan.
- [63] T. Miyagi, “Ground-state energies and radii of medium-mass nuclei in the unitary-model-operator approach”, TRIUMF, Vancouver, Canada, July, 2015.
- [64] J. Menéndez, “Ab initio framework for Nuclear Structure and Fundamental Symmetries”, The 14th CNS International Summer School, Wako, Japan, August, 2015.
- [65] Javier Menéndez: “Towards ab initio calculations of nuclear structure and matrix elements” Los Alamos National Laboratory, USA, November 3, 2015.
- [66] Javier Menéndez: “From Atomic Nuclei to Neutrininos and Dark Matter”, Insituto de Física Teórica UAM/CSIC, Spain, March 14, 2016.
- [67] Javier Menéndez: “Neutrinoless double-beta decay: studying neutrininos with atomic nuclei”, Universitat de Barcelona, Spain, March 17, 2016.

理論ハドロン物理 (福嶋研)

ハドロン (核子、中間子、及びその励起状態) は、クォークとグルーオンの束縛状態であり、量子色力学 (QCD) がその相互作用を支配している。QCD はシンプルなラグランジアンで記述されるが、その非摂動性のために複雑で興味深い物性を示す。我々の研究室では高温・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について、QCD の量子多体問題という観点から研究を行っている。

中性子星の状態方程式の新しい構成法の提唱

中性子星のコアにクォーク物質が存在し得るかどうかが、まだよく分かっていない。クォーク物質への転移が1次相転移だとすると状態方程式が軟化して重い中性子星を支えられない。しかし核物質とクォーク物質の間を滑らかな関数で内挿すれば支えられることが知られている。後者の問題点は、内挿領域でミクロな物理情報が失われてしまうことであった。そこで我々はミクロな理論の内部パラメータの密度依存性によって核物質とクォーク物質をつなぐアイデアを提唱した。この手法は単なる処方箋ではなく、いわゆるクォークイオン状態の存在を根拠とする、クォーク非閉じ込め現象の物理を正しく捉えたものであることを強調した [7, 43]。

Lefschetz thimble 法を用いた複素 Langevin 法の新しい定式化

符号問題を克服する方法として複素化積分が注目されている。複素 Langevin 法は数学的正当性に問題のある手法であり、これを改善するために Lefschetz thimble 法に隠れた超対称性を利用することによって、Lefschetz thimble 法を複素 Langevin 法に酷似した形に書き直し、数値計算によって極めて良い収束性を確認した [4]。

非相対論的 Banks-Casher 関係式

QCD では、カイラル対称性の自発的破れによってハドロン質量が生成されている。一方、非相対論的フェルミ系では、粒子数保存に関する対称性の自発的破れによって超流動や超伝導が引き起こされる。これらの現象は、一般には全く別のものであるが、多成分混合フェルミ系では数学的な類似性がある。本研究では、この類似性に着目し、QCD における有名な関係式である Banks-Casher 関係式を、非相対論的多成分混合フェルミ系に適用した。Banks-Casher 関係式は、QCD におけるカイラル対称性の破れの秩序変数と経路積分計算で得られるスペクトル密度を結びつける厳密な関係式である。我々は、非相対論系の場合の Banks-Casher 関係式を導出し、超流動の秩序変数がスペクトル密度で与えられることを示した [6]。

場の理論における回転の効果

磁場と回転の類似性 磁場中の粒子の普遍的性質は、エネルギー準位の Landau 量子化である。Lorentz 力と Coriolis 力の対応から容易に想像できるように、Landau 準位は回転によっても実現される。こうした回転の効果は凝縮系物理ではよく知られているが、その一方でこれまで相対論的観点からこの 2 つの類似性は議論されてこなかった。本研究では曲がった時空のスカラ理論を解析し、相対論的な場の理論においても回転によってある種の Landau 量子化が得られることを明らかにした。

相対論的フェルミオン系における回転の効果 初期宇宙や中性子星においては、温度、密度、磁場などの効果によって非常に興味深い QCD 物性が実現している。その代表例が磁場中のカイラル対称性の構造である。本研究では回転が有効的に密度効果と見なせることに着目して、磁場と密度効果が引き起こす現象が、磁場と回転の効果によっても再現されることを明らかにした [45, 50]。我々はここで得られた新規現象を「回転による磁氣的抑制」と命名した。

巻き数展開法を用いた正準集合の方法による有限密度格子 QCD

フェルミオン行列式の評価に巻き数展開法を採用した正準集合の方法を用いることで、2-flavor Wilson fermion における有限密度 QCD の数値シミュレーションを行った。有限密度格子 QCD 計算には「符号問題」が存在するため、通常、その適用範囲は低密度領域に限られるが、正準集合の方法では、この問題を回避できる。本研究では、圧力、粒子数、バリオン感受率の密度依存性を求め、その結果が低密度領域での先行研究と無矛盾であることも確認した。通常、巻き数展開法は、ホッピングパラメータ展開に立脚しているために、その適用範囲は十分重いクォーク系に限られる。この問題を解決する手法として、3次元空間内のクォークの伝搬を厳密に評価できる改良された巻き数展開法を新たに開発し、その有効性も確認した。

格子 QCD 計算を用いたダイクォークの探索

ダイクォーク描像は、エキゾチックハドロンを自然に説明する代表的なシナリオの 1 つである。QCD 熱力学の重要な研究対象である低温高密度 QCD 物質のカラー超伝導状態でも、ダイクォークは主要な構成要素だと考えられており、ダイクォーク描像は、長年に渡って研究者たちの関心を引き続けている。1 つのグルーオンの交換による相互作用に立脚したモデルによると、クォーク間の引力は、good diquark と呼ばれるカラー反 3 重項、フレーバー反対称、スピン 1 重項の正パリティチャンネルで大きくなり、このチャンネルでのダイクォーク質量が最も軽いと結論されている。本研究の目的は、この現象論的予言を格子 QCD 計算が支持するか否かを調べることである。本取り組みでは、静的クォークに 2 つの軽いクォークを組み合わせてゲージ不変な演算子を構成し、様々なダイクォーク間の質量差と密度-密度相関関数のクォーク間距離依存性を求めた。この結果より、good diquark が最も軽く、また、そのチャンネルにおいてダイクォーク相関が強くなる傾向にあることを見出した。

Particle production under external fields

Production of fermions with mass was studied in response to a background electromagnetic field at real-time. The anomalous currents were studied at the CP -odd domain considering a non-zero parallel component of the B with respect to E , numerically. The produced net current were simulated for different values of the fermion mass at real-time using naive fermions. A quantitative description of mass suppression on momentum particle and antiparticle distributions was gained. As a test for the numerical framework, results were contrasted with Wilson fermions showing consistency with the Nielsen-Ninomiya no go theorem. Results were presented in [30, 27] and are to be submitted for publication.

Field theory formulation of the perfect fluid

An action principle for the perfect fluid has been proposed. Within the proposed formalism a long-standing problem regarding the description of rotational flow was settled; Clebsch potential variables emerge without additional constraints and give a framework free of redundant degrees of freedom. The formulation naturally leads to two novel types of interactions. Gauge on the Clebsch potential result in the abelian and non-abelian fluids, while interaction on the velocity potentials which convert the rest-mass energy to energies of other fields and vice-versa. Results uploaded to arxiv and submitted to Physical Review Letters for publication.

複素 Langevin 方程式の Gaussian ansatz を用いた解析

実時間の量子シミュレーションに用いられる確率過程量子化には非物理的な固定点があることが知られている。確率過程量子化の基礎方程式である複素 Langevin 方程式を quartic 模型に対し、Gaussian ansatz を用いて半解析的に解くことで、確率過程量子化が非物理的な結果をもたらす条件を調べた。その結果、Lefschetz thimble 上の積分経路の曲率が大きくなるときに厳密解との差が大きくなるという、先行研究と一致する結果が quartic 模型で具体的に得られた。

円偏光電場下における量子異常誘起効果

カイラルアノマリーから決まる電磁応答は軸性ゲージ背景場を用いて定式化できるが、多くの現実的なセットアップにおいてこれを人為的にチューンすることは容易ではない。本研究では円偏光電場により Dirac フェルミオン系を駆動し非平衡定常状態を作ることで、実効的に軸性ベクトルポテンシャル背景場を実現できることに着目し、外部磁場への応答として異常電荷密度が誘起されることを見出した。我々は円偏光電場によりチューン可能なこのアノマリー誘起効果を「カイラルポンピング効果」と命名した [9, 44]。

Dynamically and Spatially Assisted Chiral Magnetic Effect

Inhomogeneous parallel electric and magnetic fields configurations which both enhance Schwinger pair production and elicit a net chirality were explored in the worldline path integral formalism. Upon factoring the path integral into magnetic and electric portions, it was found pair production and its dynamically assisted enhancement were associated

with instanton solutions for the electric field portions. Furthermore it was found that the inclusion of a spatially inhomogeneous magnetic field further enhanced pair production, yet a finite electric field was needed for any pair production to occur. The chiral magnetic effect in heavy ion collision and semimetal environments was predicted as a result of pair production and the nontrivial topology [29].

<報文>

(原著論文)

- [1] A. Flachi, K. Fukushima, and V. Vitagliano, “Geometrically induced magnetic catalysis and critical dimensions”, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 181601 (2015).
- [2] S. Benic, I. Mishustin, C. Sasaki, “Effective model for the QCD phase transitions at finite baryon density”, *Phys. Rev. D* **91**, 125034 (2015).
- [3] K. Fukushima, “Simulating net particle production and chiral magnetic current in a CP-odd domain”, *Phys. Rev. D* **92**, 54009 (2015).
- [4] K. Fukushima, Y. Tanizaki, “Hamilton dynamics for Lefschetz-thimble integration akin to the complex Langevin method”, *PTEP* 111A01 (2015).
- [5] T. Hayata, A. Yamamoto, “Complex Langevin simulation of quantum vortices in a Bose-Einstein condensate”, *Phys. Rev. A* **92**, 043628 (2015).
- [6] T. Kanazawa, A. Yamamoto, “Nonrelativistic Banks-Casher relation and random matrix theory for multi-component fermionic superfluids”, *Phys. Rev. D* **93**, 016010 (2016).
- [7] K. Fukushima, T. Kojo, “The Quarkyonic Star”, *Astrophys. J.* **817**, 180 (2016).
- [8] D. E. Alvarez-Castillo, A. Ayriyan, S. Benic, D. Blaschke, H. Grigorian, S. Typel, “New class of hybrid EoS and Bayesian M-R data analysis”, *Eur. Phys. J. A52*, 69 (2016).
- [9] S. Ebihara, K. Fukushima, T. Oka, “Chiral pumping effect by rotating electric fields”, *Phys. Rev. B* **93**, 155107 (2016).
- [10] K. Fukushima, K. Hattori, H.-U. Yee, Y. Yi, “Heavy quark diffusion in strong magnetic fields at weak coupling and implication to elliptic flow”, *Phys. Rev. D* **93**, 074028 (2016).

(会議抄録)

- [11] A. Yamamoto, T. Hayata, “Complex Langevin simulation in condensed matter physics”, *PoS LATTICE 2015*, 041 (2015).
- [12] T. Kanazawa, A. Yamamoto, “Lifshitz-type SU(N) lattice gauge theory in five dimensions”, *PoS LATTICE 2015*, 051 (2015).
- [13] R. Fukuda, A. Nakamura, S. Oka, “Validity range of canonical approach to finite density QCD”, *PoS LATTICE 2015*, 167 (2015).

- [14] R. Fukuda, A. Nakamura, S. Oka, S. Sakai, A. Suzuki, Y. Taniguchi, “Beating the sign problem in finite density lattice QCD”, *PoS LATTICE 2015*, 208 (2015).
- [15] K. Murase and T. Hirano, “Hydrodynamic fluctuations and dissipation in an integrated dynamical model,” *Proceedings of the XXV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2015)* [arXiv:1601.02260 [nucl-th]].
- [16] S. Takeuchi, K. Murase, T. Hirano, P. Huovinen and Y. Nara, “Violation of mass ordering for multi-strange hadrons at RHIC and LHC,” *Proceedings of the XXV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2015)* [arXiv:1601.04409 [nucl-th]].
- [17] K. Nagai, R. Kurita, K. Murase and T. Hirano, “Causal hydrodynamic fluctuation in Bjorken expansion,” *Proceedings of the XXV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2015)* [arXiv:1602.00794 [nucl-th]].
- <学術講演>
(国際会議)
一般講演
- [18] A. Nakamura, R. Fukuda, S. Oka, S. Sakai, A. Suzuki, Y. Taniguchi : “Finite density QCD (1) -Lattice Canonical Approach-”, sQGP and extreme QCD, Kavli Institute for Theoretical Physics China, China, May 15, 2015.
- [19] A. Yamamoto : “Complex Langevin simulation in condensed matter physics”, The XXIII International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2015), Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, July 14-18, 2015.
- [20] R. Fukuda, A. Nakamura, S. Oka : “Validity range of canonical approach to finite density QCD”, The XXIII International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2015), Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, July 16, 2015.
- [21] S. Benic : “Effective model for the QCD phase transitions at finite density”, The many faces of neutron stars, Munich, Germany, Aug. 24-Sep. 18, 2015.
- [22] S. Benic : “Photon in pA in CGC”, Selected topics in the physics of the Quark-Gluon Plasma and Ultrarelativistic Heavy Ion Collisions, Germany, Sep. 7-26, 2015.
- [23] S. Oka, R. Fukuda, A. Nakamura : “Study of finite density QCD phase transition with multiple precision canonical approach”, The 13th International workshop on QCD in extreme conditions, Central China Normal University, Wuhan, China, Sep. 23, 2015.
- [24] S. Benic : “Photon production from the Color Glass Condensate in pA collisions”, *Quark Matter 2015*, Kobe, Japan, Sep. 27-Oct. 3, 2015.
- [25] K. Fukushima : “What flows in the chirally anomalous transport?”, 25th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Kobe, Japan, Sep. 29, 2015.
- [26] K. Mameda : “QCD θ -vacua from the chiral limit to the quenched limit”, *Quark Matter 2015*, Kobe, Japan, Sep. 29, 2015.
- [27] P. Morales : “Real-time CME simulation at finite mass” (poster presentation) , *Quark Matter 2015*, Kobe, Japan, Sep. 29, 2015.
- [28] A. Nakamura, R. Fukuda, S. Oka, S. Sakai, A. Suzuki, J. Takahashi, Y. Taniguchi : “Lattice QCD for Baryon Rich Matter –Beyond Taylor Expansions”, *Quark Matter 2015*, Kobe, Japan, Sep. 30, 2015.
- [29] P. Copinger and K. Fukushima : “Dynamically and Spatially Assisted Chiral Magnetic Effect”, *KEK Theory Workshop 2015*, Tsukuba, Japan, Dec. 1-4, 2015.
- [30] P. Morales : “Suppression of net-particle production from finite fermion mass” , *High Energy Physics in the LHC Era*, Valparaiso, Chile, Jan. 9, 2016.
- 招待講演
- [31] K. Fukushima : “Geometrical Effects on Quark Matter”, sQGP and extreme QCD, Beijing, China, May 25, 2015.
- [32] K. Fukushima : “New Approach to the Sign Problem: Hamiltonian Dynamics in the Lefschetz thimble and the Complex Langevin Methods and a Conjecture toward Unification”, *Workshop on Dense Matter from Chiral Effective Theories*, Jilin, China, June 27, 2015.
- [33] K. Fukushima : “The complex Langevin and the Lefschetz thimble methods – supersymmetric Hamiltonian and the unification”, *Numerical approaches to the holographic principle, quantum gravity and cosmology*, Kyoto, Japan, July 23, 2015.
- [34] K. Fukushima : “QCD under curvature and magnetic effects”, *Gauge field topology from lattice simulations and solvable models to experiment*, New York, U.S.A., Aug. 18, 2015.
- [35] K. Fukushima : “Quark loops and photons with CGC in pA”, *Equilibrium mechanisms in Weakly and Strongly Coupled Quantum Field Theory*, Seattle, U.S.A., Aug. 25, 2015.
- [36] K. Fukushima : “QCD in Heavy-Ion Collisions”, 25th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Kobe, Japan, Sep. 27, 2015.

- [37] K. Fukushima : “QCD in Heavy-Ion Collisions”, New Progress in Heavy Ion Collision: What is Hot in the QGP, Wuhan, China, Oct. 7, 2015.
- [38] Koichi Murase: “J-PARC HI physics 2: Hydrodynamics”, The 31st Reimei Workshop on Hadron Physics in Extreme Conditions at J-PARC, Jan. 21, 2016.
- [39] Koichi Murase: “Relativistic fluctuating hydrodynamics”, The 6th Asian Triangle Heavy-Ion Conference (ATHIC 2016), Feb. 18, 2016.
- [40] K. Fukushima : “Dynamically and Spatially Assisted CME”, QCD Chirality Workshop 2016, Los Angeles, U.S.A., Feb. 23, 2016.

(国内会議)

一般講演

- [41] S. Oka, R. Fukuda, A. Nakamura, S. Sakai, A. Suzuki, Y. Taniguchi : “Exploration of finite density phase transition with canonical approach - Effects of multiple precision computation-”, Autumn meeting of the Physical Society of Japan, Osaka City Univ., Sep. 27, 2015.
- [42] 村瀬功一、「高エネルギー原子核衝突と流体力学的揺らぎ」、KEK 原子核・ハドロンの課題と将来 2015、高エネルギー加速期研究機構 (KEK)、2015 年 11 月 25 日
- [43] 福嶋健二 : “The Quarkyonic Star”, 日本物理学会第 71 回年次大会、東北学院大学、2016 年 3 月 19 日.
- [44] 海老原周、福嶋健二、岡隆史、「円偏光電場下におけるディラックフェルミオンの量子異常誘起効果」、日本物理学会第 71 回年次大会、東北学院大学、2016 年 3 月 21 日
- [45] 豆田和也、福嶋健二、Xu-Guang Huang、Hao-Lei Chen : “Magnetic catalysis versus rotational inhibition”, 日本物理学会第 71 年次大会、東北学院大学、2016 年 3 月 22 日

招待講演

- [46] K. Fukushima : “Nambu–Jona-Lasinio Model: Harvests and Youngsters”, Nambu and Science Frontier, Osaka, Japan, Nov. 17, 2015.

(セミナー)

- [47] S. Benic : “Unruh effect and condensate in and out of accelerated vacuum”, (KEK、2015 年 4 月 8 日)
- [48] K. Fukushima : “Chiral Gap Effect”, (理化学研究所、2015 年 6 月 15 日)
- [49] 村瀬功一: “Hydrodynamic fluctuations in high-energy nuclear collisions”, (東京大学本郷、2015 年 10 月 26 日)
- [50] 豆田和也: “Rotational Effects in Quantum Field Theory”, (慶應義塾大学、2016 年 3 月 2 日)

1.2 素粒子論研究室

1.2.1 現象論

ヒッグス粒子

遠藤と諸井は野尻 (KEK) と共に超対称性模型におけるヒッグス粒子の崩壊について研究を行った。量子補正を適切に評価することで、将来のレプトンコライダー実験により高いエネルギースケールの超対称性模型が検出可能であることを示した [2]。

真空崩壊

遠藤、諸井、庄司は野尻 (KEK) と真空の崩壊について研究を行った。真空の崩壊率の計算には大きなスケール不定性があるが、量子補正を取り入れることでこの不定性を小さく抑えることができることを示した [3]。

超対称模型の現象論

濱口、石川は超対称性理論におけるニュートラリーノ暗黒物質のうち、特にヒッグス粒子の質量 (125GeV) や Z ボソンの質量 (91GeV) の約半分の質量を持ち resonance を通して対消滅する軽い Bino-Higgsino 暗黒物質について、(i) LHC でのチャージャーノ/ニュートラリーノ探索、(ii) ヒッグスの invisible 崩壊 (LHC および ILC)、(iii) 暗黒物質の直接検出、などの制限および検証可能性を包括的に調べ、近い将来ほぼ全てのパラメータ領域において検証可能であることを定量的に示した [4]。

Bae は Baer, Serce, Zhang (オクラホマ大) とともに超対称アクシオン模型における種々の宇宙論的制限と整合的なレプトン数生成のシナリオを議論した [6]。

LHC 現象論

ATLAS 実験では、Z ボソンの崩壊で出来たと考えられるレプトン対、ジェット、損失垂直エネルギー (MET) の存在するイベントの過剰が 3 シグマの有意度で確認された。寺田は、他機関の白井氏、Lu 氏と共に、この過剰を超対称模型から予言される新粒子の崩壊として説明した [7, 66]。対象として考えた生成、崩壊のプロセスは、グルイーノ対生成、グルーオンを放出するヒグシーノへの崩壊、Z ボソンを放出するニュートラリーノへの崩壊である。効率の良い Z ボソンへの崩壊率を得る為と、他の新粒子探索と矛盾する様な崩壊モードを避ける為に、上記粒子の間のやや縮退したスペクトルを仮定した。面白いことに、Z ボソンへの高い崩壊率を要請すると、重いスクォークが導かれる。これはスプリット超対称性と呼ばれる枠組みと合致し、例えばヒッグス粒子

の質量 125 GeV を自然に説明できるといった利点がある。CMS 実験は同様のイベントの探索を行っているが、イベントの過剰は見つかっていない。ATLAS 実験のみを説明することは比較的容易に行えるが、CMS 実験とも整合性のある説明が可能であるかは非自明であるという結論に達した。

リュウは、Brussels 大学の Mariotti、Mawatari、Vereecken と King's College London の Sakurai と LHC におけるイベントの過剰について超対称性理論で解釈した [8]。リュウは、DESY の Shirai と LHC におけるダイボソンイベントの過剰について暗黒物質の探索方法で調べると提唱した [9]。これらの研究成果を国際会議で発表した [56, 57]

諸井、高江洲、伊藤は LHC 実験において存在が示唆されている、スカラー状態の光子光子衝突型加速器における測定可能性について調べ、広範なパラメータ領域において、十分な精度での測定が予期されることを示した [10]。これらについて伊藤は KEK-PH 2016 において発表を行った [53]。

e^+e^- 線型加速器の物理

諸井は、兼村、田辺とともに、将来の e^+e^- 線型加速器で得られる高エネルギー電子ビームを用いたビームダンプ実験の可能性を指摘した。特に、hidden photon 模型についてのセンシティブティを見積もり、過去の実験によってカバーされていないパラメータ領域が e^+e^- 線型加速器におけるビームダンプ実験でカバーされ得ることを指摘した [11]。

暗黒物質からの宇宙線反陽子

浜口、諸井、中山は AMS-02 衛星が宇宙線反陽子のフラックスの超過成分を報告したことを受けて、これを暗黒物質の対消滅あるいは崩壊によって説明できること、特にウィーノ暗黒物質の対消滅がよい候補であることを示した [12]。

暗黒物質への宇宙論的制限

諸井と高江洲は、川崎、郡、とともに、宇宙初期における暗黒物質対消滅がビッグバン軽元素合成に与える影響について研究を行った。特に対消滅によって生じるハドロンジェットの効果を正確に見積もるとともに、軽元素量についての最新の観測的制限を用いることで、暗黒物質の対消滅断面積に対する上限を様々な暗黒物質模型について得た [13]。

中山は川崎（東大宇宙線研）、関口（IBS）とともに、暗黒物質の対消滅が初期宇宙での水素の再結合に与える影響を詳細に評価し、最新の PLANCK 衛星の観測結果を用いて、暗黒物質の対消滅断面積に対する厳しい制限を得た [14]。

ダイクォークのベーテ・サルペーター方程式

神野、北原、三嶋はダイクォークの Bethe-Salpeter 方程式におけるグルーオン交差型ダイアグラムの寄与の重要性を指摘し、それらを取り入れた近似で Bethe-Salpeter 方程式を解いた [15]。三嶋はこの内容をもとに学位論文をまとめた [44]。

1.2.2 重いクォークonium

三嶋は、清（順天堂大）、隅野（東北大）とともに、摂動 QCD に基づいた重いクォーク同士の束縛状態のエネルギー準位を解析し、トップクォーク対の 1S 共鳴エネルギーからトップクォークの \overline{MS} 質量を決定する際の理論的不確かさを見積もった [16]。また、同様の解析をチャモニウム系の $J/\psi, \eta_c(1S)$ とボトモニウム系の $\Upsilon(1S), \eta_b(1S)$ に適用しチャームクォークとボトムクォークの \overline{MS} 質量を高精度で決定した [17]。

重力的粒子生成

江間、神野、中山は向田 (IPMU) とともに、インフレーション後のインフラトン振動期において一般に重力の効果によってインフラトンとは直接の結合がない粒子の生成が起こることを指摘した。さらに拡張重力模型では重力的粒子生成がより顕著になることを示し、その宇宙論的影響を評価した [18]。また、一般的な拡張重力模型においてインフラトン振動期のダイナミクスを解析する簡便な方法を開発した [19]。

さらにある種の拡張重力模型において、インフラトン振動期にインフラトンの短波長揺らぎに不安定性 (gradient instability) が現れることを指摘し、この種の模型における再加熱過程の解析が従来よりはるかに複雑になることを明らかにした [20]。

ヒッグス場と宇宙論

アクシオン模型は強い相互作用における Strong CP 問題を解決する有力な模型であるが、アクシオンが大きな等曲率揺らぎを得ることが問題であった。中山、瀧本は DFSZ アクシオン模型において、ヒッグスインフレーションのもとでアクシオン等曲率ゆらぎが大きく抑制されることを示した [21]。

神野、中山、瀧本はヒッグス場が電弱スケールより遥かに高いスケールで一次相転移を起こした可能性があることを指摘し、このときに放出される重力波の強度を見積もった。その結果、将来の DECIGO 衛星で重力波が観測できる可能性があることを示した [22]。

スカラー場の擬スケールダイナミクス

一般に膨張宇宙のもとでのスカラー場のダイナミクスは、ポテンシャルの冪の指数によって振動的な振る舞いになるかスケールリングと呼ばれる振る舞いになるかが決まっている。江間、中山、瀧本は、スカラー場のポテンシャルの冪の指数がある特定の値をとると、振動ともスケールリングとも定性的に違う、擬スケールリングと呼ばれる奇妙な振る舞いを示すことを明らかにし、その宇宙論的影響を調べた [23]。

インフレーション模型

超重力理論は標準模型を超える素粒子論の有力候補の一つであり、宇宙初期のインフレーションの記述に適した枠組みである。寺田は、超重力理論でインフラトンのポテンシャルの安定化の為の場を導入しないラージフィールド・インフレーションの方法を最小超対称標準模型のヒッグス場に応用し、ヒッグス・インフレーションの模型を国際会議の会議抄録に提出した [38]。また、寺田は他機関の Ketov 氏と共に、安定化の為の場を導入せずに大域的な $U(1)$ 対称性を持つ理論でのインフレーション機構を提唱した [25, 65]。これに関連し、国際会議で安定化の為の場を導入しない超重力インフレーションについて講演を行った [67]。

中山は高橋（東北大）、柳田（IPMU）とともに、超重力カオティックインフレーション模型から自然にシーソー機構が導かれることを指摘し、ニュートリノの質量差、混合角などの観測値を再現できること、再加熱およびレプトン数生成機構がうまく働くことを示した [24]。

最も観測と合うインフレーション模型の一つに Starobinsky 模型がある。この模型が観測と合う為には非常に大きいパラメータが必要とされる。寺田は、他機関の浅賀、磯、川合、郡、野海氏達と共にこの問題を再考した。作用の全体の係数が大きく、かつ Ricci 曲率の展開の第一項の係数が小さいという状況が得られれば、自動的に高次項の影響が抑制されることを発見した。また、宇宙定数の微調整に加えもう一パラメータの微調整を許せば、そのような状況は余剰次元模型から自然に実現されることを指摘した。この結果と、前年度に行った Starobinsky 模型の研究を抱き合わせて、国際会議で発表した [63, 64, 39]。

1.2.3 弦理論、場の理論全般

超対称場の理論の性質

立川は IPMU の渡辺伯陽と、class S 理論とよばれる大きなクラスの $4d \mathcal{N} = 2$ 理論の線演算子の性質について調べていたものを論文にまとめた [26]。また、立川は、class S 理論の基本的な構成要素である T_N 理論についてのレビューを出版した [27]。

6次元超共形場理論のコンパクト化

大森、清水、立川は米倉 (IPMU) と共に、ALE 特異点をプローブする M5 ブレーンの上に実現される 6次元超共形場理論の、円周および 2次元トーラスを用いたコンパクト化を解析し、得られる 5次元理論と 4次元理論を決定した。この例の結果を一般化して、6次元 (2,0) 理論に Higgs 可能な 6次元超共形場理論に対して、5次元および 4次元へのコンパクト化の持つ一般的な性質を明らかにした [28]。

大森、清水は有質量 IIA 型超弦理論の NS5-D6-D8 ブレーン系を用いて得られる 6次元超共形場理論に対して、同様のコンパクト化を調べた。コンパクト化で得られる 5次元理論を記述する 5-ブレーンウェブを同定することで、4次元理論がクラス S 理論であることを示した [29]。

5次元の超対称ゲージ理論

川野は、松宮と共同で、この 2, 3 年間取り組んでいる研究で、6次元 $\mathcal{N} = (2, 0)$ 超重力理論を 5次元に落としたものを使って、5次元 SuperYang-Mills 理論の 3次元球と 2次元リーマン面へツイストを伴うコンパクト化した理論について調べた。去年度に明らかになった、丸い 3次元球と squash された場合の両方について、破れていない超対称性の数を変えるようなツイストの方法があり、 $\mathcal{N} = 2$ ツイストに相当するコンパクト化について、局所化の方法を用いて、経路積分が完全に実行できることを示した。さらに、ellipsoid 球面上へコンパクト化した場合についても理解が進み、丸い 3次元球や squash された場合と同様に、 $\mathcal{N} = 1$ ツイストに相当するコンパクト化について、局所化の方法を用いて、経路積分の完全な解析計算をした。その結果が、4次元 $\mathcal{N} = 1$ ゲージ理論の超対称性 index を正しく再現しているを明らかにした [30]。

BCD 型のインスタントン分配関数

仲村はゲージ群が $SO(N)$ または $Sp(N)$ である $\mathcal{N} = 2$ 超対称ゲージ理論のインスタントン分配関数の評価を行った。この分配関数は、ある多変数有理関数の Jeffrey-Kirwan 留数を決定することで計算できる。その留数を決定するアルゴリズムを構成し、実際に分配関数に対するより高次の補正を計算することができた。このアルゴリズムの構成と高次補正の計算により、特に、新たな積分公式が示唆された [31]。

共形場理論と可解格子模型

朱と松尾は Maulik と Okounkov による共形場理論を用いた可解格子模型を一般化し、超共形場理論を用いた可解格子模型を考察した。それを用いて超対称な Calogero-Sutherland 模型や超対称 W 代数との対応関係を調べた [32]。

SH^c 代数の表現の研究

SH^c 代数とは $W_{1+\infty}$ 代数として知られている無限次元 Lie 代数の量子変形の一つであり、Virasoro 代数、W 代数など超弦理論で重要な働きをしている代数の表現をすべて含むものだと考えられている。福田、仲村、松尾、朱は SH^c 代数の表現を具体的に調べ、それが triality と呼ばれる自己同型を持つこと、W 代数の極小模型の Hilbert 空間が持っている Burge 条件を再現すること、また、W 代数の表現で知られていたレベルとランクを入れ替える双対性が SH^c 代数の中でどのように実現されるのかを調べた [33]。

Ambitwistor 空間を対象空間とする弦理論と散乱振幅

大森は Mason および Skinner によって提唱された Ambitwistor 空間を対象空間とする弦理論の幾何学的構造を調べ、散乱振幅の因子化を示した [34]。

ホログラフィーとエンタングルメントエントロピー

中口は、宇賀神 (KITP)、小川 (理研) とともに、ホログラフィー対応において境界と因果的に無関係な重力側の領域が場の理論側でどう記述されるかを探るため、時間依存ヤヌスブラックホール時空においてエンタングルメントエントロピーの時間発展をホログラフィックに調べ、その増加速度が時空の変形パラメーターに依存するなどの結果を得た [35, 104]。

場の理論のエンタングルメントエントロピー

中口、西岡は、Banerjee (KIPMU) とともに、3次元において繰り込み群で単調減少する定常的な関数として円筒上のくりこまれたエンタングルメントエントロピーという量を提案し、自由スカラー場に対する質量摂動の場合に確かに定常的かつ繰り込み群で単調減少することを確認した [36]。

西岡は Technion 工科大学の Yarom と、重力アノマリーの存在する様々な次元の場の理論のエンタングルメントエントロピーを調べ、その一般座標変換の元での変換性を決定した [37]。

<受賞>

- [1] 立川裕二, New Horizons Prize in Physics, Breakthrough Prize Foundation, 2015年11月8日。

<報文>

(原著論文)

- [2] M. Endo, T. Moroi and M. M. Nojiri, “Footprints of Supersymmetry on Higgs Decay,” JHEP **1504**, 176 (2015) [arXiv:1502.03959 [hep-ph]].

- [3] M. Endo, T. Moroi, M. M. Nojiri and Y. Shoji, “Renormalization-Scale Uncertainty in the Decay Rate of False Vacuum,” JHEP **1601**, 031 (2016) [arXiv:1511.04860 [hep-ph]].
- [4] K. Hamaguchi and K. Ishikawa, “Prospects for Higgs- and Z-resonant Neutralino Dark Matter,” Phys. Rev. D **93**, no. 5, 055009 (2016) [arXiv:1510.05378 [hep-ph]].
- [5] K. Hamaguchi, S. P. Liew and M. Stoll, “How to decontaminate overlapping fat jets,” Phys. Rev. D **92**, no. 1, 015012 (2015) [arXiv:1505.02930 [hep-ph]].
- [6] K. J. Bae, H. Baer, H. Serce and Y. F. Zhang, “Leptogenesis scenarios for natural SUSY with mixed axion-higgsino dark matter,” JCAP **1601**, 012 (2016) [arXiv:1510.00724 [hep-ph]].
- [7] X. Lu, S. Shirai and T. Terada, “ATLAS Z Excess in Minimal Supersymmetric Standard Model,” JHEP **1509** (2015) 204 [arXiv:1506.07161 [hep-ph]].
- [8] S. P. Liew, A. Mariotti, K. Mawatari, K. Sakurai and M. Vereecken, “Z-peaked excess in goldstini scenarios,” Phys. Lett. B **750** (2015) 539 [arXiv:1506.08803 [hep-ph]].
- [9] S. P. Liew and S. Shirai, “Testing ATLAS Diboson Excess with Dark Matter Searches at LHC,” JHEP **1511** (2015) 191 [arXiv:1507.08273 [hep-ph]].
- [10] H. Ito, T. Moroi and Y. Takaesu, “Studying 750 GeV di-photon resonance at photon-photon collider,” Phys. Lett. B **756** (2016) 147 [arXiv:1601.01144 [hep-ph]].
- [11] S. Kanemura, T. Moroi and T. Tanabe, “Beam dump experiment at future electron-positron colliders,” Phys. Lett. B **751** (2015) 25 [arXiv:1507.02809 [hep-ph]].
- [12] K. Hamaguchi, T. Moroi and K. Nakayama, “AMS-02 Antiprotons from Annihilating or Decaying Dark Matter,” Phys. Lett. B **747**, 523 (2015) [arXiv:1504.05937 [hep-ph]].
- [13] M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi and Y. Takaesu, “Revisiting Big-Bang Nucleosynthesis Constraints on Dark-Matter Annihilation,” Phys. Lett. B **751** (2015) 246 [arXiv:1509.03665 [hep-ph]].
- [14] M. Kawasaki, K. Nakayama and T. Sekiguchi, “CMB Constraint on Dark Matter Annihilation after Planck 2015,” Phys. Lett. B **756**, 212 (2016) [arXiv:1512.08015 [astro-ph.CO]].
- [15] G. Mishima, R. Jinno and T. Kitahara, “Diquark bound states with a completely crossed ladder truncation,” Phys. Rev. D **91**, no. 7, 076011 (2015) [arXiv:1502.05415 [nucl-th]].
- [16] Y. Kiyo, G. Mishima and Y. Sumino, “Strong IR Cancellation in Heavy Quarkonium and Precise Top Mass Determination,” JHEP **1511**, 084 (2015) [arXiv:1506.06542 [hep-ph]].

- [17] Y. Kiyo, G. Mishima and Y. Sumino, “Determination of m_c and m_b from quarkonium 1S energy levels in perturbative QCD,” *Phys. Lett. B* **752**, 122 (2016) [arXiv:1510.07072 [hep-ph]].
- [18] Y. Ema, R. Jinno, K. Mukaida and K. Nakayama, “Gravitational Effects on Inflaton Decay,” *JCAP* **1505**, no. 05, 038 (2015) [arXiv:1502.02475 [hep-ph]].
- [19] Y. Ema, R. Jinno, K. Mukaida and K. Nakayama, “On adiabatic invariant in generalized Galileon theories,” *JCAP* **1510**, no. 10, 049 (2015) [arXiv:1505.04670 [gr-qc]].
- [20] Y. Ema, R. Jinno, K. Mukaida and K. Nakayama, “Particle Production after Inflation with Non-minimal Derivative Coupling to Gravity,” *JCAP* **1510**, no. 10, 020 (2015) [arXiv:1504.07119 [gr-qc]].
- [21] K. Nakayama and M. Takimoto, “Higgs inflation and suppression of axion isocurvature perturbation,” *Phys. Lett. B* **748**, 108 (2015) [arXiv:1505.02119 [hep-ph]].
- [22] R. Jinno, K. Nakayama and M. Takimoto, “Gravitational Waves from the First Order Phase Transition of the Higgs Field at High Energy Scales,” *Phys. Rev. D* **93**, no. 4, 045024 (2016) [arXiv:1510.02697 [hep-ph]].
- [23] Y. Ema, K. Nakayama and M. Takimoto, “Curvature Perturbation and Domain Wall Formation with Pseudo Scaling Scalar Dynamics,” *JCAP* **1602**, no. 02, 067 (2016) [arXiv:1508.06547 [gr-qc]].
- [24] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “Viable Chaotic Inflation as a Source of Neutrino Masses and Leptogenesis,” *Phys. Lett. B* **757**, 32 (2016) [arXiv:1601.00192 [hep-ph]].
- [25] S. V. Ketov and T. Terada, “Single-Superfield Helical-Phase Inflation,” *Phys. Lett. B* **752** (2016) 108 [arXiv:1509.00953 [hep-th]].
- [26] Y. Tachikawa and N. Watanabe, “On skein relations in class S theories,” *JHEP* **1506** (2015) 186 [arXiv:1504.00121 [hep-th]].
- [27] Y. Tachikawa, “A review of the T_N theory and its cousins,” *PTEP* **2015** (2015) no.11, 11B102 [arXiv:1504.01481 [hep-th]].
- [28] K. Ohmori, H. Shimizu, Y. Tachikawa and K. Yonekura, “6d $\mathcal{N} = (1, 0)$ theories on S^1/T^2 and class S theories: part II,” *JHEP* **1512**, 131 (2015) [arXiv:1508.00915 [hep-th]].
- [29] K. Ohmori and H. Shimizu, “ S^1/T^2 compactifications of 6d $\mathcal{N} = (1, 0)$ theories and brane webs,” *JHEP* **1603**, 024 (2016) [arXiv:1509.03195 [hep-th]].
- [30] T. Kawano and N. Matsumiya, “5D SYM on 3D Deformed Spheres,” *Nucl. Phys. B* **898** (2015) 456 [arXiv:1505.06565 [hep-th]].
- [31] S. Nakamura, “On the Jeffrey-Kirwan residue of BCD-instantons,” *PTEP* **2015**, no. 7, 073B02 (2015) [arXiv:1502.04188 [hep-th]].
- [32] R. D. Zhu and Y. Matsuo, “Yangian associated with 2D $N=1$ SCFT,” *PTEP* **2015**, no. 9, 093A01 (2015) [arXiv:1504.04150 [hep-th]].
- [33] M. Fukuda, S. Nakamura, Y. Matsuo and R. D. Zhu, “ SH^c realization of minimal model CFT: triality, poset and Burge condition,” *JHEP* **1511**, 168 (2015) [arXiv:1509.01000 [hep-th]].
- [34] K. Ohmori, “Worldsheet Geometries of Ambitwistor String,” *JHEP* **1506**, 075 (2015) [arXiv:1504.02675 [hep-th]].
- [35] Y. Nakaguchi, N. Ogawa and T. Ugajin, “Holographic Entanglement and Causal Shadow in Time-Dependent Janus Black Hole,” *JHEP* **1507**, 080 (2015) [arXiv:1412.8600 [hep-th]].
- [36] S. Banerjee, Y. Nakaguchi and T. Nishioka, “Renormalized Entanglement Entropy on Cylinder,” *JHEP* **1603**, 048 (2016) [arXiv:1508.00979 [hep-th]].
- [37] T. Nishioka and A. Yarom, “Anomalies and Entanglement Entropy,” *JHEP* **1603** (2016) 077 [arXiv:1509.04288 [hep-th]].
- (会議抄録)
- [38] T. Terada, “Toward Higgs inflation in the MSSM,” in Proceedings of the 2nd Toyama International Workshop on Higgs as a Probe of New Physics (HPNP2015), Toyama, Japan, 2015, eConf C15-02-11, arXiv:1504.06230 [hep-ph].
- [39] T. Terada, “Reinterpretation and Reheating of (SUSY) Starobinsky model,” accepted as PoS(LeptonPhoton2015)046.
- (学位論文)
- [40] 修士論文: 岡澤 太志, “4次元 BC 型 $\mathcal{N} = 2$ 超対称ゲージ理論のインスタントン”
- [41] 修士論文: R. D. Zhu, “W-algebra: its constructions and applications to Gauge/Gravity theory”
- [42] 博士論文: K. Ishikawa “Phenomenology of Bino-Higgsino Dark Matter”
- [43] 博士論文: R. Jinno, “Gravitational effects on inflaton decay at the onset of reheating”
- [44] 博士論文: G. Mishima, “Role of crossed ladder diagrams in the diquark Bethe-Salpeter equation”
- [45] 博士論文: S. Nakamura, “ SH^c Description of Minimal Models and Triality”
- [46] 博士論文: M. Stoll, “New methods for top quark identification and reconstruction at hadron colliders”

- [47] 博士論文: M. Takimoto, “Dynamics of Peccei-Quinn Field in the Early Universe”
 <学術講演>
 (国際会議)
 一般講演
- [48] K. J. Bae, “Leptogenesis scenarios for natural SUSY”, IBS-PNU Joint Workshop on Particle Physics, String Theory and Cosmology, Busan, Korea, 2015 年 12 月 2 日.
- [49] K. J. Bae, “Mixed Axion/Higgsino DM and Leptogenesis”, Beyond the Standard Model in Okinawa 2016, OIST, Okinawa, Japan, 2016 年 3 月 7 日.
- [50] M. Endo, “Footprints of Supersymmetry on Higgs Decay”, Asian Linear Collider Workshop, KEK, 2015 年 4 月 20 日.
- [51] Y. Ema, “Particle Production after Inflation with Non-minimal Derivative Coupling to Gravity,” COSMO-15, Warsaw, 2015 年 9 月 7 – 11 日.
- [52] Y. Ema, “Pseudo Scaling Scalar Dynamics,” Particle Cosmology and beyond 2015, Kanazawa, 2015 年 11 月 16 – 19 日.
- [53] H. Ito, “750 GeV Di-photon Resonance at Photon-Photon Collider,” KEK-PH 2016, Ibaraki, 2015 年 2 月.
- [54] R. Jinno, “Gravitational effects on inflaton decay,” COSMO-15, the 19th annual International Conference on Particle Physics and Cosmology, the University of Warsaw, 2015 年 9 月.
- [55] R. Jinno, “Gravitational effects on inflaton decay at the onset of reheating,” Beyond the Standard Model in Okinawa 2016, OIST, 2016 年 3 月.
- [56] Seng Pei Liew, “LHC “excesses”: Have we found SUSY?,” SUSY 2015 Conference, California, USA, 2015 年 8 月.
- [57] Seng Pei Liew, “On LHC “excesses,”” Kavli-IPMU-Durham-KIAS workshop, Tokyo, Japan, 2015 年 9 月.
- [58] G. Mishima, “Diquark bound states at far beyond ladder truncation,” Phenomenology 2015 Symposium, Pittsburgh, 2015 年 5 月.
- [59] G. Mishima, “Bottom quark mass from bottomonium spectrum,” International Workshop on Particle Physics and Cosmology, Sendai, 2015 年 11 月.
- [60] G. Mishima, “Bottom quark mass from bottomonium spectrum,” 3rd Belle II Theory Interface Platform (B2TiP) Workshop, Tsukuba, 2015 年 10 月.
- [61] Y. Shoji, “Higgs mixing in the NMSSM and Light Higgsinos,” 16th LHC Physics Monthly Meeting, KIAS, Korea, 2015 年 6 月 1 – 2 日.
- [62] Y. Shoji, “Fate of false vacua at one loop,” Scalars 2015, University of Warsaw, Poland, 2015 年 12 月 3 – 7 日.
- [63] T. Terada, “Reheating of SUSY Starobinsky model”, The 27th International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies, poster, 2015 年 8 月 17 – 22 日.
- [64] T. Terada, “Reinterpretation of the Starobinsky model”, The 27th International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies, 2015 年 8 月 21 日.
- [65] T. Terada, “Single-Superfield Helical-Phase Inflation”, COSMO 2015, 2015 年 9 月 9 日.
- [66] T. Terada, “ATLAS Z + MET Excess in the MSSM”, DESY Theory Workshop 2015: Physics at the LHC and beyond, 2015 年 10 月 1 日.
- [67] T. Terada, “Single-superfield realization of large-field inflation in supergravity”, New perspectives on cosmology, 2016 年 1 月 6 日.
- [68] H. Shimizu “6d $\mathcal{N} = (1, 0)$ theories on T^2 and class S theories” YITP Workshop Developments in String Theory and Quantum Field Theory, Kyoto, 2015 年 11 月 9 – 13 日.
- [69] H. Shimizu “ S^1 compactification of 6d SCFTs” The 10th Asian Winter School on Strings, Particles and Cosmology, Okinawa, 2016 年 1 月 6 – 16 日.
- 招待講演
- [70] M. Endo, “Footprints of Supersymmetry on Higgs Decay,” JPS-KPS Joint Symposium, Daejeon, 2015 年 4 月 24 日.
- [71] M. Endo, “Footprints of Supersymmetry on Higgs Decay,” 13th new Higgs working group meeting, Toyama, 2015 年 5 月 9 日.
- [72] M. Endo, “Lepton-flavor Universality,” B2TiP meeting, KEK, 2015 年 10 月 28 日.
- [73] K. Hamaguchi, “Prospects for Higgs- and Z-resonant neutralino dark matter,” Anticipating Discoveries: LHC14 and Beyond, MIAPP, Munich, Germany, 2015 年 7 月 15 日.
- [74] K. Hamaguchi, “Neutrinoless double beta decay and Leptogenesis,” Particle Cosmology and beyond 2015, 金沢, 2015 年 11 月 17 日
- [75] K. Hamaguchi, “Neutrinoless double beta decay and Leptogenesis,” IBS-PNU Joint Workshop on Particle Physics, String Theory and Cosmology, 釜山, 韓国, 2015 年 12 月 3 日.
- [76] K. Hamaguchi, “Diphoton Excess and Running Coupling Constant,” Beyond the Standard Model in Okinawa 2016, OIST, 2016 年 3 月 8 日.
- [77] T. Moroi, “Footprints of Supersymmetry on Higgs Decay,” PPC 2015, Deadwood, SD, U.S.A., 2015 年 6 月 29 日 – 7 月 3 日.
- [78] T. Moroi, “Looking for New Physics at the ILC,” International Workshop on Particle Physics and Cosmology, Sendai, Japan, 2015 年 9 月 14 – 18 日.

- [79] T. Moroi, “Beam-Dump Experiment at the ILC,” LCWS15, Whistler BC, Canada, 2015 年 11 月 2 – 6 日.
- [80] T. Moroi, “Beam-Dump Experiment at the ILC,” Particle Cosmology and beyond 2015, Kanazawa, Japan, 2015 年 11 月 16 – 19 日.
- [81] T. Moroi, “Renormalization-Scale Uncertainty in the Decay Rate of False Vacuum,” IBS-PNU Joint Workshop on Particle Physics, String Theory and Cosmology, Busan, Korea, 2015 年 12 月 2 – 5 日.
- [82] K. Nakayama, “Gravitational Particle Production after Inflation with Extended Gravity Models,” Everything about Gravity, LeCosPA, Taiwan, 2015 年 12 月 15 日.
- [83] Y. Tachikawa, “On fractional M5 branes and frozen singularities,” KIAS-YITP joint workshop, KIAS, Seoul, Korea, 2015 年 9 月 15 日.
- [84] Y. Tachikawa, “6d SCFTs and F-theory: a bottom-up perspective,” F-theory 20 conference, Caltech, California, USA, 2016 年 2 月 22 日.
- [85] Y. Matsuo, “ SH^c and W-algebras - level-rank duality, minimal models and poset”, Workshop “Quantum geometry, Duality and Matrix models”, Moscow, 2015 年 8 月 24 – 30 日.
- [86] Y. Matsuo, “Holomorphic field realization of SH^c and quantum geometry of quiver gauge theories”, Workshop “Higher Structures in String Theory and M-theory”, Tohoku University, 2016 年 3 月 7 – 11 日.
- [87] T. Nishioka, “Anomalies and entanglement entropy,” Strings 2015, ICTS-TIFR, India, 2015 年 6 月 25 日.
- [88] T. Nishioka, “Anomalies and entanglement entropy,” International Workshop on Strings, Black Holes and Quantum Information, Tohoku University, 2015 年 9 月 10 日.
- [89] T. Nishioka, “Comments on perturbation and regularization in entanglement entropy,” Joint Theoretical High Energy Theory Seminar, Newe Shalom, Israel, 2016 年 3 月 15 日.
- (国内会議)
- 一般講演
- [90] 江間 陽平, “Particle Production after Inflation with Non-minimal Derivative Coupling to Gravity,” 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪市立大学, 9 月.
- [91] 江間 陽平, “Fate of Electroweak Vacuum during Preheating,” 日本物理学会 2016 年春季大会, 東北学院大学, 3 月.
- [92] 三嶋 剛, “ダイクォーク束縛状態を記述するベータ・サルペーター方程式について,” 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪, 2015 年 9 月.
- [93] 中山 和則, “AMS-02 宇宙線反陽子と暗黒物質,” 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪市立大学, 2015 年 9 月 25 日.
- [94] 中山 和則, “Sneutrino chaotic inflation revisited,” 日本物理学会 第 71 回年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 21 日.
- [95] 庄司 裕太郎, “Next-to-MSSM (review),” Summer camp on ILC accelerator and physics / detectors 2015, 群馬, 2015 年 7 月.
- [96] 庄司 裕太郎, “真空崩壊確率の完全な 1-loop order での計算とその応用について,” 素粒子物理学の進展 2015, 京都大学基礎物理学研究所, 2015 年 9 月.
- [97] 庄司 裕太郎, “Fate of false vacuum at one-loop,” 第 15 回新ヒッグス勉強会, 富山大学, 2015 年 10 月.
- [98] 庄司 裕太郎, “Renormalization-Scale Uncertainty in the Decay Rate of False Vacuum,” KEK-PH 2016, KEK, 2016 年 2 月.
- [99] 庄司 裕太郎, “Renormalization-Scale Uncertainty in the Decay Rate of False Vacuum,” Beyond the Standard Model in Okinawa 2016, OIST, 2016 年 3 月.
- [100] 庄司 裕太郎, “Renormalization-Scale Uncertainty in the Decay Rate of False Vacuum,” 松江素粒子物理学研究会, 島根大学, 2016 年 3 月.
- [101] 瀧本 真裕, “Suppression of axion isocurvature perturbation in Higgs inflation,” 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪市立大学, 2015 年 9 月.
- [102] 清水 浩之, “6d $\mathcal{N} = (1, 0)$ theories on T^2 and class S theories,” 日露 Working Seminar, 大阪市立大, 2015 年 7 月 9 – 10 日.
- [103] 仲村 智, “Jeffrey-Kirwan 留数を用いた Sp/SO 群におけるインスタント分配関数の解析,” 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪市立大学, 2015 年 9 月.
- [104] 中口 悠輝, “時間依存ヤヌスブラックホールにおけるエンタングルメント,” 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪市立大学, 2015 年 9 月 25 日.
- 招待講演
- [105] 遠藤 基, “Overview of Flavor Physics,” 日本物理学会 シンポジウム「新発見に迫るフレーバー物理」, 大阪市立大, 2015 年 9 月 27 日.
- [106] 濱口 幸一, “ダブルベータ崩壊への期待,” 「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」, 2015 年領域研究会, 神戸大学, 2015 年 5 月 16 日.
- [107] 濱口 幸一, “ダブルベータ崩壊とレプトジェネシスと Higgs- and Z-resonant neutralino DM,” 基礎研究会 素粒子物理学の進展 2015, 基礎物理学研究所, 2015 年 9 月 18 日.
- [108] 濱口 幸一, “SUSY 今後の展望 やっぱり SUSY は軽い,” 新学術領域研究会 テラスケール 2015 先端加速器 LHC が切り拓くテラスケールの素粒子物理学, 東京工業大学大岡山キャンパス, 2015 年 12 月 22 日.
- [109] 濱口 幸一, “レプトジェネシスおよび $0\nu 2\beta$ 発見時の右巻きニュートリノへの質量制限などについて,” 第一回 A 班主催若手研究会, 大阪大学, 2016 年 2 月 23 日.
- [110] 諸井 健夫, “標準模型を超える物理とエネルギーフロンティア実験,” 日本物理学会, 2016 年 3 月 19 – 22 日.

- [111] 中山 和則, “AMS-02 による宇宙線反陽子観測と暗黒物質,” 「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」2015 年領域研究会, 神戸大学, 2015 年 5 月 16 日.
- [112] 西岡 辰磨, “ゲージ/重力対応とエンタングルメント,” 物理学科談話会, 名古屋大学, 2015 年 5 月 13 日.
- [113] 西岡 辰磨, “Aspects of Renormalized Entanglement Entropy,” String Theory in Greater Tokyo, 中央大学, 2015 年 10 月 15 日.

2 原子核・素粒子実験

2.1 原子核実験グループ

【早野・櫻井・Wimmer】

原子核実験グループは、早野研、櫻井研、Wimmer 研の三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。それぞれの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や大阪大学核物理研究センターにおいて 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または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。特に近年は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。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)で得られる高強度な不安定核ビームを利用している。

ウィマー研究室では、直接反応によって原子核を構成する核子の一粒軌道の波動関数を求めることで、エキゾチック原子核の性質を研究している。実験は、アメリカ超電導サイクロトロン研究所(NSCL)、カナダ国立素粒子原子核研究所(TRIUMF)、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)で行っている。

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り、JINR研究所のV.I. Korobovらによる三体系量子電磁力学(QED)計算と比較することによって、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。遷移ごとに粒子の質量からの影響や様々な量子電磁力学の影響、ヘリウム原子核が有限の大きさをもつことによる影響が異なるため、多くの遷移で精密分光実験を行うことが重要である。2015年度、早野研究室とマックスプランク量子光学研究所らの実験グループは温度 $T \sim 1.5$ Kに冷却された反陽子ヘリウム原子に対して波長417.8 nmと372.6 nmの逆方向に進行する2つのレーザーを用いて二光子遷移を励起する実験を行った。過去に行った測定の中で最も精密な測定であり、2016年度にAC Stark効果、パワーブロードニング、原子同士の衝突による遷移周波数のシフトといった系統的な不確かさを測定することで、質量比を $< 3 \times 10^{-10}$ の精度で決定できる見込みである。さらにグループは、標的圧力 $p \sim 1$ mb、温度 $T \sim 1.5$ Kで初めて反陽子ヘリウム原子の4つの状態 $(n, l) = (35, 33), (37, 35), (38, 35)$ および $(40, 36)$ の占有率の時間推移を測定し、標的密度が400倍変化しても、 $(n, l) = (38, 35)$ 以外の状態は寿命がほとんど変化しない事を確認した。

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。この吸収断面積は反陽子と原子核との相互作用を調べるため様々な運動量領域で測定されている。入射エネルギーが最も低い例としては、2012年に5.3 MeV/cという超低速の反陽子を用いて実験を行った。炭素、白金、パラジウム標的に5.3 MeV/cの反陽子を入射し、原子核中で消滅した際に放出されるパイ中間子を検出する事で、その運動量領域において初めて反陽子の消滅イベントを確認した。

2015年には、100 MeV/cの反陽子を用いた実験を行った。この領域では反陽子とアイソスピン対称性を持つ、反中性子の吸収断面積がいくつかの原子核中において、これまでの実験、理論から予想される値よりも大きくなる事が報告されている。反陽子と反中性子のデータを系統的に比べることでこの振る舞い、強い相互作用の仕組みをより深く理解できると期待されているが、反中性子のデータに比べ反陽子のデータが少ないのが現状である。2015年の実験では、標的として作りやすく、かつ反中性子の比較するデータが存在する炭素を標的とした実験を行った。

実験はCERNの反陽子減速器を用いて行われ、特にビームの形状や強度について注意深く調整が行われた。反陽子の標的中の消滅イベントは時間的に

2. 原子核・素粒子実験

特定されるため、本実験ではキッカーのタイミングを調節し従来の 200 ns の幅のビームを 60 ns まで時間的に短くした。また検出器の飽和を避けるため、通常の single extraction ではなく multiple extraction を用い、1 パルスごとに含まれる反陽子の数を 1×10^5 程度まで減らした。実験中にはビームダンプ付近にチェレンコフ検出器を置きビームの相対強度を測定したが、検出器のビーム強度に対する得られる信号強度の線形性をより高めるため、ホットダイオードで読み出すチェレンコフ検出器を開発した。ラジエータとホットダイオードの種類について実験前に試験が行われ、ラジエータとしては光量が試験した中でもっとも多かったフッ化鉛を、ホットダイオードについては nuclear counter effect を減らすためにアバランシェホットダイオードを用いた。

上記の条件のもと 2 週間実験を行い、無事にデータを取得した。現在データを解析中であり、結果は博士論文としてまとめられる予定である。

2.1.2 陽子ビームを用いたパイ中間子原子の分光実験 (早野研究室)

有限密度におけるカイラル対称性の回復は近年のハドロン物理学の重要な研究課題の一つである。我々はこの課題に対して、錫や鉛などの重い原子核のパイ中間子原子の分光実験を行うことによって取り組んでいる。パイ中間子原子の $1s$ や $2s$ などの深い束縛状態の束縛エネルギーは有限密度におけるカイラル対称性のオーダーパラメーターの大きさと関連していることが知られている。現在までにドイツの GSI や理研において (d , ^3He) 反応を用いた実験が行われ、原子核媒質中においてカイラル対称性が回復していることが示されてきた。

パイ中間子原子の研究をさらに進めるために、大阪大学核物理研究センターにおいて、(p , ^2He) 反応を用いた分光実験を新たに計画している。この実験では二つの陽子を Grand-Raiden スペクトロメーターで測定することにより、パイ中間子原子の束縛エネルギーを測定する。また、近年新設された GRAF ビームラインを用いて大強度の一次ビームを用いる。高分解能のスペクトロメーターである Grand-Raiden と一次ビームのエネルギー広がりの影響を小さくする分散整合光学系を用いることにより、従来の実験よりも測定の分解能を向上させることを目指す。

2015 年度は 1 日間のテスト実験を行い、実験の実現可能性について研究を行った。新設されたビームラインでのビーム輸送のテストを行い、十分な効率でビーム輸送を行うことができることを確認した。また、 $^{12}\text{C}(p, ^2\text{He})^{11}\text{B}$ 反応の測定を行い、 ^{11}B の基底状態への遷移に対応するピークを観測することができた。これは Grand-Raiden スペクトロメーターで ($p, ^2\text{He}$) 反応を測定した最初の例である。このデータを元に今後は ($p, ^2\text{He}$) 反応のバックグラウンドの性質などを解析する予定である。

2.1.3 インビームガンマ線分光による核構造研究 (櫻井研究室)

SEASTAR 国際共同研究

我々は、RIBF で得られる高強度不安定核を用いたインビーム γ 線核分光を通じて、陽子・中性子比率が安定核とは極端に異なる原子核の構造の異常性を研究している。これまで 2014 年 5 月と 2015 年 5 月と二回にわたり、極めて中性子過剰な原子核の励起エネルギーを体系的に測定を行う SEASTAR 国際共同実験 (Shell Evolution And Search for Two-plus energies At RIBF) を主導してきた。励起状態を効率的に生成し、かつビーム重心系での γ 線エネルギーに精度よく再構成するため、厚い液体水素標的と反跳陽子の軌跡を測定する TPC を組み合わせて核反応が起きた位置を再構成する MINOS 検出システムと、高検出効率で脱励起 γ 線を測定する NaI(Tl) シンチレーターアレイ DALI2 という二つの検出器を用いた。これまでに、中性子過剰な Cr と Fe の原子核において強く変形現象が発現していることを結論付けた [36]。また、既存の不安定核の中で最も中性子過剰な二重魔法数核である ^{78}Ni の励起状態の解析をすすめ、理論計算との比較からその閉核構造を議論している [80, 84]。

逆転の島の一粒子構造

$Z = 10-12$, $N = 20-22$ 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 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一粒子軌道を占有する配位として解釈されており、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 や Ne 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 RIBF においてクーロンおよび核力分解反応の断面積測定、およびインビームガンマ線核分光による励起準位構造を調べる実験を行った。

中性子ドリップライン近傍に位置し「逆転の島」に属する ^{31}Ne は大きく変形した核であり、同時に一つ中性子が芯の周りに広く分布する「ハロー構造」を持っていることが観測されてきた。一方で ^{27}Ne は「逆転の島」の外に位置しており、その中間に位置する ^{29}Ne では中性子が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と「逆転の島」を特徴付ける配位とが競合すると予想されてきた。我々は中性子を核力とクーロン力という異なる感度を持つ力で分離し、その分離反応断面積と分離破砕片の運動量分布の測定から ^{29}Ne の基底状態の中性子配位を解明した。研究の結果、 ^{29}Ne の基底状態は「逆転の島」を特徴付ける中性子配位であり、ハロー構造を持つ核種と類似の性質を示していることを明らかにした [41]。

近年「逆転の島」領域よりもさらに中性子過剰な ^{36}Mg や ^{38}Mg においても大きな変形が測定され、 ^{42}Si を中心とする魔法数 $N = 28$ の消失した領域と「逆転の島」領域が接続し、一つの大きな変形核領域を形成していることが実験・理論の両面から議論されている。我々は中性子配位に敏感な一中性子ノックアウト反応によって ^{36}Mg から ^{35}Mg を生成することで、この領域の変形のメカニズムと中性子配位の関係を明らかにする実験を行った。実験結果の解析により複数の γ 線のエネルギーと放出断面積を導出し、ガンマ線同時計数解析によって ^{35}Mg の励起準位の構造を実験的に推定した。さらに、 ^{35}Mg 残留核の運動量分布の解析により、価中性子の一部がp軌道を占有していることを明らかにした。これらの結果を反対称化分子動力学法および独自に行った殻模型計算の結果と比較し、一粒子軌道準位について議論した [79, 85]。

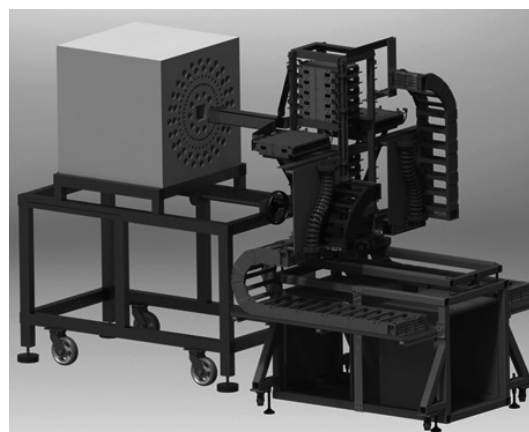


図 2.1.1: BRIKEN アレイ

2.1.4 不変質量法による中性子過剰核のクラスター構造研究 (櫻井研究室)

原子核を構成する陽子と中性子が幾つかまとまって一つの構成要素となり、核全体がその集合体となっている構造をクラスター構造と呼ぶ。例えば ^{12}C には三つの α 粒子がガス状にゆるく束縛したクラスター構造が存在し(ホイル状態)、 α 粒子三つが合成して炭素より重い原子核を生成する過程において重要な役割を果たすことが知られている。一方で中性子過剰核では、余剰中性子が加わることによって系全体が幾何学的構造を持ち、ホイル状態のようなガス状とは異なったクラスター構造が予想されている。 ^{16}C は ^{12}C に4つの余剰中性子が加わった系として、三つの α 粒子が直鎖状や三角形を形作ったクラスター励起準位を持つとされる。

この中性子過剰な ^{16}C のクラスター励起準位の探索するために、我々は2013年4月に理化学研究所RIBFで実験を行った。超伝導RIビーム分離生成装置(BigRIPS)から供給される核子あたり200 MeVの ^{16}C 二次ビームを液体 ^4He 標的に入射して、 ^{16}C を α 非弾性散乱により励起した。SAMURAIスペクトロメータで全ての崩壊片の四元運動量を測定し、不変質量法により励起準位を再構成した。また、崩壊片からの脱励起 γ 線のエネルギーも同時測定した。現在、様々な崩壊チャンネルのうち $^{16}\text{C}^* \rightarrow ^{12}\text{Be} + ^4\text{He} (+\gamma)$ と $^{16}\text{C}^* \rightarrow ^{10}\text{Be} + ^6\text{He}$ という崩壊チャンネルから励起エネルギースペクトルを得て、幾何構造を持つクラスター準位の候補となりうる励起準位のピークを同定した [120, 81, 117]。

2.1.5 検出器開発 (櫻井研究室)

BRIKEN 国際共同研究

BRIKENは、理化学研究所における β 遅発中性子放出確率(P_n)の測定を目的とした国際共同研究

である。現在、2016年秋に予定されている実験に向けて検出器の開発と実験準備を行っている。本年度は、 P_n 測定実験に用いる ^3He 中性子検出器がアメリカ・スペインからそれぞれ輸入され、動作確認を行った。また、 β 遅発中性子を減速させるために用いるポリエチレンマトリックスは中国で製造した。全体で400 kgwの重量を持つアレイを支える土台は日本グループが設計・製作し、現在アレイの建設作業を行っている。これら建設作業と並行して、 P_n 測定実験において不安定核の埋め込み位置測定および β 線測定に用いるシリコン検出器アレイAIDA (Advanced Implantation Detector Array)のテスト実験を実施し、実際の実験状況で β 崩壊曲線から β 崩壊寿命の導出に成功した。

波形識別型粒子検出器 NiGIRI の開発

電荷を持たない粒子である中性子と γ 線(光子)は、磁場によりその軌道を曲げることが出来ないため、中性子と光子の識別のためには飛行時間法が主に利用される。しかし、エネルギーの高い中性子は γ 線と十分な時間差がないため、飛行時間法では区別できない。そこで我々は、エネルギー損失により信号の減衰時定数が異なる有機シンチレーターを用いて波形解析による粒子識別を可能にした新しい検出器NiGIRI (Neutron, ion and Gamma-ray Identification for Radioactive Isotope beam)の開発を行っている。本年度は、粒子識別能力の評価のため、 ^{252}Cf 線源から放出される中性子および γ 線を用いて波形解析による粒子識別性能の評価を行った。その結果、エネルギー損失の大きな領域で2種の粒子を識別することに成功した [119]。

荷電粒子検出器 NINJA

理化学研究所RIBFのSAMURAIスペクトロメータでは、反応で放出された核子と残留核の同時測定を行うことで粒子崩壊閾値よりも高い励起状態にあ

る原子核の構造研究を行っている。SAMURAIにおいて中性子と残留核の同時測定を行う場合には、残留核と陽子の磁気剛性の差が大きいため、大気中に設置された焦点面検出器では崩壊陽子を測定することができなかった。そこで我々は双極子磁石の内部で陽子検出を行うために高磁場・真空中で動作する荷電粒子検出器 NINJA を新規に開発した。NINJA はプラスチックシンチレータのアレイであり、磁場中での使用のために MPPC を用いて読み出している。2015 年 11 月に行われたテスト実験により、NINJA は双極子磁石の内部の陽子検出に成功し、さらに陽子とその他の軽い荷電粒子を弁別できる分解能があることを確認した [118]。

2.1.6 直接反応を用いたエキゾチック核の核分光 (ウィマー研究室)

エキゾチック原子核の構造は、よく知られている安定核のものとは大きく異なることがこれまでの実験および理論研究から明らかになってきている。我々のグループは、直接反応を用いた中性子過剰核の核分光測定を進めている。直接反応は原子核の一粒子構造を知るとも良い手法であり、その波動関数を実験的に得ることができる。この手法により、我々は変形共存や新魔法数出現のメカニズムを明らかにすべく研究を行っている。

アイソスピン -1 核 ^{70}Kr の核分光

極端に陽子過剰な原子核は、原子核のアイソスピン対称性を研究する良い対象である。アイソスピンを保存しない相互作用は、陽子数と中性子数を入れ替えた原子核間で異なる構造を示すが、このような研究はこれまで軽い原子核に限られてきた。我々は、理化学研究所の RIBF において、 ^{70}Kr の構造をクーロン励起および核子ノックアウト反応によって研究した。この原子核はこれまで全く励起準位が知られていなかったが、我々の研究によって 3 つの新たな励起準位を発見した。理論計算との比較から、陽子過剰核 ($N < Z$) において、クーロン相互作用とアイソスピン対称性を破る核力要素が核構造を決める主要な役割を果たすことが明らかになった。

中性子数 60 核に見られる急激な形状変化

中性子数 60 の Sr, Zr, Mo 同位体に見られる原子核の形状変化は、原子核の基底準位における変形遷移現象のなかでも最も急激なものとして知られている。この変形の変化に潜む波動関数の振る舞いを研究するためには、基底準位における一粒子軌道構造の測定が待ち望まれている。我々は、2013 年と 2014 年の夏にカナダ国立素粒子原子核研究所 (TRIUMF) において、 (d, p) 核子移行反応を用いた一粒子軌道エネルギー測定とその遷移率測定に成功した。この研究を

さらに進めるため、現在三重水素標的を用いた二核子移行反応の実験研究を計画している。二核子移行反応は、特に 0^+ 励起準位を選択的に励起することができ、変形遷移現象の性質を理解する鍵となる。この反応を用いた初めての実験として、 $t(^{94}\text{Sr}, p)^{96}\text{Sr}$ 反応測定を 2016 年夏に実施する予定である。

中性子数 28 核の三重変形共存

一つの原子核において 3 つの異なる形が共存する現象を変形共存と呼ぶ。たとえば、 ^{44}S 核では低励起エネルギーに 3 つの 0^+ 準位が存在し、それぞれ球形、プロレート変形 (ラグビーボール型)、オブレート変形 (ディスク型) をしていることが予想されている。それぞれの変形の波動関数を知るためには、一粒子準位構造の測定が有効である。我々は 2015 年 10 月にアメリカ国立超伝導サイクロトロン研究所 (NSCL) において、 ^{44}S の基底状態の波動関数を一核子ノックアウト反応によって測定する実験を行った。この測定によって、 ^{44}S の基底準位における $f_{7/2}$ 軌道と $p_{3/2}$ 軌道の混合率を導出し、3 つの変形の共存と混合率を求めることができる。

中性子数 32 の魔法数

最近、中性子過剰核において中性子数 32 が魔法数的な性質を持つことが発見された。我々は、中性子数 32 を持つ ^{52}Ca において、魔法数の性質を調べる二つの相補的な実験を計画している。まずは、その集団運動の性質をクーロン励起による遷移強度測定によっておこなう。さらに、基底準位の一粒子軌道の占有率を、一中性子、一陽子ノックアウト反応から導出する。この 2 つの相補的な測定により ^{52}Ca が持つ魔法数的な性質をより詳細に研究することができる。最新の殻模型計算との比較により、この二重魔法数核の微視的構造を明らかにすることができる。このインビームガンマ線分光法を用いた実験計画は、2014 年の RIBF の実験審議委員会によって承認され、近いうちに理研 RIBF におけるインビーム γ 線核分光実験を実施する予定である。

<受賞>

- [1] 櫻井博儀、仁科記念賞、公益財団法人 仁科記念財団、2015 年 12 月 7 日。

<報文>

(原著論文)

- [2] PHENIX collaboration: Heavy-quark production and elliptic flow in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$ GeV, Phys. Rev. C **91**, 044907 (2015).
- [3] PHENIX collaboration: Measurement of Long-Range Angular Correlation and Quadrupole Anisotropy of Pions and (Anti) Protons in Central d + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, Phys. Rev. Lett. **114**, 192301 (2015).

- [4] Bronson, F *et al.*: Design, development, and initial operation of BabyScan: An in-vivo counter for children around Fukushima, Nucl. Instrum. Methods A **784**, 610 (2015).
- [5] Hashimoto, T *et al.*: Search for the deeply bound K^-pp state from the semi-inclusive forward-neutron spectrum in the in-flight K^- reaction on helium-3, Prog. Theo. Expr. Phys. **6**, 061D01 (2015).
- [6] PHENIX collaboration: Centrality dependence of low-momentum direct-photon production in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, Phys. Rev. C **91**, 064904 (2015).
- [7] Sato, M *et al.*: Liquid He-3 target for an experimental search for nuclear anti-kaon bound states in J-PARC, J. Radioanalytical and Nucl. Chemit. **305**, 883 (2015).
- [8] PHENIX collaboration: Systematic study of charged-pion and kaon femtoscopy in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, Phys. Rev. C **92**, 034914 (2015).
- [9] PHENIX collaboration: Systematic study of azimuthal anisotropy in Cu + Cu and Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$ and 200 GeV, Phys. Rev. C **92**, 034913 (2015).
- [10] PHENIX collaboration: Measurements of Elliptic and Triangular Flow in High-Multiplicity He-3 + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, Phys. Rev. Lett. **115**, 142301 (2015).
- [11] Hayano, R *et al.*: Whole-body counter surveys of over 2700 babies and small children in and around Fukushima Prefecture 33 to 49 months after the Fukushima Daiichi NPP accident, Proc. Japan Acad. Ser B **91**, 440 (2015).
- [12] PHENIX collaboration: ϕ meson production in d + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, Phys. Rev. C **91**, 044909 (2015).
- [13] Akiyama, J *et al.*: Minimal Internal Radiation Exposure in Residents Living South of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster, PLOS ONE **10**, e0140482 (2015).
- [14] Nomura S *et al.*: Dependence of radiation dose on the behavioral patterns among school children: a retrospective analysis 18 to 20 months following the 2011 Fukushima nuclear incident in Japan, J. Radiation Research **57**, 1 (2016).
- [15] PHENIX collaboration: Inclusive cross section and double-helicity asymmetry for π^0 production at midrapidity in p + p collisions at $\sqrt{s} = 510$ GeV, Phys. Rev. D **93**, 011501 (2016).
- [16] PHENIX collaboration: Dielectron production in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, Phys. Rev. C **93**, 014904 (2016).
- [17] PHENIX collaboration: Measurement of higher cumulants of net-charge multiplicity distributions in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ to 200 GeV, Phys. Rev. C **93**, 011901 (2016).
- [18] PHENIX collaboration: Transverse energy production and charged-particle multiplicity at midrapidity in various systems from $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ to 200 GeV, Phys. Rev. C **93**, 024904 (2016).
- [19] PHENIX collaboration: ϕ meson production in the forward/backward rapidity region in Cu + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, Phys. Rev. C **93**, 024904 (2016).
- [20] PHENIX collaboration: Scaling properties of fractional momentum loss of high- p_T hadrons in nucleus-nucleus collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ from 62.4 GeV to 2.76 TeV, Phys. Rev. C **93**, 024911 (2016).
- [21] Adachi, N *et al.*: Measurement and comparison of individual external doses of high-school students living in Japan, France, Poland and Belarus-the ‘D-shuttle’ project-, J. Radiological Protection **36**, 49 (2016).
- [22] PHENIX collaboration: Forward J/ψ production in U + U collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 193$ GeV, Phys. Rev. C **93**, 034903 (2016).
- [23] PHENIX collaboration: Single electron yields from semileptonic charm and bottom hadron decays in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, Phys. Rev. C **93**, 034904 (2016).
- [24] A. Corsi *et al.*: “Neutron-driven collectivity in light tin isotopes: Proton inelastic scattering from ^{104}Sn ”, Phys. Lett. B **743**, 451 (2015).
- [25] Y. G. Ma *et al.*: “Different mechanism of two-proton emission from proton-rich nuclei ^{23}Al and ^{22}Mg ”, Phys. Lett. B **743**, 306 (2015).
- [26] G. Lorusso *et al.*: β -Decay Half-Lives of 110 Neutron-Rich Nuclei across the $N = 82$ Shell Gap: Implications for the Mechanism and Universality of the Astrophysical r Process”, Phys. Rev. Lett. **114**, 192501 (2015).
- [27] J. Taprogge *et al.*: “ β decay of ^{129}Cd and excited states in ^{129}In ”, Phys. Rev. C **91**, 054324 (2015).
- [28] Zs. Vajta *et al.*: “ γ -ray spectroscopy of ^{19}C via the single-neutron knock-out reaction”, Phys. Rev. C **91**, 064315 (2015).
- [29] D. Steppenbeck *et al.*: “Low-Lying Structure of ^{50}Ar and the $N = 32$ Subshell Closure”, Phys. Rev. Lett. **114**, 252501 (2015).
- [30] A. Etilé *et al.*: “Low-lying intruder and tensor-driven structures in ^{82}As revealed by β decay at a new movable-tape-based experimental setup”, Phys. Rev. C **91**, 064317 (2015).
- [31] K. Li *et al.*: “Relativistic Coulomb excitation in ^{32}Mg near 200 MeV/nucleon with a thick target”, Phys. Rev. C **92**, 014608 (2015).
- [32] R. Lozeva *et al.*: “New decay scheme of the $^{136}_{51}\text{Sb}^{85}$ 6^- isomer”, Phys. Rev. C **92**, 024304 (2015).

- [33] A. Matta *et al.*: “New findings on structure and production of ^{10}He from ^{11}Li with the (d, ^3He) reaction”, *Phys. Rev. C* **92**, 041302 (2015).
- [34] P. Lee *et al.*: “ β -delayed γ -ray spectroscopy of non-yrast states in ^{138}Te near the neutron drip line”, *Phys. Rev. C* **92**, 044320 (2015).
- [35] Y. X. Watanabe *et al.*: “Pathway for the Production of Neutron-Rich Isotopes around the $N = 126$ Shell Closure”, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 172503 (2015).
- [36] C. Santamaria *et al.*: “Extension of the $N = 40$ Island of Inversion towards $N = 50$: Spectroscopy of ^{66}Cr , $^{70,72}\text{Fe}$ ”, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 192501 (2015).
- [37] P.-A. Soderstrom *et al.*: “Two-hole structure outside ^{78}Ni : Existence of a μs isomer of ^{76}Co and β decay into ^{76}Ni ”, *Phys. Rev. C* **92**, 051305 (2015).
- [38] F. Browne *et al.*: “Lifetime measurements of the first 2^+ states in $^{104,106}\text{Zr}$: Evolution of ground-state deformations”, *Phys. Lett. B* **750**, 448 (2015).
- [39] P. Morfouace *et al.*: “Evolution of single-particle strength in neutron-rich ^{71}Cu ”, *Phys. Lett. B* **751**, 306 (2015).
- [40] J. Litzinger *et al.*: “Transition probabilities in neutron-rich $^{84,86}\text{Se}$ ”, *Phys. Rev. C* **92**, 064322 (2015).
- [41] N. Kobayashi *et al.*: “One-neutron removal from ^{29}Ne : Defining the lower limits of the island of inversion”, *Phys. Rev. C* **93**, 014613 (2016).
- [42] R. Lozeva *et al.*: “New isomer found in $^{140}_{51}\text{Sb}^{89}$: pphericity and shell evolution between $N = 82$ and $N = 90$ ”, *Phys. Rev. C* **93**, 014316 (2016).
- [43] Z. Patel *et al.*: “Decay spectroscopy of ^{160}Sm : The lightest four-quasiparticle K isomer”, *Phys. Lett. B* **753**, 182 (2016).
- [44] D. Suzuki *et al.*: “Second 0^+ state of unbound ^{12}O : Scaling of mirror asymmetry”, *Phys. Rev. C* **93**, 024316 (2016).
- [45] Y. Shiga *et al.*: “Investigating nuclear shell structure in the vicinity of ^{78}Ni : Low-lying excited states in the neutron-rich isotopes $^{80,82}\text{Zn}$ ”, *Phys. Rev. C* **93**, 024320 (2016).
- [46] H. Wang *et al.*: “Spallation reaction study for fission products in nuclear waste: Cross section measurements for ^{137}Cs and ^{90}Sr on proton and deuteron”, *Phys. Lett. B* **754**, 104 (2016).
- [47] A. I. Morales *et al.*: “Low-lying excitations in ^{72}Ni ”, *Phys. Rev. C* **93**, 034328 (2016).
- [48] C. J. Chiara *et al.*: “Identification of deformed intruder states in semi-magic ^{70}Ni ”, *Phys. Rev. C* **91**, 044309 (2015).
- [49] K. Whitmore *et al.*: “Magnetic response of the halo nucleus ^{19}C studied via lifetime measurement”, *Phys. Rev. C* **91**, 041303 (2015).
- [50] J. Diriken *et al.*: “Experimental study of the $^{66}\text{Ni}(\text{d,p})^{67}\text{Ni}$ one-neutron transfer reaction”, *Phys. Rev. C* **91**, 054321 (2015).
- [51] L. P. Gaffney *et al.*: “Collectivity in the light radon nuclei measured directly via Coulomb excitation”, *Phys. Rev. C* **91**, 064313 (2015).
- [52] S. Noji *et al.*: “Gamow-Teller transitions to ^{45}Ca via the $^{45}\text{Sc}(\text{t}, ^3\text{He}+\gamma)$ reaction at MeV/u and its application to stellar electron-capture rates”, *Phys. Rev. C* **92**, 024312 (2015).
- [53] T. Braunroth *et al.*: “Reduced transition strengths of low-lying yrast states in chromium isotopes in the vicinity of $N=40$ ”, *Phys. Rev. C* **92**, 034306 (2015).
- [54] Z. Meisel *et al.*: “Mass Measurement of ^{56}Sc Reveals a Small $A = 56$ Odd-Even Mass Staggering, Implying a Cooler Accreted Neutron Star Crust”, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 162501 (2015).
- [55] N. Kesteloot *et al.*: “Deformation and mixing of co-existing shapes in the neutron-deficient polonium isotopes”, *Phys. Rev. C* **92**, 054301 (2015).
- [56] L. P. Gaffney *et al.*: “Low-energy Coulomb excitation of ^{62}Fe and ^{62}Mn following in-beam decay of ^{62}Mn ”, *Eur. Phys. Jour. A* **51**, 16 (2015).
- [57] A. Lepailleur, K. Wimmer *et al.*: “Spectroscopy of ^{28}Na : shell evolution toward the drip line”, *Phys. Rev. C* **92**, 054309 (2015).
- [58] A. Parikh *et al.*: “Spectroscopy of ^{19}Ne for the thermonuclear $^{15}\text{O}(\alpha,\gamma)^{19}\text{Ne}$ and $^{18}\text{F}(\text{p},\alpha)^{15}\text{O}$ reaction rates”, *Phys. Rev. C* **92**, 055806 (2015).
- [59] D. Smalley *et al.*: “Lifetime measurements of ^{17}C excited states and three-body and continuum effects”, *Phys. Rev. C* **92**, 064314 (2015).
- [60] A. Kankainen *et al.*: “Angle-integrated measurements of the $^{26}\text{Al}(\text{d}, \text{n})^{27}\text{Si}$ reaction cross section: a probe of spectroscopic factors and astrophysical resonance strengths”, *Eur. Phys. Jour. A* **52**, 6 (2016).
- [61] G. Cerizza *et al.*: “Structure of ^{107}Sn studied through single-neutron knockout reactions”, *Phys. Rev. C* **93**, 021601(R) (2016).
- [62] S. A. Milne *et al.*: “Mirrored one-nucleon knockout reactions to the $T_z = \pm 3/2$ $A = 53$ mirror nuclei”, *Phys. Rev. C* **93**, 024318 (2016).
- [63] A. Gade *et al.*: “One-neutron pickup into ^{49}Ca : Bound neutron $g_{9/2}$ spectroscopic strength at $N = 29$ ”, *Phys. Rev. C* **93**, 031601(R) (2016).
- [64] Z. Meisel *et al.*: “Time-of-flight mass measurements of neutron-rich chromium isotopes up to $N = 40$ and implications for the accreted neutron star crust”, *Phys. Rev. C* **93**, 035805 (2016).
- [65] K. Kolos *et al.*: “Direct Lifetime Measurements of the Excited States in ^{72}Ni ”, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 122502 (2016).

- [66] H. L. Crawford *et al.*: “Rotational Band Structure in ^{32}Mg ”, Phys. Rev. C **93**, 031303(R) (2016).
- [67] A. Mutschler *et al.*: “Spectroscopy of ^{35}P using the one-proton knockout reaction”, Phys. Rev. C **93**, 034333 (2016).
- (会議抄録)
- [68] Hori, M *et al.*: Method for laser spectroscopy of metastable pionic helium atoms, Hyperfine Int. **233**, 83 (2015).
- [69] Fujioka H *et al.*: Spectroscopy of eta'-nucleus bound states at GSI and FAIR - very preliminary results and future prospects, Hyperfine Int. **234**, 33 (2015).
- [70] Aghai-Khozani H *et al.*: First measurement of the antiproton-nucleus annihilation cross section at 125 keV, Hyperfine Int. **234**, 85 (2015).
- [71] V. Werner *et al.*: “Collectivity of neutron-rich Cr and Fe toward $N = 50$ ”, EPJ Web of Conferences **107**, 03007 (2016).
- [72] F. Browne *et al.*: “Gamma-ray Spectroscopy in the Vicinity of ^{108}Zr ”, Acta Phys. Pol. **B46**, 721 (2015).
- [73] E. Sahin *et al.*: “First Results on the Excited States in ^{77}Cu ”, Acta Phys. Pol. **B47**, 889 (2016).
- (学位論文)
- [74] 田中良樹: “Search for η' mesic nuclei by missing-mass spectroscopy of the $^{12}\text{C}(p, d)$ reaction.”, 早野研博士論文, 2015.
- [75] 堀井啓志: “重イオン衝突実験における保存電荷非ガウスゆらぎの拡散過程と時間発展”, 早野研修士論文, 2015.
- [76] 小山俊平: “不変質量法を用いた ^{16}C のクラスター状態の研究”, 櫻井研修士論文, 2015.
- <学術講演>
- (国際会議)
- ポスターセッション
- [77] Y. Murakami: “Development of a lead fluoride Cherenkov counter for antiproton-nucleus annihilation cross section measurements”, LEAP 2016, Kanazawa, Japan, Feb, 2016
- 一般講演
- [78] K. Wimmer: “Spectroscopy of neutron-rich Fe isotopes: Breakdown of the $N = 40$ harmonic oscillator gap”, Nuclear Structure and Dynamics III, Portoroz, Slovenia, June 17, 2015.
- [79] S. Momiyama: “In-beam gamma-ray spectroscopy on ^{35}Mg via one-neutron knockout reaction”, Nuclear Structure and Dynamics III, Portoroz, Slovenia, June 18, 2015.
- [80] R. Taniuchi: “In-beam gamma-ray spectroscopy of ^{78}Ni ”, Nuclear Structure and Dynamics III, Portoroz, Slovenia, June 19, 2015.
- [81] S. Koyama: “Study of cluster degree of freedom in neutron-rich sd-shell nuclei via inelastic alpha scattering”, SAMURAI International Collaboration Workshop, Wako (Japan), September 8, 2015.
- [82] M. Niikura: “Study of shell evolution towards ^{78}Ni at OEDO-SHARAQ”, OEDO-SHARAQ workshop, Wako (Japan), September 9, 2015.
- [83] M. Niikura: “Overview of SEASTAR campaign”, 4th SUNFLOWER workshop, Osaka (Japan), September 30, 2015.
- [84] R. Taniuchi: “In-beam gamma-ray spectroscopy of ^{78}Ni ”, International symposium frontier of γ -ray spectroscopy (GAMMA15), October 1, 2015.
- [85] S. Momiyama: “In-beam gamma-ray spectroscopy on ^{35}Mg via one-neutron knockout reaction”, International symposium frontier of γ -ray spectroscopy (GAMMA15), October 1, 2015.
- 招待講演
- [86] Hayano, RS: Internal Radiation Exposures of Fukushima Children the risk is low, but parents' anxiety is still high, ICRR2015 (May 25-29, 2015) Kyoto Japan.
- [87] Hayano, RS: Radiation measurements - what, how, and why?, ICRP 11th dialogue seminar (May 29-30, 2015) Fukushima-city, Fukushima, Japan
- [88] Hayano, RS: Concerns of individuals living in contaminated territories, The Fourth Workshop on Science and Values in Radiological Protection Decision-making, (June 9-11, 2015), Moscow, Russia.
- [89] Hayano, RS: The role of social media in informing population after the Fukushima disaster in Japan, RICOMET 2015 (June 15-17, 2015) Brdo Castle, Slovenia
- [90] Hayano, RS: Measure & Communicate 4.5 years, and beyond, ICRP 12th dialogue seminar (September 12-13, 2015) Date-city, Fukushima, Japan
- [91] Hayano, RS: Fukushima dopo il 2011, Fukushima FOOD SAFETY CONFERENCE (Sep 22, 2015), Milan, Italy.
- [92] Hayano, RS: Measure & Communicate - an experience of an “antimatter” physicist in Fukushima -, IAEA Technical meeting (Oct 8, 2015) Fukui, Japan
- [93] Hayano, RS: Measure & Communicate - Lessons from Fukushima - 5th JICC Seminar on Lessons learned from Fukushima Daiichi Nuclear Accident (Nov 3, 2015), Shinagawa, Japan
- [94] Hayano, RS: Probing fundamental symmetry using antimatter, The 9th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium (Nov 11, 2015), RCNP Oasaka, Japan

- [95] Hayano, RS: Measure & Communicate - a personal recollection of an "antimatter" physicist, Safecast workshop (Nov 23, 2015), Vichy, France
- [96] Hayano, RS: Measure & Communicate - what worked, what didn't -, International Workshop on the Fukushima Dialogue Initiative (Dec 12, 2015), Date-city, Fukushima, Japan
- [97] Hayano, RS: Fukushima Accident, 54th International Winter Meeting on Nuclear Physics (Jan 25, 2016) Bormio, Italy
- [98] Hayano, RS: Measure & Communicate with BABYSCAN and 'D-shuttle', Revitalization strategies after radiation disaster (Feb 14, 2016) Hiroshima University, Hiroshima, Japan
- [99] Hayano, RS: Measure & Communicate - an experience of an "antimatter" physicist in Fukushima - (Feb 25, 2016) IAEA/JICC/WERC Nuclear Policy School, Fukui, Japan
- [100] Hayano, RS: Getting high school students actively involved in understanding the radiological situation in Fukushima (March 10, 2016) FMU/IAEA Technical Meeting on Radiation, Health and Healing, Fukushima Medical University, Japan
- [101] H. Sakurai: "New results on the structure of exotic nuclei", APS Spring Meeting, Baltimore, USA, April, 2015.
- [102] H. Sakurai: "Recent progress on exotic nuclei at RIBF", Mazurian Lakes Conference on Physics Frontiers in Nuclear Physics, Piaski, Poland, September, 2015.
- [103] H. Sakurai: "Current and future programs at RIBF", 2015 ANPhA Symposium, Gyeongju, Korea, October, 2015.
- [104] H. Sakurai: "Overview of RIBF", RISP Workshop, Daejeon, Korea, November, 2015.
- [105] H. Sakurai: "Scientific programs with exotic nuclei at RIBF", 27th ASRC International Workshop "Nuclear Fission and Exotic Nuclei", Tokai, Japan, December, 2015.
- [106] H. Sakurai: "Overview of physics experiments at RIPS/BigRIPS", International Symposium on Physics with Fragment Separators -25th Anniversary of RIKEN-Projectile Fragment Separator (RIPS25), Hayama, Japan, December, 2015.
- (国内会議)
一般講演
- [107] 竜野秀行: 荷電粒子ビーム環境における超伝導遷移端マイクロカロリメータ X線検出器の性能評価 II (日本物理学会 2015 年秋季大会)
- [108] 橋本直: 超伝導遷移端マイクロカロリメータを用いた K 中間子原子 X 線精密分光実験 (2) (日本物理学会 2015 年秋季大会)
- [109] 山我拓巳: ${}^3\text{He}(K^-, n)$ 反応を用いた KbarNN 束縛状態探索のための、水素・重水素標的を用いた素過程 (K^-, n) 反応の研究 (日本物理学会 2015 年秋季大会)
- [110] 川崎新吾: J-PARC K1.8BR ビームラインにおける $d(K^-, n)$ 反応による $\Lambda(1405)$ 粒子の精密分光実験 (日本物理学会 2015 年秋季大会)
- [111] 川崎新吾: J-PARC K1.8BR ビームラインにおける $d(K^-, n)$ 反応による $\Lambda(1405)$ 粒子の精密分光実験 (日本物理学会第 71 回年次大会)
- [112] 王恵仁: 高運動量中性子移行反応による軽い原子核内のテンソル力効果の研究 (日本物理学会第 71 回年次大会)
- [113] 山我拓巳: J-PARC K1.8BR ビームラインに於ける ${}^3\text{He}(K^-, n)$ 反応を用いた $\bar{K}NN$ 束縛状態の研究 (日本物理学会第 71 回年次大会)
- [114] 阪上朱音: RCNP におけるパイ中間子原子分光のためのテスト実験 (1) (日本物理学会第 71 回年次大会)
- [115] 渡辺珠以: RCNP におけるパイ中間子原子分光のためのテスト実験 (2) (日本物理学会第 71 回年次大会)
- [116] 田中良樹: GSI における ${}^{12}\text{C}(p, d)$ 反応を用いた η' 中間子原子核の分光実験 (日本物理学会第 71 回年次大会)
- [117] 小山俊平: 『不変質量法を用いた ${}^{16}\text{C}$ のクラスター状態の研究』, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 19 日.
- [118] 齋藤岳志: 『SAMURAI 実験における陽子検出器 NINJA の開発状況』, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 21 日.
- [119] 長峰駿介: 『波形識別型粒子検出器 NiGIRI の性能評価』, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 21 日.
- 招待講演
- [120] 小山俊平: 『SAMURAI による ${}^{16}\text{C}$ クラスター準位探索』, RCNP 研究会「アイソスカラー型単極遷移で探る原子核の励起状態とクラスター構造」, RCNP, 2015 年 7 月 16 日.
- [121] 早野龍五: π 中間子原子: 励起エネルギー 140MeV のガモフテラー遷移 (日本物理学会 2015 年秋季大会) (セミナー)
- [122] 早野龍五: 「知ろうとすること。」を続ける, 2015 年 6 月 1 日, 福島県立福島高等学校
- [123] Hayano, RS: Fukushima Accident - a personal recollection of an "antimatter" physicist, June 27, 2015, Ritsumeikan Asia Pacific University, Oita, Japan
- [124] 早野龍五: 中学校の理科はすごいんだ!, 2015 年 7 月 4 日, 荒川区自然科学フォーラム
- [125] Hayano, RS: Fukushima Accident, 2015 France-Japan Students' Radiation Protection Workshop (August 3, 2015) U. Tokyo
- [126] 早野龍五: D-shuttle を持ってパリの高校生が来福, 2015 年 8 月 13 日, 福島県伊達市

- [127] 早野龍五: 「知ろうとすること。」を続ける, QM2015 国際会議市民講座, 2015 年 9 月 27 日, 神戸市
- [128] 早野龍五: Measure & communicate, 原子力システム懇話会, 2015 年 10 月 20 日, 東京
- [129] 早野龍五: 福島の現状, 2015 年 11 月 19 日, 東京大学生産技術研究所
- [130] 早野龍五: ニュートリノ振動, 2015 年 11 月 20 日, 福島県立福島高等学校
- [131] 早野龍五: 測って、伝える。2015 年 12 月 9 日, 食の安全と正しい情報の伝え方に関する日伊共同シンポジウム報告会, 東京
- [132] 早野龍五: 測って伝える - BABYSCAN から見える福島の今, 2015 年 12 月 10 日, ILC のための最先端測定器の国際的新展開における一般講演, KEK, Tsukuba, Japan
- [133] 早野龍五: 私が 15 万人のツイッターフォロワーから学んだこと, 2015 年 12 月 10 日, 日本原子力産業協会主催特別会員フォーラム, 東京
- [134] Hayano, RS: Measurement and comparison of individual external doses of high-school students living in Japan, France, Poland and Belarus- the 'D-shuttle' project -, Foreign Correspondents' Club of Japan (Feb 8, 2016), Tokyo, Japan
- [135] 早野龍五: 測って伝える - BABYSCAN から見える福島の今, 2016 年 2 月 12 日, 放射線利用促進セミナー, 名古屋
- [136] 早野龍五: 測って伝える - BABYSCAN から見える福島の今, 2016 年 2 月 20 日, 兵庫県精神科診療所学会術講演会, 神戸
- [137] Hayano, RS: We Want to Know - how an anti-matter physicist reacted to the Fukushima Accident - (Feb 22, 2016), Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (OIST), Okinawa, Japan
- [138] 早野龍五: 測って伝える - BABYSCAN から見える福島の今, 2016 年 3 月 15 日, 戸田建設, 東京
- [139] Hayano, RS: Fukushima five years on - what worked, what didn't? - (March 25, 2016) OECD/NEA, Paris, France
- [140] H. Sakurai: "Present Status of and Plans for RIBF", Physics Division Seminar, Oak Ridge, USA, December, 2015.
- [141] H. Sakurai: "New Magicity and Magicity Loss of Nuclei", Department-of-Physics Seminar, Knoxville, USA, December, 2015.
- [142] 櫻井博儀: "科学するところ —対象、思索、実行—", 不動岡高校、加須市、2015 年 6 月。
- [143] K. Wimmer: "Tracking the Evolution of the Nuclear Shell Structure in Exotic Nuclei", Physics Seminar, September 9 2015, GANIL, Caen.
- [144] K. Wimmer: "Recent results from intermediate energy knockout reactions", RIBF Discussion, November 27 2015, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
- [145] K. Wimmer: "Spectroscopy of ^{28}Na : Shell evolution toward the drip line", Nuclear Physics Seminar, TRIUMF, December 7 2015, Vancouver, Canada.

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中に凝縮し、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、ヒッグス場が真空中に凝縮すると素粒子が質量を持つことは教科書に書いてあるが、なぜヒッグス場が真空中に凝縮するかは、標準理論を越える問題である。従って、この粒子の性質の詳細を研究することで、標準理論を越える素粒子物理学の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やトップクォークの詳細を研究し、新粒子を探索して、標準理論を越える素粒子物理学の方向を呈示する。

ILC 関連の技術開発では、特に、衝突点でのナノスケールのビームのサイズを測定する「新竹ビームサイズモニター」の開発研究を行ない、KEK の ATF2 において実証実験を行なっている。さらに ILC 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研究を行なっている。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においては、2014 年に我々の実験によって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。現在この研究を進めて、弱い等価原理を量子力学の下で検証する実験の準備を行っている。

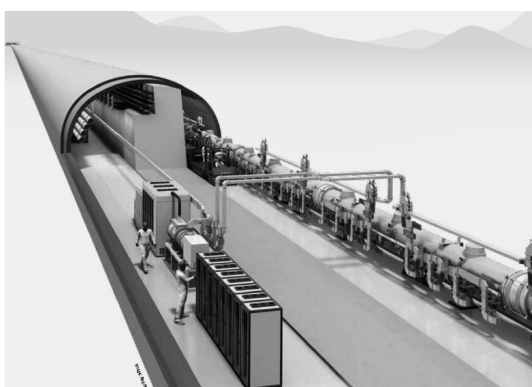


図 2.2.1: 電子・陽電子衝突のリニアコライダー、ILC

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。13 年前から ICFA (International Committee for Future Accelerators) では、各国でバラバラに行なってきた加速器開発を統合し、超電導主加速器を主体としたリニアコライダーを国際的に推進する体制を整えた。2012 年 7 月にはヒッグス粒子が発見され、ILC の初期に行なう物理学が明確になり、12 月には技術設計書が完成しプロジェクトは国際的に大きく進展した。2013 年からは ILC は新たな国際組織 LCC (Linear Collider Collaboration) で運営される。LCC を監督するのが LCB (Linear Collider Board) であり、駒宮はその議長を務める。2012 年 3 月には我が国の素粒子実験分野の「将来計画検討小委員会」が答申を出し、ILC の早期建設を提唱し、10 月には、高エネルギー物理学研究者会議 (研究コミュニティー) は、ILC を早期に我が国に建設して、ヒッグス粒子の詳細研究から初めて徐々に加速器を足してゆき、エネルギーを段階的に増強して、トップクォーク、暗黒物質を担う粒子、ヒッグス粒子の自己結合と順次研究していくという段階的実施案についての合意の文書を発表した。2014 年度からは ILC の名前がついた調査予算が執行され、政府は我が国での建設を真剣に検討している。本研究室は、わが国に ILC を誘致す

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、KEK をはじめ全国の研究者と共に努力を重ねている。

ATF2 レーザー干渉型電子ビームサイズモニターの開発研究

KEK にある加速器試験施設 ATF2 では、ILC のための最終収束系の実証試験が行われている。本研究室では、ATF2 の仮想衝突点において垂直方向に 37 nm に収束した極小の電子ビームサイズを測定するためのビームサイズモニターとして、KEK と協力して新竹モニターを開発した。

新竹モニターは、レーザー干渉縞で電子ビームをスキャンし、この際に発生するコンプトン散乱光をガンマ線検出器を用いて測定する。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とコンプトン信号量は大きくなり、谷の位置では小さくなる。このコンプトン信号量の変調の大きさは電子ビームサイズによって変化するため、この測定によって電子ビームサイズを算出することができる。この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 1064 nm のレーザーを用いてビームサイズ 70 nm が測定された。ATF2 における改良点は、より小さい 37 nm のビームサイズを測定するために二倍高調波による波長 532 nm のレーザーの使用、ビームを固定したまま干渉縞 (位相) をナノメートル単位で動かし測定できるような光学遅延の導入、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などである。

新竹モニターはレーザー干渉を用いる革新的な手法により、100 nm 以下の垂直方向電子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。精密測定したビームサイズ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的に貢献している。2014 年 6 月には世界記録である 44 nm の測定を達成した。

現在は新竹モニターのガンマ線検出器を新たにアクリルチェレンコフ検出器に交換し、より時間応答の早い測定器信号が得られるようになった。これによって、ATF2 のマルチバンチビーム運転において電子ビームサイズを測定することが可能となり、2 バンチビーム運転において 2 つ目のバンチのビームサイズを測定することに成功した。バンチ-バンチ間のビーム軌道フィードバックシステム (FONT システム) を用いたうえで 2 つ目のバンチのビームサイズ測定を行い、これによってビーム収束点における鉛直方向ビーム軌道がフィードバックによって安定化していることを検証する実験を行った。

ILD 電磁カロリメータ

測定器コンセプトの一つである ILD (International Large Detector) の、電磁カロリメータの開発を進めている。ILC でターゲットとする物理事象の多くは

複数のジェットを伴うため、いかにしてそのエネルギー分解能を高めるかが鍵となる。LHCなどのハドロンコライダーでは、ジェットエネルギーの大部分をハドロンカロリメータで測定していたが、荷電粒子についてはより分解能の高いトラック情報を用いるなどの、粒子の種類別に適した方法で測定するアルゴリズムが提案されている。そのアルゴリズムの性能は、電磁カロリメータでのクラスタの分離能で大きく左右される。そのために、測定器に高い細密度を要請する。

本研究室では、5 mm 四方のピクセルを持つ高密シリコン PIN フォトダイオードをセンサーとした、Si/W サンドイッチカロリメータの開発を中心に押し進めてきた。世界各国の共同研究グループにおいて、実装に向けた細部の仕様決定と確認作業をしている中で、主に、電気的特性試験によるセンサー性能の担保、および、放射線損傷による性能劣化の物理過程の特定とセンサー寿命の測定を担当している [12, 34]。2015 年度に神戸大学海事科学研究科のタンデム静電加速器において中性子損傷によるセンサーの耐久試験を行ったところ、数桁におよぶ暗電流量の悪化が確認されたが、これでも十分に仕様を満たす。照射した中性子量は、飛跡貫通型検出器を用いて計測したもとの、ILC での運用で予想される中性子量を考えると、50 年から 100 年程度の耐性を持つことが確認された [24]。またセンサーと同時に、読み出し電源で使われる大型コンデンサと、検出器と読み出し基板をつなぐ導電性エポキシ接着剤の耐性試験も行った。これらは ILC100 年相当の範囲で有意な損傷の兆候は見られなかった [36]。

電磁カロリメータのハードウェア開発の一方で、ILD 検出器のシミュレーションコードの開発を進めている。主に、電磁カロリメータにおける光子のクラスタリングアルゴリズム (GARLIC) の整備と検出器ノイズなどの効果の導入を行っている。また、ヒッグス粒子からタウ粒子へ崩壊する過程を用いて、重いヒッグス粒子等の CP 混合度の測定アルゴリズムの開発を行っている。タウ粒子等の質量など、既知の物理量を用いた保存則による制限を解析過程に課すことで、より高精度な混合度測定が期待できる。

2.2.2 LHC 実験

CERN の誇る世界最大の陽子・陽子衝突加速器 LHC は、2012 年にヒッグス粒子を発見し、2 年間の休止期間を経て、昨年には衝突エネルギーを 8 TeV から 13 TeV に上げて運転している。軽いヒッグス粒子の発見によって、超対称性が有利となったが、まだその兆候は見えていない。13 TeV の運転では新粒子らしき兆候も見え始めている。国際的な大規模実験である ATLAS に、十分に訓練を積んだ博士課程の大学院生を送り込み、他国の研究者や学生と切磋琢磨させることで、真に国際的実力を持った研究者を育てている。国際競争は特に厳しいが、素粒子物理国際研究センターの有能な研究者と協力して様々な成果を上げている。

超対称性粒子グレイノ探索

2015 年からの LHC Run2 では衝突重心系エネルギーの増加により強い相互作用で生成される重い粒子の断面積が飛躍的に上昇している。特に超対称性理論におけるグレイノは対生成断面積が 4-10 倍に増加することから Run2 初期の新物理探索の目玉であり、本研究室ではその早期発見を目指して ATLAS 実験で取得したデータの解析に取り組んでいる [15]。

0 レプトン終状態解析 超対称性理論パラメータに応じてグレイノは様々な崩壊が考えられるが、0 レプトンモードは崩壊分岐比が大きくなる場合が多いため最も重要な終状態である。ATLAS では主にジェットの横運動量や消失運動量といった粒子の運動量の大きさに注目した解析を行ってきたが、本研究室では事象の角度情報を取り込んだ新しい変数 “aplanarity” をさらに導入し、背景事象とのよりよい分離を実現した。この新変数は 1 レプトン終状態解析にも導入されている。また発見のためには精度の良い背景事象数の推定が必須である。これまでの解析では MC シミュレーションに大きく依存した背景事象のモデリングが用いられていたが、この解析ではまだ実験で標準模型の過程がまともに測定されたことのないような極端にエネルギーの高い領域が探索対象であるため、モデリングの不定性が必然的に大きくなる。そこで本研究室では探索領域から少し緩い領域で実測されたデータの分布を、aplanarity を用いて探索領域に外挿する data driven な推定法を開発し、背景事象推定による系統誤差を改善した。南はこれを博士論文とした。これらを ATLAS 実験が 2015 年に取得したデータに適用し、結果は標準理論と無矛盾であったが、これによりグレイノの質量に対して従来より大幅に厳しい制限を付けた (図 2.2.2)[5]。

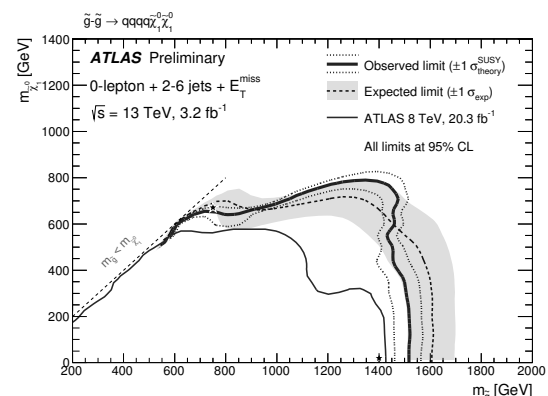


図 2.2.2: グレイノがクオーク対と最も軽い中性電弱ゲージノに崩壊するモデルに対する排除領域。青い点線 [黒点線] は 95% CL の予測される排除領域 (黄色 [灰色] の領域は $\pm 1\sigma$)。赤実線 [太実線] は実験データによる 95% CL の排除領域 (赤い点線 [細点線] は理論による $\pm 1\sigma$ の等高線)。青い実線 [黒実線] は Run1 ($\sqrt{s}=8 \text{ TeV}$) における排除領域。

1 レプトン終状態解析 グルイーノ崩壊でW やスレプトンが生じる場合を想定して、1レプトン終状態の解析も2015年のデータを用いて行われた。結果は標準理論と現段階では無矛盾であり、これによりグルイーノ崩壊でレプトンを生ずるシナリオに対する制限を大幅に更新した [6]。この解析では統計的に有意ではないが、データが推定値を大きく上回っている信号領域が1つあり、2016年以降のデータでの動向に注意が必要である。また現解析ではMCシミュレーションをベースとした背景事象推定法が行われているが、0レプトン終状態の場合と同様、興味のある高エネルギーかつジェットが多い領域でのモデリングにやや不安があり、妥当性はあまり自明ではない。そこで本研究室では現行の方法とは独立に、新しい背景事象推定方法を考案して現解析の追証を行った。これは2レプトン終状態のデータを1レプトン領域に外挿する data driven な方法であり、これにより多重ジェット領域のモデリングの精度が改善された。また現解析と同じ推定結果を導いたことから、データの超過は背景事象のミスモデリングによるものではない可能性がより高まった [43]。

電弱ゲージノ探索

軽い電弱ゲージノは超対称性ダークマターシナリオなど、超対称性理論において非常に広い枠組みで存在が支持されているが、これまでのところ実験的な兆候は見られていない。LHC Run1 で従来より排除領域を広げたが [8]、生成断面積が小さいため制限はまだ弱く、Run2でのデータ統計量の大幅な増加によって重い質量領域での本格的な探索が期待されている。

レプトン終状態解析 レプトンを含む終状態を用いた探索は幅広いモデルに対して感度を持ち、中でも3レプトン終状態はQCD過程が寄与しないためLHCでは最も有力な探索チャンネルと考えられている。そこでの主要な背景事象である標準理論のWZ生成事象と電弱ゲージノ信号事象の運動学は酷似しており、その分離問題がボトルネックとなってきたが、本研究室では新しいアルゴリズムとして尤度関数をベースとした多変量解析の手法の研究を行ってこの問題に取り組んでいる。多次元尤度関数のモデリングは、通常の機械学習の方法では訓練データ量などの面で技術的困難が大きいが、行列要素を用いて理論から第一原理的に計算することによってこれを解消した。今年度の前半にてこの研究は一通り完成し、結果的に物理的に重要である電弱ゲージノ間の質量差が小さい信号に対する信号領域においてWZ事象の棄却能力を2-3倍向上させることに成功し、このS/N比の改善によってデータ量が十分溜まった際の感度を大幅に改善した [38]。

消失飛跡探索 超対称性理論の中でも宇宙論等の観点からAMS BやPGMは非常に有望なモデルである。これらではSU(2)ゲージボソンの超対称性パートナーである中性ウィーノが最も軽い超対称性粒子であり、さらに荷電ウィーノと質量差160 MeV程度で縮退することが予言されている。このとき荷電

ウィーノの寿命は典型的に0.2 nsec程度と長寿命なため、陽子陽子衝突で荷電ウィーノが生成された場合はATLAS検出器で途中まで飛跡を残し、検出器内で中性ウィーノと低エネルギーパイオンに崩壊した後は消えたように見えるという、消失飛跡と呼ばれる特徴的な信号を残す。標準理論ではこのような崩壊過程は存在せず、飛跡の再構成ミスに由来する事象のみが背景事象となるため感度が高い。Run2初期ではグルイーノ崩壊を通じた荷電ウィーノ生成事象の探索が有力であり、現在感度の精査を進めている。またこの解析では飛跡再構成の改善が特に重要であるが、本研究室ではATLASの最内層にあるピクセル検出器のアライメントについて、各モジュールの歪みをデータを用いて測定する手法を開発し、数マイクロメートルの精度を実現した [18, 40]。

2.2.3 中性子実験

素粒子標準理論を超えた理論体系の中には、微視的スケールにおいて、質量やバリオン数などを結合荷とした新しい相互作用を示唆するものがある。これらは、ニュートン重力の逆二乗則に従わない現象として表れ、場合によっては弱い等価原理を破る源となる可能性を持つ。このような背景のもと、重力の精密検証を目指した超冷中性子と冷中性子実験を進めてきた。

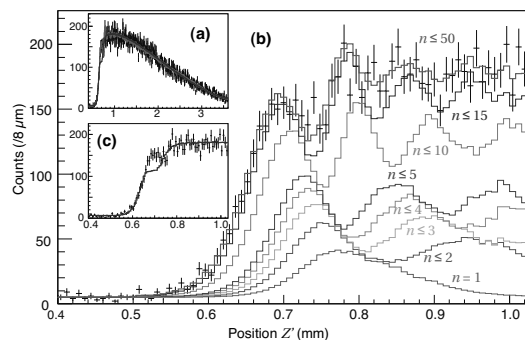


図 2.2.3: 地球重力に束縛された超冷中性子の鉛直方向存在確率分布。十字の測定点は、量子効果を取り入れた計算(ヒストグラム)で良く再現されている。(a) 全体の分布の比較。(b) 分布の立ち上がり部分の比較(ヒストグラムは量子数 $n \leq n_0$ の存在確率を足し上げたもの)。(c) 量子効果の無い場合の計算から得られる分布の比較。図は G. Ichikawa, S. Komamiya, Y. Kamiya *et al.*, PRL **112** (2014) 071101 より。

超冷中性子を用いた弱い等価原理の検証実験準備

運動エネルギーが100 neV程度の中性子は超冷中性子と呼ばれ、地球重力によって束縛状態を形成する。この束縛状態の観測は、微視的スケールでの重力の検証になるため、本研究室で実験を行ってきた。2014年の初めには、量子力学的束縛状態に特徴的な存在確率分布を、位置分解能を持つ中性子測定器を用いて0.7 μm 以下の位置精度で捉えた(図2.2.3)。

超冷中性子の重力束縛状態はこのような特徴的な位置分布を示すと同時に、その時間発展も量子力学に由来する特徴的なものである。本研究室では、中性子チョッパーと時間分解能を持つ中性子検出器を用いて、この時間発展を観測する新たな実験手法を考案した。この時間発展を観測することに対応しており、微視的スケールでの重力を検証する新手法である。特にシュレーディンガー方程式における弱い等価原理を0.1%の精度で検証できると見積もられており [44]、現在実験に向けた準備を進めている。

冷中性子散乱実験

冷中性子ビームとキセノンガスの散乱過程を詳細に調べることにより、ナノメートルのスケールにおける新しい重力的相互作用の探索を進めている。実験は、韓国原子力研究所にある物性研究用の小角中性子散乱ビームラインを用いた。測定された散乱角分布を既知の相互作用からなる分布と比較し、その整合性を評価する。

結果は、16 から 160 mrad. の散乱角領域において、1%程度の統計精度で既知の散乱角分布に一致し、これまでフランスのグループが決めていた制限を最大一桁程、更新することに成功した (図 2.2.4[2])。

更に、より長い到達距離を持った力を探索対象として、中性子レンズを用いた実験構成の最適化を行い、十分な感度が得られる事を確認した。また、中性子フラックスモニターを用いることによる系統誤差の抑制について検討し、キセノン同位体を用いたより高精度な実験の設計を進めている。検討の結果から現在の実験から二桁程の感度改善が期待される [11, 14, 19, 20, 21, 37, 51]。

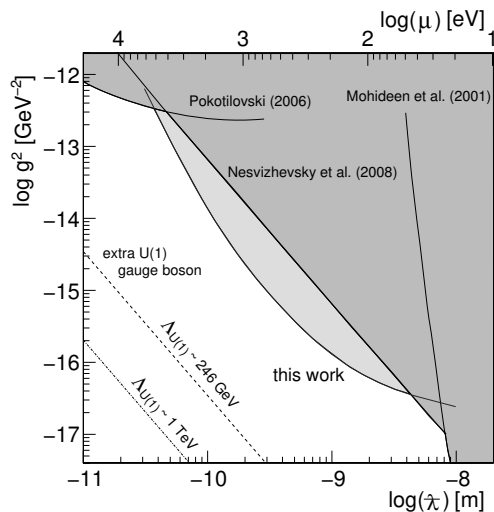


図 2.2.4: 更新した重力に準ずる新しい相互作用への制限。横軸を新しい力の到達距離または媒介粒子の質量とし、縦軸を結合の強さとした。0.04 から 4 nm の到達距離において、これまでの制限を最大で一桁ほど改善することに成功した [2]。

<報文>

(原著論文)

- [1] S. Chen, D. Jeans, Y. Kamiya, C. Kozakai *et al.*: “Beam test performance of the SKIROC2 ASIC”, Nucl. Instrum. Meth. A **778** (2015) 78
- [2] Y. Kamiya, K. Itagaki, M. Tani *et al.*: “Constraints on New Gravity Forces in the Nanometer Range”, Phys. Rev. Lett. **114** (2015) 161101
- [3] CALICE collaboration (including D. Jeans): “Pion and proton showers in the CALICE scintillator-steel analogue hadron calorimeter”, J. Instrum. **10** (2015) P04014
- [4] CALICE collaboration (including Y. Kamiya, S. Chen, D. Jeans, S. Komamiya, C. Kozakai, H. Nakanishi): “Shower development of particles with momenta from 15 GeV to 150 GeV in the CALICE scintillator-tungsten hadronic calorimeter”, J. Instrum. **10** (2015) P12006
- [5] ATLAS Collaboration: “Search for squarks and gluinos in final states with jets and missing transverse momentum at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2015-062
- [6] ATLAS Collaboration: “Search for gluinos in events with an isolated lepton, jets and missing transverse momentum at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2015-076.
- [7] D. Jeans: “Tau lepton reconstruction at collider experiments using impact parameters”, Nucl. Instrum. Meth. A **810** (2016) 51
- [8] ATLAS Collaboration (including S. Chen): “Search for the electroweak production of supersymmetric particles in $\sqrt{s}=8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D **93** (2016) 052002
- [9] CALICE collaboration (including Y. Kamiya, D. Jeans, S. Komamiya, H. Nakanishi): “First results of the CALICE SDHCAL technological prototype”, J. Instrum. **11** (2016) P04001

(学位論文)

- [10] 加納勇也: 「レーザー干渉型ビームサイズモニターを用いた 2nd バンチ電子ビームサイズ測定」 修士論文 (東京大学大学院理学系研究科) 2016 年 3 月
- [11] 笹山悦宏: 「低速中性子散乱を用いた未知短距離力の探索」 修士論文 (東京大学大学院理学系研究科) 2016 年 3 月

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [12] H. Nakanishi, C. Kozakai, Y. Kamiya, D. Jeans, S. Komamiya: “Measurement of irradiated Si-Pad and estimation of radiation effects for ILD ECAL”, CALICE meeting, 19 April 2015, the University of Tokyo, Japan

- [13] D. Jeans: “ECAL (all options) with a focus on simulation”, Asian Linear Collider Workshop, 20-24 April 2015, KEK, Japan
- [14] Y. Kamiya, K. Itagaki, Y. Sasayama *et al.*: “Search for New Gravitylike Forces at the HANARO 40 m SANS Beam Line”, HANARO SYMPOSIUM 2016, 11-13 May 2015, Deajeon, Korea
- [15] Y. Minami: “Inclusive searches for squarks and gluinos with the ATLAS detector”, SUSY2015, 27 August 2015, California, USA
- [16] S. Komamiya: “Observation of Spatial Distribution of Gravitationally Bound Quantum States of Ultracold Neutrons and Its Derivation Using the Wigner Function”, 16 September 2015, Paul Scherrer Institut (PSI), Switzerland
- [17] D. Jeans: “Recent developments in LC calorimeter R&D” “Full tau lepton reconstruction using impact parameters”, Linear Collider Workshop 2015, 1-7 November 2015, Whistler, Canada
- [18] C. Kozakai: “PIXEL MODULE DISTORTION MEASUREMENT”, ATLAS Tracking CP Workshop, 30 November - 1 December 2015, Chamonix, France
- [19] Y. Kamiya, Y. Sasayama, S. Komamiya, and G. N. Kim: “Search for new gravity-like short-range forces in neutron-Xe scattering”, 8th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms - FPUA2015, 30 November - 2 December 2015, Saitama, Japan
- [20] Y. Kamiya, Y. Sasayama, S. Komamiya, and G. N. Kim: “Experimental Constraints on Fifth Force Candidates in the Nanometer Range”, The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 7-11 December 2015, Kyoto, Japan
- [21] Y. Kamiya, Y. Sasayama, K. Itagaki, *et al.*: “Experimental Constraints on New Gravity-like Forces in the Nanometer Range”, International Conference on Gravitation and Cosmology, 14-18 December 2015, Mohali, India
- [22] Y. Kano: “IP-BSM Two bunch operation”, 19th ATF2 Project Meeting, 13 January 2016, LAL, France
- [23] C. Kozakai for the ATLAS collaboration: “Alignment of the ATLAS Inner Tracking System during LHC Run 2”, 125th LHCC meeting, 2 March 2016, CERN, Switzerland
- [24] H. Nakanishi, C. Kozakai, Y. Kamiya, D. Jeans, S. Komamiya: “Evaluation of neutron resistivity for ECAL components”, CALICE meeting, 2 March 2016, Kyushu, Japan
- 招待講演
- [25] S. Komamiya: “Report of the International Committee for Future Accelerator and the Linear Collider Board”, Asian Linear Colliders Workshop, 21 April 2015, KEK, Japan
- [26] S. Komamiya: “ILC Status and Perspective”, Future Research Infrastructures: Challenges and Opportunities, 9 July 2015, Varenna, Italy
- [27] S. Komamiya: “ILC Status Report”, XXVII International Symposium of Lepton and Photon Interactions at High Energies, 21 August 2015, Ljubljana, Slovenia
- [28] S. Komamiya: “ILC (Scientific and Political Readiness)”, CERN Science Policy Committee, 14 September 2015, CERN, Switzerland
- [29] S. Komamiya: “Report and News from the Linear Collider Board”, International Linear Colliders Workshop, 2 November 2015, Whistler, BC, Canada
- [30] S. Komamiya: “International Linear Collider”, NCTS Annual Theory Meeting, 11 December 2015, National Tsing Hua University, Taiwan
- [31] S. Komamiya: “Status of ILC”, Asian Forum for Accelerators and Detectors (AFAD) 2016, 2 February 2016, Kyoto University, Japan
- [32] S. Komamiya: “ICFA/LCB Report”, Asian Committee for Future Accelerators (ACFA) 2016, 4 February 2016, Kyoto University, Japan
- (国内会議)
- 一般講演
- [33] 内田健太: 「超冷中性子を用いたサブミクロンスケールの重力測定」 高エネルギー春の学校、2015年6月10 - 12日、滋賀
- [34] 中西均、小坂井千紘、神谷好郎、Daniel Jeans、駒宮幸男: 「ILD 電磁カロリメータに向けたシリコン検出器の中性子放射線耐性」 高エネルギー春の学校、2015年6月10 - 12日、滋賀
- [35] 加納勇也: 「ATF2 における 2nd bunch ビームサイズ測定」 ILC 夏の合宿、2015年7月18 - 21日、群馬
- [36] 中西均、小坂井千紘、神谷好郎、Daniel Jeans、駒宮幸男、ILD 電磁カロリメータに向けたシリコン検出器と導電性接着剤の中性子放射線耐性試験」 日本物理学会秋季大会、2015年9月25 - 28日、大阪市立大学
- [37] 神谷好郎、笹山悦宏、駒宮幸男、Guinyun Kim: 「中性子散乱を用いた重力に準ずる未知相互作用の探索」 日本物理学会秋季大会、2015年9月25 - 28日、大阪市立大学
- [38] 陳詩遠、山本真平、山中隆志、浅井祥仁: 「LHC ATLAS 実験 Run2 における電弱ゲージノ探索のための新たな背景事象抑制法」 日本物理学会秋季大会、2015年9月25 - 28日、大阪市立大学
- [39] 南雄人、山中隆志、浅井祥仁: 「LHC-ATLAS 実験 Run2 における超対称性グルーオンの探索」 日本物理学会秋季大会、2015年9月25 - 28日、大阪市立大学

- [40] 小坂井千紘、山本真平：「ATLAS 実験における 13TeV 衝突データを用いた ピクセル検出器のアラインメント」日本物理学会秋季大会、2015 年 9 月 25 - 28 日、大阪市立大学
- [41] 内田健太、神谷好郎、駒宮幸男、市川豪：「超冷中性子を用いた未知短距離探索へ向けた実験システムの改善」日本物理学会秋季大会、2015 年 9 月 25 - 28 日、大阪市立大学
- [42] 加納勇也、駒宮幸男、神谷好郎、照沼信浩、田内利明、奥木敏行：「ATF2 における 2nd bunch ビームサイズ測定」日本物理学会秋季大会、2015 年 9 月 25 - 28 日、大阪市立大学
- [43] 陳詩遠、齊藤智之、山中隆志、浅井祥仁：「LHC ATLAS 実験 Run2 における 1 レプトンを持つ終状態を用いた超対称性粒子探索 (2)」日本物理学会 第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 - 22 日、東北学院大学
- [44] 内田健太、神谷好郎、駒宮幸男：「超冷中性子を用いた新物理探索のための実験システムの開発」日本物理学会 第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 - 22 日、東北学院大学
- [45] Daniel Jeans: “Tau lepton reconstruction at collider experiments using impact parameters” 日本物理学会 第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 - 22 日、東北学院大学
- [46] 加納勇也、駒宮幸男、神谷好郎、照沼信浩、奥木敏行、田内利明、Philip N. Burrows、Colin Perry、Glenn Christian、Neven Blaskovic Kraljevic、Talitha Bromwich：「ATF2 におけるレーザー干渉型電子ビームサイズモニターを用いたビーム軌道ジッターの研究」日本物理学会 第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 - 22 日、東北学院大学
- [47] 駒宮幸男：「ILC/LCB」高エネルギー物理学研究者会議総会、2016 年 3 月 20 日、東北学院大学

招待講演

- [48] 駒宮幸男：「ILC 計画の実現に向けて」日本物理学会秋季大会、2015 年 9 月 25 - 28 日、大阪市立大学
- [49] 駒宮幸男：「宇宙の理解と素粒子物理学の発展」三井住友 PreEMP、2015 年 10 月 22 日、三井住友銀行呉服橋クラブ、東京
- [50] 駒宮幸男：「素粒子・宇宙・鈴木厚人先生」2016 年基礎科学ブレークスルー賞授賞記念特別講演会、2016 年 2 月 8 日、岩手

(セミナー)

- [51] 神谷好郎：「中性子で重力を探る」弘前大学 物理学セミナー、2016 年 2 月 15 日、弘前大学

2.3 衰輪 研究室

衰輪研究室は、教授の定年退職により平成 27 年度でその活動を終了した。最終年度の報告をする。

2.3.1 原子炉ニュートリノモニター

原子炉モニタリングに応用するための小型反電子ニュートリノ検出器 PANDA (Plastic Anti-Neutrino Detector Array) を開発した。運転中の原子炉からは、透過力の強い反電子ニュートリノが核分裂反応に伴って大量に放出されている。この反電子ニュートリノのフラックスを原子炉建屋の外から測定することで、原子炉の運転状況や燃料組成の変化を監視することができる。ニュートリノ検出技術を応用した原子炉モニタリングは、国際原子力機関 (IAEA) によって実施されている査察に代わる、非侵襲的で負担の少ない画期的な保障措置の手法となることが期待されている。

我々のグループが開発している PANDA は、液体シンチレータと比べてより安全性の高いプラスチックシンチレータをターゲットとして使用しており、セグメント化した構造を採用することで効率的なバックグラウンド事象の排除を可能にしている。またトラックやコンテナに積載した状態で測定が可能であるため、原子炉建屋の外からのモニタリングに適している。

2008 年から現在までに第 1~3 次プロトタイプとして lesserPANDA、PANDA36、PANDA64 を開発してきた。2011-2012 年には PANDA36 を大飯発電所に設置し、原子炉建屋の外から原子炉運転中と停止中のニュートリノフラックスの差を約 2σ で検出することに世界で初めて成功した。最終型の検出器 PANDA100 の開発が終了し、検出器は北里大学理学部の川崎健夫研究室に移動している。今後、関西電力大飯発電所の再稼働を待って第 2 回めの検出実験を行う予定である。

2.3.2 雷雲ガンマ線

PANDA36 を大飯発電所に設置していた冬季の 2 か月間に、数分間にわたるカウントレートの予期しない上昇が 3 バースト見つかった。これらのバーストは、エネルギースペクトルが 10-15MeV の高エネルギーまで伸びていることや気象庁の提供する雷情報との一致などから、雷雲に由来する長時間持続性のガンマ線バーストであることがわかった。長時間持続性の雷雲由来バーストは山岳地帯での観測例が多いが、冬季の日本海沿岸は雷雲が低い高度に発生するため海面レベルで雷雲バーストを観測することができる世界でも珍しい地域である。

雷雲内に存在する電場の強さが $\sim 300\text{kV/m}$ 以上になると、空気中の電子は電場による加速が大気分子との衝突による減速を上回って加速され、相対論的逃走電子が発生する。電子が相対論的速度に達する過程でさらに新しい逃走電子が次々に生成するため、逃走電子数は雷雲電場で 10^5 倍程度まで増倍するという相対論的逃走電子雪崩 (RREA) モデルが提唱されている。

このモデルに従えば、一定以上の活動度のある雷雲中では、その電場により宇宙線中の電子が加速・増倍されて制動放射を起こし、大量の電磁シャワー

が下方に向かって定常的に放射されていることになる。雲底高度の高い夏の雷雲の場合は、電磁シャワーは大気に吸収され地上まで到達することは少ないが、冬季の日本海沿岸や山岳地帯では雲底と地表の距離が小さいために多くの電磁シャワーが降り注ぐことになる。バーストの持続時間は、雷雲の通過時間または雷雲活動度の持続時間で決まることになる。

RREA モデルに基づく逃走電子の増倍とそれに伴う電磁シャワーが、これまで山岳地帯や日本海沿岸で検出されてきた長時間持続性バーストを十分に説明できるかどうかはまだわかっていない。

大飯発電所で PANDA36 が観測したバーストの解析から、 γ 線の到来方向がほぼ天頂方向からでありバースト持続中に変化しないこと、さらにシミュレーションでは電場加速後の逃走電子のエネルギーが 17MeV で単色であると仮定して高度 400-1000m から発射した場合に観測スペクトルをよく再現することがわかった。

空気中の窒素分子との光核反応によって生成した中性子と思われるイベントも 1 つのバーストと同時に検出されている。このようにして発生した中性子は空気中の窒素原子核 ^{14}N に吸収されて ^{14}C を生成する。このことは、今まで知られていなかった ^{14}C の新たな源があることを示しており、炭素年代測定に影響を及ぼす可能性がある。

山岳地帯での観測のために、第 3 次プロトタイプ PANDA64 をトラックに積載した状態で東大宇宙線研究所乗鞍観測所の屋外に設置して、2014 年 7 月から 9 月に測定をおこなった。全測定期間で 12 回の雷雲由来長時間持続性バーストが観測され、そのエネルギースペクトルは最大規模のバーストで 25MeV 程度まで伸びていた。気象庁提供の雷情報との関連を調べたところ、12 回のバースト全てが「雷可能性あり」を示すレベル 1 以上の状態で観測されていた。

乗鞍で観測したバーストについて、大飯発電所での測定時と同様に単色の逃走電子を仮定したシミュレーションをおこなうと、40-80MeV の電子を 400-1000m の高度から発射した場合に測定スペクトルをよく再現した。この結果から、逃走電子のエネルギーは山岳地帯である乗鞍観測所のほうが日本海沿岸の大飯発電所よりも高く、一方で、大気中での逃走電子フラックスは大飯のほうが乗鞍より小さいという結果が得られた。このことは、山岳地帯のほうが大気密度が低いことを考えれば、RREA モデルと定性的に矛盾しない。

2.3.3 Hidden photon 暗黒物質探索

概要

過去数十年の天文観測の結果、宇宙には光では観測できない非バリオンの暗黒物質が存在することが確実であると考えられている。暗黒物質の性質をつきとめることは今日の天文学および宇宙論にとって最重要の課題であり、暗黒物質を直接探索する様々な実験的試みが続けられている。

一番よく知られており、我々も過去に探索を行った暗黒物質の候補で、また現在行われているほとんどの探索実験が狙っているのは、Weakly Interacting Massive Particles (WIMP) である。しかし、暗黒物質には、axion-like particles (ALP) や hidden-sector photons (HP) のような Weakly Interacting Slim Particles (WISP) と呼ばれるもうひとつの重要な候補がある。

Hidden-sector photon または単に hidden photon は、通常の photon (光子) との間の kinetic mixing を利用して実験的探索が可能である。なかでも、最近提案された球面鏡を使う方法では広範囲の質量領域の探索実験が可能である。

この方法では、雰囲気中の hidden photon が球面鏡の表面でその質量にほぼ等しいエネルギーの通常の photon を垂直に放出するので、球面鏡の中心に hidden photon 由来の光子が集中する。この比較的単純な手法の有効性を実証するために、我々は質量が $\sim\text{eV}$ の光学領域と $\sim\mu\text{eV}$ の電波領域でふたつの探索実験を行った。これらの実験で探索したのは、いずれもこれまでに未探索のパラメータ領域である。

光学領域

Hidden photon の質量が $\sim\text{eV}$ の光学領域では、過去に solar hidden photon の探索実験に用いた直径 500mm 焦点距離 1007mm の放物面鏡と光電子増倍管を用いた。この鏡は球面鏡ではないが、直径に対して焦点距離が長いために球面鏡として近似できる。その結果、現在のセットアップで到達可能な感度では hidden photon CDM の証拠は見つからなかった。これを用いて、質量 $3.1 \pm 1.2\text{eV}$ における mixing parameter について、 $\chi < 6 \times 10^{-12}$ という制限を得た。

電波領域

Hidden photon の質量が $\sim 50\mu\text{eV}$ 付近の電波領域では、直径 2.2 m の市販されている安価なパラボラアンテナを用いて、BS 放送で使われている Ku バンド ($\sim 12\text{GHz}$) について実験を行った。これも球面鏡ではなく放物面鏡であるが、この場合は焦点距離が短く、球面鏡として近似できないので、新たな工夫が必要となる。

そのために我々は図 2.3.1 に示すように、パラボラアンテナの前面にアルミ板の平面鏡を光軸に垂直に設置する新しい手法を考案した。この配置では、hidden photon が平面鏡の表面で通常の photon を垂直に放出し、正面のパラボラでその焦点に集光される。

探索実験の結果、hidden photon 由来の信号は見つからなかったが、そのことを利用して質量 $\sim 50\mu\text{eV}$ 近傍に $\chi < 2 \times 10^{-12}$ という制限を得た。

現在のセットアップでは極めて限られた質量領域しか探索できていないが、球面鏡を使う hidden photon 探索実験の有効性を世界に先駆けて実証することが

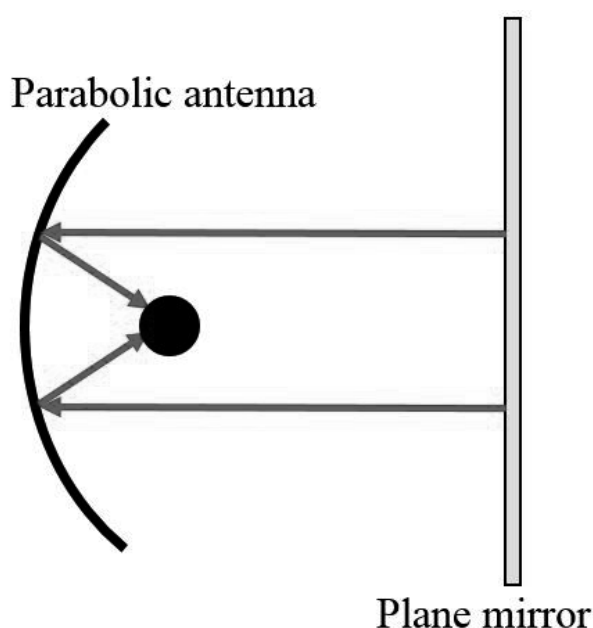


図 2.3.1: 放物面鏡と平面鏡の組み合わせによる新手法

できた。とりわけ、放物面鏡と平面鏡を組み合わせることで市販の安価なパラボラアンテナを利用できるようになり、新たに球面鏡を製作する必要がなくなった。

より広範囲の質量領域に探索を拡張することは容易で、上記いずれの実験でも、目的の波長領域に感度を持つ光子検出器を取り付けることで可能である。

<報文>

(原著論文)

- [1] J. Suzuki, T. Horie, Y. Inoue, M. Minowa: Experimental Search for Hidden Photon CDM in the eV mass range with a Dish Antenna, JCAP 09 (2015) 042, arXiv:1504.00118 [hep-ex].
- [2] Y. Kuroda, S. Oguri, Y. Kato, R. Nakata, Y. Inoue, C. Ito, M. Minowa: Observation of gamma ray bursts at ground level under the thunderclouds, arXiv:1601.06349 [astro-ph.HE].

(会議抄録)

- [3] Jun'ya Suzuki, Yoshizumi Inoue, Tomoki Horie, Makoto Minowa: Hidden photon CDM search at Tokyo, Proceedings, 11th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs (Axion-WIMP 2015): Zaragoza, Spain, June 22-26, 2015, <http://www-library.desy.de/preparch/desy/proc/proc15-02.pdf>, arXiv:1509.00785 [hep-ex].
- [4] Tomita, N. et al.: World's Cheapest Readout Electronics for Kinetic Inductance Detector by Using RedPitaya, J. Low Temp. Phys. doi:10.1007/s10909-016-1485-0.

- [5] Oguri, S. et al.: GroundBIRD: Observing Cosmic Microwave Polarization at Large Angular Scale with Kinetic Inductance Detectors and High-Speed Rotating Telescope, J. Low Temp. Phys. doi:10.1007/s10909-015-1420-9.
- [6] Ishitsuka, H. et al.: Front-End Electronics for the Array Readout of a Microwave Kinetic Inductance Detector Towards Observation of Cosmic Microwave Background Polarization, J. Low Temp. Phys. doi:10.1007/s10909-015-1467-7.

(学位論文)

- [7] 熊原充志: 雷雲から飛来する放射線の研究, 平成 28 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.
- [8] 堀江友樹: Experimental search for hidden photon dark matter by using dish antenna method, (パラボラアンテナを用いた手法による hidden photon ダークマターの実験的探索), 平成 27 年 6 月博士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.
- [9] 加藤陽: Observational study of thundercloud radiation bursts using a segmented organic scintillator installed at a mountaintop, (セグメント化有機シンチレータを用いた山頂における雷雲放射線バーストの観測研究), 平成 27 年 9 月博士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.
- [10] 井上慶純: Search for solar axions with the Tokyo axion helioscope, (東京アクシオンヘリオスコブ装置による太陽アクシオンの探索), 平成 28 年 1 月博士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.
- [11] 鈴木惇也: Experimental search for hidden photon CDM in the eV mass range with a concave mirror, (和文:凹面鏡を用いた質量 eV 領域における hidden photon ダークマター探索), 平成 28 年 3 月博士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [12] J. Suzuki: Hidden photon CDM search at Tokyo, 11th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs (Axion-WIMP 2015), University of Zaragoza, Spain, 22–26 June 2015.
- [13] N. Tomita: World's cheapest readout electronics for kinetic inductance detector by using RedPitaya, 16th International Workshop on Low Temperature Detectors, Grenoble, France, 20–24 July 2015.
- [14] Y. Kato: Thundercloud-related radiation bursts observed at a coastal area and a mountaintop using segmented organic scintillators, Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration (TEPA), Yerevan Physics Institute, Yerevan, Armenia, 5-9 October 2015.

- [15] Y. Kato: Development of Plastic Anti-neutrino Detector Array (PANDA), Applied Antineutrino Physics (AAP), Virginia Tech Research Center, Arlington, United States, 7-8 December 2015.

(国内会議)

一般講演

- [16] 鈴木惇也: Hidden photon ダークマター探索、Cosmophysics seminar、高エネルギー加速器研究機構 2015年4月15日.
- [17] 富田望: RedPitaya を用いた世界一安い MKID 読み出し回路の構築、日本天文学会 2015 年度秋季年会、兵庫県甲南大学 2015 年 9 月 9 日.
- [18] 加藤陽: 原子炉モニタリング用反電子ニュートリノ検出器を用いた雷雲ガンマ線の観測、日本物理学会 2015 年秋季大会、大阪市立大学、2015 年 9 月 25 日.
- [19] 加藤陽: Development of Plastic Anti-Neutrino Detector Array (PANDA) for reactor monitoring、新学術領域「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会、静岡県熱海市「ニューウェルシティー湯河原」、2015 年 12 月 2 日.
- [20] 蓑輪眞: 素粒子物理学実験と低温物理、東京大学低温センター研究交流会、2016 年 2 月 23 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、岐阜県飛騨市のスーパーカミオカンデ検出器でのニュートリノおよび核子崩壊の研究、茨城県東海村の J-PARC 加速器と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。

2.4.1 (スーパー) B ファクトリー実験

Belle 実験

1999 年から 2010 年にかけて運転した KEK の B ファクトリー (KEKB 加速器/Belle 測定器) では、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蓄積した。このデータを使って、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。本研究室では特に、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る新物理探索と、クォークの粒子-反粒子対称性 (CP 対称性) の破れのパラメータのひとつ ϕ_3 の測定に関する研究を行っている。

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、ミューオンの質量の約 17 倍であり、新物理に対してその二乗、約 290 倍の感度を有する。

われわれは KEK B ファクトリー加速器で得られた大量のタウ・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。KEK B ファクトリーにおけるタウレプトンの輻射レプトン崩壊 (radiative leptonic decay; $\tau \rightarrow \mu\nu\nu\gamma$ 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。これらの精密測定を目指し系統誤差と背景事象の研究が進められている。また、本年度から新たに $\tau^- \rightarrow \ell^- \ell'^+ \ell'^- \nu_\tau \bar{\nu}_\ell$ ($\ell, \ell' = e, \mu$) and $\tau^- \rightarrow \pi^- \ell^+ \ell'^- \nu_\tau$ ($\ell = e, \mu$) の解析を開始し、これらの崩壊を正しくシミュレートするためのモンテカルロ事象生成ソフトウェアを開発した。

標準模型では、B 中間子系での CP 対称性の破れの大きさはユニタリティ三角形と呼ばれる複素平面上の三角形の三つの内角 (ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3) をパラメータとして表すことができる。このうち、 ϕ_3 と呼ばれるパラメータについては $B^- \rightarrow DK^-$ 崩壊の観測から理論的不定性が非常に小さい測定が可能である。しかし、この崩壊の分岐比が小さいために、現時点では三つの角度の中で測定精度が最も悪く、代替の測定法がいくつか提案されている。 ϕ_3 の測定は、今後 Belle II 実験でさらに大量のデータを集めたとき、新物理探索に重要な役割を果たすことが期待されている。本研究室では、Belle 実験のデータ解析から $B^- \rightarrow DK^-$ 事象に加えて $B^- \rightarrow D^* K^-$ 事象を使うことで更なる測定精度向上ができることを示し、このモデル非依存解析法を用いた解析を進めている。Belle 実験の全データを用い ϕ_3 の測定を更新するとともに、Belle II 実験でのソフトウェアフレームワークで同モードの精密測定精度の実現可能性も研究している。

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取めた 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。本研究室は Belle II 測定器の構成要素である SVD 検出器と ECL 検出器の開発・量産を主導している。

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 層の計 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が改善される。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。

最外層の 6 層目ラダーは最新設備をもつ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) 内にて製造される。本研究室は、Kavli IPMU 内の実験室創設時から SVD 検出器のラダーモジュールの量産に向けた量産研究開発を主導してきた。本研究室で開発された 6 層目ラダーの組立手法は、海外の研究機関による 3, 4, 5 層目ラダーの製造にも適用されている。本年度は、実験で使用される品質の量産 0 号実機を開発することに成功した。また、SVD のデータを用いて K_S などの長寿命粒子の飛跡を検出するためのソフトウェアの開発も進められている。

本研究室では、電子や γ を含む終状態のエネルギー測定で重要な役割を担う ECL (電磁カロリメータ) 検出器に関しても、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

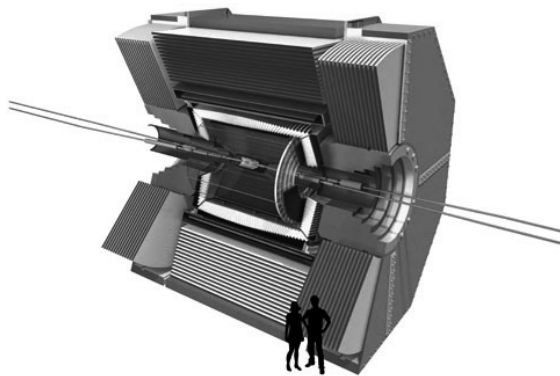


図 2.4.1: Belle II (ベルツー) 測定装置の完成予想図

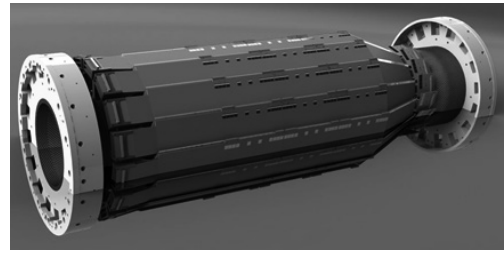


図 2.4.2: 本研究室で製作中の、Belle II SVD 測定器の完成予想図

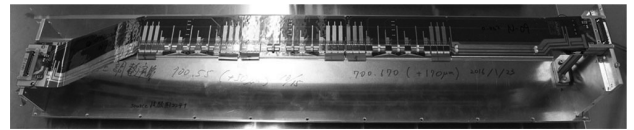


図 2.4.3: 本研究室を中心に製作した、Belle II SVD ラダーの量産 0 号機

出しエレクトロニクスの開発試験、およびシンチレータの試験を行っている。ECL 検出器のアップグレードオプションとして、使用する結晶を CsI(Tl) から、より時定数の短い pure CsI に取り換えることで更なる性能向上を目指す案がある。本研究室では様々な pure CsI 結晶サンプルや波長変換材を組み合わせて発光量や検出効率を測定し、さらに後段の Avalanche Photodiode 検出器 (APD) に接続される増幅回路の改良を含め、総合的な性能向上に取り組んでいる。本年度は、pure CsI 結晶と APD を用いたカウンターの試験を実施し、浜松ホトニクス社の S8664 シリーズの APD が実験に必要な光検出能力を有することを実証した。また、ナノ構造有機シリコン発光体を用いた波長変換材 (NOL-9) を用いることで飛躍的な性能向上ができることが判明した。これらの開発により、エネルギーに換算した雑音の大きさを 410 keV に抑えることに成功し、アップグレードのための要求を満たす性能を達成することができた。

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

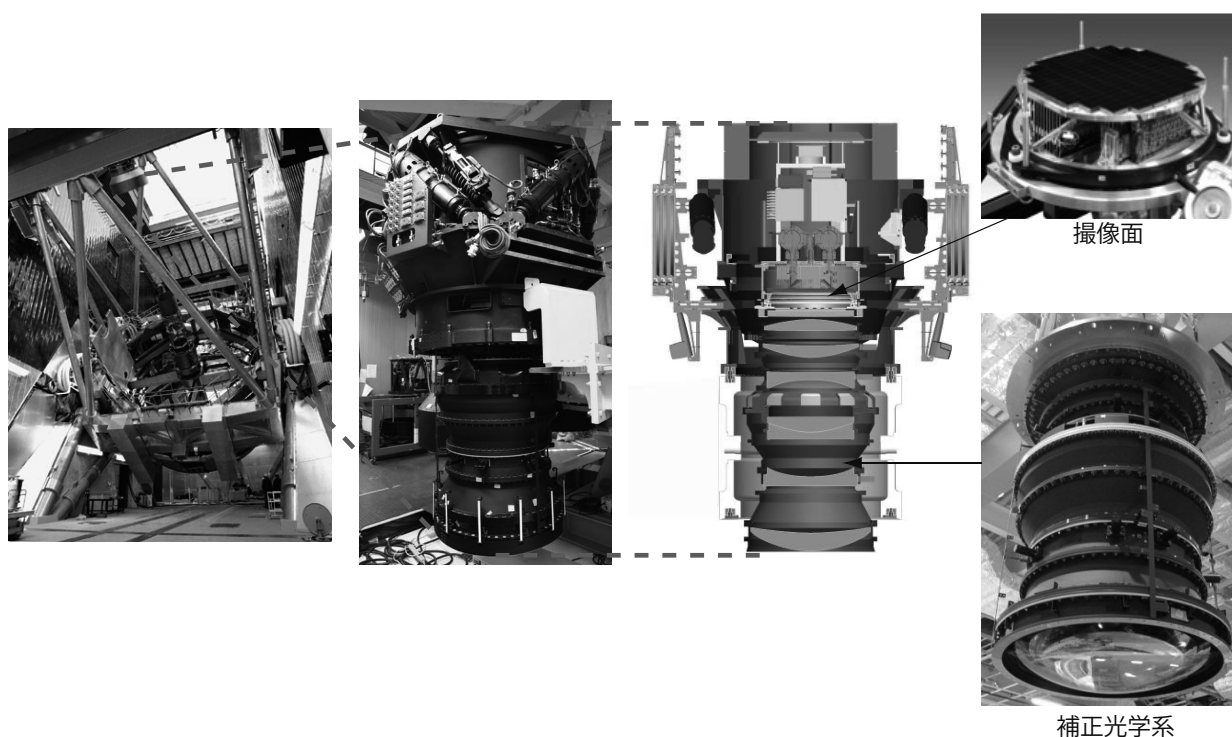


図 2.4.4: 完成した Hyper Suprime-Cam の概観。

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。

2015 年度は本格的な HSC の観測に先立ち、暗黒物質の性質の検証を目的とした、銀河団の重力レンズ効果を用いた新たな手法を開発した。銀河団は宇宙最大の自己重力天体であり、背景銀河像への重力レンズ効果の信号が最大であり、暗黒物質の性質を調べるには最善の天体である。HSC の先代である SC 主焦点カメラのデータに新手法を適用し、X 線光度で最も明るい、最大質量級の 50 個の銀河団について、重力レンズ解析を行った。その結果、冷たい暗黒物質を仮定した宇宙構造形成の標準模型が予想する「銀河団の質量プロファイルの普遍性」を有意(約 6σ)に検出することに世界で初めて成功した。つまり、銀河団の質量の大小に関わらず、暗黒物質の分布の特徴が相似的であることを観測的に確認できた。この新手法を、今後 HSC の観測で得られる、さらに多数の銀河団サンプルに適用することで、銀河団スケールでの暗黒物質の性質をより詳細に探ることができると考えている。

HSC の開発は 2012 年 8 月に完了し、2014 年 3 月より大規模サーベイ観測を開始している。HSC の概観を図 2.4.4 に示す。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

データの解析から復元した暗黒物質マップを図 2.4.5 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暗黒物質の正体に迫る物理結果を出していきたい。

2.4.3 加速器ニュートリノ実験

2015 年のノーベル物理学賞は、ニュートリノ振動の発見に対し与えられた。ニュートリノ振動は、素粒子の標準模型を超えるものとしてこれまで確立した唯一の現象であり、より根源的な原理を探求する上での手がかりとなると期待されている。また、ニュートリノ振動を利用することでレプトンの粒子-反粒子対称性(CP 対称性)の破れに関する研究が可能であり、宇宙の物質-反物質の非対称性の謎を解く鍵を与える可能性がある。

我々は、人工のニュートリノビームを用いてニュートリノ振動を精密に測定する、長基線ニュートリノ振動実験を行っている。また、ニュートリノ振動測定系の系統誤差を削減することを目的として、長基線ニュートリノ振動実験に関連した比較的小規模な実験の立案・遂行を行っている。

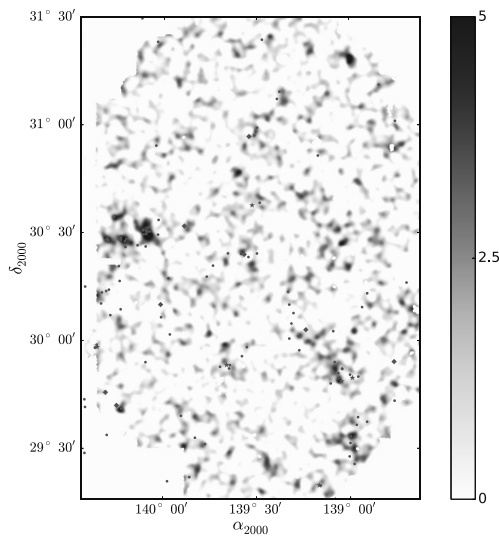


図 2.4.5: HSC の初期エンジニア観測による暗黒物質マップ ([45])。詳細な密度構造の復元に成功している。

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。

ニュートリノ振動の精密測定 これまでに、2013 年までに収集したすべてのデータを用いて解析を行い、ニュートリノ混合パラメータの精度の高い測定を行った。T2K 実験以前には測られていなかった、ニュートリノの CP 対称性の破れのパラメータ δ_{CP} に対しては、原子炉ニュートリノ実験からの θ_{13} に対する制限を用い、3 世代の標準的なニュートリノ混合行列を仮定したとき、正質量階層 (負質量階層) の場合 90% 信頼度で $0.15\pi < \delta_{CP} < 0.83\pi$ ($-0.08\pi < \delta_{CP} < 1.09\pi$) の領域を排除した。この結果は、ニュートリノ振動で CP 対称性が大きく破れている可能性を示唆しており、今後のニュートリノ研究の指針となる成果である。また、振動パラメータ $\sin^2 \theta_{23}$, $|\Delta m_{23}^2|$ に関して、初めてスーパーカミオカンデによる大気ニュートリノでの測定の精度を上回り、世界最高精度の測定を行っており、今後さらなる精密測定を目指す。

反ニュートリノビームによるニュートリノ振動測定 T2K 実験では、2014 年 6 月から反ニュートリノビームを用いた測定を開始した。ニュートリノの振動確率と、反ニュートリノの振動確率を比べることで、ニュートリノの CP 対称性の破れを直接的に検証する。ただし、T2K 実験のエネルギーでの反ニュートリノ

と物質の反応断面積はニュートリノに比べ 1/3-1/4 程度であるため、反ニュートリノモードの実験にはより多くのデータが必要となる。我々のグループは、反ニュートリノビームの安定的な生成、およびビームの品質の継続的な監視を行うための、ニュートリノビームのビーム軸上に置かれた前置検出器 (INGRID 検出器と呼ばれる) の運用の中核を担っている。

2015 年 5 月までのデータを解析した結果、反ミューオンニュートリノ反応の候補事象を 34 事象観測し、反ミューオンニュートリノ消失による振動パラメータ測定として、世界最高レベルの精度である、 $0.38 < \sin^2(\theta_{23}) < 0.64$, $2.26 \times 10^{-3} < |\Delta m_{32}^2| < 2.80 \times 10^{-3} (\text{eV}^2)$ [68% CL] という制限を得た。

今後は、さらに多くのデータを収集するとともに、ニュートリノビームと反ニュートリノビームのデータを合わせてニュートリノ振動の解析を行い、ニュートリノの CP 対称性の破れの探索など、ニュートリノの性質をさらに深く理解することでその先にあるより基礎的な物理の解明を目指す。

T2K phase II と前置検出器アップグレード T2K 実験グループでは、電子ニュートリノ出現の発見という成果をもとに、J-PARC のビーム強度を 1.3 MW 程度までアップグレードし、実験期間を延長するとともに、系統誤差の改善を行うことで、CP 非保存現象の探索をはじめとする、新たな物理に対する感度をさらに向上させることを検討している。特に、CP 非保存現象に関して、対称性の破れが比較的大きい場合、現在の見積もりでは 3σ 以上の有意度で観測が可能となる。2016 年 1 月に行われた J-PARC の実験プログラム諮問委員会 (PAC) に Expression of Interest を提出し、さらに具体的な提案に向けて検討を進めている。

また、この T2K Phase II と呼ばれる実験計画に関連して、前置ニュートリノ検出器を大幅にアップグレードすることを検討しており、現在、概念設計の検討と、物理感度の改善の見込みに関する研究を進めている。

水標的でのニュートリノ反応断面積測定実験 (WAGASCI 実験)

T2K 実験では前置検出器での測定によりニュートリノ-原子核反応断面積の系統誤差を削減しているが、1) スーパーカミオカンデが水、前置検出器では主にプラスチック (炭化水素) という標的原子核の違い、2) スーパーカミオカンデ (全方向) と前置検出器 (主にビームの方向) の角度アクセプタンスの違い、という検出器の違いにより主な系統誤差が生まれている。今後、T2K 実験でより多くのデータを蓄積するにつれ、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ニュートリノ振動測定の精度を制限することが予想される。そこで、我々のグループを中心に、この系統誤差を削減するための新しい実験を行おうとしている。

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



図 2.4.6: 製作中の WAGASCI モジュール。薄いプラスチックシンチレータを格子状に組んだ層と、平面的に並べた層を交互に並べた構造。シンチレータの間の空間に水を入れてニュートリノ反応の標的とする。

とを目標にした新実験の検討を 2013 年から開始し、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 2 種類の標的を持ち、かつ大角度まで高いアクセプトラ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計画を立案した。この実験を 2014 年 5 月に J-PARC でのテスト実験 (T59: 実験名 WAGASCI) として提案し、採択された。さらに、この標的モジュールの一部を先行して既存の T2K 前置検出器の上流に置き、性能評価とともにニュートリノ反応の研究を行う計画 (INGRID water module) も提案し、T2K 実験グループで認められた。

本年度は、以下の開発を行った。(1) 検出器で必要となる数千チャンネルの光検出器 MPPC の性能を測定するために、一度に 128 チャンネルを試験可能な評価システムの構築を行い、一部の MPPC の性能を測定した。(2) フランス・エコールポリテクニク大学と共同で、信号読み出し回路の開発・試験を行った。(3) 米国・フェルミ国立加速器研究所と共同で、3mm 厚のプラスチックシンチレータを開発・制作した。(4) フランス・エコールポリテクニク大学と共同で、標的部の設計を決定した。(5) 最初の標的部モジュールを実寸大プロトタイプとして制作し (図 2.4.6)、その性能を宇宙線等を用いて評価した。

2.4.4 陽子崩壊の探索

素粒子の標準模型は、近年の Higgs 粒子の発見に象徴されるように非常に成功した模型であるが、様々な未解決の謎を残しており、より基本的な物理法則を表す理論の低エネルギーでの有効理論であると考えられている。標準模型を超えた物理の理論として有力なものとして、「大統一理論」がある。大統一理論では、4 つの基本的な相互作用のうち、標準模型で統一された電磁相互作用と弱い相互作用に加え、 10^{16} GeV 程度の超高エネルギーで、さらに強い力も統一される。また、クォークとレプトンも統一される一方で、陽子の崩壊が予言される。陽子崩壊の探索は、大統一理論の唯一の直接的検証法である。

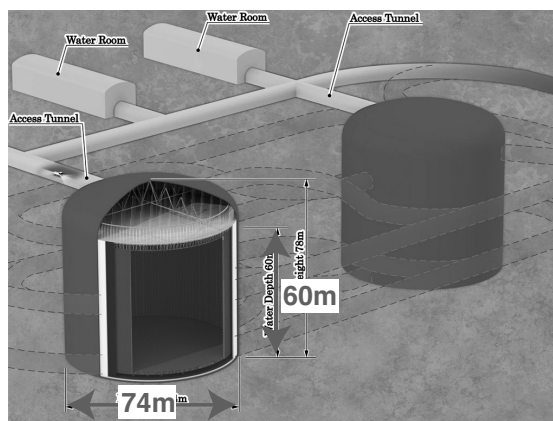


図 2.4.7: ハイパーカミオカンデ検出器の概念図。

我々の研究室では、スーパーカミオカンデのデータを用い、陽子崩壊を世界最高の感度で探索しようとしている。すべての光電子増倍管の情報を使う、新しい再構成ソフトウェアを開発することで、既存の解析よりも感度を向上させ、発見を目指す。新しい再構成アルゴリズムの性能を引き出すためには、光電子増倍管のゲインや水の透過率などの検出器の動作状況の時間変動を考慮する必要があるため、それらを宇宙線などの較正用データで評価・較正する作業を行った。さらに、陽子崩壊の主要なモードである $p \rightarrow e^+ \pi^0$ 崩壊に関する系統誤差の見積もりを進め、実データの解析に向けた準備を進めた。

2.4.5 次世代大型水チェレンコフ検出器・ハイパーカミオカンデ

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、非対称性の詳細な研究のためには 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より一桁大きなニュートリノ検出器、「ハイパーカミオカンデ」検出器 (図 2.4.7) 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、ニュートリノの CP 非対称性測定だけでなく、陽子崩壊の探索や、超新星からのニュートリノ検出などを世界最高感度で行うことのできる、宇宙と素粒子の分野にわたる幅広い研究を行うための実験装置である。

我々の研究室では、2009 年から宇宙線研、京都大学、名古屋大学などの国内関係者に呼びかけてワーキンググループを結成し研究を推進するとともに、ハイパーカミオカンデでの最も重要なテーマのひとつである、J-PARC 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きた。2014 年 5 月には、長基線ニュートリノ実験の提案書をまとめ、J-PARC Program Advisory

Committee に将来の実験 P58 として提案を行った。また、2015 年 1 月には、12 カ国から約 250 名が参加する国際共同実験グループが発足し、世界各国で実現に向けた研究を協力して進めている。本研究室では、物理感度研究のまとめ役を担うほか、計画の成否を決める基幹技術のひとつである新型光検出器の開発を行っている。

本年度は、J-PARC 加速器のビーム強度向上シナリオの改訂や、光電子増倍管の検出効率向上や耐圧の改善などの、近年の開発研究の成果を受けて、検出器の設計の最適化を行った。その結果、直径 74m、高さ 78m (水深 60m) の円筒型の空洞を二つ並べた構造 (図 2.4.7) を新たな基本設計として採用することとなった。光子の検出効率が約 2 倍に向上した光電子増倍管を、スーパーカミオカンデと同じ 40% の光電被覆率に敷き詰めることで、目標とする物理感度を達成するために必要となる体積を抑え、コストを最適化することに成功した。今後は、計画の実現に向け、開発・研究をさらに精力的に進めていく。

<受賞>

- [1] Masashi Yokoyama (as a member of K2K and T2K collaborations), Hiroaki Aihara, Yasutaka Kanazawa, Yusuke Suda and Jiayin Wang (as members of T2K collaborations), 2016 Breakthrough Prize for Fundamental Physics, Breakthrough Prize Foundation, November 8, 2015.

<報文>

(原著論文)

B ファクトリー関連

- [2] A. Garmash *et al.* [Belle Collaboration], “Amplitude analysis of $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(nS)\pi^+\pi^-$ at $\sqrt{s} = 10.865$ GeV,” *Phys. Rev. D* **91**, no. 7, 072003 (2015).
- [3] Y. M. Goh *et al.* [Belle Collaboration], “Search for the decay $B^+ \rightarrow \bar{K}^{*0}K^{*+}$ at Belle,” *Phys. Rev. D* **91**, no. 7, 071101 (2015).
- [4] L. Pesantez *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the direct CP asymmetry in $\bar{B} \rightarrow X_{s+d}\gamma$ decays with a lepton tag,” *Phys. Rev. Lett.* **114**, no. 15, 151601 (2015).
- [5] I. Jaegle [Belle Collaboration], “Search for the dark photon and the dark Higgs boson at Belle,” *Phys. Rev. Lett.* **114**, no. 21, 211801 (2015).
- [6] S.-K. Choi *et al.* [Belle Collaboration], “Measurements of $B \rightarrow \bar{D}D_{s0}^{*+}(2317)$ decay rates and a search for isospin partners of the $D_{s0}^{*+}(2317)$,” *Phys. Rev. D* **91**, no. 9, 092011 (2015). Erratum: [*Phys. Rev. D* **92**, no. 3, 039905 (2015)]
- [7] X. L. Wang *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\psi(2S)$ via Initial State Radiation at Belle,” *Phys. Rev. D* **91**, 112007 (2015).
- [8] A. Heller *et al.* [Belle Collaboration], “Search for $B^+ \rightarrow \ell^+\nu_\ell\gamma$ decays with hadronic tagging using the full Belle data sample,” *Phys. Rev. D* **91**, no. 11, 112009 (2015).

- [9] A. Vinokurova *et al.* [Belle Collaboration], “Search for B decays to final states with the η_c meson,” *JHEP* **1506**, 132 (2015).
- [10] B. Pal *et al.* [Belle Collaboration], “Evidence for the decay $B^0 \rightarrow \eta\pi^0$,” *Phys. Rev. D* **92**, no. 1, 011101 (2015).
- [11] Y. L. Han *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of $e^+e^- \rightarrow \gamma\chi_{cJ}$ via initial state radiation at Belle,” *Phys. Rev. D* **92**, no. 1, 012011 (2015).
- [12] D. Matvienko *et al.* [Belle Collaboration], “Study of D^{**} production and light hadronic states in the $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+}\omega\pi^-$ decay,” *Phys. Rev. D* **92**, no. 1, 012013 (2015).
- [13] A. Abdesselam *et al.* [BaBar and Belle Collaborations], “First Observation of CP Violation in $\bar{B}^0 \rightarrow D_{CP}^{(*)}h^0$ Decays by a Combined Time-Dependent Analysis of BABAR and Belle Data,” *Phys. Rev. Lett.* **115**, no. 12, 121604 (2015).
- [14] B. Kronenbitter *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the branching fraction of $B^+ \rightarrow \tau^+\nu_\tau$ decays with the semileptonic tagging method,” *Phys. Rev. D* **92**, no. 5, 051102 (2015).
- [15] U. Tamponi *et al.* [Belle Collaboration], “First observation of the hadronic transition $\Upsilon(4S) \rightarrow \eta h_b(1P)$ and new measurement of the $h_b(1P)$ and $\eta_b(1S)$ parameters,” *Phys. Rev. Lett.* **115**, no. 14, 142001 (2015).
- [16] C. Oswald *et al.* [Belle Collaboration], “Semi-inclusive studies of semileptonic B_s decays at Belle,” *Phys. Rev. D* **92**, no. 7, 072013 (2015).
- [17] M. Huschle *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the branching ratio of $\bar{B} \rightarrow D^{(*)}\tau^-\bar{\nu}_\tau$ relative to $\bar{B} \rightarrow D^{(*)}\ell^-\bar{\nu}_\ell$ decays with hadronic tagging at Belle,” *Phys. Rev. D* **92**, no. 7, 072014 (2015).
- [18] R. Seidl *et al.* [Belle Collaboration], “Inclusive cross sections for pairs of identified light charged hadrons and for single protons in e^+e^- at $\sqrt{s} = 10.58$ GeV,” *Phys. Rev. D* **92**, no. 9, 092007 (2015).
- [19] Y. Y. Chang *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of $B^0 \rightarrow p\bar{\Lambda}D^{(*)-}$,” *Phys. Rev. Lett.* **115**, no. 22, 221803 (2015).
- [20] M. Staric *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of D^0 - \bar{D}^0 mixing and search for CP violation in $D^0 \rightarrow K^+K^-, \pi^+\pi^-$ decays with the full Belle data set,” *Phys. Lett. B* **753**, 412 (2016).
- [21] D. Santel *et al.* [Belle Collaboration], “Measurements of the $\Upsilon(10860)$ and $\Upsilon(11020)$ resonances via $\sigma(e^+e^- \rightarrow \Upsilon(nS)\pi^+\pi^-)$,” *Phys. Rev. D* **93**, no. 1, 011101 (2016).
- [22] M. Masuda *et al.* [Belle Collaboration], “Study of π^0 pair production in single-tag two-photon collisions,” *Phys. Rev. D* **93**, no. 3, 032003 (2016).
- [23] P. Hamer *et al.* [Belle Collaboration], “Search for $B^0 \rightarrow \pi^-\tau^+\nu_\tau$ with hadronic tagging at Belle,” *Phys. Rev. D* **93**, no. 3, 032007 (2016).

- [24] Y. Sato *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the lepton forward-backward asymmetry in $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$ decays with a sum of exclusive modes,” *Phys. Rev. D* **93**, no. 3, 032008 (2016). Addendum: [*Phys. Rev. D* **93**, no. 5, 059901 (2016)]
- [25] V. Chobanova *et al.* [Belle Collaboration], “First observation of the decay $B^0 \rightarrow \psi(2S)\pi^0$,” *Phys. Rev. D* **93**, no. 3, 031101 (2016).
- [26] R. Glattauer *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the decay $B \rightarrow D\ell\nu_\ell$ in fully reconstructed events and determination of the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa matrix element $|V_{cb}|$,” *Phys. Rev. D* **93**, no. 3, 032006 (2016)
- [27] P. Vanhoefer *et al.* [Belle Collaboration], “Study of $B^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-$ decays and implications for the CKM angle ϕ_2 ,” *Phys. Rev. D* **93**, no. 3, 032010 (2016).
- [28] N. K. Nisar *et al.* [Belle Collaboration], “Search for the rare decay $D^0 \rightarrow \gamma\gamma$ at Belle,” *Phys. Rev. D* **93**, no. 5, 051102 (2016).
- [29] V. Bhardwaj *et al.* [Belle Collaboration], “Inclusive and exclusive measurements of B decays to χ_{c1} and χ_{c2} at Belle,” *Phys. Rev. D* **93**, no. 5, 052016 (2016).
- [30] S. Eidelman, D. Epifanov, M. Fael, L. Mercolli and M. Passera, “ τ dipole moments via radiative leptonic τ decays,” *JHEP* **1603**, 140 (2016).
- T2K/Super-K/Hyper-K 関連
- [31] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Neutrino oscillation physics potential of the T2K experiment,” *PTEP* **2015**, no. 4, 043C01 (2015).
- [32] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Measurements of neutrino oscillation in appearance and disappearance channels by the T2K experiment with 6.6×10^{20} protons on target,” *Phys. Rev. D* **91**, no. 7, 072010 (2015).
- [33] K. Suzuki *et al.*, “Measurement of the muon beam direction and muon flux for the T2K neutrino experiment,” *PTEP* **2015**, no. 5, 053C01 (2015).
- [34] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Measurement of the ν_μ charged current quasielastic cross section on carbon with the T2K on-axis neutrino beam,” *Phys. Rev. D* **91**, no. 11, 112002 (2015).
- [35] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Measurement of the electron neutrino charged-current interaction rate on water with the T2K ND280 π^0 detector,” *Phys. Rev. D* **91**, 112010 (2015).
- [36] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Measurement of the ν_μ charged-current quasielastic cross section on carbon with the ND280 detector at T2K,” *Phys. Rev. D* **92**, no. 11, 112003 (2015).
- [37] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Upper bound on neutrino mass based on T2K neutrino timing measurements,” *Phys. Rev. D* **93**, no. 1, 012006 (2016).
- [38] K. Choi *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Search for neutrinos from annihilation of captured low-mass dark matter particles in the Sun by Super-Kamiokande,” *Phys. Rev. Lett.* **114**, no. 14, 141301 (2015).
- [39] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “The Search for $n - \bar{n}$ oscillation in Super-Kamiokande I,” *Phys. Rev. D* **91**, 072006 (2015).
- [40] J. Gustafson *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Search for dinucleon decay into pions at Super-Kamiokande,” *Phys. Rev. D* **91**, no. 7, 072009 (2015).
- [41] V. Takhistov *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Search for Nucleon and Dinucleon Decays with an Invisible Particle and a Charged Lepton in the Final State at the Super-Kamiokande Experiment,” *Phys. Rev. Lett.* **115**, no. 12, 121803 (2015).
- [42] Y. Zhang *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “First measurement of radioactive isotope production through cosmic-ray muon spallation in Super-Kamiokande IV,” *Phys. Rev. D* **93**, no. 1, 012004 (2016)
- [43] K. Abe *et al.* [Hyper-Kamiokande Proto- Collaboration], “Physics potential of a long-baseline neutrino oscillation experiment using a J-PARC neutrino beam and Hyper-Kamiokande,” *PTEP* **2015**, 053C02 (2015).
- [44] K. Ieki *et al.* [DUET Collaboration], “Measurement of absorption and charge exchange of π^+ on carbon,” *Phys. Rev. C* **92**, 035205 (2015).
- HSC/PSF 関連
- [45] S. Miyazaki *et al.*, “Properties of Weak Lensing Clusters Detected on Hyper Suprime-Cam’s 2.3 deg² Field,” *Astrophys. J.* **807**, no. 1, 22 (2015).
- [46] H. Niikura, M. Takada, N. Okabe, R. Martino and R. Takahashi, “Detection of universality of dark matter profile from Subaru weak lensing measurements of 50 massive clusters,” *Publ. Astron. Soc. Jap.* **67**, 103 (2015).
- (会議抄録)
- [47] N. Chikuma *et al.*, “A new experiment at J-PARC to measure the neutrino cross section ratio between water and plastic,” proceedings of Flavor Physics and CP Violation 2015, *PoS FPCP* **2015**, 069 (2015).
- [48] Masashi Yokoyama, “Hyper-Kamiokande Project,” in proceedings of the Sixteenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, A. I. Studenikin (*ed.*), World Scientific.
- [49] C. Irmeler *et al.*, “Construction and test of the first Belle II SVD ladder implementing the origami chip-on-sensor design,” in Proceedings, Topical

- Workshop on Electronics for Particle Physics (TWEPP15) : Lisbon, Portugal, September 28 - October 02, 2015, JINST **11**, no. 01, C01087 (2016).
- [50] R. Thalmeier *et al.*, “EMC studies for the vertex detector of the Belle II experiment,” in Proceedings, Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (TWEPP15) : Lisbon, Portugal, September 28 - October 02, JINST **11**, no. 01, C01044 (2016).
- (国内雑誌)
- [51] 横山将志, 「ニュートリノ振動の発見が拓いた世界」, 『科学』 **85** (12), 1148 (2015).
- (学位論文)
- 修士論文
- [52] Yifan Jin, “Study of a scintillation counter consisting of a pure CsI crystal and APD,” Master’s thesis, September 2015
- [53] 竹馬匠泰, “Research and development of magnetized muon range detector and readout electronics for a neutrino cross section experiment,” 修士論文, 2016年3月
- [54] 細見郁直, “Characterization of Multi-Pixel Photon Counters for a new neutrino detector,” 修士論文, 2016年3月
- [55] 新倉広子, “Probing properties of dark matter with Subaru imaging data of massive clusters and Andromeda Galaxy,” 修士論文, 2016年3月
- <学術講演>
- (国際会議)
- ポスター発表
- [56] Nobuhiro Shimizu, “Monte Carlo study of the measurement of Michel Parameters in the radiative leptonic decay of tau,” Frontier Detectors for Frontier Physics:13th Pisa Meeting on Advanced Detectors, 24–30 May 2015.
- [57] Naruhiro Chikuma, “A new experiment at J-PARC to measure the neutrino cross section ratio between water and plastic,” Flavor Physics and CP Violation 2015, Nagoya, Japan, May 25–29, 2015.
- [58] Taichiro Koga, “New Water/Plastic Muon Neutrino Cross Section Ratio Measurement at J-PARC,” 10th International Workshop on Neutrino-Nucleus Interactions in the Few-GeV Region (NuInt15), Osaka, November 16–21, 2015.
- 一般講演
- [59] Ian J. Watson, “Measurement of ϕ_3 by the GGSZ Method at Belle 2,” 2nd B2TIP (Belle 2 Theory Interface Platform) Workshop, Krakow, Poland, 27–29 April, 2015.
- [60] Taichiro Koga, “Precision neutrino cross section measurements and modeling for long-baseline oscillation experiments,” 4th Joint workshop of the France-Japan and France-Korea International Associated Particle Physics Laboratories, Okinawa, May 20–22, 2015.
- [61] Fuminao Hosomi, “Performance test of new MPPC for a new neutrino detector WAGASCI,” PhotoDet 2015, Moscow, Russia, July 6–9, 2015.
- [62] Denis Epifanov, “Study of scintillation counter consisting of a pure CsI crystal and APD,” *ibid.*
- [63] Denis Epifanov, “Recent results from Belle,” 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, August 20–26, 2015, Moscow State University, Moscow, Russia.
- [64] Nobuhiro Shimizu, “Search for the New Physics with decay of tau into leptons at B factory,” 5th KEK Flavor Factory Workshop, Tokyo, October 26–27, 2015.
- [65] Masashi Yokoyama, “Hyper-Kamiokande,” Prospects in Neutrino Physics (NuPhys 2015), London, UK, December 16–18, 2015.
- [66] Taichiro Koga, “Neutrino experiments and detectors at J-PARC near detector hall,” 7th Asian Forum for Accelerators and Detectors, Kyoto, February 1–3, 2016.
- 招待講演
- [67] Masashi Yokoyama, “Study of neutrino oscillations in the T2K experiment and development of new neutrino detectors,” 10th anniversary of JSPS-RFBR cooperative program symposium, Moscow, Russia, October 21, 2015.
- (国内会議)
- ポスター発表
- [68] 婁天濛, 「MPPCとシンチレータアレイを用いた宇宙線の三次元検出」, 高エネルギー物理 春の学校 2015, 滋賀県大津市, 2015年6月10日–12日.
- 一般講演
- [69] 佐々木淳弥, 「Belle II 実験用シリコン崩壊点検出器プロトタイプラダーの放射線照射試験による性能評価」, 高エネルギー物理 春の学校 2015, 滋賀県大津市, 2015年6月10日–12日.
- [70] 新倉広子, 「銀河団の重力レンズ質量密度プロファイルの普遍性の検出」(a3) 第45回天文・天体物理若手夏の学校 2015年7月27日–30日.
- [71] 新倉広子, 高田昌広, 岡部信広, Rosella Martino, 高橋龍一「銀河団の重力レンズ質量密度プロファイルの普遍性の検出」(T10a) 日本天文学会 2015年秋季年会 2015年9月9日–11日.
- [72] 須田祐介, 「Super-Kamiokande 実験での陽子崩壊探索感度向上のための研究」, 日本物理学会 2015年秋季大会, 大阪市立大学, 2015年9月25–28日.

- [73] 佐々木淳弥, 「Belle 実験におけるタウ粒子の五体レプトン (3 荷電レプトンと 2 ニュートリノ) 崩壊分岐比測定における研究」, 同上.
- [74] 細見郁直, 「WAGASCI 検出器のためのクロストーク抑制型 MPPC の大量試験」, 同上.
- [75] 清水信宏, 「タウの radiative leptonic decay を用いたミシエルパラメータの測定」, Flavor Physics Workshop 2015, 静岡県沼津市, 2015 年 10 月 6 日-9 日.
- [76] 須田祐介, 「スーパーカミオカンデにおける陽子崩壊探索—最新結果と将来に向けた改善—, ニュートリノフロンティアの融合と進化 2015, 静岡県熱海市, 2015 年 12 月 1 日-3 日.
- [77] 古賀太一郎, 「新ニュートリノ測定器 WAGASCI」, 同上.
- [78] 細見郁直, 「WAGASCI 検出器のための MPPC の大量試験と性能評価」, 第 22 回素粒子物理国際研究センターシンポジウム, 白馬, 2016 年 2 月 28 日-3 月 2 日.
- [79] 婁天濛, 「ハイパーカミオカンデに向けた大口径ハイブリッド型光検出器の低ノイズ読み出し開発と性能評価」, 同上.
- [80] 新倉広子, 「アンドロメダ銀河の HSC 観測による原始ブラックホール探索」 HSC 時間領域天文学 (TDA) ブレインストーミング研究会, 2016 年 3 月 4-5 日.
- [81] 細見郁直, 「WAGASCI 検出器のための MPPC の大量試験と性能評価」, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 19-22 日.
- [82] 婁天濛, 「ハイパーカミオカンデに向けた大口径ハイブリッド型光検出器の低ノイズ読み出し実現と性能評価」, 同上.
- [83] 竹馬匠泰, 「新ニュートリノ検出器 WAGASCI における光検出器読み出しエレクトロニクスの研究開発」, 同上.
- [84] 古賀太一郎, 「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反応断面積測定のための新検出器 INGRIDWaterModule の建設」, 同上.
- 招待講演
- [85] 横山将志, 「ニュートリノの物理」, Flavor Physics Workshop 2015, 静岡県沼津市, 2015 年 10 月 6 日-9 日.
- [86] M.Yokoyama, “Hyper-KamiokaNDE,” 7th New Physics Forum, University of Tokyo, November 9, 2015.
- (セミナー, その他)
- [87] Masashi Yokoyama, “Hyper-Kamiokande: goals, status and prospects,” SPP Seminar, CEA-Saclay, France, April 30, 2015.
- [88] Ian J. Watson, “Australia, Life as a Researcher, Particle Physics, and the Belle Detector,” JSPS Science Dialogue program at Jishukan Senior High School, September 27, 2015.
- [89] Hiroko Niikura, “Universality of dark matter profiles with weak lensing measurements with clusters,” Astro Lunch Seminar, Kavli IPMU, October 20, 2015.
- [90] 相原博昭, 「環境安全・安全衛生の社会的・科学的位置づけ」 2015 年度 学術フロンティア講義「環境安全衛生入門」第 2 回, 東京大学, 2015 年 4 月 15 日.
- [91] 相原博昭, 「高校卒業後 40 年 —ある学者の場合—」, 平成 27 年主要大学説明会基調講演, 東京ビッグサイト, 2015 年 8 月 11 日.
- [92] 相原博昭, 「暗黒宇宙の謎と素粒子物理」, 平成 27 年度サイエンスカフェ, 奇石博物館 (静岡県富士宮市), 2015 年 9 月 27 日.
- [93] 相原博昭, 「反物質の物理 —宇宙のでき方を研究する—」, 第 25 回東京大学環境安全研究センターシンポジウム, 2015 年 12 月 24 日.
- [94] 相原博昭, 「ビッグサイエンスの挑戦 —文化と技術革新を牽引する—」, 中植資本・与大師の対話, 2016 年 1 月 14 日.
- [95] Hiroaki Aihara, “U.S.-Japan Cooperation in Big Science and Technology — Past, Present and Future —,” US-Japan Political Leader’s Forum on Advanced Science and Technology — Enhancing US-Japan Alliance through Science and Technology—, February 11, 2016, Rayburn House Office Building, Washington DC, U.S.A.

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、2015 年に LHC 加速器は重心系エネルギーが 13TeV に増強されて運転を再開した。2015 年は、積算ルミノシティで約 $4fb^{-1}$ の実験データが得られ、本研究室は、ヒッグス粒子の発見につづいて、超対称性粒子の探索、及び、標準理論を超えた新しい素粒子現象の探索を行っている。

750GeV 付近に新現象?

高い横方向運動量を持つ光子を 2 つ要求し、二光子の不変質量分布を図 2.5.2 に示す。ヒッグス粒子の



図 2.5.1: LHC 加速器

125GeV 以外に、750GeV 付近に小さなエクセスが観測された。図 2.5.3 は、95%CL の断面積*崩壊分岐比の制限に焼き直したものであり、スカラー粒子が二光子に崩壊していると仮定している。750GeV の超過は、 4σ 弱であるが、Look Elsewhere Effect をいれると、まだ 2σ 程度であり、まだ統計的なふらつきの可能性もあり、2016 年のデータが重要な役割を果たす。まだ統計的に不十分であるので、何も言えないが、エクセスの幅が期待より広く、本研究室はこの研究を重点的に行っている。

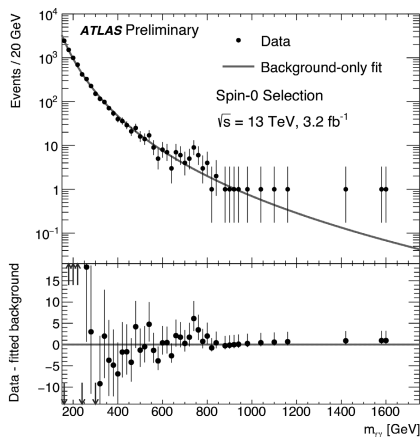


図 2.5.2: 2 光子の不変質量分布

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。ヒッグス粒子の質量 125GeV をうけて、naturalness などを一部緩和しなおして超対称性粒子発見可能な探索モードの再考を行い、以下の 3 つのモードに絞って、研究を行っている。

1. グルイーノ の対生成から生成する 4 ジェット事象
2. スカラートップクォークの対生成
3. 電弱ゲージノが Wino だったときの異常な飛跡

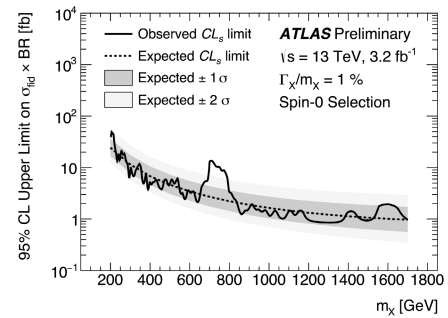


図 2.5.3: 横軸は、二光子の不変質量、縦軸は、95%CL の断面積*崩壊分岐比。点線はバックグラウンドから期待される感度の上限を示し、2 色の帯は、それぞれ $1, 2\sigma$ の統計・系統誤差をいれた幅を示している。実線は、2015 年の観測データを示している。

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 (m_{ET} 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 m_{ET} 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、 m_{ET} 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。グルイーノ探索は、これに加えて、事象の立体的な情報を用いて、これまでの発見感度を 25% から 50% 高める事ができた。図 2.5.4 は、2015 年度の結果 (M_{eff} 分布) を示す。まだ有意な超過が観測されていない。これから、グルイーノについて約 1.5TeV の質量下限が得られた。図 2.5.5 に、棄却した領域を、グルイーノ質量と一番軽い超対称性粒子 (ニュートラリーノ) 質量平面で示している。

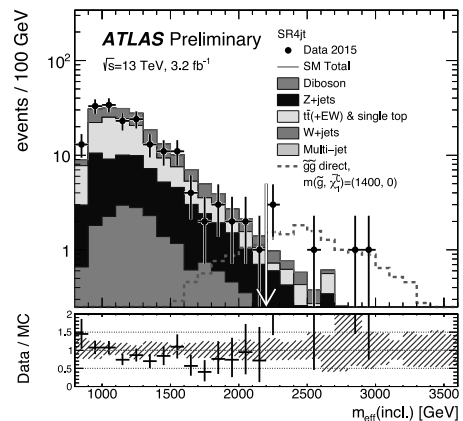


図 2.5.4: レプトンを含まない超対称性探索モードで期待される横方向消失運動量とジェットの横運動量のスカラー和分布 (M_{eff}): 共に黒点が 2015 年度実験したデータ、実線ヒストグラムがバックグラウンド (標準モデル過程)、点線が期待される信号

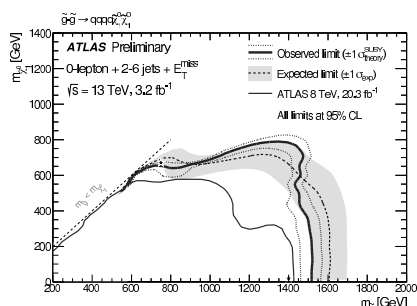


図 2.5.5: グリーノとニュートラリーノの質量平面で棄却された領域赤線の左側が今回棄却した領域 (95%CL)

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。

ポジトロニウムの超微細構造の測定

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

Ps HFS の値は束縛系 QED を検証する上で重要であり、過去に多くのグループによって測定され、理論計算値とズレがあった。本研究室では、「Ps に 203GHz のミリ波を直接照射して遷移を起こす世界初の方法」と、「Ps のゼーマン分裂幅を、時間発展まで考慮して精密測定する方法」の 2 種類の方法で測定した。その結果、前者は [141] に取り上げられる成果を挙げ、また後者はズレの原因がポジトロニウムの熱化にあったことを特定した。後者の熱化測定の詳細は [3] で報告した。現在、後者の精度を一桁上げる計画を検討している。

ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却

ポジトロニウムはボース粒子であるため、冷却するとボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) を起こすと考えられる。Ps の質量が約 1 MeV と非常に軽いため、10 K 程度の比較的高い温度で BEC を起こすと予想される。もし Ps BEC が実現できた場合、

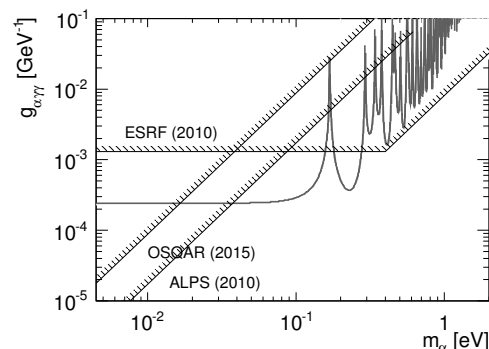


図 2.5.6: 得られた結合定数の上限 (実線) と既存の上限 (ハッチ) [106]

重力の研究や物質と反物質の対称性の研究、ガンマ線レーザーなどの多くの応用が期待できる。ただし、ポジトロニウムの寿命が 100 ns 程度しか無いため、短時間に冷却と高密度化を行う必要があり、この困難さからいまだに実現されていない。本研究室では、ポジトロニウムの熱化とレーザー冷却を組み合わせることを [1] で提案し、冷却用レーザーシステムを設計した。このレーザーシステムは五神研究室と共同で開発しており、現在、729 nm のシード光を ECDL を用いて製作している。また、最初のステップとして 100 K までのポジトロニウムの熱化測定を行うとともに、冷却ポジトロニウムの温度をレーザーを用いて測定するための装置を検討している。さらに、産総研と協力して高密度陽電子ビームの開発を開始した。

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、X 線 \rightarrow 弱結合未知粒子 \rightarrow X 線の変換を行う “Light Shining through a Wall” (LSW) と呼ばれる手法で、アクシオンなどの弱結合未知粒子を探索している。X 線と未知粒子の変換は強磁場の印加により行うが、この印加磁場の強度が探索感度を決める。本研究室の実験では、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。そのために 10 T, 0.2 Hz, 0.8 m の超高線り返し長尺パルス磁場システムを開発した。11 月に SPring-8 のビームライン、BL19LXU で最初の探索を行い、二光子との結合定数に対し、未知粒子質量 0.1 eV 以下の領域において、 $2.51 \times 10^{-4} \text{ GeV}^{-1}$ (95% C.L.) の制限を得 (図 2.5.6)、先行実験による制限を 5.1 倍更新した。今後、磁石を改良して SACLA での本測定に入る。

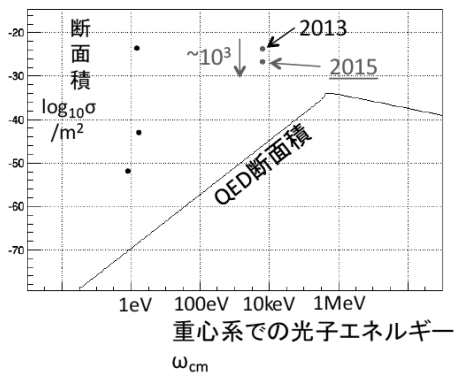


図 2.5.7: 得られた断面積の上限と既存の上限、理論予想値 [135]

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、散乱することが予言されている。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。X 線光学系及び SACLA のアップグレードを行って測定した結果、 3.7×10^6 パルスの衝突で散乱光が観測されなかった事から、重心系エネルギー 6.5 keV において、 $1.9 \times 10^{-27} \text{ m}^2$ (95% C.L.) の制限を得た (図 2.5.7)。これにより、2013 年のわれわれの実験によって得られた制限を 3 桁更新する事ができた。今後更に感度を向上させるため、二色発振を利用することを考えており、設計を進めている。

高フィネス共振器とパルス磁石を用いた真空複屈折の探索

QED で予言されている強場下の物理として、真空の複屈折が挙げられる。真空に強い磁場を掛けると、仮想電子対の分極を通して屈折率が異方性を持ち、光の偏光状態が変化すると予想される。先述のパルス磁石と赤外レーザーを用いて真空複屈折を探索する事を計画しているが、感度向上のためには高フィネスのファブリ・ペロー共振器を用いて光路長を稼ぐ事が重要となる。パルス磁石の振動があるため、外乱に強い自発共鳴型の共振器を五神研究室と共同で開発している。今年度は本番の 1/10 のフィネス $\sim 30,000$ 用のミラーを使ってプロトタイプ共振器を製作し、24 時間の安定共振を確認した。また磁石と組み合わせた状態でフィネス $\sim 30,000$ が得られた。今後はこのプロトタイプ共振器を用いた He の複屈折測定によって装置のスタディを行った後、フィネス $\sim 300,000$ の共振器を作成して真空複屈折の探索を行う。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] K. Shu, X. Fan, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, K. Yoshioka and M. Kuwata-Gonokami, “Study on Cooling of Positronium for Bose-Einstein Condensation”, Accepted for publication in J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. (arXiv:1511.07924 (2015)).
- [2] The ALPHA Collaboration, “An improved limit on the charge of antihydrogen from stochastic acceleration”, Nature 529, 373 (2016).
- [3] A. Ishida, T. Namba and S. Asai, “Measurement of positronium thermalization in isobutane gas for precision measurement of ground-state hyperfine splitting”, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 49, 064008 (2016).

The ATLAS Collaboration

- [4] “Measurement of the charge asymmetry in highly boosted top-quark pair production in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collision data collected by the ATLAS experiment”, Phys. Lett. B 756, 52 (2015).
- [5] “Search for new phenomena with photon+jet events in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 03, 041 (2015).
- [6] “Combination of searches for WW , WZ , and ZZ resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 755, 285 (2015).
- [7] “Search for strong gravity in multijet final states produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector at the LHC”, J. High Energy Phys. 03, 026 (2015).
- [8] “Search for New Phenomena in Dijet Mass and Angular Distributions from pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 754, 302 (2015).
- [9] “Measurement of the dependence of transverse energy production at large pseudorapidity on the hard-scattering kinematics of proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV with ATLAS”, Phys. Lett. B 756, 10 (2015).
- [10] “A search for prompt lepton-jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 02, 062 (2015).
- [11] “Evidence for single top-quark production in the s -channel in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector using the Matrix Element Method”, Phys. Lett. B 756, 228 (2015).
- [12] “Dijet production in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with large rapidity gaps at the ATLAS experiment”, Phys. Lett. B 754, 214 (2015).
- [13] “Measurement of the correlations between the polar angles of leptons from top quark decays in the helicity basis at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 93, 012002 (2015).

- [14] “Measurement of the production cross-section of a single top quark in association with a W boson at 8 TeV with the ATLAS experiment”, J. High Energy Phys. 01, 064 (2015).
- [15] “Measurement of the differential cross-section of highly boosted top quarks as a function of their transverse momentum in $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collisions using the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 93, 032009 (2015).
- [16] “Search for the production of single vector-like and excited quarks in the Wt final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 02, 110 (2015).
- [17] “Measurements of four-lepton production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 753, 552 (2015).
- [18] “Measurements of four-jet differential cross sections in $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collisions using the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 12, 105 (2015).
- [19] “Search for the electroweak production of supersymmetric particles in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 93, 052002 (2015).
- [20] “Search for flavour-changing neutral current top quark decays $t \rightarrow Hq$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 12, 061 (2015).
- [21] “Measurement of the $t\bar{t}W$ and $t\bar{t}Z$ production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 11, 172 (2015).
- [22] “Measurement of jet charge in dijet events from $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 93, 052003 (2015).
- [23] “Search for direct top squark pair production in final states with two tau leptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector. Search for direct scalar top pair production in final states with two tau leptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 76, 81 (2015).
- [24] “Search for pair production of a new heavy quark that decays into a W boson and a light quark in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 92, 112007 (2015).
- [25] “Constraints on new phenomena via Higgs boson couplings and invisible decays with the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 11, 206 (2015).
- [26] “Search for a high-mass Higgs boson decaying to a W boson pair in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 01, 032 (2015).
- [27] “Search for single top-quark production via flavour changing neutral currents at 8 TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 76, 55 (2015).
- [28] “Search for invisible decays of a Higgs boson using vector-boson fusion in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 01, 172 (2015).
- [29] “Measurements of fiducial cross-sections for $t\bar{t}$ production with one or two additional b -jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 76, 11 (2015).
- [30] “Summary of the ATLAS experiment’s sensitivity to supersymmetry after LHC Run 1 - interpreted in the phenomenological MSSM”, J. High Energy Phys. 10, 134 (2015).
- [31] “Search for flavour-changing neutral current top-quark decays to qZ in pp collision data collected with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 8$ TeV”, Eur. Phys. J. C 76, 12 (2015).
- [32] “Searches for scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 76, 1 (2015).
- [33] “Search for lepton-flavour-violating $H \rightarrow \mu\tau$ decays of the Higgs boson with the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 11, 211 (2015).
- [34] “Constraints on non-Standard Model Higgs boson interactions in an effective Lagrangian using differential cross sections measured in the $H \rightarrow \gamma\gamma$ decay channel at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 753, 69 (2015).
- [35] “Measurement of transverse energy-energy correlations in multi-jet events in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector and determination of the strong coupling constant $\alpha_s(m_Z)$ ”, Phys. Lett. B 750, 427 (2015).
- [36] “Determination of the ratio of b -quark fragmentation fractions f_s/f_d in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. Lett. 115, 262001 (2015).
- [37] “Measurement of the branching ratio $\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0)/\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda^0)$ with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 751, 63 (2015).
- [38] “Study of the $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ and $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ decays with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 76, 1 (2015).
- [39] “ Z boson production in p +Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV measured with the ATLAS detector”, Phys. Rev. C 92, 044915 (2015).
- [40] “Search for an additional, heavy Higgs boson in the $H \rightarrow ZZ$ decay channel at $\sqrt{s} = 8$ TeV in pp collision data with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 76, 45 (2015).
- [41] “Summary of the searches for squarks and gluinos using $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS experiment at the LHC”, J. High Energy Phys. 10, 054 (2015).

- [42] “Search for photonic signatures of gauge-mediated supersymmetry in 8 TeV pp collisions with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 92, 072001 (2015).
- [43] “Measurements of the Higgs boson production and decay rates and coupling strengths using pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV in the ATLAS experiment”, Eur. Phys. J. C 76, 6 (2015).
- [44] “Determination of the top-quark pole mass using $t\bar{t} + 1$ -jet events collected with the ATLAS experiment in 7 TeV pp collisions”, J. High Energy Phys. 10, 121 (2015).
- [45] “ATLAS Run 1 searches for direct pair production of third-generation squarks at the Large Hadron Collider”, Eur. Phys. J. C 75, 510 (2015).
- [46] “Measurement of the production of neighbouring jets in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 751, 376 (2015).
- [47] “Measurement of exclusive $\gamma\gamma \rightarrow \ell^+\ell^-$ production in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 749, 242 (2015).
- [48] “Study of $(W/Z)H$ production and Higgs boson couplings using $H \rightarrow WW^*$ decays with the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 08, 137 (2015).
- [49] “Search for heavy Majorana neutrinos with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV”, J. High Energy Phys. 07, 162 (2015).
- [50] “Search for the associated production of the Higgs boson with a top quark pair in multilepton final states with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B 749, 519 (2015).
- [51] “Study of the spin and parity of the Higgs boson in diboson decays with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 75, 476 (2015).
- [52] “Modelling $Z \rightarrow \tau\tau$ processes in ATLAS with τ -embedded $Z \rightarrow \mu\mu$ data”, J. Instrum. 10, P09018 (2015).
- [53] “Measurement of colour flow with the jet pull angle in $t\bar{t}$ events using the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 8$ TeV”, Phys. Lett. B 750, 475 (2015).
- [54] “Search for metastable heavy charged particles with large ionisation energy loss in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS experiment”, Eur. Phys. J. C 75, 407 (2015).
- [55] “Measurement of the top quark pair production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in the $\ell + \tau$ channel and of the top quark branching ratios into channels with leptons and quarks with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 92, 072005 (2015).
- [56] “Search for type-III Seesaw heavy leptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector”, Phys. Rev. D 92, 032001 (2015).
- [57] “Search for heavy lepton resonances decaying to a Z boson and a lepton in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 09, 108 (2015).
- [58] “Search for Higgs boson pair production in the $b\bar{b}b\bar{b}$ final state from pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 75, 412 (2015).
- [59] “Search for Dark Matter in Events with Missing Transverse Momentum and a Higgs Boson Decaying to Two Photons in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector”, Phys. Rev. Lett. 115, 131801 (2015).
- [60] “Search for high-mass diboson resonances with boson-tagged jets in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 12, 55 (2015).
- [61] “Measurement of differential J/ψ production cross-sections and forward–backward ratio in p+Pb collisions with the ATLAS detector”, Phys. Rev. C 92, 034904 (2015).
- [62] “Search for new light gauge bosons in Higgs boson decays to four-lepton final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector at the LHC”, Phys. Rev. D 92, 092001 (2015).
- [63] “A search for $t\bar{t}$ resonances using lepton-plus-jets events in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 08, 148 (2015).
- [64] “Search for production of vector-like quark pairs and of four top quarks in the lepton-plus-jets final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 08, 105 (2015).
- [65] “Search for Higgs bosons decaying to aa in the $\mu\mu\tau\tau$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS experiment”, Phys. Rev. D 92, 052002 (2015).
- [66] “Measurements of the Total and Differential Higgs Boson Production Cross Sections Combining the $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ Decay Channels at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector”, Phys. Rev. Lett. 115, 091801 (2015).
- [67] “Search for high-mass diphoton resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 92, 032004 (2015).
- [68] “Search for massive, long-lived particles using multitrack displaced vertices or displaced lepton pairs in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 92, 072004 (2015).
- [69] “Analysis of events with b -jets and a pair of leptons of the same charge in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 10, 150 (2015).

- [70] “Search for invisible decays of the Higgs boson produced in association with a hadronically decaying vector boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* 75, 337 (2015).
- [71] “Measurement of charged-particle spectra in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector at the LHC”, *J. High Energy Phys.* 09, 050 (2015).
- [72] “Measurement of the top pair production cross-section in 8 TeV proton–proton collisions using kinematic information in the lepton+jets final state with ATLAS”, *Phys. Rev. D* 91, 112013 (2015).
- [73] “Search for heavy long-lived multi-charged particles in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV using the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* 75, 362 (2015).
- [74] “Search for long-lived, weakly interacting particles that decay to displaced hadronic jets in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, *Phys. Rev. D* 92, 012010 (2015).
- [75] “Search for New Phenomena in Dijet Angular Distributions in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV Measured with the ATLAS Detector”, *Phys. Rev. Lett.* 114, 221802 (2015).
- [76] “Search for low-scale gravity signatures in multi-jet final states with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 8$ TeV”, *J. High Energy Phys.* 07, 032 (2015).
- [77] “Search for a new resonance decaying to a W or Z boson and a Higgs boson in the $\ell\ell/\ell\nu/\nu\nu+b\bar{b}$ final states with the ATLAS Detector”, *Eur. Phys. J. C* 75, 263 (2015).
- [78] “Combined Measurement of the Higgs Boson Mass in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the ATLAS and CMS Experiments”, *Phys. Rev. Lett.* 114, 191803 (2015).
- [79] “Measurement of the top quark mass in the $t\bar{t} \rightarrow$ lepton + jets and $t\bar{t} \rightarrow$ dilepton channels using $\sqrt{s} = 7$ TeV ATLAS data”, *Eur. Phys. J. C* 75, 330 (2015).
- [80] “Search for vector-like B quarks in events with one isolated lepton, missing transverse momentum and jets at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, *Phys. Rev. D* 91, 112011 (2015).
- [81] “Search for the Standard Model Higgs boson produced in association with top quarks and decaying into $b\bar{b}$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* 75, 349 (2015).
- [82] “Search for production of WW/WZ resonances decaying to a lepton, neutrino and jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* 75, 209 (2015).
- [83] “Search for a Charged Higgs Boson Produced in the Vector-boson Fusion Mode with Decay $H^\pm \rightarrow W^\pm Z$ using pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Experiment”, *Phys. Rev. Lett.* 114, 231801 (2015).
- [84] “Search for a Heavy Neutral Particle Decaying to $e\mu$, $e\tau$, or $\mu\tau$ in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector”, *Phys. Rev. Lett.* 115, 031801 (2015).
- [85] “Measurement of the forward-backward asymmetry of electron and muon pair-production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, *J. High Energy Phys.* 09, 049 (2015).
- [86] “Determination of spin and parity of the Higgs boson in the $WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ decay channel with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* 75, 231 (2015).
- [87] “Search for supersymmetry in events containing a same-flavour opposite-sign dilepton pair, jets, and large missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* 75, 318 (2015).
- [88] “Evidence of $W\gamma\gamma$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV and limits on anomalous quartic gauge couplings with the ATLAS detector”, *Phys. Rev. Lett.* 115, 031802 (2015).
- [89] “Constraints on the off-shell Higgs boson signal strength in the high-mass ZZ and WW final states with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* 71, 335 (2015).
- [90] “Two-particle Bose–Einstein correlations in pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 7 TeV measured with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* 75, 466 (2015).
- [91] “A search for high-mass resonances decaying to $\tau^+\tau^-$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, *J. High Energy Phys.* 07, 157 (2015).
- [92] “Differential top–antitop cross-section measurements as a function of observables constructed from final-state particles using pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in the ATLAS detector”, *J. High Energy Phys.* 06, 100 (2015).
- [93] “Search for massive supersymmetric particles decaying to many jets using the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV”, *Phys. Rev. D* 91, 112016 (2015).
- [94] “Search for a CP-odd Higgs boson decaying to Zh in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, *Phys. Lett. B* 744, 163-183 (2015).
- [95] “Search for new phenomena in final states with an energetic jet and large missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* 75, 299 (2015).

- [96] “Observation of top-quark pair production in association with a photon and measurement of the $t\bar{t}\gamma$ production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector”, Phys. Rev. D 91, 072007 (2015).
- [97] “Measurement of the charge asymmetry in dileptonic decays of top quark pairs in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 05, 061 (2015).
- [98] “Search for direct pair production of a chargino and a neutralino decaying to the 125 GeV Higgs boson in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 75, 208 (2015).
- [99] “Evidence for the Higgs-boson Yukawa coupling to tau leptons with the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 04, 117 (2015).
- [100] “Search for pair-produced long-lived neutral particles decaying in the ATLAS hadronic calorimeter in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV”, Phys. Lett. B 743, 15 (2015).
- [101] “Search for squarks and gluinos in events with isolated leptons, jets and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector”, J. High Energy Phys. 04, 116 (2015).
- [102] “Search for Higgs and Z Boson Decays to $J/\psi\gamma$ and $\Upsilon(nS)\gamma$ with the ATLAS Detector”, Phys. Rev. Lett. 114, 121801 (2015).
- [103] “Search for Scalar-Charm Pair Production in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector”, Phys. Rev. Lett. 114, 161801 (2015).
- (会議抄録)
- [104] A. Ishida, “New Precise Measurement of the Hyperfine Splitting of Positronium”, J. Phys. Chem. Ref. Data 44, 031212 (2015).
- (国内雑誌)
- [105] 山崎高幸, 山道智博, 稲田聡明, X線自由電子レーザーを用いて真空を探る, 高エネルギーニュース 34(2015)97.
- (学位論文)
- [106] 稲田聡明, “Search for axion-like particles using strong pulsed magnets at SPring-8”, 博士論文 (2016).
- [107] 齊藤 真彦, “LHC/ATLAS 実験における消失飛跡を用いた超対称性粒子探索”, 修士論文 (2015).
- [108] 西澤 祐一, “ATLAS 検出器を用いた重い Diboson 共鳴の多変量解析による探索”, 修士論文 (2015).
- (著書)
- [109] 浅井祥仁「LHC の物理—ヒッグス粒子発見とその後の展開—」 基本法則から読み解く物理学最前線 第7巻 共立出版
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [110] S. Asai, “SUSY Search@LHC”, 27th Rencontres de Blois Particle Physics and Cosmology, June 2015 France
- [111] A. Ishida, “New Measurements of the Positronium Hyperfine Splitting”, The XVIII International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics (POSMOL2015), July 19, 2015, Lisboa, Portugal.
- [112] A. Ishida, “Precision measurement of the hyperfine splitting of positronium”, International Conference on Precision Physics and Fundamental Physical Constants (FFK-2015), October 12, 2015, Budapest, Hungary.
- [113] S. Asai, “The Latest results of LHC Run2, New scalar ϕ (750) ??? Where is the Supersymmetry?”, LEAP2016, March 2016, Japan
- 一般講演
- [114] A. Ishida, “New precision measurement of hyperfine splitting of positronium”, The 17th International Conference on Positron Annihilation (ICPA-17), September 21, 2015, Wuhan, China.
- [115] X. Fan, “Search for Vacuum Magnetic Birefringence with Pulsed Magnet”, Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2015), December 1, 2015, 理化学研究所和光キャンパス.
- [116] K. Shu, “Study on Cooling of Positronium for Bose-Einstein Condensation”, Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2015), December 1, 2015, 理化学研究所和光キャンパス.
- [117] S. Adachi, “Search for squarks and gluinos with the ATLAS detector in final states with jets and transverse missing momentum using 2015 data”, Lake Louise Winter Institute 2016, February 7-13, 2016, Chateau Lake Louise, Canada.
- ポスター
- [118] A. Ishida, “New precise measurement of the hyperfine splitting of positronium”, The XVIII International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics (POSMOL2015), July 17-20, 2015, Lisboa, Portugal.
- (国内会議)
- 招待講演
- [119] 浅井祥仁, 光を使って真空・時空を探る, 量子エレクトロニクス研究会「極限計測の科学と技術」, 2015年12月、東京大学山中寮内藤セミナーハウス.
- [120] 浅井祥仁, シンポジウム “13TeV 実験現状のまとめと今後の展望”, 日本物理学会, 2016年3月 東北学院大学

一般講演

- [121] 石田明, 欧州原子核研究機構における反陽子減速器を用いた反物質の研究、第3回欧州若手交流会、2015年8月30日、フライブルク、ドイツ。
- [122] 周健治, ボーズ・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却の考察、京都大学原子炉実験所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」、2015年11月、京都大学原子炉実験所。
- [123] 石田明, CERN 反陽子減速器における反水素を用いた ALPHA 実験、第22回素粒子物理国際研究センターシンポジウム、2016年3月、長野県北安曇郡白馬村岳美山荘。
- [124] 周健治, ボーズ・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却の考察、第22回素粒子物理国際研究センターシンポジウム、2016年3月、長野県北安曇郡白馬村岳美山荘。

日本物理学会秋季大会:大阪市立大学:2015年9月

- [125] 周健治, “ボーズ・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却”。
- [126] 稲田聡明, “SPring-8/SACLA におけるパルス強磁場を用いた弱結合未知粒子の探索”。
- [127] 樊星, “パルス磁石を用いた真空複屈折の探索”。
- [128] 森永真央, “LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるタウ粒子対に崩壊する超対称性ヒッグス粒子の探索”。
- [129] 齊藤 真彦, “LHC-ATLAS 実験 Run2 における長寿命荷電 Wino の探索”。

日本物理学会:第71回年次大会:東北学院大学:2016年3月

- [130] 稲田聡明, “SPring-8/SACLA におけるパルス強磁場を用いた弱結合未知粒子の探索 II”。
- [131] 周健治, “ボーズ・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却 I”。
- [132] 村吉諄之, “ボーズ・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却 II”。
- [133] 樊星, “パルス磁石を用いた真空複屈折の探索 I”。
- [134] 上岡修星, “パルス磁石を用いた真空複屈折の探索 II”。
- [135] 山道智博, “SPring-8/SACLA における光子光子散乱の探索”。
- [136] 森永真央, “LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるタウ粒子対に崩壊する MSSM ヒッグス粒子の探索”。
- [137] 安達俊介, “LHC-ATLAS 実験 Run2 における複数のジェットおよび横方向消失運動量を用いたグルーノ生成事象探索”。
- [138] 齊藤 真彦, “LHC-ATLAS 実験 Run2 における消失飛跡検出による電弱ゲージノ直接生成事象の探索”。

ポスター

- [139] 樊星, パルス磁石を用いた真空複屈折の探索、量子エレクトロニクス研究会「極限計測の科学と技術」、2015年12月、東京大学山中寮内藤セミナーハウス。

(セミナー)

- [140] A. Ishida, “New Precision Measurement of the Hyperfine Splitting of Positronium”, DESY Physics Seminar, Hamburg and Zeuthen, Germany, 2015年4月。

(その他)

- [141] 「ポジトロニウムのエネ初測定」(国内ウォッチ記事)、日経サイエンス 2015年8月号、pp. 16-17 (2015)。

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、トポロジカル系の理論を主眼に研究を行ってきた。これらの現象では、電子相関によりゲージ対称性が自発的に破れたり、トポロジカル系特有な新奇現象が起きる。面白い物性を面白い物質構造で発現させ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。2015年度に青木は定年を迎え、本物理学教室にファカルティとして加わって以来、30年間の研究室活動を完了した。

3.1.1 超伝導

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

銅酸化物高温超伝導体の相図で最も顕著な特徴の一つは、電子の band filling に対して T_C が上に凸 (dome 状) になることであるが、満足行く説明はあまりない。2次元斥力 Hubbard 模型における d 波超伝導に対して、揺らぎ交換 (FLEX) 近似は、反強磁性スピン揺らぎに媒介される運動量依存ペアリング相互作用を記述できるが、母物質の Mott 絶縁相を記述できない。他方、Mott 絶縁相を記述できる動的平均場理論 (DMFT) を出発点としたクラスター拡張では小さなクラスター (粗い k 空間) しか扱えない。そこで北谷、辻 (理研)、青木は、DMFT と FLEX を組み合わせる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を FLEX で取り込む方法を新たに提案した [2, 21, 32, 33]。この手法を 2次元 Hubbard 模型に適用した結果、 T_C dome を得ることに成功した (図 3.1.1)。Dome の起源は、FLEX で過大評価された自己エネルギーが DMFT で filling 依存して補正されるためである。

平坦バンド超伝導

平坦バンドをもつようなフェルミオン格子模型において、非従来型の超伝導が発現し得るであろうか。小林、町田 (原子力機構)、青木等は、平坦バンドをもつ最も簡単な擬 1次元模型の一つであるダイアモ

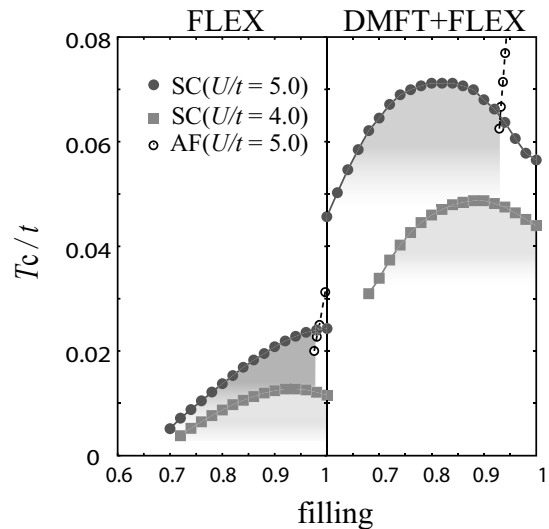


図 3.1.1: FLEX (左) と DMFT+FLEX 法 (右) による T_C vs band filling[2]。

ンド鎖上の斥力 Hubbard 模型に対して、厳密対角化と DMRG を用いて物性を調べた。結果は、電子の全 band filling が $1/3$ (最下バンドが満ち、平坦バンドが空) 近傍でペア相関が発達することを見出した。フェルミ面は無いので、従来のスピン揺らぎ媒介ペアリングとは異なっている可能性がある。

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計算とトポロジカル・モット絶縁相

近年、強相関電子系の物理と冷却原子系 (特に光学格子上) の物理が啓発し合い発展している。前者に対しては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について北村、辻、青木は、原子間短距離相互作用に対する定式化を、特にスピン構造やトポロジカル構造について制限の無い場合に拡張した。これを用いて、トポロジカル Mott 絶縁体 (粒子間相互作用のためにフェルミオン系が自発的にトポロジカル絶縁体になる現象) を発生させるための光格子を設計し、第一原理計算によりトポロジカルな性質 (ノンゼロの Chern 数等) を確認した (図 3.1.2) [3, 20]。

グラフェンの量子ホール効果とカイラル対称性

炭素が蜂の巣格子をなすグラフェンは massless Dirac 粒子のバンド分散 (Dirac cone) をもつために興味深

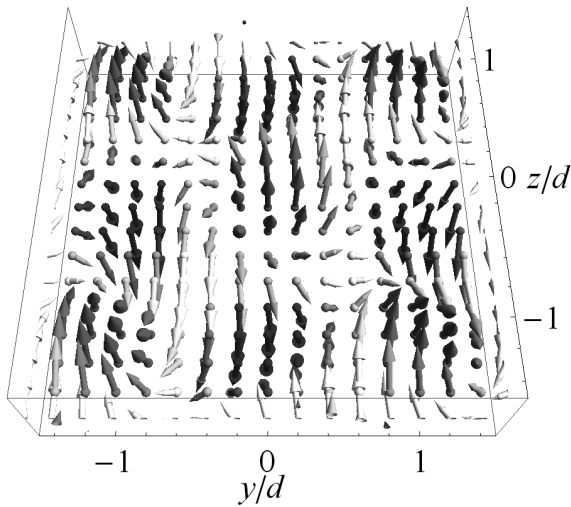


図 3.1.2: 設計された光学格子におけるトポジカル Mott 絶縁相のトポジカルな構造 [3].

く、特に磁場中では丁度ディラック点に $n = 0$ ランダウ準位が存在し、これがグラフェン量子ホール効果においてトポジカルに保護された性質となる。河原林（東邦大）、初貝（筑波大）、青木は、不規則性を入れたときにも、不規則性がカイラル対称性を尊重すれば、この準位はトポジカルに保護され続けることを示していた。さらに一般的に、ディラック・コーンが傾いており、かつ質量をもつ場合に拡張すると、 $n = 0$ ランダウ準位は質量項のために分裂するにもかかわらず、デルタ関数のままでいることが、数値的および解析的に示された [4, 25, 26, 44]。質量項はカイラル対称性を崩すが、 $n = 0$ ランダウ準位の部分空間内では波動関数はカイラル演算子の固有状態であり続けることに起因する。また、ボンダ秩序相における vortex の構造も議論した [42, 43]。

シリセンのトポジカルな解析

グラフェンのシリコン版であるシリセンのバンド構造においては、 sp^2 軌道が支配するグラフェンと異なり sp^3 軌道が混じり、これがフェルミ面付近に多軌道性をもたらす。初貝、白石（名古屋大）、青木は、3次元の sp^3 混成バンドを記述する基本的なモデルである Weaire-Thorpe モデルを拡張することによりシリセンの電子構造を解析的に記述した [5, 27]。Weaire-Thorpe モデルは平坦バンドをもつが、これはシリセンでも幅の狭いバンドとして名残り、ディラック・コーンと共存する。

螺旋面上の Dirac 電子

グラフェンを螺旋面状に巻いたときの電子構造は、螺旋対称の Dirac 電子への影響という場の理論的観

点からも、また螺旋転位をもつグラファイトとの関連からも興味深い。渡邊（現在 Kavli IMPU）、小松（総合文化）、辻、青木は、曲率の効果を取り入れるために zweibein を用いて Dirac 演算子を共変微分に変えて定式化することにより、螺旋面上では Dirac 電子は (i) 曲率から生じる一種のポテンシャルがあるにもかかわらず束縛状態を持たないが、(ii) 位相シフトや局所状態密度（図 3.1.3）には螺旋対称の効果が見られることを示した [6]。

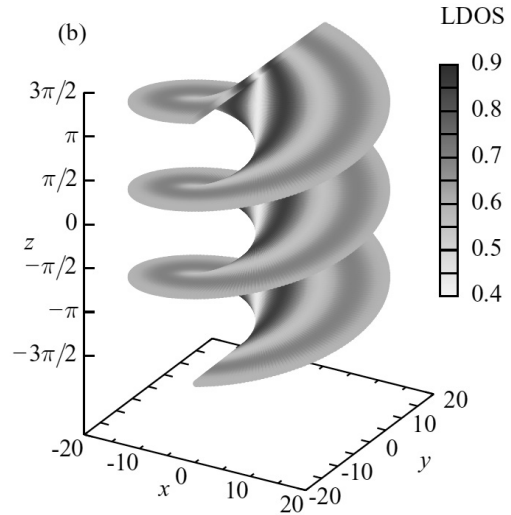


図 3.1.3: 螺旋面上の Dirac 電子の波動関数の局所状態密度 [6].

Graphitic zeolites における 3 次元 Dirac 電子

グラフェンを 3次元周期的曲面 (“graphitic zeolites”) としたときに電子構造はどうなるかという問題を、越野（東北大）、青木は提起した。TB モデルによる解析から、3次元の電子構造は (i) 周期曲面のトポロジー [立方晶か gyroid (図 3.1.4) か、等] に支配され、(ii) 2次元での massless Dirac 点は、3次元構造では massive になり、質量は構造の周期に反比例してスケールし、(iii) 波動関数は、3次元構造では必須のトポジカル欠陥に振幅が集中することを見出した [7, 34]。

2 層グラフェンにおける電子複屈折

グラフェン中の電子の伝播は、光学における負の屈折にアナログであることが示唆されている。Maksym、青木は、2層グラフェンにおける電子伝播においては、正の屈折と負の屈折を併せもつ複屈折が起き得ることを 4成分 Dirac 方程式から指摘し、現実的なパラメータ領域で興味深い現象がおきることをシミュレーションで示した [45]。

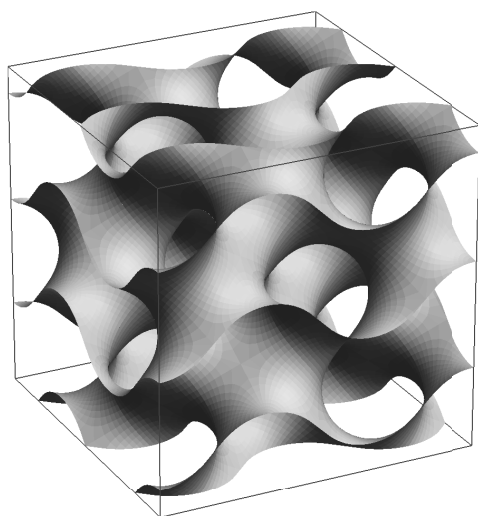


図 3.1.4: Gyroid[7].

量子ホール系における THz ダイナミクス

量子ホール系の光応答について、「光で見る量子ホール効果」ともいうべき現象があることは、森本（現在 UC Berkeley）等により理論提案され、島野等により THz 光の Faraday 回転実験観測がなされてきたが、フォトン・エネルギーがサイクロトロン・エネルギーにより近い領域でもこの現象が存在することが Cerne (SUNY Buffalo) の実験グループにより観測され、森本、青木はこの理論解析を行い、光応答のプラトーが高振動数でも robust であることを示した [8].

設計された Metal-Organic Framework における強磁性とトポロジカルな性質

籠目格子は Lieb-Mielke-Tasaki による平坦バンド強磁性の舞台となる。山田（現在物性研）、副島、Dinca (MIT 化学)、辻、平井、青木は、これを、有機物が金属元素により連結された framework (MOF) において、half-filled 平坦バンドという強磁性条件を満たしながら設計し、金を含む新物質でこれが実現することを提案した [9, 28, 41]。強磁性をスピン密度汎関数により確認し、さらにスピン軌道相互作用を考えると、平坦バンドがトポロジカルになることも示された。

3.1.3 非平衡

非平衡現象は、強相関電子系やトポロジカル系において特に興味深い。本年度は以下を行った。

超伝導体における Higgs モード共鳴

超伝導体は、秩序パラメーターの振幅（超流動密度）の集団励起振動モード（Higgs モード）をもつ。Higgs モードは電荷、分極などをもち、線形応答の範囲では電磁場と結合しないため実験観測が困難であったが、2013, 2014 年には島野グループにより実験観測され、青木グループにより理論解析された。辻、青木は、(i) 非線形応答まで考慮するとヒッグスと電磁場が結合し、周波数 Ω の光を照射すると周波数 2Ω で s 波超伝導体の秩序パラメーターを強制振動させられること、(ii) 2Ω が Higgs モードの固有周波数である 2Δ (超伝導ギャップ) と一致するとき共鳴が起こり、秩序パラメーターの振動の振幅および三次高調波が共鳴的に発散することについて詳しい理論解析を行った [10, 16].

杉岡等は、d 波超伝導体の Higgs モードを平均場近似の範囲で理論的に調べ、アンチノードでのギャップの最大値付近に幅の広い Higgs モードの共鳴ピークが存在することを示した。杉岡はこれを修士論文に含めた [53].

強結合フォノン媒介超伝導体における集団励起

超伝導体中の Higgs モードの解析は BCS 理論によるものが主であり、強結合電子・格子系における理解は十分ではない。特に、遅延効果を含む有効相互作用や、フォノン振動自体との関連の理解は重要である。村上、Werner (Fribourg 大)、辻、青木は、Holstein モデルに対し、非平衡 DMFT と Migdal 近似を用いてフォノン媒介超伝導体の Higgs モードの性質を調べた。結果として、BCS 理論から予言される Higgs エネルギーと超伝導ギャップの関係が強結合においても成立する事が分かった。また、フォノン振動と秩序パラメーターとの結合から生じる新たな集団励起モードが存在することも見出した [11, 22, 23, 37, 38]。村上は、これも含め、平衡ならびに非平衡の電子・フォノン結合系についての研究を博士論文にまとめた [52].

2 バンド超伝導体における集団励起

室谷、辻、青木は、2 バンド超伝導体における Higgs モードおよび Leggett モード（2 個の超流動秩序が逆位相で振動する位相モード）、ならびにそれらと光との共鳴を理論的に調べ、(i) 2 個存在する Higgs モードは異なる共鳴幅をもつ、(ii) Leggett モードは非線形効果により電場により励起され得て、特徴的な温度依存をもつ、などを示し、 MgB_2 での観測可能性について議論した [12].

非平衡電子・格子相互作用系における電子緩和とフォノン緩和

電子・格子相互作用系を非平衡にして、その後の時間発展を追ったときに、電子とフォノンがそれぞれ

れどのように緩和するかは基本的な問題である。村上、Werner、辻、青木は、最も基本的なモデルである Holstein 模型の緩和現象を非平衡 DMFT を用いて解析した。その結果、電子・格子相互作用を弱結合から中間結合に増やすにつれて、フォノンの方が速く緩和する領域から、電子の方が速く緩和する領域へクロスオーバーすることを見出した [15]。この熱化クロスオーバーは、自己無撞着に結合している非平衡電子の自己エネルギーと非平衡フォノンの自己エネルギーが、電子・格子結合への異なる依存性をもつことから来ている。村上は、この研究も含め博士論文をまとめた [52]。

非平衡超伝導

超伝導においては普通は全運動量がゼロのクーパー対が凝縮するのにに対し、原理的にはノンゼロの対が凝縮しても良いが、磁場中等以外では起きにくい。北村、青木は、引力ハバード模型を時間的に周期的な外場（直線偏光）中に置くと、 η ペアリングと呼ばれる、重心運動量がノンゼロのペアが凝縮した超伝導状態の可能性を見出した [14, 24, 39, 49]。外場の早い時間スケールを繰り込んだ有効ハミルトニアンではホッピングや相互作用は平衡のものとは著しく異なり、特に全運動量 (π, π) の対が凝縮した η ペアリング状態が、動的不安定性を介したプロトコルを用いれば実現することが期待される。

一方、超伝導体に円偏光を照射すると何が起きるであろうか。岡・青木により示されたように、Dirac 電子系に円偏光を照射すると Floquet topological insulator になるが、この超伝導版である。杉岡等は、 $d_{x^2-y^2}$ 波超伝導体は円偏光中では $d_{x^2-y^2} + id_{xy}$ 波超伝導になり得ることを示唆した。杉岡はこれを修士論文にまとめた [53]。

フロケ・トポロジカル相転移

系を AC 外場で駆動すると生じるフロケ (Floquet) トポロジカル絶縁体は最近ではトポロジカル絶縁体表面のディラック分散や蜂の巣光学格子上の冷却原子系において観測されている。外場の振動数が十分大きい領域では Floquet 理論により良く理解されているが、外場が低振動数の場合、および電子間相互作用がある場合にどうなるかは分かっていなかった。見上、北村、安田（現在東大理工）、辻、岡 (MPI Dresden)、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を計算した [13, 40]。その結果、(i) 理論的枠組みとして、振動数の逆数の展開を Brillouin-Wigner 理論を用いて行くと、任意の次数まで曖昧さのない有効理論が得られ、従来の van Vleck 縮退摂動論や Floquet-Magnus 展開より明快な枠組みとなる、(ii) これを、円偏光照射下の蜂の巣格子、Lieb 格子、籠目格子などに適用すると、外場を変化させるにつて異なるトポロジカル状態間の一連の転移が起きる、(iii) 低振動数に行くと精細な相図が発現する (図 3.1.5)、

(iv) 多体相互作用があると、モット絶縁体とトポロジカル状態間の転移が起きる、などが見出された。

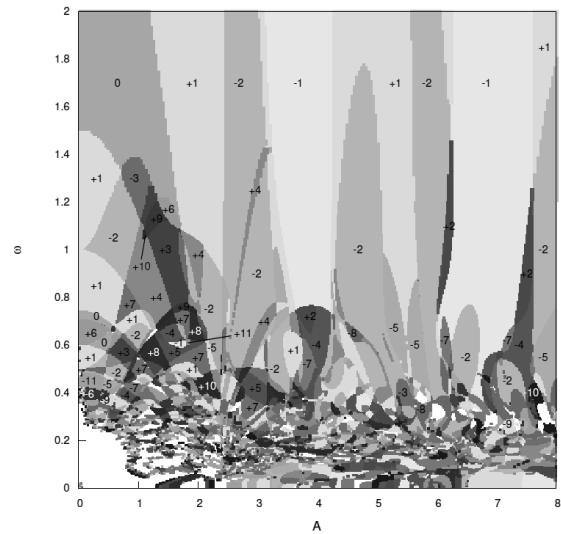


図 3.1.5: 蜂の巣格子に円偏光を当てたときの、光の振動数 (ω) と強度 (A) に対する相図。色や数字は Chern 数 [13]。

3.1.4 その他

青木は本物理学教室での「最終講義」（教室談話会）を「物性物理学のルネサンス — 超伝導、トポロジカル系、非平衡」と題して行った [51]。本物理学教室からの PhD 取得以降 38 年間の研究生活において、343 編の論文 (Phys. Rev. Lett. 34 編, Phys. Rev. B 109 編、ほか JPSJ, Nature, Science, Rev. Mod. Phys. 等) を出版し、総引用数は 1 万回を超える。6 名の助手、助教、21 名の PhD (うち 17 名はアカデミア)、15 名の MSc を送り出した。辻、青木は「超伝導体中のヒッグスモードに関する開拓的理論研究」により、超伝導科学技術賞を受賞した [1]。青木研 OB の酒井志朗氏 (理研)、渡辺悠樹氏 (MIT) は第 10 回日本物理学会若手奨励賞 (領域 8) を受賞した。青木研助教の高吉慎太郎氏は 2015 年 9 月に Geneve 大学 postdoc に転出した。青木は、国際会議招待講演で、高温超伝導への路 [29, 30]、物性物理学における自発的対称性の破れ [31]、トポロジカル端状態 [19]、非平衡電子・電子、電子・格子相互作用系 [17]、有機磁性 [18] について解説し、セミナー講演等も高温超伝導 [35, 36, 50]、超伝導体における Higgs モード [46, 47, 48] について行った。松永、辻、青木、島野は、超伝導体中のヒッグスモードについて解説した [16]。青木は、定年退職後は、ImPACT については本物理学教室で、科研費については産総研 (筑波) にて研究を続ける。

<受賞>

- [1] 辻 直人、青木秀夫、第 19 回超伝導科学技術賞。
- <報文>
- (原著論文)
- [2] M. Kitatani, N. Tsuji, H. Aoki: FLEX+DMFT approach to the d-wave superconducting phase diagram of the two-dimensional Hubbard model, *Phys. Rev. B* **92**, 085104 (2015).
- [3] Sota Kitamura, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: An interaction-driven topological insulator in fermionic cold atoms on an optical lattice — A design with a density functional formalism, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 045304 (2015).
- [4] Yasuhiro Hatsugai, Tohru Kawarabayashi and Hideo Aoki: Survival of sharp $n = 0$ Landau levels in massive tilted Dirac fermions — Role of the generalized chiral operator, *Phys. Rev. B* **91**, 085112 (2015).
- [5] Y. Hatsugai, K. Shiraishi and H. Aoki: Flat bands in Weaire-Thorpe model and silicene, *New J. Phys.* **17**, 025009 (2015).
- [6] Masataka Watanabe, Hisato Komatsu, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Electronic structure of helicoidal graphene — massless Dirac particles on a curved surface with a screw symmetry, *Phys. Rev. B* **92**, 205425 (2015).
- [7] Mikito Koshino and Hideo Aoki: Dirac electrons on three-dimensional graphitic zeolites — a scalable mass gap, *Phys. Rev. B* **93**, 041412(R) (2016).
- [8] A. V. Stier, C. T. Ellis, J. Kwon, H. Xing, H. Zhang, D. Eason, G. Strasser, T. Morimoto, H. Aoki, H. Zeng, B. D. McCombe, and J. Cerné: Terahertz dynamics of a topologically protected state: Quantum Hall effect plateaus near the cyclotron resonance of a two-dimensional electron gas, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 247401 (2015).
- [9] Masahiko Yamada, Tomohiro Soejima, Naoto Tsuji, Daisuke Hirai, Mircea Dinca and Hideo Aoki: First-principles design of a half-filled flat band of the Kagome lattice in two-dimensional metal-organic frameworks, arXiv:1510.00164.
- [10] Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Theory of Anderson pseudospin resonance with Higgs mode in a superconductor, *Phys. Rev. B* **92**, 064508 (2015).
- [11] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Multiple amplitude modes in strongly coupled phonon-mediated superconductors, *Phys. Rev. B* **93**, 094509 (2016).
- [12] Yuta Murotani, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Theory of light-induced resonances with collective Higgs and Leggett modes in multiband superconductors, arXiv:1511.05762.
- [13] Takahiro Mikami, Sota Kitamura, Kenji Yasuda, Naoto Tsuji, Takashi Oka and Hideo Aoki: Brillouin-Wigner theory for high-frequency expansion in periodically driven systems — Application to Floquet topological insulators, *Phys. Rev. B* **93**, 144307 (2016).
- [14] Sota Kitamura and Hideo Aoki: η -pairing superfluid in periodically-driven fermionic Hubbard model with strong attraction, arXiv:1511.07890.
- [15] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Interaction quench in the Holstein model: Thermalization crossover from electron- to phonon-dominated relaxation, *Phys. Rev. B* **91**, 045128 (2015).
- (国内雑誌)
- [16] 松永隆佑、辻 直人、青木秀夫、島野 亮: 超伝導体中のヒッグスモード — 高強度テラヘルツ波による検出とヒッグス共鳴第三高調波発生、*固体物理* **50**, 411 (2015).
- <学術発表>
- (国際会議)
- 招待講演
- [17] Hideo Aoki: Electron-electron and electron-phonon interactions in and out of equilibrium (*Exploring Extreme Forms of Matter*, Tokyo, Mar 2016).
- [18] Hideo Aoki: Designing flat-band ferromagnets — a path to make organic-based systems magnetic and topological (*Int. Conf. Quantum Magnets 2015*, Crete, Sep. 2015).
- [19] Hideo Aoki: Topological edge states — from cold atoms to organic ferromagnets (*Int. workshop on bulk-edge correspondence & topological phases*, Tokyo, Sep 2015).
- [20] Sota Kitamura: Design of interaction-driven Chern insulator on an optical lattice (*Int. workshop on bulk-edge correspondence & topological phases*, Tokyo, Sep 2015).
- 一般発表
- [21] M. Kitatani, N. Tsuji, and H. Aoki: DMFT +FLEX approach for the two-dimensional repulsive Hubbard model (*M2S 2015*, Geneva, Aug 2015).
- [22] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Non-equilibrium dynamics of the Holstein model in the superconducting and normal phases (*M2S 2015*, Geneva, Aug 2015).
- [23] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Collective amplitude modes in strongly-coupled phonon-mediated superconductors (*“Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems” Gordon Research Conf.*, Lucca, Feb 2016).

- [24] Sota Kitamura and Hideo Aoki: Eta-pairing superconductivity in periodically driven attractive systems via dynamical instability (“*Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems*” Gordon Research Conf., Lucca, Feb 2016).
- [25] T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai and H. Aoki: Robust $n = 0$ Landau levels of massive and tilted Dirac fermions (*Graphene Week 2015*, Manchester, June 2015).
- [26] T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai and H. Aoki: Tilted massive Dirac fermions with disorder — anomaly in Landau levels (*EP2DS*, Sendai, July 2015).
- [27] H. Aoki, K. Shiraishi and Y. Hatsugai: Molecular-orbital view of the whole band structure of silicene (*16th NT*, Nagoya, June 2015).
- [28] Masahiko G. Yamada, Tomohiro Soejima, Naoto Tsuji, Daisuke Hirai, Mircea Dincă and Hideo Aoki: First-principles design of a half-filled flat band of the Kagome Lattice in two-dimensional metal-organic frameworks (APS March Meeting 2016).
- (国内会議)
- 招待講演
- [29] 青木秀夫：高温超伝導への路 — 平衡・非平衡 (ImPACT 未来開拓研究会, 北海道, Oct 2015)。
- [30] 青木秀夫：超伝導増強および制御 — 平衡、非平衡 (CMRC+研究会, KEK, Nov 2015)。
- [31] 青木秀夫：物性物理学における南部理論 (日本物理学会シンポジウム「自発的対称性の破れ：南部陽一郎先生が拓いた物理と素粒子・原子核・物性の進展」、仙台, Mar 2016)。
- 一般発表
- [32] 北谷基治、辻直人、青木秀夫：2次元斥力 Hubbard 模型における Pomeranchuk 不安定性と超伝導 (日本物理学会, 仙台, 2016年3月)。
- [33] 北谷基治、辻直人、青木秀夫：FLEX+DMFT 法による2次元斥力 Hubbard 模型の超伝導 (ImPACT 量子情報技術ワークショップ, 市ヶ谷, 2016年3月)。
- [34] 青木秀夫: Three-dimensional graphene — helicoidal and zeolitic (「トポロジカル相におけるバルク・エッジ対応の普遍性：固体物理から冷却原子まで」、筑波, Mar 2016)。
- [35] Hideo Aoki: Barriers and breakthrough for designing higher-Tc superconductivity (ImPACT meeting on RT SC, Tokyo, Feb 2016).
- [36] 青木秀夫：量子シミュレーションによる高温超伝導の Tc 増強 (ImPACT 全体会議, 東京, Mar 2016)。
- [37] 村上雄太、Philipp Werner、辻直人、青木秀夫：強結合フォノン媒介超伝導体における集団励起モードの動的平均場理論による解析 (日本物理学会, 大阪, Sept 2015)。
- [38] 村上雄太、Philipp Werner、辻直人、青木秀夫：Dynamical properties of strongly-coupled phonon-mediated superconductors (第10回量子シミュレーション研究会, 京都, Oct 2015)。
- [39] 北村 想太、青木 秀夫：引力フェルミ・ハバード模型における AC 外場に誘起される η ペアリング超流動 (日本物理学会, 仙台, 2016年3月)。
- [40] 見上敬洋、北村想太、安田憲司、辻直人、岡隆史、青木秀夫：Brillouin-Wigner 理論に基づく時間に周期的な量子系における高周波数展開 (日本物理学会, 仙台, 2016年3月)。
- [41] 山田昌彦、副島智大、辻直人、平井大介、ミルシア・ディンカ、青木秀夫：2次元有機金属構造体における強磁性トポロジカル絶縁体の設計 (日本物理学会, 大阪, 2015年9月)。
- [42] 河原林透、初貝安弘、青木秀夫：傾いたディラック電子系におけるボンド秩序の vortex とゼロモード (日本物理学会, 大阪, 2015年9月)。
- [43] 板垣 諒、初貝安弘、青木秀夫、河原林透：ディラック電子系におけるボンド秩序の高次 vortex 近傍の局所状態密度 (日本物理学会, 大阪, 2015年9月)。
- [44] 河原林透、初貝安弘、青木秀夫：一般化されたカイラル対称性を持つ格子模型 (日本物理学会, 仙台, 2016年3月)。
- [45] P. A. Maksym and H. Aoki: Electron propagation in bilayer graphene in the birefringent regime (日本物理学会, 仙台, 2016年3月)。
- (セミナー (国外))
- [46] Hideo Aoki: Higgs and Leggett modes in superconductors (ETH Zürich, July 2015).
- [47] Hideo Aoki: Collective modes in superconductors — Higgs and Leggett (MPI Dresden, Aug 2015).
- [48] Hideo Aoki: Higgs collective mode and its resonance with nonlinear optics in superconductors (TU Wien, Sep 2015).
- [49] Sota Kitamura: Strong Coupling Expansion for Floquet Systems: Application to Dynamically-Induced η -pairing Superconductivity (MPI Dresden, Nov 2015).
- (セミナー (国内))
- [50] 青木秀夫：高温超伝導増強への路 (産総研, Jan 2016)。
- [51] 青木秀夫：最終講義「物性物理学のルネサンス — 超伝導、トポロジカル系、非平衡」、東大、10 March 2016。
- (学位論文)
- [52] Yuta Murakami: Theoretical Study of Electron-Phonon Coupled Systems in and out of Equilibrium (博士論文, 2015年12月)。
- [53] Arata Sugioka: Theory of AC-driven nonequilibrium collective and topological states in d-wave superconductors (修士論文, 2016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。27年度の研究概要は以下の通りである。

3.2.1 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、応答は我々の研究室の重要なテーマであり、27年度は以下のテーマについて研究を進めた。

周期外場によって駆動された量子開放系の定常状態

周期外場によって駆動された量子系の時間発展は、フロケ演算子によって解析される。そのような系が外界の熱浴と相互作用する場合、系は量子開放系として、周期的な定常状態に達する。そのような状態はフロケ演算子の固有状態の分布関数で与えられる。フロケ固有値を実効的なエネルギー準位とみなし、それをコントロールすることで新しい物性制御の方法を開発することは非常に重要な問題であるが、系が熱浴に接している場合にどのような分布になるかは自明でない。我々はどのような条件の下でフロケ演算子の固有状態のカノニカル分布が実現するかについて調べてきている。これまで我々の研究により、厳密にフロケ状態のカノニカル分布が実現するためには厳しい条件が必要であることがわかったが、27年度は熱浴との相互作用の強さや、また熱浴のスペクトル密度によってその条件が緩和されることを明らかにした。[17, 19]

速い外場で駆動された量子系での準定常状態

周期外場で駆動された孤立量子系の長時間でのダイナミクスを理解することは非平衡物理の重要な問題である。近年、周期外場によって物性を制御しようという研究が理論、実験の両面から盛んに行われている。理論的には、周期外場で駆動された量子系のフロケ演算子の解析に基づいて多彩な現象が予想されている。しかし、これまでの研究では、外場によるエネルギー吸収の効果が無視されてきた。実際、具体的なモデルについての数値計算から、周期駆動系はエネルギーを吸収することで最終的には温度無限大の状態に行き着くと考えられている。そこで、外場からのエネルギー吸収の効果を定量的に理解することを目指した。

フロケ演算子のマグナス展開という手法についての数学的に厳密な解析を通して、周期外場の振動数が大きいときに、外場によるエネルギー吸収が外場の振動数について指数関数的に遅いことを証明した。

このことから、周期駆動系の一般的な緩和過程を明らかにした。つまり、エネルギー吸収が起こる時間スケールよりも短い時間領域では、従来のエネルギー吸収を無視した理論で予言される非自明な準定常状態に緩和し、続いて外場によるエネルギー吸収によって最終的に温度無限大の状態に向かって緩和する。[12, 13, 35, 59]

磁場掃引のもとでの磁化の運動

量子系においてどのように準安定状態が表せるか。またそこからの緩和、特に準安定状態が崩壊するいわゆるスピノーダル点における特異性がどのように表せるかについて研究を進めている。その代表的なモデルとして、古典スピン系では Stoner-Wohlfarth 現象が知られている。一軸的異方性を持つスピン系の磁場中での性質、特に、磁場掃引のもとで示す動的相転移について詳しく調べた。磁場掃引における量子状態の変化はいわゆる Landau-Zener 機構で表され、エネルギー準位の擬交差でのエネルギーギャップが重要な役割をする。その分布がスピノーダル点で古典系での緩和時間のスケーリング関係と類似のスケーリング関係を示すことを発見した (図 3.2.1)。また、スピノーダル点を超えて磁場を掃引した場合、非自明なビート現象が現れることも発見し、量子系特有の干渉現象であることを明らかにした。全スピン S が $1/2$ でない場合には、古典的に対応を持たない矢印で表せない特有な量子状態をとる。その様子の特徴付ける spin-fidelity なる量を導入し、上述のビート現象では spin-fidelity も振動することを発見した。[8, 21, 34]

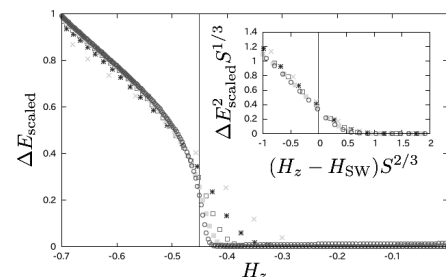


図 3.2.1: エネルギー準位の擬交差でのエネルギーギャップの磁場依存性とスケーリング関係 (詳細は論文参照)

以上の研究は大きなスピン S の系で調べたが、 $S = 1/2$ のスピンが強磁性的に結合した系における状況も研究した。一次元リングのように結合が希薄な場合、協力的なスピノーダル現象が弱められることが知られているが、スモールワールドネットワークのように密な結合をもつ系では、大きな S と同様な現象が現れることも明らかにした。[29]

量子応答：電子スピン共鳴

系のミクロな情報を反映するために与えられたハミルトニアンから直接、久保公式によって電子スピン共鳴のスペクトルを調べる方法を開発してきた。ハミルトニアン対角化の方法では扱える系の大きさの制限がきついで、系の量子力学的時間発展を求め、その Fourier 変換からスペクトルを求める方法が用いられる。従来この方法に関して時間相関関数の時間発展をいわゆる純粋熱状態を用いて求める方法 (AC 法) が開発されていた。その方法では観測時間が有限であるため Fourier 変換に Gibbs 振動と呼ばれる効果が現れ、数値解析上の問題になっていた。その問題に対して、我々は、Winer-Khinchin の関係を用いて、時間相関関数ではなく、変動する物理量自身の量子力学的時間発展からスペクトルを求める方法 (WK 法) を開発した。この方法ではスペクトルの負値問題は解決できるが、統計処理上の収束が遅いことを明らかにした。これらの方法の比較などにより、AC 法でも系が大きくなると Gibbs 振動の効果が抑えられることが明らかになり、その方法を用いて、1 次元異方性ハイゼンベルク模型の高温で、興味を持たれていたスペクトルのダブルピーク構造のサイズ依存性を明らかにした (図 (3.2.2))。さらに、そのスペクトルの構造が特定の磁化をもつ準位間の遷移に帰着できることを発見し、そのサイズ依存性を明らかにした。[5, 20, 57]

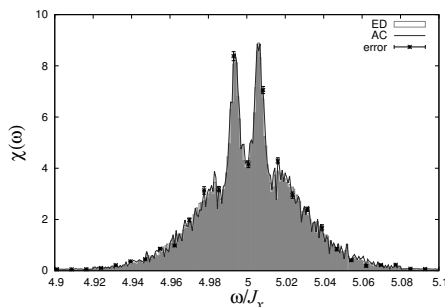


図 3.2.2: AC 法、WK 法、厳密対角化法によって求められたスペクトルの比較 (詳細は論文参照)

また、反強磁性電子スピン共鳴のスペクトルに關する非平衡 Thermo-filed dynamics の方法による定式化も進めた。[6] また、canonical-thermal-state 状態に基づいた量子系におけるデコヒーレンス、熱平衡状態に関する研究も進めた。[10]

輸送現象におけるゆらぎ

近年、半導体メゾスコピック系において、制御された非平衡環境下での輸送現象が精力的に研究されている。特に、電流揺らぎには、非平衡輸送過程に關する豊富な情報が含まれることが知られており、そ

の相互作用効果などのさらなる理解が望まれている。本年度は、量子ドットとリード中の電子の静電結合を記述する模型として、相互作用共鳴準位模型を調べた。これまでの研究によってその I-V 特性が詳細に明らかにされており、顕著な性質として、スケールリング領域においてべき乗則に従った負微分抵抗を示すことが知られていた。本研究では、汎関数くりこみ群法を拡張し、電流パーテックス関数のフロー方程式を解くことによって、電流揺らぎにおける二体相互作用の効果を調べた。解析の結果、電流揺らぎに關してもまた、広いパラメータ領域でべき的な振る舞いを示すことが明らかになった。[16, 24, 67, 51]

3.2.2 協力現象の統計力学

多体の要素が相互作用によって引き起こす協力現象も、我々の研究室の重要なテーマであり、27 年度は以下のテーマについて研究を進めた。

3.2.3 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系ではイジングモデルでモデル化されるが格子変形に伴う長距離相互作用が現れる。特に、その長距離相互作用と、系がもつ短距離相互作用の競合によって種々の新規な相転移が現れる [31]。27 年度は、短距離相互作用にフラストレーションがある三角格子反強磁性体において、長距離強磁性相互作用の結果を調べた。その結果、短距離相互作用で知られていた双対 Kosterlitz-Thouless 相転移の低温側の相転移が新しいタイプの相転移に変わることを明らかにした。[4] また、短距離反強磁性相互作用があってもフラストレーションがない場合には、磁場がない場合には長距離強磁性相互作用は有意な効果をもたらさないことがわかっていたが、磁場中では短距離反強磁性相互作用と長距離強磁性相互作用の競合の結果、気相・液相相転移に類似した相転移の構造が現れることを明らかにした。[9, 32, 33, 58]

さらに、短距離相互作用が ANNNI 模型と類似な構造をもつ物質でのスピントスオーバー物質での相転移に關する実験での温度変化、光照射効果などの結果の解析を行った。[7]

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、実際の磁石の保磁力の統計力学機構解明に向けて研究を進めている。これらの系では、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。そのような系の有限温度での核形成や磁壁ピンニングなどの機構を明らかにするため、有限温度での磁化の運動を取り扱うことのできる確率的 LLG (Landau-Lifshitz-Gilbert) 方程式

の定式化を行い、これまで知られていた基底状態の相図が有限温度でどのように変わるかについて明らかにした。[2, 36, 43, 61]

3.2.4 確率過程

拡散方程式の熱カーネルを Dunkl 演算子と呼ばれる微分差分演算子に拡張したものは Dunkl 過程と呼ばれ、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。特別な場合として、Dyson's Brownian motion 模型や Wishart-Laguerre 固有値過程などが含まれる。この Dunkl 過程が関与する確率過程の定常状態への移行の際の漸近過程の特徴を明らかにした。[3]

3.2.5 統計力学の基礎的研究

示量的だが非相加的な系の熱力学

系のサイズを相似的に大きくしても平衡状態の性質が変化しないとき、その系は示量的であるといい、系を任意の二つの部分系に外から仕事することなく分割できるとき相加的であるという。これらの性質を持たない重要な例として長距離相互作用系がある。ハミルトニアンに適切なスケーリングを導入することで、長距離相互作用系の場合でも示量性が成り立つようにできる。したがって長距離相互作用系の熱統計力学の特異な性質は非相加性に由来する。

27年度は、示量性を満たすが相加性を満たさない熱力学系の性質について一般的に議論し、そのような系では熱力学的性質が系の形状に依存することによって Gibbs-Duhem の関係式が破れることを見出した。また、系の形状が固定されている場合には、相加性を持たない系でも Gibbs-Duhem 関係式が成り立たなければならないことを指摘した。示量性を満たすが相加性を満たさない例としてダイポール間相互作用を有する粒子系を研究し、系の形状が変化する仕方では体積をコントロールしたときに限って Gibbs-Duhem 関係式が破れるという理論的な予想を数値計算によって裏付けた。[14]

アンサンブルの等価性

アンサンブルの等価性は平衡統計力学の重要な結果の一つである。これまで、ミクロカノニカル分布、カノニカル分布、グランドカノニカル分布といった平衡分布の間の等価性が問題とされ、古典系の平衡分布間のアンサンブルの等価性はほぼ完全に理解されている。一方で、上記の平衡分布に限らない、一般的な二つのアンサンブルの等価性の問題はこれまで理解が進んでいなかった。森は、アンサンブルの等価性の問題を古典系、量子系のどちらにも適用できる形で一般的に定式化し、二つの分布の間の相対エントロピーの熱力学的極限での振る舞いから、こ

れらの分布が等価か否かを判定できることを示した。[15]

<受賞>

- [1] 池内光希、理学系研究科奨励賞、2016年3月

<報文>

(原著論文)

- [2] M. Nishino and S. Miyashita, Realization of thermal equilibrium in inhomogeneous magnetic systems by the Landau-Lifshitz-Gilbert equation with stochastic noise, and its dynamical aspects, *Phys. Rev. B* **91**, 134411 (1-13) (2015).
- [3] S. Andraus, S. Miyashita, Two-step asymptotics of scaled Dunkl processes, *J. Math. Phys.* **56**, 103302 (1-23) (2015).
- [4] M. Nishino, S. Miyashita, Termination of the Berezinskii-Kosterlitz-Thouless phase with a new critical universality in spin-crossover systems, *Phys. Rev. B* **92**, 184404 (1-7) (2015).
- [5] H. Ikeuchi, H. De Raedt, S. Bertaina, S. Miyashita, Computation of ESR spectra from the time evolution of the magnetization: Comparison of autocorrelation and Wiener-Khinchin-relation-based methods, *Phys. Rev. B* **92**, 214431 (1-15) (2015).
- [6] M. Saeki, S. Miyashita, Non-equilibrium thermofield dynamics for anti-ferromagnetic spin system, *Physica A* **446**, 272-305 (2016).
- [7] H. Watanabe, K. Tanaka, N. Brefuel, H. Cailleau, J. F. Letard, S. Ravy, P. Fertey, M. Nishino, S. Miyashita and E. Collet, Ordering phenomena of high-spin/low-spin states in stepwise spin-crossover materials described by the ANNNI model, *Phys. Rev. B* **93**, 014419 (1-12) (2016).
- [8] T. Hatomura, B. Barbara and S. Miyashita, Quantum Stoner-Wohlfarth Model, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 037203 (1-5) (2016).
- [9] P.A. Rikvold, G. Brown, S. Miyashita, C. Omand and M. Nishino, Equilibrium, metastability, and hysteresis in a model spin-crossover material with nearest-neighbor antiferromagnetic-like and long-range ferromagnetic-like interactions, *Phys. Rev. B* **93**, 064109 (1-13) (2016).
- [10] M.A. Novotny, F. Jin, S. Yuan, S. Miyashita, H. De Raedt and K. Michielsen, Quantum decoherence and thermalization at finite temperature within the canonical-thermal-state ensemble, *Phys. Rev. A* **93**, 032110 (1-46) (2016).
- [11] Eriko Kaminishi, Takashi Mori, Tatsuhiko N. Ikeda, and Masahito Ueda, Entanglement prethermalization in a one-dimensional Bose gas, *Nature Phys.* **11**, 1050 (2015).
- [12] Tomotaka Kuwahara, Takashi Mori, and Keiji Saito, Floquet-Magnus theory and generic transient dynamics in periodically driven many-body quantum systems, *Ann. Phys.* **367**, 96 (2016).

- [13] Takashi Mori, Tomotaka Kuwahara, and Keiji Saito, Rigorous bound on energy absorption and generic relaxation in periodically driven quantum systems, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 120401 (2016).
- [14] Takashi Mori, Thermodynamics of extensive but nonadditive systems: modified Gibbs-Duhem equation in the dipolar gas, arXiv:1510.07109 (2015).
- [15] Takashi Mori, Macrostate equivalence of two general ensembles and specific relative entropies, arXiv:1602.06182 (2016).
- [16] T. J. Suzuki, D. M. Kennes, and V. Meden, Current noise of the interacting resonant level model, *Phys. Rev. B* **93**, 085306 (1-13) (2015).
- [17] Tatsuhiko Shirai, Juzar Thingna, Takashi Mori, Sergey Denisov, Seiji Miyashita, Floquet-Gibbs states for dissipative quantum systems, arXiv:1511.06864 (2015).
- (国内雑誌)
- [18] 宮下精二、「相転移現象と数理モデル」、数理科学、サイエンス社、pp. 14-19 (2016).
- (学位論文)
- [19] Tatsuhiko Shirai, Long-time asymptotic of periodically driven open quantum systems (時間周期駆動量子開放形の定常状態), 博士論文, The University of Tokyo, March 2016.
- [20] Hiroki Ikeuchi, Study of the spectra of Electron-Spin-Resonance from the quantum time evolution of magnetization (磁化の量子時間発展を用いた電子スピン共鳴の研究), 修士論文, The University of Tokyo, March 2016.
- [21] Takuya Hatomura, Quantum dynamics of nanomagnets under time-dependent fields (悲観依存する外場の下での微小磁性体の量子ダイナミクスとその量子古典転移), 修士論文, The University of Tokyo, March 2016.
- (著書)
- [22] 宮下精二、西野正理、「統計物理学による磁気モーメントの反転に対する核生成理論の構築」、省/脱 Dy ネオジム磁石と新規永久磁石の開発、シーエムシー出版、pp. 165-171 (2015).
- <学術講演>
- (国際会議)
- [23] T. Shirai, Condition for emergence of Floquet-Gibbs state in periodically driven open systems, *New Frontiers in Non-equilibrium Physics 2015*, Yukawa Institute for Theoretical Physics(YITP) Kyoto University, 2015-07-21-8-23.
- [24] T. Suzuki, Functional renormalization group study of current noise through quantum dot systems, *New Frontiers in Non-equilibrium Physics 2015*, Yukawa Institute for Theoretical Physics(YITP) Kyoto University, 2015-07-21-8-23.
- [25] T. Mori, Quasi-stationary states in periodically driven quantum systems, *New Frontiers in Non-equilibrium Physics 2015*, Yukawa Institute for Theoretical Physics(YITP) Kyoto University, 2015-07-21-08-23.
- [26] T. Mori, Floquet resonant states in periodically driven quantum systems, *New Frontiers in Non-equilibrium Physics 2015*, Yukawa Institute for Theoretical Physics(YITP) Kyoto University, 2015-07-21-08-23.
- [27] T. Mori, Effective long-range interactions and non-additivity in quasi-equilibrium states, *New Frontiers in Non-equilibrium Physics 2015*, Yukawa Institute for Theoretical Physics(YITP) Kyoto University, 2015-07-21-08-23.
- [28] H. Ikeuch, Temperature and size dependence of ESR spectra in XXZ antiferromagnetic chain, LMU-UT Cooperation in Physics Workshop, Koshiba Hall, Hongo Campus, The University of Tokyo, 2016-02-29-30.
- [29] T. Hatomura, Quantum dynamics of single molecular magnets under time dependent fields, LMU-UT Cooperation in Physics Workshop, Koshiba Hall, Hongo Campus, The University of Tokyo, 2016-02-29-30.
- [30] T. Suzuki, Photon-assisted current noise through a quantum dot system with an oscillating gate voltage, *New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics 2015*, Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, 2015-06-11.
- 招待講演
- [31] S. Miyashita, Various Ordering Processes of Spin-Crossover Type Systems And Effects of Elastic Interaction on Them, 10th International Symposium on Hysteresis Modeling and Micromagnetics (HMM 2015), IASI, ROMANIA (Unirea Hotel) 2015-05-18-20.
- [32] S. Miyashita, Competition between short and long range interactions, ENS-UT Workshop on Physics 2015, The University of Tokyo, 2015-11-18-19.
- [33] S. Miyashita, Effects of antiferromagnetic short interaction in elastic spin-crossover systems, France-Japan workshop on Impacting materials with light and electric fields and watching real time dynamics (IM-LED 2015), Chemistry Department, The University of Tokyo, 2015-11-16.
- [34] S. Miyashita, Collapse of metastable state in a quantum system, LMU-UT Cooperation in Physics Workshop, Koshiba Hall, Hongo Campus, The University of Tokyo, 2016-02-29-30.
- [35] T. Mori, General scenario of relaxation process in periodically driven quantum systems, KIAS Workshop on Quantum Information and Thermodynamics, Busan, Korea, 2015-11-25-28.
- (国内会議)

一般講演

- [36] S. Miyashita, 核生成理論と単磁区反転機構理論の整備, 元素戦略磁性材料研究拠点 第7回磁性材料研究拠点成果報告会, 物質・材料研究機構(千現地区) 研究本館1階 第一会議室, 2015-06-20.
- [37] 白井達彦, Juzar Thingna, 駆動量子開放系での散逸によって誘起されるフロケギブス分布日本物理学会, 関西大学 千里山キャンパス, 2015-09-16-19.
- [38] 肘井敬吾, 坂井徹, 宮下精二, 太田仁, $S=1/2$ 三量体量子スピン鎖における動的感受率の数値的研究, 日本物理学会, 関西大学 千里山キャンパス, 2015-09-16-19.
- [39] 坂井徹, 肘井敬吾, 大久保晋, 太田仁, 中野博生, 宮下精二, カゴメ格子反強磁性体におけるスピギャップの有無の ESR による検証の可能性, 日本物理学会, 関西大学 千里山キャンパス, 2015-09-16-19.
- [40] 西野正理, 宮下精二, フラストレートした三角格子反強磁性体の臨界現象における弾性相互作用および長距離相互作用の効果, 日本物理学会, 関西大学 千里山キャンパス, 2015-09-16-19.
- [41] 宮下精二, 池内光希, Hans De Raedt, Sylvain Bertaina, 時間発展法による ESR スペクトルの計算法の開発: 相関関数法と Wiener-Khinchin 法, 第54回電子スピンサイエンス学会年会 (SEST2015), 朱鷺メッセ: 新潟コンベンションセンター, 2015-11-02-04.
- [42] 森貴司, General scenario of relaxation in periodically driven quantum systems, 東京大学 教室会議 ランチトーク, 東京大学 理学部 物理, 2015-11-06.
- [43] 宮下精二, 核生成理論と単磁区反転機構理論の整備, 第8回 磁性材料研究拠点成果報告会, TKP ガーデンシティ仙台, 2015-12-11-12.
- [44] Sergio Andraus, Temperature dependence of the threshold magnetic field for nucleation and domain wall propagation in an inhomogeneous structure with grain boundary, 第8回 磁性材料研究拠点成果報告会, TKP ガーデンシティ仙台, 2015-12-11-12.
- [45] 森貴司, アンサンブル等価性と相対エントロピー, UEDA GROUP 第8回 基礎物理セミナー合宿 一分野横断型若手ワークショップ, 箱根太陽山荘, 2016-02-20-22.
- [46] 白井達彦, 時間周期駆動量子開放系の定常状態, UEDA GROUP 第8回 基礎物理セミナー合宿 一分野横断型若手ワークショップ, 箱根太陽山荘, 2016-02-20-22.
- [47] 森貴司, 桑原知剛, 齊藤圭司, 周期外場によって駆動された量子多体系のエネルギー吸収についての厳密な結果, 日本物理学会 年次大会・春季大会 第71回年次大会 (2016年), 東北学院大学泉キャンパス, 2016-03-19-22.
- [48] 白井達彦, 時間周期外場の掛かった系でのデコヒーレンス, 日本物理学会 年次大会・春季大会 第71回年次大会 (2016年), 東北学院大学泉キャンパス, 2016-03-19-22.
- [49] Sergio Andraus, 西野正理, 宮下精二, 不均一磁気ドメイン構造での核生成とドメイン壁ピニングの温度依存性, 日本物理学会 年次大会・春季大会 第71回年次大会 (2016年), 東北学院大学泉キャンパス, 2016-03-19-22.
- [50] 西野正理, 宮下精二, 一般化6状態クロックモデルにおける長距離相互作用の効果と三角格子反強磁性体の臨界現象, 日本物理学会 年次大会・春季大会 第71回年次大会 (2016年), 東北学院大学泉キャンパス, 2016-03-19-22.
- [51] 鈴木貴文, D.M.Kennes, V.Meden, 相互作用共鳴準位模型における電流ゆらぎ汎関数くりこみ群法による解析, 日本物理学会 年次大会・春季大会 第71回年次大会 (2016年), 東北学院大学泉キャンパス, 2016-03-19-22.
- [52] 池内光希, 宮下精二, Hans De Raedt, Sylvain Bertaina, 量子スピン系における ESR スペクトルの温度依存性と有限サイズ効果, 日本物理学会 年次大会・春季大会 第71回年次大会 (2016年), 東北学院大学泉キャンパス, 2016-03-19-22.
- [53] 鳩村拓矢, 宮下精二, 複雑ネットワーク上の横磁場イジング模型における磁場掃引下でのダイナミクス, 日本物理学会 年次大会・春季大会 第71回年次大会 (2016年), 東北学院大学泉キャンパス, 2016-03-19-22.
- [54] 榎 裕太, 松本宗久, 宮下精二, 赤井久純, 三宅 隆, 佐久間照正, スピン模型による希土類磁石の磁気異方性に関する有限温度特性の解析, 日本物理学会 年次大会・春季大会 第71回年次大会 (2016年), 東北学院大学泉キャンパス, 2016-03-19-22.
- [55] 石井隆志, 桑原知剛, 森貴司, 周期駆動可積分系における heating の可能性, 日本物理学会 年次大会・春季大会 第71回年次大会 (2016年), 東北学院大学泉キャンパス, 2016-03-19-22.

招待講演

- [56] 宮下精二, Numerical methods for quantum magnets, 研究会名: 日本磁気学会, 名古屋大学, 2015-9-11.
- [57] 宮下精二, 時間発展法による ESR スペクトルの計算法の開発: 相関関数法と Wiener-Khinchin 法, 第54回電子スピンサイエンス学会年会 (SEST2015), 朱鷺メッセ: 新潟コンベンションセンター, 2015-11-2-4.
- [58] 宮下精二, スピントロニクスオーバー系での相転移, 兵庫県立大学大学院物質理学研究科フロンティア機能物質創製センター第2回シンポジウム「機能性物質の最前線—物質科学の新展開を目指して—», 兵庫県立先端科学技術支援センター (CAST) セミナー室1 (大ホール), 2016-03-05.
- [59] 森貴司, 周期外場によって駆動された量子多体系の準定常性, 量子論の諸問題と今後の発展 (QMKEK), 高エネルギー加速器研究機構 (KEK), 2016-2-17-18. (セミナー)
- [60] S. Miyashita, Competitions of elastic and short range interactions in spin-crossover materials,

Florida State University, Department of Physics
National High Magnetic Field Laboratory, 2016-02-19.

- [61] S. Miyashita, Temperature dependence of the nucleation and magnetic domain wall propagation, York University, Department of Physics, 2016-03-30.
- [62] 森貴司, 二つの混合状態間のマクロな等価性と相対エントロピー, 矢上統計物理学セミナー, 慶應大学, 2016-03-25.
- [63] 森貴司, Long-time behavior of a quantum system subject to periodic driving, 羽田野研究室セミナー, 東大生産研, 2015-04-16.
- [64] 白井達彦, 駆動共振器系で起こる新奇な相転移現象について, 矢上統計物理学セミナー, 慶應大学 矢上キャンパス, 2015-04-17.
- [65] T. Shirai, S. Miyashita, Novel symmetry-breaking phenomenon in a driven cavity system. (駆動共振器系で現れる新奇な相転移現象について) 京都大学基礎物理学研究所セミナー, 京都大学 基礎物理学研究所 研究棟・講義室 K202, 2015-04-22.
- [66] Takafumi Suzuki, Photon-assisted current noises through a quantum dot system, 京都大学基礎物理学研究所セミナー, 京都大学 基礎物理学研究所 研究棟・講義室 K202, 2015-07-15.
- [67] Takafumi Suzuki, Functional renormalization group study of the current noise of the interacting resonant level model, 京都大学基礎物理学研究所セミナー, 京都大学 基礎物理学研究所 研究棟・講義室 K202, 2015-11-18.
- [68] Takafumi Suzuki, Photon-assisted current noise through a quantum dot system, 羽田野研セミナー, 生産技術研究, 2016-01-07.

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)、トポロジカル物質、ディラック電子系、有機伝導体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-波超伝導について詳しく調べた。具体的には電子相関を十分考慮した試行波動

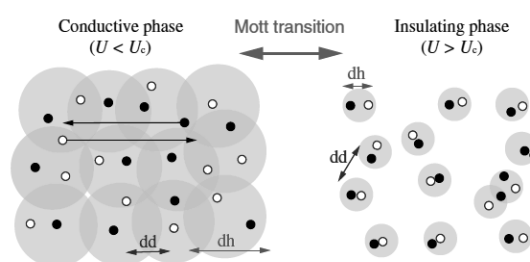


図 3.3.1: 黒丸が doublon、白丸が holon を表す。右は束縛状態を作った絶縁体状態 (モット絶縁体) で、左は束縛状態が重なり合って金属となった状態。右図の状態に動けるキャリアがドーピングされた状態が、高温超伝導の舞台であると考えられる。

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 (図 3.3.1 右図参照)。[40]

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。我々は時間反転対称性を破った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、図 3.3.1 の doublon と holon の束縛という観点を加えて調べることによって、フラックス状態の安定性を議論した。また、新しく波動関数に適切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があることが明らかになった。[5]

電子ドーピング銅酸化物高温超伝導体の微視的モデル

電子ドーピング系の銅酸化物高温超伝導体とホールドーピング系を比較すると、 t' の違い以外に有効的なハバードモデルのクーロン斥力が小さいという可能性がある。このアイデアをもとに、酸素軌道を考慮したハバードモデルから微視的モデルを構築した。クーロン斥力が小さい場合、ドーピング無し状態でモット絶縁体とはならず、代わりに超伝導がゼロドーピングまで実現するという可能性がある。ハバードモデルに対する変分モンテカルロ計算の結果は、この可能性を支持している。[64, 65]

3.3.2 ディラック電子系

単層グラファイト (グラフェン) や有機伝導体 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しうると予想され、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「固体中のディラック電子系」と呼ばれる。我々は興味ある物性を開拓すべく研究を行っている。

ディラック電子系の誘電率

ディラック電子系物質の誘電率に関する解析計算を行った。よく知られているように、ディラック方程式はローレンツ変換に対して不変である。このローレンツ共変性に起因して、誘電率と反磁性磁化率の間にはディラック電子系特有の普遍的な関係があることを見出した。この関係は、量子電磁力学のくりこみ理論と固体ディラック電子の電気磁気応答との対応という観点からも興味深く、今後の発展が期待される。

ディラック電子のスピホール効果

固体中ディラック電子は、顕著なスピホール効果を生み、それが反磁性電流と同じ表式で与えられることを発見した(図 3.3.2 参照)スピホール効果とは、加えた電場に対して垂直方向にスピ流が発生する現象であり、スピ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、我々は非放射性元素中最大のスピ軌道相互作用を持つビスマスにおけるスピホール効果を、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。[31, 41, 42]

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)とその周りに現れる π 電子由来の局在軌道との相互作用により強められることを数値くりこみ群により示した。また、磁場を印加すると軌道磁性の効果により近藤温度が劇的に減衰する可能性があることを、磁場下の強束縛近似による電子状態の計算から明らかにした。[19, 61]

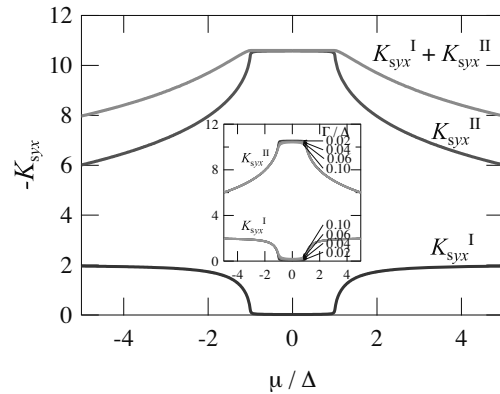


図 3.3.2: ビスマスのディラック電子によるスピホール係数

ディラック電子系の遮蔽と超伝導

単一分子有機導体 $[\text{Ni}(\text{hfdt})_2]$ は、圧力印加により超伝導を示す。本物質において、超伝導転移温度が最高になる圧力でディラック電子が発現し、さらに高圧でフェルミ面が大きくなるにもかかわらず超伝導転移温度は下がるという特徴的な振舞いが見られている。我々はこの特異な超伝導転移温度とフェルミ面の大きさとの関係を解明するために、電子格子相互作用の遮蔽効果に着目し、平均場近似を用いて超伝導転移温度の導出を行った。その結果、2次元、3次元そして擬2次元のディラック電子において、超伝導転移温度がフェルミ波数の関数としてピークを持つことを明らかにした。[11, 62]

ディラック電子の超伝導状態におけるマイスナー効果

4×4 行列で表されるディラックハミルトニアンをもとに、ディラック電子の超伝導状態におけるマイスナー効果を調べた(図 3.3.4)。その結果、通常の k^2 分散の場合に見られる反磁性項ではなく、バンド間効果を起源とする非自明なマイスナー効果を示すことを発見した。さらに非相対論極限を考慮することで、ディラック電子のマイスナーカーネルが、非相

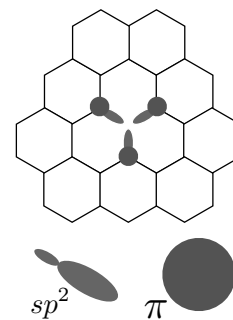


図 3.3.3: グラフェン中の点欠陥とその周りの sp^2 軌道と π 軌道

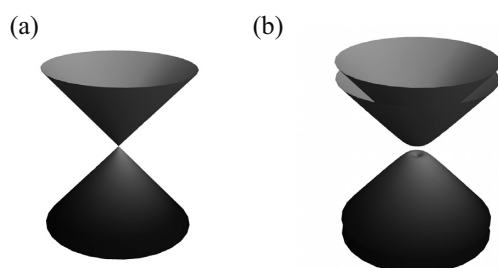


図 3.3.4: ディラック電子の (a) 常伝導状態と (b) 超伝導状態での分散関係。

対論極限での自由電子のマイスナーカーネルと一致することを確認した。また、自由電子のマイスナーカーネルの「常磁性項」と「反磁性項」が、ディラック電子ではそれぞれ「バンド内項」と「バンド間項」に対応することを明らかにした。[8, 22]

3.3.3 反磁性

ブロッホ電子の軌道帯磁率の一般論

磁場下のブロッホ電子の運動は長年の基本的な問題であるが、グリーン関数を用いた一般的な表式から出発して、ブロッホ波動関数を用いた厳密な軌道帯磁率の一般表式を導き出すことに成功した。通常知られている Landau-Peierls による軌道帯磁率以外に、3つの項にまとめることができることを示し、それぞれの物理的な意味も明らかとなった。厳密な表式なので、Van Vleck 項、内殻電子による反磁性項 (Langevin 項) などすべてを含む。さらに、原子軌道を出発点とした tight-binding モデルでの軌道帯磁率を具体的なモデルに対して求め、軌道の重なり積分に関する摂動として厳密な帯磁率の結果を初めてしめすことができた。[1, 2]

パイエルス位相による方法

固体中の軌道磁化率を求める方法として、グリーン関数を用いた福山公式による方法と、パイエルス位相による方法とが知られている。しかし、通常用いられるパイエルス位相による方法では、その導出過程に近似が入るため、結果として福山公式を用いて導出された軌道磁化率とは異なることが指摘されていた。そこで、パイエルス位相導出の際の近似を行うことなく計算を進めて軌道磁化率を導出し、福山公式から導出された軌道磁化率と一致することを明らかにした。[7]

3.3.4 有機導体に関する理論

有機導体 (分子性導体) は関連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磁気抵抗

有機物におけるディラック電子の分散関係は、波数空間で傾いていると考えられている。このことを考慮して、磁場中の輸送現象を調べた [4]。古典的な電子の運動は傾きのために楕円となるが、このためにランダウレベルの混成が起って伝導度が変化することがわかった。低磁場では伝導度に異方性が出現し、これを実験的に測定することでディラックコーンの傾きが測定できることを提唱した。さらに、最近の α -(BEDT-TTF)₂I₃ の有機導体における磁気抵抗の実験との比較を行い、実験で見られている電気伝導度の極小現象が、不純物散乱を考えることによって理解できることを見出した。さらに、磁気抵抗の計算を3次元のディラック電子系にも拡張した [20]。この場合、磁場方向の伝導度が量子極限で温度や磁場に依存しない一定値になることを見出した。

3.3.5 トポロジカル物質の理論

Dirac 半金属系におけるスピン流及び軸性カレントの理論

トポロジカル相転移点直上で実現する Dirac 半金属系の輸送を議論した。具体的には、 4×4 の質量項無し Dirac Hamiltonian について、自己無撞着 Born 近似の範囲で量子輸送方程式を書き下し、空間について2次の勾配近似を行った。その結果、電荷・スピン3成分・軸性チャージ等を含む8自由度のカップルした拡散方程式群を得た。この方程式群を電場下の定常状態において解くことにより、慣習的スピン流演算子が0であるのにも関わらず、試料端でスピン蓄積を伴うスピンホール効果が起こることを明らかにした。また、軸性カレントが試料端において電場及びスピン流に垂直な方向に流れていることを示した [12, 39, 45]。

フラクタルと量子ホール係数の関係

2次元正方格子遍歴電子系に垂直磁場を印加すると、Hofstadter's butterfly と呼ばれるフラクタルな量子相図が現れる。このとき、整数量子ホール効果との間に興味深い関係が存在することがわかった。単位格子当たりの磁束 $\phi = p/q$ の分母の偶奇に応じて、ゼロ点近傍に $|k|$ に比例するディラックコーンまたは k^2 分散が生じることがわかる。これらのバンドは付加的な磁束 $\Delta\phi$ によりランダウ量子化され、準位間で σ_{xy} が量子化される。格子系を考えているため、いずれのランダウ準位も分裂するが、 σ_{xy} の総和は分裂前と変わらないため、特定の条件下では具体的な計算をすることなく σ_{xy} が求められる。我々は、この条件とフラクタルの間に共通する規則が存在することを明らかにした。[13, 25, 48]

3.3.6 重い電子系および多軌道電子系理論

f^2 電子配置系での非磁性一重項状態と準粒子との関連性

U や Pr などの f 軌道に電子が 2 個占有している強相関系 (f^2 電子配置) では、局在サイトで非磁性一重項基底が実現していると考えられている UPt_3 や UBe_{13} などにおいて、異常な物性が観測されている。これらの物性を微視的な観点から理解するために、多軌道周期アンダーソン模型に対して Rotationally invariant slave boson 法の鞍点近似を用いることで、準粒子状態と非磁性一重項との関連性を調べた。その結果、非磁性一重項はその対称性によって 2 種類の異なる物性を遍歴電子に及ぼすことがわかった。(1) まず、任意の結晶構造で実現する Γ_1 一重項基底の場合、局在電子数が 2 の近傍で、最もエネルギーの低い f 軌道に 2 つの電子が占有する一次の局在軌道間の価数転移が起こることがわかった。この系では伝導電子との混成強度を軌道ごとに変化させない限り、重い準粒子状態を形成しないことを示した。(2) 一方で六方晶系での Γ_4 一重項など、 Γ_1 以外の対称性を有する非磁性一重項基底では、結晶場一重項基底と近藤-芳田一重項状態の競合によって、磁場に鈍感な重い準粒子状態が形成されることがわかった。[30, 63]

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、原子価スキッピングと呼ばれている。最近 Tl を少量ドープした $PbTe$ 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。[50]

量子臨界磁気ゆらぎの反対称スピン軌道相互作用に対する影響

f 電子系を含む化合物の中には、加圧によって磁気秩序が消失する臨界圧近傍で、量子臨界磁気ゆらぎが発達して種々の物理量に非フェルミ液体的振る舞いが現れる物質がある。しかし、量子臨界磁気ゆらぎがラシュバ相互作用のような反対称スピン軌道相互作用に与える影響についてはわかっていなかった。この影響を調べた結果、量子磁気臨界点近傍でフェルミ面が顕著に変形するとともに、スピン軌道相互作用によって分裂した二つのバンドの質量くりこみ効果が逆になることがわかった (JPSJ 誌の Editors' choice に選ばれた)。[6, 26]

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、空間反転対称性の破れた多軌道系のスピンホール伝導率は、不純物散乱の強さの関数として符号反転含む特異な依存性を示すことが明らかになった。また、不純物散乱強度の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、さらにバーテックス補正がスピンホール伝導率にほとんど影響しないことを示した。[9]

励起子絶縁体

励起子絶縁体はバンド間のクーロン相互作用により発現する相であり、近年実験的にその候補物質として Ta_2NiSe_5 が見つかった。さらに、この Ta_2NiSe_5 が高圧下で示す超伝導相も実験的に報告された。これを受けて我々は、バンド間クーロン相互作用を含んだ 2 バンドハバードモデルを起点に超伝導の可能性について追究した。具体的には、異スピン間のバンド間クーロン相互作用をとりいれ、2 次摂動を考えた。その結果、超伝導体のモデルである t - J モデルの形に変形できることを明らかにした。[53]

3.3.7 磁性体およびスピン軌道相互作用

ハイパーかごめ格子を有するイリジウム酸化物の磁気相図

ハイパーかごめ格子 (図 3.3.5) を有するイリジウム酸化物 $Na_4Ir_3O_8$ は、3 次元量子スピン液体の実現候補物質として注目されている。本物質の低温でのスピン状態を解明するために、我々はまずスピン軌道相互作用を含む多軌道ハバード模型からマイクロにスピン模型を導出した。その結果、等方的なハイゼンベルグ反強磁性相互作用の他に 3 つの異方的相互作用を含むスピン模型を得た。得られたスピン模型に対し、古典スピンを仮定して基底状態相図を求めた。その結果、非整合磁気秩序や反強磁性秩序の他に、3 つの非共面的な $q = 0$ の磁気秩序相を得た [10, 51]。

強磁性体-カイラル磁性体接合における非相反マグノンの透過率

磁性体における素励起であるマグノンは、長距離に渡ってスピンを運ぶことが可能であり、理論面のみならず応用面においても注目を集めている。反転中心対称性が破れた系において、マグノンは分散関係の違いから進行方向に対して挙動が変化する非相反性を持つことが期待される。実際、 $LiFe_5O_8$ などの磁性体物質においては、非相反な伝搬が観測されている。我々はマイクロ波スピンポンピングによるスピン注入を想定し、らせん磁気構造が実現しているカイラル磁性体と強磁性体の接合でのマグノンの透過率を理論的に解析した。手法として、LLG 方程式を用いた数値計算と、ジャロシンスキー守谷 (DM) 相互作用を含むハミルトニアンからの微視的な解析計

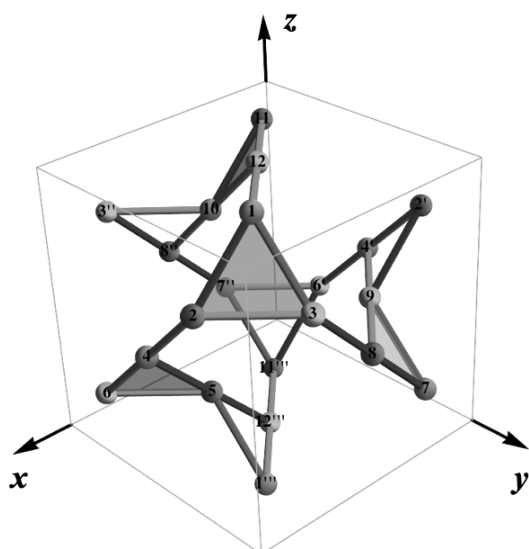


図 3.3.5: ハイパーかごめ格子の構造 [10]

算を用いた。その結果、透過率の DM 相互作用依存性や外部磁場依存性を明らかにした。[52]

らせん構造とスピンのカイラル磁気構造との微視的関係

カイラル磁性体はスピンがらせん状に巻いた磁性体である (図 3.3.6 参照)。このようなスピン構造は、結晶構造中のらせん構造がスピン軌道相互作用を通してスピンの転写されることによって生じる。しかし、らせん構造とカイラル磁気構造の微視的関係は十分に理解されていなかった。この関係性を解明するため、微視的模型を出発点に電子状態解析をおこなった。その結果、スピン軌道相互作用により、らせん構造中を移動する電子の軌道間の移動積分に位相が生じることがわかった。さらに電子間のクーロン相互作用を導入すると、カイラリティを産むジャロシンスキー守谷相互作用が得られることがわかった。[33, 35]

強磁性体/重金属界面におけるジャロシンスキー守谷相互作用の RKKY メカニズムによる微視的導出

ジャロシンスキー守谷相互作用 (DMI) はスピントロニクス分野において、興味深い性質を引き起こすものとして興味をもたれている。強磁性体と重い原子を含む金属 (重金属) 接合界面において、DMI によると思われる磁気モーメント反転などの現象が見られている。これを理解するために、表面ラシュバ相互作用と重金属中の RKKY メカニズムを同時に考慮することによって、強磁性体内の DMI を微視的に評価した。ラシュバ相互作用の大きさによって、DMI の絶対値に上限があること、ラシュバ相互作用が大きすぎると DMI はむしろ減少してしまうこと

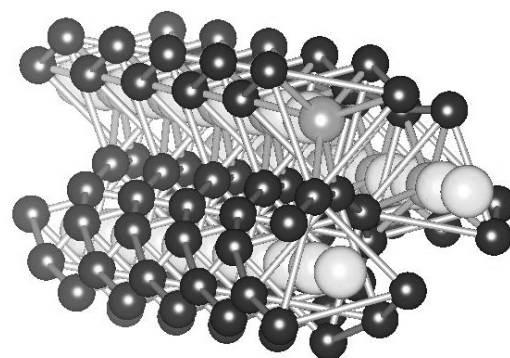


図 3.3.6: CrNb_3S_6 の結晶構造。下半分の濃い色の硫黄イオンが、らせん形に巻いている。(現実の結晶より、らせん構造を誇張して描いている。)

を見出した。また、強磁性体と重金属の格子定数の比や、重金属側の化学ポテンシャルの位置によって、DMI の符号が変わることも見出した。これらは実験結果の解釈に役立つと思われる。[14, 34, 37, 38, 59]

反強磁性体磁壁のダイナミクス

スピントロニクスの主な研究は強磁性体であり、他の磁気構造である反強磁性体の研究は未発展な部分が多い。そこで特に反強磁性体に対する確率的ランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式を用いて、以下のことを示した。(1) 反強磁性体/非磁性体金属接合におけるスピン・ゼーベック効果によって注入されるスピン流の磁場依存性を調べた。(2) 反強磁性体のフォッカー・プランク方程式を調べ、上記のスピン流を見積もった。(3) また、温度勾配下の反強磁性磁壁のダイナミクスを調べ、磁壁にかかるトルクがスピン波の分布に比例することを示した。またジャロシンスキー守谷相互作用に比例する付随的な項を見出した。[28, 46]

<報文>

(原著論文)

- [1] M. Ogata and H. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 124708-1-13 (2015). "Orbital Magnetism of Bloch Electrons I. General Formula"
- [2] M. Ogata: to appear in J. Phys. Soc. Jpn. "Orbital Magnetism of Bloch Electrons II. Application to Single-Band Models and Corrections to Landau-Peierls Susceptibility"
- [3] H. Fukuyama and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 023702-1-3 (2016). "Solitons in the Crossover between Band Insulator and Mott Insulator: Application to TTF-Chloranil under Pressure"

- [4] I. Proskurin, M. Ogata, and Y. Suzumura: Phys. Rev. B **91**, 195413-1-14 (2015). “Longitudinal conductivity of massless fermions with tilted Dirac cone in magnetic field”
- [5] H. Yokoyama, S. Tanuma and M. Ogata: in preparation. “Staggered Flux State in Two-Dimensional Hubbard Model”
- [6] Y. Fujimoto, K. Miyake, and H. Matsuura: J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 043702-1-5 (2015). “Deformation of the Fermi Surface and Anomalous Mass Renormalization by Critical Spin Fluctuations through Asymmetric Spin-Orbit Interaction”
- [7] H. Matsuura and M. Ogata: submitted to J. Phys. Soc. Jpn. “Theory of Orbital Susceptibility in the Tight-Binding Model: Corrections to the Peierls Phase”
- [8] T. Mizoguchi and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 084704-1-7 (2015). “Meissner Effect of Dirac Electrons in Superconducting State due to Interband Effect”
- [9] T. Mizoguchi and N. Arakawa: Phys. Rev. B **93**, 041304(R) (2016). “Controlling spin Hall effect by using a band anti crossing and nonmagnetic impurity scattering”
- [10] T. Mizoguchi, K. Hwang, K.-H. Lee and Y. B. Kim: submitted to Phys. Rev. B. “Generic Model for Hyperkagome Iridate in the Local Moment Regime”
- [11] T. Mizoguchi and M. Ogata: in preparation. “Unscreening Effect on Electron-Phonon Coupling in Dirac Electron Systems”
- [12] N. Okuma and M. Ogata: to appear in Phys. Rev. B. “Unconventional Spin Hall Effect and Axial Current Generation in a Dirac Semimetal”
- [13] N. Yoshioka, H. Matsuura and M. Ogata: to appear in J. Phys. Soc. Jpn. “Quantum Hall effect of massless Dirac fermions and free fermions in Hofstadter’s butterfly”
- [14] T. Shibuya, H. Matsuura and M. Ogata: submitted to J. Phys. Soc. Jpn. “Magnetic chirality induced from RKKY interaction at an interface of a ferromagnet/heavy metal heterostructure”
- [15] S. C. Furuya, H. Matsuura, and M. Ogata: submitted to Phys. Rev. Lett. ArXiv:1503.02499. “Negative Coulomb Drag in Coupled Quantum Wires”
- [16] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: in preparation. “Localized State of Massless Dirac Fermions in Quasi-Two-Dimensional Organic Conductor α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ Induced by Singlet Defect”
- [17] Y. Tanaka and M. Ogata: in preparation. “Correlation Effects on Charge Order and Zero-Gap State in Organic Conductor α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ ”
(会議抄録)
- [18] H. Yokoyama, R. Sato, S. Tamura, and M. Ogata: Phys. Proc. **65**, 17 (2015). “Effects of diagonal hopping on stability of antiferromagnetic state”
- [19] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: J. Phys. Conf. Series **603**, 012013-1-10 (2015). “Defect-induced Kondo effect in graphene: Role of localized state of π electrons”
- [20] I. Proskurin, M. Ogata, and Y. Suzumura: J. Phys. Conf. Series **603**, 012009-1-12 (2015). “Longitudinal conductivity of a three-dimensional Dirac electron gas in magnetic field”
- [21] Y. Suzumura, I. Proskurin, and M. Ogata: J. Phys. Conf. Series **603**, 012011-1-10 (2015). “Reflectance of Dirac electrons in organic conductor”
- [22] T. Mizoguchi and M. Ogata: J. Phys. Conf. Series **603**, 012004-1-7 (2015). “Meissner effect of Dirac electron in superconducting state”
- [23] N. Okuma and M. Ogata: J. Phys. Conf. Series **603**, 012018-1-7 (2015). “Study of spin transport in Dirac systems”
- [24] S. Suetsugu, H. Matsuura, and M. Ogata: J. Phys. Conf. Series **603**, 012020-1-6 (2015). “Anomalous Hall effect in the Dirac electron system with a split term”
- [25] N. Yoshioka, H. Matsuura, and M. Ogata: J. Phys. Conf. Series **603**, 012019-1-7 (2015). “Distribution of Chern number by Landau level broadening in Hofstadter butterfly”
(国内雑誌)
- [26] 松浦弘泰、三宅和正: 固体物理 **109**, 51 (2016). “スピン軌道相互作用と多体効果の協奏”
(学位論文)
- [27] 澁谷泰良: “Dzyaloshinskii-Moriya Interaction at an Interface of a Ferromagnet/Heavy Metal Heterostructure” (重金属/強磁性体へテロ構造界面に発生する Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用の理論的研究) (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)
- [28] 中田百科: “Spin Dynamics of Antiferromagnets at Finite Temperatures” (有限温度での反強磁性体のスピンダイナミクス) (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
- [29] M. Ogata and H. Fukuyama: 20th International Conference on Magnetism (ICM2015) (Barcelona, Spain, July 5–10, 2015). “Orbital Magnetism in Multi-Band Systems”
- [30] T. Hinokihara, A. Tsuruta and K. Miyake: (ICM 2015) (Barcelona, July 5–10, 2015). “Relation between Heavy Quasiparticles and Crystal Electric Field Multiplet in f^2 -Configuration Based Systems”

- [31] M. Ogata, Y. Fuseya and H. Fukuyama: Cooperation in Physics Workshop: LUM-UT (Tokyo, February 29–March 1, 2016). “Spin Hall effect and spin-polarization in magneto-optical conductivity of Dirac electrons”
- [32] K. Tokushuku, Y. Masaki, J. Kishine and M. Ogata: LMU-UT (2.29-3.1, 2016). “Transmittance of nonreciprocal magnon to chiral magnet”
- [33] H. Matsuura: Third International Workshop DM Interaction and Exotic Spin Structures (Pskov, Russia, May 26–30, 2015). “Theory of DM interaction derived from screw structure of crystal”
- [34] T. Shibuya, H. Matsuura and M. Ogata: Core to Core, Kick off meeting (Glasgow, October 11–13, 2015). “Study of interfacial DM interaction in a heavy metal/ferromagnet heterostructure”
- [35] H. Matsuura: Joint of STAC-9 and TOEO-9 (Tsukuba, October 19–21, 2015). “Spin-Orbit Interaction and Superexchange Mechanism on 5d Materials”
- [36] H. Matsuura: Toyota RIKEN International Workshop 2015 (Nagoya, November 17–19, 2015). “Effect of spin-orbit interaction on metallization of quasicrystal system”
- [37] H. Matsuura: CMSI-USMM International Workshop (Tokyo, January 5–9, 2016). “Spin-Orbit Interaction in Bulk and Interface”
- [38] H. Matsuura: Core to Core International Meeting, χ Mag2016 (Hiroshima, February 21–24, 2016). “DM interaction induced by RKKY interaction at interface of ferromagnet/heavy metal heterostructure”
- [39] N. Okuma and M. Ogata: ISSP International workshop on “New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics” (ISSP, June 1–19, 2015). “Spin Hall effect of Dirac fermions with vanishing spin current operator”
- 招待講演
- [40] M. Ogata and H. Yokoyama: Martin Gutzwiller’s Scientific Universe: From Wavefunctions over Periodic Orbits to Sun, Moon and Earth (Dresden, Germany, October 28–31, 2015). “Crossover between BCS Superconductivity and Doped Mott Insulator in Two-Dimensional Hubbard Model”
- [41] M. Ogata, Y. Fuseya and H. Fukuyama: Hong Kong Forum of Physics 2015 “Novel Quantum States and Their Manipulations” (Hong Kong, January 10–12, 2016). “Spin Hall effect and large diamagnetism in Dirac electrons in solids”
- [42] M. Ogata, Y. Fuseya and H. Fukuyama: Tsinghua-UTokyo Workshop on Recent Topics in Materials Physics, Science and Engineering (Tokyo, March 9–11, 2016). “Spin Hall effect and spin-polarization in magneto-optical conductivity of Dirac electrons” (国内会議)
- 一般講演
- [43] 小形正男, 福山秀敏: 日本物理学会, 関西大学 2015, 9.25–9.28 (秋季大会) “グラフェンにおける軌道帯磁率の理論”
- [44] 福山秀敏, 小形正男: 日本物理学会, 関西大学 “中性-イオン性転移におけるソリトン”
- [45] 大熊信之, 小形正男: 日本物理学会, 関西大学 “慣習的スピン流演算子が0のディラック電子系におけるスピンホール効果”
- [46] 中田百科, 小形正男: 日本物理学会, 関西大学 “ブロッホ方程式を用いたスピンモーティブフォースとスピントランスファートルクの現象論的導出”
- [47] 澁谷泰良, 松浦弘泰, 小形正男: 日本物理学会, 関西大学 “強磁性体/重金属ヘテロ接合界面に発生するDzyaloshinskii-Moriya 相互作用の膜厚依存性”
- [48] 吉岡信行, 松浦弘泰, 小形正男: 日本物理学会, 関西大学 “Hofstadter’s butterfly 中の massless Dirac Fermion と free fermion”
- [49] 小形正男: 日本物理学会, 東北学院大学 2016, 3.19–3.22 (年次大会) “ブロッホ電子の軌道帯磁率: 摂動としての厳密な取扱い”
- [50] 松浦弘泰, 三宅和正: 日本物理学会, 東北学院大学 “バレンススキッピングによる近藤効果と超伝導の理論”
- [51] 溝口知成, Yong-Baek Kim: 日本物理学会, 東北学院大学 “ハイパーかごめ格子をもつイリジウム化合物 $\text{Na}_4\text{Ir}_3\text{O}_8$ の磁気相図”
- [52] 徳宿邦夫, 正木祐輔, 岸根順一郎, 小形正男: 日本物理学会, 東北学院大学 “カイラル磁性体界面へのスピンプンピングによる非相反マグノンの伝播”
- [53] 宮藤大輔, 小形正男: 日本物理学会, 東北学院大学 “2バンドハバード模型による励起子絶縁体の相図の数値計算”
- [54] 山崎国人, 土浦宏紀, 吉岡匠哉, 小形正男: 日本物理学会, 東北学院大学 “電子ドーピング型超伝導体の有効モデルと超伝導状態”
- [55] 小形正男: 「分子バイオロジー研究会」、蒲郡 2015, 7.25–7.26 “量子バイオロジーの理論構築”
- [56] 松浦弘泰: 広島大学キラル物性拠点研究会, 広島大学イノベーションセンター 2015, 4.17 “日常と非日常の左右対称性の破れ”
- [57] 松浦弘泰: キラルミニ勉強会, 広島大学, 2015, 7.21-23 “磁気相互作用ミニマム”
- [58] 松浦弘泰: SPRUC 分野融合型研究 (実用) 準備会, 大阪大学, 2015, 9.7 “固液界面のマイクロ理論の可能性”
- [59] 松浦弘泰: 理研シンポジウム: ミュオン科学応用の最先端, 理化学研究所, 2016, 2.16 “Spin-Orbit Interaction in Bulk and Interface”
- [60] 松浦弘泰: 理研シンポジウム: ミュオン科学応用の最先端, 理化学研究所, 2016, 2.16 “Theory on Formation of Muonium in solid and Observation of Electric field in solid by Excited states of Muonium”

- [61] 松浦弘泰: 第8回東北大学研究会、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目指して」東北大学、2016、2.19–21 “グラフェンにおける欠陥誘起近藤効果の理論”
- [62] 溝口知成、小形正男: 第1回ディラック電子系マルチフェロイクス研究会、2016、1.28–29 “ディラック電子系における電子格子相互作用の遮蔽と超伝導”
- [63] 檜原太一、鶴田篤史、三宅和正: J-Physics: 多極子伝導系の物理 Kick-Off、神戸大学総合研究拠点コンベンションホール 2015、9.14–15 “多軌道アンダーソンモデルのスレーブボソン法による解析”

招待講演

- [64] 小形正男: 日本物理学会、関西大学 2015、9.25–9.28 (秋季大会) 領域7、8 合同シンポジウム『強相関係での電荷揺らぎの物理の新展開: π 電子系と d 電子系』“d 電子系の電荷揺らぎを含んだ超伝導”
- [65] 小形正男、横山寿敏: 「エキシトニック相、強相関係電荷揺らぎ」勉強会 (東京理科大学 2015、7.14–7.15) “電子ドープ系とホールドープ系”

(セミナー)

- [66] M. Ogata Seminar at Universidad Autonoma de Madrid (2015, July 10) “Crossover between BCS Superconductivity and Doped Mott Insulator in Two-Dimensional Hubbard Model”
- [67] 小形正男: 理学クラスター講義 (2015, July 21) “物性における対称性: 超伝導をめぐる”
- [68] 小形正男: 高校生のための冬休み講座 2015 (December 24) “目の前の量子力学～超伝導のふしぎ～”
- [69] 徳宿邦夫: MERIT colloquium、東京大学 (2015、12.19)、“Non-reciprocal magnon propagation in chiral magnet”

3.4 常行研究室

第一原理分子動力学法など基本原理に基づく計算機シミュレーションは、観測や実験からは得られない物性情報を得たり、あるいは実験に先んじた予言を行うことを可能にする。当研究室では主にそのような計算物理学的手法を開発しながら、物性物理学の基礎研究を行っている。電子相関の強い系やナノ構造体を取り扱うための新しい第一原理電子状態計算手法の開発、緩和の遅い熱伝導現象を第一原理に基づいてシミュレーションするためのモデリング手法の開発、超伝導転移温度の第一原理計算手法の開発、超高圧下など極限条件下の結晶構造探索と物性予測、固体表面・界面の構造・電子状態・化学反応機構、固体中の水素不純物効果、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

非調和格子振動のスパースモデリングとフォノン物性計算への応用

格子振動の非調和性は固体の熱膨張、格子熱伝導、および高温・高圧下における構造安定性など様々な物性を特徴付ける事が知られている。当研究室では、この多彩に振る舞う非調和効果を統一的に扱うための第一原理計算手法の開発を行っている。この手法では、通常のフォノン計算に必要な2次の Interatomic force constant (IFC) に加えて3次と4次の非調和 IFC を第一原理的に決定する必要がある。パラメータである IFC が求まれば、それらを用いた摂動計算や自己無撞着フォノン計算を行うことで様々な非調和フォノン物性を非経験的に計算する事が可能である。本手法は汎用性が高く且つ高精度であるが、高次テンソルである非調和 IFC を全て第一原理的に決める必要があり、特に結晶構造が複雑な系で計算コストが増大するという課題があった。

これを解決するため、Least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) によるパラメータ推定の最適化を試みた。LASSO では通常の最小自乗法に対し L_1 ノルムをペナルティ項として加えてパラメータ最適化を行う。 L_1 ノルムによって多くのパラメータがゼロとなるスパースな解が得られやすく、且つ過学習を回避しやすくなるという利点がある。LASSO を実装し Si, PbTe や SrTiO₃ などへ適用したところスパースな解を得ることに成功した。また、最小自乗法に比べて少ない学習データで必要な IFC を効率的に推定出来ることを確認した。

上記の手法を熱電材料である SnSe および高圧下で高い超伝導転移温度を示す硫化水素 (H₃S, H₂S) へ適用し、フォノンの非調和性と熱伝導率・超伝導転移温度との関連性を定量的に解析した。

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出来

る。本年度は逐次対角化法により TC 法の自己無撞着方程式を解く手法を開発し、従来の DFT 軌道を基底関数とした直接数値対角化法に比べて格段に計算を高速化することに成功した。これにより、遷移金属酸化物など電子相関の強い系に TC 法を適用する基盤が整った。

分割統治法を用いたナノ構造体の全系電子状態・エネルギースペクトル計算手法の開発

密度汎関数理論などの第一原理に基づく電子状態計算手法は、物質中の原子配置と電子物性を高精度に理論解析・理論予測するための強力な手段である。ところが通常の第一原理計算の計算コストは、系の大きさの 3 乗もしくはそれ以上のべきで増加するため、複雑なヘテロ界面を含むナノ構造体への適用には多くの計算資源を要する。そこで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をほぼ独立に行う事で、計算コストを系の大きさの 1 乗に収める、いわゆる分割統治法（オーダー N 法の一つ）が開発されているが、全系に広がった電子状態やそれがもたらすエネルギースペクトルが記述できないため、利用範囲が限定されている。

そこで我々では、分割された各部分系 (fragment) の波動関数を、全系波動関数を表現するための基底関数として用い、さらに部分系のエネルギースペクトルも利用することで、高速に全系の電子エネルギースペクトル計算を実現する手法の開発を行っている。これまで分割統治法の一つである LS3DF 法に基づき手法開発を続けてきたが、LS3DF 法では外側に真空層を置いた孤立系として部分系の計算を行うことや、この手法の特徴として部分系の重なりが大きく基底関数が極めて過剰（過完備）になることから、通常的全系電子状態計算と比べて計算精度が悪いという問題があった。そこで今年度より、分割統治法の別種である Lean Divide and Conquer (LDC) 法を下にした実装に取り組み、より高精度で低コストかつ汎用性に優れた手法を開発することに成功した。

スピン-軌道相互作用による結晶磁気異方性解析コードの高速化

近年レアメタルを用いない硬磁性材料開発が期待されているが、これを達成するためにはまず、結晶磁気異方性 (MCA) の起源を明らかにしなければならない。理論的な立場からはスピン軌道相互作用 (SOI) の効果を従来の密度汎関数理論 (DFT) に組み込むことで MCA の議論が展開されてきたが、この手法ではどの原子、どの電子軌道が MCA に寄与しているのかを議論することが難しい。この点に鑑み我々は、DFT 計算と SOI に関する摂動計算を組み合わせることで、MCA の局所解析コードの開発を行ってきた。本年度はこのコードのアルゴリズムを改良することで大規模系、例えば数百原子を含むネオジム磁石界面モデルの Fe 原子の MCA 解析等も全くストレスなく行うことが可能になった。

3.4.2 シミュレーション手法の応用

高圧下硫化水素の高温超伝導

前年度に開始した硫化水素における高温超伝導の研究をさらに推進した。2014 年 12 月に発見された高圧下硫化水素における $T_c=200\text{K}$ の超伝導については、我々のもの (R. Akashi et al., Phys. Rev. B 91, 224513 (2015)) を含む様々な理論的研究がなされたが、硫化水素の圧縮を低温のまま行うと、180GPa-200GPa 付近で T_c が圧力に対して連続的かつ急激に増大する傾向を見せるという、 T_c の圧力に対する依存性は理解が進んでいなかった。そこで H_2S ならびにそれが高圧で相分離することにより現れると考えられている H_3S の結晶構造に関する知見から、相分離のプロセスで「無数の類似構造 (H_xS , $x=2-3$) を段階的に移り変わる」シナリオを提示した (図 3.4.1)。この類似構造群に対して密度汎関数法による全エネルギー計算を行った結果、組成変化に対するエネルギー変化がほぼ線形であり、準安定状態として十分実現の可能性があること、また中間組成に対する超伝導密度汎関数理論に基づく T_c 計算により、実験の T_c 増大が再現されることが明らかになった。

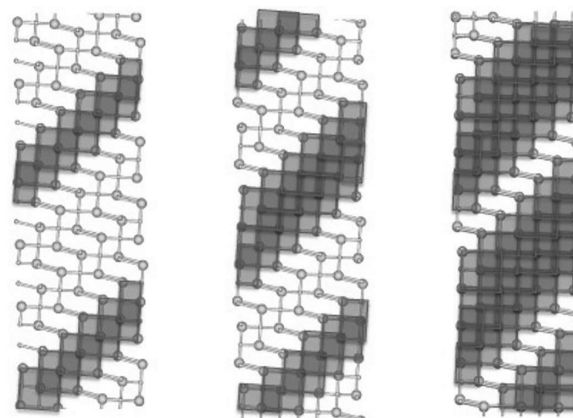


図 3.4.1: 発見された H_2S 結晶構造の例。影をつけた部分には既知の高 T_c 相が部分的に生成しており、この割合が増えるにつれて T_c が増大する。

SiO_2 結晶中の不純物水素の荷電状態

水素不純物は周りの結晶格子・欠陥・不純物と電子をやり取りすることで様々な荷電状態 (H^+ , H^0 , H^-) と、その荷電状態に応じた原子配置を取り、母物質の電氣的・光学的性質を変える。水素不純物の従来の理論研究では、熱力学的に安定な荷電状態はどれか、もしくは水素 (H^0) やプロトン (H^+) はどう拡散するか、ということが研究されてきた。その一方で「荷電状態を移り変わるような反応」については扱われてこなかった。このような反応は準安定な荷電状態の安定性や、荷電状態を移り変わるような新奇な拡散過程を議論する際に必須である。

我々は異なる荷電状態を移り変わる反応の、反応経路を計算する手法を開発した。我々の手法は Nudged Elastic Band 法 (NEB 法) をベースとしている。我々の手法では、まず異なる荷電状態を仮定して得られる二つのポテンシャルエネルギー曲面 (PES) から、各原子配置においてエネルギーの低い方の PES を選び出すことで、新しい一つの PES を考える。そしてその新しい PES に NEB 法を適用することで、荷電状態が変わる反応の反応経路が求まる。

この拡張 NEB 法と密度汎関数法を用いて、石英中の荷電中性の孤立水素原子 (H^0) が他の荷電状態に移る際の反応経路を求め、活性化障壁を第一原理的に計算した (図 3.4.2)。その結果、孤立水素原子は熱力学的には不安定だが、準安定状態として実現可能であることを示した。また各荷電状態が最安定となるような空隙の割合を調べたところ、電子の化学ポテンシャルによってはおよそ 80% の体積で H^0 が最安定となることが分かった。これらの結果からミュオオニウムが大量に観測される μ SR 実験を説明できる。

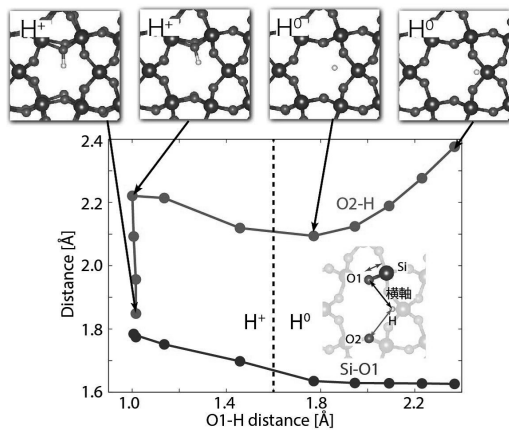


図 3.4.2: 石英中の H^+ と H^0 の安定構造間の反応経路。拡張 NEB 法により格子緩和まで含めた反応経路が計算できる。

第一原理計算による新奇ペロブスカイト型酸水素化物の探索

ペロブスカイト型酸化物 ABO_3 は圧電体や強誘電体として広く研究されている。圧電性や強誘電性を制御するためにカチオン $A \cdot B$ の置換が行われるが、 $A \cdot B$ の組み合わせは一般に、電荷が中性である必要から制限される。一方で、酸素アニオンをヒドリド (H^-) で置換する (酸水素化物を合成する) 研究もなされている。ヒドリドは酸素アニオンとは価数が異なるため、電荷中性になる $A \cdot B$ の組み合わせを変化させられる可能性がある。

こうした新たな組み合わせの中で、 $KTiO_2H$ が価電子帯上部に 2 次元面内の電子状態を持つことを第一原理計算により発見した (図 3.4.3)。この電子状態には水素原子の電子親和力の高さが関係し、水素と同じく 1 価のアニオンになるハロゲンで置換した場合には現れない。また、 $RbTiO_2H \cdot CsTiO_2H$ も同様の電子状態を持ち、他にも新奇物性を持ったペロブスカイト型酸水素化物の存在が期待される。

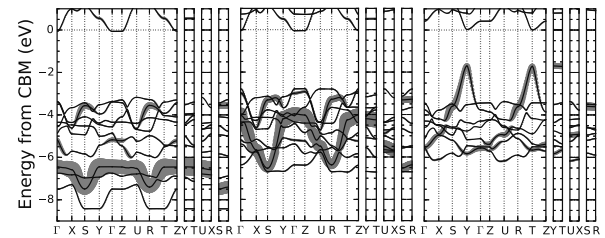


図 3.4.3: 左から $KTiO_2F$, $KTiO_2Cl$, $KTiO_2H$ のバンド構造。色付きの線の太さはそれぞれ $F 2p$, $Cl 3p$, $H 1s$ 成分の強さを表している。エネルギーは伝導帯下端を基準としている。

Cu 添加型焼結磁石材料における異相界面近傍の磁気異方性

Nd-Fe-B 焼結磁石 (ネオジム磁石) は、他の永久磁石に比べ大きなエネルギー積を持つことから様々な製品で利用されているが、高温領域における保磁力の弱熱耐性が問題となっており、その原因は未だ明らかにされていない。この保磁力機構理解のためには、 $Nd_2Fe_{14}B$ 主相とそれを取り巻く多種の副相がなす界面構造と磁気状態が重要であると認識されている。近年、Cu を添加することで Nd-Fe-B 磁石の保磁力が向上するという実験的報告があり、本研究では Cu 添加型 $Nd_2Fe_{14}B/NdO_x$ のモデル界面構造の第一原理計算を進め、界面近傍の主相の磁気状態、特に保磁力と直結している Nd の磁気異方性を中心に解析を行った。計算の結果、主相界面第一相の Fe または Nd 原子の磁気異方性は基本的に面内方向であることが分かった。生成エネルギーの比較を行ったところ、添加された Cu 原子は主相界面第一相の Fe 原子と置き換わりやすいことが確認された。この置換に伴い、界面の Nd の磁気異方性が改善されるという解析結果が得られたことから、電子論的な立場からも Cu 添加が保磁力向上に優位な効果をもたらすことが理解された。

ネオジム磁石粒界相の構造探索への理論数値的アプローチ

現在最強の磁石として幅広く使用されているネオジム磁石の保磁力は、粒界相の組成および構造が重要な役割を果たしている可能性が高精度実験解析によって示唆されている。しかし、数 mm 程度の厚さ

しかない粒界相の構造を実験的に同定するのは極めて困難である。そこで我々は、special-quasirandom structure (SQS) 法に基づく解析によって、この粒界相探索を試みた。ベースとなる構造は実験で示唆された fcc 構造とした。SQS 法に基づき fcc 構造に様々な割合で Nd 原子と Fe 原子をランダムに配置し（ここではスピンの向きもランダムに配置した）、密度汎関数法計算によって構造安定性の評価を行った。その結果、Nd と Fe の組成に依らず結晶構造を保たないことが示された。

相変化記録材料の非熱的構造変化の第一原理的研究

DVD-RAM などの書き換え型光学ディスクの記録膜には、光学特性が大きく異なる結晶-アモルファス相間を高速に転移できる相変化記録材料が使われている。近年、超短パルスレーザー照射による数百 fs 以内の光学特性の変化がこれらの物質で確認され、デバイスの更なる高速化の可能性が示唆されたが、その原子ダイナミクスは未だ明らかとなっていない。そこで我々は、超短パルスレーザー照射による相変化記録材料 (GeTe , $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$) の構造変化の原子ダイナミクスを解明すべく、第一原理分子動力学計算を行なった。その際、レーザー照射直後の状態を記述するために電子系は電子散乱によって短時間に緩和すると仮定し、電子系のみ高温にした有限温度密度汎関数理論を用いた。計算の結果、どちらの物質においても高配位構造を経由するアモルファス化が確認された。この結果は、アモルファス化の際に低配位の間状態が実現すると主張する従来のモデルとは大きく異なるが、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ における非等方的なセル変形などの実験結果を定性的に説明できている。我々は、以上の結果に基づきアモルファス化の新たなモデルの提案を行なった。

半導体中のポリエキシトン

間接ギャップ半導体は伝導電子がバレー自由度を持つことを特徴とし、励起子系においてはバレー自由度がポリエキシトンの安定化という顕著な多体効果をもたらすことが予想されてきた。有効質量近似で記述される電子・正孔系がエキシトン三量体以上の束縛状態を持つかは自明ではなく、実際、水素原子やポジトロニウムでは三量体が安定して存在しないことが実験的・数値計算的に示されている。間接ギャップ半導体では、価電子帯のバンド自由度と伝導帯のバレー自由度が電子間・正孔間の Pauli 斥力を緩和することから三量体以上の複合エキシトンの安定化が予想されており、近年ダイヤモンドの発光スペクトル中でポリエキシトン内部での励起子発光崩壊に由来するとされるピークが五神グループにより実験的に観測された。

本研究では励起子系の記述に Correlated Gaussian (CG) 型の基底を採用し、バレー/バンド自由度及び質量異方性をあらわに取り込んだ有効質量近似モデルの中で、ダイヤモンド中の励起子多体問題を直

接数値的に計算した。その結果、励起子, trion (励起子+電子/正孔), 励起子分子といった基本的な束縛状態に加え、荷電励起子分子 (励起子分子+電子/正孔) と triexciton (励起子三量体) の束縛状態を示すことに成功した。荷電励起子分子はダイヤモンドの電子・正孔の有効質量比では不安定であることがバレー自由度無し計算で示されており, triexciton に加えてバルク中の多重バレー/バンド系に固有の存在であると言える。

上記の結果は全束縛エネルギーが実験値をよく再現しており、実験グループの主張と矛盾しない。さらに、(i) 電子・正孔が質量異方性の異なるバレー/バンドの組み合わせを取り得ることにより考えうる基底状態の準位が複数存在し、発光スペクトル中にピークの幅となって現れる可能性があること、(ii) 発光スペクトル中では励起子分子のピーク近傍に trion のピークが、triexciton のピークの近傍に荷電励起子分子のピークが現れ、実験ではこれらも合わせて観測している可能性があることも示した。特に (i) は発光スペクトル中のピーク幅から複合粒子の温度を見積もることを難しくさせる可能性がある。これらはバルク中では物質を問わず世界初の成果である。

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Tadano and S. Tsuneyuki, Self-consistent phonon calculations of lattice dynamical properties in cubic SrTiO_3 with first-principles anharmonic force constants, *Phys. Rev. B* 92, 054301 (2015).
- [2] T. Tadano and S. Tsuneyuki, First-principles analysis of anharmonic nuclear motion and thermal transport in thermoelectric materials, *AIP Conf. Proc.* 1702, 090063 (2015).
- [3] R. Akashi, M. Kawamura, S. Tsuneyuki, Y. Nomura, and R. Arita First-principles study of the pressure and crystal-structure dependences of the superconducting transition temperature in compressed sulfur hydrides *Phys. Rev. B* 91, 224513 (2015)
- [4] R. Akashi, M. Ochi, S. Bordacs, R. Suzuki, Y. Tokura, Y. Iwasa, and R. Arita Two-dimensional valley electrons and excitons in noncentrosymmetric 3R-MoS_2 *Phys. Rev. Applied* 4, 014002 (2015)
- [5] J. Y. Xue, T. Izumi, A. Yoshii, K. Ikemoto, T. Koretsune, R. Akashi, R. Arita, H. Taka, H. Kita, S. Sato, H. Isobe Aromatic hydrocarbon macrocycles for highly efficient organic light-emitting devices with single-layer architectures *Chem. Sci.* 7, 896 (2016)
- [6] W. Sano, T. Koretsune, T. Tadano, R. Akashi, and R. Arita, Effect of Van Hove singularities on high- T_c superconductivity in H_3S , *Phys. Rev. B* 93, 094525 (2016).
- [7] M. Ochi, Y. Yamamoto, R. Arita, and S. Tsuneyuki, "Iterative diagonalization of the non-Hermitian transcorrelated Hamiltonian using a

- plane-wave basis set: Application to *sp*-electron systems with deep core states”, J. Chem. Phys. 144, 104109 (2016).
- (国内雑誌)
- [8] 河村光晶, 常行真司「最適化テトラヘドロン法を用いた高精度ブリルアン領域積分」, 固体物理 vol.51(1), 25 (2016).
- (学位論文)
- [9] 山本良幸, *Ab initio* quantum Monte Carlo study on hydrogen impurities in silic (第一原理量子モンテカルロ法によるシリカ中の水素不純物に関する研究) (東京大学, 2016年3月 博士(理学))
- [10] 田中悠太, 相変化記録材料の非熱的構造変化の第一原理的研究 (東京大学, 2016年3月, 修士)
- [11] 辻本直人, First-Principles Study on Spin-Flop Transition in Cr_2O_3 (東京大学, 2016年3月, 修士)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [12] S. Tsuneyuki, Recent Progress in the Transcorrelated Method for Condensed Matter, ICQC2015 Satellite Symposium in Kobe: Novel Computational Methods for Quantitative Electronic Structure Calculations, Kobe University, Kobe, Jun. 16-18, 2015.
- [13] S. Tsuneyuki, Atomistic Modeling of Materials from First Principles, AIMR International Symposium (AMIS2016), Tohoku Univ., Sendai, Feb. 21-24, 2016 (plenary).
- [14] R. Akashi, S. Tsuneyuki and R. Arita, Stacking-based control of electron interlayer hopping: MoS_2 and other materials Energy, Materials, Nanotechnology (EMN) Bangkok meeting, Bangkok, Thailand, Nov. 11-14, 2015. (Oral)
- [15] R. Akashi, M. Kawamura, S. Tsuneyuki, Y. Nomura and R. Arita: First-Principles Study of the High-Tc Superconductivity in Compressed Sulfur Hydride, 28th International Symposium on Superconductivity (ISS2015), Tokyo, Japan, Nov. 16-18, 2015.
- [16] R. Akashi: Superconductivity in compressed sulfur hydride: Dependences on pressure, composition, and crystal structure from first principles, APS March Meeting 2016, Baltimore, USA, Mar. 14-18, 2016.
- [17] Daisuke Hirai, Shinji Tsuneyuki, and Yoshihiro Gohda: Rare-metal-free magnetic materials with high coercivity, International Conference on Small Science, Phuket, Thailand, Nov. 4-7, 2015.
- [18] Y. Gohda, “First-principles theory of magnets: microstructure interfaces”, EMN Meeting on Magnetic Materials 2016, (Kona, USA, Mar. 23, 2016).
- [19] Y. Gohda, “Electronic-structure calculations for magnetic interfaces”, EMN Bangkok Meeting 2015, (Bangkok, Thailand, Nov. 11, 2015).
- [20] Y. Gohda, “First-principles study of microstructure interfaces of Nd-Fe-B magnets”, ESICMM-G8 Symposium on Next Generation Permanent Magnets, (Tsukuba, Japan, Jun. 18, 2015).
- [21] Y. Gohda, “Microstructure of Fe-based magnetic materials”, The 3rd OpenMX/QMAS workshop, (Kashiwa, Japan, May 13, 2015).
- 一般講演
- [22] T. Tadano and S. Tsuneyuki: First-principles calculation of anharmonic phonon frequency, lifetime, and thermal conductivity of cubic SrTiO_3 : A self-consistent phonon approach, Psi-k Conference 2015, San Sebastian, Spain, Sep. 7, 2015.
- [23] T. Tadano and S. Tsuneyuki: Self-consistent phonon calculations of anharmonic phonon properties in cubic perovskite SrTiO_3 , ASIAN-18, Kashiwa, Japan, Nov. 10, 2015.
- [24] T. Tadano and S. Tsuneyuki: *Ab initio* lattice dynamics of severely anharmonic materials at high temperatures, International USMM&CMSI Workshop, Tokyo, Japan, Jan. 6, 2016.
- [25] R. Akashi, M. Kawamura, S. Tsuneyuki, Y. Nomura and R. Arita: Fully non-empirical study on superconductivity in compressed sulfur hydrides, Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S) 2015, Geneva, Switzerland, Aug. 22-28, 2015. (Oral)
- [26] R. Akashi Density functional theory for plasmon-assisted superconductivity: Development and its applications, Psi-k 2015 conference, San Sebastian, Spain, Sep. 6-10, 2015. (Oral)
- [27] M. Ochi, Y. Yamamoto, R. Arita, and S. Tsuneyuki, “Impact of core electrons on the band structures calculated with the transcorrelated method”, Ψ_k Conference 2015, San Sebastian, Spain, September 7, 2015.
- [28] Y. Yamamoto, K. Yoshizawa, R. Akashi, R. Maezono and S. Tsuneyuki: “*Ab initio* Quantum Monte Carlo Study of Hydrogen Impurity in Silica”, The 18th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, ISSP, the University of Tokyo, November 10, 2015.
- [29] N. Sato, R. Akashi, and S. Tsuneyuki: Two-dimensional electronic states in perovskite-type KTiO_2H : comparison with KTiO_2X ($X = \text{F, Cl, Br}$) and MTiO_2H ($M = \text{Li, Na, Rb, Cs}$), Psi-k 2015 Conference, San Sebastian, Spain, September 6-10, 2015
- [30] Y. Tatetsu, T. Ozaki, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda: Effects of Cu doping in $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\text{NdO}_x$ interfaces studied from first principles, ESICMM-G8 Symposium on Next Generation Permanent Magnets, Tsukuba, Japan, June 18-19, 2015.

- [31] Y. Tatetsu, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda: First-principles study of the effect of Cu and NdO_x in Nd₂Fe₁₄B magnets, 20th International Conference on Magnetism (ICM2015), Barcelona, Spain, July 5-10, 2015.
- [32] Y. Tatetsu, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda: First-principles study of Cu-doped Nd-Fe-B magnets, The 18th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, Kashiwa, Japan, December 9-11, 2015.
- [33] Y. Tatetsu, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda: Structural and magnetic properties of Cu-doped Nd-Fe-B magnets studied by first-principles calculations, MMM-Intermag 2016, San Diego, USA, January 11-15, 2016.
- [34] Y. Tatetsu, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda: First-principles study of magnetic anisotropy in Cu-doped Nd-Fe-B magnets, 2016 MRS Spring Meeting, Phoenix, USA, March 28 - April 1, 2016.
- [35] K. Yoshizawa, Y. Iwazaki, Y. Gohda and S. Tsuneyuki: Electronic and magnetic properties of impurity hydrogen in semiconductors, 20th International Conference on Magnetism (ICM2015), Barcelona, Spain, July 7, 2015.
- [36] K. Yoshizawa, Y. Iwazaki, Y. Gohda and S. Tsuneyuki: Excess electron states accompanying impurity hydrogen in rutile TiO₂, The 18th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, Kashiwa, Japan, Nov. 10, 2015.
- [37] Synge Todo, Ryo Igarashi, Shusuke Kasamatsu, Takeo Kato, Naoki Kawashima, Tsutomu Kawatsu, Yusuke Konishi, Hikaru Kouta, Haruhiko Matsuo, Masashi Noda, Shoichi Sasaki, Yayoi Terada, Shigehiro Tsuchida, Kazuyoshi Yoshimi, and Kanako Yoshizawa: MateriApps – a Portal Site of Materials Science Simulation, SUPERCOMPUTING FRONTIERS 2016, Biopolis, Singapore, March 15, 2016.
- [38] Daisuke Hirai, Taisuke Ozaki, Shinji Tsuneyuki, and Yoshihiro Gohda: First-principles calculation of Nd₂Fe₁₄B/dhcp-Nd interface, ESICMM-G8 Symposium on Next Generation Permanent Magnets, Tsukuba, Jun. 18-19, 2015.
- [39] Daisuke Hirai, Shinji Tsuneyuki, and Yoshihiro Gohda: Effect of hydrogen on magnetic properties of ε-Fe₂O₃, 20th International Conference on Magnetism, Barcelona, Spain, Jul. 5-10, 2015.
- [40] Shunsuke Yamada, Ryosuke Akashi and Shinji Tsuneyuki: A new method for calculating one-electron energy spectrum of a large system based on a first-principles divide-and-conquer method, Psi-k 2015 Conference, San Sebastian, Spain, Sept. 9, 2015.
- [41] Y. Tanaka, R. Akashi, and S. Tsuneyuki, “First-principles calculations of nonthermal structural phase transition of GeTe”, The 18th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (Asian-18), Tokyo, Japan, Nov. 10, 2015.
- [42] Hiroki Katow, Junko Usukura, Ryosuke Akashi, Kalman Varga, and Shinji Tsuneyuki, Stability of excitonic complexes in a multi-valley/band semiconductor APS March Meeting, Baltimore, ML, USA, March 14-18, 2016
- [43] Y. Gohda, H. Misawa, H. Tsuchiura, and S. Tsuneyuki, “First-principles study of interface magnetic properties of Nd-Fe-B magnet microstructures”, 13th Joint MMM-Intermag Conference, San Diego, USA, Jan. 12, 2016.
- [44] Y. Gohda, H. Misawa, H. Tsuchiura, and S. Tsuneyuki, “Interface magnetic anisotropy of Nd-Fe-B magnets”, Psi-k Conference 2015, Donostia/San Sebastian, Spain, Sept. 7, 2015.
- [45] Y. Gohda, H. Misawa, H. Tsuchiura, and S. Tsuneyuki, “Magnetism of interfaces between Nd₂Fe₁₄B and NdO_x examined by first-principles calculations”, The 22nd International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS22), Kraków, Poland, Jul. 14, 2015.
- (国内会議)
招待講演
- [46] 常行真司 「シミュレーションとデータ科学によるこれからの物質・材料研究」, ISSP ワークショップ「物質・材料開発を支える基礎科学」(東京大学柏の葉キャンパス駅前サテライト), 2015年6月22日.
- [47] 常行真司 パネルディスカッション, 第15回 NIMS フォーラム テーマ『「超」のつく材料と技術もつてます』(東京国際フォーラム ホール B7), 2015年10月7日.
- [48] 常行真司 「マテリアルズ・インフォマティクスの現状と将来展望: シミュレーションとデータ科学によるこれからの物質・材料研究」, IMS 理事長主催勉強会シリーズ「マテリアルズ・インフォマティクス 物質・材料研究における新展開」(NIMS), 2015年7月1日.
- [49] 常行真司 パネルディスカッション, 第2回 HPCI 成果報告会(日本科学未来館), 2015年10月26日.
- [50] 常行真司 「レーザーによる非熱的加工と光源開発への期待」, NEDO 次世代レーザー技術シンポジウム(フクラシア東京ステーション), 2015年11月18日.
- [51] 常行真司 「大規模計算科学研究のこれから」, 第2回 元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>/大型研究施設連携シンポジウム -局所構造制御で物質から材料へ-(東京大学伊藤謝恩ホール), 2016年1月21日.
- [52] 常行真司 「さきがけ インフォマティクスについて」, 第2回 元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>/大型研究施設連携シンポジウム -局所構造制御で物質から材料へ-(東京大学伊藤謝恩ホール), 2016年1月22日.

- [53] 常行真司 パネルディスカッション, スパコン「京」がひらく社会と科学 シンポジウム「スーパーコンピュータの今とこれから」【いまこれ】(よみうり大手町ホール, 東京), 2016年1月29日.
- [54] 常行真司 「第一原理からの物性モデリングとポスト「京」/マテリアルズインフォマティクス時代への展望」, TCCI 第6回研究会(分子研), 2016年3月15日.
- [55] 只野央将, 常行真司:「第一原理フォノン伝導計算: その最前線とポスト京/マテリアルズインフォマティクス時代への展望」, 第63回応用物理学会春期学術講演会 特別シンポジウム, 東京工業大学(目黒区), 2016年3月22日.
- [56] 明石遼介:「高圧下硫化水素における高温超伝導の第一原理計算による解析」, 物性セミナー 東京大学駒場キャンパス, 2015年7月24日.
- [57] 明石遼介:「圧力下硫化水素における高温超伝導の第一原理計算に基づく研究」, 物性研短期研究会「低次元電子系におけるエキシトニック相の新展開」 東京大学物性研究所, 2015年11月28日.
- [58] 明石遼介:「第一原理計算に基づく高圧下硫化水素における超伝導の研究」, 田仲研究室セミナー 名古屋大学, 2016年1月22日.
- [59] 明石遼介:「硫化水素における高温超伝導: 第一原理計算の立場から」, 第13回水素量子アトムクス研究会 東京大学生産技術研究所, 2016年2月18-19日.
- [60] 明石遼介:「硫化水素超伝導の理論的研究の現状」, 日本物理学会 2016年年度大会 東北学院大学 2016年3月19日-22日.
- [61] 岩崎誉志紀:「第一原理計算による誘電体 / 圧電体材料の解析」, 第63回応用物理学会春季学術講演会「誘電体・強誘電体材料評価・解析技術の最先端」, 東工大 大岡山キャンパス, 2016年3月19-22日.
- 一般講演
- [62] 常行真司:「総括」, 第2回 ICCPT シンポジウム(東京大学), 2015年8月21日.
- [63] 只野央将, 常行真司:「自己無撞着フォノン理論に基づく SrTiO₃ の非調和フォノンと熱伝導の第一原理計算」, 日本物理学会 2015年秋季大会, 関西大学(吹田市), 2015年9月16日.
- [64] 只野央将, 常行真司:「第一原理フォノン伝導解析用ソフトウェア ALAMODE の利用方法・計算事例の紹介」, 日本熱電学会 計算&データ研究会, 東京大学(文京区), 2016年3月11日.
- [65] 只野央将, 常行真司:「熱電材料 SnSe におけるソフトモードと格子熱伝導率の第一原理計算」, 物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会「計算物質科学の今と未来」, 東京大学(柏市), 2016年4月4日.
- [66] 明石遼介, 河村光晶, 常行真司, 野村悠祐, 有田亮太郎:「高圧下硫化水素における高温超伝導の第一原理計算による解析」, 日本物理学会 2015年秋季大会, 関西大学(大阪), 2015年9月16-19日. (18aPF-11)
- [67] 越智正之, 山本良幸, 有田亮太郎, 常行真司:「Block Davidson 法を用いた平面波基底 Transcorrelated 法の固体への適用」, 第6回 CMSI 研究会(HPCI 戦略プログラム分野2最終報告会), 東京大学本郷キャンパス(文京区), 2015年12月7日.
- [68] 越智正之, 明石遼介, 黒木和彦:「LaO_{0.5}F_{0.5}BiS₂ 超伝導体高圧相における電子状態の第一原理解析」, 日本物理学会第71回年次大会, 東北学院大学泉キャンパス(仙台市), 2016年3月22日.
- [69] 山本良幸, 吉澤香奈子, 明石遼介, 前園涼, 常行真司:「拡散量子モンテカルロ法によるルチル型 SiO₂ 中水素原子の最安定状態の解析」, 物性研究所短期研究会機能物性融合科学研究会シリーズ(3)「反応と輸送」, 東京大学物性研究所, 2015年6月24日.
- [70] 山本良幸, 吉澤香奈子, 明石遼介, 前園涼, 常行真司:「第一原理量子モンテカルロ法によるルチル型 SiO₂ 中孤立水素原子の安定性の解析」, 日本物理学会 2015年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス, 2015年9月16日.
- [71] 山本良幸, 吉澤香奈子, 明石遼介, 前園涼, 常行真司:「第一原理量子モンテカルロ法によるシリカ中の水素不純物に関する研究」, 第13回水素量子アトムクス研究会, 東京大学生産技術研究所, 2016年2月19日.
- [72] 山本良幸, 明石遼介, 常行真司:「Nudged Elastic Band 法による異なる荷電状態間の活性化障壁の第一原理計算」, 東北学院大学泉キャンパス, 2016年3月21日.
- [73] 佐藤暢哉, 明石遼介, 常行真司:「2次元の電子状態をもつペロブスカイト型酸水素化物 KTiO₂H の理論予測」, 物性研究所短期研究会 機能物性融合科学研究会シリーズ(3)「反応と輸送」, 東京大学物性研究所, 2015年6月24日.
- [74] 山田俊介, 明石遼介, 常行真司:「分割統治法の部分系軌道を用いた大規模系一電子ハミルトニアン次元縮約」, 日本物理学会 年次大会, 東北学院大学(仙台市), 2016年3月22日.
- [75] 立津慶幸, 常行真司, 合田義弘:「第一原理計算による Nd-Fe-B 磁石界面近傍の Cu の評価」, 日本物理学会 2015年秋季大会, 関西大学(大阪府), 2014年9月19日.
- [76] 立津慶幸, 常行真司, 合田義弘:「第一原理計算からみた Nd-Fe-B 磁石界面近傍の Cu の役割」, 日本金属学会 2016年春季講演大会, 東京理科大学(東京都), 2016年3月24日.
- [77] 吉澤香奈子, 岩崎誉志紀, 合田義弘, 常行真司:「ルチル TiO₂ 中の不純物水素と余剰電子状態」, 日本物理学会 2015年秋季大会, 関西大学(吹田市), 2015年9月17日.
- [78] 吉澤香奈子, 吉本芳英, 常行真司:「第一原理計算向け入出力支援ツールの開発: TAPIOCA と C-Tools」, 第5回計算物質科学イニシアティブ(CMSI)研究会, 東京大学(文京区), 2015年12月7日.
- [79] 吉澤香奈子, 岩崎誉志紀, 合田義弘, 常行真司:「ルチル TiO₂ 中の不純物水素と Ti³⁺ イオン」, 第13回水素量子アトムクス研究会, 東京大学生産技術研究所(目黒区), 2016年2月18日.

- [80] 吉澤香奈子, 岩崎誉志紀, 合田義弘, 常行真司: 「酸素欠陥のあるルチル TiO_2 中の不純物水素と Ti^{3+} イオン」, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学 (仙台市), 2016 年 3 月 22 日.
- [81] 平井大介, 常行真司, 合田義弘: 「イプシロン型酸化鉄の磁性への水素の影響」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学 千里山キャンパス (大阪府), 2015 年 9 月 16 日-19 日.
- [82] 山田昌彦, 副島智大, 辻直人, 平井大介, ミルシア ディンカ, 青木秀夫: 「二次元有機金属構造体における強磁性トポロジカル絶縁体の設計」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学 千里山キャンパス (大阪府), 2015 年 9 月 16 日-19 日.
- [83] Daisuke Hirai, Shinji Tsuneyuki, and Yoshihiro Gohda: Theoretical approach to grain-boundary phases in $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ -based magnets, 第 8 回 元素戦略磁性材料研究拠点成果報告会, 仙台 (宮城), 2015 年 12 月 11 日-12 日.
- [84] 田中悠太, 常行真司: 「超短パルスレーザーによる GeTe の非熱的構造変化の第一原理的研究」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス, 大阪府, 2015 年 9 月 18 日.
- [85] 田中悠太, 明石遼介, 常行真司: 「 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ における非熱的構造変化の第一原理的研究」, 日本物理学会 2016 年春季大会, 東北学院大学泉キャンパス, 宮城県, 2016 年 3 月 20 日.

3.5 藤堂研究室

物質の状態を知るには、多体のシュレディンガー方程式を解き、統計力学の分配関数を求めればよい。しかしながら、現代のスーパーコンピュータの計算能力をもってしても、完全な解を求めることはできない。そこで、もとの方程式の中に含まれる、物理的に重要な性質を失うことなく、シミュレーションを実行しやすい形へ表現しなおすことが、計算物理における重要な鍵となる。藤堂研究室では、モンテカルロ法に代表される確率的なシミュレーション、経路積分に基づく量子ゆらぎの表現、特異値分解やテンソルネットワークによる情報圧縮などの手法を駆使し、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、相転移現象の解明を目指している。また、最先端のスーパーコンピュータの能力を活かすための並列化手法の研究、次世代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・公開も進めている。

藤堂研究室: <http://exa.phys.s.u-tokyo.ac.jp>

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

強い空間的・時間的異方性をもつ量子系の臨界現象

シミュレーションによる臨界現象の分類には、臨界指数などの臨界性を定量的に特徴づける量を精度良く求めることが不可欠である。しかしながら、系に強い空間的異方性がある場合には、強い有限サイズ効果など、精密な解析が難しい場合も多い。さらに、量子系に対するモンテカルロ法においては、虚時間と呼ばれる新たな軸を導入して量子ゆらぎを正確に取り込むが、これにより新たな長さスケール因子が導入されるだけでなく、特に系がランダムネスを持つ場合には、もう一つの非自明な臨界指数 (動的臨界指数 z) があらわれることもある。我々は量子モンテカルロ法と機械学習的な手法である確率的最適化を組み合わせた新しい方法を開発した。通常の有限サイズスケーリング解析では、温度や相互作用に関してパラメータスキャンが必要となるが、我々の手法では、系のアスペクト比も含む様々なパラメータがシミュレーション実行中に自動調整される。その結果、臨界点が自動的に求まるだけでなく、臨界振幅やスピン波速度等も精度良く計算することが可能となった。また、ランダムネスをもつ量子系に対してもこの手法を拡張し、超流動-ボーズ・ガラス転移における動的臨界指数の解析を行った [3, 9, 12, 15, 21, 23, 27]。

局所 Z_N 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、 $\text{SU}(N)$ 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。

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。しかしながら、平均場的領域、中間領域、近接的領域、それぞれの境界については、これまで明らかではなかった。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、オーダー 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。また、「combined Binder ratio」と呼ばれる、スケーリング補正項を打ち消すユニバーサルな方法を開発し、境界領域における相転移の臨界指数の振る舞いを明らかにした。さらに、相関のあるランダムネスをもつ長距離相互作用スピン系に対する

シミュレーション手法を開発し、その臨界特性の解析を行った [13]。

SU(N) J - Q 模型の量子相転移

従来、連続相転移は対称性の自発的破れとして理解されてきた。しかしながら近年、異なる対称性が破れた相の間の連続量子相転移のメカニズム—脱閉じ込め臨界現象—が提案され、注目を集めている。その有力な候補と考えられている、二次元格子上の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さな系では、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。一方、有限温度相転移の臨界指数からは、絶対零度にむかって一次転移へのクロスオーバーが全く見られないなど、SU(N) J - Q 模型で脱閉じ込め臨界現象のシナリオが成り立っていることを強く示唆する結果を得た [1]。

3.5.2 強相関多体系に対する新たな計算手法の開発

エネルギーギャップの高精度計算

エネルギーギャップはトポロジカル相等の量子系を特徴付ける量として重要であるだけでなく、量子臨界点の効率的な解析方法を提供する。しかしエネルギーギャップはボルツマン分布に関する期待値の形で簡単に書くことができず、これまで量子モンテカルロ法での高精度な計算は困難であった。我々は虚時間相関関数のフーリエ成分を用いた巧妙な線形結合を考案し、高精度かつ漸近的なバイアスの消失を可能とするギャップ計算法を開発した。新しく考案した手法を用い、スピンとフォノンが相互作用する一次元系の量子相転移点が Wess-Zumino-Witten 模型で記述されることを示した。これらの計算結果から、格子自由度の量子性が一次元量子スピン系に非常に重要な役割を果たすことを明らかにした [2, 24, 19]。

モンテカルロ法による量子スピン系の励起速度計算

多くの量子スピン系は、 $O(N)$ 非線形シグマ模型と呼ばれる有効理論で記述できることが知られており、磁気秩序相・無秩序相・臨界点を包括的にとり扱うことができる。その理論は、磁化・スティッフネス・励起速度の3つの物理量をパラメータとして持つ。この中で磁化とスティッフネスの計算法は確立されていたが、励起速度を高精度に計算することは難しかった。我々は、効率的なエネルギーギャップ計算法と巻き付き数を用いた手法を用いることで、一次元・二次元・二層系の反強磁性体における励起速

度を近似なしに高精度に計算した。そして非線形シグマ模型のラージ N 極限と比較し、有限の N ($=3$) での非自明な補正を明らかにした [4, 20, 25]。

テンソルネットワーク

テンソルネットワークは、量子多体系の波動関数を低ランクのテンソル積として表す手法である。従来の対角化法やDMRGで扱えなかったより高次元の量子スピン系、フェルミオン系の基底状態を定量的に調べることでできる手法として、近年注目が集まっている。我々は、PEPS (Projected Entangled Pair States) と角転送行列くりこみ群法を組み合わせた大規模並列化を目指し、並列テンソルネットワークライブラリや乱択特異値分解アルゴリズムの調査・開発を行った。

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。この手法の多スピン更新の手法などと組み合わせや、相関時間と遷移行列の要素との関連などに関して研究を行った [16, 17, 18, 19, 22, 30]。

連続空間ワームアルゴリズム量子モンテカルロ法の開発

多体量子系における相関効果を正しく扱う手法の一つとして連続空間ワームアルゴリズム量子モンテカルロ法がある。我々はこの空間ワームアルゴリズム量子モンテカルロ法のプログラム整備を行った。また、開発したプログラムを用いて、He4の超流動転移、グラファイト表面に吸着したHe4の固体相に関する予備計算を行った [8]。

機械学習・情報科学の物質科学への応用

ディープラーニングやスパースモデリングなどに代表される機械学習・情報科学の手法の物質科学への応用を目指し、調査・研究を行った。特に、Robins-Monro アルゴリズムの臨界現象解析への応用や、様々な最適化手法の比較・検討、モデルハミルトニアンのパラメータ推定手法、実験データとシミュレーションのデータ同化手法、ニューラルネットワークによる微分方程式の求解や、計算流体力学のLESへの応用を検討した [3, 9, 12, 15, 21, 23, 27, 29]。

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

並列厳密対角化パッケージの開発

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、コードのポータ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 を開発し公開した。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。[10]。

<https://github.com/t-sakashita/rokko>

物質科学シミュレーションのポータル 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」の整備を行った。また、気軽にシミュレーションを始めることのできる環境構築を目指し、Live UB Linux システム「MateriApps LIVE!」、MateriApps アプリケーションのインストールスクリプト集「MateriApps Installer」の開発・公開を行った [5, 11, 14]。

<http://ma.cms-initiative.jp>

オープンソース・ソフトウェアの開発・公開

ALPS 量子格子模型のシミュレーションソフトウェア [6]

<http://alps.comp-phys.org>

ALPS/looper ループアルゴリズム量子モンテカルロ法

<http://wistaria.comp-phys.org/alps-looper>

BCL (Balance Condition Library) 詳細つりあいを満たさないマルコフ連鎖モンテカルロのためのライブラリ [16, 17, 18, 19, 22, 30]

<https://github.com/cmsi/bcl>

Cluster-MC クラスターアルゴリズムモンテカルロ法

<https://github.com/wistaria/cluster-mc>

MateriApps Installer MateriApps アプリケーションのインストールスクリプト集 [5, 11, 14]

<https://github.com/wistaria/MateriAppsInstaller>

MateriApps LIVE! 物質科学アプリケーションを気軽に試すことのできる Live USB Linux システム [5, 11, 14]

<http://cmsi.github.io/MateriAppsLive>

worms ワームアルゴリズム量子モンテカルロ法

<https://github.com/wistaria/worms>

<報文>

(原著論文)

- [1] Takafumi Suzuki, Kenji Harada, Haruhiko Matsuo, Syngye Todo, Naoki Kawashima, Thermal Phase Transition of Generalized Heisenberg Models for $SU(N)$ Spins on Square and Honeycomb Lattices, *Phys. Rev. B* **91**, 094414 (2015).
- [2] Hidemaro Suwa, Syngye Todo, Generalized Moment Method for Gap Estimation and Quantum Monte Carlo Level Spectroscopy, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 080601 (2015).
- [3] Shinya Yasuda, Hidemaro Suwa, Syngye Todo, Stochastic approximation of dynamical exponent at quantum critical point, *Phys. Rev. B* **92**, 104411 (2015).
- [4] Arnab Sen, Hidemaro Suwa, Anders W. Sandvik, Velocity of excitations in ordered, disordered, and critical antiferromagnets, *Phys. Rev. B* **92**, 195145 (2015).

(会議抄録)

- [5] Yusuke Konishi, Ryo Igarashi, Shunsuke Kasamatsu, Takeo Kato, Naoki Kawashima, Tsutomu Kawatsu, Hikaru Kouta, Masashi Noda, Shoichi Sasaki, Yayoi Terada, Syngye Todo, Shigehiro Tsuchida, Kazuyoshi Yoshimi, Kanako Yoshizawa, MateriApps — a Portal Site of Materials Science Simulation, *JPS Conf. Proc.* **5**, 011007 (2015).

(国内雑誌)

- [6] 藤堂真治, “実験技術”としての量子多体系シミュレーションソフトウェア ALPS, *日本物理学会誌* **70**, 275–282 (2015).
- [7] 渡辺宙志, 藤堂真治, 特集「『京』が拓いた物性物理」について, *分子シミュレーション研究会会誌「アンサンプル」* **18**, 5–6 (2016).

(学位論文)

- [8] Yasuaki Sakagawa, Search for novel quantum phase of He4 with continuous-space path-integral Monte Carlo (修士論文).
- [9] Shinya Yasuda, Study of quantum criticality with strong space-time anisotropy by quantum Monte Carlo with stochastic optimization (博士論文).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] Tatsuya Sakashita, Ryo Igarashi, Yuichi Motoyama, Tsuyoshi Okubo, Synge Todo, “Development of Integrated Interfaces for Eigensolvers, Rokko,” Eigenvalue Problems: Algorithms; Software and Applications, in Petascale Computing (EPASA), September 2015, Tsukuba.
- [11] Synge Todo, Ryo Igarashi, Shusuke Kasamatsu, Takeo Kato, Naoki Kawashima, Tsutomu Kawatsu, Yusuke Konishi, Hikaru Kouta, Haruhiko Matsuo, Masashi Noda, Shoichi Sasaki, Yayoi Terada, Shigehiro Tsuchida, Kazuyoshi Yoshimi, Kanako Yoshizawa, “MateriApps: a Portal for Materials Science Simulation,” SC15, November 2015, Austin.
- [12] Synge Todo, “Quantum criticality with strong space-time anisotropy,” LMU-UT Workshop, February 2016, Tokyo.
- [13] Toshiaki Horita, Hidemaro Suwa, Synge Todo, “Upper and Lower Critical Decay Exponents of Ising Ferromagnet with Long-range Interactions,” LMU-UT Workshop, March 2016, Tokyo.
- [14] Synge Todo, “MateriApps: a Portal to Materials Science Simulation,” Supercomputing Frontiers Singapore 2016, March 2016, Singapore.
- [15] Hidemaro Suwa, Shinya Yasuda, Synge Todo, “Stochastic Approximation of Dynamical Exponent at Quantum Critical Point,” APS March Meeting 2016, March 2016, Baltimore.

招待講演

- [16] Hidemaro Suwa, “Worldline Quantum Monte Carlo Analysis of Critical Phenomena in Spin-Boson Systems,” 1st Meeting of Condensed Matter Physics, July 2015, Tsinghua University.
- [17] Hidemaro Suwa, “Geometric Allocation Approach to Irreversible Markov Chain,” Break and Beyond Detailed Balance Condition—expanding to machine learning—, December 2015, Kyoto.
- [18] Hidemaro Suwa, “Phase-Transition Study of Spin-Phonon Systems by Worldline Quantum Monte Carlo Breaking Detailed Balance,” Institute Seminar, January 2016, S.N. Bose National Centre for Basic Sciences, Kolkata, India.
- [19] Hidemaro Suwa, “Irreversible Quantum Monte Carlo Algorithm and Unbiased Spectral Gap Estimation,” Workshop: Topics in Advanced Monte Carlo Methods, March 2016, Tokyo.

(国内会議)

一般講演

- [20] 諏訪秀磨, Arnab Sen, Anders W. Sandvik, 「モンテカルロ法による量子反強磁性体の励起速度計算」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月, 関西大.

- [21] 安田真也, 諏訪秀磨, 藤堂眞治, 「ランダムネス存在下における量子相転移の動的臨界指数測定」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月, 関西大.
- [22] 諏訪秀磨, 藤堂眞治, 「連続スピン系におけるマルチスピン更新と詳細つりあいを破るモンテカルロ法」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月, 関西大.
- [23] 藤堂眞治, 「顕著な有限サイズ効果を伴う量子相転移現象の解析」, HPCI 第 2 回成果報告会, 2015 年 10 月, 日本科学未来館.
- [24] 諏訪秀磨, 「モンテカルロスベクトロスコピーによる量子スピン系のスケール次元解析」, HPCI 第 2 回成果報告会, 2015 年 10 月, 日本科学未来館.
- [25] 諏訪秀磨, 「モンテカルロスベクトロスコピーによる量子スピン系のスケール次元解析」, 第 6 回 CMSI 研究会 (HPCI 戦略プログラム分野 2 最終報告会), 2015 年 12 月, 東大.
- [26] 藤堂眞治, 「ここまで来た、計算物質科学の見える化活動」, 第 4 回 TUT-CMSI 見える化シンポジウム, 2016 年 3 月, 秋葉原.
- [27] 藤堂眞治, 「確率的最適化とランダムスピン系への応用」, 統計物理の新展開 2016, 2016 年 3 月, 大阪大学.

招待講演

- [28] 藤堂眞治, 「大学における計算機教育と HPC」, 第 4 回 CMSI 人材育成シンポジウム「高度計算科学技術を有する人材が活躍する社会を目指して ~国際競争力強化のための ICT の浸透~」, 2016 年 1 月, 大阪大学.

(セミナー)

- [29] 島垣 凱, 「Bayesian Statics and Kernel Method」, 産業総合技術研究所 ナノシステム研究部門 非平衡研究会, 2015 年 5 月, 産総研.
- [30] Synge Todo, 「Geometric Allocation Approaches in Markov Chain Monte Carlo」, Seminar, October 2015, University of Science and Technology, China.
- [31] 島垣 凱, 「シミュレーションで統計物理学」, サイエンスアゴラ, 2015 年 11 月, 日本科学未来館.

3.6 桂研究室

物性理論・統計力学の基礎的な問題に関する理論的研究を行っている。特に、相関の強い多体系（電子系、ボゾン系、スピン系、...）における磁性・強誘電性・量子ホール効果・超伝導などの物性の解明および新奇現象の予言を目指している。またこれらの系に対して、平均場近似などの従来の手法や、場の理論的手法、数値的対角化などを組み合わせて多角的にアプローチしている。また、量子多体系や可解模型に関する数理物理学的研究も同時に行っている。

3.6.1 強相関系

相互作用するマヨラナフェルミオン系のトポロジカル秩序

Kitaev により考案された 1 次元 p 波超伝導体の模型 (Kitaev 模型) は、そのトポロジカル相でマヨラナフェルミオンの端状態が現れることから、トポロジカル超伝導体の典型例として注目を集めている。また近年では、鉄の原子鎖を用いた実験的な実現も提案されている [Nadj-Perge *et al.*, *Science* **346**, 602 (2014)]。桂は、学習院大の高橋、Utrecht 大の Schuricht とともに、マヨラナフェルミオン間の相互作用を導入した Kitaev 模型について調べた [3, 30]。その結果、相図中のあるライン上で、基底状態が厳密に求まることを示した。このラインは、先行研究で数値的に調べられた相図中のトポロジカル相内にあり、求められた基底状態は、相互作用を導入した Kitaev 模型のトポロジカル相を代表していると考えられる。また、この基底状態と元の相互作用のない Kitaev 模型の基底状態とは、エネルギーギャップを閉じることなく断熱的に繋がっていることを証明した。また、縮退した二つの基底状態の間を結ぶマヨラナ演算子の具体形を求めた。

スピン-電荷結合系におけるカゴメネットワーク形成相と超固体相

遍歴電子と局在スピンの結合を記述する最も基本的な模型の一つである強磁性近藤格子模型は、マンガン酸化物等の強相関電子系の物性を理解するために長い間研究がなされてきた。最近では、幾何学的フラストレーションを有する格子系において、非共線・非共面な磁気構造を持った種々の新規な磁性相の発現や量子異常ホール効果などの輸送現象の研究が精力的になされている。赤城と東大理工の求はこうした幾何学的フラストレーションの効果による新しい磁性・量子輸送現象を開拓する目的で、三角格子上の強磁性近藤格子模型を詳細に調べ、その基底状態相図を変分計算とアニーリング法を相補的に用いることで明らかにした。その結果、カゴメ格子状のネットワーク上でスピンの強磁性的に揃い、残りのサイト上のスピンはそれらと逆向きとなるような、カゴメネットワーク形成を伴う非自明な秩序相を得た。また、磁場変化に対する状態相図も調べたところ、このフェリ磁性状態は 1/2 磁化プラトーを経て、超固体相に連続転移することが明らかとなった。これらの相は、カゴメネットワーク形成や大きなフント結合に由来して、スピンの(ほぼ)完全偏極した massless Dirac 電子を伴う非自明な磁性相である。これらの結果は投稿論文としてまとめられ [2]、日本物理学会で発表された [26]。

3.6.2 トポロジカル系

2次元トポロジカル絶縁体の \mathbf{Z}_2 トポロジカル数

トポロジカル絶縁体とは、自明なバンド絶縁体とは断熱的に接続することができない絶縁体で、非自明なトポロジカル数により特徴づけられる。このトポロジカル数は、並進対称性がある場合には、波数空間での積分により自然に定義することが可能であるが、乱れのある場合には、その定義は自明ではない。桂は、学習院大の高麗と、乱れのある2次元の時間反転対称なトポロジカル絶縁体 (class AII) に対するトポロジカル数を、非可換幾何の手法を用いて導入した。また、このトポロジカル数の時間反転対称な摂動に対する安定性を証明した。このトポロジカル数は、Atiyah-Singer の \mathbf{Z}_2 トポロジカル数の自然な拡張とみなせる。また、2次元のトポロジカル絶縁体の典型例である Kane-Mele 模型や、Bernevig-Hughes-Zhang 模型などに適用し、実際にこのトポロジカル数が非自明な値をとることを示した。これらの結果は [5] にまとめられ、また国際会議での招待講演などで発表された [20, 22, 32]。

量子スピンネマティック相におけるトポロジカル欠陥

液晶 (ネマティック相) において、トポロジカル欠陥は重要な役割を果たす。しかし、そのスピン版ともみなせるスピンネマティック相という、液晶とよく似た対称性を有する非自明な磁性相におけるトポロジカル欠陥の役割はあまり知られていない。そこで赤城と富山県大の植田、OIST の Shannon は、スピンネマティック相におけるトポロジカル欠陥について詳細に調べた。こうした非自明な磁性相が安定に存在する最も単純な模型の一つは、スピン 1 のハイゼンベルグ模型に双二次相互作用項を付加した模型 (bilinear-biquadratic 模型) である。三角格子上のこの模型に対し、ホモトピーに基づいた解析と数値的な最適化法 (アニーリング法) を用いることで、どのようなトポロジカル欠陥が現れるかを明らかにした。その結果、SU(3) 対称性を有する特別な点において、新しいソリトン解を見出した [図 3.6.1]。そのうちのひとつである高次のトポロジカルチャージを有するソリトンは、自発的に 2 つに分裂し反発的相互作用が生じるという、今までに見つかった事の無いタイプのソリトンである。これらの結果は投稿論文としてまとめられた [4]。また、国際会議での招待講演をはじめ、幾つかの研究会で発表された [19, 15, 17, 29, 33, 35]。

3.6.3 可解模型・統計力学

サイン二乗変形系

空間変調のある 1 次元量子系は、数値計算における有限サイズ効果の軽減や、量子状態の転送などの観点から注目を集めている。特に、量子臨界系にサイン二乗変形と呼ばれる変形を施した場合には、開

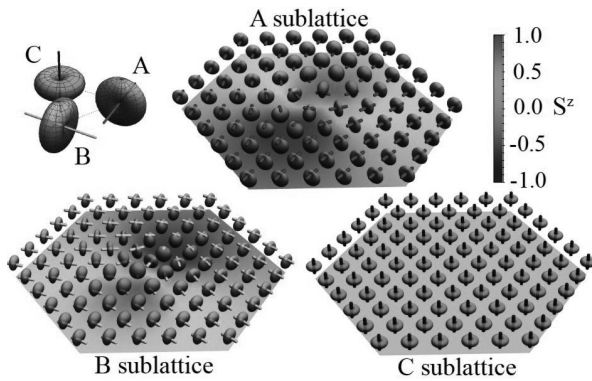


図 3.6.1: SU(3) symmetric point の 3 副格子 anti-ferro nematic order における π_2 トポロジカル欠陥。

放境界条件での多体の基底状態が、一様周期系の基底状態とほぼ一致するという非自明な性質が知られている。また、可解模型や共形場理論との非自明な関係も示唆されている。桂は、新潟大学の奥西と、1次元の自由フェルミオン系のサイン二乗変形を、ポテンシャル中の1粒子量子力学の逆問題として定式化した [1, 28]。その結果、この系の1粒子固有関数は、Gegenbauer 多項式を用いて表せることを示した。また、このことから、この系の多体の基底状態が一様周期系の基底状態と厳密に一致することを証明した。さらに格子系との対応も数値対角化により調べ明らかにした。

有限時間スケールにおける時間周期ダイナミクス

周期的な駆動が掛かった量子多体系の動的構造の理解は統計物理学における重要な未解決問題となっている。このような時間周期系は、システムの構造を制御する Floquet engineering という分野の発展と共に、新しいブレイクスルーを起こしうる物理系として注目を集めている。一方で、時間周期系の定常状態に関する十分な理解は極限的な場合 (相互作用のないフェルミオン系や高周波極限) を除いて得られていない。一般的な理論として、このような理想極限から少しでも外れると定常状態は熱化現象のため興味深い性質を示さなくなることが知られている。ところが、実用的には、時間周期系の無限時間極限を見ることは無意味で、実験の時間スケールで見えるような現象に興味がある。このような有限時間スケールで系の動的構造を理解することが今後の応用上極めて重要であるにも関わらず、厳密な解析はほとんどなされていないのが現状である。桑原、森 (東大)、斎藤 (慶応大) は Floquet-Magnus 理論をベースとして、有限時間ダイナミクスの基本的な枠組みを与えることに成功した [6, 8]。同時に、時間スケールで系を記述する有効ハミルトニアン の性質が定性的に異なることに着目し、時間周期系では我々は「Floquet Prethermalization」と呼ぶ2段熱化現象が普遍的に観測されることを示した。これらの成果は、[25]をはじめ幾つかの研究会で発表された [11, 12, 13]。

超対称性の破れとゴールドストーンフェルミオン

近年、非相対論的な場の理論における、自発的対称性の破れに付随する南部・ゴールドストーンボゾンが注目を集めている。三ノ宮と桂は、IPMU の中山と、格子フェルミオン系における超対称性の破れとゴールドストーンフェルミオンの関係について調べた。具体的には、Nicolai 模型と呼ばれる格子模型を拡張し、その模型において超対称性が自発的に破れている場合があることを示した。さらに数値対角化や場の理論的手法を用いて、低エネルギー励起が線形分散をもち、質量のないディラックフェルミオンによって記述されることを明らかにした。これらの成果は、[14]をはじめ幾つかの研究会で発表された [18, 34]。

3.6.4 その他

平坦バンド系は強磁性や分数量子ホール効果などの観点から興味を持たれており、また近年では冷却原子系を用いた実現 [Taie *et al.*, *Science advances* **1**, e1500854 (2015).] も話題を集めている。桂は、福岡工業大の丸山と、平坦バンドをもつモデルハミルトニアンの一一般的な構成法についての解説記事を執筆した [9]。また桂は、最近話題のスキルミオンなどのトポロジカル励起と非線形方程式についての解説記事を執筆した [10]。

<報文>

(原著論文)

- [1] Kouichi Okunishi and Hoshio Katsura: Sine-square deformation and supersymmetric quantum mechanics, *J. Phys. A: Math. Theor.* **48**, 445208 (2015).
- [2] Yutaka Akagi and Yukitoshi Motome: Spontaneous formation of kagome network and Dirac half-semimetal on a triangular lattice, *Phys. Rev. B* **91**, 155132 (2015).
- [3] Hoshio Katsura, Dirk Schuricht, and Masahiro Takahashi: Exact ground states and topological order in interacting Kitaev/Majorana chains, *Phys. Rev. B* **92**, 115137 (2015).
- [4] Hiroaki T. Ueda, Yutaka Akagi, and Nic Shannon: Quantum solitons with emergent interactions in a model of cold atoms on the triangular lattice, *Phys. Rev. A* **93**, 021606(R) (2016). [selected for Kaleidoscope]
- [5] Hoshio Katsura and Tohru Koma: The \mathbf{Z}_2 Index of Disordered Topological Insulators with Time Reversal Symmetry, *J. Math. Phys.* **57**, 021903 (2016).
- [6] Tomotaka Kuwahara, Takashi Mori, and Keiji Saito: Floquet-Magnus theory and generic transient dynamics in periodically driven many-body quantum systems, *Ann. Phys.* **367**, 96 (2016).

- [7] Itai Arad, Tomotaka Kuwahara, and Zeph Landau: Connecting global and local energy distributions in quantum spin models on a lattice, *J. Stat. Mech.* 033301 (2016).
- [8] Takashi Mori, Tomotaka Kuwahara, and Keiji Saito: Rigorous bound on energy absorption and generic relaxation in periodically driven quantum systems, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 120401 (2016).
- (国内雑誌)
- [9] 桂 法称, 丸山 勲: フラットバンドの構成法—分子の奏でるハーモニー—, *固体物理* **50**, No. 5, 41 (2015).
- [10] 桂 法称: 非線形方程式とトポロジカル励起, *数理解科学*, 2016 年 1 月号, No.631.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [11] Tomotaka Kuwahara: Persistent metastability in periodically driven systems, *New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics (NPSMP2015)*, Kashiwa, Jun. 2015.
- [12] Tomotaka Kuwahara: Universal character of metastability in periodically driven systems, *New Frontiers in Non-equilibrium Physics 2015*, Kyoto, Aug. 2015.
- [13] Tomotaka Kuwahara: Universal character of metastability in periodically driven systems, *Yukawa International Seminar 2015 (YKIS2015)*., Kyoto, Aug. 2015.
- [14] Noriaki Sannomiya: Supersymmetry breaking and Goldstone fermions in an extended Nicolai model, *KEK Theory Workshop 2015*, Tsukuba, Dec. 2015.
- [15] Yutaka Akagi (Hiroaki T. Ueda, Nic Shannon): Topological defects in quantum spin-nematics, *APW-CEMS joint Workshop "Highlights of modern condensed matter physics"*, Wako, Jan. 2016.
- [16] Nobuyuki Yoshioka (Toshiya Ideue, Takashi Kurumaji, Hosho Katsura): Anomalous phonon Hall effect in polar ferrimagnets, *APW-CEMS joint Workshop "Highlights of modern condensed matter physics"*, Wako, Jan. 2016.
- [17] Yutaka Akagi: Topological Defects in Quantum Spin-nematics, *LMU-UT Cooperation in Physics Workshop*, Tokyo, Mar. 2016.
- [18] Noriaki Sannomiya: Supersymmetry breaking and Nambu-Goldstone fermions in an extended Nicolai model, *LMU-UT Cooperation in Physics Workshop*, Tokyo, Mar. 2016.
- 招待講演
- [19] Yutaka Akagi (Hiroaki T. Ueda, Nic Shannon): Topological defects in quantum spin-nematics, *the 20th International Conference on Magnetism (ICM2015)*, Barcelona, July 2015.
- [20] Hosho Katsura: Topological indices of disordered insulators with time-reversal symmetry, *LMU-UT Cooperation in Physics Workshop*, Tokyo, Feb. 2016.
- (国内会議)
- 一般講演
- [21] 桂 法称, 高吉 慎太郎, 渡辺 伯陽, 青木 秀夫: 平坦バンドのある Bose-Hubbard 模型におけるペア朝永-Luttinger 液体相, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月, 関西大学.
- [22] 桂 法称, 高麗 徹: カイラル対称性をもつトポロジカル絶縁体と非可換指数定理, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月, 関西大学.
- [23] 坂本 良平, 桂 法称: 多成分非線形 Klein-Gordon 方程式における解の線形安定性, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月, 関西大学.
- [24] 吉岡 信行, 松浦 弘泰, 小形 正男: Hofstadter's butterfly 中の massless Dirac fermion と free fermion, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月, 関西大学.
- [25] 桑原 知剛, 森 貴司, 斉藤 圭司: 時間周期系における準定常性の普遍的性質, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月, 関西大学.
- [26] 赤城 裕, 求 幸年: スピン-電荷結合系における磁場中相図: カゴメネットワーク形成相と超固体相, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月, 関西大学.
- [27] 植田 浩明, 赤城 裕, Nic Shannon: 三角格子スピン-1-Bilinear-Biquadratic 模型の 120 度反強磁性相における Z2-vortex の配向性とエネルギー, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月, 関西大学.
- [28] 奥西 巧一, 桂 法称: サイン 2 乗変形と超対称量子力学, 東大物性研短期研究会「スピン系物理の深化と最前線」, 2015 年 11 月, 東大物性研.
- [29] 赤城 裕 (植田 浩明, Nic Shannon): 量子スピンネマティック相におけるトポロジカル欠陥, 東大物性研短期研究会「スピン系物理の深化と最前線」, 2015 年 11 月, 東大物性研.
- [30] 桂 法称: Exact ground states and topological order in interacting Majorana- and parafermion chains, 第 1 回トポ物質科学領域研究会, 2015 年 12 月, 京都大学.
- [31] 吉岡 信行, 井手上 敏也, 車地 崇, 桂 法称: Anomalous phonon Hall effect in polar ferrimagnets, 第 1 回トポ物質科学領域研究会, 2015 年 12 月, 京都大学.
- [32] 桂 法称, 高麗 徹: 乱れのある Z_2 トポロジカル絶縁体と非可換指数定理, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月, 東北学院大学.
- [33] 赤城 裕, 植田 浩明, Nic Shannon: 三角格子スピン-1-Bilinear-Biquadratic 模型におけるトポロジカル欠陥, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月, 東北学院大学.
- [34] 三ノ宮 典昭, 桂 法称, 中山 優: 拡張 Nicolai 模型における超対称性の破れと Goldstone フェルミオン, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月, 東北学院大学.

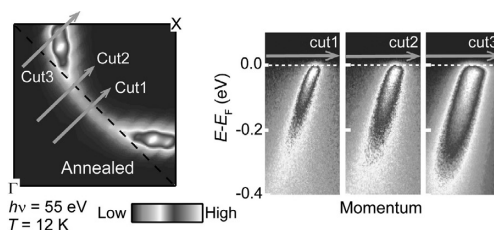
招待講演

- [35] 赤城 裕: 量子スピネマティック相におけるトポロジカル欠陥, 第五回「強相関電子系理論の最前線」研究会, 2015年12月, 勝浦観光ホテル.

(セミナー)

- [36] 桑原 知剛: Universal character of metastability in periodically driven systems, 統計力学セミナー, 2015年5月, 東京大学.
- [37] 桂 法称: Exact ground states and topological order in interacting Kitaev chains, 統計力学セミナー, 2015年6月, 東京大学.
- [38] 桑原 知剛: 有限時間スケールにおける時間周期系の一般理論, 羽田野研究室セミナー, 2015年10月, 東京大学.
- [39] 桑原 知剛: General theory for finite-time dynamics in periodically driven many-body systems, 村尾研究室セミナー, 2015年11月, 東京大学.
- [40] 赤城 裕: Topological defects in quantum spin-nematics, 統計力学セミナー, 2015年12月, 東京大学.

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) 測定等の放射光分光実験により、高温超伝導、スピントロニクス材料、薄膜・界面の電子状態の研究を行っている。遷移金属酸化物、遷移金属化合物、強磁性半導体、強磁性合金が示す超伝導、金属-絶縁体転移、磁気異方性、界面における新奇物性等の発現機構解明をめざしている。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, 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), 実験室光源 (本郷) を用いて実験を行っている。

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らない世紀を超えた難問である。また、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と、擬ギャップ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。

プロテクトアニールした電子ドープ型銅酸化物超伝導体

近年、電子ドープ型銅酸化物高温超伝導体を特殊な方法で還元アニールすることによって超伝導を妨げる頂点酸素を完全に除去すれば、キャリアドープに必要とされていた Ce 置換を行わずに超伝導を実現できることが明らかになってきている。最近バルク結晶でも、“プロテクトアニール”という還元方法で頂点酸素を取り除き、従来より少ない Ce 置換量で高温超伝導が実現できている。我々は、プロテクトアニールした電子ドープ型超伝導体 $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-\delta}$ の ARPES 測定を行い、アニール前に見えた反強磁性に由来する擬ギャップが完全に消滅していることを見出した。また、フェルミ面の面積から電子キャリアー濃度を正確に見積り、プロテクトアニールし

図 4.1.1: ARPES で観測した電子ドープ銅酸化物高温超伝導体 $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-\delta}$ のバンド分散 (右上図) とフェルミ面 (左上図)。“プロテクトアニール法”により超伝導を妨げる頂点酸素を完全に除去した結果、アニール前に見えた反強磁性に由来する擬ギャップが完全に消滅している。(下図) 超伝導臨界温度 T_c の電子キャリアー濃度依存性。プロテクトアニール法により広い濃度範囲にわたって従来よりも高い T_c が維持されており、 T_c の最高値も上昇していることがわかる [15]。

た試料で従来よりも広い濃度範囲にわたって高い T_c が維持されていることを明らかにした [15]。

鉄系超伝導体母物質の異方的な電子構造

鉄系高温超伝導体の低ドープ領域における結晶構造や電気伝導の面内異方性は、超伝導機構と関連して大きな注目を集めてきた。 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ における電気伝導の面内異方性の原因として、母体の電子構造の異方性か不純物 (Co) の異方性か、ホットな議論が続いてきた。我々は、等電子置換系である $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ru}_x)_2\text{As}_2$ の電気抵抗測定と ARPES 測定をおこない、電子構造の面内異方性を調べた。その結果、Co 置換試料と同様の電気抵抗の面内異方性が弱いながらも観測され、Ru 置換量に比例して増大することも確認した。ARPES スペクトルは少量の Ru 置換では母体のもから変化せず、電子構造の異方性よりも Ru 不純物の異方性が電気伝導の面内異方性の原因であるという見方を支持した [10]。

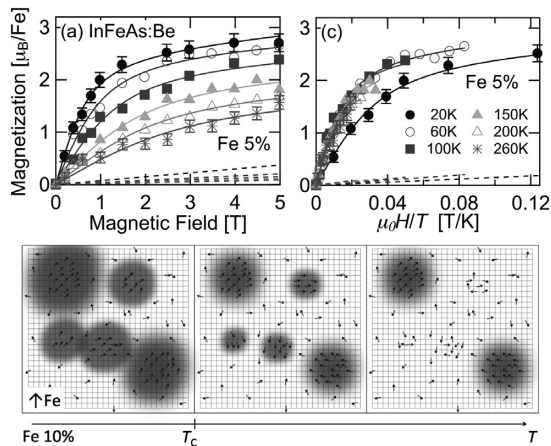


図 4.1.2: InAs(001) 基板上に成長した n 型強磁性半導体 $\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x\text{As:Be}$ ($x = 0.1$) の磁化過程。(a), (b) には、温度および磁場を変えて測定した Fe $L_{2,3}$ 吸収端 X 線磁気円二色性 (XMCD) の強度をプロットしている。(b) は、(a) と同じデータを (磁場) / (温度) を横軸としてプロットしたものである。(c) 磁化曲線を超常磁性クラスターと孤立スピンの共存を仮定してフィットして得られた物理的描像の模式図。キュリー点 T_C に向かって温度が低下すると、超常磁性クラスターの数が増加するが、クラスターの大きさは成長しない [14]。

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, 半導体に磁性原子をドーブした強磁性半導体は, 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・試料における磁気異方性, 界面効果, 基板圧力効果を光電子分光および X 線磁気円二色性 (XMCD) 測定により調べている。とくに, 元素選択的・局所的な磁性プローブである XMCD 測定を, 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。

酸化物強磁性体の膜厚化による強磁性の消失と軌道角運動量

金属的な電気伝導を示す遷移金属酸化物を原子レベルで薄くしていくと, 数原子層 (ML) の臨界膜厚以下で絶縁体に転移することが多く報告されている。強磁性キュリー温度 $T_C \sim 160$ K を持つ金属的な酸化物強磁性体 SrRuO_3 (SRO) は, 3~4ML 以下で絶縁体になるとともに強磁性も消失する。我々は, SrTiO_3 (001) 基板上に成長させた様々な膜厚の SRO 試料の Ru $M_{2,3}$ 吸収端 XAS および XMCD を測定

し, スピン磁気モーメント, 軌道磁気モーメントの膜厚依存性を調べた。バルク結晶では小さかった軌道磁気モーメントが薄膜では面垂直方向に観測され, 基板からの引っ張り応力による SRO の垂直容易磁化を Bruno 機構で説明できた。また, 膜厚が低下し臨界膜厚に近づくにつれて, スピン磁気モーメントは低下する一方で軌道磁気モーメントは低下しないことがわかった [8]。今後は XMCD の磁場印加方向依存性を調べ, Bruno 機構の定量的検証や Bruno 機構からのずれを調べて行く。

n 型強磁性半導体の磁化過程

$\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ に代表される強磁性半導体の大部分は, ドープされるキャリアが p 型 (ホールの) で, p - n 接合の作製には n 型強磁性半導体の開発が必要であった。最近, InAs に Fe および Be を同時にドーブした $\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x\text{As:Be}$ が作製され, n 型強磁性半導体として注目されている。我々は, InAs(001) 基板上に作製した $\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x\text{As:Be}$ ($x = 0.05, 0.1$) の Fe $L_{2,3}$ 吸収端 XMCD を温度および磁場を変えて測定し, XMCD 強度プロットから得られた磁化曲線を, 超常磁性クラスターと孤立スピンの共存を仮定したモデルでフィットすることによって磁化過程のミクロな振る舞いを調べた。強磁性キュリー温度 T_C 以上では, 温度の低下とともに超常磁性クラスター数は増加するが, クラスターの大きさは成長しないことがわかり, クラスターの大きさが成長する $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$, $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ と異なる振る舞いが明らかになった [14]。

<受賞>

- [1] 野中洋亮: 日本物理学会秋季大会 領域 5 第 1 回学生ポスター優秀賞 (国際光年記念ポスター賞)。
- [2] 坂本祥哉: 第 29 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム 学生発表賞。

<報文>

(原著論文)

- [3] Y. Krockenberger, M. Horio, H. Irie, A. Fujimori, and H. Yamamoto: As-grown superconducting Pr_2CuO_4 under thermodynamic constraints, *Appl. Phys. Express* **8**, 053101 (2015).
- [4] S-i. Fujimori, T. Ohkochi, I. Kawasaki, A. Yasui, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagami, Y. Haga, E. Yamamoto, and Y. Onuki: Electronic structures of ferromagnetic superconductors UGe_2 and UCoGe studied by angle-resolved photoelectron spectroscopy, *Phys. Rev. B* **91**, 174503–1–9 (2015); arXiv:1505.01898.
- [5] V. R. Singh, V. K. Verma, K. Ishigami, G. Shibata, A. Fujimori, T. Koide, Y. Miura, M. Shirai, T. Ishikawa, G. f. Li, M. Yamamoto: Electronic and magnetic properties of off-stoichiometric $\text{Co}_2\text{Mn}_\beta\text{Si/MgO}$ interfaces studied by x-ray magnetic circular dichroism, *J. Appl. Phys.* **117**, 203901–1–6 (2015); arXiv:1504.02392.

- [6] L. C. C. Ambolode II, K. Okazaki, M. Horio, H. Suzuki, L. Liu, S. Ideta, T. Yoshida, T. Mikami, T. Kakeshita, S. Uchida, K. Ono, H. Kumigashira, M. Hashimoto, D.-H. Lu, Z.-X. Shen, and A. Fujimori: Dependence of electron correlation strength in $\text{Fe}_{1+y}\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x$ on Se content, *Phys. Rev. B* **92**, 035104–1-6 (2015); arXiv:1505.07637.
- [7] N. B. Brookes, G. Ghiringhelli, A.-M. Charvet, A. Fujimori, T. Kakeshita, H. Eisaki, S. Uchida, and T. Mizokawa: Stability of the Zhang-Rice singlet with doping in lanthanum strontium copper oxide across the superconducting dome and above, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 027002–1-5 (2015).
- [8] K. Ishigami, K. Yoshimatsu, D. Toyota, M. Takizawa, T. Yoshida, G. Shibata, T. Harano, Y. Takahashi, T. Kadono, V. K. Verma, V. R. Singh, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, T. Koide, M. Oshima, H. Kumigashira, and A. Fujimori: Thickness-dependent magnetic properties and strain-induced orbital magnetic moment in SrRuO_3 thin films, *Phys. Rev. B* **92**, 064402–1-5 (2015); arXiv:1505.05692.
- [9] M. Kobayashi, K. Yoshimatsu, E. Sakai, M. Kitamura, K. Horiba, A. Fujimori, and H. Kumigashira: Origin of the anomalous mass renormalization in metallic quantum well states of strongly correlated oxide SrVO_3 , *Phys. Rev. Lett.* **115**, 076801–1-5 (2015); arXiv:1059368.
- [10] L. Liu, T. Mikami, S. Ishida, K. Koshiishi, K. Okazaki, T. Yoshida, H. Suzuki, M. Horio, L. C. C. Ambolode II, J. Xu, H. Kumigashira, K. Ono, M. Nakajima, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Kakeshita, S. Uchida, and A. Fujimori: In-plane electronic anisotropy in the antiferromagnetic-orthorhombic phase of isovalent-substituted $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ru}_x)_2\text{As}_2$, *Phys. Rev. B* **92**, 094503–1-5 (2015); arXiv:1503.02855.
- [11] S. Kudo, T. Yoshida, S. Ideta, K. Takashima, H. Anzai, T. Fujita, Y. Nakashima, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, K. M. Kojima, S. Uchida, and A. Fujimori: Temperature evolution of correlation strength in the superconducting state of high- T_c cuprates, *Phys. Rev. B* **92**, 195135–1-5 (2015), Editors' suggestion; arXiv:1510.00176.
- [12] H. Suzuki, G. Q. Zhao, K. Zhao, B. J. Chen, M. Horio, K. Koshiishi, J. Xu, M. Kobayashi, M. Minohara, E. Sakai, K. Horiba, H. Kumigashira, B. Gu, S. Maekawa, Y. J. Uemura, C. Q. Jin, and A. Fujimori: Fermi surfaces and p - d hybridization in the diluted magnetic semiconductor $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x(\text{Zn}_{1-y}\text{Mn}_y)_2\text{As}_2$ studied by soft x-ray angle-resolved photoemission spectroscopy, *Phys. Rev. B* **92**, 235120–1-5 (2015); arXiv:1509.04520.
- [13] T. Yoshida, W. Malaeb, S. Ideta, A. Fujimori, D. H. Lu, R. G. Moor, Z.-X. Shen, M. Okawa, T. Kiss, K. Ishizaka, S. Shin, S. Komiya, Y. Ando, H. Eisaki, and S. Uchida: Coexistence of a pseudo-gap and a superconducting gap for the high- T_c superconductor $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ studied by photoemission spectroscopy, *Phys. Rev. B* **93**, 014513–1-5 (2016); arXiv:1208.2903.
- [14] S. Sakamoto, L. D. Anh, P. N. Hai, G. Shibata, Y. Takeda, M. Kobayashi, Y. Takahashi, T. Koide, M. Tanaka, and A. Fujimori: Magnetization process of the n -type ferromagnetic semiconductor $(\text{In,Fe})\text{As:Be}$ studied by x-ray magnetic circular dichroism, *Phys. Rev. B* **93**, 035203–1-5 (2016); arXiv:1505.01402.
- [15] M. Horio, T. Adachi, Y. Mori, A. Takahashi, T. Yoshida, H. Suzuki, L. C. C. Ambolode II, K. Okazaki, K. Ono, H. Kumigashira, H. Anzai, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, D. Ootsuki, K. Sawada, M. Takahashi, T. Mizokawa, Y. Koike, and A. Fujimori: Suppression of the antiferromagnetic pseudogap in the electron-doped high-temperature superconductor by protect annealing, *Nat. Commun.* **7**, 10567–1-8 (2016); arXiv:1502.03395.
- [16] K. Horiba, M. Kitamura, K. Yoshimatsu, M. Minohara, E. Sakai, M. Kobayashi, A. Fujimori, and H. Kumigashira: Isotropic kink and quasiparticle excitations in the three-dimensional perovskite manganite $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 076401–1-5 (2016); arXiv:1504.07808.
- [17] M. Kitamura, K. Horiba, M. Kobayashi, E. Sakai, M. Minohara, T. Mitsushashi, A. Fujimori, T. Nagai, H. Fujioka, and H. Kumigashira: Spatial distribution of transferred charges across the heterointerface between perovskite transition metal oxides LaNiO_3 and LaMnO_3 , *Appl. Phys. Lett.* **108**, 111603–1-5 (2016).
- [18] Y. K. Wakabayashi, S. Sakamoto, Y. Takeda, K. Ishigami, Y. Takahashi, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, M. Tanaka, and S. Ohya: Room-temperature local ferromagnetism and its nanoscale expansion in the ferromagnetic semiconductor $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$, *Sci. Rep.* **6**, 23295–1-9 (2016); arXiv:1502.00118.
- (綜説, 解説, その他)
- [19] A. Fujimori: Simultaneously ferromagnetic and antiferromagnetic MnAs layer, *Journal Club for Condensed Matter Physics*, <http://www.condmatjournalclub.org/?p=2607>
- [20] A. Fujimori: From monolayer back to bulk FeSe -based high-temperature superconductors, <http://www.condmatjournalclub.org/?p=2756>
- [21] A. Fujimori: Charge disproportionation and spin-state transition in the negative charge-transfer-energy regime, *JPSJ News and Comments* **13**, 01–1-2 (2016)
- (学位論文)

- [22] 鈴木博人: Spectroscopic studies of the electronic structures of 122-type superconductors and ferromagnetic semiconductors (博士論文)
- [23] 徐健: Superconducting gap in the iron-based superconductor $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ studied by angle-resolved photoemission spectroscopy (博士論文)
- [24] 野中洋亮: X-ray magnetic circular dichroism study of the spinel-type oxide CoV_2O_4 (修士論文)
- [25] 奥石佳佑: Photoemission study of the parent and Cr-doped compounds of 122-type iron-based superconductors (修士論文)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [26] S. Ohya, Y. K. Wakabayashi, Y. Ban, S. Sakamoto, Y. Takeda, A. Fujimori, and M. Tanaka: Promising features of the group-IV-based ferromagnetic semiconductor $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$, *EMN East Meeting: Energy Materials Nanotechnology* (Beijing, April 20-23, 2015).
- [27] A. Fujimori: Soft x-ray spectroscopies of ferromagnetic semiconductors: from prototypical to novel materials, *4th Super-PIRE REIMEI Workshop on Frontiers of Condensed Matter Physics* (TRIUMF, Vancouver, May 15-23, 2015).
- [28] A. Fujimori: Unusual electronic structure and complex ferromagnetism in magnetic semiconductors revealed by soft x-ray spectroscopies, *Frontiers in Advanced Materials (FAM-2015)*, (Bangalore, June 15-18, 2015).
- [29] A. Fujimori: Magnetic anisotropies of transition-metal oxides studied by angle-dependent XMCD, *8th Workshop for Emergent Materials Research (EMR8) & 4th Workshop of Max-Planck POSTECH Center for Complex Phase Materials* (POSTECH, Pohang, July 1-2, 2015).
- [30] A. Fujimori: Electronic correlations in transition-metal oxides, *New TRENDS in Correlated OXIDES and Interfaces (TRENDOXIDES2015)* (Brescia, Italy, November 12-18, 2015).
- [31] A. Fujimori and G. Shibata: Magnetic inhomogeneity and anisotropy of manganite thin films studied by XMCD, *7th IACS-APCTP-Academy Joint Activity on Emergent Phenomena in Novel Oxide Materials and Low Dimensional Systems* (Coorg, India, December 1-2, 2015).
- [32] A. Fujimori: Comment (Intermediate summary), *International USMM & CMSI Workshop: Frontiers of Materials and Correlated Electron Science - from Bulk to Thin Films and Interfaces* (University of Tokyo, January 5-9, 2016)
- [33] A. Fujimori: ARPES observation of competing orders/fluctuations in high-temperature superconductors, *Advances in Electron Spectroscopy - Experiment and Theory- (AESET-2016)*, (Mandi, India, January 18-21, 2016).
- [34] G. Shibata: Metal-insulator transition and magnetic anisotropy of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ thin films studied by XMCD, *16-th Japan-Korea-Taiwan Workshop on Strongly Correlated Electron Systems (JKT16)*, (University of Tokyo, February 19-20, 2016).
- [35] A. Fujimori: Suppressed antiferromagnetism and enlarged superconducting phase in protect-annealed electron-doped cuprates, *Quantum Materials Symposium 2016 (QMS16)* (Muido, Korea, February 22-26, 2016).
- [36] A. Fujimori: Competing orders in high-temperature superconductors, *Cooperation in Physics Workshop: LMU-UT* (University of Tokyo, February 29-March 1, 2016).
- [37] A. Fujimori: Spontaneous symmetry breaking and spin-orbit interaction in the electronic structures of Fe pnictides, *Indo-Japan Seminar on Emergent Phenomena in Transition-Metal Compounds and Related Materials* (Indian Institute of Science, Bangalore, March 28-30, 2016).
- 一般講演
- [38] H. Suzuki, G. Q. Zhao, K. Zhao, B. J. Chen, M. Horio, K. Koshiishi, J. Xu, M. Kobayashi, M. Minohara, E. Sakai, K. Horiba, H. Kumigashira, B. Gu, S. Maekawa, Y. J. Uemura, C. Q. Jin, and A. Fujimori: Soft x-ray ARPES study of the new diluted magnetic semiconductor $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x(\text{Zn}_{1-y}\text{Mn}_y)_2\text{As}_2$, *International Workshop on Strong Correlation and ARPES (CORPES15)*, (Paris, July 5-10, 2015).
- [39] S-i. Fujimori, M. Kobata, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagami, Y. Matsumoto, E. Yamamoto, N. Tateiwa, and Y. Haga: Electronic structure of ThRu_2Si_2 studied by ARPES, *20-th International Conference of Magnetism* (Barcelona, July 5-10).
- [40] Y. K. Wakabayashi, S. Sakamoto, K. Ishigami, Y. Takahashi, Y. Takeda, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, M. Tanaka, and S. Ohya: Room-temperature local ferromagnetism and nano-scale domain growth in the ferromagnetic semiconductor $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$, *21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21) & 17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-17)* (Sendai, July 26-31, 2015).
- [41] M. Kobayashi, K. Yoshimatsu, E. Sakai, M. Kitamura, K. Horiba, A. Fujimori, and H. Kumigashira: Origin of the anomalous mass renormalization in metallic quantum well states of correlated oxide SrVO_3 , *XXIII^e Congrès Général de la Société Française de Physique* (Strasbourg, August 24-28, 2015).
- [42] K. Horiba, M. Kitamura, K. Yoshimatsu, M. Minohara, E. Sakai, M. Kobayashi, A. Fujimori,

- and H. Kumigashira: Kink and quasiparticle excitations in $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ thin films studied by *in-situ* angle-resolved photoemission spectroscopy, *13-th International Conference on Electron Spectroscopy and Structure (ICESS 2015)*, (Brookhaven, September 28-October 2, 2015).
- [43] M. Kobayashi, K. Yoshimatsu, E. Sakai, M. Kitamura, K. Horiba, A. Fujimori, and H. Kumigashira: Origin of the anomalous mass renormalization in metallic quantum well states of correlated oxide SrVO_3 , *ibid.*
- [44] T. Mitsuhashi, M. Minohara, M. Kitamura, E. Sakai, K. Horiba, K. Yoshimatsu, A. Fujimori, M. Kobayashi, and H. Kumigashira: Polarization dependent angle-resolved photoemission study on (110) surfaces of SrVO_3 films, *ibid.*
- [45] M. Kobayashi, K. Yoshimatsu, E. Sakai, M. Kitamura, K. Horiba, A. Fujimori, and H. Kumigashira: Origin of the anomalous mass renormalization in metallic quantum well states of correlated oxide SrVO_3 , *9-th International Conference on the Science and Technology of Advanced Ceramics (STAC-9)*, (Tsukuba, October 19-21, 2015).
- [46] M. Horio, T. Yoshida, H. Suzuki, G. Shibata, K. Okazaki, J. Xu, K. Koshiishi, Y. Mori, A. Takahashi, T. Konno, T. Ohgi, H. Sato, D. Ootsuki, T. Mizokawa, K. Ono, M. Kobayashi, M. Minohara, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Anzai, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, T. Adachi, Y. Koike, and A. Fujimori: Impact of annealing on the electronic structure of the electron-doped cuprate superconductors, *International USMM & CMSI Workshop: Frontiers of Materials and Correlated Electron Science - from Bulk to Thin Films and Interfaces* (University of Tokyo, January 5-9, 2016).
- [47] G. Shibata, K. Yoshimatsu, E. Sakai, V. R. Singh, V. K. Verma, K. Ishigami, T. Harano, T. Kadono, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Sawa, H. Kumigashira, M. Oshima, T. Koide, and A. Fujimori: Thickness-dependent electronic and magnetic properties of $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ thin films studied by x-ray magnetic circular dichroism, *ibid.*
- [48] K. Koshiishi, L. Liu, K. Okazaki, H. Suzuki, J. Xu, M. Horio, Y. Nonaka, H. Kumigashira, K. Ono, M. Nakajima, S. Ishida, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, S. Uchida, and A. Fujimori: Anisotropic electronic structure of BaFe_2As_2 in the electronic "nematic" phase, *ibid.*
- [49] S. Sakamoto, Y. K. Wakabayashi, Y. Takeda, S. i. Fujimori, H. Suzuki, Y. Ban, H. Yamagami, M. Tanaka, S. Ohya, and A. Fujimori: Electronic structure of ferromagnetic semiconductor $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ studied by soft x-ray angle-resolved photoemission spectroscopy *16-th Japan-Korea-Taiwan Workshop on Strongly Correlated Electron Systems (JKT16)* (University of Tokyo, February 19-20, 2016).
- [50] K. Koshiishi, L. Liu, K. Okazaki, H. Suzuki, J. Xu, M. Horio, Y. Nonaka, H. Kumigashira, K. Ono, M. Nakajima, S. Ishida, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, S. Uchida, and A. Fujimori: Observation of electronic structure of BaFe_2As_2 in the electronic "nematic" phase by angle-resolved photoemission spectroscopy, *ibid.*
- [51] M. Horio, Y. Krockenberger, K. Yamamoto, Y. Yokoyama, K. Takubo, Y. Hirata, S. Shin, A. Yasui, E. Ikenaga, H. Yamamoto, H. Wadati, and A. Fujimori: Hard X-ray photoemission and soft X-ray absorption spectroscopies on the superconducting parent compound of T^1 -cuprate superconductors Nd_2CuO_4 , *ibid.*
- [52] H. Suzuki, G. Q. Zhao, J. Okamoto, S. Sakamoto, Z.-Y. Chen, Y. Nonaka, G. Shibata, K. Zhao, B. J. Chen, W.-B. Wu, F.-H. Chang, H.-J. Lin, C. T. Chen, A. Tanaka, B. Gu, S. Maekawa, Y. J. Uemura, C. Q. Jin, D. J. Huang, and A. Fujimori: Electronic configurations and magnetic properties of Mn ions in the diluted magnetic demiconductor $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x(\text{Zn}_{1-y}\text{Mn}_y)_2\text{As}_2$ studied by resonant inelastic x-ray scattering and x-ray magnetic circular dichroism, *ibid.*
- [53] J. Xu, K. Okazaki, H. Suzuki, K. Koshiishi, M. Horio, L. Liu, S. Ideta, T. Yoshida, M. Hashimoto, D. H. Lu, Z.-X. Shen, K. Ono, H. Kumigashira, M. Nakajima, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, S. Kasahara, T. Terashima, T. Shimauchi, Y. Matsuda, S. Uchida, and A. Fujimori: Superconducting gap in the iron-based superconductor $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ studied by angle-resolved photoemission spectroscopy, *ibid.*
- [54] K. Ikeda, G. Shibata, T. Seki, K. Ishigami, S. Sakamoto, Y. Nonaka, M. Sakamaki, K. Amemiya, K. Takanashi, and A. Fujimori: Anisotropic behavior of orbital magnetic moments in L1_0 -ordered FePt thin films studied by Fe L-edge X-ray magnetic circular dichroism, *ibid.*
- [55] K. Yamamoto, Y. Hirata, M. Horio, Y. Yokoyama, K. Takubo, M. Minohara, H. Kumigashira, Y. Yamamaki, H. Nakao, Y. Murakami, A. Fujimori, and H. Wadati: Thickness and orientation dependence of charge and magnetic orders in $\text{La}_{1/3}\text{Sr}_{2/3}\text{FeO}_3/\text{SrTiO}_3$ thin films measured by X-ray scattering, *ibid.*
- [56] J. Xu, K. Okazaki, H. Suzuki, K. Koshiishi, M. Horio, L. Liu, S. Ideta, T. Yoshida, M. Hashimoto, D. H. Lu, Z.-X. Shen, K. Ono, H. Kumigashira, M. Nakajima, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, S. Kasahara, T. Terashima, T. Shimauchi, Y. Matsuda, S. Uchida, and A. Fujimori: Superconducting gap in the iron-based superconductor $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ studied by angle-resolved photoemission spectroscopy, *Cooperation in Physics Workshop: LMU-UT* (University of Tokyo, February 29-March 1, 2016).

(国内会議)

招待講演

- [57] 藤森淳：鉄系超伝導体の電子構造の異方性，基研研究会基研研究会「多自由度と相関効果が生み出す超伝導の新潮流～BCS から BEC まで～」(京大基研，2015 年 6 月 9-10 日)
- [58] 藤森淳：光電効果がひらいた現代物理学：ニュートリノから高温超伝導まで，「物理学と光～光の基礎と最先端研究～」(東大駒場，2015 年 8 月 20 日)
- [59] 藤森淳：ARPES で見た電子ドープ型超伝導体の反強磁性相関と電荷揺らぎ，CMRCplus 研究会「量子ビームによる銅酸化物超伝導体研究の最前線」(KEK 物構研，2015 年 11 月 18 日)
- [60] 藤森淳：プロテクトアニールした T' 型銅酸化物の電子構造，物性研短期研究会「低次元電子系におけるエキシトニック相の新展開」(物性研，2015 年 11 月 26-28 日)
- [61] 藤森淳：HiSOR における高分解能光電子分光，広島大学放射光科学研究センター創立 20 周年記念講演会(広島大学，2016 年 3 月 10 日)。
- [62] A. Fujimori: Competing orders/fluctuations in cuprates and iron pnictides: 日本物理学会第 71 回年次大会, Symposium on "Commonalities and Individualities in Unconventional Superconductors" (東北学院大学, 2016 年 3 月 19 日)。
- [63] 藤森淳：まとめ，日本物理学会第 71 回年次大会，シンポジウム「超高分解能非弾性散乱が加速する物質科学」(東北学院大学，2016 年 3 月 20 日)。

一般講演

- [64] 山本航平，平田靖透，堀尾眞史，横山優一，田久保耕，簗原誠人，組頭広志，山崎裕一，中尾裕則，村上洋一，藤森淳，和達大樹：共鳴軟 X 線散乱でみた $\text{La}_{1/3}\text{Sr}_{2/3}\text{FeO}_3$ の磁気秩序の膜厚依存性，物性研短期研究会 機能物性融合科学研究会シリーズ (3)「反応と輸送」(物性研，2015 年 6 月 24 日)。
- [65] 池田啓祐，芝田悟朗，関剛斎，坂本祥哉，野中洋亮，酒巻真粧子，雨宮健太，高梨弘毅，藤森淳：Fe L 端 XMCD により観測した L_{10} 秩序型 FePt 薄膜の軌道磁気モーメントの異方性，第 76 回応用物理学会秋季学術講演会(名古屋国際会議場，2015 年 9 月 13-16 日)
- [66] 芝田悟朗，吉松公平，石上啓介，原野貴幸，高橋文雄，坂本祥哉，門野利治，古瀬充穂，淵野修一郎，岡野眞，藤平潤一，内田公，渡邊和訓，藤平秀幸，藤平誠一，組頭広志，小出常晴，藤森淳：角度依存 XMCD による $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 薄膜の磁気異方性とスピン分布異方性の観測，日本物理学会秋季大会(関西大学，2015 年 9 月 16-19 日)。
- [67] 鈴木博人，岡本淳，G. Q. Zhao，坂本祥哉，Z. Y. Chen，W. B. Wu，K. Zhao，B. J. Chen，B. Gu，前川禎通，田中新，Y. J. Uemura，C. Q. Jin，C. T. Chen，D. J. Huang，藤森淳：新規強磁性半導体 $\text{Ba}_{1-y}\text{K}_y(\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{As}_2$ の共鳴非弾性軟 X 線散，同上。

- [68] J. Xu, K. Okazaki, H. Suzuki, M. Horio, L. Liu, S. I deta, T. Yoshida, M. Hashimoto, D. H. Lu, Z.-X. Shen, K. Ono, H. Kumigashira, M. Nakajima, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, S. Kasahara, T. Terashima, T. Shimauchi, Y. Matsuda, S. Uchida, A. Fujimori: Superconducting gap in the iron-based superconductor $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, 同上。
- [69] 興石佳佑，劉亮，岡崎浩三，鈴木博人，徐健，堀尾眞史，組頭広志，小野寛太，中島正道，石田茂之，木方邦宏，李哲虎，伊豫彰，永崎洋，内田慎一，藤森淳： BaFe_2As_2 の電子ネマティック相における電子構造，同上。
- [70] 野中洋亮，芝田悟朗，C.-F. Chang, X. Liu, 坂本祥哉，池田啓祐，田中新，小出常晴，L. H. Tjeng, 藤森淳：マグネタイト Fe_3O_4 薄膜の角度依存 X 線磁気円二色性，同上。
- [71] 鈴木博人，岡崎浩三，山本貴士，染谷隆史，岡田大，金井輝人，石井順久，中島正道，永崎洋，板谷治郎，藤森淳，辛埴：鉄系超伝導体母物質 BaFe_2As_2 の極紫外時間分解角度分解光電子分光，同上。
- [72] 堀尾眞史，芝田悟朗，鈴木博人，徐健，興石佳佑，今野巧也，高橋晶，扇太郎，佐藤秀孝，小林正起，簗原誠人，堀場弘司，組頭広志，足立匡，小池洋二，藤森淳：電子ドープ型銅酸化物高温超伝導体 $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ の内殻分光，同上。
- [73] 大槻太毅，溝川貴司，N. L. Saini, 大田由一，岡崎浩三，辛埴，藤森淳，鳥山達矢，小西健久，太田幸則，卞舜生，工藤一貴，野原実：レーザー角度分解光電子分光による $\text{Ir}_{1-x}\text{Pt}_x\text{Te}_2$ の超伝導ギャップの直接観測，同上。
- [74] 山本航平，平田靖透，堀尾眞史，横山優一，田久保耕，簗原誠人，組頭広志，山崎裕一，中尾裕則，村上洋一，藤森淳，和達大樹：軟 X 線回折による $\text{La}_{1/3}\text{Sr}_{2/3}\text{FeO}_3$ 薄膜の磁気秩序の膜厚依存性の研究，同上。
- [75] 山本紳太郎，下中大也，柴田大輔，小寺健二郎，吉田鉄平，藤森淳，大川万里生，斎藤智彦，組頭広志，小野寛太，池永英司，宮坂茂樹，田島節子：光電子分光による $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ の擬ギャップの観測，同上。
- [76] 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，小野寛太，組頭広志，工藤一貴，高須賀政哉，野原実，N. L. Saini, 溝川貴司： $\text{BaNi}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の角度分解光電子分光，同上。
- [77] 大槻太毅，溝川貴司，N. L. Saini, 大田由一，山本遇哲，橋本嵩広，岡崎浩三，辛埴，藤森淳，鳥山達矢，小西健久，太田幸則，卞舜生，工藤一貴，野原実：レーザー角度分解光電子分光による $\text{Ir}_{1-x}\text{Pt}_x\text{Te}_2$ の超伝導ギャップの直接観測，同上。
- [78] 下中大也，小寺健二郎，柴田大輔，山本紳太郎，吉田鉄平，組頭広志，小野寛太，藤森淳，小宮世紀，安藤陽一： $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の ARPES スペクトルを用いた自己エネルギー解析，同上。
- [79] M. Kobayashi, K. Yoshimatsu, E. Sakai, M. Kitamura, K. Horiba, A. Fujimori, and H. Kumigashira: Origin of the anomalous mass renormalization in metallic quantum well states of correlated oxide SrVO_3 , *9th International Conference*

- on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC-9) (Epocal Tsukuba, October 19-21, 2015) .
- [80] 堀尾眞史, 芝田悟朗, 鈴木博人, 徐健, 輿石佳佑, 今野巧也, 高橋晶, 扇太郎, 佐藤秀孝, 小林正起, 簗原誠人, 堀場弘司, 組頭広志, 足立匡, 小池洋二, 藤森 淳: X 線内殻光電子分光で調べる電子ドーブ型銅酸化物高温超伝導体におけるアニール効果, 第 9 回物性科学領域横断研究会 (東京大学, 2015 年 11 月 13-15 日) .
- [81] 坂本祥哉, 若林勇希, 竹田幸治, 藤森伸一, 鈴木博人, 伴芳祐, 山上浩志, 田中雅明, 大矢忍, 藤森淳: 軟 X 線角度分解光電子分光による強磁性半導体 $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ の電子構造の解明, 第 20 回スピン工学の基礎と応用 (PASPS-20) (東北大通研, 2015 年 12 月 3-4 日) .
- [82] 芝田悟朗, 和達大樹, 田久保耕, 高橋文雄, R. Sutarto, F. He, 吉松公平, 組頭広志, 小出常晴, 藤森淳: 共鳴軟 X 線散乱を用いた強磁性金属 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 薄膜の深さ方向電子状態解析, 第 29 回日本放射光学会・放射光科学合同シンポジウム (東大柏の葉キャンパス駅前サテライト, 2016 年 1 月 9 日-11 日) .
- [83] 鈴木博人, 岡本淳, G. Q. Zhao, 坂本祥哉, Z. Y. Chen, W. B. Wu, K. Zhao, B. J. Chen, B. Gu, 前川禎通, 田中新, Y. J. Uemura, C. Q. Jin, C. T. Chen, D. J. Huang, 藤森淳: 新規強磁性半導体 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x(\text{Zn}_{1-y}\text{Mn}_y)_2\text{As}_2$ の共鳴非弾性軟 X 線散乱, 同上.
- [84] 堀尾眞史, 芝田悟朗, 鈴木博人, 徐健, 輿石佳佑, 今野巧也, 高橋晶, 扇太郎, 佐藤秀孝, 小林正起, 簗原誠人, 堀場弘司, 組頭広志, 足立匡, 小池洋二, 藤森淳: 電子ドーブ型銅酸化物高温超伝導体 $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ の内殻光電子分光, 同上.
- [85] 坂本祥哉, 若林勇希, 竹田幸治, 藤森伸一, 鈴木博人, 伴芳祐, 山上浩志, 田中雅明, 大矢忍, 藤森淳: 軟 X 線角度分解光電子分光による強磁性半導体 $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ の電子構造の解明, 同上.
- [86] 輿石佳佑, 劉亮, 岡崎浩三, 鈴木博人, 徐健, 堀尾眞史, 組頭広志, 小野寛太, 中島正道, 石田茂之, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 内田慎一, 藤森淳: BaFe_2As_2 の電子ネマティック相における異方的な電子構造, 同上.
- [87] 野中洋亮, 芝田悟郎, 小堀内類, 石上啓介, 坂本祥哉, 田中新, 小出常晴, 勝藤拓郎, 藤森淳: スピネル型酸化物 CoV_2O_4 の X 線磁気円二色性, 同上.
- [88] 池田啓祐, 芝田悟朗, 関剛斎, 石上啓介, 坂本祥哉, 野中洋亮, 酒巻真粧子, 雨宮健太, 高梨弘毅, 藤森淳: Fe L 端 XMCD により観測した Ll_0 秩序型 FePt 薄膜の軌道磁気モーメントの異方性, 同上.
- [89] 徐健, 岡崎浩三, 鈴木博人, 堀尾眞史, 劉亮, 出田真一郎, 吉田鉄平, 橋本信, D. Lu, Z.-X. Shen, 小野寛太, 組頭広志, 中島正道, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 内田慎一, 藤森淳: 鉄系超伝導体 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の超伝導ギャップ, 同上.
- [90] 山本航平, 平田靖透, 堀尾眞史, 横山優一, 田久保耕, 簗原誠人, 組頭広志, 山崎裕一, 中尾裕則, 村上洋一, 藤森淳, 和達大樹: 共鳴 X 線散乱でみた $\text{La}_{1/3}\text{Sr}_{2/3}\text{FeO}_3$ の磁気秩序の膜厚依存, 同上.
- [91] 小林正起, 吉松公平, 三橋太一, 坂井延寿, 北村未歩, 湯川龍, 簗原誠人, 藤森淳, 堀場弘司, 組頭広志: 強相関酸化物 SrVO_3 量子井戸状態の金属絶縁体転移近傍における振る舞い, 同上.
- [92] 三橋太一, 簗原誠人, 北村未歩, 湯川龍, 坂井延寿, 堀場弘司, 吉松公平, 藤森淳, 小林正起, 組頭広志: ペロブスカイト型遷移金属酸化物 $\text{SrVO}_3(110)$ 薄膜の *in-situ* 偏光依存 ARPES, 同上.
- [93] 北村未歩, 堀場弘司, 小林正起, 坂井延寿, 簗原誠人, 三橋太一, 藤森淳, 藤岡洋, 組頭広志: ペロブスカイト酸化物 $\text{LaNiO}_3/\text{LaMnO}_3$ ヘテロ界面における電荷移動, 同上.
- [94] 下中大也, 山本紳太郎, 小寺健二郎, 柴田大輔, 吉田鉄平, 小野寛太, 組頭広志, 藤森淳, 小宮世紀, 安藤陽一: 高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ における ARPES スペクトルの自己エネルギー解析, 同上.
- [95] 堀尾眞史, 芝田悟朗, 鈴木博人, 徐健, 輿石佳佑, 今野巧也, 高橋晶, 扇太郎, 佐藤秀孝, 小林正起, 簗原誠人, 堀場弘司, 組頭広志, 足立匡, 小池洋二, 藤森淳: X 線内殻分光で調べる電子ドーブ型銅酸化物高温超伝導体におけるアニール効果, 2015 年度量子ビームサイエンスフェスタ (つくば国際会議場, 2016 年 3 月 15-16 日) .
- [96] 野中洋亮, 芝田悟朗, 小堀内類, 石上啓介, 坂本祥哉, 池田啓祐, 池震棟, 小出常晴, 田中新, 勝藤拓郎, 藤森淳: スピネル型酸化物 CoV_2O_4 の X 線磁気円二色性, 同上.
- [97] 輿石佳佑, 劉亮, 岡崎浩三, 鈴木博人, 徐健, 堀尾眞史, 組頭広志, 小野寛太, 中島正道, 石田茂之, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 内田慎一, 藤森淳: 角度分解光電子分光による BaFe_2As_2 の電子ネマティック相における電子構造の観測, 同上.
- [98] 山本航平, 平田靖透, 堀尾眞史, 横山優一, 田久保耕, 簗原誠人, 組頭広志, 山崎裕一, 中尾裕則, 村上洋一, 藤森淳, 和達大樹: X 線散乱で見た $\text{La}_{1/3}\text{Sr}_{2/3}\text{FeO}_3$ の磁気秩序の膜厚・基板方位依存性, 同上.
- [99] 堀尾眞史, Y. Krockenberger, 山本航平, 横山優一, 田久保耕, 平田靖透, 辛埴, 保井晃, 池永英司, 山本秀樹, 和達大樹, 藤森淳: T' 型銅酸化物母物質超伝導体薄膜 Nd_2CuO_4 の硬 X 線光電子分光, 日本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学, 2016 年 3 月 19-22 日) .
- [100] 輿石佳佑, 小林達也, 鈴木博人, 徐健, 堀尾眞史, 橋本信, D. Lu, Z.-X. Shen, 宮坂茂樹, 田島節子, 藤森淳: 鉄系超伝導体類似物質 $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.81}\text{Cr}_{0.19})_2\text{As}_2$ の角度分解光電子分光, 同上.
- [101] 野中洋亮, 芝田悟朗, 小堀内類, 石上啓介, 坂本祥哉, 池田啓祐, 池震棟, 小出常晴, 田中新, 勝藤拓郎, 藤森淳: スピネル型バナジウム酸化物 CoV_2O_4 の角度依存 X 線磁気円二色性, 同上.
- [102] 北村未歩, 堀場弘司, 小林正起, 坂井延寿, 簗原誠人, 三橋太一, 雨宮健太, 藤森淳, 藤岡洋, 組頭広志: 強相関酸化物ヘテロ構造を用いた界面強磁性の設計・制御, 同上.
- [103] 小林正起, 吉松公平, 三橋太一, 坂井延寿, 北村未歩, 湯川龍, 簗原誠人, 藤森淳, 堀場弘司, 組頭広

志：強相関金属酸化物 SrVO_3 量子井戸における金属-絶縁体転移近傍のフェルミ液体破綻，同上。

- [104] 下中大也，小寺健二郎，柴田大輔，山本紳太，組頭広志，小野寛太，藤森淳，小宮世紀，安藤陽一，吉田鉄平： $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ における自己エネルギーの温度依存性，同上。
- [105] 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：ウラン化合物の $U\ 4d-5f$ 共鳴光電子分光，同上。
- セミナー他
- [106] A. Fujimori: New phase diagram of electron-doped cuprates: Superconductivity vs antiferromagnetic fluctuations (National Synchrotron Radiation Research Center, Taiwan, August 25, 2015).
- [107] 藤森淳：放射光で見た半導体スピントロニクス材料，「高信頼性ものづくりプロジェクト」セミナー（長岡技科大，2015年11月5日）。
- [108] A. Fujimori: Competing orders/fluctuations in high-temperature superconductors probed by ARPES (Department of Physics, Tsinghua University, December 10, 2015).

4.2 長谷川研究室

修士課程1年生として4月から遠藤由大が、10月からDi Fanが新しくメンバーに加わった。3月には福居直哉と一ノ倉聖が博士課程を修了し、それぞれ理学系研究科化学専攻の特任研究員として転出、および当研究室の学振特任研究員に着任した。また、石原大嵩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。おもに半導体や金属、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原子層を利用し、それら原子尺度の低次元電子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次元バルク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。最近の主な話題は、トポロジカル絶縁体やトポロジカル結晶絶縁体結晶の表面状態、ラシュバ効果によるスピン分裂した表面状態、グラフェン、シリセン、原子層超伝導などである。このようなナノマテリアル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・スピン輸送

2層グラフェンにおける超伝導の観測

アルカリ(土類)元素をインターカレートしたグラファイトでは、「層間電子状態」によって超伝導が発

現することが知られている。最近、グラフェンにおいても元素ドーブによる超伝導化が盛んに研究されている。2層グラフェン(Bilayer Graphene, BLG)の層間化合物に関してはSTM、ARPES、第一原理計算が行われている。CaをインターカレートしたBLGにおいては層間電子状態がFermi面以下に存在するため、超伝導の発現が期待されていた。本研究ではBLGに超高真空中でLiやCaをインターカレートし、in situ低温電気伝導測定を行った。

BLGはSiC(0001)面上に脱離法によって作製し、ARPESによるバンド分散の測定から2層と同定した。大気中を輸送した後、超高真空サブケルビン4端子プローブ装置内で加熱によって表面を清浄化し、それにLiを室温蒸着するとグラフェン層間にLi原子がインターカレートされ、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ の周期でオーダーする(Li-BLG)。さらに、Li-BLGを150°Cに加熱しながらCaを蒸着するとLiとCaが置換し、Caがインターカレートする(Ca-BLG)。これらの試料にin situ電気伝導測定を行うと、Li-BLGが弱局在的な傾向を示して超伝導に転移しなかったのに対して、Ca-BLGは約2Kで超伝導転移を示した。この結果はBLGにおける初の超伝導観測であり、BLGにおいても層間電子状態と超伝導が密接に関連することを意味している。(東北大学との共同研究)

タリウム2原子層における超伝導の観測

Si(111)表面に形成されるTl単原子層表面構造Si(111)-1×1-TlはRashba効果を示すことから注目されていたが、バンド絶縁体的であるために電気伝導の研究は進んでいなかった。そこに、さらにTlを蒸着すると第1層とincommensurateな構造で金属的な電子状態を持つ第2層が形成され、Si(111)-6×6-Tl表面構造となる。この構造の光電子スペクトルの温度依存性から大きな電子格子相互作用定数 $\lambda = 1.86$ を持つことがわかった。バルクTlと同等のDebye温度を持つと仮定すると $T_C = 7.9 \sim 8.9$ Kでの超伝導転移が予測される。

本研究でSi(111)-6×6-Tl表面構造の作製及びin situ電気伝導測定を行ったところ、 $T_C = 0.962$ Kの超伝導転移を観測した。転移温度よりも高温から抵抗の減少が見られ、2次元超伝導に特徴的な振幅揺らぎの影響と考えられる。この T_C は、上述の光電子分光の結果から期待される T_C よりも低い。この原因としては、Debye温度がバルク値に比べて低いためか、あるいは構造欠陥に由来する乱れによる超伝導の抑制が考えられる。実際、常伝導抵抗は7.6 k Ω であり、Cooper対の量子化抵抗 $h/4e^2 = 6.5$ k Ω よりも大きい。この抵抗は乱れ誘起超伝導-絶縁体転移の臨界点として知られており、この表面構造がその転移点近傍にあることを示している。(ロシア科学アカデミーとの共同研究)

トポロジカル絶縁体表面における原子ステップを横切る抵抗

トポロジカル表面状態では、スピンと運動量が常に直交するという性質がある（スピン・運動量ロッキング）。このため、その電子は、スピン反転が起こらない限り、原子ステップなどによって後方散乱されにくいといわれ、実際、STMによる電子定在波の観測によって検証された。その一方で、マクロな電気伝導に、この散乱抑制効果が現れるかは、直接的な測定がなされていない。

本研究では、トポロジカル表面電子状態の原子ステップを横切るときの電気抵抗を測定した。トポロジカル絶縁体超薄膜を微傾斜 Si(111) 基板上に成長させて、原子ステップが一定方向に並んだ薄膜試料を作成し、正方 4 探針法でステップ平行およびステップ垂直方向の抵抗率を独立に測定した。初めに、表面状態のみがフェルミ面に存在する $(\text{Bi}_{0.80}\text{Pb}_{0.20})_2\text{Te}_3$ 試料におけるステップ垂直方向の抵抗率を測定し、そこからステップでの電子波動関数の透過率を求めた。その値は、トリビアル物質の透過率よりも高く、それはトポロジカル表面状態における後方散乱の抑制に起因していると考えられる。また、フェルミ面にバルク状態が共存する場合には透過率が低下することも併せて判明した。これは、バルクへの散乱の効果であると考えられる。さらに、 Bi_2Te_3 と Bi_2Se_3 と比較した場合、 Bi_2Te_3 のステップ透過率が低いことが判明した。これは、 Bi_2Te_3 と Bi_2Se_3 のフェルミ面のワーピング効果に起因した違いであると解釈できる。

$(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$ におけるシュブニコフ・ドハース振動の観測

トポロジカル絶縁体 $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$ は、Bi のドーピング濃度 x を変化させることで、フェルミ準位の位置をチューニングできる。フェルミ準位をギャップ中央に近い位置にチューニングできれば、トポロジカル絶縁体でしばしば問題となる、電気伝導におけるバルクの寄与を大幅に低減できる。本研究では、異なる x の試料 ($x = 0.29, 0.34, 0.42$) を用い、低温磁場中で *ex situ* の電気伝導測定を行い、シュブニコフ・ドハース (SdH) 振動の観測を通じてその基礎物性を明らかにした。まず試料をへき開して薄片化し、それにインジウムボンディングを施し 4 端子測定を行った。作製した試料の全てにおいて抵抗の温度変化 (300 K ~ 2 K) は金属的となった。ホール電圧測定から、 $x = 0.29, 0.34$ の試料では p 型、 $x = 0.42$ の試料では n 型であった。また磁場を 14 T まで印加したところ、磁場の逆数に対して周期的に縦抵抗が振動する SdH 振動が観測された。振動は全ての試料で観測され、その結果から、移動度はフェルミ準位がギャップ中央に近いほど高く、 n 型の $x = 0.42$ では $17,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ に達した。これはトポロジカル表面状態由来の電気伝導であると考えられる。(広島大学・ノヴォシビルスク大学との共同研究)

SiC 上の二層グラフェンにおける電子局在

単層グラフェンにおいて、極低温領域で弱局在効果が観測され、その理論的なアプローチも盛んに行われており、電気伝導度の温度依存性および磁場依存性から様々な散乱過程の寄与を分離することができる。これらの先行研究を元に、今まで詳細な解析が行われていなかった SiC 結晶表面上に成長させた二層グラフェンにおける弱局在効果の詳細な解析を行った。結論としては、電気伝導に参与する散乱において弾性的なバレー内散乱の寄与が最も大きいことが判明した。このバレー内散乱は波数空間をわずかに移動する散乱であるため、その起源は SiC 基板中のイオン化したドーパントによる散乱と考えられる。実際にバレー内散乱長から計算された散乱中心密度とドーパント密度を比較すると、これらの値は同じオーダーであった。また、この二層グラフェンに Li をインターカレートし電気伝導測定を行った結果、Li からの電子ドーピングによる電気伝導度の増加を観測した。さらに、その試料を 900 °C で加熱することにより Li を脱離させ、2 層グラフェンに戻した試料を作製し、同様の伝導測定を行った結果、Li をインターカレートする前の 2 層グラフェンと比べて電気伝導度が下がった。今後は、この不可逆的な変化の原因を角度分解光電子法や全反射高速陽電子回折法を用いて解明していく。

トポロジカル絶縁体の近接磁場効果

磁性体がトポロジカル絶縁体の表面電子状態に及ぼす影響を輸送特性の観点から議論するため、反強磁性絶縁体 MnSe とトポロジカル絶縁体 Bi_2X_3 ($\text{X} = \text{Se}, \text{Te}$) のヘテロ接合界面において 4 端子電気伝導測定を行った。その結果、MnSe/ Bi_2Se_3 と MnSe/ Bi_2Te_3 において、MnSe の膜厚が 1~5 BL (バイレイヤー) の範囲で金属的な伝導を示しつつも、MnSe 層が厚くなるにつれて電気伝導度が減少した。先行研究の ARPES 実験との比較により、電気伝導度減少の起源は、試料内部に拡散した Mn が散乱体として働くことが一因であると結論した。また、磁化率の *ex situ* 測定から界面において強磁性的性質を示すことが明らかになった。一方、東京工業大学・平原研究室との共同研究により、これらの試料の LEED-IV 法による構造解析を行った結果、ヘテロ接合界面では Mn と Bi が結合して新たな合金相構造が形成されている可能性を見出した。(東京工業大学との共同研究)

スピン分裂表面状態での Photogalvanic 効果

この研究の目的は、ラシユバ型スピン分裂した表面状態での「スピン・運動量ロッキング」を利用して、円偏光照射によってスピン偏極電流を励起し、それを検出することである。試料として、ラシユバ効果を示す Bi(111) 超薄膜および 1/3 原子層の Bi が吸着した Ag 超薄膜 $\text{Ag}(111)-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-\text{Bi}$ 、および比較のためにラシユバ効果を示さない $\text{Ag}(111)$ 膜および Si(111) 基板を用いた。 $\lambda/4$ 板を回転させて照射する

光の偏光状態を変えながら、試料両端の電極間に生じる光起電力を測定した。そのデータフィッティングでは、円偏光に由来する成分（円二色性）、直線偏光に由来する成分（線二色性）、そして偏光状態に依存しないバックグラウンド成分に分解して行った。円偏光依存成分は、ラシュバ型表面状態を持つ試料で大きく、ラシュバ効果を示さない試料では小さかった。また、表面垂直方向に対して光の入射角を反転すると、ラシュバ型試料では光起電力の符号が逆転した。これらの結果は、スピン・運動量ロッキングに起因するメカニズムで説明できる。今後、まだ理論的に説明されていない直線偏光依存成分の解釈を行う。

4 探針型 STM を用いた有機分子の電気伝導測定

分子によるデバイス構築にはその電気伝導メカニズムの正確な理解が必要である。我々は4探針型STMを用いて、各種有機分子膜の電気伝導率の測定を試みている。本年度はグラフィジン、Fe/Co テルピリジンなど十数種類の測定を行った。

どの物質も、バンド計算などでは伝導性が大いに期待される試料であったが、実際に伝導性を持つ試料はわずかに二つだけであった。分子の伝導性を確認するためには、数十マイクロンサイズの試料片に探針を直接コンタクトして測定するという手法が有用であることが確認された。

大阪大学家研究室から提供いただいた「Au ナノ粒子/チオフェンコンポジット」では、分子伝導でよく見られる高抵抗・非線形性が確認された。化学専攻西原研から提供いただいたPtジチオレンでは電子線照射時間に依存して伝導度が増大する現象が見られ、チャージアップの影響と思われる。(大阪大学および当理学系研究科化学専攻との共同研究)

4.2.2 表面ナノ構造

原子層超伝導 Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,Pb) の超低温 STM/STS 測定

我々は、Rashba 効果によりスピン分裂したバンド構造を持つと同時に超伝導を示す単原子層物質 Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,Pb) 表面構造を発見した ($T_C = 2.25$ K)。これは、Si 表面上で Tl(1 原子層) と Pb(1/3 原子層) が混合した 1 原子層合金であり、空間反転対称性が破れているためにスピン-重項と三重項クーパ対の混合など特異な超伝導状態が期待される。

そこで、我々は、物性研究所において、0.5 K での STM/STS 測定を行い、超伝導ギャップ Δ の大きさが ~ 0.8 meV であった。伝導測定による T_C と合わせると、比 $\Delta(0)/K_B T_C$ は 4.0 となり、BCS による理論値 1.76 より大きな値を得た。また、磁場を印加してゼロバイアスコンダクタンスマッピングを行うことにより渦糸の観察を行ったところ、渦糸の中心においても STS スペクトルに超伝導ギャップに類似

したディップ構造が観測されるという特異な結果を得た。また、超伝導ギャップの STS スペクトルが BCS 理論に基づく s 波を仮定した理論では再現されないこともわかった。これらのことは、この超伝導体为非 BCS 超伝導体であることを示唆している。(東京大学物性研究所との共同研究)

Pb_xSn_{1-x}Te(111) における角度分解光電子分光測定

SnTe は結晶構造の鏡映対称性に起因したトポロジカル表面状態を示す、「トポロジカル結晶絶縁体」であるが、PbTe はトリビアル物質である。そのため、SnTe に Pb をドーピングして Pb_xSn_{1-x}Te 混晶を作ると、 $x=0.7$ 程度でバンド反転が解消され、トポロジカル表面状態が消失すると考えられている。また、Pb のドーピングによって p 型の SnTe のキャリア密度を減らすことができることから、 $x=0.7$ 以下において、ギャップ中にフェルミレベルをチューニングできると考えられる。その状態において磁性元素をドーピングして強磁性状態を実現すれば、磁気摂動によってギャップレストポロジカル表面状態にギャップが開くと期待できる。本年度はまず MBE で作製した Pb_xSn_{1-x}Te(111) 薄膜 ($x=0, 0.25, 0.5, 1.0$) について広島大学の放射光施設 HiSOR において角度分解光電子分光測定 (ARPES) を行った。入射フォトンエネルギーを変化させることでバンドの 2 次元性を検証した結果、 $x=0.5$ 以下の試料において直線状の 2 次元的なバンド分散を確認した。今後更に解析し、このバンドの由来を調べ、Pb ドーピング濃度依存性を詳しく見ていく予定である。(広島大学・筑波大学との共同研究)

金属吸着 Ge(111) 表面構造の電子状態

Ge(111) 表面上に単原子層程度の Pb が吸着して作る表面超構造について、その輸送特性を明らかにするため、超高真空・極低温・強磁場下での in situ 4 端子電気伝導測定を行った。その結果、Pb を 4/3 ML 蒸着した Ge(111)- $\beta(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$ -Pb では電気伝導度の温度依存性が絶縁体的な振る舞いを示したが、Pb の蒸着量が 3 ML を超えた試料では 2 K 以下で金属的な伝導を観測した。これらのバンド構造を明らかにするため、佐賀県立九州シンクロトロン光研究センターにおいて ARPES 測定を行った。LEED 測定から、作成した 3 ML-Pb/Ge(111) は Ge(111)- $\beta(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$ -Pb と Pb(111)-(1 × 1) アイランドが混在している様子を観測した。一方で、そのバンド構造は Ge(111)- $\beta(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$ -Pb 由来のバンドに加え、Pb(111)-(1 × 1) ではない未知のバンド構造を持つことを明らかにした。Si(111) 基板上的同様の表面構造が超伝導になることから、今後、Ge(111) 上のこれらの構造の超低温での伝導特性を測定する予定である。

4.2.3 新しい装置・手法の開発

純スピン流注入プローブの開発

スピンを利用する技術、スピントロニクスが期待されているが、現在はスピン流の生成も測定も制限が大きい。スピントロニクスの発展には自由にスピン流の生成・測定ができるプローブが必須であり、本研究室では本年度からその製作を始めた。東京大学大規模集積システム設計教育研究センター (VDEC) の微細加工設備を用いて製作している。スピン注入に必要な各種金属を均質に積層パターニングすること、プローブ先端にスピン拡散長よりも短い間隔での接合を作ることの2点が技術的に困難であったが、本年度はその設計および製作技術検証を終え、試作プローブが完成した。来年度はこれを用いて実際にスピン流の生成と測定を行い、注入プローブとしての機能の実証を行う。

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)
- ・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)
- ・日本学術振興会 科研費 若手研究B「強磁性トポロジカル結晶絶縁体の開発とその空間反転対称性からみた特性の解明」(代表 秋山了太)
- ・日本学術振興会 科研費 若手研究B「独立駆動4探針・磁性探針STMによるスピン偏極した1次元電子系の研究」(代表 高山あかり)
- ・日本学術振興会 科研費 挑戦的萌芽研究「多探針STMを用いた純スピン流プローブの開発」(代表 保原麗)

<受賞等>

- [1] 一ノ倉聖：平成27年度 理学系研究科研究奨励賞(博士課程)(東京大学大学院理学系研究科, 2016年3月)。

<報文>

(原著論文)

- [2] S. Ichinokura, K. Sugawara, A. Takayama, T. Takahashi, and S. Hasegawa: *Superconducting Calcium-Intercalated Bilayer Graphene*, ACS Nano **10**, 2761 (Jan, 2016)).
- [3] T. Hirahara, T. Shirai, T. Hajiri, M. Matsunami, K. Tanaka, S. Kimura, S. Hasegawa, and K. Kobayashi: *Role of Quantum and Surface-State Effects in the Bulk Fermi Level Position of Ultrathin Bi films*, Phys. Rev. Lett. **115**, 106803 (Sep, 2015).
- [4] A.V. Matetskiy, S. Ichinokura, L.V. Bondarenko, A.Y. Tupchaya, D.V. Gruznev, A.V. Zotov,

A.A. Saranin, R. Hobara, A. Takayama, and S. Hasegawa: *Two-dimensional superconductor with giant Rashba effect: One-atomic-layer Tl-Pb compound on Si(111)*, Phys. Rev. Lett. **115**, 147003 (Oct, 2015).

- [5] A.V. Matetskiy, I. A. Kibirev, T. Hirahara, S. Hasegawa, A.V. Zotov, and A.A. Saranin: *Direct observation of a gap opening in topological interface states of MnSe/Bi₂Se₃ heterostructure*, Appl. Phys. Lett. **107**, 091604 (Sep, 2015).
- [6] R. Akiyama, K. Fujisawa, T. Yamaguchi, R. Ishikawa and S. Kuroda: *Two-dimensional quantum transport of multivalley (111) surface state in topological crystalline insulator SnTe thin films*, Nano Research **9**, 490 (Feb, 2016).

(総説)

- [7] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, and T. Takahashi: *Rashba effect of bismuth thin film on silicon studied by spin-resolved ARPES*, J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena, **201**, 105 (May, 2015).

(国内雑誌)

- [8] 一ノ倉聖, 平原徹, 酒井治, 長谷川修司, 鈴木拓: *ビスマス表面におけるスピン依存イオン散乱*, 表面科学 **36**, 408 (Aug, 2015).
- [9] 長谷川修司: *物理科学、この30年：表面物理学、パリティ* **30**, 14 (Apr, 2015).

(著書)

- [10] 長谷川修司: *研究者としてうまくやっていくには* (講談社ブルーバックス, Dec, 2015).
- [11] 長谷川修司, 他分担執筆, パリティ編集委員会編: *先生、物理っておもしろいんですか?* (丸善, May, 2015).

(その他)

- [12] 長谷川修司: *研究・開発、この人間的な営み*, 本 (講談社, Jan, 2016).
- [13] 長谷川修司: *物理チャレンジ2015、いよいよ始まる*, 大学の物理教育 **21**, 93 (Jul, 2015).

(学位論文)

- [14] 一ノ倉聖: *超高真空中でのその場電気伝導測定を用いた半導体表面上の原子層超伝導に関する研究* (博士論文).
- [15] 福居直哉: *トポロジカル絶縁体の原子ステップが輸送特性に与える影響* (博士論文).
- [16] 石原大嵩: *スピン分裂表面状態と光誘起電圧の円二色性* (修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [17] S. Hasegawa, *Atomic-Layer Superconductors*, International Symposium on Two-Dimensional Layered Materials and Art: Two Worlds Meet, 2016年3月24日, IMeRA, Marseille (France).
- [18] S. Hasegawa, *Atomic-Layer Superconductors*, Cooperation in Physics Workshop of LMU-UTokyo, 2016年3月1日, 小柴ホール、東京大学.
- [19] S. Hasegawa, *Atomic-Layer Superconductors*, The 16th Japan-Korea-Taiwan Workshop on Strongly Correlated Electron Systems, 2016年2月19日, 小柴ホール、東京大学.
- [20] S. Hasegawa, *Charge/spin transport and superconductivity at Rashba spin-split surface states*, The 23rd International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM23), 2015年12月11日, ニセコ, 北海道.
- [21] S. Hasegawa, *Surface Transport of Topological and Non-topological Materials*, The 10th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices (ALC'15), 2015年10月26日, 松江, 島根.
- [22] S. Hasegawa, *Charge/Spin Transport at Surfaces*, The 7th International Conference on Scanning Probe Spectroscopy and Related Methods (SPS'15), 2015年6月22-24日, Poznan (Poland).
- [23] S. Hasegawa, *Surface transport below 1 K*, International Workshop on LEED and Related Techniques, 2015年5月28日, Hannover (Germany).
- 一般講演
- [24] S. Ichinokura, *Superconductivity in Ca-intercalated Bulayer Graphene*, Tsinghua-UTokyo Workshop on Recent Topic in Materials Physics, Science and Engineering, 2016年3月10日, 東京大学.
- [25] S. Ichinokura, *Two-Dimensional Superconductor with a Giant Rashba Effect: Monatomic Layer Tl-Pb Compound on Si(111)*, Cooperation in Physics Workshop of LMU-UTokyo, 2016年3月2日, 東京大学.
- [26] N. Fukui, *In situ Measurements of Transport Properties in Topological Insulator $(Bi_{1-x}Pb_x)_2Te_3$ with Atomic Steps*, Cooperation in Physics Workshop of LMU-UTokyo, 2016年3月2日, 東京大学.
- [27] S. Ichinokura, T. Nakamura, H. Kim, A. Takayama, R. Hobar, S. Hasegawa, Y. Hasegawa, A.V. Matetskiy, L.V. Bondarenko, A.Y. Tupchaya, D.V. Gruznev, A.V. Zotov, A.A. Saranin, *Two-dimensional superconductor with a giant Rashba effect: monatomic layer Tl-Pb compound on Si(111)*, The 16th Japan-Korea-Taiwan Workshop on Strongly Correlated Electron Systems, 2016年2月20日, 東京大学.
- [28] S. Hasegawa, S. Ichinokura, R. Hobar, R. Akiyama, A. Takayama, A.V. Zotov, and A. A. Saranin, *Superconductivity in Rashba-Type Spin-Split Surface States: $Si(111)-\sqrt{3}\times\sqrt{3}-(Tl,Pb)$ Surface Superstructure*, Symposium on Surface and Nano Sciences 2016, 2016年1月16日, 富良野 (北海道) .
- [29] T. Hirahara, M. Aitani, T. Shirai, S. Ichinokura, M. Hanaduka, D. Y. Shin, T. Hajirc, M. Matsumami, K. Tanaka, S. Kimura, K. Kobayashi, and S. Hasegawa, *Surface and Bulk States of Ultrathin Bi films: Electronic Structure and Transport Properties*, The 15th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-15), 2015年11月19日, 広島国際会議場 (広島).
- [30] R. Akiyama, K. Fujisawa, T. Yamaguchi, R. Ishikawa, and S. Kuroda : *2-dimensional transport of the topological surface state in $SnTe(111)$ films*, The 15th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-15), 2015年11月17日, 広島国際会議場 (広島).
- [31] R. Akiyama, K. Fujisawa, T. Yamaguchi, R. Sakurai, and S. Kuroda : *Two-dimensional weak antilocalization in topological crystalline insulator $SnTe$ thin films*, New Trends in Topological Insulators 2015, 2015年8月8日, San Sebastian (Spain).
- [32] R. Hobar, N. Fukui, T. Nakamura, and S. Hasegawa : *Electronic conductance measurement of Au nano particle/Thiophene compound by multi-probe STM*, International Workshop on Molecular Architectonics, 2015年8月4日, 知床, 北海道.
- (国内会議)
- 招待講演
- [33] 長谷川修司:トポロジカル物質のインパクト, 日本表面科学会中部支部・日本真空学会東海支部合同講演会, 2015年4月25日, 名古屋工業大学, 愛知.
- 一般講演
- [34] 一ノ倉 聖、菅原克明、高山あかり、高橋隆、長谷川修司 : *Ca-インターカレートした2層グラフェンにおける超伝導*, 第7回 低温センター研究交流会, 2016年2月23日, 東京大学.
- [35] 福居 直哉、保原麗、高山あかり、秋山了太、長谷川修司 : *原子ステップをもつトポロジカル絶縁体の in situ 輸送特性観測*, 第7回 低温センター研究交流会, 2016年2月23日, 東京大学.
- 日本物理学会 第71回年次大会, 2016年3月19日-22日 (東北学院大学, 仙台)
- [36] 平原徹, 白井皓寅, 羽尻哲也, 松波雅治, 田中清尚, 木村真一, 長谷川修司, 小林功佳: *ピスマス超薄膜における半金属半導体転移の検証 II*, 2015年3月19日.
- [37] 福居直哉, 保原麗, 高山あかり, 秋山了太, 長谷川修司: *原子ステップをもつトポロジカル絶縁体の in situ 輸送特性観測*, 2015年3月19日.
- [38] 並木雅俊, 毛塚博史, 長谷川修司, 真野絢子, 中屋敷勉, 田中忠芳, 近藤一史, 鍵山茂徳, 江尻有郷: *グローバル時代に対応した物理教育コンテンツの研究開発 III. 国際物理オリンピック実験再現*, 2015年3月19日.

- [39] 遠藤由大, 一ノ倉聖, 鈴木克郷, 菅原克明, 秋山了太, 高山あかり, 高橋隆, 長谷川修司: 極低温その場 4 端子電気伝導測定による 2 層グラフェンの輸送特性, 2015 年 3 月 19 日.
- [40] 秋山了太, 角田一樹, 一ノ倉聖, 木村昭夫, Konstantin Kokh, Oleg Tereshchenko, 長谷川修司: $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$ における量子振動および量子コヒーレント輸送の観測, 2015 年 3 月 19 日.
- [41] 一ノ倉聖, 菅原克明, 高山あかり, 高橋隆, 長谷川修司: Ca -インターカレートした二層グラフェンにおける超伝導, 2015 年 3 月 22 日.
- [42] 一ノ倉聖, A.V. Matetskiy, L.V. Bondarenko, A.Y. Tupchaya, D.V. Gruznev, A.V. Zotov, 保原麗, 秋山了太, 高山あかり, A.A. Saranin, 長谷川修司: *in situ* 電気伝導測定による *Rashba* 系表面構造 (Tl, Pb)/ $Si(111)$ の超伝導の観測, 2015 年真空・表面科学合同講演会 2015 年 12 月 1 日, つくば国際会議場 (茨城).
- [43] 中村友謙, 芳野諒, 保原麗, 長谷川修司, 平原徹: 走査トンネルポテンシオメトリ法による表面上の単一ステップでの抵抗測定, 2015 年真空・表面科学合同講演会 2015 年 12 月 2 日, つくば国際会議場 (茨城).
- [44] 一ノ倉聖, 菅原克明, 高山あかり, 高橋隆, 長谷川修司: Ca をインターカレーションしたバイレイヤークラフエの超伝導, 第 6 回分子アーキテクトにクス研究会 2015 年 10 月 24 日, 京都大学桂キャンパス (京都).
- 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 16 日-19 日 (関西大学)
- [45] 一ノ倉聖, A.V. Matetskiy, L.V. Bondarenko, A.Y. Tupchaya, D.V. Gruznev, A.V. Zotov, 保原麗, 秋山了太, 高山あかり, A.A. Saranin, 長谷川修司: *Rashba* 系表面構造 (Tl, Pb)/ $Si(111)$ における二次元超伝導: *in situ* 電気伝導測定, 2015 年 9 月 16 日.
- [46] 石原大嵩, 福居直哉, 保原麗, 高山あかり, 秋山了太, 平原徹, 長谷川修司: 可視光レーザーを用いた表面ラッシュバ系における光誘起電圧の円二色性: Bi 表面および Bi 吸着 Ag 表面, 2015 年 9 月 16 日.
- [47] 花塚真大, 一ノ倉聖, 保原麗, 高山あかり, 秋山了太, 長谷川修司: $Pb/Ge(111)$ 超薄膜における構造と輸送特性, 2015 年 9 月 18 日.
- [48] 保原麗, 福居直哉, 中村友謙, 丹波俊輔, 家裕隆, 安蘇芳雄, 長谷川修司: 多探針 *STM* を用いた金ナノ粒子/チオフェン複合粒子の電気伝導測定, 2015 年 9 月 18 日.
- [49] 秋山了太, 一ノ倉聖, 角田一樹, 木村昭夫, Konstantin Kokh, Oleg Tereshchenko, 長谷川修司: トポロジカル絶縁体 $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$ における *in situ* および *ex situ* 電気伝導測定による表面状態の比較検証, 2015 年 9 月 18 日.
- [50] 久保高幸, 中西亮介, 高山あかり, 福居直哉, 保原麗, 秋山了太, 長谷川修司: 4 端子電気伝導測定による MnX/Bi_2X_3 ($X=Se, Te$) 薄膜の輸送特性, 2015 年 9 月 19 日.
- [51] 右近修治, 一宮彪彦, 井通暁, 江尻有郷, 大嶋孝吉, 大塚洋一, 川村康文, 岸澤真一, 毛塚博史, 小牧研一郎, 近藤泰洋, 真梶克彦, 鈴木功, 瀬川勇三郎, 武士敬一, 遠山潤志, 長谷川修司, 林壮一, 深津晋, 松本益明, 松本悠, 味野道信: 物理チャレンジ 2015 報告: IV 第 2 チャレンジ実験問題, 2015 年 9 月 19 日.
- [52] 興治文子, 田中忠芳, 伊東敏雄, 植田毅, 川村清, 杉山忠男, 東辻浩夫, 波田野彰, 松澤通生, 吉田弘幸, 中屋敷勉, 江尻有郷, 真梶克彦, 鈴木功, 深津晋, 光岡薫, 毛塚博史, 榎優一, 江馬英信, 大森亮, 澤岡洋光, 笠浦一海, 川畑幸平, 佐藤遼太郎, 中塚洋佑, 濱崎立資, 山村篤志, 長谷川修司, 北原和夫: 国際物理オリンピック 2015 日本代表候補者への教育研修報告, 2015 年 9 月 19 日.
- [53] 並木雅俊, 田中忠芳, 鎌山茂徳, 中屋敷勉, 近藤一史, 長谷川修司, 江尻有郷: グローバル時代に対応した物理コンテンツの研究開発 II. 国際物理オリンピック実験問題考察, 2015 年 9 月 19 日.
- [54] 長谷川修司: 表面・分子系での電子・スピン伝導, 新学術領域分子アーキテクトニクス第 5 回領域会議, 2015 年 4 月 24 日, 千葉大学 (千葉).
- (セミナー)
- [55] 秋山了太, *Two dimensional electrical transport in topological crystalline insulator $SnTe$ thin films*, 東京大学理学部物理教室ランチトーク, 2015 年 5 月 8 日, 東京大学.
- [56] Shuji Hasegawa: *Four-tip STM and micro-four-point probes to measure electronic/spin transport at surfaces and nanostructures*, Max Planck Institute of Microstructure Physics-Halle, 2015 年 5 月 26 日, Halle (Germany).
- [57] Shuji Hasegawa: *Charge/spin transport and superconductivity at spin-split surface states*, International Center of Quantum Materials, Peking University, 2015 年 12 月 24 日, Beijing (China).
- [58] 長谷川修司: ナノサイエンス ー私たちの体や日常を支える極美の世界を探るー, 東京銀杏会 第 23 回銀杏講演会, 2016 年 2 月 19 日, 学生会館 (東京).
- (講義等)
- [59] 長谷川修司: 初年次ゼミナール「歴史を変えた物理」(駒場 1 年生向), 2015 年度夏学期 (駒場).
- [60] 長谷川修司, 小森文夫: 物性物理学特論 (表面物理学), 2015 年度夏学期 (本郷).
- [61] 長谷川修司, 高山あかり, 秋山了太, 中村友謙 (TA), 遠藤由大 (TA): 物理学実験 I (3 年生) 電子回折, 2015 年度冬学期 (本郷).
- (アウトリーチ)
- [62] 長谷川修司, 並木雅俊: 実験課題レポートの書き方, および LED によるプランク定数測定実験, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2016 年 3 月 12 日, 栃木県立宇都宮高等学校 (栃木).

- [63] 長谷川修司: 科学の世界 ～サイエンスと顕微鏡～, 科学先取りグローバルキャンパス岡山 (GSCO), 2015年8月23日, 岡山大学 (岡山).
- [64] 長谷川修司: ナノワールドの探索 ～私たちの日常を支える極微の世界～, 東大理学部 高校生のための夏休み講座 2015, 2015年8月20日, 東京大学 (東京)
- [65] オープンキャンパス研究室公開 「表面的でない表面物理学」, 2015年8月6日, 理学部1号館 B101号室 (東京大学)
- [66] 模擬授業および研究室見学 兵庫県立姫路西高等学校, 2015年8月3日: 札幌市立札幌開成中等教育学校, 2015年8月7日: 神奈川県立湘南高等学校, 2015年8月7日: 群馬県立前橋高等学校, 2015年11月10日: 栃木県立宇都宮高等学校, 2015年12月1日.

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構成粒子の統計性や粒子間相互作用の効果が顕わになり、非日常的な量子現象・状態が出現する。我々は、できるだけ純粋かつ単純な2次元物質を対象として、これまで知られていない、そして一般性のある基底状態、素励起、相転移現象を、極低温下で探索している。具体的には、量子効果が非常に強いヘリウムの液体や固体(量子液体・固体)、炭素の2次元シートであるグラフェンが対象物質である。

実験手法は、自作の核断熱消磁冷却装置(到達温度 $50 \mu\text{K}$)や超低温 (30 mK)・高磁場 (13 T)・超高真空 (10^{-8} Pa 以下)の多重極限環境下で作動する走査トンネル顕微・分光装置 (STM/S)、無冷媒型の希釈冷凍機(到達温度 17 mK)を中心に、比熱、NMR(核磁気共鳴)、ねじれ振り子、走査トンネル分光 (STS)、電気伝導度、磁化測定など多彩な手法を用いる。また、本学低温センターや物性研、信州大、NTT基礎研、カタルーニャ工科大学など学内外の実験や理論グループと共同研究を進めている。

4.3.1 2次元ヘリウムの量子相研究

液体ヘリウムは実験室で扱える最も純粋な物質であり、その単純な構成からは想像できないような複雑で多彩な量子現象を極低温で示す。ヘリウム $4(^4\text{He})$ とその安定同位体であるヘリウム $3(^3\text{He})$ は同一の原子間相互作用をもちながら、前者はボース統計に従うスピン0の中性粒子、後者はフェルミ統計に従うスピン $1/2$ の中性粒子である。原子質量が小さいため量子効果が大きく、それらの液体と固体は、統計性の違いを反映して、超流動、異方的BCS状態、核磁気秩序など豊富な物理を表出する。我々は、原子スケールで平坦なグラファイト表面に物理吸着させることで ^4He や ^3He を2次元空間に閉じ込め、その物性を $100 \mu\text{K}$ に至る超低温まで調べ、超固体相や量子スピン液体相など物質のまったく新しい量子状態を探索している。2次元 He は3次元 He より量

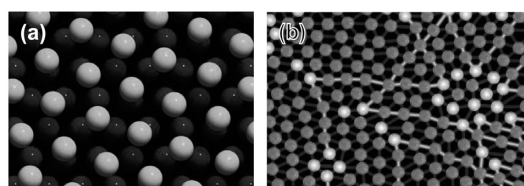


図 4.3.1: (a) HD2 層上で形成される2次元 ^3He の $4/7$ 整合相のイメージ。HD の2層目が青丸、 ^3He 単原子層が水色丸。(b) C2相や C2-like相で実現していると思われる量子液晶状態の候補の一つ、量子 hexatic 相のイメージ。明るい原子が5回対称と7回対称の回位対を表し、原子列がそこで切断されることで並進対称性が破れている。一方、回位対は局所的に安定化して零点運動するので、6回の回転対称性は準長距離秩序を保つ。この状態が絶対零度でも実現するのが量子 hexatic 相である。

子性が強く、粒子相関もはるかに広い範囲で制御できる量子多体系のフロンティアである。

量子スピン液体

三角格子など幾何学的なフラストレーションをもつ格子上に、互いに反強磁性的に相互作用する $S = 1/2$ のスピンの配置したとき、交換相互作用よりずっと低温でも磁気秩序せず、スピンエントロピーはゼロに漸近する不思議な磁性を示す場合がある。“量子スピン液体”と呼ばれるこの新奇な磁性状態は、絶対零度でも常磁性体と同じように各格子点のスピン期待値はゼロに止まり、一見して対称性の破れはない。ちょうど量子液体が座標空間での液体であるのに対し、量子スピン液体はスピン空間での量子液体と考えることもできる。この状態が安定化するには、最近接2体の交換相互作用に加えて、少なくとも4体までの循環型交換相互作用(リング交換あるいは4スピン交換)が大きい必要がある。この新奇な磁気基底状態は必ず新奇な磁気素励起を伴っているはずで、低温比熱の測定が重要となる。

我々は最近、グラファイト表面を重水素化水素 (HD) $_2$ 分子層でプレコートした上に単原子層 ^3He 吸着させ、その量子相図を $0.2 \leq T \leq 90 \text{ mK}$ の広い温度範囲の比熱測定から決定した。その結果、下地 HD 層に対して $4/7$ の面密度比となる 5.25 nm^{-2} のとき、この系がこれまで観測されたことのない $C \propto T^{2/3}$ という特異な低温比熱の温度依存性を広い温度範囲 ($T \leq 6 \text{ mK}$) でもつことが判明した。この整合密度からわずかに1%ずれるだけで、低密度側ではフェルミ液体相と、高密度側では C2-like 相と名付けた大きな圧縮率をもつ別の固体相と2相共存することから、 $4/7$ 相は整合固相に間違いない。実測した比熱から計算されるエントロピー変化量はほぼ $k_B \ln 2$ で、 ^3He

核スピン自由度に由来した比熱のみを観測していることが分かる。帯磁率も同じ温度域で $\chi \propto T^{-1/3}$ という異常な冪乗則に従うことが先行研究の再解析から分かり、今回の比熱データと合わせて、その磁気素励起の正体の注目が集まっている。今後はNMR測定から磁気的ダイナミクスの情報を得て、その正体に迫りたい。例えば、有力な理論モデルの一つに、基底状態にSU(2)対称性を仮定したときの $S = 1$ マヨラナフェルミ粒子がある。

量子液晶の可能性

実験室で扱える量子物質には、これまで量子気体(アルカリ原子気体)、量子液体(^4He , ^3He)、量子固体(^4He , ^3He)の3種類が知られている。しかし、古典物質には液体と固体の中間に、回転対称性や並進対称性が部分的に破れた液晶がある(熱平衡にないアモルファス(ガラス)はここでは考えない)。では量子液晶は存在するのだろうか?もし存在すれば、極低温で超固体性を示すはずで、大変興味深い。関連して、高温超伝導体や一部の電子系では、ネマティック相と呼ばれる電子の量子液晶状態があると考えられている。

我々は、グラファイト上の2層系 ^3He や ^4He の第2層目の融解に伴う比熱を、比較的“高温”域($0.1 \leq T < 1.9$ K)で精密測定し、低密度の量子液体相と高密度の量子固体相に挟まれた中間密度域に新奇な量子相があることを見いだした。従来、我々も含めて、これを第1層目Heの結晶周期性に整合した整合固相(C2相)と考えたが、これが10%の密度幅をもって存在すること、運動量空間での共存とも言える特異な共存域で液体相と隔てられていること、密度がほとんど同じなのにより重い ^4He の方が40%も融点が高いことなど、さまざまな特異性があり、単純な整合相とは思えない。そこで、我々は次の2通りの可能性を提唱した。一つは多数の零点欠陥を内包できる整合固相の可能性、もう一つは量子液晶の可能性である。上記したHD2層上 ^3He のC2-like相は、下地層の密度が20%以上も小さいのに、このC2相とほぼ同じ ^3He 密度域に現れている。このことは、整合固相と考えると無理があり、量子液晶の傍証の一つと考えられる。

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のハニカム格子からなる理想的な2次元物質である。 p_z 軌道の成すエネルギーバンドが線形分散をもつことから電子やホールが質量ゼロのディラック粒子として振舞い、ゼロエネルギーのランダウ準位をもつなど基礎物理学の観点から大変興味深い。同時に、高い熱および電気伝導度を備え機械的にも強くしなやかなことから、次世代エレクトロニクス素材として注目されている。

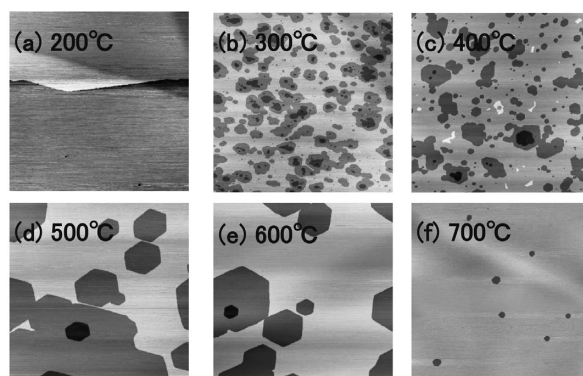


図 4.3.2: さまざまな温度で水素プラズマ・エッチングしたグラファイト表面のSTM像。図は全て $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 。高温で水素プラズマに曝すことで単原子層深さのナノピットが作成されるが、その形状は 450°C 以下では不定形、 500°C 以上では六角形となる。

ジグザグ端をもつ六角形ナノピットの作成

ハニカム格子構造をもつグラフェンにはジグザグ型とアームチェア型の2種類の端構造がある。前者では二つの副格子の対称性が破れているため端に局在した電子状態(ジグザグ端状態; zz -ES)が形成され、アームチェア端には現れない。 zz -ESのバンド幅は狭く、わずかな摂動でスピン偏極し得る。非磁性の炭素原子だけから成るグラフェンに磁性が誘起されれば興味深い。また、スピントロニクスへの応用も期待できる。 zz -ESの理論研究は大変活発であるが、実験研究は、我々による2005年の zz -ES自体の発見以降、大きく進展したとは言い難い。これは端生成の原子レベルでの制御が困難だからである。

我々は最近、グラファイト表面をさまざまな方法で化学エッチングしてジグザグ端を作成する技術開発に取り組んできた。その結果、高温にしたグラファイトを水素プラズマに曝すことで、その表面にかなり直線性の良いジグザグ端で囲まれた単原子層深さの六角形ナノピット(一辺、数十~数百nm)を多数作成することに成功した。

図 4.3.2 に示すように、選択的にジグザグ端を得る異方性エッチング反応は、水素プラズマに暴露する温度が 500°C のとき最も活発で、それより低温または高温では反応は進まない。これは、水素プラズマのうち、原子状水素が反応の核となる点欠陥や小さな不定形ナノピットを形成する作用をもち、イオン化した水素が異方性エッチングに寄与していることを示唆している。一方、プラズマを発生させる高周波の出力を大きくして原子状水素の密度を高くすると反応核の数が増え、同時に深さ方向の反応性も増してしまうことが分かった。ただ、水素イオンの密度も同時に増えるので、最大ナノピット径 D_{max} はそれほど変わらない。水素プラズマに暴露する時間を長くすると、最表面のグラフェン面積が単調減少して D_{max} は概ね直線的に増加するが、次のグラ

フェン層のナノピット形成までには、一定のタイムラグがあることが分かった。このように、異方性エッチングの制御を STM を使って原子レベルで評価した実験は本研究が初めてである。

ジグザグ・エッジ状態と量子ホール・エッジ状態

通常の量子ホール系では、磁場中ランダウ準位 (LL) のエネルギーは試料の端近傍で大きくシフトしてパンチ量子ホール端状態 (QH-ES) を形成して、そこに 1 次元エッジ電流が流れる。しかし、グラフェンの最低ランダウ準位 (LL0) は電荷中性点に位置するので、試料の端までゼロエネルギーに止まると予想される。ジグザグ端の場合、上記したようにジグザグ端状態 (zz-ES) がゼロエネルギーに存在するので、端ごく近傍での LL0 との関係は必ずしも自明でない。理論研究によれば、LL0 状態は、アームチェア端に近づくにつれて電荷密度が単調減少するが、ジグザグ端の場合は一旦減少したあと再増加して zz-ES となること、それらの空間変化が磁気長で規格化されることなどが予測されている。我々は、上記した水素プラズマエッチング法でグラファイト表面に作成した六角形ナノピットのジグザグ端の近傍で低温磁場中の STS 測定を行い、この問題を実験的に調べた。

図 4.3.3(a) で示したジグザグ端を横切るライン上でトンネル分光測定した局所状態密度を図 4.3.3(c) にカラーマッピングした。グラファイトの場合の最低ランダウ準位は LL0,-1 で、図中 30 mV 付近に観測されており、その電荷密度は、端に向かって減衰した後、再増加している。一方、それ以外の LL には再増加は見られず、指数が大きい程、より短い長さスケールで端に向かって減衰している。その結果、図中に点線で示したような扇形のコントラストが得られる。以上の減衰長は磁気長でよく規格化でき、理論予測と一致する。ただし、この場合、zz-ES (図中赤丸) が -25 mV と LL0,-1 とは若干異なるエネルギーに位置していても、こうした reentrant な振る舞いが見られる理由は今のところ不明である。また、我々の試料では、zz-ES のエネルギーはフェルミ準位近傍 ± 20 meV の範囲で、空間的に 10~20 nm の長さスケールで変調してしている。これらに下地グラフェンとの層間相互作用がどのように関係しているかは今後の検討課題である。

4.3.3 1次元硫黄鎖を内包したカーボンナノチューブの低温物性

グラフェンが円筒状に丸まった擬 1 次元物質であるカーボンナノチューブ (CNT) は、相互作用する 1 次元電子系特有の朝永-Luttinger 液体 (TLL) の振る舞いが予測され、実際、その実験例もいくつか報告されている。しかし、CNT1 本の長さは数 μm と短く、その低温の伝導度測定にはメソスコピック系特有の試料依存性や帯電効果の補正などの問題が常につきまとう。我々は、無数の CNT ロープのランダムネットワークである buckypaper に着目し、統計平均とし

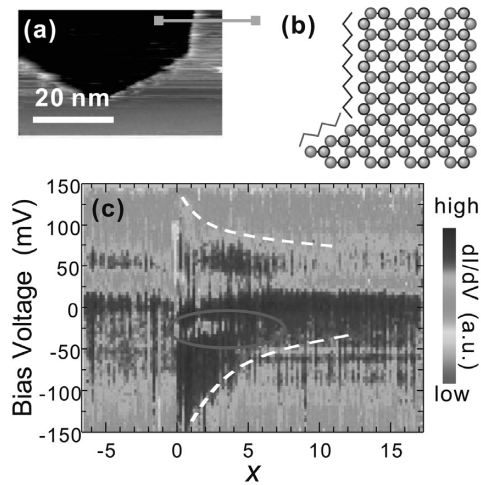


図 4.3.3: グラファイト表面に作成したナノピットのジグザグ端の STM 像 (a) と、その原子配列 (b)。 (c) ジグザグ端を垂直に横断する直線 ((a) の緑線: x 軸) 上で測定した微分トンネルコンダクタンス (局所状態密度に比例) のカラーマッピング。赤丸はジグザグ端に局在した電子状態 (zz-ES) で、ランダウ準位 (LL; 右側の明るい横縞) は白い破線領域より端に近づくにつれて減衰する。横軸はエッジの位置をゼロとした。

での CNT 伝導特性を調べている。CNT ロープは 10 本程度の CNT の束で、ロープ同士の連結点間距離は数百 nm である。また、最近、CNT 内部に 1 次元硫黄鎖を内包した試料 (S@CNT) で、硫黄鎖が金属的な振る舞いをすることが報告された。バルクの硫黄は、90 GPa 以上の超高压下で金属化し、17 K 以下で超伝導転移することが知られている。CNT 中でも似たような現象が起きないかも興味深い。

図 4.3.4(a) は外径 1.4 nm の金属型の単層 (SW) および 2 層 (DW) CNT からなる buckypaper 試料の抵抗率の温度依存性である。2 層 CNT は、 $2 \leq T \leq 100$ K の広い範囲で TLL 特有の $\rho \propto T^{-\alpha}$ の温度依存性を示し、その冪 $\alpha = 0.23 \pm 0.03$ は CNT に電極がバルク接触したときの理論値 (0.24) に非常に近い。2 K 以下でこの冪乗則から正方向にずれるのは、不純物による弱局在効果と考えられ、実際、同じ温度域では負の磁気抵抗が観測される (図 4.3.4(b))。さらに、希釈冷凍機を使った $T = 14$ mK までの測定では、弱局在効果特有の温度の対数に比例する振る舞いが見られた。なお、最低温度まで超伝導や電荷密度波など相転移の兆候は観測されていない。一方、単層 CNT 試料の抵抗率は単一の冪乗則よりずっと大きな温度依存性を示し、 $1 \leq T \leq 20$ K の狭い温度範囲であるが、3 次元 variable range hopping (VRH) に近い温度依存性をもつ。さらに、VRH から期待される大きな正の磁気抵抗効果も観測されている (図 4.3.4(b))。こうした 2 層と単層の大きな違いが何に由来するかをいま検討している。なお、硫黄を内包

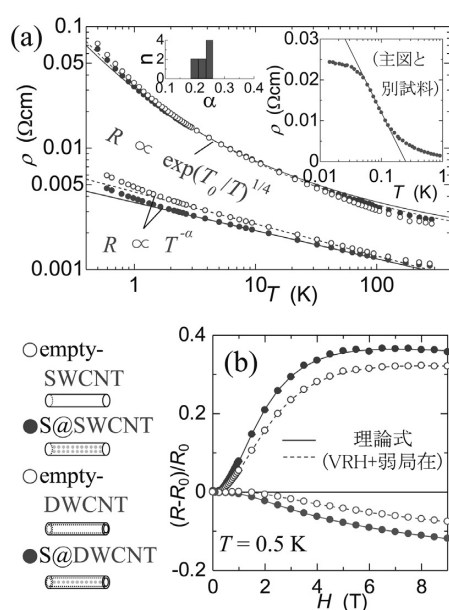


図 4.3.4: 硫黄原子鎖有 (●)/無 (○) の単層 (赤)/2 層 (青)CNT からなる buckypaper のゼロ磁場における抵抗率の温度依存性 (a) と、 $T = 0.5$ K での抵抗変化率の磁場依存性 (b)。2 層 CNT では硫黄原子鎖の有無に関わらず TLL 特有の $\rho \propto T^{-\alpha}$ の温度依存性が観測されるが、(a) 左側のインセットは、このときの α 値のヒストグラム。右側のインセットは硫黄原子鎖を内包した単層 CNT-buckypaper の $T = 14$ mK に至る抵抗率の温度依存性。

させた試料 (S@CNT) に、大きな伝導特性の差は見られなかった。本研究で用いた buckypaper 試料は、信州大学の金子教授と藤森准教授のグループより提供頂いた。

<受賞>

- [1] 佐藤 秀樹: ベストポスターアワード、第 7 回 低温センター 研究交流会、(東京大学、2016 年 2 月 23 日)

<報文>

(学位論文)

- [2] 佐藤 秀樹: グラファイト表面へのジグザグ端の作成とその STM/S 観測 (Fabrication and STM/S studies of zigzag edges at graphite surfaces) (修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [3] Tomohiro Matsui, Hideki Sato, Hiroshi Fukuyama: STS Studies of Zigzag Edge State and Quantum-Hall Edge States at Graphite Surfaces, Physics of

bulk-edge correspondence & its universality - From solid state physics to cold atoms, (Otsuka, Univ. of Tsukuba, Sep. 27-29, 2015).

招待講演

- [4] Hiroshi Fukuyama: Two-Dimensional Quantum Materials Physisorbed on Graphite, Grand Challenges in Quantum Fluids and Solids Workshop, (Univ. of Buffalo, USA, Aug. 7-9, 2015).
- [5] Masahiro Kamada, Ryuji Nakamura, Sachiko Nakamura, Ryo Toda, Tomohiro Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Novel Features of the Quantum Spin Liquid State in 2D Solid ^3He , The international symposium on Quantum Fluid and Solids (QFS2015), (Niagara Falls, USA, Aug. 9-15, 2015).
- [6] Hiroshi Fukuyama: Two-Dimensional Quantum Materials Physisorbed on Graphite, Physics of Interfaces and Layered Structures, (Stockholm, Sweden, Aug. 24-Sept. 11, 2015).
- [7] Tomohiro Matsui, Hideki Sato, Hiroshi Fukuyama: STS Studies of Zigzag Edge State and Quantum-Hall Edge States at Graphite Surfaces, Tsinghua-UTokyo Workshop on Recent topics in Materials Physics, Science and Engineering, (Hongo, The Univ. of Tokyo, March 9-11, 2016).
- [8] Hiroshi Fukuyama: Quantum Liquid, Solid and Liquid-crystal Phases of Helium in Two-dimensions, Exploring Extreme Forms of Matter, (Hongo, The Univ. of Tokyo, March 14, 2016).

(国内会議)

一般講演

- [9] 中山 和貴、杉本 宗太郎、戸田 亮、松井 朋裕、藤森 利彦、金子 克美、福山 寛: 1 次元硫黄鎖を内包するカーボンナノチューブの低温伝導特性、日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大、2015 年 9 月 16-19 日).
- [10] 中村 龍司、鎌田 雅博、松井 朋裕、福山 寛: 2 次元整合固体 ^3He の量子スピン液体状態、日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大、2015 年 9 月 16-19 日).
- [11] 鎌田 雅博、中村 龍司、松井 朋裕、福山 寛: 水素膜上 2 次元ヘリウム 3 の磁気相図、日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大、2015 年 9 月 16-19 日).
- [12] 鎌田 雅博、中村 龍司、松井 朋裕、福山 寛: 2 次元ヘリウム 3 の新奇な量子状態、第 7 回 低温センター 研究交流会 (東京大学、2016 年 2 月 23 日).
- [13] 中山 和貴、戸田 亮、松井 朋裕、藤森 利彦、金子 克美、福山 寛: 金属型単層・二層カーボンナノチューブの低温電気伝導特性、第 7 回 低温センター 研究交流会 (東京大学、2016 年 2 月 23 日).
- [14] 佐藤 秀樹、松井 朋裕、福山 寛: グラファイト表面における量子ホール端状態と磁場中ジグザグ端状態の STS 観測、第 7 回 低温センター 研究交流会 (東京大学、2016 年 2 月 23 日).

- [15] 松井 朋裕、佐藤 秀樹、福山 寛：グラフェンにおける量子ホール端状態と磁場中ジグザグ端状態の STS 観測、日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大学、2016 年 3 月 19-22 日)。
- [16] 中村 龍司、鎌田 雅博、松井 朋裕、福山 寛：水素膜上 2 次元ヘリウム 3 の量子相図、日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大学、2016 年 3 月 19-22 日)。
- [17] 中村 祥子、福山 寛：2 次元ヘリウムの整合局在に対する同位体効果、日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大学、2016 年 3 月 19-22 日)。

招待講演

- [18] 福山 寛：低温ブツリガクと医療、第 115 回 日本外科学会定期学術集会、(名古屋国際会議場、2015 年 4 月 16-17 日)。

4.4 岡本 研究室

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

4.4.1 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、整数量子ホール効果などの現象が観測されている。

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による研究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。本年度は枅富が主体となり走査トンネル分光顕微鏡 (STM/STS) と電気伝導測定を同時に行える装置を用いて、鉄原子により誘起された 2 次元電子系の研究を行った。

図 4.4.1(a) に InSb 劈開表面に鉄原子を 0.01 原子層 (ML) 蒸着したときの STM 像を示す。急冷蒸着

を行っているため、クラスターなどは形成されず、鉄原子がランダムに分布していることがわかる。鉄原子はドナーとなり InSb 表面に電子を供給し、2 次元電子系を形成する。図 4.4.1(b) にその 2 次元電子系における縦抵抗率とホール抵抗の磁場依存性を示す。ホール係数から見積もられる電子密度は $8.2 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ である。これを STM 像から得られた鉄原子の原子密度と比較することにより、全鉄原子の 10% 程度が電子を InSb 表面に供給していることがわかる。また、この 2 次元電子系におけるゼロ磁場の電気抵抗率から求めた電子移動度は $11 \text{ m}^2/\text{Vs}$ 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。これはドナー (鉄原子) の低い電離確率によりポテンシャルの平均化が起こっているためだと考えている。一方、Shubnikov-de Haas 振動の減衰から求められる電子移動度は $1 \text{ m}^2/\text{Vs}$ 程度であり、前者より一桁程度小さい値になっている。縦抵抗を見ると、低磁場から明瞭な Shubnikov-de Haas 振動が観測され、6 T を超える磁場領域において量子ホール状態が実現されている。この系では 2 つのサブバンドが伝導に寄与しており、8.5 T 近傍で見られる $i = 4$ の量子ホール状態は第一サブバンドが $i = 3$ 、第二サブバンドが $i = 1$ のスピン分離に起因する量子ホール状態である。

次にゼロ磁場と磁場中における微分コンダクタンスの測定結果 (図 4.4.2(a)-(e)) および最低ランダウ準位から求めたゼーマンエネルギーの磁場依存性 (図 4.4.2(f)) を示す。図 4.4.2 に示されている微分コンダクタンスは $100 \times 100 \text{ nm}^2$ の領域を 100 点に分割して測定した値を平均化して得たものであり、誘起された 2 次元電子系の状態密度を表していると考えられる。ゼロ磁場のスペクトル (図 4.4.2(a)) においては明瞭な立ち上がりが見られる。これは第一サブバンドのバンド端 (E_1) に相当する。また、第二サブバンドのバンド端 (E_2) は磁場中 (14 T) の測定から求められたものである。磁場中の測定ではスピン分離を伴ったランダウ準位が観測されている。最低ランダウ準位におけるスピン分離の間隔から求められるランダウの g 因子は 34 であり (図 4.4.2(f))、バルクの InSb のそれ ($|g| = 51$) と若干違いが見られた。これはバンドの非放物線性による寄与が原因である。また、図 4.4.2 のランダウ準位のボケ幅から見積もられる不規則ポテンシャルの大きさは 10 meV 程度であり、Shubnikov-de Haas 振動から見積もられるそれと良い一致を示すことがわかった。

図 4.4.3 に奇数のランダウ準位充填率 ($\nu = 1$) がフェルミレベルに位置する微分コンダクタンスの測定結果を示す。最低ランダウ準位のスピン分離幅は 33 meV 程度であり、図 4.4.2 から得られた g 因子 ($g = 34$) から推測されるスピン分離幅 18 meV に比べると、15 meV 程度増強されていると考えられる。さらに、この増強されたスピン分離幅は平均場近似を用いた交換増強効果の計算と良い一致を示すことがわかった。このことは STS を用いた微分コンダクタンスの測定により交換相互作用によるスピン分離の増強を定量的に評価できることを示している。

次に、図 4.4.1(b) に示した 8.5 T における $i = 4$ の量子ホール状態を考える。この状態は第一サブバンドが $i = 3$ 、第二サブバンドが $i = 1$ のスピン分

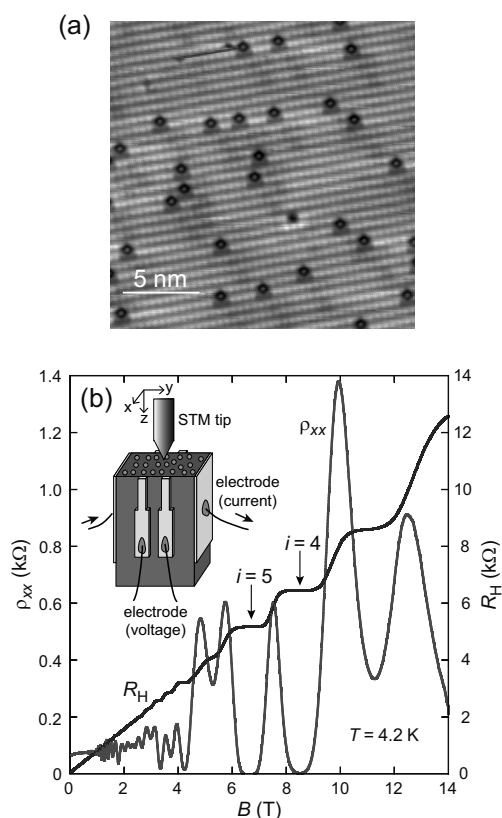


図 4.4.1: (a) InSb 劈開表面に鉄を 0.01 ML つけた場合の STM 像 ($20 \times 20 \text{ nm}^2$)。黒い輪郭を持った丸が Fe であり、明るい縞模様が Sb の格子である。(b) 4.2 K における縦抵抗率とホール抵抗の磁場依存性。

離に起因する量子ホール状態であるが、第二サブバンドは高磁場領域においては電気伝導に寄与していないと考えられるので、第一サブバンドの $i=3$ のみを考える。この量子ホール状態においても一体のゼーマン分裂に加えて、多体効果によるスピン分離幅の増大が期待される。上述の平均場近似を用いた計算よりその増強効果は 9.2 meV 程度であり、一体のゼーマン分裂を加えた合計のスピン分離幅は、微分コンダクタンスもしくは Shubnikov-de Haas 振動から得られる不規則ポテンシャルの 3 倍程度になると見積もられる。このことから、鉄が誘起する 2 次元電子系においてスピン分離の交換増強がランダウ準位充填率が奇数の量子ホール状態の実現に重要な役割を果たしていることが示唆される。

図 4.4.4 にフェルミレベル (E_F) 近傍における微分コンダクタンスの異常 (窪み) の磁場依存性を示す。この異常は電子相関と乱れに起因するクーロンギャップであると推測している。一般的にクーロンギャップは磁場を印加すると同在効果が強くなりギャップが大きくなる傾向にある。しかしながら、本研究で観測されたクーロンギャップは磁場の増加とともに減少し、8 T 以上の高磁場領域では金属的な振舞いを

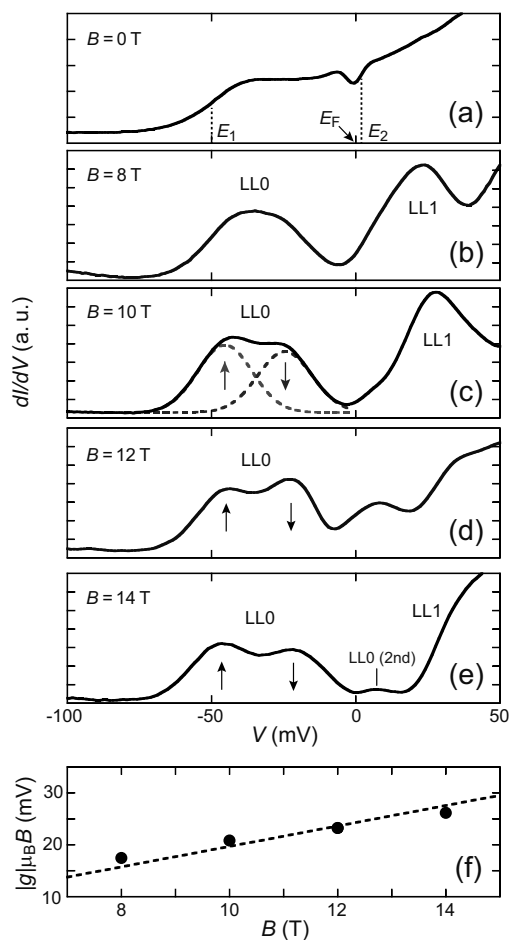


図 4.4.2: (a)-(e) 各磁場における空間的に平均化された微分コンダクタンス。(f) 最低ランダウ準位から見積もられるゼーマンエネルギーの磁場依存性。

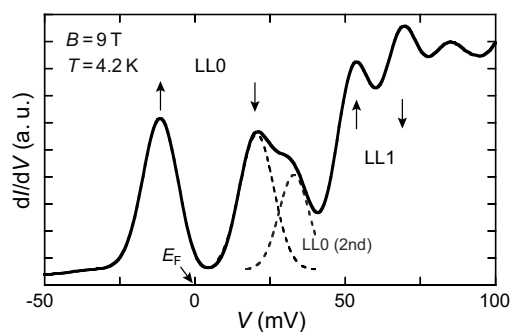


図 4.4.3: ランダウ準位充填率 $\nu = 1$ がフェルミレベルに位置する微分コンダクタンス。交換相互作用によりゼーマンエネルギーが増強されている。

示している。この異常な電子状態を明らかにするた

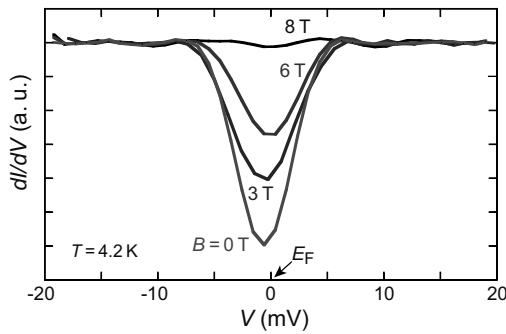


図 4.4.4: クーロンギャップの磁場依存性。

めには詳細な追実験が必要であり、今後の研究課題である。また、本研究に用いている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 (4.2 K)・高磁場 (14 T) 環境下において STM/STS 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。今後、この装置を単原子層の磁性や超伝導の研究に応用することも視野に入れている。

4.4.2 金属超薄膜の超伝導

近年、GaAs 絶縁基板の劈開表面上に形成された金属超薄膜に対する研究を行ってきた。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、空間反転対称性の破れによって生じる 2 次元面に対する垂直方向のポテンシャル勾配が原子スピン軌道相互作用との結合することによって、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ヘリカル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。

しかしながら、現時点までの測定においては、通常の BCS 状態とは異なる状態が実現されていることの直接的な実験証拠を得たとは言い難い。本年度は、2 通りのアプローチで、Pb および In 超伝導薄膜の空間反転対称性の制御を試み、ポテンシャル勾配の重要性の検証を行った。

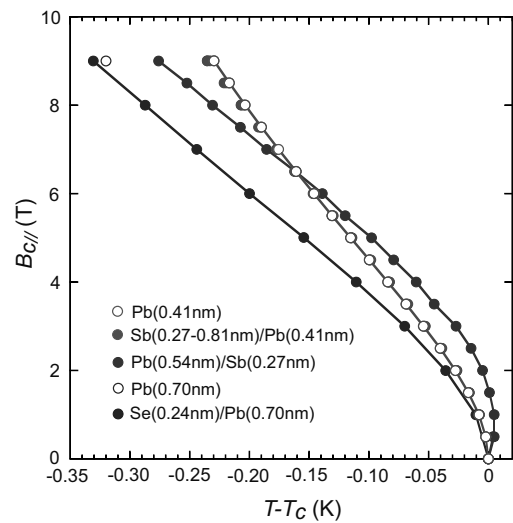


図 4.4.5: 膜厚が異なる Pb 超薄膜の上に Sb と Se を蒸着した場合の面内臨界磁場の温度依存性。

吸着物質を用いた空間反転対称性の制御

竹内が中心となり、吸着物質を用いてポテンシャル勾配を変化させる実験を行い、空間反転対称性の破れの制御を試みた。

図 4.4.5 に厚みの異なる Pb 超薄膜に吸着物質を用いた場合の面内臨界磁場の温度依存性を示す。吸着物質には電気抵抗率が著しく異なる Sb と Se を用いた。本研究に用いた温度計は磁場中での詳細な校正が行われていないため、定量的な議論はできないが、すべての膜厚の Pb 超薄膜において面内臨界磁場の増大が見られた。しかしながら、吸着物質を用いた場合と用いない場合では面内臨界磁場の温度依存性に違いが見られなかった。このことは吸着物質を用いた本実験において期待していた 2 次元面に対して垂直方向のポテンシャル勾配を変化させることができなかったか、もしくはそもそも空間反転対称性の破れが Pb 超薄膜における面内臨界磁場の増大に関係していない可能性を示唆している。

次に層間物質に Sb と Se を用いた Pb 超薄膜の 2 層系における面内臨界磁場の温度依存性を示す (図 4.4.6)。0.81 nm の Sb を 0.41 nm の Pb 超薄膜で挟んだ二層系 (Pb(0.41nm)/Sb(0.81nm)/Pb(0.41nm)) においては、Pb の一層系で観測されていた臨界磁場の増大 (図 4.4.5) が抑制されることがわかった。典型的にはこの系は各層における Pb の超伝導が弱く結合した弱結合系として理解できる。一方、面内臨界磁場増大の抑制が空間反転対称性の破れの大きさの変化によるものだとも考えられる。現時点においては多方面から実験的・理論的アプローチが必要であるが、空間反転対称性が破れた 2 次元超伝導状態の理解に繋がる可能性がある。

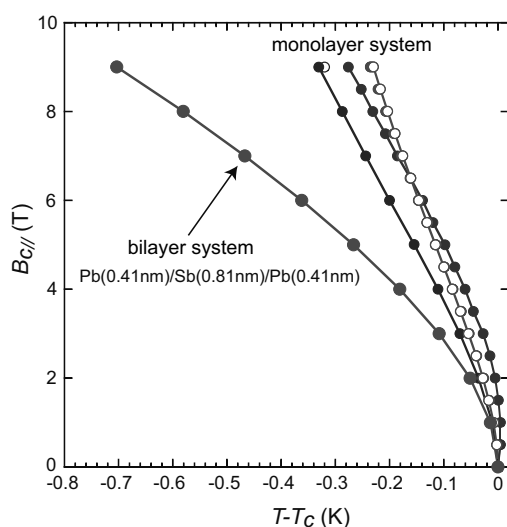


図 4.4.6: 層間物質に Sb もしくは Se を用いた Pb 超薄膜二層系と Pb 超薄膜一層系の面内臨界磁場の比較。一層系における凡例は図 4.4.5 と同じ。

膜厚変化による空間反転対称性の制御

伊藤が中心となり、単原子層から膜厚を増やしていくことによりポテンシャル勾配の大きさを変えて、Rashba スピン分裂の大きさを制御することをめざした。

図 4.4.7(a) に Pb 超薄膜の超伝導転移温度 T_c の面内磁場依存性の測定結果を示す。膜厚の増加に伴い面内磁場による T_c の減少が大きくなっているが、軌道効果による T_c の変化の計算値も同程度であり、現時点では、ポテンシャル勾配の低下により Rashba 効果が弱められたことによるものと断定することはできない。3.0 nm の試料においても、Pauli 限界 (12 T 程度) よりも臨界磁場は高いと予想され、Rashba 効果の影響は強く残っていると思われる。また、基板は異なるものの膜厚が同程度 (~2 nm) の Pb 薄膜において、 T_c が面内磁場によって上昇することが報告されていたが (Gardner *et al.*, Nat. Phys. **7**, 895 (2011))、より良質の薄膜が得られる我々の系では観測されなかった。

図 4.4.7(b) に In 超薄膜に対する結果を示す。単原子層膜に対する関原らの測定では、Pauli 限界から生じる変化よりは小さいものの、Pb 単原子層膜の場合よりも一桁程度大きな T_c の面内磁場依存性が観測されており、原子スピン軌道相互作用の大きさが Pb よりも小さいことによる結果として説明されている。今回、膜厚を増やして測定を行ったところ、 T_c の面内磁場依存性に大きな違いが見られなかった。常伝導状態のシート抵抗値やそれより見積られる弾性散乱時間、また無磁場での超伝導転移温度などの物理量は膜厚に対して大きく変化しており、現時点では、 T_c の面内磁場による変化の大きさだけが膜厚に対して鈍感である理由はわかっていない。

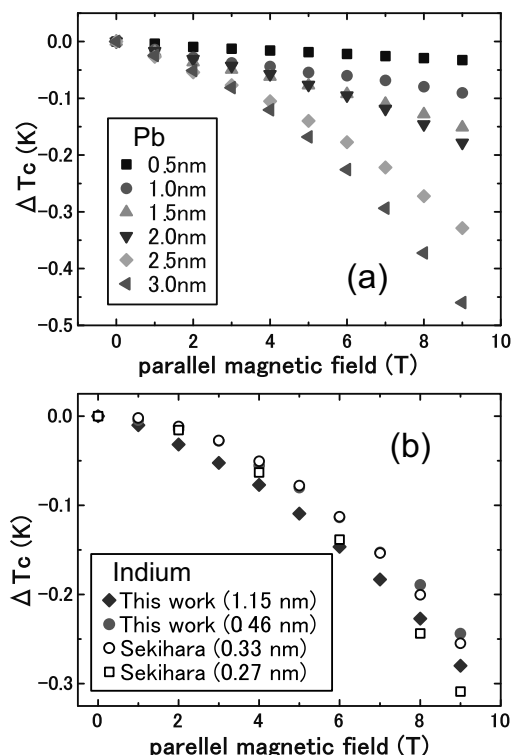


図 4.4.7: 異なる膜厚に対する超伝導転移温度の面内磁場依存性。(a) が Pb、(b) が In の超薄膜に対する測定結果。

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Sekihara, T. Miyake, R. Masutomi, and T. Okamoto: Effect of Parallel magnetic field on superconductivity of ultrathin metal films grown on a cleaved GaAs surface, Journal of the Physical Society of Japan **88**, 064710 (2015).
- [2] R. Masutomi, and T. Okamoto: Adsorbate-induced quantum Hall system probed by scanning tunneling spectroscopy combined with transport measurements, Appl. Phys. Lett. **106**, 251602 (2015) (selected as Editor's Picks).

(学位論文)

- [3] 伊藤大記: 「GaAs 劈開表面上に形成した Pb 超伝導薄膜の膜厚変化による空間反転対称性の制御」(修士論文)
- [4] 竹内伸之: 「半導体表面上に形成された単原子層鉛の超伝導における吸着物質の影響」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [5] R. Masutomi and T. Okamoto: Adsorbate-induced quantum Hall system probed by scanning tunneling spectroscopy combined with transport measurements, 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Sendai, Japan), July 26-31, 2015.

招待講演

- [6] R. Masutomi: Adsorbate-induced quantum Hall system probed by scanning tunneling spectroscopy combined with transport measurements, EMN Spring Meeting (Taipei, Taiwan), March 8-11, 2016.

(国内会議)

一般講演

- [7] 枅富龍一、岡本徹: Adsorbate-induced quantum Hall system probed by scanning tunneling spectroscopy combined with transport measurements、第7回低温センター研究交流会(東京大学武田ホール)2016年2月23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様々な固体物質を対象に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、低エネルギー領域(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、その動的応答から電子相関の性質の解明し、光による量子凝縮相の実現や量子制御を行うことを目的として研究を行っている。このために、可視光領域(eV)から低エネルギー(meV)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は、互いにクーロン相互作用する正負の荷電粒子集団というシンプルな成り立ちでありながら、その性質・振る舞いは本質的に多体問題であり、凝縮系に普遍的な多くの物理を内包する。例えば電子正孔対はその密度、温度に依存して励起子ガス、電子正孔プラズマ、電子正孔液体といった多彩な相を示す。特に密度の増加に伴う絶縁的な励起子相から金属的な電子正孔プラズマ相への移行は励起子モット転移と呼ばれ、クーロン相関の変化による絶縁体金属転移として、基礎的・応用的な観点から長く研究されてきた。電子正孔の対相関という観点から見れば、低密度極限の励起子相は強結合領域である一方、高密度の電子正孔プラズマは弱結合領域であり、励起子モット

転移は極低温の電子正孔系において長く探求されている励起子ボース-アインシュタイン凝縮(BEC)と電子正孔BCS状態(励起子絶縁体とも呼ばれる)とのクロスオーバー問題と直接繋がっていることがわかる。励起子モット転移の研究には長い歴史があるが、モット転移密度近傍の中間密度領域では、電子相関の効果を理論的に正確に扱うことは難しく、実験的にも励起子がどのように遮蔽されて金属相に至るのかは明らかになっていなかった。そこで我々はこの問題に、テラヘルツ分光法という新たな手法で取り組んできた。多くの半導体では、励起子の束縛エネルギーやモット転移密度近傍での電子正孔プラズマのプラズマ周波数といった特徴的なエネルギーはmeV程度の低エネルギー帯=テラヘルツ帯にあり、テラヘルツ分光を用いればこれら低エネルギー領域の電子相関の効果をピコ秒スケールで時間分解して測定することができる。この手法により、電子正孔系の研究は近年新たな展開を迎えている。本年度は、以下の研究を進めた。

励起子共鳴励起でのモット転移

これまで我々のグループでは、間接遷移型半導体であるSiやGeを用いて、主に有限温度の準熱平衡状態における励起子モット転移を観測・議論してきた。そこでの励起子モット転移は実際には連続的なクロスオーバーとして観測された。一方、極低温での励起子モット転移の性質は未だ明らかになっていない興味深い問題である。かつてランダウやモット自身が指摘したように、長距離のクーロン相関が働く系では(電子正孔気体のような連続自由度の系であっても)モット転移は低温で1次相転移になる可能性があり、その後も様々な議論がなされてきたが、高密度に光励起した電子正孔系を極低温にすることが困難で、未解明な基本問題の一つであった。ここで我々は、直接遷移型半導体の場合には励起子を光で共鳴的に生成することにより初期条件として実効的に極低温の励起子相を生成することに注目した。この共鳴的に光励起された初期励起子状態はイオン化率が0の励起子気体である(熱平衡でこれを実現しようとするれば励起子イオン化エネルギーよりも十分極低温の状態にする必要があるが、高密度領域ではそれは通常困難である)。この励起方法で密度を増加させた場合の励起子モット転移は、有限温度・熱平衡の場合と異なる性質を持つことが期待される。この励起子共鳴励起による励起子モット転移を詳しく調べるために、我々は直接遷移型半導体GaAsを対象として実験を行った。

本研究では、電子正孔相関の効果を実験的に抽出する手法として、光ポンプ-テラヘルツプローブ分光法を用いた。バルクGaAsの励起子は束縛エネルギーが4meV(~1THz)程度と小さく、励起子がテラヘルツ波パルス電場によって容易にイオン化してしまう。これを避けるためにはテラヘルツプローブパルスの電場を十分弱くする必要がある。逆に、プローブパルスの電場が強いと、測定により得られる誘電関数は、励起子がイオン化してできた相関のない自由な電子正孔気体を反映したドルーデ型に変化する

様子が観測された。この弱/強電場極限の2つのテラヘルツプローブにより得られたスペクトルの違いを比較することで、誘電関数、光学伝導度スペクトルに現れる電子正孔相関の効果を敏感に抽出する手法を考案した。

この手法を用いて励起子共鳴励起でのモット転移を観測した結果、モット転移密度を超えた高密度領域において、電子相関の強い異常金属相(これを以下CM相:Correlated Metalと呼ぶ)が過渡的に現れることがわかった。CM相のテラヘルツ帯光学伝導度は、相関のない自由な電子正孔系が示すドルーデ型のスペクトルに比べて低周波数側のスペクトル重みが抑制され高周波側に移動した形状を示した。拡張ドルーデモデルを用いた解析でも、質量増強因子や散乱率に、異常金属特有の周波数依存性が現れた。さらに、格子温度を上げるとCM相が消失することがわかり、これは光学フォノン吸収による電子正孔系の加熱によって極低温でしか現れないCM相が不安定化したものと解釈された。以上より、CM相は、励起子モット転移密度近傍で極低温でのみ現れる電子正孔相関の強い異常金属状態であると結論した。さらに、光励起後のスペクトルの時間発展から、CM相の形成・消失ダイナミクスを調べた。その結果、CM相はモット転移密度近傍から形成され始め、高密度になるほどその形成は早くなり、一端形成した後は熱化して消失することが分かった。さらに、その形成ダイナミクスには有限の潜伏時間が観測され、過飽和の励起子気体から1次転移的にCM相に変化している可能性が示唆された。このCM相の微視的な機構はまだ明らかになっていないが、電子正孔BCS状態の前駆現象である可能性や、モット転移が1次転移性を帯びたことで空間的に不均一な電子状態が実現している可能性などを考えている。いずれの場合でも、極低温の高密度電子正孔系を実現し、その電子相関の特徴をテラヘルツ分光を用いて調べることで、長年議論されてきた励起子モット転移の本質的な性質を実験的に捉えることができたと考えられる。

4.5.2 超伝導体の光励起非平衡ダイナミクス

我々はこれまでに非線形光学結晶 LiNbO_3 を用いてフェムト秒光パルスから高電場強度テラヘルツ波パルスを発生せることに成功し、テラヘルツ波パルスによる物質相制御の研究を行ってきた。そしてこの開発した光源を用いて、s波超伝導体 $\text{Nb}_{1-x}\text{Ti}_x\text{N}$ のヒッグスモードの観測に成功したことをこれまでに報告してきた。

ヒッグスモードとは、対称性の自発的な破れに伴って生じる、秩序パラメーター Δ の振幅の揺らぎに相当する集団励起モードである。超伝導のヒッグスモードは、線形応答の範囲では電磁場と直接結合しないために、これまで電荷密度波と共存する特殊な系を除いて観測されていなかった。我々はモノサイクル高強度テラヘルツパルスによる非断熱的励起という手法を開発し、初めてこの観測に成功した。さらに昨年度は、超伝導ギャップ以下の周波数を持つ狭帯域マ

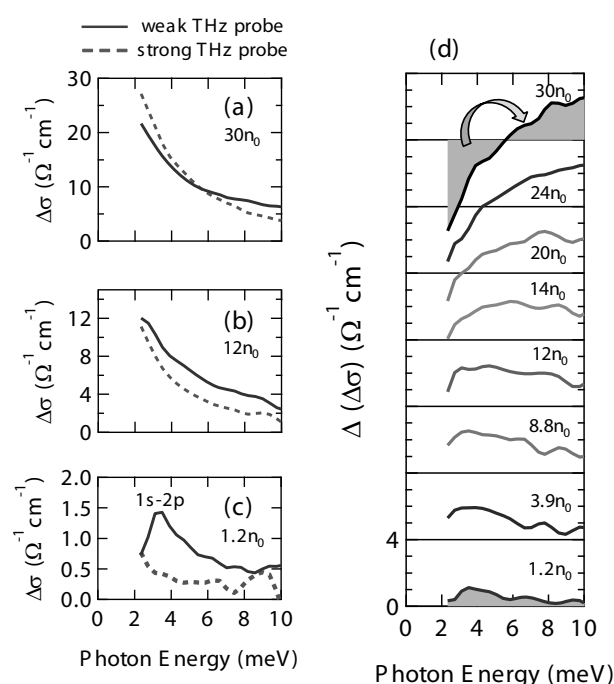


図 4.5.1: 励起子共鳴励起後 10 ps における、(a),(b),(c): 弱/強電場プローブそれぞれで測定された光学伝導度と、(d): それらの差分伝導度の密度依存性。 $n_0 = 1.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 。低密度では励起子 1s-2p 遷移共鳴が、高密度では相関金属の特徴である低エネルギー側から高エネルギー側へのスペクトルウェイトの移行が現れている。

ルチサイクルテラヘルツパルスを用いることで、非線形応答領域ではテラヘルツ電磁場とヒッグスモードが強く結合し、秩序パラメーターを強制振動させること、さらにその非線形応答の結果巨大な第三高調波が発生することを報告した。

本年度は、銅酸化物高温超伝導体やマルチギャップ超伝導体に対して高強度テラヘルツパルスを照射し、その非線形応答を時間分解測定することで集団励起の振る舞いを明らかにすることを目的に研究を進めた。

マルチギャップ超伝導体におけるヒッグスモード

自発的に対称性の破れた一般的な系では、ヒッグスモードが存在するとはいえ、安定なモードとして検出可能かどうかは自明ではない。それは秩序パラメーターの位相の揺らぎに相当するもう1つの集団励起モード、いわゆる南部-ゴールドストーンモードが長波長極限ではゼロエネルギーで存在しており、有限のエネルギーを持つヒッグスモードから南部-ゴールドストーンモードへのエネルギー緩和が素早く起

このためである。超伝導においてヒッグスモードが安定に存在するのは、長距離クーロン相互作用によってアンダーソンヒッグス機構が働くことが起因している。この機構により南部-ゴールドストーンモードが遥かに高エネルギー側へと持ち上げられ、素励起の中ではヒッグスモードが最低エネルギーの励起となり、寿命が長くなる。

では超伝導秩序パラメーターが複数存在するような、マルチギャップ超伝導体ではどうなるだろうか。MgB₂ はフォノン媒介型の超伝導体としては常圧で最も高い転移温度(約 39 K)を示し、2次元的な σ バンドと3次元的な π バンドからなる2つのギャップを持つ超伝導体として知られている。2つの秩序パラメーターが存在する場合、それぞれの振幅と位相の揺らぎに対応して、2つのヒッグスモードと2つの南部-ゴールドストーンモードが現れる。アンダーソン-ヒッグス機構によって2つの位相の和に相当するモードは高エネルギー側へ移るが、相対位相の振動モード、いわゆるレゲットモードは低エネルギー領域に残る。このとき高エネルギー側のヒッグスモード、低エネルギー側のヒッグスモード、そしてレゲットモードがどのような性質を持ち、電磁場とどのように相互作用するのかはほとんど明らかにされていない。

我々は MgB₂ に対して狭帯域化した高強度テラヘルツパルス照射し、非線形透過スペクトルから第三高調波信号を明瞭に観測することに成功した。温度を変化させて超伝導ギャップの大きさを変えながら実験を行い、第三高調波強度の温度依存性を詳細に調べた。その結果、入射テラヘルツ電場の周波数の2倍と、高エネルギー側の σ バンドのヒッグスモードのエネルギーが一致したときに非線形共鳴が生じ、最大の第三高調波が得られることがわかった。一方で、低エネルギー側の π バンドのヒッグスモードの共鳴に由来する第三高調波はほとんど観測されることがわかった。

緩和チャンネルがなく安定になるはずの最低エネルギーの π バンドのヒッグスモードが観測されないという、一見予想に反する結果が得られたが、これはごく最近なされた2バンドの連立ギャップ方程式に基づいた理論計算(本物理学教室 青木研究室)の結果とも整合することがわかった。2つの超流動凝縮成分が存在して2つの秩序パラメーターが存在するとき、バンド間相互作用がなければ2つのヒッグスモードは互いに独立に振る舞うが、バンド間相互作用が十分強い場合には、大きい超流動成分が支配的になって全体で1つの超流動密度のように振る舞う。このとき小さい超流動成分のヒッグスモードの振幅も小さくなり、第三高調波も非常に弱くなることが理論計算で示され、実験と理論が定性的には合致していることがわかった。

銅酸化物高温超伝導体におけるヒッグスモード

さらに d 波のペアリング対称性を持つ銅酸化物超伝導体の性質に着目し、最適ドーピング濃度のバルク YBa₂Cu₃O_{7- δ} 結晶に対しても高強度テラヘルツ

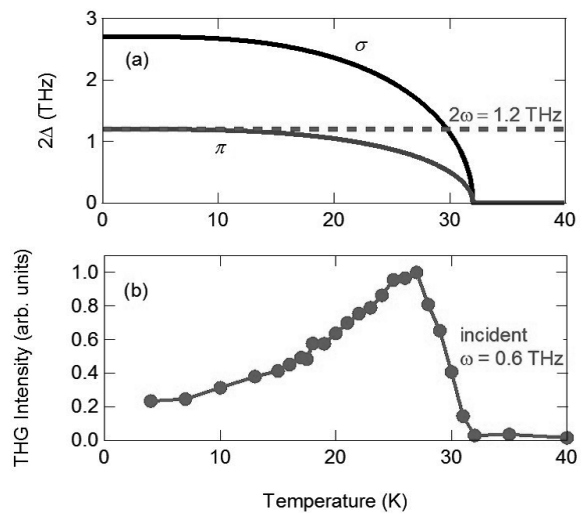


図 4.5.2: (a) BCS 理論から予想される MgB₂ の σ バンドおよび π バンドの超伝導ギャップエネルギーの温度依存性。点線は入射波の周波数 $\omega = 0.6$ THz の 2 倍を表しており、交点がヒッグスモードの共鳴条件を表している。(b) 周波数 $\omega = 0.6$ THz の入射波に対して観測された第三高調波の強度の温度依存性。

起実験を行った。銅酸化物高温超伝導体では d 波対称性に由来してヒッグスモードがいくつかの種類に分裂することが理論的に予測されているが、実験で検証した例はいまだにない。さらに s 波超伝導体と異なりギャップにノードがあるために、ヒッグスモードから個別励起モードへの強い緩和が生じることが予測され、ヒッグスモードの不安定化の要因になることも考えられるため、これまで実験による観測は報告されていない。

我々は高強度テラヘルツポンパルス照射を結晶に照射し、可視光反射を通してプローブすることで、高強度テラヘルツ振動電場照射中および照射後の非平衡ダイナミクスを調べる実験を行った。

その結果、超伝導転移温度以下でテラヘルツ波パルス照射中に波形の 2 乗に追従したコヒーレントな非線形信号が現れること、一方で転移温度近傍ではポンパルス通過後も残存するインコヒーレントな信号が現れることが分かった。この転移温度近傍で観測されたインコヒーレント信号は高強度テラヘルツ波によって準粒子励起が起きたものと考えられる。一方で転移温度以下で発達するコヒーレントな応答は、超伝導秩序パラメーターの変化を直接反映したものである可能性が高いと考えられる。今後は高強度テラヘルツ波パルス照射中の超伝導体のダイナミクスをテラヘルツ帯域でプローブする光学系を構築し、より直接的に超伝導秩序を反映する低エネルギー応答の測定によってその振る舞いをさらに明らかにしていく。

光励起非平衡状態におけるジョセフソンプラズマ

超伝導におけるもう一つの集団励起モードである位相モードは、アンダーソン-ヒッグス機構によって高エネルギー側のプラズマ振動として現れる。しかし2次元超伝導面が c 軸方向に層状に連なった銅酸化物高温超伝導体では、 c 軸方向の超伝導の磁場侵入長の長さを反映して、プラズマ振動が遠赤外の低エネルギー領域に現れる。これは2次元超伝導面間のジョセフソン結合として理解することができ、超伝導転移のコヒーレンスを如実に反映したものとしてその振る舞いが盛んに研究されてきた。最近では転移温度以上における超伝導揺らぎについても大きく注目されている。我々は光励起後のジョセフソンプラズマの振る舞いを観測することで非平衡状態における銅酸化物超伝導の性質を調べた。近赤外のフェムト秒パルスレーザーで励起しながらテラヘルツ帯の c 軸反射率を観測すると、ジョセフソンプラズマ端が低エネルギー側にシフトし、さらに強励起すると高エネルギー側から新たなプラズマ端が現れることが分かった。これは光励起により新たな縦モードと横モードが出現したことを示唆しており、現在その解析を進めている。

4.5.3 ランダウ量子化したグラフェンの非線形光学応答

炭素原子が蜂の巣格子状に二次元配列した単層グラフェン中の電子は、その運動エネルギーが結晶運動量に比例するという特異な性質を持ち、相対論的粒子である質量ゼロ・ディラック粒子とみなすことができる。このため、単層グラフェンに垂直に磁場を印加すると、通常の二次元電子系では磁場 B に比例するサイクロトロン周波数の間隔でランダウ準位が等間隔に形成されるのとは異なり、準位間隔が $B^{1/2}$ に比例し、かつ非等間隔なディラック電子系に特徴的なランダウ準位が形成される。また、ランダウ準位間遷移の双極子モーメントは磁気長程度の距離で決定される非常に巨大な値を持つ。この大きな双極子モーメントと、ランダウ準位間隔の非等間隔性によって、ディラック電子系ではランダウ準位間エネルギーに相当するテラヘルツ帯や中赤外領域において大きな非線形光学効果が発現することが予測される。さらに、高強度テラヘルツ波パルスを用いるとラビ周波数が準位間隔程度になり、光と物質の相互作用が非摂動論的になる領域に到達できると期待される。

そこで我々はランダウ準位間遷移に起因する非線形光学応答を調べるため、 $4H$ -SiC(0001)基板上にエピタキシャル成長した単層グラフェンを対象に磁場下でのテラヘルツポンプ-テラヘルツプローブ分光を行った。また、ランダウ準位間遷移によってプローブテラヘルツ電場は偏光回転(ファラデー回転)を受けるため、ワイヤグリッド偏光子を用いた偏光測定により入射プローブ電場に対して平行、垂直な透過テラヘルツ電場成分を測定した。図4.5.3(a)に示すように、モノサイクルテラヘルツポンパルス

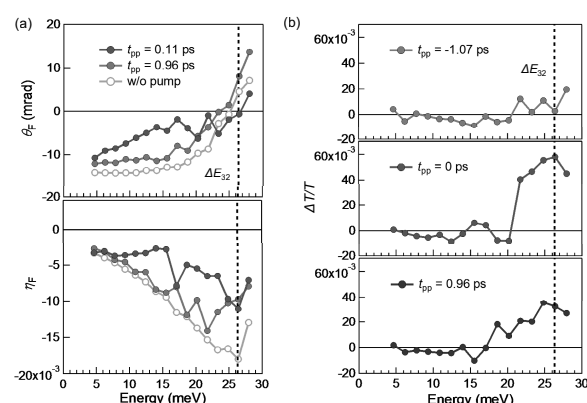


図 4.5.3: (a) 各ポンププローブ遅延時間 t_{pp} でのファラデー回転角(上)と楕円率スペクトル(下)。点線は LL_2 - LL_3 間のランダウ準位エネルギー ΔE_{32} を示す。(b) 各ポンププローブ遅延時間 t_{pp} での差分透過率スペクトル。点線は (a) と同様。

照射下ではファラデー回転角 θ_F 、楕円率 η_F 共にその大きさが減少しポンプテラヘルツ波パルスが過ぎ去ると素早く回復するという、超高速の時間変化が観測された。またこのとき、図4.5.3(b)に示した差分透過率スペクトルではテラヘルツポンパルス照射中に、 LL_2 - LL_3 間のランダウ準位間遷移に対応する周波数での吸収がほぼ消失する様子が観測された。現在、観測された超高速の非線形光学応答について、密度行列に基づく解析を行っている。

<受賞>

- [1] 島野亮、松永隆佑、辻直人、青木秀夫: 第19回超伝導科学技術賞「超伝導体中のヒッグスモードに関する開拓的実験および理論研究」(2015年4月)
- [2] 島野亮: 第32回(2015年度)井上學術賞「超伝導体のヒッグスモードの発見」(2015年12月)
- [3] 関口文哉: 平成27年度理学系研究科研究奨励賞(博士課程)(2016年3月)

<報文>

(原著論文)

- [4] Fumiya Sekiguchi and Ryo Shimano: Excitonic correlation in the Mott crossover regime in Ge, Phys. Rev. B **91**, 155202 (2015).

(学位論文)

- [5] 関口文哉: 「テラヘルツ分光による励起子モット転移近傍の電子正孔相関の研究」(博士論文)
- [6] 高山正行: 「バルク GaAs における光励起電子正孔系の非線形テラヘルツ分光」(修士論文)
- [7] 富田圭祐: 「マルチバンド超伝導体 MgB_2 におけるヒッグスモード」(修士論文)

(解説等)

- [8] 松永隆佑, 辻直人, 青木秀夫, 島野亮: 超伝導体中のヒッグスモード - 高強度テラヘルツ波による検出とヒッグス共鳴第三高調波発生、固体物理 50, 411 (2015).
- [9] 島野亮, 松永隆佑, 辻直人, 青木秀夫: 超伝導体のヒッグスモード超伝導科学技術研究会会報 FSST NEWS No.146, (2015).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] Rocco Vitalone, Keisuke Tomita, Ryusuke Matsunaga, and Ryo Shimano: Searching for Two Higgs Modes in Superconducting MgB₂ Using Terahertz Pump-Terahertz Probe Spectroscopy, SCI Summer Research Colloquium, Houston, USA, Aug. 7, 2015.
- [11] K. Tomita, Y. I. Hamada, K. Tomari, R. Matsunaga, H. Shibata, and R. Shimano: Higgs mode in a multiband superconductor MgB₂, Materials and Mechanisms of Superconductivity 2015 (M2S), Geneva, Switzerland, Aug. 23-28, 2015.
- [12] F. Sekiguchi, Changsu Kim, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, and Ryo Shimano: Emergence of anomalous metallic phase in the vicinity of exciton Mott transition in bulk GaAs, Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems, Gordon Research Conference, Lucca, Italy, Feb. 14-19, 2015.
- [13] G. Yumoto, R. Matsunaga, H. Hibino, and R. Shimano: Ultrafast terahertz nonlinearity in Landau-quantized graphene, Cooperation in Physics Workshop: LMU-UT, Tokyo, Japan, Feb. 29-Mar. 1, 2015.
- [14] Yuta Murotani, Fumiya Sekiguchi, Toshimitsu Mochizuki, Changsu Kim, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, Ken. W. West, and Ryo Shimano: Nonmonotonic thermalization of optically excited dense excitons in bulk GaAs, Cooperation in Physics Workshop: LMU-UT, Tokyo, Japan, Feb. 29-Mar. 1, 2015.
- [15] F. Sekiguchi, Changsu Kim, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, and Ryo Shimano: Emergence of correlated-metal phase around the exciton Mott transition in bulk GaAs, Cooperation in Physics Workshop: LMU-UT, Tokyo, Japan, Feb. 29-Mar. 1, 2015.
- [16] Ryo Shimano: Terahertz responses of graphene in the quantum Hall regime, MRS Spring meeting, Sanfrancisco, USA, Apr. 7, 2015.
- [17] Ryo Shimano: Higgs mode in superconductors revealed by nonlinear THz spectroscopy, CROF2015, Greece, Jul. 14, 2015.
- [18] Ryo Shimano: Quantum Faraday effect in graphene, Nanocarbon WS of PKU-UTokyo, Tokyo, Japan, Jul. 21, 2015.
- [19] Ryo Shimano: Nonlinear Terahertz Spectroscopy of Higgs Mode in Superconductors, Nonlinear Optics 2015, Hawaii, USA, Jul. 29, 2015.
- [20] Ryo Shimano: Time-resolved study of Higgs amplitude mode in s-wave superconductors, Materials and Mechanisms of Superconductivity 2015 (M2S), Geneva, Switzerland, Aug. 25, 2015.
- [21] Ryo Shimano: Higgs mode spectroscopy of conventional and unconventional superconductors, Ringberg Symposium on High Temperature Superconductivity and Correlated-Electron Systems, Munich, Germany, Oct. 15, 2015.
- [22] Ryo Shimano: Nonlinear Higgs Mode Spectroscopy of Superconductors by Intense THz Pulses, Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems, Gordon Research Conference, Lucca, Italy, Feb. 16, 2015.
- [23] Ryo Shimano: Higgs mode in superconductors, Physics Workshop: LMU-UT, Tokyo, Japan, Mar. 1, 2015.
- [24] Ryo Shimano: Time-resolved study of Higgs mode in superconductors, APS March meeting, Baltimore, USA, Mar. 17, 2015.
- (国内会議)
- 一般講演
- 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月 16-19 日、関西大学)
- [25] 湯本郷, 松永隆佑, 日比野浩樹, 島野亮: THz ポンプ-THz プロブ分光法による単層グラフェンにおける非線形ファラデー回転の観測
- [26] 富田圭祐, 濱田裕紀, 泊開人, 松永隆佑, 柴田浩行, 島野亮: マルチギャップ超伝導体 MgB₂ におけるヒッグスモード
- [27] 関口文哉, 金昌秀, 秋山英文, 望月敏光, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, 島野亮: テラヘルツ分光による高密度励起子共鳴励起下でのバルク GaAs の電子正孔状態の観測
- [28] 高山正行, 関口文哉, 松永隆佑, 望月敏光, 金昌秀, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, 島野亮: バルク GaAs におけるテラヘルツ波誘起励起子解離・再形成ダイナミクス
- 第 7 回東京大学低温センター研究交流会 (2016 年 2 月 23 日、東京大学)
- [29] 高山正行, 関口文哉, 松永隆佑, 島野亮: バルク GaAs における励起子モット転移と電子正孔異常金属相
- [30] 室谷悠太, 関口文哉, 島野亮: 光ポンプ・光プローブ分光による励起子共鳴励起下のバルク GaAs におけるモット転移の観測

招待講演

- [31] 富田圭祐, 濱田裕紀, 泊開人, 松永隆佑, 島野亮: マルチバンド超伝導体 MgB_2 におけるテラヘルツ第3高調波の観測
- [32] 泊開人, 濱田裕紀, 松永隆佑, 島野亮: 光励起非平衡状態の $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ における c 軸ジョセフソンプラズマの観測
- 日本物理学会第71回年次大会 (2016年3月19-22日 東北学院大学)
- [33] 湯本郷, 松永隆佑, 日比野浩樹, 島野亮: ランダウ量子化した単層グラフェンにおける超高速非線形テラヘルツ応答
- [34] 泊開人, 濱田裕紀, 松永隆佑, 永崎洋, 島野亮: 光励起非平衡状態における $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の c 軸ジョセフソンプラズマの観測
- [35] 室谷悠太, 関口文哉, 望月敏光, 金昌秀, 秋山英文, 望月敏光, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, 島野亮: 光ポンプ・光プローブ分光によるバルク GaAs の励起子共鳴励起におけるモット転移の観測
- [36] 関口文哉, 高山正行, 望月敏光, 金昌秀, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, 島野亮: GaAs の励起子共鳴励起によるモット転移のダイナミクスと異常金属相の出現
- その他
- [37] 島野亮, 松永隆佑: 高強度テラヘルツ波による非平衡超伝導の超高速ダイナミクスの研究, 第8回文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」シンポジウム、大阪大学、2016年1月27日
- 招待講演
- [38] 松永隆佑: 高強度テラヘルツ波による超伝導秩序パラメーター振動の実時間観測, 第53回化合物新磁性材料専門研究会、東京大学、2015年7月24日
- [39] 松永隆佑: 高強度 THz 波を用いた超伝導体の Higgs モードの研究, 第10回関東光科学若手研究会、慶応大学、2015年10月31日
- [40] 島野亮: ヒッグスモードをプローブとする超伝導体の非平衡ダイナミクス, KEK CMRC-plus 研究会「量子ビームによる銅酸化物超伝導体研究の最前線」、つくば KEK、2015年11月18日
- [41] 島野亮: グラフェンの量子ファラデー効果, 日本分光学会テラヘルツ分光部会との共催シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端 II」、作並温泉、2015年11月20日
- (セミナー)
- [42] 島野亮: 現代光物性概論, 東京大学教養学部統合自然科学・総合文化研究科関連基礎科学系 集中講義, 東京大学、2015年6月2日-4日
- [43] 島野亮: 高強度テラヘルツ波パルスを用いた物性研究, 駒場物性セミナー, 東京大学、2015年6月4日
- [44] 松永隆佑: 高強度テラヘルツ波を用いた超伝導体におけるヒッグスモードの研究, 2015年駒場夏学期物性セミナー, 東京大学、2015年7月17日

4.6 高木・北川研究室

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27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、エキゾチック半金属、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、 $J_{\text{eff}} = 1/2$ 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。 $J_{\text{eff}} = 1/2$ 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。

Ir^{4+}O_6 八面体が稜共有で隣接する場合、 $J_{\text{eff}} = 1/2$ 波動関数の複素位相項の存在により干渉効果が生じ、 Ir^{4+} 間には $\text{Ir}-\text{O}_2-\text{Ir}$ 面に垂直な方向にのみ強磁性相互作用が働く。 x, y, z 方向にのみ働く3種類の強磁性結合が3つの120結合からなるハニカム格子の上にそれぞれ置かれると3種の強磁性結合は競合し、量子計算の分野でよく知られる Kitaev 模型と等価になる。その基底状態は強磁性 RVB 状態と見なすことができる新奇な量子スピン液体状態となることが知られており、その現実物質での実現が望まれる。 Ir^{4+} がハニカム格子を形成する $\alpha\text{-A}_2\text{IrO}_3$ ($A = \text{Li}, \text{Na}$) では直交する3つの $\text{Ir}-\text{O}_2-\text{Ir}$ 面からなる120結合の実現が期待されていた。しかし実際には、 $\alpha\text{-A}_2\text{IrO}_3$ は結晶歪やその他の磁気相互作用の影響により理想的な Kitaev モデル系とはならず、反強磁性秩序を示す。そこで我々は Kitaev 型スピン液体の実現を目指して物質開発を進め、新物質 $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ を発見した。 $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ では Ir^{4+} が直交する3つの $\text{Ir}-\text{O}_2-\text{Ir}$ 面からなる120結合で結ばれ、ハニカム格子の三次元版と呼べるネットワーク (ハイパーハニカム格子) を形成する。理想的な異方的強磁性結合で結ばれれば、基底状態が2次元ハニカム格子と同様に Kitaev スピン液体と予想されている。その後の研究で $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ は磁化率の振る舞いから $\alpha\text{-A}_2\text{IrO}_3$ とは異なり強磁性相互作用が支配的とわかった。さらに強磁場を印加すると強磁性状態が誘起される。低磁場中では約40 K でノンコリニア型の磁気秩序を示すが、Kitaev 型スピン液体に極めて近い状態が実現していると考えられ現在注目を集めている。昨年度、この状態にさらに圧力を印加することにより磁場下の強磁性モーメントが消失することを見出した。続いて、圧力下核磁気共鳴 (NMR) 測定を用いて微視的に考察した。磁気秩序に起因する NMR スペクトルの増大やスピン-格子緩和時間 T_1 の温度依存性異常が大きく抑制されていた。高圧力下では不均一ではあるが、静的

スピン凍結が起きていないことが確認され、強く揺らいだスピン液体状態が実現していることが明らかになった。見出したスピン液体状態の起源は明らかではないが、新規二次元ハニカム系でもより明示的なスピン液体挙動が見えつつあり、二次元と三次元ハニカム系の舞台設定の共通点を考えるならば、Kitaev 液体状態が実現していると考えられる。

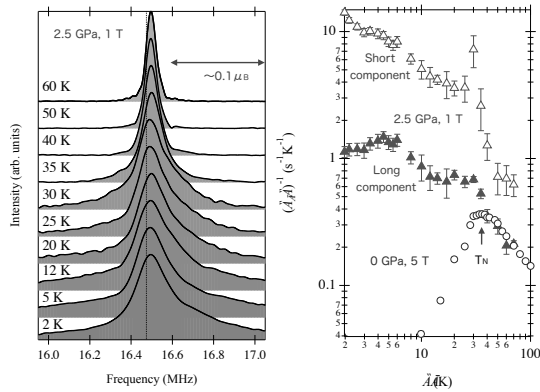


図 4.6.1: β - Li_2IrO_3 の高圧下 ^7Li -NMR 測定結果。2.5 万気圧 (GPa) では静的な磁性が 1 桁程度抑制され、動的なスピン帯磁率に相当する $(T_1T)^{-1}$ では極低温までギャップの無い励起が現れる。

4.6.2 エキゾチック半金属の探索

3次元ディラック電子の創成

アンチペロブスカイト酸化物 Sr_3PbO において 3次元ディラック電子の存在を確認し、すべてのキャリアが最低ランダウ準位に落ち込む量子極限を実現した。Sr 八面体の中央に酸素が位置するこの物質では Pb 6p 価電子帯と Sr 4d 伝導帯がわずかに重なる。結晶対称性によって伝導帯と価電子帯の混成は k 空間で異方的となり、一点でほぼゼロギャップとなる。このため 3次元ディラック電子が出現することが苺宿、小形によって理論的に指摘された。 Sr_3PbO の単結晶について磁気抵抗に現われる量子振動の詳細を調べ、バンド計算の結果と整合するディラックフェルミ面の異方性を観測した。5T から 15T 程度の磁場では、6 個の縮退するディラックフェルミ面の一部だけが量子極限に達していることが明らかとなった。カイラル異常などの量子極限での現象の探索を継続している。

励起子絶縁体

励起子絶縁体とはナローギャップ半導体もしくは半金属において、電子-正孔がクーロン相互作用によ

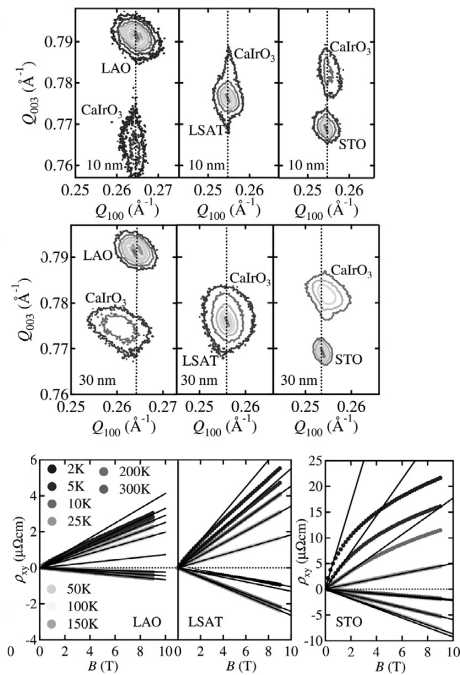


図 4.6.2: ディラックノード半金属 CaIrO_3 単結晶薄膜の X 線回折から見たエピタキシャル歪とホール抵抗の磁場依存性。

り対 (励起子) を形成することで絶縁化した状態である。昨年度までに 5d 遷移金属層状カルコゲナイド Ta_2NiSe_5 が励起子絶縁体の最も有力な候補物質であることを示した。Se を S 置換した Ta_2NiS_5 は Ta_2NiSe_5 とは対照的に励起子絶縁体への転移を示さない。 Ta_2NiS_5 について光応答から、以下のポイントを明らかにした。(1) 0.6 eV 程度の一電子ギャップを有する。(2) 束縛エネルギー 0.3 eV 程度の励起子構造が存在する。(3) 束縛エネルギーの大きさは Ta_2NiSe_5 の励起子絶縁体状態のギャップとほぼ等しい。

Ta_2NiS_5 では一電子ギャップが励起子束縛エネルギーに比べて十分大きいため励起子相が出現しないが、ほぼゼロギャップ半導体である Ta_2NiSe_5 では転移が生じ、束縛エネルギー程度の励起子ギャップが生じると理解することができる。

4.6.3 薄膜超格子構造を用いた新奇電子相の開拓

関連ディラック半金属 AIrO_3 ($\text{A}=\text{Sr}, \text{Ca}$) の輸送現象とキャリアドーピング

AIrO_3 ($\text{A}=\text{Sr}, \text{Ca}$) ペロブスカイトは結晶対称性に保護された 3次元のディラックノード電子バンドと重い正孔バンドがフェルミ準位に僅かに重なる半金属であるとされている。3種類の基板上に CaIrO_3 単

結晶薄膜をエピタキシャル成長させ、輸送現象のエピタキシャル歪み依存性を詳細に調べた。その結果により、質量の極めて軽いディラック電子と重い正孔の2キャリアモデルの範囲内で理解できることを示した。次に、La置換により電子ドーピングを行い、重い正孔バンドの存在による2キャリア共存状態からディラックバンドにのみ電子が入った状態への変化が2%程度のドーピングで起きることをホール係数のLa濃度依存性として観測した。現在、 $S = 1/2$ 高温超伝導銅酸化物のアナロジーとして $J_{\text{eff}} = 1/2$ イリジウム酸化物へのドーピングが注目されているが、薄膜のレベルでそれが可能であることを示したものである。

<報文>

(原著論文)

- [1] M.Miyazaki, R.Kadono, M.Hiraishi, A.Koda, K.M.Kojima, K. Ohashi, T.Takayama, and H.Takagi: Evidence of ordered magnetic moments at oxygen sites in antiferromagnetic Sr_2IrO_4 and $\text{Sr}_3\text{Ir}_2\text{O}_7$, *Physical Review B* **91**, 155113 (2015).
 - [2] K.Yamada, D.Aoki, K. Kitagawa and M. Takahashi: Frequency-swept solid-state ^{33}S NMR of an organosulfur compound in an extremely low magnetic field, *Chemical Physics Letters* **630**, 86-90 (2015).
 - [3] H.Oki and H.Takagi: $\text{Y}_2\text{Ti}_2\text{O}_5\text{S}_2$ as a high performance anode material for Li ion batteries, *SOLID STATE IONICS* **276**, 80-83 (2015).
 - [4] J.M.Riley, W. Meevasana, L. Bawden, M. Asakawa, T. Takayama, T.Eknapakul, T.K.Kim, M.Hoesch, S.K.Mo, H.Takagi, T.Sasagawa, M.S.Bahramy, and P.D.C.King: Negative electronic compressibility and tunable spin splitting in WSe_2 , *NATURE NANOTECHNOLOGY* **10**, 1038 (2015).
 - [5] J.Nuss, C.Muhle, K.Hayama, V.Abdlazimi, and H.Takagi: Tilting structures in inverse perovskites, $M_3T_i\text{O}$ ($M = \text{Ca, Sr, Ba, Eu}$; $T_i = \text{Si, Ge, Sn, Pb}$) *Acta crystallographica B* **71**, 300-312 (2015).
 - [6] J.Matsuno, K.Ihara, S.Yamamura, H.Wadati, K.Ishii, V.V.Shenkar, H.Y.Kee, and H.Takagi: Engineering a Spin-Orbital Magnetic Insulator by Tailoring Superlattices, *Physical Review Letters* **114**, 247209 (2015).
 - [7] Y.Kohsaka, M.Kanou, H.Takagi, T.Hanaguri, and T.Sasagawa: Imaging ambipolar two-dimensional carriers induced by the spontaneous electric polarization of a polar semiconductor BiTeI , *Physical Review B* **91**, 245312 (2015).
 - [8] H.Takeda, Y.Kato, M.Yoshimura, Y.Shimizu, M.Itoh, S.Niitaka and H.Takagi: Magnetic fluctuations and possible formation of a spin-singlet cluster under pressure in the heavy-fermion spinel LiV_2O_4 probed by Li-7 and V-51 NMR *Physical Review B* **92**, 045103 (2015).
 - [9] D.Hirai, J.Matsuno, D.Nihio-Hamane and H.Takagi: Semimetallic transport properties of epitaxially stabilized perovskite CaIrO_3 films, *Applied Physics Letters* **107**, 012104 (2015).
- (修士論文)
- [10] 松井直樹: ペロブスカイト SrIrO_3 薄膜のディラック電子と電子状態制御 (Dirac electrons and control of electronic states in perovskite SrIrO_3 thin film)
 - [11] 白井優美: Eu_3MO ($M=\text{Pb, Sn}$) の磁気輸送現象 (Magnetotransport studies on inverse perovskites Eu_3MO ($M=\text{Pb, Sn}$))
 - [12] 林義之: 重い電子系スピネル LiV_2O_4 の輸送特性と電子構造 (Transport Properties and Electronic Structure of Heavy Fermion Spinel LiV_2O_4)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [13] N. Ohta, N. Matsui, K. Misaki, H. Takagi: Substitution induced semimetal-insulator transition of $\text{SrIr}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3/\text{SrTiO}_3(001)$, (JKT workshop on strongly correlated electron systems, Tokyo, Japan, Feb. 19, 2016).
 - [14] N. Matsui, N. Ohta, H.Takagi: Metal-insulator transition in $[(\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{IrO}_3),(\text{SrTiO}_3)]$, (JKT workshop on strongly correlated electron systems, Tokyo, Japan, Feb. 19, 2016).
 - [15] R. Takano, K. Kitagawa, T. Takayama, Y. Kishimoto, H. Takagi: Quantum spin liquid state in hydrogen substitution Li_2IrO_3 measured by NMR, (JKT workshop on strongly correlated electron systems, Tokyo, Japan, Feb. 19, 2016).
 - [16] Y. Hayashi, A. Bangura, J. Okamoto, Z.Y. Chen, W.H. Li, D.J. Huang, H. Takagi: Transport Properties and Electronic Structure of Heavy Fermion Spinel LiV_2O_4 (JKT workshop on strongly correlated electron systems, Tokyo, Japan, Feb. 19, 2016).
 - [17] Y. Nakamura, K. Takenaka, A. Kishimoto, H. Takagi, Exotic properties derived from lattice defects in an anti-perovskite nitride, (JKT workshop on strongly correlated electron systems, Tokyo, Japan, Feb. 19, 2016).
 - [18] S. Suetsugu, K. Hayama, A.W. Rost, C. Muhle, J. Nuss, H. Takagi: Magnetotransport properties in three-dimensional Dirac-electron anti-perovskite oxides Sr_3PbO , (JKT workshop on strongly correlated electron systems, Tokyo, Japan, Feb. 19, 2016).
- 招待講演
- [19] H. Takagi: Exploring new superconductor in the vicinity of an electronic order, (UK-Japan Cambridge workshop, Cambridge, UK, Apr. 14, 2015).

- [20] H. Takagi: Strong spin-orbit coupling meets with honeycomb physics in complex Ir oxides, (Correlated Oxides Conference, Ohio, USA, May 04, 2015).
- [21] H. Takagi: Newly discovered superconducting materials, (Gordon Research Conference Hongkong, May 24, 2015).
- [22] H. Takagi: Enhanced functionalities in $5d$ transition metal compounds from large spin-orbit coupling, (Telluride, CO, USA, Jun. 15, 2015).
- [23] H. Takagi: Correlated electron research in Germany, (Workshop on Soft Condensed Matter Physics, Shonan Village, Japan, Jul. 04, 2015).
- [24] H. Takagi: Materials Overview, (Novel States in Spin-Orbit Coupled Quantum Matter Conference, KITP Santa Barbara, USA, Jul. 31, 2015).
- [25] H. Takagi: From correlated Dirac electrons to spin liquid in complex Ir oxides, (School and Workshop on Strongly Correlated Electronic Systems Novel Materials and Novel Theories, Trieste, Italy, Aug. 17, 2015).
- [26] H. Takagi: Synthesis of novel SC, (11th International Conference on Materials and Mechanisms in Superconductivity (M2S-XI), Geneva, Switzerland, Aug. 26, 2015).
- [27] H. Takagi: Exotic electronic states produced by strong spin-orbit coupling in complex Ir oxides, (BIRS, strongly interacting topological phases, Banff, Canada, Sep. 23, 2015).
- [28] H. Takagi: Spin-orbit coupling and electron correlations in complex $5d$ Ir oxides (Plenary), (Korrelationstage 2015 Dresden, Germany, Sep. 28, 2015).
- [29] K. Kitagawa: Spin liquid-like state in complex Ir oxides, (MPI Ringberg Symposium on High Temperature Superconductivity, Ringberg, Germany, Nov. 10, 2015).
- [30] H. Takagi: Control of dimensionality and carrier concentration in Dirac node semimetal SrIrO_3 , (JKT workshop on correlated electron systems, Tokyo, Japan, Feb. 20, 2016).
- [31] K. Kitagawa: New spin liquids on honeycomb iridates as seen by NMR, (JKT workshop on correlated electron systems, Tokyo, Japan, Feb. 20, 2016).
- [32] H. Takagi: From Kitaev spin liquid to Dirac-node semimetal- spin-orbit coupling induced electronic phases in complex Ir oxides, (Topmat16, Dresden, Germany, Mar. 03, 2016).
- [33] H. Takagi: Engineering correlated Dirac electrons in $\text{SrIrO}_3/\text{SrTiO}_3$ superlattice, (MRS Spring Meeting 2016, Phoenix, Arizona, USA, Mar. 30, 2016).
- [34] H. Takagi: Electronic Phase Change and Entropic Functions in Transition Metal Oxides, (MRS Spring Meeting 2016, Phoenix, Arizona, USA, Mar. 31, 2016).
- (国内会議)
- 一般講演
- [35] 谷田博司, 中川史也, 吉田康助, 松村武, 世良正文, 北川健太郎, 西岡孝, 松村政博: $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{Al}_{10}$ の圧力効果, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス (大阪), 2015 年 9 月
- [36] 白井優美, 葉山慶平, A.Yaresoko, A.W.Rost, C.Muehle, J.Nuss, 高木英典: 逆ペロブスカイト A_3EO ($\text{A}=\text{Eu}$, $\text{E}=\text{Pb,Sn}$) における三次元ディラック電子の物性, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス (大阪), 2015 年 9 月
- [37] 松井直樹, 北川健太郎, 高木英典: La 置換による SrIrO_3 へのキャリアドーピング, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス (大阪), 2015 年 9 月
- [38] 根岸真通, 松井直樹, 北川健太郎, 高木英典: 6H-SrIrO_3 薄膜の輸送特性, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス (大阪), 2015 年 9 月
- [39] 北川健太郎, 岸本恭来, 高山知弘, 高木英典: Li_2IrO_3 の H 置換及び高圧下の NMR で見たスピン液体的性質, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス (大阪), 2015 年 9 月
- [40] 須波圭史, 宮川和也, 堀内佐智雄, 加藤礼三, 北川健太郎, 鹿野田一司: 中性-イオン性転移物質 TTF-CA の圧力下スピン状態, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス (大阪), 2015 年 9 月
- [41] 松林和幸, 鈴木淳一郎, 辻本真規, 中辻知, 北川健太郎, 上床美也: $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の反強四極子秩序と超伝導の圧力効果, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス (大阪), 2015 年 9 月
- [42] 水戸毅, 江見直哉, 西山功兵, 谷口太一, 小山岳秀, 上田光一, 小原孝夫, 水牧仁一朗, 河村直己, 石松直樹, 北川健太郎, 小山内湧人, 林健人, 伊賀文俊, N. Shitsevalova: 小さな半導体ギャップを持つ Sm 系化合物における電子状態 SmB_6 の価数・磁性・ギャップ, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス (大阪), 2015 年 9 月
- [43] 小柳大樹, 小林義明, 伊藤正行, 磯部正彦, 高木英典, 桜井裕也: A サイト秩序型ペロブスカイト酸化物 $\text{CaCu}_3\text{Cr}_4\text{O}_{12}$ の電子状態-NMR 測定日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス (大阪), 2015 年 9 月
- [44] 杉山純, 野崎洋, 梅垣いづみ, 桜井裕也, 磯部正彦, 高木英典, Eduardo J. Ansaldo, Jess H. Brewer: A サイト秩序化ペロブスカイト $\text{LaCu}_3\text{Cr}_4\text{O}_{12}$ の μ SR 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス (大阪), 2015 年 9 月
- [45] 林義之, 高木英典: 重い電子系スピネル LiV_2O_4 の単結晶の輸送特性日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス (大阪), 2015 年 9 月
- [46] 松林和幸, 岩谷誠, 北川健太郎, 河村直己, 水牧仁一朗, 石松直樹, 渡辺真仁, 上床美也: Yb 系新物質 YbCo_2Ge_4 における圧力効果第 56 回高圧討論会, JMS アステールプラザ (広島), 2015 年 11 月

- [47] 北川健太郎, 岸本恭来, 高山知弘, 高木英典: 極低温・超高圧 NMR 測定による β - Li_2IrO_3 のスピン液体的挙動の研究, 第 56 回高圧討論会, JMS アステールプラザ (広島), 2015 年 11 月
- [48] 太田奈緒香: アンチペロブスカイトのディラック電子, 新学術領域「トポロジーが紡ぐ物質化学のフロンティア」第 5 回トポロジー集中連携研究会「ワイル半金属・超伝導」, 東北大学片平キャンパス (宮城), 2015 年 11 月
- [49] S. Suetsugu, Y. Shirai, K. Hayama, A. Yaresko, A. W. Rost, C. Muhle, J. Nuss, H. Takagi: Magneto-transport properties of 3D Dirac-electron in antiperovskiteoxides, 物性科学領域横断研究会, 東京大学本郷キャンパス (東京), 2015 年 11 月
- [50] 太田奈緒香: ペロブスカイト型 Ir 酸化物のディラックノード, 第一回ディラック電子系マルチフェロイクス研究会, 理科大学飯田橋キャンパス (東京), 2016 年 1 月
- [51] 末次祥大, 葉山慶平, A.W.Rost, C.Muhle, J.Nuss, 木英典: 3次元 Dirac 電子系アンチペロブスカイト酸化物における磁気輸送現象, 第 7 回低温センター研究交流会, 東京大学浅野キャンパス (東京), 2016 年 2 月
- [52] 末次祥大, 葉山慶平, A.Yaresko, A.W. Rost, C. Muhle, J. Nuss, 木英典: 3次元 Dirac 電子系アンチペロブスカイト酸化物 $\text{Sr}_3\text{EO}(E=\text{Sn,Pb})$ における磁気輸送現象, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学和泉キャンパス (宮城), 2016 年 3 月
- [53] 江見直哉, 小山岳秀, 西山功兵, 上田光一, 水戸毅, 水牧仁一郎, 河村直己, 石松直樹, 北川健太郎, 加賀山朋子, H. Nguyen, 清水克哉, 伊賀文俊, N. Shitsevalova: X線吸収分光・NMR 測定による近藤半導体 SmB_6 の高圧下電子状態, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学和泉キャンパス (宮城), 2016 年 3 月
- [54] 谷田博司, 中川史也, 吉田康助, 松村武, 世良正文, 北川健太郎, 西岡孝: $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{Al}_{10}$ の圧力効果 II 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学和泉キャンパス (宮城), 2016 年 3 月
- [55] 河村直己, 水牧仁一郎, 魚住孝幸, 藤内博紀, 松林和幸, 岩谷誠, 北川健太郎, 広瀬雄介, 本多史憲, 渡辺真仁: Yb 3d-2p 共鳴 X 線発光分光による $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ および YbCo_2Ge_4 の電子状態の研究, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学和泉キャンパス (宮城), 2016 年 3 月
- [56] 太田奈緒香, 松井直樹, 三崎航, 木英典: Sn 置換による $\text{SrTiO}_3(001)$ 上 SrIrO_3 薄膜の輸送特性制御, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学和泉キャンパス (宮城), 2016 年 3 月
- [57] 高野陸, 北川健太郎, 高山知弘, 岸本恭来, 木英典: 水素置換 Li_2IrO_3 における量子スピン液体状態の NMR 測定, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学和泉キャンパス (宮城), 2016 年 3 月
- [58] 松井直樹, 太田奈緒香, 木英典: $\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{IrO}_3/\text{SrTiO}_3$ 超格子の金属絶縁体転移, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学和泉キャンパス (宮城), 2016 年 3 月
- [59] 小柳大樹, 小林義明, 伊藤正行, 磯部正彦, 高木英典, 桜井裕也: A-サイト秩序型ペロブスカイト酸化物 $\text{CaCu}_3\text{Cr}_4\text{O}_{12}$ の磁気秩序相, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学和泉キャンパス (宮城), 2016 年 3 月
- [60] 藤原賢二, 須和田裕貴, 本山岳, 三好清貴, 小林達生, 北川健太郎, 佐々木孝彦, 後藤貴行, S. Seiro, C. Geibel, F. Steglich: CeCu_2Si_2 の強磁場・高圧下における価数状態の研究, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学和泉キャンパス (宮城), 2016 年 3 月
- [61] 松林和幸, 辻本真規, 中辻知, 北川健太郎, 上床美也: $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の高圧下・磁場中における非フェルミ液体的振る舞い, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学和泉キャンパス (宮城), 2016 年 3 月

招待講演

- [62] 高木英典: エキシトニック絶縁体のレビュー物質概観, 東京大学物性研究所短期研究会, 2015 年 11 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、銀河のクラスタリング解析、ミッシングバリオンの起源と観測的検証、ロン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

弱重力レンズ現象の全天シミュレーション

すばる望遠鏡の広視野撮像カメラ Hyper Suprime-Cam(HSC)を用いた大規模銀河撮像観測による重力レンズ解析を念頭においた宇宙論研究を行った。現在世界各地ですすめられている銀河撮像観測は、いざいざ1000平方度を超える広視野を観測する予定である。このような現状を鑑み、我々は全天を確保する弱重力レンズシミュレーションを行った。さらに、全天シミュレーションを応用して、HSC観測領域である1400平方度をカバーする模擬観測を行い、HSC観測における重力レンズ解析で再構築できるConvergence分布が含む宇宙論的な情報の理解を進展させた。200回の模擬観測によって明らかになった質量分布の統計的な性質は、暗黒物質が高密度に密集した領域であるハローの統計的な性質と密接に関連しており、ハローが持つ密度プロファイル、存在量と2点分布関数の適切なモデル化により、シミュレーション結果をよく説明できることを示した。また、シミュレーションにより綿密にテストされた解析モデルを用いて、宇宙加速膨張を説明するための2種類の物理的な宇宙モデルを制限する可能性を調査した。PLANCK衛星による宇宙背景放射の観測結果を併せて用いることにより、HSC観測によるConvergence分布の統計解析が、暗黒エネルギーの時間進化および一般相対性理論の破れを明らかにできる可能性を示した[16, 18]。

背景ガンマ線放射と大質量銀河の相関解析

銀河分光観測と多波長観測データの組み合わせにより、重力レンズの単独解析では明らかにできない暗黒物質の素粒子的性質を調査した。本研究では、暗黒物質の素粒子的な性質として、対消滅反応に着目した。暗黒物質がもし対消滅しているなら、宇宙の物質分布の高密度領域では、対消滅によるガンマ線が発生していることが予想される。一方で、標準的な宇宙モデルにおける銀河形成理論では、物質分布の高密度領域に選択的に銀河が形成される。このことを考慮すると、銀河系外からくるガンマ線（背景ガンマ線放射）と銀河系外に位置している銀河の間には、角度相関が生じていることが期待される。

そこで、本研究では、実在するガンマ線観測と銀河分光観測の2種のデータの相関解析を行い、暗黒物質の対消滅可能性を探索した。Fermi Large Area Telescope による背景ガンマ線放射と、Sloan Digital Sky Survey (SDSS) による極めて明るく赤い銀河 (Luminous Red Galaxy; LRG) の角度相関関数の測定を行い、現行のデータでは有意な相関は見られなかった。この測定結果と理論モデルの比較から、暗黒物質対消滅に関する上限を与えることに成功した。本研究の提案する手法は、宇宙論的な距離スケールを利用した解析手法であり、近傍の矮小銀河や銀河中心のガンマ線観測からくる制限とは独立な制限を与える。また、将来銀河探索計画における LRG サンプルの蓄積により、期待される暗黒物質対消滅に関する制限は、幅広い暗黒物質質量の範囲で近傍の制限と同等かそれ以上になることを示した [17]。

超新星重力レンズ SN Refsdal の像の出現予測

Kelly らによって、強い重力レンズ現象をうけた超新星 SN Refsdal が銀河団 MACSJ1149.5+2223 内で 2014 年 11 月に発見された。この報告の直後構築された重力レンズモデルによって 5 番目の超新星像が約 1 年後に出現することが示された。[15] 他のいくつかの研究グループも同様の像の出現を予測していたが、出現時期については異なるモデル間で 100 日以上の違いがあった。[30] その後 Kelly らの追観測により、2015 年 12 月のハッブル望遠鏡観測で新しい超新星像が検出され、いろいろなモデル予言の中でも我々の質量モデルがもっとも正確に超新星像の出現時期を予言していたことが明らかになった。この出現予測の一連の研究は、重力レンズ解析によるダークマター分布を含めた質量分布の再構築の妥当さと正確さをこれまでとまったく違う角度から検証できたという点で重要かつ画期的な成果である。

銀河団の増光を利用した遠方銀河の研究

遠方銀河を銀河団の重力レンズ増光効果を利用して調べるハッブル望遠鏡 Frontier Fields 計画の最初の銀河団 Abell 2744 のデータを用いて、 $z \sim 6-8$ の銀河のサイズの時間進化を調べた。特にダークハローのサイズと銀河のサイズの進化の関係を初めて

調べ、その結果広い赤方偏移にわたってそれらのサイズの比が一定であることを見いだした。[21] また Frontier Fields 計画の最初の 4 つの銀河団の質量モデルを構築し、増光された遠方銀河を約 120 個同定した。[22]

Hyper Suprime-Cam の弱い重力レンズ初期成果

すばる望遠鏡に取り付けられた広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) がいよいよ稼働をはじめた。カメラの試験中に撮影された 2.3 平方度の領域の弱い重力レンズ解析を行い、質量マップのピークから銀河団を 8 つ発見した。[24] これは現在の標準宇宙モデルで期待されるよりも多いという点で興味深く、より広い領域の重力レンズ解析が待たれる。この研究は HSC が当初の計画とおりの性能が達成されていることを実証し、また弱い重力レンズ研究における HSC の威力を示したものである。

アルマ望遠鏡で観測された強い重力レンズ SDP.81 の詳細解析

アルマ望遠鏡が公開した重力レンズ SDP.81 の長基線データはハッブル宇宙望遠鏡の解像度をしのぐ 0.023 秒角の画像を撮影することに成功しており、大きな注目を集めた。この公開データをもとに詳細な質量モデル解析を行い、その結果観測された詳細な重力レンズパターンを精緻に再現する質量モデルの構築にいち早く成功した。その結果、レンズ銀河中心のブラックホールの質量に下限をつけることに成功した。[32] また、アルマ望遠鏡の解像度と重力レンズの増光のおかげで背後の銀河の個々の星形成領域を分解することができ、その結果ガス密度と星形成率の関係が爆発的星形成銀河でみられるものに近しいことを突き止めた。[4]

強い重力レンズ探査

クエーサー重力レンズを大規模サーベイデータから効率的に探す手法を開発した。[10] また市民プロジェクト Space Warps から、赤外で非常に明るいめずらしい重力レンズ天体を発見した。[9] SDSS-III BOSS のクエーサーサンプルから重力レンズを探し、新たに 13 個の重力レンズクエーサーを発見した。[3]

電波で暗いクエーサーの電波放射の起源

電波で暗い (radio-quiet) クエーサーからも弱い電波放射が観測されており、その起源がクエーサー母銀河の星形成に由来するかあるいはクエーサーの活動性に起因するかはよくわかっていなかった。スピッツァー望遠鏡によるクエーサーの赤外観測により得られたクエーサーの SED を詳細に解析することによ

りクエーサー母銀河の SED を見積もりそこから星形成率を見積もった結果、星形成由来の電波放射は観測を説明するには不十分であり、クエーサーの活動性がその電波放射の主な原因であることがわかった。[20]

近傍ボイドモデルによる σ_8 問題と H_0 問題解決の可能性

プランク衛星の宇宙背景放射の観測の結果、 $z = 1090$ の観測から期待される現在の宇宙での密度ゆらぎの量 (σ_8) およびハッブル定数 (H_0) の値が近傍宇宙で直接測定された値とずれていることが知られており、原因はわかっていない。この問題は我々が宇宙の低密度領域 (ボイド) に住んでいるとすれば解決される可能性がある。簡単なボイドモデルを用いて解析した結果、密度ゆらぎのずれを解決できる程度の低密度領域を考えると観測される近傍でのハッブル定数がちょうど観測されたものと近くなり、ボイドモデルがこの二つの問題を同時に解決しうることがわかった。[14]

重力レンズ効果を用いたグラヴィティーノ質量の制限

宇宙の大規模構造の観測を用いてダークマターのモデルを制限することは観測的宇宙論における重要な役割の一つである。ダークマターの有力候補の一つとして、超対称性粒子の light gravitino が提唱されてきた。light gravitino が構造形成に与える影響としては主に、(1) matter-radiation equality の時期を変える、(2) free-streaming による構造の減衰の二つがある。(1) の効果は比較的小さいため、(2) の効果に敏感な観測量を用いる必要がある。light gravitino による減衰が効くスケールを探る観測量として、宇宙背景放射光子の重力レンズ効果 (CMB lensing) と遠方銀河からの光の弱い重力レンズ効果 (cosmic shear) の二つが挙げられる。我々は Planck 衛星による CMB lensing の power spectrum、CFHTLenS サーベイによる cosmic shear の二点相関関数を用いて、light gravitino の質量にこれまでで最も良い制限 ($m_{3/2} < 4.7 \text{ eV}$ (95% C.L.)) を得た。さらに light gravitino を考慮した際の、low redshift と high redshift の宇宙論観測の間における、揺らぎの振幅の推定量のずれ (σ_8 tension) についても議論した。

ALMA によるサーベイ観測データを用いた遠方炭素輝線銀河探査

星形成率密度の進化は、従来は静止波長系での紫外線波長域で理解されてきた。一方で近年の ALMA による観測から、遠方宇宙で星形成している銀河の中には、紫外線では暗いが炭素イオンが放射する [CII] 輝線では明るい銀河が存在する事が分かってきた。そのため、紫外線のみで測られた星形成率密度は真の値

と異なる可能性がある。以上のことから、遠方宇宙の星形成率密度を [CII] 輝線によって測れば、遠方星形成史の描像の新たな知見が得られると期待される。

我々は ALMA Cycle2 で得られた最新の観測データの解析を行い、5 平方分角の観測視野中に赤方偏移 $z = 6$ の [CII] 輝線銀河候補を 2 個検出した。そして、世界で初めて $z = 6$ における [CII] 輝線銀河の数密度を求め、星形成率密度の下限值をつけることに成功した。この観測結果は、 $z = 6$ の星形成率密度がこれまでに考えていたよりも大きかった可能性を示唆している。本研究は、従来紫外線連続光による観測から見積もられていた遠方星形成率密度を、サブミリ波輝線により見積もることが可能であることを示した初の例である。

AKARI FIS マップにおける SDSS 銀河のスタック解析

ダストは銀河形成及び銀河の化学進化を調べる上で重要な情報を持つ。ダストは星生成活動と関連する紫外光及び可視光を吸収散乱し、星からの光のおよそ半分を赤外線で再放射するためである。しかしながら明るい銀河を除いて、個々の銀河からの赤外線放射を直接検出するのは非常に難しい。バイアスの少ない形で銀河からの赤外線放射を特徴付けるために、統計的な検出をおこなうスタック解析が有用となる。

先行研究として IRAS 全天地図上における SDSS 銀河のスタック結果はあるが、その角度分解能は約 6 分と悪く定量的な解析は困難であった。そこで今回は、角度分解能が約 1 分まで向上した AKARI 全天地図を用いて同様のスタック解析を行った。

スタックによって得られるダスト赤外放射には、中心銀河からの寄与だけでなくその銀河と空間的に相関している他の銀河の寄与も含まれる。銀河の角度相関関数と AKARI の点拡がり関数をもとにした理論モデルにより、各成分からの寄与を可視光等級の関数として見積もった。中心銀河と空間的に相関している銀河からの寄与は SDSS 銀河の角度相関関数から予測可能であり、今回の観測値はその予測値と整合的であった。

さらに AKARI の 65, 90, 140 μm の各波長で解析を行い、ダストの赤外線放射効率をかけた修正黒体放射でフィットすることで 40K という平均ダスト温度を得た。これは個々に測定されている典型的な SDSS 銀河のダスト温度と同程度であり、銀河のダスト温度が赤外線の放射量に依らないことを示唆している。[28]

ダークマターハローの進化における速度分散の役割

球対称崩壊モデルはダークマターハローの非線形成長を記述するもっとも基礎的なモデルであるが、その予言が実際の個々のハローの成長をどの程度よく近似できているかは、これまで調べられた例がなかっ

た。我々は N 体シミュレーションから取り出したハローを解析し、個々のハローの進化と球対称崩壊モデルの予言とを比較した。その結果、球対称崩壊モデルは、ハローの半径が増加から減少に転じるターンアラウンド時刻まではかなり正確にシミュレーション中のハローの進化を記述できているが、その後は両者のずれが大きくなることがわかった。特に、現在のハローの半径はモデルの予言に比べて平均的に 1.2 倍となっている。我々はずれの原因が主にダークマター粒子の速度分散にあることを示した。また、速度分散の影響は運動エネルギーなどの力学量に特に強く現れていることもわかった。これらの結果はダークマターの非線形成長についてより深い理解を与えるものである。[5]

大規模 N 体シミュレーション群を用いた銀河-銀河レンズ効果のエミュレータ構築

銀河または銀河団をレンズ天体とする、背景銀河の像の歪みはレンズ天体周りの平均的な見えない暗黒物質を主成分とする宇宙の密度分布をレンズからの距離の関数として明らかにする強力な手法である。大まかには小スケールでは銀河、銀河団周りの密度プロファイル、大スケールでは宇宙論的な揺らぎの情報を見ていることになるが、その広いダイナミックレンジにわたり精密にモデリングするためには大規模な数値計算が必要となる。さらに言えば、銀河-銀河レンズ効果から宇宙論の情報を引き出すためには、期待されるシグナルを宇宙論パラメタの関数として予言する必要がある。我々はパラメタ空間を効率的にサンプルする手法であるラテン超方格法に基づいて、6次元パラメタ空間をサンプリングし、約 100 億粒子を用いた N 体シミュレーションを 84 試行実行した。得られた結果の一部を、機械学習の一種であるガウス過程を用いて学習することで、考えているパラメタ領域において任意の宇宙論パラメタについて予言を与え、残りのシミュレーションからその達成精度を検証した。その結果、すばる望遠鏡 HSC サーベイの初期データとの比較に十分な精度を達成していることを確認した [81, 131, 138, 143, 151, 158]。

FastSound による高赤方偏移の重力法則の制限

銀河の特異速度場による赤方偏移空間の銀河分布の見かけ上の非等方性は、銀河バイアスの不定性に依らない揺らぎの成長率の測定を可能にする。これまでの観測は赤方偏移 1 未満の比較的近傍宇宙の観測データに基づくものであったが、揺らぎの成長率を用いて重力理論に強い制限を課すためには、より高赤方偏移から揺らぎの成長率の時間変化を追うことが重要となる。すばる望遠鏡の多天体同時分光器 FMOS を用いて得られた赤方偏移 $1.19 < z < 1.55$ にわたる 2783 個の輝線銀河はそのような解析を可能とする。我々は、それらの赤方偏移空間の相関関数を測定し、高赤方偏移における赤方偏移歪みの兆候を初めて観測した。これにより、赤方偏移 1.4 付近にお

ける実効的な構造成長率 $f(z)\sigma_8(z) = 0.482 \pm 0.116$ を導いた。これは約 4.2σ レベルの非等方性の検出を意味する。この制限は $1 - \sigma$ で一般相対性理論と整合的である。また、低赤方偏移の観測データと組み合わせることで、宇宙マイクロ波背景放射の観測に頼ることなく赤方偏移歪みだけで重力模型に対する意味のある制限が可能であることを示した [29]。

SDSS BOSS 銀河サンプルの分布の非等方性を用いた修正重力理論の制限

赤方偏移空間の銀河の非等方クラスタリングの解析では、重力法則は一般相対性理論に従うものとして構築された理論テンプレートをを用いて揺らぎの成長率を導き、その時間依存性を手掛かりに重力模型の制限を行うが、解析の際に一般相対性理論を仮定している以上、必ずしも整合的な解析にはなっていない。そこで、本研究では一般相対性理論の単純な拡張である $f(R)$ 重力理論のもとで摂動的に計算された理論テンプレートをを用いて、SDSS BOSS から得られた約 70 万の銀河の分光サンプルの非等方性を解析し、この理論におけるモデルパラメタ $|f_{R0}|$ を制限した。その結果は一般相対性理論と無矛盾であった。[33]

キネマティック スニャーエフ・ゼルドビッチ効果を用いた宇宙論

宇宙大規模構造の観測によって、宇宙の進化の歴史を探ることが期待されている。特に赤方偏移歪みの観測によって、銀河の 3 次元分布に埋め込まれた銀河の特異速度の相関を測定することが可能となる。特異速度はニュートンの運動方程式によって重力ポテンシャルと直接関係しているため、修正重力理論への制限など、大規模構造の進化を追う上で非常に重要となっている。大スケールにおいては宇宙論的摂動論の線形理論が非常によく働くことが知られており、大スケールの二点相関関数を測定し理論と比較することで、宇宙論パラメタを制限することが可能となる。より高精度な宇宙論パラメタの制限のためには、非線形領域 (小スケール二点相関や多点相関) を考えなければならないが、非線形領域では非ガウスエラーの効果や理論モデルの不定性なども大きく、正しく宇宙論的情報を取り出すにはまだまだ解決しなければならない問題も多い。

キネマティック スニャーエフ・ゼルドビッチ効果は銀河分布の赤方偏移歪みに加えて、大スケールの特異速度相関を測定することが可能であり、近年新たな宇宙論における観測量として注目されている。キネマティック スニャーエフ・ゼルドビッチ効果は銀河クラスターのある場所でしか起こらないため、観測する量は赤方偏移歪みを受ける。我々は、赤方偏移歪みを含むキネマティック スニャーエフ・ゼルドビッチ効果を宇宙論に適用するための理論モデルを構築し、将来観測においてどの程度パラメタへの改善を与えるかを初めて示した。

宇宙論的 6 次元 Vlasov シミュレーションの高次精度化

自己重力系での Vlasov シミュレーションは N 体シミュレーションで現れる離散粒子による二体緩和、物理量のショットノイズの影響がなく、また大きな速度分散を持った系でも計算が可能であるので粒子法とは別のアプローチとして長年注目されている。この計算は 6 次元位相空間での計算が要求されるが、計算資源の発達に伴い先行研究で初めて 6 次元位相空間上での Vlasov シミュレーションが可能となった。ところが、高精度化にあたり、計算資源の観点から単純にメッシュ数を増やすことが困難であるので別の方法で精度を上げる必要があった。

我々は、空間 5 次精度スキームをもとに、正值性を保証した手法を新たに開発し、先行研究で用いられた空間 3 次精度スキームと比べ、同じメッシュ数であってもよりも高精度の計算を行うことが可能とした。また、宇宙論的な計算への拡張を行い、空間 3 次精度では達成できなかった誤差を解消することが確認できた。[132]

5.1.2 系外惑星

同一軌道面内にある外惑星の摂動を受けた内惑星の天体力学的進化

近年、主星の自転軸と惑星の公転軸の向きが大きく異なる系が数多く発見されている。それらに対する形成モデルはいくつか提案されているが、それらは向きをずらすことは可能であっても、完全に逆行する（すなわち、主星の自転軸に対して反並行な公転をする）惑星を形成することは極めて困難である。その可能性として、内側にある惑星が、外側であって（したがって、直接観測されている訳ではない）楕円軌道を描く惑星によって摂動を受けて、1 に近い極端な離心率を獲得し、その結果、公転軸を反転させるというモデルが提唱されている。我々は、そのモデルに対して、より現実的な効果（一般相対論的補正、主星と惑星の自転の効果、主星と惑星の潮汐相互作用）を考慮した天体力学的数値シミュレーションを行い、それらの系の系統的な進化を調べた [34]。その結果、このような系は強い潮汐作用のために、ほとんどの場合潮汐破壊を受けて、安定な逆行惑星を形成することはほとんど不可能であることが分かった。一方で、ある割合は安定な順行惑星を形成することがわかり、観測されているホットジュピターの一部はこの経路を経て形成されたものであるかもしれない。

重力減光を用いた高温星まわりのウォームジュピター Kepler-448b のスピン軌道角測定

有効温度 6100 K 以上の高温星まわりの近接巨大ガス惑星（ホットジュピター）では、その公転軸がしば

しば主星の自転軸と大きくずれている。この事実はホットジュピターが惑星散乱などの力学的過程を経て短周期の軌道に移動した証拠とされるが、そもそもより長周期の惑星で 2 つの軸が揃っているか否かは確かめられていない。このような検証の一環として、我々は Kepler-448b という高温星（有効温度 6800 K）まわりのウォームジュピター（公転周期 17.86 日）に着目した。この系では分光観測により、主星自転軸と惑星公転軸の天球面内におけるずれ ($12.6^{\circ} \pm_{-2.9}^{+3.0}$) が報告されていた。我々はケプラー宇宙望遠鏡によって得られたこの惑星のトランジット光度曲線において、高速自転に起因する主星の輝度分布の非一様性（重力減光）による非対称性を発見し、これをモデル化することにより、主星自転軸と惑星公転軸のずれが 3 次元的にみても同程度であることを示した。この結果は、両軸の大きなずれがやはりホットジュピターに特有の性質であることを支持する [134]。

重力減光とスピン-軌道歳差運動を起こす系外惑星系 PTF08-8695 のトランジット光度曲線の再解析

系外惑星系 PTF08-8695 は T タウリ型星と近接巨大ガス惑星からなる系である。この系に関して、2009 年と 2010 年に 2 回観測されているトランジット（惑星が主星前面を通過する際の食）光度曲線の形状が互いに大きく異なるという特異性が指摘されている。この光度曲線の時間変化は、0.671 日以下という主星の高速自転と 0.448 日という惑星の超短周期軌道に起因した、主星の自転軸と惑星の公転軸の歳差運動によるものと考えられている。過去の研究では、歳差運動の力学モデルを通して惑星の半径や質量、軌道傾斜角などといった系のパラメータを決定しているが、そこでは“主星の自転周期が惑星の公転周期と等しい”という、この系においては非自明な仮定が課されている。そこで本研究では、その仮定を除いた上でより広いパラメータ範囲に対してデータを再解析した結果、歳差運動の周期がそれぞれおよそ 200 日、500 日、800 日に対応する 3 つの解が存在することを発見した。加えて我々は、2014-15 年にかけて京都産業大学・神山天文台においてこの系の追測光観測を行い、そのデータを解析することで真の解は 200 日の歳差周期に対応する解に近いという予備的な結果を得た。[27, 63, 64, 108]

3 重食連星系の測光データによる構造決定

我々はケプラー宇宙望遠鏡によって発見された短周期（2.4 日）の食連星系 KIC 6543674 の光度曲線において、食連星の周囲を公転する 3 つめの星（tertiary star）による食を発見した。さらにその光度曲線を、内側の連星の食の光度曲線およびそのタイミング変化と組み合わせることで、系を構成する 3 つの恒星の質量・半径および軌道を測光データからすべて決定した。この解析から、tertiary star の軌道は公転周期 1100 日、離心率 0.6 で、かつ内側の連星の軌道面と非常によく揃っている（相互傾斜角

$3.3^\circ \pm 0.6^\circ$) ことが明らかとなった。標準的なシナリオでは、KIC 6543674 に含まれるような短周期連星は tertiary star による古在機構とその後の潮汐散逸によって形成され、最終的な連星軌道と tertiary star の軌道は典型的に約 40° ほど傾くとされている。従って、今回得られたフラットな構造は標準シナリオとは相容れず、永年摂動の高次項のような標準シナリオで考慮されていない過程が形成に寄与したことを示唆する [12, 135]。

トランジット惑星による重力定数の時間変動への制限

トランジット惑星系では、食の中心時刻の解析から各時刻 t における惑星の公転周期 $P(t)$ を高精度で決定することが可能である。このような惑星系を長期的にモニタリングすることで、 $P(t)$ の時間変動の上限から重力定数 G の時間変動に対する制限が得られる。我々は、ケプラー宇宙望遠鏡によって観測された 10 個のトランジット惑星系においてこのような解析を行い、2009 年–2013 年にかけて $\Delta G/G < 5 \times 10^{-6}$ 、あるいは $\dot{G}/G < 10^{-6} \text{ yr}^{-1}$ (G の変化率 \dot{G} を一定と仮定する場合) であることを示した。上記の制限はパルサータイミングや月レーザー測距実験による結果と比較すると弱いものの、制限できる変動のタイムスケール等の観点でそれらと相補的であるうえ、また長期間観測されたより多くの系を解析することでより強い制限を得ることも可能である [13]。

目視による長周期トランジット惑星候補の発見

ケプラー宇宙望遠鏡の測光データから通常のアルゴリズムでトランジットを検出するには、トランジットが複数回生じている必要がある。従って、公転周期が長く、観測期間中に 1 度しかトランジットしないような惑星は見落とされてしまう。そこで我々は、7557 個のトランジット惑星候補天体の光度曲線から、目視による single transit events (STEs; 観測期間中に 1 回のみ生じるトランジット) の探索を行い、28 個の STE を発見した。さらにその光度曲線を、同じ系の他のトランジット惑星の光度曲線あるいは主星密度への制限と組み合わせることで、STE を生じている惑星の半径と公転周期を推定した。結果、上記のうち 7 つの STE は惑星によるものである可能性が高く、その場合公転周期が数年–20 年ほどの海王星–木星サイズ惑星であることを明らかにした。またこれらの結果から、惑星系の軌道面が一般によく揃っていると仮定する場合、コンパクトな複数トランジット惑星系のうち少なくとも約 20% が周期 3 年程度以上の巨大ガス惑星を持つことを示した [26]。

ケプラー測光データを用いた長周期惑星のリング探索

太陽系外において惑星周りで、惑星と同程度の大きさを持つリング構造は発見されていない。最近の研究では、ケプラー望遠鏡で発見された 21 の短周期

惑星をターゲットに、測光データからリング探索が行われたが、リングの兆候はみつからなかった。この結果は、惑星が恒星に近いとリング粒子が物性的にも軌道的にも不安定なことで矛盾しない。

そこで、我々はケプラーのデータから、95 の長周期惑星およびその候補に絞ってリングの系統的な探索を行った。その結果、KIC 10403228 がリングに特徴的な蝕を示していることがわかった。我々はリング付き惑星の蝕のモデルを作成し、光度曲線を解釈した結果、この蝕が、ガス型惑星と同程度の惑星半径を持つリング付き惑星でうまく説明できることが判明した。また、リング以外の要因による誤検出の可能性について議論し、結果リングの出すシグナルである確率が高いとした。一方で、ケプラー則から推定される公転周期は 600 年程度と、Kepler 衛星で検出される惑星にしては非常に長いことも指摘した。このことは KIC 10403228 の光度曲線の減光を惑星による蝕と解釈すること自体が誤っている可能性がある事を示唆する [83, 136]。

5.1.3 星形成

初代星形成の降着期進化の 3D 計算: パースト的降着と間欠的 UV フィードバック

初代星形成の最終質量は原始星へのガス降着がいつまで継続するかに依存しているが、この長期進化を 3D 輻射流体シミュレーションにより調べた。これは我々がこれまで行ってきた 2D 軸対称計算を拡張したものである。3D にすることにより、星周円盤の重力不安定による角運動量輸送過程、および円盤での重力不安定による分裂過程を追跡することができるようになった。我々の計算では原始星への質量降着率が激しく時間変動する、いわゆる”episodic accretion” が普遍的に現れる。降着率の変動にあわせて星の半径、そして星の有効温度も大きく変動するため、星周囲の電離領域が生成、消滅を繰り返す様子が見られた。これが起きると UV フィードバックは間欠的にしか働かず、中心星へのガス降着を効率よく抑制することが出来ない。結果として、場合によっては 1000 太陽質量に近いような非常に大質量の初代星が形成される可能性を示した。最近の 3D 計算では、UV フィードバックと円盤分裂の効果によって初代星質量は下がる傾向があることが指摘されていたが、我々の結果はこれとは逆の可能性を指摘したものである。[7]

第一世代星形成における密度ゆらぎモデルの影響

宇宙論的シミュレーションの初期条件は観測的な制限のある始原的密度ゆらぎを元に作成されるが、第一世代星を形成する程度の小規模なゆらぎは観測解像度以下であり、理論モデルによって補完されている。将来観測される小スケールゆらぎが一般的に採用されているゆらぎと異なると、第一世代星の形成モデルに影響を及ぼす可能性がある。この影響の有

無について調べるため、小スケールの始原的密度ゆらぎを変えた場合の宇宙論的初期条件を用意し、それぞれ第一世代星の形成過程を調べた。数値シミュレーションの結果、ガス雲形成後の星形成シナリオはほぼ影響はないが、密度ゆらぎモデルによって第一世代星の形成時期と星質量が変化することを確認した。これは、もし将来の高解像度観測によって密度ゆらぎモデルが変更を受けた場合、第一世代星や宇宙初期の銀河形成のシナリオに影響が波及することを示唆している。[25]

Stream Velocity が宇宙初期の天体形成に及ぼす影響

Tseliakhovich & Hirata (2010) は従来のシミュレーションには含まれていなかった宇宙再結合期のバリオン・ダークマター間の速度差が宇宙初期の天体形成を左右する可能性について示唆した。速度差の大きさが第一世代星の形成に与える影響を系統的に調べるため、異なる速度差の元での星形成過程を宇宙論的シミュレーションより調べた。速度差が一定以上ある場合、ダークマターハローへのガス収縮が妨げられて星形成が遅れる。このとき星形成ガス雲の質量が増大するが、一方ジーンズ質量はそれに対して十分小さく、ガス雲は分裂して複数の星形成サイトとなる。これは初代星からなる星団の形成可能性を示唆している。また極めて大きな速度差の元では、ガス雲が大質量・高温となるまで星形成が阻害される。このガス雲全体が重力不安定となって収縮すると、大質量星が形成される。

原始揺らぎの非ガウス性がブラックホールの形成・成長に与える影響

標準的な宇宙モデルでは原始の揺らぎの種はガウス統計に従うとされ、観測的にも非ガウス性は極めて小さいとされている。これまでの制限は主に大スケールの揺らぎの観測に基づくものであるため、スケールに依存する非ガウス性を考えることで観測の制限をクリアしつつも小スケールで構造形成を変えるようなモデルを考えることができる。本研究では高赤方偏移で見つかった巨大なブラックホールを持つクエーサーに注目し、そのような巨大なブラックホールを形成するための理論上の困難を解消するために非ガウス性が有用かどうか議論した。我々はガウス初期条件及び非ガウス初期条件に基づく2つの宇宙論的N体計算から、ブラックホールの形成や成長に対する非ガウス性の影響を調査した。その結果、ブラックホールの数密度は正の歪度を持つ非ガウス初期条件の元で増加することが分かった。さらに、ハローの合体史に違いが生じ、その結果、最も重いブラックホールについて質量や数密度が増加し得ることを示した。[19]

超大質量星形成における間欠的質量降着と紫外線フィードバック

初期宇宙の超巨大ブラックホール (BH) 形成モデルの一つでは、太陽の10万倍程度の質量を持つ超大質量星が急速ガス降着により形成されることを仮定している。しかしながら、このガス降着の過程で放出される紫外線放射は降着を抑制する (フィードバック) 可能性があり、実際に超大質量星が形成されるかどうかについてはまだ議論の余地がある。そこで本研究では、超大質量星形成過程でフィードバックが起きるかどうかを明らかにする。まず2次元流体シミュレーションを行い、これにより星に降り積もるガスの降着率を求める。次にこの現実的な降着率を用いて、星の進化の計算を行い、星から放出される紫外線放射量を求める。2次元の流体シミュレーションから得た降着率は、平均で毎年0.3太陽質量程度で、100-1000年程度の間隔で間欠的に変動するものであった。降着率が激しく変動するにもかかわらず、星の進化計算では、星が常に膨張し続け表面温度が低く保たれるために、フィードバックが効かない程度に紫外線放射量が少なく保たれるという結果になった。これにより超大質量星は、少なくとも1万太陽質量程度までは成長できることが分かった。

宇宙論的環境下での Direct Collapse シナリオによる SMBH の形成可能性

近年 $z \sim 7$ の初期宇宙において、すでに $10^9 M_{\odot}$ の質量を持った超大質量ブラックホール (SMBH) が存在する事が明らかになってきた。形成過程に関しては、初期宇宙において非常に特殊な環境下に存在するガス雲から超大質量星を経て $\sim 10^5 M_{\odot}$ の BH が形成される Direct Collapse (DC) シナリオが提唱されている。この BH は観測された SMBH の種となることが期待される。DC に関しては様々な研究がなされているが、現在のところ宇宙論的な状況で実際に超大質量星が形成される過程は確かめられていない。そこで本研究では、DC が宇宙論的な環境下で起こりうるかを検証した。具体的な計算は、宇宙論的な初期条件から始める数値計算を Gadget を用いて行う。DC は非常に低金属なガス雲で、かつ非常に放射の強い状況で起こると考えらる。このためにも、(1) 星形成活動による金属汚染の過程、(2) 近傍銀河からの放射強度の計算、(3) 放射場のもとのガス雲の進化、を考慮する必要がある。本研究においては、N体計算をもとに準解析的に星形成史を再現することで (1)、(2) を考慮する。次に、得られた DC 候補ガス雲の進化を流体計算することで (3) の過程を追う。結果的に、20 Mpc/h のシミュレーション領域内で2例の超大質量星が形成され始めることを確認した。得られた DC の数密度は先行研究に比べて1桁ほど小さい。これは今まで DC シナリオにおいて考慮されて来なかった周囲からの環境効果 (潮汐力、ram pressure、など) に起因する。

低金属量ガス雲の重力収縮と星形成

銀河系外縁部 (ハロー) において発見されている極低金属量 ($\sim 10^{-5}$ 太陽金属量) かつ小質量 (1 太陽質量以下) の星の形成過程は明らかになっていない。低金属量においてもダストによる放射冷却が効果的となり、ガス雲が不安定となり分裂することで小質量星が形成されると考えられている。本研究ではガス雲の分裂条件を求めるために、ダストモデルについて詳細に扱いつつ、様々な金属量 (10^{-6} – $10^{-3} Z_{\odot}$; Z_{\odot} は太陽金属量) でガス雲の収縮シミュレーションを行った。まず、初期宇宙におけるダストの供給源は主に初代星の超新星であることから、初代星の超新星モデルと整合的に求められたダストの性質 (金属の凝縮率、ダスト組成、サイズ分布) を初期条件として用いる。また、分子雲中のダスト成長を 3 次元シミュレーションにおいて初めて考慮した [60]。そして 4 つのガス雲に対し、ポロノイ図を用いた粒子分割法 [6, 60] で収縮中心の解像度を高めつつ計算した。

まず、ダスト冷却によって分裂が促進されると先行研究では考えられていたのに対し、ダスト冷却が不十分である $10^{-6} Z_{\odot}$ のガス雲 1 個について分裂が見られた。このことから、分裂条件は金属量のみによって決まるわけではないことがわかる。ただし、 $10^{-6} Z_{\odot}$ において、分裂は中心の原始星の降着円盤上で起きたのに対し、 $> 10^{-5} Z_{\odot}$ では、ダスト冷却によってフィラメント状に伸長したガス雲中で分裂が起きた。このように分裂の二つのモードを一連のシミュレーションで確認したのは本研究が初めてである。

また、 $> 10^{-5} Z_{\odot}$ において大半のガス雲について分裂が見られなかった。 $10^{-5} Z_{\odot}$ において、2 つのガス雲に対してダスト冷却が不十分であり分裂が見られず、1 つのガス雲については水素分子生成に伴う加熱によってガスが安定化し、ダスト冷却が十分であっても分裂が抑制された。 10^{-4} – $10^{-3} Z_{\odot}$ についてはほぼすべてのガス雲に対して水素分子生成加熱により分裂が見られなかった。ただし、 $10^{-4} Z_{\odot}$ において、1 つのガス雲のみ OH 分子による冷却でガスの変形が促進され、続くダスト冷却により小質量の分裂片への分裂が見られた。OH 分子冷却がガス雲の分裂に関与することは本研究で初めて示されたものである。このようにガス雲によって効果的となる熱的過程が異なるのは、収縮時間の違いによって断熱圧縮加熱率が異なり、化学組成と放射冷却率に違いが現れたためである。本研究により、金属量だけではなく、収縮時間もガス雲の分裂条件を決定し得ることが初めて明らかになった [60, 68, 70, 78, 110, 122, 159]。

原始惑星系円盤の光蒸発

原始惑星系円盤は、有限の時間で消失してしまうことが知られており、この有限の時間のことを原始惑星系円盤の寿命と呼ぶ。太陽近傍星団の円盤寿命が 3–6 百万年であるのに対して、低金属量環境下 ($[O/H] \sim -0.7$ dex) の円盤寿命は平均的に百万年以下と、明らかに互いに異なる円盤寿命の振る舞いを示す。本研

究では、原始惑星系円盤の光蒸発過程を流体シミュレーションし、原始惑星系円盤寿命の金属量依存性を明らかにすることが目的である。

本研究の段階的過程として、静流体力学的に円盤の熱化学構造を解くことで EUV+FUV 光蒸発率の金属量依存性を見積もった。結果として、EUV+FUV 光蒸発率の金属量依存性は大きく分けて二つの特徴を示すことを明らかにした。一つ目は FUV 照射の有無に関わらず低金属量ほど光蒸発率が高いこと、二つ目は FUV 加熱の光蒸発への寄与は円盤系の金属量が太陽金属量に近づくほど大きくなることである。将来的には、単純化した (静的な) 円盤モデルを構築した後、光蒸発の流体シミュレーションをすることが必要とされる。

5.1.4 超新星爆発

音響メカニズムによる重力崩壊型超新星爆発の系統的研究

重力崩壊型超新星爆発とは、 $8 M_{\odot}$ 以上の大質量星がその最期に爆発を起こす現象である。そのメカニズムの最有力候補は、中心の原始中性子星が放射するニュートリノが周囲を加熱することで爆発するニュートリノ加熱メカニズムである。一方で、原始中性子星が放射する音波による加熱が爆発を起こす音響メカニズムという仮説も提唱されている。これは数値計算での再現が難しく、爆発に必要な音波強度や、実際に放射される音波強度はまだ議論が収束していない。

そこで、本研究では簡易モデル化した超新星に音波を注入し、爆発に必要な音波強度を系統的に調べた [76, 107]。その結果、特に強い音波を入れないと爆発しなかったモデルは、ニュートリノ加熱だけで爆発する場合と比較して高いエネルギー注入率が必要になった。この振る舞いの原因として、音波で加熱された流体は即座にニュートリノ放射で冷却されるため加熱効率が悪くなるという機構などを指摘した [84, 100]。

<受賞>

- [1] 藤井友香「惑星光による系外地球型惑星の表層環境の推定：将来の直接撮像観測にむけて」、第 3 2 回 (2015 年度) 井上研究奨励賞、井上科学財団、2016 年 2 月 4 日。

<報文>

(原著論文)

- [2] Akira Harada: “Structure formation in a mixed dark matter model with decaying sterile neutrino: the 3.5 keV X-ray line and the Galactic substructure”, Harada, A. & Kamada, A. (2016) JCAP, 1, 031
- [3] Anupreeta More, Masamune Oguri, Issha Kayo, Joel Zinn, Michael A. Strauss, Basilio X. Santiago, Ana M. Mosquera, Naohisa Inada, et al. “The

- SDSS-III BOSS Quasar Lens Survey: Discovery of 13 Gravitationally Lensed Quasars”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **456** (2016) 1595-1606
- [4] Bunyo Hatsukade, Yoichi Tamura, Daisuke Iono, Yuichi Matsuda, Masao Hayashi, & Masamune Oguri: “High-Resolution ALMA Observations of SDP.81. II. Molecular Clump Properties of a Lensed Submillimeter Galaxy at $z = 3.042$ ”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **67** (2015) 93
- [5] Daichi Suto, Tetsu Kitayama, Ken Osato, Shin Sasaki & Yasushi Suto: “Confrontation of top-hat spherical collapse against dark halos from cosmological N-body simulations”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2016, 68, 14
- [6] Gen Chiaki, & Naoki Yoshida 2015, *MNRAS*, 451, 3955
- [7] Hosokawa, T., Hirano, S., Kuiper, R., Yorke, H.W., Omukai, K., & Yoshida, N.: “Formation of Massive Primordial Stars: Intermittent UV Feedback with Episodic Mass Accretion” *ApJ*, (2016), in press
- [8] Inutsuka, S., Inoue, T., Iwasaki, K., & Hosokawa, T.: “The formation and destruction of molecular clouds and galactic star formation. An origin for the cloud mass function and star formation efficiency” *A & A*, **580** (2015) 49
- [9] James E. Geach, et al. (including Masamune Oguri): “The Red Radio Ring: A Gravitationally Lensed Hyperluminous Infrared Radio Galaxy at $z = 2.553$ Discovered through the Citizen Science Project SPACE WARPS”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **452** (2015) 502-510
- [10] James H. H. Chan, Sherry H. Suyu, Tzihong Chiueh, Anupreeta More, Philip J. Marshall, Jean Coupon, Masamune Oguri, & Paul Price: “Chitah: Strong-Gravitational-Lens Hunter in Imaging Surveys”, *The Astrophysical Journal*, **807** (2015) 138
- [11] Kento Masuda: “Spin–Orbit Angles of Kepler-13Ab and HAT-P-7b from Gravity-darkened Transit Light Curves,” *The Astrophysical Journal*, **805** (2015) 28
- [12] Kento Masuda, Sho Uehara, & Hajime Kawahara: “Absolute Dimensions of a Flat Hierarchical Triple System KIC 6543674 from the Kepler Photometry,” *The Astrophysical Journal Letters*, **806** (2015) L37
- [13] Kento Masuda & Yasushi Suto: “Transiting planets as a precision clock to constrain the time variation of the gravitational constant,” *Publications of the Astronomical Society of Japan* 2016; doi: 10.1093/pasj/psw017
- [14] Kiyotomo Ichiki, Chul-Moon Yoo, & Masamune Oguri: “Relationship between the CMB, Sunyaev-Zel’dovich Cluster Counts, and Local Hubble Parameter Measurements in a Simple Void Model”, *Physical Review D*, **93** (2016) 023529
- [15] Masamune Oguri: “Predicted Properties of Multiple Images of the Strongly Lensed Supernova SN Refsdal”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **449** (2015) L86-L89
- [16] Masato Shirasaki, Takashi Hamana & Naoki Yoshida: “Probing cosmology with weak lensing selected clusters - I. Halo approach and all-sky simulations”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 453, Issue 3, p.3043-3067
- [17] Masato Shirasaki, Shunsaku Horiuchi & Naoki Yoshida: “Cross-correlation of the extragalactic gamma-ray background with luminous red galaxies”, *Physical Review D*, Volume 92, Issue 12, id.123540
- [18] Masato Shirasaki, Takashi Hamana & Naoki Yoshida: “Probing cosmology with weak lensing selected clusters. II. Dark energy and $f(R)$ gravity models”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 68, Issue 1, id.414
- [19] Melanie Habouzit, Marta Volonteri, Muhammad Latif, Takahiro Nishimichi, Sebastien Peirani, Yohan Dubois, Gary A. Mamon, Joseph Silk & Jacopo Chevallard: “Black hole formation and growth with non-Gaussian primordial density perturbations”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **456** (2016) 1901
- [20] Nadia L. Zakamska, et al. (including Masamune Oguri): “Star Formation in Quasar Hosts and the Origin of Radio Emission in Radio-Quiet Quasars”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **455** (2016) 4191-4211
- [21] Ryota Kawamata, Masafumi Ishigaki, Kazuhiro Shimasaku, Masamune Oguri, & Masami Ouchi: “The Sizes of $z \sim 6 - 8$ Lensed Galaxies from the Hubble Frontier Fields Abell 2744 Data”, *The Astrophysical Journal*, **804** (2015) 103
- [22] Ryota Kawamata, Masamune Oguri, Masafumi Ishigaki, Kazuhiro Shimasaku, & Masami Ouchi: “Precise Strong Lensing Mass Modeling of Four Hubble Frontier Field Clusters and a Sample of Magnified High-Redshift Galaxies”, *The Astrophysical Journal*, **819** (2016) 114
- [23] S. Colombi, T. Sousbie, S. Peirani, G. Plum & Y. Suto, “Vlasov versus N-body: the Hénon sphere”, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 450, 3724(arXiv:1504.07337)
- [24] Satoshi Miyazaki, Masamune Oguri, Takashi Hamana, Masayuki Tanaka, Lance Miller, Yousuke Utsumi, Yutaka Komiyama, Hisanori Furusawa, et al.: “Properties of Weak Lensing Clusters Detected on Hyper Suprime-Cam’s 2.3 deg² Field”, *The Astrophysical Journal*, **807** (2015) 22

- [25] Shingo Hirano, Nick Zhu, Naoki Yoshida, David Spergel & Harold W. Yorke: “Early Structure Formation from Primordial Density Fluctuations with a Blue Tilted Power Spectrum” *The Astrophysical Journal*, **814** (2015) 18
- [26] Sho Uehara, Hajime Kawahara, Kento Masuda, Shin’ya Yamada, & Masataka Aizawa: “Transiting Planet Candidates Beyond the Snow Line Detected by Visual Inspection of 7557 Kepler Objects of Interest,” arXiv:1602.07848
- [27] Shoya Kamiaka, Kento Masuda, Yuxin Xue, Yasushi Suto, Tsubasa Nishioka, Risa Murakami, Koichiro Inayama, Madoka Saitoh, Michisuke Tanaka, & Atsunori Yonehara: “Revisiting a gravity-darkened and precessing planetary system PTFO 8-8695: A spin-orbit non-synchronous case”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **67** (2015) 94
- [28] Taizo Okabe, Toshiya Kashiwagi, Yasushi Suto, Shuji Matsuura, Yasuo Doi, Satoshi Takita, & Takafumi Ootsubo: “Image stacking analysis of SDSS galaxies with AKARI Far-Infrared Surveyor maps at $65\mu\text{m}$, $90\mu\text{m}$, and $140\mu\text{m}$ ” *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **68** (2016) 17
- [29] Teppei Okumura, Chiaki Hikage, Tomonori Totani, Motonari Tonogawa, Hiroyuki Okada, Karl Glazebrook, Chris Blake, Pedro G. Ferreira, Surhud More, Atsushi Taruya, Shinji Tsujikawa, Masayuki Akiyama, Gavin Dalton, Tomot-sugu Goto, Takashi Ishikawa, Fumihide Iwamuro, Takahiko Matsubara, Takahiro Nishimichi, Kouji Ohta, Ikkoh Shimizu, Ryuichi Takahashi, Naruhisa Takato, Naoyuki Tamura, Kiyoto Yabe & Naoki Yoshida: “The Subaru FMOS galaxy redshift survey (FastSound). IV. New constraint on gravity theory from redshift space distortions at $z \sim 1.4$ ”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, accepted (2016, arXiv:1511.08083)
- [30] Tommaso Treu, Gabriel B. Brammer, Jose M. Diego, Claudio Grillo, Patrick L. Kelly, Masamune Oguri, Steven A. Rodney, Piero Rosati, et al.: ““Refsdal” Meets Popper: Comparing Predictions of the Re-Appearance of the Multiply Imaged Supernova behind MACSJ1149.5+2223”, *The Astrophysical Journal*, **817** (2016) 60
- [31] Toshiya Kashiwagi and Yasushi Suto, “Constraining spatial extent and temperature of dust around galaxies from far-infrared image stacking analysis”, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, **451**, 4162(arXiv:1506.00902)
- [32] Yoichi Tamura, Masamune Oguri, Daisuke Iono, Bunyo Hatsukade, Yuichi Matsuda, & Masao Hayashi: “High-Resolution ALMA Observations of SDP.81. I. The Innermost Mass Profile of the Lensing Elliptical Galaxy Probed by 30 Milli-Arcsecond Images” *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **67** (2015) 72
- [33] Yong-Seon Song, Atsushi Taruya, Eric Linder, Kazuya Koyama, Cristiano G. Sabiu, Gong-Bo Zhao, Francis Bernardeau, Takahiro Nishimichi & Teppei Okumura: “Consistent modified gravity analysis of anisotropic galaxy clustering using BOSS DR11”, *Physical Review D*, **92** (2015) 043522
- [34] Yuxin Xue and Yasushi Suto, “Difficulty in Formation of Counter-orbiting Hot Jupiters from Near-coplanar Hierarchical Triple Systems: A Substellar Perturber”, *The Astrophysical Journal*, **820**, 55(17pp) (arXiv:1602.04428)
- [35] Yuya Sakurai, Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida, Harold W. Yorke, “Formation of primordial supermassive stars by burst accretion”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume **452**, p.755-764 (2015)
- [36] Yuya Sakurai, Eduard I. Vorobyov, Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida, Kazuyuki Omukai, Harold W. Yorke, “Supermassive star formation via episodic accretion: protostellar disc instability and radiative feedback efficiency”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, accepted (2016, arXiv:1511.06080)
- (国内雑誌)
- [37] 須藤 靖: 朝日新聞 asahi.com webronza 科学・環境 論説 2015年4月16日、6月1日、7月10日、8月6日、9月11日、10月20日、2015年1月8日、1月22日
- [38] 須藤 靖: “サイエンス最前線 3 8 : パンスターズ地球に衝突する小天体を監視”、週刊エコノミスト 2015年4月15日号, pp.72-73.
- [39] 須藤 靖: 物理科学、この30年: “宇宙論”、パリティ **30**(2015)5月号, pp.6-8.
- [40] 須藤 靖: “サイエンス最前線 4 2 : SETI 今も進行中 地球外文明発見プロジェクト”、週刊エコノミスト 2015年5月19日号, pp.64-65.
- [41] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その三十: 大学の存在意義”、東京大学出版会 UP **512**(2015)6月号, pp.24-29.
- [42] 須藤 靖: “サイエンス最前線 4 6 : GAIA 10億個の星の精密3次元地図作り”、週刊エコノミスト 2015年6月16日号, pp. 68-69.
- [43] 須藤 靖: “サイエンス最前線 5 0 : LSST 「広く、速く、深く」で拓く新たな天文学”、週刊エコノミスト 2015年7月14日号, pp. 76-77.
- [44] 須藤 靖: “サイエンス最前線 5 4 : 太陽系外惑星ほんの20年前まで存在しないと信じられていた”、週刊エコノミスト 2015年8月11・18日号, pp.80-81.
- [45] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その三十一: 再現性のない世界”、東京大学出版会 UP **515**(2015)9月号, pp.22-30.
- [46] 須藤 靖: “サイエンス最前線 5 8 : 系外惑星リングの発見? 土星の200倍サイズのリングを持つ天体”、週刊エコノミスト 2015年9月15日号, pp.74-75.

- [47] 須藤 靖: “サイエンス最前線 6 2 : Advanced LIGO 一般相対論 100 年、重力波が直接検出されるか”、週刊エコノミスト 2015 年 10 月 13 日号, pp.70–71.
- [48] 須藤 靖: “サイエンス最前線 6 6 : ニュートリノをめぐる冒険 (1) 素粒子の階層と太陽ニュートリノ問題”、週刊エコノミスト 2015 年 11 月 10 日号, pp.70–71.
- [49] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その三十二: 「青木まりこ現象」にみる科学の方法論”、東京大学出版会 UP 518(2015)12 月号, pp.24–31.
- [50] 須藤 靖: “サイエンス最前線 7 0 : ニュートリノをめぐる冒険 (2) 大気ニュートリノ問題とニュートリノ質量”、週刊エコノミスト 2015 年 12 月 8 日号, pp.78–79.
- [51] 須藤 靖: “サイエンス最前線 7 4 : アイスキューブ南極の水が宇宙線の謎を解明する”、週刊エコノミスト 2016 年 1 月 12 日号, pp.42–43.
- [52] 須藤 靖: “宇宙の加速膨張と高知家”、文藝春秋 巻頭エッセイ 2016 年 2 月号, pp.88–89.
- [53] 須藤 靖: “サイエンス最前線 7 8 : 現代天文学による占星術? 超新星重力レンズの理論予言が的中”、週刊エコノミスト 2016 年 2 月 9 日号, pp.70–71.
- [54] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その三十三: アインシュタイン、エディントン、マンドル”、東京大学出版会 UP 521(2016)3 月号, pp.39–46.
- [55] 須藤 靖: “サイエンス最前線 8 2 : 重力波直接検出 アインシュタインの予言以来 100 年後の快挙”、週刊エコノミスト 2016 年 3 月 8 日号, pp.74–75.
- [56] 須藤靖: 日本経済新聞 書評 2016 年 3 月 13 日
(学位論文)
- [57] Ken Osato: “Cosmology with Weak Gravitational Lensing and Sunyaev-Zel’dovich Effect” (修士論文)
- [58] Taizo Okabe: “Far-infrared emission from SDSS galaxies in AKARI all-sky maps: Image stacking analysis and its implications for galaxy clustering” (修士論文)
- [59] 仲谷峻平: “原始惑星系円盤の光蒸発” (修士論文)
- [60] Gen Chiaki, “Chemo-thermal evolution of collapsing gas clouds and the formation of metal-poor stars (収縮ガス雲の熱化学進化と低金属量星の形成過程)” 2016, Ph. D. Thesis, Univ. of Tokyo
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [61] Shingo Hirano: “First Star Formation with the Stream Velocity”; South By High Redshift (USA, 4/1-4/3, 2015)
- [62] Ryohei Nakatani: “Metallicity Dependence of Protoplanetary Disks’ Lifetime”; Star/Planet Formation Meeting (Tokyo, 4/9, 2015)
- [63] Shoya Kamiaka, Kento Masuda, Yuxin Xue, Yasushi Suto, Tsubasa Nishioka, Risa Murakami, Koichiro Inayama, Madoka Saitoh, Michisuke Tanaka, & Atsunori Yonehara: “Recharacterization of a gravity darkened and precessing planetary system PTFO 8-8695”; Emerging Researchers in Exoplanet Science Symposium (State College, 5/28-29, 2015)
- [64] Shoya Kamiaka, Kento Masuda, Yuxin Xue, Yasushi Suto, Tsubasa Nishioka, Risa Murakami, Koichiro Inayama, Madoka Saitoh, Michisuke Tanaka, & Atsunori Yonehara: “Recharacterization of a gravity darkened and precessing planetary system PTFO 8-8695”; 3rd DTA Symposium The Origins of Planetary Systems: from the Current view to New Horizons (Tokyo, 6/1-4, 2015)
- [65] Naoki Yoshida: “Cross-correlation with Weak Lensing”, Physics of the intra-cluster medium (Garching, Germany, June 15, 2015)
- [66] Shingo Hirano: “Effect of Various Streaming Velocities on the First Star Formation”; First stars, galaxies and black holes: Now and Then (Netherlands, 6/15-6/19, 2015)
- [67] Yuya Sakurai: “Supermassive star formation in the early universe with burst accretion for formation of SMBH seeds”; First stars, galaxies, and black holes: Now and Then (Groningen, Netherlands, 6/15-19, 2015)
- [68] Gen Chiaki, “Studying star formation at low metallicity with SPH simulations”, First stars, galaxies, and black holes: Now and Then (Groningen, Netherlands, June 15–19, 2015)
- [69] 細川 隆史: “Formation of Massive Primordial Stars: intermittent UV feedback with episodic mass accretion” symposia “Understanding the growth of the first supermassive black holes” in EWASS 2015 meeting (Tenerife, Spain, 6/22, 2015)
- [70] Gen Chiaki, “Star formation in the low-metallicity gas clouds”, EWASS 2015 (La Laguna, Spain, June 22–26, 2015)
- [71] Yuya Sakurai: “Supermassive star formation in the early universe with burst accretion for formation of SMBH seeds”; EWASS 2015 (La Laguna, Spain, 6/22-26, 2015)
- [72] Yuya Sakurai: “Evolution of massive protostars and protostellar outflows in numerical simulations”; Star Formation Workshop 2015 (Mitaka, 6/29-7/1, 2015)
- [73] Ken Osato, Masato Shirasaki, and Naoki Yoshida: “Impact of Baryonic Effects on Weak Lensing Cosmology: Higher-Order Statistics and Parameter Bias”; Accurate Astrophysics. Correct Cosmology. (London, 07/15)
- [74] Ken Osato, Masato Shirasaki, and Naoki Yoshida: “Investigating the σ_8 tension by the cross-correlation of tSZ and cosmic shear”; Theoretical

- and Observational Progress on Large-scale Structure of the Universe (Munich, 07/20-24)
- [75] Kento Masuda: “Spin-orbit angle of Kepler-13Ab from gravity-darkened transit light curves,” Dynamical Problems in Extrasolar Planets Science (Focus Meeting 1), IAU XXIX General Assembly, Honolulu, Hawaii, August, 2015
- [76] Akira Harada, Wakana Iwakami, Hiroki Nagakura, Shoichi Yamada: “Systematic study of acoustic mechanisms for core-collapse supernovae”; Numazu Workshop 2015, (Poster, Shizuoka, Japan, 9/1-4, 2015)
- [77] Yuya Sakurai: “Supermassive star formation via episodic accretion: protostellar disk instability and radiative feedback efficiency”; Cosmology and first light (Paris IAP, 12/7-10, 2015)
- [78] Gen Chiaki, “Numerical simulations of low-metallicity collapsing gas clouds”, Cosmology and First Light (Paris, France, December 7-10, 2015)
- [79] N. Hayatsu & ALMA Deep Field in SSA22 (ADF22) team: “The Search for $z \sim 6.3$ [CII] Emitters in ALMA Cycle 2 deep survey data”; ALMA East Asia workshop (Osaka, 12/8-12/11, 2015)
- [80] Masamune Oguri: “Updates from Cluster WG”; Subaru Hyper Suprime-Cam Survey Collaboration Meeting (Taipei, Taiwan, January 2016)
- [81] Takahiro Nishimichi: “Simulation Effort for a Galaxy-Galaxy Lensing Emulator + Covariance”, HSC Collaboration Meeting Weak Lensing Working Group, Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics, Taipei (Oral presentation, January 12, 2016)
- [82] Yasushi Suto: “Hot Jupiters from near-coplanar hierarchical triple systems”, International Workshop on “Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity III”, February 23, 2016 at Ishigaki Island, Japan.
- [83] Masataka Aizawa: “Search for planetary rings around long-period planets in Kepler photometric data”, International Workshop on “Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity III”, February 24, 2016 at Ishigaki Island, Japan.
- [84] Akira Harada, Wakana Iwakami, Shoichi Yamada: “Systematic study of the acoustic mechanism for core-collapse supernovae”; 18th Workshop on Nuclear Astrophysics, (Oral, Kreuth, Germany, 3/14-19, 2016)
- 招待講演
- [85] Naoki Yoshida: “Formation of Primordial Stars”, South by High-Redshift (Austin, USA, April 1, 2015)
- [86] Naoki Yoshida: “Formation of Early Blackholes”, Olympian Symposium (Paralia, Greece, May 20, 2015)
- [87] Yasushi Suto: “Beyond the spherical dust collapse model”, Kyoto YITP-IAP workshop “Vlasov-Poisson: towards numerical methods without particles”, June 2, 2015, Yukawa Institute, Kyoto, Japan.
- [88] Takahiro Nishimichi, Francis Bernardeau, Atsushi Taruya: “Response function of the large-scale structure of the universe to the small scale inhomogeneities”, Vlasov-Poisson : towards numerical methods without particles, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University (June 2, 2015)
- [89] 細川 隆史: “The First Star Formation: towards understanding the mass spectrum” conference “First stars, galaxies, and black holes; Now and Then” (Groningen, Netherland, 6/16, 2015)
- [90] Naoki Yoshida: “From the First Stars to Massive Blackholes”, First stars, galaxies, and black holes: now and then (Groningen, Netherland, June 18, 2015)
- [91] Naoki Yoshida: “Statistical Computational Cosmology”, Big Data Application Symposium (Tokyo, Japan, August 1, 2015)
- [92] Masamune Oguri: “The image plane approach to cosmic telescopes”; IAU XXIX General Assembly Focus Meeting 22: “The Frontier Fields: Transforming our Understanding of Cluster and Galaxy Evolution” (Honolulu, USA, August 2015)
- [93] 細川 隆史: “Formation of Massive Primordial Stars and Origins of SMBHs” 国際スクール型研究会: High-energy Astrophysics & Astroparticle physics 2015 (KEK 理論センター, 10/7, 2015)
- [94] Naoki Yoshida: “Formation of the First Stars in the Universe”, Quarks to Universe in Computational Science (Nara, Japan, November 8, 2015)
- [95] Yasushi Suto: “Beyond a pale blue dot”, The 2015 Kyoto Prize Workshop in Basic Sciences “Formation mechanism of planetary systems and the quest for earth-twins”, November 12, 2015, Kyoto, Japan.
- [96] Naoki Yoshida: “Simulations of the formation of large-scale structure”, Dark Side of the Universe (Kyoto, Japan, December 15, 2015)
- [97] N. Hayatsu & ADF22 team: “The Search for $z \sim 6.3$ [CII] Emitters in ALMA Cycle 2 deep survey data”; ALMA Deep survey workshop (Mitaka, 12/15-12/16, 2015)
- [98] Naoki Yoshida: “Multi-Component Cosmological Simulations”, SPPEXA Annual Meeting (Garching, Germany, January 26, 2016)
- [99] Naoki Yoshida: “Statistical Computational Cosmology”, JST Symposium on Big Data Application (Tokyo, March 5, 2016)

- [100] Akira Harada, Wakana Iwakami, Shoichi Yamada: “Systematic study of the acoustic mechanism for core-collapse supernovae”; The Second ALPS Symposium on Photon Science, (Oral, Tokyo, Japan, 3/29, 2016)
- (国内会議)
一般講演
- [101] 杉山 尚徳: “kSZ 効果の理論モデルの構築”; 日本天文学会秋季年会 (甲南大学, 9/9-11, 2015)
- [102] 須藤大地: “ダークマターの速度分散の成長とハローの自己相似的進化”; 天文学会 2015 年秋季年会 (甲南大学, 9/9, 2015)
- [103] 仲谷峻平: “原始惑星系円盤の光蒸発 I; 輻射流体コードの開発”; 日本天文学会 2015 年秋季年会 (甲南大学, 9/9-9/11, 2015)
- [104] 櫻井祐也: “Supermassive stars forming with episodic accretion in the early universe”; 日本天文学会 2015 年秋季年会 (甲南大学, 9/9-11, 2015)
- [105] 細川 隆史: “初代星形成におけるバースト降着と間欠的 UV フィードバック” 天文学会 2015 年秋季年会 (甲南大学, 9/10, 2015)
- [106] Sunmyon Chon, Shingo Hirano, Takashi Hosokawa, & Naoki Yosida ”宇宙論的環境下での Direct Collapse シナリオによる SMBH の形成可能性” 天文学会 2015 年秋季年会 (甲南大学, 9/10, 2015)
- [107] 原田了, 岩上わかな, 長倉洋樹, 山田章一: “音響メカニズムによる重力崩壊型超新星爆発の系統的研究”; 天文学会 2015 年秋季年会 (口頭発表, 兵庫, 9/9-11, 2015)
- [108] 上赤 翔也, 増田賢人, Yuxin Xue, 須藤靖, 西岡翼, 村上里茶, 稲山廣一郎, 斎藤まどか, 田中道祐, 米原厚憲: “重力減光とスピン-軌道歳差運動を起こす系外惑星系 PTFO 8-8695 のトランジット光度曲線の再解析”; 日本天文学会 2015 年秋季年会 (甲南大学, 9/9-11, 2015)
- [109] 平野 信吾: “Streaming Velocity による宇宙初期の大質量ブラックホール形成”; 日本天文学会 2015 年秋季年会 (甲南大学, 9/9-9/11, 2015)
- [110] 千秋元, 「低金属量ガス雲の重力収縮シミュレーション」、星形成の諸階層—銀河から惑星まで—、(フォーレスト箱根, 2015 年 9 月 14~16 日)
- [111] 平野 信吾: “Streaming Velocity による宇宙初期の大質量ブラックホール形成”; 星形成の諸階層 -銀河から惑星まで- (箱根, 9/14-9/16, 2015)
- [112] 櫻井祐也: “始原ガス中での超大質量星形成と間欠的降着: 輻射フィードバックの影響”; 星形成の諸階層 (箱根, 9/14-16, 2015)
- [113] 細川 隆史: “初代星形成におけるバースト降着と間欠的 UV フィードバック” 研究会” 星形成の諸階層” (箱根, 9/16, 2015)
- [114] 大栗 真宗: “Mapping Dark Matter”; 新学術領域「なぜ宇宙は加速するのか?-徹底的究明と将来への挑戦-」 発足シンポジウム (カブリ IPMU, 9/20, 2015)
- [115] 細川 隆史: “Formation of Massive Primordial Stars and Origins of SMBHs” 「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第 3 回ワークショップ (甲南大学, 10/17, 2015)
- [116] 櫻井祐也: “間欠的質量降着による超大質量星形成と輻射フィードバック”; 超巨大ブラックホール研究推進連絡会 第 3 回ワークショップ (甲南大学, 10/17-18, 2015)
- [117] 平野 信吾: “Streaming Velocity による宇宙初期の大質量ブラックホール形成”; 超巨大ブラックホール研究推進連絡会 第 3 回ワークショップ (甲南大学, 10/17-10/18, 2015)
- [118] 西道 啓博, 吉田 直紀, 白崎 正人, 大里 健: “摂動理論と N 体計算を組み合わせた宇宙の大規模構造高速計算法の開発”、第 7 回「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム -多分野に広がる計算科学の発展と将来像-、筑波大学計算科学研究センター (ポスター講演, 2015 年 10 月 20 日)
- [119] 大栗 真宗: “超新星重力レンズ SN Refsdal の像の出現予測”; 第 4 回観測的宇宙論ワークショップ (京都大学, 11/18, 2015)
- [120] 大里 健, 関口 豊和, 白崎 正人, 鎌田 歩樹, 吉田 直紀: “Constraint on Mass of Light Gravitino from CMB Lensing and Cosmic Shear”; 第四回観測的宇宙論ワークショップ (基礎物理学研究所, 京都大学, 11/19)
- [121] 早津夏己, ADF22 team; “ALMA CYCLE2 サーベイデータを用いた $z = 6.3$ [CII] 輝線銀河探索”; 初代星・初代銀河研究会 2015 (群馬, 11/30 - 12/2)
- [122] 千秋元, 「低金属量ガス雲の熱的進化と低質量星形成」、初代星・初代銀河研究会 2015、(草津セミナーハウス, 2015 年 11 月 30 日~12 月 2 日)
- [123] 平野 信吾: “宇宙初期の天体形成における Streaming Velocity の影響”; 初代星・初代銀河研究会 (草津, 11/30-12/02, 2015)
- [124] 櫻井祐也: “超大質量星形成の降着段階における間欠的降着と輻射フィードバックの影響”; 初代星・初代銀河研究会 2015b (草津, 11/30-12/2, 2015)
- [125] Sunmyon Chon, Shingo Hirano, Takashi Hosokawa, & Naoki Yosida ”宇宙論的環境下での Direct Collapse シナリオによる SMBH の形成可能性” 初代星・初代銀河研究会 2015 at 草津温泉 (草津, 11/30, 2015)
- [126] 早津夏己, 吉田直紀, 松田有一, 清水一紘: “数値シミュレーションと ALMA 観測で探る遠方星形成史”; 若手銀河研究者研究会 (京都, 12/6 - 12/7)
- [127] 平野 信吾: “宇宙初期の天体形成における Streaming Velocity の影響”; 第 28 回理論懇シンポジウム (大阪大学, 12/23-12/25, 2015)
- [128] 櫻井祐也: “間欠的質量降着による超大質量星形成—星周円盤の不安定性と輻射フィードバック—”; 第 28 回理論懇シンポジウム 「宇宙における天体形成から生命まで」 (大阪大, 12/23-12/25, 2015)

- [129] 吉田 直紀, 白崎正人, 堀内俊: “Cross-correlation of cosmic shear with extragalactic gamma-ray background”; 高エネルギーガンマ線で見える極限宇宙 (東京大学柏キャンパス, 1/14, 2015)
- [130] 平野 信吾: “Supersonic Streams Drive the Formation of Cluster of / Supermassive First Stars”; 平成 27 年度 CfCA ユーザーズミーティング (水沢, 1/28-1/29, 2016)
- [131] 西道 啓博: “大規模宇宙論的シミュレーション群を用いた宇宙大規模構造の精密理論テンプレートの構築”; CfCA ユーザーズミーティング, 国立天文台水沢キャンパス (口頭講演, 2016 年 1 月 29 日)
- [132] 田中 賢, 吉川 耕司, 吉田 直紀: “6 次元位相空間上での Vlasov シミュレーションにおける高次精度化”; 日本天文学会 2016 年春季年会 (首都大学東京, 3/14-17, 2016)
- [133] 杉山 尚徳: “ハローパワースペクトルの展開法”; 日本天文学会春季年会 (首都大学東京, 3/14-17, 2016)
- [134] 増田賢人: “重力減光を用いた高温星まわりのウォームジュピターのスピン軌道角測定”; 日本天文学会 2016 年春季年会 (首都大学東京, 3/15 2016)
- [135] 増田賢人, 上原翔, 河原創: “3 重食連星系 KIC 6543674 の測光データによる構造決定”; 日本天文学会 2016 年春季年会 (首都大学東京, 3/14-17, 2016)
- [136] 逢澤正嵩, 上原翔, 増田賢人, 河原創, 須藤靖: “ケプラー測光データを用いた長周期惑星のリング探査”; 日本天文学会 2016 年春季年会 (首都大学東京, 3/15, 2016)
- [137] 岡部泰三, 柏木俊哉, 須藤靖, 松浦周二, 土井靖生, 瀧田 怜, 大坪貴文 “AKARI FIS 全天地図による SDSS 銀河のスタック解析”; 日本天文学会 2016 年春季年会 (首都大学東京, 3/16, 2016)
- [138] 西道 啓博, 高田 昌広, 吉田 直紀, 大里 健, 大栗 真宗, 白崎 正人, 浜名崇, 高橋 龍一: “大規模シミュレーション群に基づく銀河-銀河レンズ効果のエミュレータ”; 日本天文学会 2016 年春季年会, 首都大学東京南大沢キャンパス (口頭講演, 2016 年 3 月 16 日)
招待講演
- [139] 西道 啓博: “宇宙大規模構造の統計解析の現状と今後”; 研究会「天文学と統計的手法」、統計数理研究所 (2015 年 5 月 29 日)
- [140] 大栗 真宗: “サーベイ時代の宇宙論”; 2015 年度 第 45 回天文・天体物理若手夏の学校 (信州・戸倉上山田温泉, 7/27, 2015)
- [141] 須藤靖: “すぐ役に立つものはすぐ役に立たなくなるー昨今の大学をとりまく状況への懸念ー” 日本学術会議公開シンポジウム「人文・社会科学と大学のゆくえ」(2015 年 7 月 31 日)
- [142] 吉田 直紀: “広域宇宙撮像データによるビッグデータ宇宙論”; 情報論的学習理論と機械学習研究会 (愛媛大学, 9/15, 2015)
- [143] 西道 啓博: “大規模 N 体シミュレーション群を用いた宇宙大規模構造の精密理論モデルの構築”; 第 4 回観測的宇宙論ワークショップ, 京都大学基礎物理学研究所 (2015 年 11 月 18 日)
- [144] 須藤靖: “日本学術会議提言「これからの理科教育のあり方」について”; 日本物理学会第 71 回年次大会「物理学・天文学分野の参照基準」、東北学院大学 (2016 年 3 月 19 日)
(セミナー)
- [145] 細川 隆史: “ファーストスター誕生: コンピュータ中に再現された宇宙最初の星形成”; 天文学教室セミナー (東北大学, 4/15, 2015)
- [146] 細川 隆史: “Formation of Massive Primordial Stars”; 宇宙進化研究室コロキウム (大阪大学, 4/22, 2015)
- [147] 細川 隆史: “Formation of Massive Primordial Stars”; astrophysics seminar (Tubingen univ., Germany, 6/22, 2015)
- [148] 須藤靖: “加速する宇宙論”; 東京工業大学, 地球惑星教室セミナー (2015 年 6 月 24 日)
- [149] 須藤靖: “重力レンズ越しにみる夜空: 宇宙の果てから系外惑星へ”; 日本物理学会 2015 年度科学セミナー「物理学と光ー光の基礎と最先端研究ー」(2015 年 8 月 21 日)
- [150] Kento Masuda: “Obliquity and orbital precession of the Kepler-13A system probed with gravity-darkened transit light curves,” MIT Astrophysics Brown Bag Lunch Series, October, 2015
- [151] Takahiro Nishimichi: “Simulation effort for galaxy-galaxy lensing signal from SuMIRe-HSC”, Argonne National Laboratory, USA, (October 16, 2015)
- [152] 西道 啓博: “宇宙大規模構造の精密理論モデルと統計解析”; 弘前大学理工学部地球環境学科 (2015 年 10 月 26 日)
- [153] Sunmyon Chon, Shingo Hirano, Takashi Hosokawa, & Naoki Yosida “The formation of SMBH in cosmological simulation” Waseda (早稲田, 11/20, 2015)
- [154] 西道 啓博: “宇宙論の問題設定とゼルドビッチ近似”; 統計数理研究所 (2015 年 11 月 27 日)
- [155] 大栗 真宗: “超新星重力レンズの発見”; 東京大学天文学教室談話会 (東京大学, 11/24, 2015)
- [156] 平野 信吾: “Mass Distribution of Primordial Stars: Various Star Formation in the Early Universe”; 理論コロキウム (国立天文台, 12/9, 2015)
- [157] 西道 啓博: “On the nonlinear mode coupling in the gravitational growth of cosmic structures”; 早稲田大学理論宇宙物理学研究室 (2016 年 1 月 22 日)
- [158] 西道 啓博: “大規模シミュレーション群を用いた銀河-銀河レンズ効果の理論テンプレート構築”; 名古屋大学宇宙論研究室 (2016 年 2 月 18 日)
- [159] 千秋元, 「低金属量ガス雲の熱化学進化と星形成」(甲南大学, 2016 年 3 月 2 日)
(講演)
- [160] 須藤靖: “系外惑星から宇宙生物学へ”; 駿台学園天文講座 (2015 年 5 月 16 日)

- [161] 須藤靖: “宇宙を眺めて世界を知る”, 駿台予備学校講演会 (2015年6月27日)
- [162] 吉田直紀: “天の川探索: 現代宇宙論と宇宙考古学の交差点”サイエンスカフェ宇宙 2015 (多摩六都科学館, 7/5, 2015)
- [163] 吉田直紀: “ビッグデータ宇宙論”; ナガセ 大学学部研究会 (ガーデンシティ品川, 8/19, 2015)
- [164] 吉田直紀: “宇宙のダークマター”; 宇宙の進化を支配した暗黒物質 (朝日カルチャーセンター湘南教室, 9/12, 2015)
- [165] 吉田直紀: “宇宙はこうして生まれた”; コズミックフロントプラネタリウム版 座談会 (とよた科学体験館, 9/19, 2015)
- [166] 吉田直紀: “宇宙の夜明け”; 第19回自然科学研究機構シンポジウム (名古屋大学豊田講堂, 9/20, 2015)
- [167] 吉田直紀: “宇宙の夜明け -ファーストスターと超巨大ブラックホールの謎-”; 第31回湯川記念講演会 (大阪大学中之島センター, 10/11, 2015)
- [168] 須藤靖: “宇宙の起源について”, 三鷹市民大学 総合コース「科学」(2015年10月31日)
- [169] 吉田直紀: “ファーストスターと超巨大ブラックホールの謎”; 市民講演会「計算」から見える素粒子・原子核・宇宙の世界 (奈良春日野国際フォーラム I・RA・KA, 11/7, 2015)
- [170] 吉田直紀: “ファーストスター”; コズミックフロントプラネタリウム版 講演会 (豊橋市視聴覚教育センター, 2/21, 2016)

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、村尾美緒教授、添田彬仁助教、博士課程大学院生の秋笛清石氏、加藤晃太郎氏、宮崎慈生氏、新保厚氏、修士課程大学院生の山崎隼汰氏、坂井亮介氏のメンバーで、分散型量子情報処理、多体量子状態の量子情報的解析、量子力学基礎論、量子アルゴリズム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 分散型量子情報処理

分散型量子計算における2体ユニタリの符号化理論

局所操作古典通信 (LOCC) と事前共有されたエンタングルメントを用いた2体ユニタリの実装法を

解析した。特に、量子状態に関する完全にランダムな確率分布を考え、離れた2者間が所有している入力状態が、この確率分布を N 回利用して生成された N 個の量子状態であるときに、それぞれの量子状態に同じ2体ユニタリを施した状態を $N \rightarrow \infty$ の極限で漸近的に生成する方法を考え、量子状態1個あたりに必要な事前エンタングルメントおよび古典計算の必要最低量を求めた。その結果、2ラウンドの LOCC による実装法の場合、実装対象のユニタリによって決定される3体量子状態の「マルコフ化コスト」(本報告別節参照)が前述の必要最低量の上限を与えることが判明した。なお、このマルコフ化コストは必要最低量の下限でもあると予測される。本研究では、実装対象であるユニタリが与えられた際に、対応するマルコフ化コストを計算するための有限手順アルゴリズムも発見した。本研究は、電気通信大学の若桑江友里博士との共同研究である。[担当: 添田、村尾]

ネットワーク符号化によるユニタリ演算の実装可能性

クラスターネットワークやバタフライネットワーク上で実装可能なユニタリ演算の解析を行った。ネットワーク符号化は通信容量や通信方向に制限のある衛星通信や無線通信ネットワークなどで効率的な通信を達成するために、近年活発に研究されてきている。効率的な分散型量子計算を設計するためにネットワーク符号化を量子計算への応用が重要となる。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ネットワーク上で実装できるユニタリ演算を解析した。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開発し、それを用いることでバタフライ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。次に、クラスターネットワークで実装不可能なユニタリ演算の非自明な集合を解明した。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。本結果は、クラスターネットワークをベースとしたユニタリ演算の新しい分類方法や回路素子への分解方法を与え、ユニタリ演算の大局性解析や回路分解問題への貢献が期待される。[担当: 秋笛、村尾]

構築タスクを通じた多体エンタングルメントの操作論的特徴付け

初期状態として、AとBの2者間に2量子ビットの最大エンタングル状態(ベルペア)複数個が共有されている時に、AとBが量子系のやりとり(量子通信)を行うことなくベルペアを決められた2体量子状態にする変換する量子状態の「構築」タスクを考えることで、2体状態のエンタングルメントを操作論的に定量化できることが知られている。一方、一般に3つ以上の部分系からなる量子系に出現するエンタングルメント(多体エンタングルメント)は

2 体量子系の場合の拡張だけでは理解できない非自明な性質をもつ。本研究では、複数者間をベルペアでつないだ量子ネットワーク構造を考え、各者がベルペアを変換することで所定の多体量子状態を構築するタスクを解析した。また、決められた多体量子状態 1 個を正確に構築するタスクに加え、同一状態有限個を近似的に構築する場合も解析した。その結果として、任意のツリー形のネットワーク構造に配置されたベルペアを変換し任意の多体量子状態を構築するために必要十分なベルペアの数を求めた。証明には、任意のツリー形のネットワーク構造に配置されたベルペアから各者が分散して多体量子状態を構築する分散アルゴリズムを見出すことで、(厳密な構築と、近似的構築の漸近的極限において) 最少のベルペアから構築を行う手順を提示した。本研究では、ベルペアの数という「量」に加え多者をつなぐベルペアのネットワーク構造の「形」という新たな観点からも多体エンタングルメントを操作論的に特徴づけることに成功した。同時に、本研究で見出した分散アルゴリズムは、エンタングルメントを利用した量子情報処理における量子通信削減に有用である。[担当：山崎、添田、村尾]

5.2.2 多体量子状態の量子情報の解析

1 次元系の非可換ハミルトニアンに対する量子 Hammersley-Clifford 定理

グラフ上に定義された古典スピン系において、短距離ハミルトニアンの Gibbs 状態は、マルコフネットワークと呼ばれるクラスの確率分布と等価であることが知られている (Hammersley-Clifford 定理)。ここで、マルコフネットワークとは、系の特定の分割に対する条件付き相互情報量が常に完全に 0 となること (マルコフ性) によって特徴づけられる確率分布である。条件付き相互情報量は、2 つの離れた部分系間の相関を、残りの系による条件付けの下で定量化する関数である。これらの概念は量子系に対して拡張することができ、先行研究により、可換かつ短距離ハミルトニアンの Gibbs 状態は常にマルコフ性を持ち、逆に正方格子やツリーグラフ上の量子的なマルコフネットワークも可換なハミルトニアンの Gibbs 状態で表せることが知られている。

一方で、量子系ではハミルトニアンの各項は非可換となり得るが、そのような場合に Gibbs 状態とマルコフネットワークの関係性はどうかは不明であった。本研究では、まず 1 次元スピン系に対し、任意の短距離ハミルトニアンの Gibbs 状態の持つ条件付き相互情報量を調べた。その結果、このような Gibbs 状態においては、条件付き相互情報量が 2 領域間の距離に対して指数的に減衰し、常に近似的にマルコフ性を満たすことが分かった。また、逆にマルコフ性を近似的に満たす 1 次元量子状態は、常に短距離ハミルトニアンの Gibbs 状態で近似できることも示した。これらの結果は 1 次元系のみならず、任意のツリーグラフやラダーグラフ等に拡張可能であるが、2 次元正方格子に対して同様の結果が成立す

るかは未解決である。本研究は、Microsoft Research Redmond の Fernand Brandao 博士 (現カリフォルニア工科大学教授) との共同研究である。[担当：加藤]

トポロジカル・エンタングルメント・エントロピーとエンタングルメント・ハミルトニアン

分数量子ホール効果の系に代表されるトポロジカル秩序相は、基底状態の縮退度が系のトポロジカルな形状に依存し、それらの基底状態が局所的には区別がつかない等の新奇な性質を持つ量子相であり、局所的な擾乱に強い量子系という性質から量子メモリや量子計算機への応用が期待されている。このトポロジカル秩序相の研究においては、基底状態の持つエンタングルメントを調べることで局所的な秩序変数では不可能な相の分類が可能となるとして、状態の持つエンタングルメントの特徴づけが盛んに行われている。

本研究では、縮約密度行列の対数をとった演算子である「エンタングルメント・ハミルトニアン」と、「トポロジカル・エンタングルメント・エントロピー」と呼ばれる量の関係に注目した。我々は、シリンダーのような 2 次元空間におけるスピン系の一定の幅を持ったリング状の部分領域を考え、そのリング領域における基底状態のエンタングルメント・ハミルトニアンの構造を調べた。その結果、その基底状態が非自明なトポロジカル・エンタングルメント・エントロピーを持つことと、リング領域のエンタングルメント・ハミルトニアンが周方向に非局所的であることが同値であることが分かった。

今後さらに、非自明なトポロジカル・エンタングルメント・エントロピーの値が基底状態に与える制限を明らかにし、トポロジカル秩序相におけるエンタングルメントの新たな性質を見出すことが期待される。本研究は、NTT 物性科学基礎研究所の Fabian Furrer 博士との共同研究である。[担当：加藤、村尾]

3 体量子状態のマルコフ化コスト

3 体量子状態を構成する部分系の 1 つを量子操作によって「乱雑化」し、量子マルコフ鎖を生成するタスクを考え、これを「マルコフ化」と命名した。特に、与えられた 3 体量子状態を N 個用意し、乱雑化操作を確率的ユニタリ操作に限定したときに、漸近的にマルコフ化するために必要な乱雑化量を求めた。なお、この量は対象とする量子状態を無限個用意したときに定義される量であるが、各量子状態あたりに必要な乱雑化量 (マルコフ化コスト) は量子状態を 1 個用意した時に決まるエントロピー関数で表現できることを証明した (single-letter formula)。また、直観に反し、マルコフ化コストは量子状態の非連続な関数であり、与えられた量子状態が量子マルコフ鎖に無限に近い状態であっても、マルコフ化コストは無限に大きくなりうることも判明した。この結果は、分散型量子計算および分散型情報圧縮への応用

が存在する。本研究は、電気通信大学の若桑江友里博士との共同研究である。[担当：添田、村尾]

5.2.3 量子力学基礎論

量子操作の非局所性と非因果性の解析

大局的分離写像に属する量子操作を「因果律を破る相関」で特徴付ける手法を開発し、解析を行った。量子操作の非局所性を理解する上で大局的分離写像と呼ばれる多者間量子操作の集合に属する量子操作を理解することは重要である。しかし、そこに属する量子操作の例は殆ど知られていなかった。本研究ではまず古典通信の概念を拡張し、特殊相対論的因果律と矛盾するような「因果律を破る相関」をも含む一般化された古典相関として古典通信を再定義した。次に大局的分離写像に属する量子操作を多者間で行うには (a) エンタングルメントと因果律に従う通常の古典通信か (b) 「因果律を破る相関」のどちらかが必要であることを示した。エンタングルメントの非局所性が超光速通信に使えないことは知られていたが、本結果からエンタングルメントが通常の古典通信と組み合わせられることで「因果律を破る相関」をシミュレートする能力を持つと解釈できる。また、「因果律を破る相関」と近年研究が盛んな「量子因果律」の関連を示した。最後に、「量子因果律」で知られている結果を用いることで大局的分離写像に属する量子操作の新しい例を発見した。本研究は、NTTコミュニケーション科学基礎研究所の加藤豪博士および尾張正樹博士（現静岡大学准教授）との共同研究である。[担当：秋笛、村尾]

トポス量子力学に基づく合成量子系の解析

量子力学は非可換代数を用いて定式化されるが、トポス量子力学は非可換代数からトポスを定義し、トポス内の可換代数によって量子系を表現する。可換代数を用いるため、古典力学の概念が自然に一般化される。例えば、古典力学における物理系はスペクトルによって表され、状態はスペクトル上の確率測度であるが、トポス量子力学においてはスペクトル上の確率付値が量子状態に対応する。本研究では、トポス内の積スペクトルを考えることで、トポス式量子力学における空間的合成系・時間的合成系と呼ばれる2種類の合成系を定義し、それぞれの性質を解析した。空間的合成系の状態は、量子状態よりも広いクラスである positive over pure tensor 状態と対応していることを示した。また空間的合成を受ける系間に入出力相関を生む確率過程が存在せず、時間的合成を受ける系間にはそのような確率過程が少なくとも一つ存在することを示した。本研究は、Oxford大学のChris Heunen博士（現Edinburgh大学所属）との共同研究である。[担当：宮崎、添田、村尾]

5.2.4 量子アルゴリズム

ユニタリ操作の「学習」による再現

未知のユニタリ操作を実行するブラックボックスが与えられた際に、このブラックボックスが持つ作用を「学習」することを考えた。具体的には量子アルゴリズムとして、ユニタリ操作ブラックボックスを N 回用いて適切に生成された量子状態を資源とすることで、資源状態生成後に与えられた任意の入力状態に対し、ブラックボックスを実行したのと同じ状態をブラックボックス自体は使用せずに近似的に出力する方法を解析した。このユニタリ操作の「学習」による再現には、資源とする量子状態に量子測定を施すことで、ユニタリ操作を記述する行列の要素を数値的に特定したうえで、対応するユニタリ操作を再現する「古典的方法」が知られている。一方、ユニタリ操作の行列要素に関する情報を取り出さずにブラックボックスを再現する「量子的方法」も可能である。量子操作は量子測定を含むため、量子的方法は古典的方法を含むより一般的な方法であるが、先行研究の結果により、測定結果が無数存在する量子測定を用いるならば、古典的方法を用いてもユニタリ操作の最適な「学習」による再現が可能であることが知られていた。我々は、ランダムユニタリ操作の N -design を用いることで、有限個の測定結果を持つ量子測定によって最適なユニタリ操作の「学習」による再現が実行でき、 $N + 1$ -design に対応する量子測定を用いることで最悪ケースを平均ケースに一致させることができることを示した。また、ポートベーステレポーテーションを拡張することで、ブラックボックスの学習による再現の量子的方法に応用できることを示し、古典的方法と量子的方法における「学習」の差異を解析した。[担当：新保、添田、村尾]

低制御量子系への量子情報入出力アルゴリズム

量子計算機を用いると、量子力学で許される任意の変換（量子操作）が実行できる。本研究では、量子計算機を用いることで、低制御量子系に対して任意の量子操作を実行するアルゴリズムを構築した。低制御量子系とは、一種類の固定した操作を除いては、外部系から制御が不可能な量子系である。本研究では、この固定した操作が量子計算機の一部と相互作用となっている場合について考察した。低制御量子系の制御に向けて、低制御量子系から量子計算機に状態を移す操作、およびその逆操作が実行可能となるかについて調べた。2つの系の間で状態の入出力操作が実行となれば、量子計算機の状態には任意の量子操作を行うことができるため、低制御量子系の状態が間接的に制御可能となる。その結果、低制御量子系と量子計算機との相互作用を記述するハミルトニアンがある性質を満たし、この相互作用のオン・オフが外部から調整できるときに、状態の入出力操作が任意の近似精度で実行可能となること、およびその実現方法（アルゴリズム）を提示した。また、この近似の精度はダイヤモンドノルムを用いて評価し

た。以上の結果を用いて、異方的 Heisenberg 型ハミルトニアンなど、相互作用時間の調整のみでは状態の入出力が実行不可能な相互作用ハミルトニアンが与えられた場合に対しても、本アルゴリズムを用いることで状態の入出力が可能となる例を示した。[担当：坂井、添田、村尾]

<報文>

(原著論文)

- [1] K. Kato, F. Furrer, and M. Murao *Information-theoretical analysis of topological entanglement entropy and multipartite correlations*, Phys. Rev. A **93**, 022317 (2016)
- [2] J. Miyazaki, M. Hajdušek, and M. Murao, *Analysis of the trade-off between spatial and temporal resources for measurement-based quantum computation*, Phys. Rev. A **91**, 052302 (2015)
- [3] S. Nakayama, A. Soeda, and M. Murao, *Quantum algorithm for universal implementation of projective measurement of energy*, Phys. Rev. Lett. **114**, 190501 (2015)
- [4] S. Jevtic, T. Rudolph, D. Jennings, Y. Hirono, S. Nakayama, and M. Murao, *Exchange Fluctuation Theorem for correlated quantum systems*, Phys. Rev. E **92**, 042113 (2015)
- [5] K. Nakago, M. Hajdusek, S. Nakayama, and M. Murao, *Parallelizable adiabatic gate teleportation*, Phys. Rev. A **92**, 062315 (2015)
- [6] A. Shimbo, A. Soeda, and M. Murao, *State-optimized local randomization: randomness cost of bipartite states*, The 15th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2015), Seoul, Aug. 2015
- [7] A. Soeda, S. Nakayama, and M. Murao, “No error-free implementation of quantum controlled-gates is possible without prior knowledge of the target gate”, The 15th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2015), Seoul, Aug. 2015
- [8] S. Akbue, M. Owari, G. Kato, and M. Murao, *Entanglement as a resource for deterministically simulating a causal classical correlations*, CAUSALITY IN A QUANTUM WORLD, Queensland, Aug. 2015
- [9] S. Nakayama, A. Soeda, and M. Murao, *Quantum algorithm for universal implementation of projective measurement of energy*, Quantum Information Processing and Communication (QIPC2015), Leeds, Sep. 2015
- [10] K. Nakago, M. Hajdusek, S. Nakayama, and M. Murao, *Parallelized adiabatic gate teleportation*, Quantum Information Processing and Communication (QIPC2015), Leeds, Sep. 2015
- [11] S. Nakayama, A. Soeda, and M. Murao, *Quantum algorithm for universal implementation of the projective measurement of energy*, Interdisciplinary Workshop on Quantum Devices 2015 (IWQD2015), Tokyo, Oct. 2015
- [12] K. Kato, F. Furrer, and M. Murao, *Information-theoretical analysis of topological entanglement entropy and multipartite correlations*, The 19th Conference on Quantum Information Processing (QIP2016), Banff, Jan. 2016

(学位論文)

- [6] 秋笛清石、*Entanglement and Causal Relation in Distributed Quantum Computation*、博士論文
- [7] 坂井亮介、「低制御量子系への量子情報入出力アルゴリズム」、修士論文
- [8] 山崎隼汰、*Distributed Construction of Multipartite Entangled States over Quantum Networks*、修士論文

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [9] E. Wakakuwa, A. Soeda, and M. Murao, *A Coding Theorem for Bipartite Unitaries in Distributed Quantum Computation*, The 2015 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT2015), Hong Kong, Jun. 2015
- [10] E. Wakakuwa, A. Soeda, and M. Murao, *Markovianizing Cost of Tripartite Quantum States*, The 2015 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT2015), Hong Kong, Jun. 2015
- [11] S. Akibue and M. Murao, *Implementability of unitary operations over the butterfly, grail and cluster networks with free classical communication*, The 15th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2015), Seoul, Aug. 2015
- [12] M. Murao, *Implementation of projective measurement of energy without knowing Hamiltonian*, UTokyo-ANU Workshop on Quantum Information and Control, Tokyo, Mar. 2016

招待講演

- [19] K. Kato, F. Furrer, and M. Murao *Merging Marginal Quantum Markov States and Application to Topological Orders*, Workshop on Quantum Marginals and Numerical Ranges, Guelph, Aug. 2015

(国内会議)

一般講演

- [21] K. Kato, F. Furrer, M. Murao, 「トポロジカル・エンタングルメント・エントロピーの情報理論的側面」、量子制御技術の発展により拓かれる量子情報の新時代、京都、2015年7月
- [22] A. Shimbo, A. Soeda, M. Murao, *State-optimized local randomization: randomness cost of bipartite states*, Okinawa School in Physics: Coherent Quantum Dynamics 2015、沖縄、2015年10月

- [23] 新保厚、添田彬仁、村尾美緒、「既知の2体量子状態に対する最適化された局所的ランダム化コスト」、ImPACT 未来開拓研究会 2015、北海道、2015年10月
- [24] 山崎隼汰、添田彬仁、村尾美緒、「量子ネットワーク上での多体量子もつれ状態の分散型構築」、第33回量子情報技術研究会、神奈川、2015年11月
- [25] 添田彬仁、仲山将順、村尾美緒、「事前情報なしの量子回路コントロール化の不可能性」、第33回量子情報技術研究会、神奈川、2015年11月
- [26] 添田彬仁、仲山将順、村尾美緒、「事前情報なしの量子回路コントロール化の不可能性」、日本物理学会 2016年秋季大会、宮城、2016年3月

招待講演

- [27] 村尾美緒、「分散型量子情報処理とエンタングルメント理論」、成果報告シンポジウム、東京、2016年3月

5.3 上田研究室

近年のナノサイエンスの発展により、原子や分子、光子を量子1個の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

回折限界を超えた位置測定

物理法則で決まる原理的境界により光の波長よりも小さい対象物は見えないと考えられてきた。近年

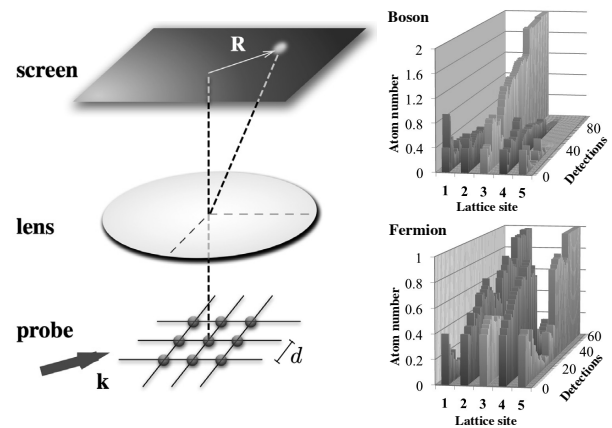


図 5.3.1: 左図: 光格子にトラップされた冷却原子の撮像。プローブ光が原子により散乱された後、レンズにより集光されスクリーンに像を結ぶ。得られた像から原子位置が推定される。右図: 量子測定理論により追跡した多原子の波束の実時間収縮過程。パウリの排他律により、ボソン(右上)よりもフェルミオン(右下)の方が波束の収縮が速く起こる。このような解析を応用する事で、原子位置の測定が回折限界を超えた分解能で行える。[11]

の実験技術の発展により、この位置分解能の限界一回折限界が直接の制約となる状況が多く実現されている。特に、冷却原子系で実現した量子気体顕微鏡においては回折限界が要求する高い信号雑音比のために測定が破壊的になってしまうという制約があった。また、2014年のノーベル化学賞の対象にもなった生命科学における超解像蛍光顕微鏡においては膨大な撮像回数のために時間分解能が大きな制約となっていた。我々は、回折限界を超えた分解能で原子や分子の位置を測定するための理論的枠組みと計算手法を確立する事で、これらの困難が解決できることを理論的に示した。特に、光格子系において量子測定理論を用いて多体波動関数の収縮を追跡することで、原子位置が高フィデリティーで決定できることを示した(図5.3.1)。これにより少数光子・非共鳴散乱光を用いた非破壊なシングルサイト測定が行える可能性を指摘した。さらに、理論を古典系にも拡張し超解像蛍光顕微鏡に応用することで、時間分解能の理論限界を達成できる解析手法を構築する事に成功した。[11, 17]

共鳴 p 波 Fermi 気体における普遍的関係式

冷却原子気体において、Feshbach 共鳴を利用した強相関気体を実現している。この系は、高温超伝導体や中性子物質など強相関多体系のクリーンなモデル系として期待される一方、理論的には量子モンテカ

ルロ等を除き有効な計算手法が確立していない。近年、BCS-BEC クロスオーバーの強相関領域において、系の短距離相関が特異なベキ則に従うこと、そして、系の短距離相関と熱力学量が共にコンタクトと呼ばれる単一の物理量によって与えられることが示された。これらの関係式は、 s 波相互作用する系において、相互作用の詳細やトラップ形状、超流動相か常流動相か等の情報に依らず、一般的に成り立つ解析的な結果として注目を集めている。我々は、共鳴的に p 波相互作用する Fermi 気体において、短距離相関の振るまいと熱力学量との関係を調べた。共鳴的な p 波相互作用は強い紫外発散のために、 s 波相互作用の場合と異なりスケール不変なユニタリ極限を持たない。しかし、相互作用の到達距離と平均粒子間距離が大きく分離した希薄気体においては、一般的に、その中間的なスケールで相関関数がベキ的に振る舞うことを示した。またその係数、 p 波コンタクトが、エネルギーを p 波散乱体積で微分した量と一致することを示した。[13]

Bose-Einstein 凝縮体の励起バンド・トポロジ

近年、冷却原子系において、レーザーを用いて人工的にゲージ場を発生させ、様々に制御する技術が発展している。最近の顕著な進展として、非自明なトポロジを持ったバンドを示すことで知られる Haldane 模型が、周期変動する蜂の巣光格子中で実現された。この系にフェルミ原子を注入することでトポロジカル絶縁体の実現が期待される一方、ボース原子を注入した際にどのような新しい現象が起こるかは興味深い。我々は、Haldane 模型を相互作用するボソン系へ拡張した Haldane-Bose-Hubbard 模型を考え、BEC 相の励起構造を Bogoliubov 理論により解析した。その結果、相互作用がないときのバンドのトポロジカルな性質が、相互作用する BEC の Bogoliubov 励起バンドに引き継がれること、相互作用ないしは粒子数密度を大きくするとき、非自明な Chern 数を持った領域が徐々に広がるのがわかった。この領域では、系に端がある場合、二つの励起バンド間をつなぐようにカイラル・エッジ・モードが現れる。凝縮体の一部をこのようなエッジ・モードにコヒーレントに励起することでエッジ物質波を生成でき、それが背景の凝縮体と干渉することで端に沿って密度波が現れる。これは巨視的量子干渉を利用したエッジ・モードの新しい観測法として応用できる。[14]

エンタングルメント保存による準定常状態

冷却原子系において非平衡状態から熱平衡状態への緩和現象が実験で観測され、理論・実験の両方から緩和過程の理解が進んでいる。可積分に近い系では、熱平衡状態への緩和より短い時間スケールで準定常状態へ緩和する前期熱平衡化現象が知られている。我々は、一次元ボース気体の緩和過程についての最近の実験を、Lieb-Liniger 模型の量子クエンチの問題として理論的に定式化した。量子クエンチ後の時間発展をペーテ仮説法によって厳密に計算した

結果、従来の準定常状態への緩和とは異なる新しいタイプの緩和現象を発見した。さらに、この緩和現象がエンタングルメント保存によって引き起こされるという新たな機構を明らかにした。従来の前期熱平衡化現象は「局所的な保存量」の存在によって引き起こされると考えられていたが、我々が発見した前期熱平衡化現象はエンタングルメントという非局所性が現れるという点で新しい。その証拠として、この現象が部分系間のエンタングルメントを表す密度行列の非対角要素から生じることを計算によって示した。[15]

5.3.2 量子論・統計力学と情報理論の融合

絶対不可逆過程における量子非平衡等式

近年、様々な系で量子情報処理を実現するための実験的技術が進展している。特に、エンタングルド状態を生成したり、量子測定とフィードバック制御を活用して、様々な量子状態を準備することが出来るようになってきた。我々は一般的な量子測定・フィードバック制御を行うときの系の非平衡ダイナミクスを解析するうえで有用な、詳細ゆらぎの定理やジャルジンスキー等式等の一連の量子非平衡等式を導出した。測定過程とフィードバック過程のそれぞれに対して導かれた詳細ゆらぎの定理を用いると、それぞれの過程の前向き経路の確率と時間反転経路の確率の比が、散逸を表す全エントロピー生成と関係付けられる。これにより、量子測定やフィードバックで散逸を減らす方法について定量的に調べる手法を導くことが出来た。従来の研究では測定器の初期状態が純粋状態の場合や、射影測定を系に行う場合といった、応用上重要なセットアップに対してジャルジンスキー等式を導くことが出来なかった。我々はそれらの原因である絶対不可逆過程の効果を取り入れることで、一般の量子測定とフィードバック制御を取り扱い、量子非平衡等式を導出できることを明らかにした。[9]

仕事揺らぎと散逸のトレードオフ関係

熱ゆらぎが無視できないような小さな系における仕事や熱といった物理量が実験で測れるようになり、理論の方でも微小系の（量子）熱力学の研究が活発に進んでいる。このような系から仕事を取り出すとすると、その量は熱ゆらぎによって確率的になってしまう。そこで、仕事のゆらぎが小さく、かつ熱浴に散逸してしまう散逸仕事も小さくするようなプロトコルが望ましいが、先行研究ではこれらの二つの目的がそれぞれ別々のテクニクを使って研究されてきた。我々は、一般に非平衡系では仕事ゆらぎと散逸を同時にゼロにすることは出来ず、それらの間にはトレードオフ関係があることを見出した。さらに、仕事と散逸のそれぞれのゆらぎの和が非平衡自由エネルギーのゆらぎよりも必ず大きくなることを発見した。これは、初期状態・終状態の非平衡さ

の度合いによって仕事と散逸が受ける制約を表している。我々は、さらにトレードオフの下限を達成するプロトコルの導出を行い、それがハミルトニアンのクエンチ、熱平衡化、準静的過程の組み合わせで構成されていることを示した。[16]

微小孤立量子系におけるミクロカノニカル分布の妥当性

ユニタリ時間発展する孤立多体量子系においても熱平衡化が起こり得ることが近年理解されてきた。系のサイズが大きくなるにつれて、エネルギー固有状態それぞれが熱平衡状態に漸近するという固有状態熱平衡化仮説 (Eigenstate Thermalization Hypothesis) のためである。しかしながら、この議論は十分大きな系でミクロカノニカル分布を正当化するが、有限系でそれがどのような精度で適用出来るのかという問いには答えていなかった。我々はこの問いに答えるため、1次元ハードコア・ボースハバード模型における相互作用クエンチ問題を数値的に解析し、クエンチ後に到達する定常状態をミクロカノニカル分布がどの程度良く記述しているのかを定量的に調べた。その結果、ミクロカノニカル分布の精度が $1/D$ (D はヒルベルト空間の次元) に比例して向上する場合があることを発見した。固有状態熱平衡化仮説は高々 $1/\sqrt{D}$ に比例してしか向上しないという先行研究を踏まえると、固有状態間の平均化という新たな効果によってミクロカノニカル分布の精度が一層向上することをこの結果は意味している。また、ヒルベルト空間の次元 D は系の体積に関して指数関数的に増大することを考慮すると、小さな系であってもミクロカノニカル分布は非常に高い精度で適用可能であることが明らかとなった。[10]

局所的対称性を持つ非可積分系での一般化ギブス分布

近年、孤立量子系のユニタリ発展のみから統計力学を正当化する試みが実験・理論の両面で進展している。特に、クエンチ後に系が達する定常状態がカノニカル分布で表されるかどうかは、最も盛んに研究されている。エネルギーのみを保存する非可積分系においては、Eigenstate Thermalization Hypothesis (ETH) と呼ばれる機構によってカノニカル分布が正当化される。ETH とは、物理量をエネルギー固有状態で挟んだ期待値そのものがカノニカル分布での統計平均と等しくなるという仮説である。一方、保存量を固有状態を決定するほど多く持つ可積分系では ETH が破れ、定常状態もカノニカル分布でなく、保存量を考慮した一般化 Gibbs 分布 (GGE) で表されると期待されている。我々はこの二つの中間的な場合として、保存量を伴うような対称性を持つ非可積分系について調べた。その結果、系が局所的な対称性をサイズに比例して持つ場合は、非可積分系であってもカノニカル分布でなく GGE へと緩和することを示した。またこの場合、通常の ETH は破れるが、対称性セクターごとに見ると ETH が回復することを発見し、この機構により GGE を正当化した。[18]

量子測定における情報と擾乱のトレードオフ関係

量子系に対し測定を行うとその反作用により被測定系は変化し、これを擾乱と呼ぶ。特に、系についての情報がより得られるような測定ほど、より大きな擾乱を引き起こす。この事は、古くはハイゼンベルグにより不確定性関係として指摘され、近年では量子情報理論の発展に伴い情報と擾乱の間のトレードオフ関係として定量的な定式化が様々な方法でなされてきた。我々は、未知状態を測定により推定する際の推定誤差に着目し、量子推定理論を用いてこのトレードオフ関係を不等式の形で定式化した。情報は測定値の確率分布についての古典 Fisher 情報量、擾乱は測定前後の状態で失われた量子 Fisher 情報量をそれぞれ用いて定量化した。得られた不等式に基づいて、ある一定の情報を得られるような測定の内、与える擾乱が最小であるようなものが論理的に可逆な純粋測定であることを明らかにした。また、二状態間の識別可能性の尺度を与えるダイバージェンスについて、類似のトレードオフ関係を満たすための条件を明らかにし、特に最大量子相対エントロピーがこれを満たすことを新たに見出した。[19]

<受賞>

- [1] 川口由紀: 文部科学大臣表彰若手科学賞 (文部科学省、2015年4月12日) .
- [2] 蘆田祐人: ポスター優秀賞第1位 (第60回物性若手夏の学校、2015年7月31日).
- [3] 東川翔: 分科会優秀発表賞 (第60回物性若手夏の学校、2015年7月31日).
- [4] 沙川貴大: 第30回西宮湯川記念賞 (西宮市、2015年11月23日) .
- [5] 曾弘博: ポスターレビュー賞 (第1回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会、2015年12月13日).
- [6] 蘆田祐人: 日本物理学会領域1第4回 (2015年秋季大会) 学生プレゼンテーション賞 (日本物理学会領域1運営委員、2016年3月20日).
- [7] 東川翔: 日本物理学会領域1第4回 (2015年秋季大会) 学生プレゼンテーション賞 (日本物理学会領域1運営委員、2016年3月20日).
- [8] 蘆田祐人: 平成27年度理学系研究科研究奨励賞 (修士課程) (東京大学、2016年3月24日).

<報文>

(原著論文)

- [9] K. Funo, Y. Murashita, and M. Ueda: Quantum nonequilibrium equalities with absolute irreversibility, *New J. Phys.* **17**, 075005 (2015).
- [10] T. N. Ikeda and M. Ueda: How accurately can the microcanonical ensemble describe small isolated quantum systems?, *Phys. Rev. E* **92**, 020102 (2015).
- [11] Y. Ashida and M. Ueda: Diffraction-unlimited position measurement of ultracold atoms in an optical lattice, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 095301 (2015). Editor's suggestion.

- [12] N. T. Phuc, G. Tatara, Y. Kawaguchi, and M. Ueda: Controlling and probing non-abelian emergent gauge potentials in spinor Bose-Fermi mixtures, *Nat. Comm.* **6**, 8135 (2015).
- [13] S. M. Yoshida and M. Ueda: Universal high-momentum asymptote and thermodynamic relations in a spinless Fermi gas with a resonant p -wave interaction, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 135303 (2015).
- [14] S. Furukawa and M. Ueda: Excitation band topology and edge matter waves in Bose-Einstein condensates in optical lattices, *New J. Phys.* **17**, 115014 (2015).
- [15] E. Kaminishi, T. Mori, T. N. Ikeda, and M. Ueda: Entanglement pre-thermalization in a one-dimensional Bose gas, *Nat. Phys.* **11**, 1050 (2015).
- [16] K. Funo and M. Ueda: Work fluctuation-dissipation trade-off in heat engines, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 260601 (2015).
- [17] Y. Ashida and M. Ueda: Precise multi-emitter localization method for fast super-resolution imaging, *Optics Letters* **41**, 72 (2016).
- [18] R. Hamazaki, T. N. Ikeda, and M. Ueda: Generalized Gibbs ensemble in a nonintegrable system with an extensive number of local symmetries, *Phys. Rev. E* **93**, 032116 (2016).
- [19] T. Shitara, Y. Kuramochi, and M. Ueda: Trade-off relation between information and disturbance in quantum measurement, *Phys. Rev. A* **93**, 032134 (2016).
- (学位論文)
- [20] Yuto Ashida: Diffraction-Unlimited Position Measurement: from Quantum Gases to Biomolecules (修士論文).
- [21] 東川翔: 対称性の破れた相のリー代数による特徴づけ (修士論文).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [22] S. M. Yoshida and M. Ueda: Universal high-momentum behaviors and thermodynamic relations in a spinless Fermi gas with a resonant p -wave interaction, , 46th Annual DAMOP Meeting, Columbus, USA, 2015.6.8-12.
- [23] Y. Ashida and M. Ueda: Diffraction-unlimited position measurement of quantum particles, Gordon Research Conference: Atomic Physics, Newport, USA, 2015.6.14-19.
- [24] R. Hamazaki, T. N. Ikeda and M. Ueda: Generalized Gibbs Ensemble in Nonintegrable Systems with Symmetries, *New Frontiers in Non-equilibrium Physics 2015*, Kyoto University, 2015.7.27-8.7
- [25] E. Kaminishi, T. Mori, T. N. Ikeda and M. Ueda: Entanglement prethermalization, *New Frontiers in Non-equilibrium Physics 2015*, Kyoto University, 2015.8.3-7
- [26] K. Funo and M. Ueda: Work fluctuations and energy dissipation in nonequilibrium processes, *New Frontiers in Non-equilibrium Statistical Physics 2015*, Kyoto University, 2015.8.17-8.19
- [27] S. Higashikawa and M. Ueda: μ -symmetry breaking: algebraic approach to finding building block of quantum many-body systems, “Synthetic Quantum Magnetism”, Dresden, Germany, 2015.8.31-9.4.
- [28] Y. Horinouchi and M. Ueda: Relation between a renormalization-group limit cycle and universal three-body parameter in Efimov physics, 12th US-Japan Seminar, Madison, USA, 2015.9.20-24.
- [29] S. M. Yoshida and M. Ueda: Universal high-momentum asymptote and thermodynamic relations in a spinless Fermi gas with a resonant p -wave interaction, 12th US-Japan Seminar, Madison, USA, 2015.9.20-24.
- [30] R. Hamazaki, T. N. Ikeda and M. Ueda: Generalized Gibbs Ensemble in Nonintegrable Systems with Symmetries, *Okinawa School in Physics: Coherent Quantum Dynamics*, OIST, 2015.9.29-10.8.
- [31] S. Higashikawa and M. Ueda: μ -symmetry breaking: algebraic approach to finding building block of quantum many-body systems, *Okinawa School in Physics: Coherent Quantum Dynamics*, OIST, 2015.9.29-10.8.
- [32] T. Shitara and M. Ueda: Information-Disturbance Relation in Quantum Measurement Based on Estimation Theory, *Okinawa School in Physics: Coherent Quantum Dynamics*, OIST, 2015.9.29-10.8.
- [33] K. Funo and M. Ueda: Work fluctuations and energy dissipation in nonequilibrium processes, *Third Conference on Quantum Thermodynamics*, Porquerolles, France, 2015.10.11-16.
- [34] Y. Murashita and M. Ueda: Resolving the Gibbs paradox in small thermodynamic systems, *The 3rd East Asia Joint Seminar on Statistical Mechanics*, KAIST, 2015.10.14-17
- [35] Y. Ashida and M. Ueda: Multi-Particle Quantum Dynamics under Continuous Observation, *Dynamics in Artificial Quantum Systems (DAQS2016)*, Research Center for Advanced Science and Technology (RCAST), The University of Tokyo, 2016.1.12-14.
- [36] R. Hamazaki, T. N. Ikeda and M. Ueda: Generalized Gibbs ensemble in nonintegrable systems with an extensive number of local symmetries, *Dynamics in Artificial Quantum Systems (DAQS2016)*, Research Center for Advanced Science and Technology (RCAST), The University of Tokyo, 2016.1.12-14.

- [37] Y. Horinouchi and M. Ueda: Topological property of a limit cycle and universal four-body bound states in Efimov physics: LMU-UT, Tokyo, Japan, 2016.2. 29-3.1.
- [38] S. M. Yoshida and M. Ueda: Universality and Anisotropy in a Resonantly Interacting p -Wave Fermi Gas, Cooperation in Physics Workshop: LMU-UT, Tokyo, Japan, 2016.2. 29-3.1.
- [39] K. H. Z. So, M. Ueda: Phase diagram of ferromagnetic spinor bosons in an optical lattice under an external magnetic field, APS March Meeting 2016, Baltimore, Maryland, USA, 2016.3.14-3.18.
- 招待講演
- [40] M. Ueda: Few-body universality from atoms to nuclei (crossover sessions), The 21st International Conference on Few-body Problems in Physics, Chicago, USA, 2015.5.18-22.
- [41] M. Ueda: Relationship between the Onset of the Limit Cycle and the Universal Three-Body Parameter in Effimov Physics, 2015 Taiwan International Workshop on Ultra cold Atoms and Molecules, Taipei, Taiwan, 2015.7.9-11.
- [42] M. Ueda: Resolving the Gibbs Paradox in Small Thermodynamic Systems, Thermodynamics and Nonlinear Dynamics in the Information age, Telluride, USA, 2015.7.13-17.
- [43] S. Furukawa: Excitation band topology and edge matter waves in Bose-Einstein condensates in optical lattices, 24th Annual International Laser Physics Workshop, Shanghai, China, 2015.8.21-25.
- [44] U. Ebling: Spinor dynamics in ultracold Fermions, International Workshop “Synthetic Quantum Magnetism”, Dresden, Germany, 2015.8.31-9.4.
- [45] S. Furukawa: Quantum Hall physics of bosons in synthetic gauge fields, International Workshop “Synthetic Quantum Magnetism”, Dresden, Germany, 2015.8.31-9.4.
- [46] M. Ueda: Controlling and probing non-abelianness and quantum mass acquisition in spinor condensates, CUA(center for ultracold atoms) seminar, Boston, USA, 2015.9.13-19.
- [47] M. Ueda: Entanglement pre-thermalization in a Bose gas, The 12th US-Japan Seminar on many body quantum systems: from quantum gases to metrology and information processing, Madison, USA, 2015.9.19-25.
- [48] M. Ueda: Gibbs Paradox and Entanglement Prethermalization, Towards thermodynamics with quantum systems, Porquerolle, France, 2015.10.11-16.
- [49] M. Ueda: Controlling and Probing Non-Abelianness and Quantum Mass Acquisition in Spinor Condensates, Topological Phase in Condensed Matter and Cold Atomic Systems, Hong Kong, China, 2015.12.11-19.
- (国内会議)
- 一般講演
- [50] 設楽智洋、倉持結、上田正仁: 量子測定における情報と擾乱のトレードオフ関係、第 32 回量子情報技術研究会 (QIT32)、大阪大学、2015.5.25-26.
- [51] 蘆田祐人: 光格子系における回折限界を超えた位置測定方法、基研研究会「量子制御技術の発展により拓かれる量子情報の新時代」、京都大学、2015.7.13-16.
- [52] 設楽智洋: 量子測定における情報と擾乱のトレードオフ関係、基研研究会「量子制御技術の発展により拓かれる量子情報の新時代」、京都大学、2015.7.13-16.
- [53] 蘆田祐人、上田正仁: 情報理論による回折限界を超えた位置推定方法、日本物理学会 2015 年秋季大会、関西大学、2015.9.16-19.
- [54] 齋藤岳志、古川俊輔: 人工次元・ゲージ場中の相互作用粒子系における悪魔の階段、日本物理学会 2015 年秋季大会、関西大学、2015.9.16-19.
- [55] 東川翔、上田正仁: SU(N) 対称なフェルミオン系のベアリングと南部ゴールドストーンモード・トポロジカル励起、日本物理学会 2015 年秋季大会、関西大学、2015.9.16-19.
- [56] 東川翔、上田正仁: 対称性の破れた相での非可換渦の実現可能性・エンタングルメント、日本物理学会 2015 年秋季大会、関西大学、2015.9.16-19.
- [57] 設楽智洋、上田正仁: 線形応答理論を用いた量子 Fisher 情報量の決定、量子統計モデリングのための基盤構築、京都大学、2015.11.11-13.
- [58] 古川俊輔、上田正仁: 光格子中の Bose-Einstein 凝縮体における励起バンド・トポロジーとエッジ物質波、第 9 回物性科学領域横断研究会、東京大学、2015.11.13-15.
- [59] 古川俊輔: 結合トライマー模型によるボルボサイトの磁気的性質の解析、物性研短期研究会「スピン系物理の深化と最前線」、2015.11.16-18.
- [60] 上田正仁、古川俊輔: 冷却原子系におけるトポロジカル量子現象、第 1 回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会 京都大学芝蘭会館、2015.12.11-13.
- [61] 曾弘博、上田正仁: 光格子中の強磁性スピナーボソンの外部磁場下での相図、第 1 回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会 京都大学芝蘭会館、2015.12.11-13.
- [62] 古川俊輔、上田正仁: 光格子中の BEC におけるバンド・トポロジーとエッジ物質波、第 1 回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会 京都大学芝蘭会館、2015.12.11-13.
- [63] 堀之内裕理、上田正仁: くりこみ群のリミットサイクルと Efimov 状態の物理、第 1 回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会 京都大学芝蘭会館、2015.12.11-13.
- [64] 吉田周平、上田正仁: 共鳴 p 波相互作用するスピンレス・フェルミ気体の普遍的性質、第 1 回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会、京都大学芝蘭会館、2015.12.11-13.

- [65] 古川俊輔: 人工ゲージ場中の冷却原子系における量子ホール物理、第6回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」集中連携研究会、東京大学、2016.2.9-10.
- [66] 吉田周平、上田正仁: 共鳴 p 波フェルミ気体の普遍性と異方性、第6回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」集中連携研究会、東京大学、2016.2.9-10.
- [67] 設楽智洋、上田正仁: 線形応答理論を用いた量子 Fisher 情報量の測定法、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、2016.2.17-18
- [68] 蘆田祐人、上田正仁: 実時間観測下における光格子系の量子ダイナミクス、日本物理学会第71回(2016年)年次大会、東北学院大学、2016.3.19-22.
- [69] 設楽智洋、上田正仁: 量子 Fisher 情報量の線形応答理論を用いた決定法、日本物理学会第71回(2016年)年次大会、東北学院大学、2016.3.19-22.
- [70] 曾弘博、上田正仁: 光格子中の強磁性スピナーボゾンの外部磁場下での相図、日本物理学会第71回(2016年)年次大会、東北学院大学、2016.3.19-22.
- [71] 東川翔、上田正仁: トポロジカル励起の間にトポロジカルな influence が生じるための一般的条件、日本物理学会第71回(2016年)年次大会、東北学院大学、2016.3.19-22.
- [72] 堀之内裕理、上田正仁: くりこみ群のリミットサイクルと Efimov 状態、日本物理学会第71回(2016年)年次大会、東北学院大学、2016.3.19-22.
- [73] 村下湧音、上田正仁: 微小熱力学系における Gibbs のパラドックス、日本物理学会第71回(2016年)年次大会、東北学院大学、2016.3.19-22.
- [74] 吉田周平、上田正仁: p 波フェルミ気体における異方的コンタクト、日本物理学会第71回(2016年)年次大会、東北学院大学、2016.3.19-22.
- [75] Zongping Gong、蘆田祐人、上田正仁: Fluctuation theorems for open quantum systems with nonequilibrium feedback control、日本物理学会第71回(2016年)年次大会、東北学院大学、2016.3.19-22.
- [76] O. Janson、古川俊輔、桃井勉、P. Sindzingre、J. Richter、K. Held: 結合トライマー模型によるボルボサイトの磁気的性質の解析、日本物理学会第70回(2016年)年次大会、東北学院大学、2016.3.19-22.
- [77] 蘆田祐人: 冷却原子気体の量子非破壊測定、ImPACT 量子情報技術ワークショップ第2回全体会議、JST 東京本部別館、2016.3.28-30.
- 招待講演
- [78] 古川俊輔: エンタングルメント・エントロピーと共形場理論(チュートリアル講演)、第32回量子情報技術研究会(QIT32)、大阪大学、2015.5.25-26.
- (セミナー)
- [79] Eriko Kaminishi: Entanglement prethermalization, OIST Quantum system unit (Thomas Busch group), 2015.6.8.
- [80] 設楽智洋: 量子測定における情報と擾乱のトレードオフ関係、長岡・小川研セミナー、電気通信大学、2016.6.17.
- [81] 堀之内裕理: Efimov 状態とくりこみ群のリミットサイクル、日本大学理工学部素粒子論研究室コロキウム、日本大学、2015.7.1.
- [82] Yûto Murashita: New fluctuation theorems and the Gibbs paradox, Physics Colloquium, Universit du Luxembourg, 2015.9.24.
- [83] Eriko Kaminishi: Entanglement prethermalization in a one-dimensional Bose gas, Qulink Seminar at National Institute of Informatics, 2015.12.3.
- [84] 古川俊輔: Entanglement spectra in topological phases and coupled Tomonaga-Luttinger liquids、田仲・川口研セミナー、名古屋大学、2015.12.17.
- [85] Yusuke Horinouchi: Topological property of a limit cycle and universal four-body bound states in Efimov physics, QHP seminar, RIKEN Quantum Hadron Physics laboratory, 2016.3.7.
- [86] 村下湧音: New fluctuation theorems and the Gibbs paradox、竹内研セミナー、東京工業大学、2016.3.24.
- (その他)
- [87] 蘆田祐人: 光格子系における回折限界を超えた位置測定方法、第60回物性若手夏の学校、ぎふ長良川温泉ホテルパーク、2015.7.27-31.
- [88] 東川翔: $U(N)$ 対称なフェルミオン系の超流動状態の N の偶奇性の違い、第60回物性若手夏の学校、ぎふ長良川温泉ホテルパーク、2015.7.27-31.
- [89] 吉田周平: 強く p 波相互作用するフェルミ気体の普遍的な関係式、第60回物性若手夏の学校、ぎふ長良川温泉ホテルパーク、2015.7.27-31.
- [90] 東川翔: $U(N)$ 対称なフェルミオン系の超流動状態の N の偶奇性の違い、IMPACT 未来開拓研究会、休暇村支笏湖、2015.10.13-18.
- [91] U. Ebling: Quantum Gases - The coldest matter in the universe, the "Science Dialogue" program of JSPS, Tokyo Metropolitan Hibiya High School, 2016.1.14.
- [92] 蘆田祐人: 実時間観測下における光格子系の量子ダイナミクス、第8回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2016.2.20-22.
- [93] 久良尚任: 動的な量子推定問題と情報幾何、第8回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2016.2.20-22.
- [94] 設楽智洋: 量子 Fisher 情報量と線形応答理論、第8回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2016.2.20-22.
- [95] 濱崎立資: 孤立量子系における対称性の揺らぎへの影響、第8回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2016.2.20-22.
- [96] 古川俊輔: 人工次元・ゲージ場中の相互作用粒子系における悪魔の階段、第8回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2016.2.20-22.
- [97] 村下湧音: 微小熱力学系における Gibbs のパラドックス、第8回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2016.2.20-22.

- [98] 吉田周平: 共鳴 p 波フェルミ気体の普遍性と異方性, 第 8 回基礎物理セミナー合宿, 箱根太陽山荘, 2016.2.20-22.
- [99] Zongping Gong: Quantum trajectory thermodynamics with discrete feedback control, 第 8 回基礎物理セミナー合宿, 箱根太陽山荘, 2016.2.20-22.

5.4 横山 (順) 研究室

当研究室はビッグバン宇宙国際研究センターを本拠として、一般相対性理論、場の量子論、素粒子物理学等の基礎物理学理論に基づいて、宇宙論と重力理論の理論的研究を幅広く行うとともに、理学部物理学教室の教育と研究に参画しています。また、大型低温重力波検出器 KAGRA の稼働を控え、近年重力波データ解析の研究と人材育成にも乗り出していますが、こちらは本年度にビッグバン宇宙国際研究センターに発足した KAGRA 重力波データ解析国際協力部門に引き継がれる運びとなりました。

5.4.1 初期宇宙論

特異点なきインフレーション宇宙の創生

宇宙のエネルギー密度は宇宙膨張と共に徐々に薄まっていくため、宇宙膨張を過去に遡ると、密度無限大の特異点に当たると考えられている。これまで、インフレーション宇宙論の初期条件もこのような仮定の下で考えられてきた。つまり、インフレーション宇宙論は特異点問題を解決するわけではないのである。本研究では一般化ガリレオン理論をさらに拡張した理論を考えることにより、ヌルエネルギー条件を安定的に破り、宇宙が漸近的ミンコフスキー時空からはじまり、インフレーション、再加熱を経験し現在に至るまで、不安定性なく進化できる理論を構築することに成功した [2]。

一般化 G インフレーション理論の整合性

本研究では、インフレーションの最も一般的な枠組みである Generalized G inflation 理論を用いて、観測可能な重力波を生成しながら場の変位をプランクスケール以下にとどめられることを示した。また、それがどのような物理的な状況において意味を持つのかを理論の強結合領域を求めることにより明らかにし、そのような場合のモデルに対する量子補正が無視できる、すなわちモデルが整合的であるということを示した。[3, 40, 41]

ブラックホールからのインフレーション宇宙の生成

ブラックホール (BH) のホーキング温度は、BH の質量に反比例し、BH の蒸発が進むにつれて増加す

る。GUT スケールで一次相転移を起こすようなスカラー場が存在する場合、ホーキング温度が GUT スケールに到達したところで、BH の周りは真真空から偽真空へと相転移することが期待される。そこで BH の周りで量子的に生成された真空泡のダイナミクスを、イスラエルの接続条件を用いて議論し、ホーキング温度が GUT スケールに到達すると、BH はその内側に偽真空領域を含む子宇宙へと相転移し、その内側でインフレーションが再度始まる、というシナリオを提唱した [31, 82, 56, 68]。

超対称性理論におけるドメインウォール問題の解決法

素粒子相互作用の準極小超対称性標準理論は、極小理論における μ 項をスカラー一重項の期待値によって説明する理論であるが、 Z_3 対称性が破れる際ドメインウォールを生成してしまうという問題が指摘されていた。本研究では、インフレーション中のこの場の挙動を注意深く解析し、超重力理論に由来してこの場がインフレーション中にハッブルパラメータに比例した質量を十分得る場合には、観測可能な宇宙の全域が同一のドメインに落ちることが可能で、それによってドメインウォール問題を回避できることを示した [5]。

空間方向のみに不変性を持つ理論における背景量とゆらぎの変換性

XG3 理論と名付けた空間方向のみに座標変換に対する不変性を持つ理論において、一様等方宇宙を記述する変数とその周りのゆらぎを記述する変数が、disformal 変換によってどのように変換されるかを調べた。結果として、この理論はこの変換に対して閉じていること、摂動量、特にテンソルゆらぎは高階微分相互作用を持つにもかかわらず、アインシュタイン重力の場合と同等の表現を持つ座標系を取ることができることを示した [7]。

大域的相転移を起こしたスカラー場からの重力波と宇宙の熱史

初期宇宙起源のスケール不変な重力波として、インフレーション中に生成する量子的重力波と並んで、大域的相転移を起こした多成分スカラー場が宇宙膨張と共に一様化する際に放出される重力波が挙げられる。本研究では、この場の時間発展を、インフレーション後の再加熱期の宇宙膨張と共に解き、生成する重力波のスペクトルを精細に求めると共に、再加熱温度に対する依存性を明らかにした。そして、DECIGO 等の観測衛星によって熱史を決定できる条件、ならびにインフレーション起源の重力波と峻別できるための条件を明らかにした [6]。

遅延スケール宇宙ひもが CMB に与える影響

インフレーション中に宇宙ひもが生成するモデルを考えた場合、典型的な長さスケールを与える相関長が指数的に引き伸ばされ、スケールに到達する時間が大きく遅延する。本研究では、このような「遅延スケール宇宙ひも」モデルに対して、その発展を探った。その結果として、近年の宇宙マイクロ波背景放射の精密観測によって指摘されている大スケールでのアノマリーがこの遅延スケール宇宙ひもによって説明可能であることを指摘した [8]。

宇宙論的摂動論の長波長解と原始ブラックホール

大振幅の密度ゆらぎが初期宇宙に存在していたとして、それが自己重力によって崩壊すると、原始ブラックホール (PBH) が形成される。ある種のインフレーションモデルでは、大振幅の曲率ゆらぎが生成され PBH が形成される。PBH の存在量を理論的に計算すれば、観測的な制限と比較することで、インフレーションモデルに対する知見が得られる。インフレーション中に生成された曲率ゆらぎは超ホライズンスケールに引き伸ばされ、その後の放射優勢期などに再びホライズンの中に入る。ゆらぎが超ホライズンスケールにある間は、アインシュタイン方程式を近似的に解くことでゆらぎの時間発展を調べられる。この近似解を様々な座標条件に一般化し、さらに長波長ゆらぎ中に存在する短波長ゆらぎによる PBH 形成の条件を議論した [9]。

原始ブラックホールで探る短波長原始重力波

インフレーション理論では様々な波長の重力波が生成されると予想されるが、そのうち短波長の重力波の振幅が大きいと、重力波の二次の効果により密度ゆらぎが生成する。密度ゆらぎの振幅が十分大きいと PBH が形成する。しかし PBH は観測的に見つからないので、PBH が大量に形成してしまうほど大振幅の短波長重力波は棄却されることになる。このような考察から得られるインフレーション起源の短波長重力波への制限は、ビッグバン元素合成や宇宙マイクロ波背景放射から得られる制限よりも厳しいことを明らかにした [11, 30, 95]。

5.4.2 観測的宇宙論

暗黒物質ミニハローで探る短波長原始ゆらぎ

短波長原始ゆらぎが大きいほど構造形成が早まり、より初期に高密度の暗黒物質ミニハローが多数形成する。暗黒物質が対消滅する場合には、これらのミニハローで発生したガンマ線やニュートリノが観測されるはずである。つまり、これらの観測は短波長原始ゆらぎに対する制限を与えることになる。この

制限は暗黒物質の性質やミニハローの性質に依存するため、その依存性について詳細に調べた [42]。

将来の大型電波干渉計画による宇宙論の探求

将来の精密観測時代を見据え、将来の大規模観測によってどのような宇宙論のフロンティアが開拓されていくかを探求することは重要である。特に、Square Kilometre Array (SKA) と呼ばれる次世代電波望遠鏡に着目している。宇宙大規模構造を用いた宇宙論探査はこれまで可視光・近赤外による探査がほとんど全てであった。しかし、SKA を用いることで電波域というこれまで宇宙論的には用いることができなかった波長域を通じて宇宙を見ることが可能になる。全く新しい宇宙論のツールとして重要視されており、我が国として寄与しうるサイエンストピックについてまとめ、今後の発展を議論した [22]。

将来の大型電波干渉計画を用いたインフレーションモデルの峻別

電波域による銀河探査も行うことが可能になり、宇宙の電波 3 次元地図を書くことができるようになる。可視光・近赤外探査による結果とは相補的な関係となっており、双方向の解析が重要になる。解析の際に、電波銀河の形状による分類を応用することでマルチトレーサー法と呼ばれる手法を用いることが可能になり、インフレーションモデルの峻別に対して重要な寄与をしうる。この際、Euclid 衛星 (可視光・近赤外) との協働により、あらゆるインフレーションモデルが満たすべき「整合性条件」の可否を探査できる。もし今後の精密観測により整合性条件を破るような結果が得られた場合、これまで知られていた全てのインフレーションの研究は再検討を余儀なくされる。また、宇宙マイクロ波背景放射観測との協働においても SKA は重要な地位を占める。日本が主導して行う予定の LiteBIRD 衛星計画において SKA のデータとの協働によって、精度を 2 倍以上改善することができることを示した [15]。

密度揺らぎによる高次ベクトル摂動の弱い重力レンズ効果による観測可能性

ベクトル摂動、テンソル摂動は弱い重力レンズ効果を通じて歪み場にパリティ負のモードを生成することが知られている。このモードは線形密度揺らぎでは生成することができないことから、非スカラー摂動の重要なプローブとなり得る。線形レベルでは密度揺らぎはベクトル摂動を作り得ないが、高次項を通じて関係付くことが期待されている。我々は高次密度揺らぎを通じて生成されるベクトル摂動を数値的に解くことでその観測可能性を探求した [14]。

5.4.3 曲がった時空の場の量子論

Hawking-Moss インスタントンの解釈

スカラー場の有効ポテンシャルが、偽真空状態とポテンシャルトップを含む場合、偽真空からポテンシャルトップへの相転移が、ゼロではない確率で起こることが知られている。このような解は、Hawking-Moss インスタントンとして知られている。de Sitter 時空を静的な座標で記述し、ハミルトニアン条件から相転移間の状態は全エネルギーがゼロであることから、系のエントロピーだけが相転移に寄与する、という熱力学的解釈を与えた [4]。

de Sitter 時空中の Schwinger 効果

インフレーション原始磁場形成理論において、強い電場を生じる場合があるので、de Sitter 時空中における Schwinger 効果について研究を行った。4次元の de Sitter 時空における Dirac 粒子の Schwinger 効果について解析し、Schwinger 効果が誘起する電流の振る舞いが、電荷の持つスピンや電荷の質量によって大きく異なることを見出した。特に、背景電場強度が、Dirac 場の質量によって決まる特定の値より小さい場合、誘起電流が電場と反対向きに流れるという反直感的な結果を得た。このことは、インフレーション宇宙において場の理論の非摂動効果まで取り入れれば、基本的な物理法則を変更することなしに、ある程度大きな電磁場のゆらぎを生成する可能性があることを示唆している [50, 51]。

一方で、誘起電流期待値の計算において必要となるくりこみの問題に関して、異なる手法による計算の結果が一致するかという疑問があったので、これまでカットオフ入りの断熱正則化によって計算されていた、4次元 de Sitter 時空中のスピン 0 粒子の場合の Schwinger 効果による誘起電流の期待値について、Point splitting に基づくゲージ不変性を保つくりこみを行い、これら 2つの手法による結果が一致することを確かめた。

磁気双極子放射への QED 補正

中性子星などのコンパクト天体に付随する磁場は、パルサースピンの減速率の測定によって見積もられている。このスピンの減衰は磁気双極子放射などの効果によって天体の角運動量が失われることに起因する。現在までの観測で、最大で 10^{15} Gauss を超える強度の磁場を持つ天体 (マグネター) が見つかっている。このような磁場の強度は、QED 効果が顕著になる磁場のスケール ($m_e^2/e \sim 10^{13}$ Gauss) を超えており、古典論的な磁気双極子放射公式を用いてこれを推定したのでは、無矛盾性の観点から問題を生じる可能性がある。そこで我々は、QED による効果を計算し、磁気双極子放射公式への補正項を摂動論を用いて具体的に書き下した。この補正項は、天体周りの比較的小スケールの磁場構造に依存して決ま

るが、その効果は一般的にあまり大きくなく、従前の古典的な磁場強度の見積もりで (天文学的な不定性の範囲内では) 十分であることがわかった [26]。

高強度レーザーを用いたアンルー効果の検証

ELI によって、近い将来に 10^{25} [W/cm²] の強度をもつレーザーが実現されると期待されている。この強度によって電子を加速させた場合、アンルー効果で電子は $\sim 10^3$ [K] の熱浴を感じる。電子はその熱浴と相互作用することで熱的に揺らぎ、放射すると考えられている。量子場の真空揺らぎを考慮し、この放射の角度分布や強度を解析的に調べ、強レーザーを用いたアンルー効果の可能性について議論した [12, 13, 81, 57, 68]。

5.4.4 重力理論

自発的スカラー化

物質の密度がある臨界密度以上で、自発的スカラー化が起こるスカラーテンソル理論を提唱した [16]。スカラー場の質量がゼロのモデルは、Damour と Esposito-Farese によってすでに提唱されていたが、今回の新しい点は、スカラー場に質量を持たせたことである。自発的スカラー化が起こっている相では、重力定数が小さくなること、有効宇宙定数が現れること、スカラー場と物質との相互作用が生じること、の3点において、重力の法則が一般相対論からずれることを明らかにした。そして、有質量のおかげで、スカラー場の振動成分が暗黒物質として振る舞うこと、一般相対論が宇宙論的アトラクターになること、宇宙初期インフレーション中に起こる自発的スカラー化により、暗黒物質として観測から要求される存在量も説明可能なことを示した。

スカラー・テンソル理論とブラックホール

近年、スカラー場のシフト対称性を有するホルンデスキー理論の枠組みで、計量場は静的・球対称なブラックホール時空を表しているにもかかわらず、スカラー場は非自明な空間プロファイルを持つだけでなく時間にも依存するという大変興味深い解の集合が見つかった。この解集合の一部は、シュバルツシルト-ドジッター解になっているが、ドジッター膨張率から読み取った有効宇宙定数は、ラグランジアンに現れている宇宙定数とは別物になっており、その意味で宇宙定数のスクリーニングを実現した解になっている。こういった興味深い性質を持つ解であるが、その安定性は調べられていなかった。それを実際に奇パリティ型に限定して摂動解析を行ったのが、[17]である。解析の結果、シフト対称性という条件を満たすホルンデスキー理論の範囲では、ラグランジアン of 具体的な形に依らず、摂動はブラックホールの地平線近傍では、必ずゴースト的になり不安定になっ

てしまうことがわかった。よって、そのような解が現実世界を記述する可能性は棄却された。

D 次元 Lovelock-Galileon 理論におけるブラックホールの不安定性

Lovelock-Galileon 理論は、場の方程式が 2 階かつスカラー場に関するシフト対称性を持つような、一般次元スカラーテンソル理論のサブクラスである。この理論において、近年非自明なスカラー場の配位を持つ 5 次元ブラックホール解が発見された。我々は、それらの解がテンソル型摂動に対し不安定であることを示した。さらに解を一般次元に拡張し、5 次元の場合に現れたのと同様の不安定性が次元によらず普遍的に生じることを示した [18]。

5.4.5 重力波

2016 年 2 月 11 日に LIGO-Virgo collaboration が発表した連星ブラックホール合体現象 GW150914 の検出は、人類史に重力波天文学の創成という新たな 1 ページを加えた。日本の重力波直接検出計画 KAGRA も LIGO-Virgo と肩を並べ、重力波天文学・物理学を強力に推進すべく 2018 年の観測を目指している。現在 KAGRA は岐阜県飛騨市神岡町池の山地下に 3km のマイケルソン干渉型検出器を建設し終え、3 月 26 日より試験観測運転をおこなっている。2016 年度の実データ解析に向けて、2015 年度はデータ解析手法の研究や、解析環境の整備をおこなった。

iKAGRA へ向けた連続重力波探査解析パイプラインの構築

連続重力波は、観測時間よりも十分に長い信号持続時間を持ち、周波数とその期間にわたってほぼ一定であるような重力波の総称である。非軸対称に回転する中性子星が主要な連続重力波源と考えられている。連続重力波の振幅は微小であるため、検出器雑音の中から信号を抽出するには長時間積分を必要とし、その計算コストが問題となる。これに対処するため、連続重力波データ解析には、 \mathcal{F} -statistic と呼ばれる手法が広く用いられている。結果として、電磁波観測で既に知られているような高速回転する中性子星、パルサーの場合には探索パラメータはなく、既知の回転周波数とスピンドアウン率、パルサーの方向から一意に他の波形パラメータが算出される。一方で、全天探査の場合には、これらの 4 つのパラメータが未知であるので、広大なパラメータ領域から真の重力波のパラメータを精力的に見つけなければいけない。本研究では、重力波検出器 KAGRA の稼働へ向けて連続重力波の解析パイプラインの開発を行った [74, 75, 96]。

Phase-II TOBA による低周波数帯連続重力波探査

ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA は地上低周波数帯重力波検出器であり、二本の直交する棒状のテストマスから構成され、検出器平面上の二本のマスの角度変動から重力波が読み取られる。TOBA は KAGRA や LIGO などの大型レーザー干渉計では探索できない低周波数領域に強みを持つ検出器である。今回新たに作成された Phase-II TOBA を用いて、検出器が最も良い感度を持つ 6Hz から 7Hz の 1Hz バンドにわたって、データ長が約 1 日の全天探査を行い、低周波数帯において、未知のパルサーから放射される連続重力波を探査した。結果として、統計的に有意な重力波信号は発見されず、6.84Hz で最も厳しい振幅上限値 3.6×10^{-12} を信頼度 95% で課すことができた [19, 45, 46, 47, 48]。

連続重力波を用いた孤立中性子星の質量推定法

高速回転する非軸対称な中性子星 (NS) は回転周波数の二倍の周波数を持つ重力波を放射する。しかし、NS の角運動量軸と慣性主軸が一致しない場合、NS は角運動量軸を中心とした自由歳差運動を行い、四重極モードに加えて歳差モードと呼ばれる回転周波数と同一の周波数を持つ重力波も放射する。さらに、近年では NS の内部に超流動コアを含むモデルのもとでも、たとえ電磁波観測で歳差運動を示す信号の変調が観測されなかったとしても、NS から放出される重力波は回転周波数の 1 倍と 2 倍の二つのモードを持つことが示唆されている。そこで、このような 2 つのモードを持つ NS からの重力波に焦点を当て、重力波観測による NS の質量推定法を新たに提案した。そして、モンテカルロシミュレーションを用いることで、Einstein Telescope のような第三世代の重力波検出器での観測では、歳差角が一様に分布しているという仮定のもとで、1kpc 離れた扁平率が 10^{-6} である孤立 NS の約半数を、その質量の 20% 程度の精度で推定できることを示した [28, 43, 44]。

重力波検出器データに内在する非ガウス性の研究

バースト性の重力波を探査すると、多くのイベント (信号候補) が現れるが、実際にはそれらはグリッチノイズと呼ばれる、短時間で励起、減衰する地球・人間活動・機器起源のノイズである。これらのイベントは発生原因についてはわかっていないことが多く、一概に棄却することはできない。また、真の信号の背景として、false alarm probability、ひいては信号閾値を上昇させており、低信号対雑音比の信号を検出する上で妨げになっている。本研究では、非ガウス性と非定常性を区別する重要性を説き、非ガウス性を Student-t 分布によって特徴付け、その度合いを計算する手法を提案、LIGO S5 データに適用することでその有用性を示した [10]。非ガウス性が強い領域では、従来のマッチドフィルターとは異なるフィルターを使うことによって、より統計的に最

適な検出統計量を構成できる。今回の研究は、このような統計量を使うか否かの基準を提供する。

<受賞>

- [1] N. Oshita, JGRG presentation award, Gold Prize, The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG25), 2015 年 12 月 7 日-11 日.

<報文>

(原著論文)

- [2] T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J. Yokoyama, “Galilean Creation of the Inflationary Universe,” JCAP **1507** (2015) no.07, 017
- [3] T. Kunimitsu, T. Suyama, Y. Watanabe and J. Yokoyama, “Large tensor mode, field range bound and consistency in generalized G-inflation,” JCAP **1508**, no. 08, 044 (2015)
- [4] N. Oshita and J. Yokoyama, “Entropic interpretation of the Hawking-Moss bounce,” arXiv:1603.06671 [hep-th]. Prog. Theor. Exp. Phys. in press.
- [5] A. Mazumdar, K. Saikawa, M. Yamaguchi and J. Yokoyama, “Possible resolution of the domain wall problem in the NMSSM,” Phys. Rev. D **93** (2016) no.2, 025002
- [6] S. Kuroyanagi, T. Hiramatsu and J. Yokoyama, “Reheating signature in the gravitational wave spectrum from self-ordering scalar fields,” JCAP **1602** (2016) no.02, 023
- [7] T. Fujita, X. Gao and J. Yokoyama, “Spatially covariant theories of gravity: disformal transformation, cosmological perturbations and the Einstein frame,” JCAP **1602** (2016) no.02, 014 doi:10.1088/1475-7516/2016/02/014
- [8] C. Ringeval, D. Yamauchi, J. Yokoyama and F. R. Bouchet, “Large scale CMB anomalies from thawing cosmic strings,” JCAP **1602**, no. 02, 033 (2016)
- [9] T. Harada, C. Yoo, T. Nakama and K. Koga, “Cosmological long-wavelength solutions and primordial black hole formation,” Phys. Rev. D **91**, 084057 (2015)
- [10] T. Yamamoto, K. Hayama, S. Mano, Y. Itoh, and N. Kanda, “Characterization of non-Gaussianity in gravitational wave detector noise” Accepted for publication in Phys. Rev. D (2016)
- [11] T. Nakama and T. Suyama, “Primordial black holes as a novel probe of primordial gravitational waves,” Phys. Rev. D **92**, 121304 (2015)
- [12] N. Oshita, K. Yamamoto and S. Zhang, “Quantum radiation produced by a uniformly accelerating charged particle in thermal random motion,” Phys. Rev. D **93** (2016) in press, arXiv:1509.03038 [hep-th].
- [13] N. Oshita, K. Yamamoto and S. Zhang, “Quantum radiation from a particle in an accelerated motion coupled to vacuum fluctuations,” Phys. Rev. D **92**, 045027 (2015)
- [14] S. Saga, D. Yamauchi and K. Ichiki, “Weak lensing induced by second-order vector mode,” Phys. Rev. D **92**, no. 6, 063533 (2015)
- [15] T. Namikawa, D. Yamauchi, B. Sherwin and R. Nagata, “Delensing Cosmic Microwave Background B-modes with the Square Kilometre Array Radio Continuum Survey,” Phys. Rev. D **93**, no. 4, 043527 (2016)
- [16] P. Chen, T. Suyama & J. Yokoyama: “Spontaneous-scalarization-induced dark matter and variation of the gravitational constant”, Phys. Rev. D **92**, 124016 (2015),
- [17] H. Ogawa, T. Kobayashi & T. Suyama: “Instability of hairy black holes in shift-symmetric Horndeski theories”, Phys. Rev. D **93**, 064078 (2016), [arXiv:1510.07400].
- [18] K. Takahashi, T. Suyama and T. Kobayashi, “Universal instability of hairy black holes in Lovelock-Galileon theories in D dimensions”, Phys. Rev. D **93**, 064068 (2016)
- [19] K. Eda, A. Shoda, Y. Kuwahara, Y. Itoh and M. Ando, “All-sky coherent search for continuous gravitational waves in 677 Hz band with a torsion-bar antenna,” Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 011F01

(総説)

- [20] J. Yokoyama, “Issues on the inflationary magnetogenesis,” Comptes Rendus Physique **16** (2015) no.10, 1018.
- [21] K. Sato and J. Yokoyama, “Inflationary cosmology: First 30+ years,” Int. J. Mod. Phys. D **24** (2015) no.11, 1530025.
- [22] D. Yamauchi *et al.* [SKA-Japan Consortium Cosmology Science Working Group Collaboration], “Cosmology with the Square Kilometre Array by SKA-Japan,” Publication of Japan SKA Consortium, arXiv:1603.01959 [astro-ph.CO].

(会議抄録)

- [23] J. yokoyama, “Birth of the inflationary universe and tensor fluctuations,” Proc. 2nd LeCosPA symposium everything about gravity, in press.
- [24] T. Suyama, “Primordial black holes as a novel probe of primordial gravitational waves,” Proc. 2nd LeCosPA symposium everything about gravity, in press.
- [25] Y.F. Cai and T. Suyama, “Summary of Parallel Session : Cosmology-Early Universe,” Proc. 2nd LeCosPA symposium everything about gravity, in press.

- [26] T. Hayashinaka and T. Suyama, “QED correction to magnetic dipole radiation,” Proc. 2nd LeCosPA symposium everything about gravity, in press.
- [27] N. Oshita, K. Yamamoto, and S. Zhang, “Unruh radiation produced by a uniformly accelerating charged particle in thermal random motions,” Proc. 2nd LeCosPA symposium everything about gravity, in press.
- [28] K. Eda, K. Ono and Y. Itoh, “Determination of mass of an isolated neutron star using continuous gravitational waves with two frequency modes: an effect of a misalignment angle,” Proc. 11th Amaldi Conference, in press
- (学位論文)
- [29] 國光太郎: “Classical and Quantum Aspects of Cosmic Inflation Models” (博士論文)
- [30] 中間智弘: “Cosmological constraints on short-wavelength primordial perturbations” (博士論文)
- [31] 大下 翔誉: 「ブラックホールを種としたインフレーション宇宙の生成」(修士論文)
- (著書)
- [32] 横山順一『輪廻する宇宙 ダークエネルギーに満ちた宇宙の将来』講談社 206 ページ。
- (国内解説記事)
- [33] Kipp Cannon, 端山和夫, 伊藤洋介, 高橋博毅「重力波の初検出と情報処理技術 - LIGO と KAGRA で活用されている情報処理技術 - 」, 情報処理 Vol.57 No.5 May 2016
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [34] J. Yokoyama, “Independent Component Analysis for Gravitational Waves,” GWPAW, Osaka, June 16.
- [35] T. Suyama, “Probing primordial perturbation on small scales,” Mini-workshop on inflation, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, March 10.
- [36] T. Suyama, “Neutron stars in scalar-tensor theories,” 4th Annual Symposium of the Innovative Area on Multi-messenger Study of Gravitational Wave Sources, Kavli IPMU, the University of Tokyo, February 18 - 20.
- [37] T. Suyama, “Spontaneous scalarization-induced dark matter and variation of the gravitational constant,” The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, December 7 - 11.
- [38] T. Suyama, “Generation of sparse and localized curvature perturbation from inflation,” COSMO15, COSMO-15, the University of Warsaw, Warsaw, Poland, September 7 - 11.
- [39] Y. Itoh, “Search for continuous gravitational wave from neutron stars” Joint symposium by three innovative areas: Gravitational Wave Source / Underground Particle-Nuclear Research / Neutron Star Matter ”Universe and Astronomical Objects Uncovered by Multi-Fold Approach ” Tohoku University, Sendai, 2015/07/25
- [40] T. Kunimitsu, T. Suyama, Y. Watanabe, J. Yokoyama, “Large Tensor Mode, Field Range Bound and Consistency in Generalized G-Inflation,” Gordon Research Conference on String Theory & Cosmology, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, May 31 - June 5, 2015.
- [41] T. Kunimitsu, T. Suyama, Y. Watanabe, J. Yokoyama, “Field range bound and consistency in generalized G-inflation,” COSMO-15, the University of Warsaw, Warsaw, Poland, September 7 - 11, 2015.
- [42] T. Nakama, K. Kohri and T. Suyama, “Annihilation signals from dark matter minihalos as a probe of primordial power on small scales revisited,” MG14 (Fourteenth Marcel Grossmann Meeting), University of Rome ”La Sapienza”, Rome, Italy, July 12 - 18, 2015.
- [43] K. Eda, K. Ono, and Y. Itoh, “Search for mass of an isolated neutron star using gravitational wave observations”, 11th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves, Gwangju, South Korea, 2015/6/25
- [44] K. Eda, K. Ono, and Y. Itoh, “Determining mass of an isolated neutron star using gravitational waves”, 14th Marcel Grossmann Meeting (MG14), Rome, Italy, 2015/7/12-18
- [45] K. Eda, A. Shoda, Y. Kuwahara, Y. Itoh, and M. Ando, “Search for low-frequency continuous gravitational waves with a torsion-bar antenna”, Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop (GWPAW) 2015, Osaka, Japan, 2015/6/17-20
- [46] K. Eda, A. Shoda, Y. Kuwahara, Y. Itoh, and M. Ando, “An all-sky search for continuous gravitational waves in low-frequency regime using the Phase-II TOBA data”, RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics, Nagano, Japan, 2015/8/3
- [47] K. Eda, A. Shoda, Y. Kuwahara, Y. Itoh, and M. Ando, “Data analysis of continuous gravitational wave in low-frequency regime using the Phase-II TOBA data”, 10th Bi-Monthly Workshop on ”New Developments in Astrophysics Through Multi-Messenger Observations of Gravitational Wave Sources”, Osaka City University, 2015/8/7

- [48] K. Eda, A. Shoda, Y. Kuwahara, Y. Itoh, and M. Ando, “An all-sky coherent search for continuous gravitational waves in 6-7 Hz band with a torsion-bar antenna”, The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG25), Kyoto University, 2015/12/8
- [49] T. Hayashinaka, “QED effective action for background field in de Sitter spacetime”, RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics, Tochigi, 2 Aug. 2015
- [50] T. Hayashinaka, “Fermionic Schwinger current in 4-d de Sitter spacetime”, 12th Conference in the Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics, Daejeon, Korea, 15 Oct. 2015
- [51] T. Hayashinaka, “Fermionic Schwinger Current in 4-d de Sitter Spacetime”, The 25th workshop on General Relativity and Gravitation, Kyoto, 8 Dec. 2015
- [52] T. Hayashinaka, “QED Correction to Radiation from Magneters”, the Second LeCosPA Symposium Everything About Gravity, National Taiwan University, 14 Dec. 2015
- [53] K. Takahashi: “Equation of state of dark energy in $f(R)$ gravity”, RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics, (Nikko, Tochigi, 8/3, 2015)
- [54] K. Takahashi: “Equation of state of dark energy in $f(R)$ gravity”, COSMO15, (Warsaw, Poland, 9/8, 2015)
- [55] K. Takahashi: “Universal instability of hairy black holes in Lovelock-Galileon theories in D dimensions”, JGRG25, (YITP, Kyoto, 12/9, 2015)
- [56] N. Oshita and Jun’ichi Yokoyama, “Black holes as seeds of baby universe”, The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG25), Kyoto, Kyoto University, December, 8th, 2015.
- [57] N. Oshita, Kazuhiro Yamamoto, Sen Zhang, “Unruh radiation produced by a uniformly accelerating charged particle in thermal random motion”, Second LeCosPA International Symposium: Everything about Gravity, Taiwan, National Taiwan University, December, 17th, 2015.
- 招待講演
- [58] J. Yokoyama, “Galilean Creation of the Inflationary Universe”, Gordon research conference on string theory and cosmology, Hong Kong University of Science and Technology, June 1.
- [59] J. Yokoyama, “Gravitational waves from the early universe,” Hot topics in general relativity and gravitation, ICISE, Vietnam, August 10.
- [60] J. Yokoyama, “Galilean Creation of the Inflationary Universe,” COSMO 15, Warsaw University, Poland, September 11.
- [61] J. Yokoyama, “Gravitational waves from the early universe,” CosPA 2015, Institute for the Physics of the Universe, IBS, Korea, October 16.
- [62] J. Yokoyama, “Birth of the inflationary universe and tensor perturbations,” 2nd LeCosPA symposium Everything about gravity, LeCosPA, National Taiwan University, Taiwan, December 17.
- [63] J. Yokoyama, “Gravitational radiation and CMB anisotropy from cosmic strings created during inflation,” Cosmic strings@Brazil, Sao Paulo University, San Carlos, Brazil, February 16.
- [64] J. Yokoyama, “Approaches to inflationary cosmology,” 1st CORE-U Conference: Intense Fields and Extreme Universe, Hiroshima University, March 7.
- [65] T. Suyama, “Spontaneous scalarization : asymmetron as dark matter,” Exploring Theories of Modified Gravity, U. Chicago, Oct. 12 - 14.
- [66] T. Suyama, “Primordial black holes as a novel probe of primordial gravitational waves,” 国立台湾大学, 台北, Dec. 14 - 18.
- [67] D. Yamauchi: “Cosmology with the Square Kilometre Array by SKA-Japan”; Dark Side of the Universe (Kyoto, 12/14, 2015)
- [68] N. Oshita, “Hawking radiation from the view point of the inflationary universe and laser cosmology”, First CORE-U international conference : Intense fields and extreme universe, Hiroshima, Hiroshima University, March, 8th, 2016.
- (国内会議)
- 一般講演
- [69] 須山輝明, “自発的スカラー化、修正重力、暗黒物質,” 新学術領域「重力波天体」A05 班合宿, 伊豆, Jan. 7 - 9.
- [70] 須山輝明, “自発的スカラー化を伴うスカラー・テンソル理論と暗黒物質,” 日本物理学会第71回年次大会, 東北学院大学, Mar. 19 - 22.
- [71] 山内大介: “SKA による宇宙論”; 日本天文学会 2015 年秋季大会 (甲南大学, 9/11, 2015)
- [72] 山内大介: “SKA-JP Cosmology SWG の活動”; 銀河進化と遠方宇宙 2015 (兵庫, 9/7, 2015)
- [73] 中間 智弘、須山照明、横山順一: “短波長原始ゆらぎの観測的探求”; 日本物理学会 2015 年秋季大会、大阪市立大学、大阪府、日本、2015 年 9 月 25 日 - 28 日.
- [74] 枝和成, 伊藤洋介, 神田展行, 田中一幸, KAGRA DAS Collaborators, 「iKAGRA へ向けた連続重力波探査パイプラインの構築」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪市立大学, 2015 年 9 月 27 日
- [75] 枝和成, 伊藤洋介, 「連続重力波探査におけるカイニ乗検定を用いた検出器雑音の棄却法」, 日本物理学会 2016 年年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 22 日
- [76] 林中貴宏、天文若手夏の学校 2015、「インフレーション中の QED における非摂動効果の研究と原始磁場形成理論への応用」、長野県、2015 年 7 月 28 日

- [77] 林中貴宏、SKA サイエンス会議 宇宙磁場 2015、「インフレーション磁場形成と Schwinger 効果」、鹿児島大学、2015 年 9 月 17 日
- [78] 林中貴宏、藤田智弘、横山順一、日本物理学会、「インフレーション原始磁場形成と Schwinger 効果」、大阪市立大学、2015 年 9 月 28 日
- [79] 高橋 一史: 「 $f(R)$ 重力理論におけるダークエネルギーの状態方程式」、日本物理学会 2015 年秋季大会 (大阪市立大学、9/28、2015)
- [80] 高橋 一史: 「 D 次元 Lovelock-Galileon 理論におけるブラックホールの不安定性」、日本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学、3/20、2016)
- [81] 大下翔誉、山本一博、張森、“Radiation from a particle in an accelerated motion coupled to vacuum fluctuations”, 日本物理学会秋季大会, 大阪市立大学, 大阪, 2015 年 9 月 27 日
- [82] 大下翔誉、横山順一、“ブラックホールが生成するインフレーション宇宙”, 日本物理学会春季大会, 東北学院大学, 宮城, 2015 年 3 月 21 日
- (セミナー)
- [83] J. Yokoyama, “Galilean Creation of the Inflationary Universe,” McGill University, December 2.
- [84] J. Yokoyama, “Creation of the inflationary universe out of a black hole,” ICTP Brazil seminar, February 22.
- [85] J. Yokoyama, “Creation of the inflationary universe out of a black hole,” ETH Physics seminar, March 2.
- [86] 横山順一、「インフレーション宇宙論と宇宙の創生」山口大学セミナー 3 月 9 日。
- [87] 須山輝明、“Discrimination of the origin of the primordial perturbation” 名古屋大学素粒子セミナー 2015 年 5 月 12 日
- [88] 須山輝明、“Spontaneous scalarization : asymmetron as dark matter” CENTRA セミナー (リスボン) 2015 年 9 月 3 日
- [89] 須山輝明、“Spontaneous scalarization-induced dark matter and variation of the gravitational constant” 国立台湾大学 LeCosPA セミナー (台北) 2015 年 12 月 21 日
- [90] 須山輝明、“インフレーションと修正重力理論について” 神戸大学セミナー 2016 年 1 月 28 日
- [91] Y. Itoh, “Determining mass of an isolated neutron star using GW” Colloquium of the physics department of the Rikkyo University, 2015/05/26
- [92] 伊藤洋介、「重力波で探る中性子星」中性子星の観測と理論: 研究活性化ワークショップ京都大学理学研究科セミナーハウス、京都、2015/12/21-22
- [93] D. Yamauchi: “Cosmic strings and their future detectability”; Astrophysics & Cosmology Group seminar (Waseda University, Tokyo, 7/3, 2015)
- [94] D. Yamauchi, “Cosmic strings and their future detectability”; EHQG seminar (Nagoya University, Nagoya, 4/7, 2015)
- [95] T. Nakama, “Primordial black holes as a novel probe of primordial gravitational waves”; KEK Theory Seminar (Tsukuba, Japan, October 14, 2015)
- [96] 枝和成、「連続重力波データ解析の基礎」、重力波研究交流会、東京大学、2015 年 10 月 30 日
- [97] K. Takahashi, “Universal instability of hairy black holes in Lovelock-Galileon theories in D dimensions”; Joint Seminar on Cosmology and Gravitation, (RESCEU, University of Tokyo, Japan, February 8, 2016)
- [98] N. Oshita, “Birth of an inflationary universe out of a black hole,” Joint Seminar on Cosmology and Gravitation, (RESCEU, University of Tokyo, Japan, February 8, 2016)
- (集中講義)
- [99] 伊藤洋介、「重力波データ解析入門」、立教大学、2015 年 5 月 19 日、20 日、26 日、27 日
- [100] 伊藤洋介、「重力波データ解析」、宇宙線研究所、2016 年 3 月 11 日
- (アウトリーチ)
- [101] 横山順一、「静岡県立袋井高校見学会 進路講座」東京大学理学部、5 月 22 日
- [102] 横山順一、「恵泉女学園高校見学会 進路講座」東京大学理学部、7 月 3 日
- [103] 横山順一、「重力波で探る宇宙のはじまり」一般相対論 100 周年記念講演会、東京大学駒場祭、11 月 21 日
- [104] 横山順一、「重力波でさぐる輪廻する宇宙」SSH 講演会、日比谷高校、1 月 29 日
- [105] 伊藤洋介、「アインシュタインの重力波をとらえる」、東京大学オープンキャンパス、東京大学、8 月 6 日
- [106] 伊藤洋介、工大祭 2015 一般相対論 100 周年記念市民講演会パネルトーク、東京工業大学 10 月 11 日

6 一般物理実験

6.1 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ー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プラズマの基礎研究を行うと共に、量子科学技術研究開発機構で建設中の 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 装置を対象とした共同研究を進めている。

6.1.1 TST-2 実験の概要

TST-2 は球状トカマク (ST) 型の装置であり、プラズマの主半径、小半径はおよそ 0.36、0.23 m、電磁誘導、高周波波動を用いた最大プラズマ電流はそれぞれ 120、25 kA である。球状トカマク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、当研究室では早い時期からその基礎研究を行ってきた。現在もっとも重要な研究課題は、高周波 (RF) 電流駆動とそれによるプラズマの立ち上げであり、TST-2 では、主として低域混成波 (Lower-Hybrid Wave, LHW) を用いた電流駆動実験を行ってきた。2015 年度は、弱磁場側静電結合型コムライン (Capacitively-Coupled Comblin, CCC) アンテナを用いた実験を行い、磁場増強、上下リミターの設置等により、最大 25 kA のプラズマ電流の駆動・維持に成功した。維持されたプラズマの特性を理解するために種々の計測を行った。電子温度分布は中心が低いホローな分布であり、波動電力変調実験の結果から周辺加熱が示唆された。また、干渉計による密度計測からプラズマ上部に密度の高い領域があることがわかった。これらの測定結果と波動コードによる予測から、弱磁場側アンテナから放射されたパワーは、中心部ではなく周辺部やプラズマ上部に投入されており、電流駆動の効率が低下していることが示唆された。波動コードで様々な入射条件を検討した結果、上側からの入射で良好な中心加熱 (電流駆動) が期待されることがわかり、上側アンテナを新たに設計製作した。製作後に特性試験、調整を行い、2015 年度末に TST-2 に設置した。これまでの初期的な実験では、13 kA の電流駆動に成功している。

	CCC	グリル	ICC
偏波	LHW	LHW	FW
エレメント数	13	4	11
プラズマとの結合度	100 %	40 %	50 %
到達 I_p	25 kA	10 kA	13 kA
$I_p=10$ kA での電力	15 kW	70 kW	50 kW

表 6.1.1: TST-2 で使用されたアンテナの性能比較。

6.1.2 高周波プラズマ立ち上げ実験

CCC アンテナ実験

米国 General Atomics 社と共同開発した静電結合型コムライン (CCC) アンテナを用いて、低域混成波 (LHW) による非誘導プラズマ電流立ち上げ実験を行った。CCC アンテナの特徴は、一般的な LHW アンテナである導波管列アンテナの使用が難しい 200 MHz であっても、指向性の高い LHW を低い反射率で直接励起できる点である。これにより高パワー実験 (~100 kW) が可能となり、最大 25 kA の非誘導電流立ち上げに成功した。また、更に高い電流値を得る為にはトロイダル磁場の増強が必要であることがわかった。これは、現状ではプラズマ電流の上昇と共にプラズマ密度が上昇するため、トロイダル磁場強度を強めることで LHW のモード変換密度限界を緩和させる必要があるためである。実際、実験における高密度限界は入射波の磁場方向の屈折率 n_{\parallel} ($= -5.5$) のモード変換密度に対応している。トロイダル磁場は、パラメトリック崩壊による損失が顕著になる磁場 ($\omega \geq \omega_{LH}$) よりも低くある必要があり、密度と電流のスケーリングから外挿すると、約 35 kA が限界値となる。トロイダル磁場の増加なしにプラズマ電流を上昇させるには、入射 n_{\parallel} を増加させることで近接条件を緩和することが考えられるが、プラズマ中心部に到達する前に吸収され、有効に電流駆動できないことが危惧される。実際トムソン散乱計測システムで計測された温度分布は、中心で 10–30 eV、外側で 60–100 eV とホローであったため、入射 n_{\parallel} の増加により、プラズマ周辺部での吸収が強くなってしまふ。これを解決する手法として考えられるのが次節で説明する LHW の上側入射である。これにより LHW の密度限界の緩和、及びプラズマ中心付近での強い吸収が期待できる。

得られた結果から、これまで TST-2 で使用された導波管列 (グリル) アンテナ、誘電結合型コムライン (ICC) アンテナとの性能比較を行った。表 6.1.1 からわかるように、CCC アンテナが 200 MHz で LHW を入射する上で、最も効率的に電流を立ち上げていることがわかる。ICC アンテナは CCC アンテナと同様、コムライン型ではあるが FW アンテナであるためプラズマとの結合度が 50% と良くない。グリルアンテナはボンデロモータティブ力によるアンテナ前面密度の希薄化が原因で結合度が 40% と良くない。エレメント数の増加は入射 n_{\parallel} スペクトルの指向性を

高めるため、エレメント数が13本であるCCCアンテナは最も指向性の高い入射 n_{\parallel} スペクトルを励起することができる。

上側入射アンテナ

TST-2ではこれまでLHWの弱磁場側入射によるプラズマ電流駆動実験を行ってきた。LHWによるプラズマ電流駆動の効率を下げる要因として、最外殻磁気面外でのLHW吸収が挙げられる。光線追跡コードGENRAYによる計算の結果、プラズマの上側から入射されたLHWの屈折率が、入射時には $n_{\parallel} = 5.5$ であるのが、プラズマ中心部に伝搬するにもなると $n_{\parallel} \sim 30$ 程度まで増加することがわかった。このことにより、高密度でも波がプラズマ中心部まで伝搬し、そこで強い吸収が起こるため、球状トカマク型プラズマでのLHWを用いた電流駆動方式の実用性が高まると期待される。新アンテナの調整に関しては、まず真空容器外でインピーダンス整合をとる調整をした結果、 200 ± 3 MHzで1%以下の反射率が実現された。その後、アンテナを真空容器内(アンテナ全面 $z = 335$ mm)に設置し、フィードスルーも含めてインピーダンス整合をとったところ、 200 ± 3 MHzで8%以下の反射率が実現された。 200 MHzの電源からアンテナまでの伝送路の接続も完了し、上側CCCアンテナを用いた運転が開始された。

硬X線計測

LHWにより駆動される電流は高速電子が担っており、硬X線計測を行うことでその速度分布や空間分布を知ることができる。2014度の研究ではNaIシンチレータと光電子増倍管(PMT)を用いた計測器により、硬X線放射の径方向分布を測定した。しかし、PMTはトロイダル磁場の影響を受けてしまうので、シンチレーション光を光ファイバーで真空容器から離れたPMTまで伝送する必要があった。そのため、シンチレーション光が減衰しエネルギー分解能が悪化してしまうという問題があった。そこで、磁場の影響を受けないAPD(Avalanche Photo Diode)をシンチレーション光の読み出しに用いたシステムの開発を行った。PMTの信号の増倍率が105倍であるのに対して、APDは50–100倍程度しかないので、さらにオペアンプを用いた160倍の反転増幅回路を製作した。セシウム137からのエネルギースペクトルを測定した結果、エネルギー分解能はPMTが10.8%であったのに対しAPDは5.5%となった。信号のパルス幅はPMTが2 μ s、APDが5 μ sであり、時間分解能では現状PMTの方が優れている。またAPDでは60 mV程度の熱雑音があるため、35 keV以下の信号は見えない。この装置を用いて測定を行ったところ、当初はLHWによる高周波ノイズとコイル電源由来のノイズが非常に大きくX線測定は困難であった。しかし、貫通コンデンサーの使用、1点アース、APD以外の機器(オシロスコープ、電源)をTST-2から離す、グラウンドループやケーブルを

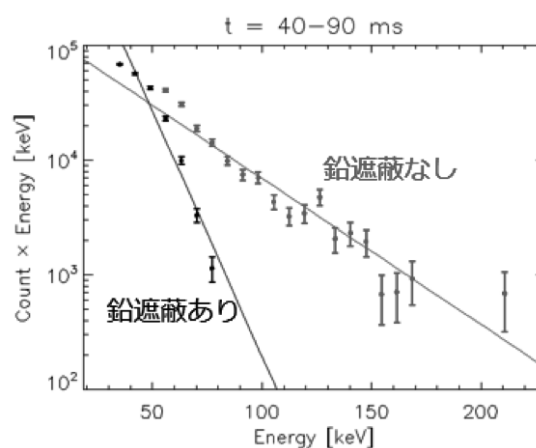


図 6.1.1: NaI+APD により計測された、RF プラズマにおける硬 X 線放射エネルギースペクトル。

束ねることによるループの減少、解析時のバンドパスフィルターの使用により、通電時のノイズはほぼ全て除去することができた。LHWで生成したプラズマのエネルギースペクトルを計測し、計測器を鉛で囲んだ場合と囲まない場合で比較した。図 6.1.1 から、視線を鉛で遮蔽すると放射が減るので、プラズマ由来の硬 X 線が計測されていることがわかる。

軟 X 線計測

可視光–軟 X 線 (1 eV–10 keV) の範囲に感度を持つフォトダイオードアレイを用いてプラズマの放射光強度計測を行った。LHWの入射電力に1.12 kHzの変調をかけて計測を行ったところ、プラズマ電流の増加が大きい30–45 msでは発光強度の変調成分の振幅の分布は非変調成分の分布によく一致していた。また、変調の遅れ時間がプラズマ中心付近で最も小さく、周辺で増加していることから、LHWの吸収はプラズマ中心付近で主に起こっていると考えられる。一方で、電流上昇が緩やかになる55–80 msの分布については、変調成分の振幅の分布が大半径の小さい領域に集中しているのに対して、非変調成分はプラズマ中心にピークを持っている。変調の遅れ時間もプラズマ中心でピークを持っていることから、この時間帯ではLHWのパワーはプラズマ周辺部で吸収され、プラズマ中心へ向かって輸送されていることが示唆される。

アンテナからの銅不純物の影響

CCCアンテナ表面は銅であり、これが不純物としてプラズマ電流立ち上げに影響を与えている可能性があった。そこでRFプラズマにおいて銅のラインスペクトルを可視分光器で測定することにより、銅の同定と銅の発生機構の解明を試みた。分光測定の結果、プラズマ中には中性銅 (CuI: 324.7 nm, 327.4 nm)

が存在することがわかった。また、アンテナ近傍の視線で銅の発光強度が他の視線と比べて大きいことがわかり、銅はアンテナから放出されていることが示された。さらに、発光強度はLHWのパワーにほぼ比例しており、銅はRFシーススパッタリングによりアンテナ表面から放出されている可能性が示唆された。また、波長範囲0–900 nmにおける中性銅のラインスペクトルの強度(200–900 nmの強度は測定値、0–200 nmの強度は相対強度を用いて推定)が40 W程度であると見積もられ、LHWのパワー(約50 kW)に比べて小さく、プラズマに与える影響は小さいことがわかった。

干渉計による密度分布推定

RFプラズマに対してマイクロ波干渉計の水平方向計測視線を用いることで、水平方向線積分電子密度の鉛直方向の分布を得た。プラズマ電流が10–15 kA以上ある時に分布がフラットな形状を持つことがわかった。トムソン散乱で計測されたミッドプレーン上の密度は主半径方向に釣鐘状の分布をとることから、LCFS内の電子密度と同等の密度が $z = 200$ mmに存在することが示唆された。

MEGAによるRFプラズマモデリング

TST-2のLHW立ち上げプラズマでは、バルク電子の担う圧力は全体の1%程度にすぎず、ほとんどの圧力は高速電子が担っていることが示唆されている。そこで、高速粒子・MHD連結シミュレーションコードMEGAを用いて、プラズマ電流9 kAの放電のモデリングを行った。低圧力、低密度の計算を行うため、MEGAの数値的安定性を改善した。また、磁気面から大きく外れる高速電子の振る舞いを調べるため、粒子軌道追跡を実装した。初期分布関数としては、光線追跡コードGENRAYとFokker-PlanckコードCQL3Dにより得られたものを参考にした。得られた時間平均圧力分布、及び温度分布は3流体平衡計算[6]の結果と比較し、定性的・定量的に一致することが確認された(図6.1.2)。揺動成分については、さらなる解析が必要である。ポロイダル断面での電場揺動の空間構造を図6.1.3に示す。これらの計算では空間的に一様な電子分布関数を用いたが、もう少し現実的な、ホローな高速電子分布を初期条件としたモデリングが進行中である。初期的な解析では、かなりの高速電子がリミターに衝突し損失することが示された。高速電子の平衡への影響の解析、硬X線計測との比較を行っていく予定である。

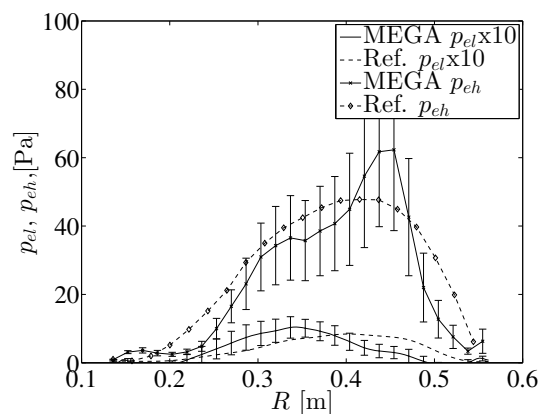


図 6.1.2: MEGA により得られた時間平均圧力分布と3流体平衡計算[6]の比較。エラーバーは時間的揺動振幅と分布関数モデル依存性を含む。

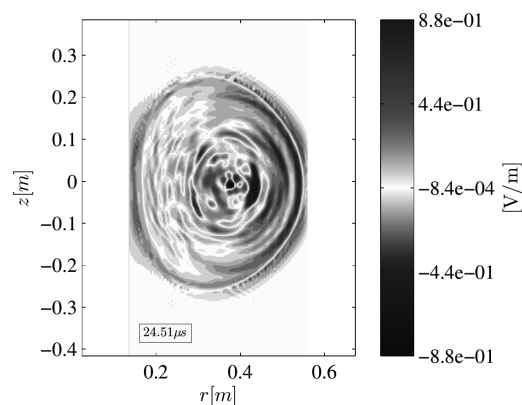


図 6.1.3: MEGA により得られた E_{\parallel} 分布。

6.1.3 OH プラズマ実験

ログスキープローブを用いたプラズマ周辺部の局所電流計測

球状トカマク TST-2 においては、プラズマ平衡、乱流、不安定性に関する種々の研究がなされている。プラズマ内部を流れる電流密度分布はそれらと深い関係があり、電流密度分布計測は極めて意義が高い。TST-2 では、局所電流の直接計測が可能な小型高巻線密度ログスキープローブを開発し、そのログスキープローブ 2 つと、磁場計測用のピックアップコイル 5 つ、電子密度温度計測用の静電プローブ 2 つを搭載したログスキープローブを設計製作した。プラズマとの絶縁のためにログスキープローブヘッドはセラミックで覆われている。ログスキープローブを用いて、電流貫通穴を貫通した電流の直接計測が可能である。また、本プローブはトカマクの主半径方向に移動可能で、貫通穴の向きをトロイダルポロイダル面で回転可能なことから、電流の流れる向きを含めた分布計測が可能である。プローブの主半径位置を固定し、プラズマ放電ごとに電流貫通穴の向きとトロイダル方向の成す角を変えながら電流信号を計測した結果、磁場が穴を貫通できない角度においても有限な電流信号が観測され、計測した角度分布の幅が幾何学的条件から計算した曲線の幅より広くなることがわかった。この違いはセラミックとプラズマの境界に形成されたプラズマシースの影響であると考え、ログスキープローブを用いた計測条件を考慮したシースモデルを新たに考案した。そのシースモデルをもとに磁場が穴を貫通できない条件において電子の軌道を数値計算したところ、電子の軌道がシース電場による $E \times B$ ドリフトの影響を貫通方向に受け、電子が穴を貫通し得ることがわかった。特に、角度分布の幅は電子温度に比例し磁場の強さに反比例することがわかった。

本プローブを用い、球状トカマクにおける磁気再結合現象 (IRE) を調査した。本計測では、ログスキープローブの計測結果から、IRE 中の局所的な電流揺動の存在が明らかとなり、IRE の瞬間に局所電流の流れる方向が反転することがわかった。高速度カメラを用いて電流信号を同時に観測したところ、電流の流れる方向が反転する瞬間にプローブの発光箇所も反転することがわかり、電流反転現象を支持するデータを得ることができた。

6.1.4 計測器開発

マルチパストムソン散乱計測

LHW で駆動された TST-2 プラズマの電子温度・密度分布を精度良く計測するため、マルチパストムソン散乱計測システムの開発を行っている。このシステムは通常のトムソン散乱計測システムに加え、Q スイッチ型レーザー装置の光学共振器と同様の光学系を持ち、レーザーパルスはミラー間に同軸上に閉じ込められプラズマ内部を何度も通過する。往復

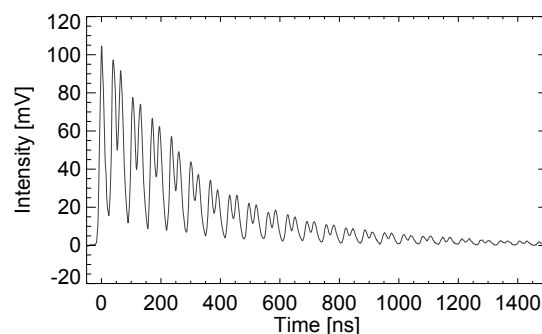


図 6.1.4: マルチパストムソン散乱計におけるラマン散乱信号。

の時間スケールは温度・密度変化のそれに対して十分早いため、得られた複数の散乱信号を積算することで信号量を稼ぐ。マルチパストムソン散乱計測によって改善される SN 比は 1 往復ごとの光学損失に依存するため、必要最低限かつ高性能（高透過率または高反射率）の部品で構成されるシステムを整備した。このシステムの光学損失は 20% 程度であり、1 パス目と比べて 10 倍の信号量が得られたことを窒素のラマン散乱計測により確認した (図 6.1.4)。

マイクロ波散乱計

低域混成波 (LHW) により生成されたプラズマの解析には、波動の数値計算が必須であるが、そのための数値計算コードは実際の実験における計測によって妥当性を検証することが重要である。TST-2 では LHW を直接計測できるマイクロ波散乱計を設計製作中である。プローブ光の周波数・入射方向を掃引し、LHW によって散乱された光を多点計測することで、プラズマ内部の波動の空間構造を推定することが可能である。計測器は 2016 年度に設置予定である。

6.1.5 共同研究

QUEST におけるトムソン散乱

2014-2015 年度の 2 年間で開発した制御回路を導入し、1 μs 以内の誤差で電子温度・電子密度の計測をすることが可能になった。本システムを用いて、ガスバフ入射とコンパクトトラス (CT) 入射による QUEST プラズマ応答、粒子供給量の評価を行った。8.2 GHz RF プラズマに対するガスバフによって 0.03 s 以下の短い時間で電子温度は減少し、密度は高くなる。その後、高い密度を維持したまま、温度は 2 s で 50% まで回復する。また、OH プラズマへの CT によるインボード/アウトボード側での電子温度・電子密度の変化を観測することに成功した。ガスバフと CT 入射による密度分布の時間変化

から、ガスパフでは供給粒子数 0.8×10^{16} 個で供給効率 0.013%、CT では供給粒子数 4.7×10^{16} 個で供給効率 0.009% と評価された。

LHD 装置における反射計計測

高周波はプラズマの加熱や電流駆動に用いられるが、その理解と制御のために、プラズマ中での高周波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計測であり、微小な電子密度変動を測定できることから、高周波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、ICRF (周波数 38.47 MHz) 波動の計測を行っており、2015 年度は、これまでのデータの解析を進めた。近接した 2 点間の波動由来密度振動の位相を調べた結果、全体としては同相である頻度が最も高いものの、2 点間の距離が離れた場合のデータから、波動がプラズマ外側から磁気軸側に向かって伝搬している傾向 (図 6.1.5(a) 赤線)、吸収が弱いと予測される条件では、定在波構造が見られやすいことがわかった (図 6.1.5(b))。

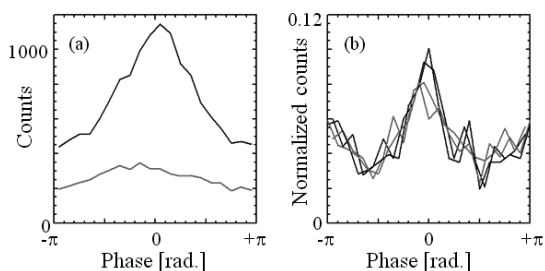


図 6.1.5: (a) 計測された位相のヒストグラム。黒 : 全データ、赤 : 2 周波数のカットオフ間の距離が平均 (=26 mm) より大きいもの。(b) 吸収の弱いパラメータ領域における (a) と同様のヒストグラム。複数のプロットは異なる解析手法を用いて生成したもの。

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Wakatsuki, T. Suzuki, N. Hayashi, J. Shiraishi, S. Ide, Y. Takase: Simulation of plasma current ramp-up with reduced magnetic flux consumption in JT-60SA, *Plasma Phys. Control. Fusion* **57**, 065005 (2015).
- [2] Shintaro TSUDA, Akira EJIRI, Hitoshi TANAKA, Yuichi TAKASE, Masaki UCHIDA, Takashi MAEKAWA, Naoto TSUJII and Toshihiro TAKEUCHI: Measurement of Ion Temperature and Flow in RF Start-Up Plasmas in TST-2 and LATE, *Plasma Fusion Res.* **10**, 1202064 (2015).
- [3] Kishore Mishra, H. Zushi, H. Idei, M. Hasegawa, T. Onchi, S. Tashima, S. Banerjee, H. Hanada, H. Togashi, T. Yamaguchi, A. Ejiri, Y. Takase, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, A. Kuzmin and QUEST team: Self organization of high β p plasma equilibrium with an inboard poloidal magnetic field null in QUEST, *Nucl. Fusion* **55**, 083009 (2015).
- [4] T. Shinya, Y. Takase, T. Wakatsuki, A. Ejiri, H. Furui, J. Hiratsuka, K. Imamura, T. Inada, H. Kakuda, H. Kasahara, R. Kumazawa, C. Moeller, T. Mutoh, Y. Nagashima, K. Nakamura, A. Nakanishi, T. Oosako, K. Saito, T. Seki, M. Sonehara, H. Togashi, S. Tsuda, N. Tsujii, T. Yamaguchi: Non-inductive Plasma Start-up Experiments on the TST-2 Spherical Tokamak Using Waves in the Lower-hybrid Frequency Range, *Nucl. Fusion* **55**, 073003 (2015).
- [5] N. Tsujii, M. Porkolab, P. T. Bonoli, E. M. Edlund, P. C. Ennever, Y. Lin, J. C. Wright, S. J. Wukitch, E. F. Jaeger, D. L. Green, and R. W. Harvey: Validation of full-wave simulations for mode conversion of waves in the ion cyclotron range of frequencies with phase contrast imaging in Alcator C-Mod, *Phys. Plasmas* **22**, 082502 (2015).
- [6] A. Ishida, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, H. Togashi, Y. Yoshida, T. Shinya and S. Tsuda: Three-fluid axisymmetric equilibrium model and application to spherical torus plasmas sustained by RF electron heating, *Plasma Fusion Res.* **10**, 1403084 (2015).
- [7] H. Togashi, A. Ejiri, H. Homma, T. Shinya, Y. Takase, K. Toida, N. Tsujii, T. Yamaguchi, Y. Yoshida, M. Hasegawa, Y. Nagashima, H. Furui, K. Nakamura, W. Takahashi, T. Takeuchi, M. Sonehara, S. Yajima and H. Ymazaki: First measurement of electron temperature and density profiles for spherical tokamak plasmas sustained by lower hybrid wave, *Plasma Fusion Res.* **10**, 1202082 (2015).
- [8] T. Ii Tsujimura, S. Kubo, H. Takahashi, R. Makino, R. Seki, Y. Yoshimura, H. Igami, T. Shimozuma, K. Ida, C. Suzuki, M. Emoto, M. Yokoyama, T. Kobayashi, C. Moon, K. Nagaoka, M. Osakabe, S. Kobayashi, S. Ito, Y. Mizuno, K. Okada, A. Ejiri, T. Mutoh and the LHD Experiment Group: Development and application of a ray-tracing code integrating with 3D equilibrium mapping in LHD ECH experiments, *Nuclear Fusion* **55**, 123019 (2015).
- [9] Akira EJIRI, Yuichi TAKASE, Naoto TSUJII, Takahiro SHINYA, Satoru YAJIMA, Masateru SONEHARA, Hirokazu FURUI, Hiro TOGASHI, Hiroto HOMMA, Kenta NAKAMURA, Toshihiro TAKEUCHI, Yusuke YOSHIDA, Wataru TAKAHASHI, Kazuya TOIDA, and Hibiki YAMAZAKI: RF central solenoid operation for plasma produc-

tion and current drive in TST-2, Plasma Fusion Res. **11**, 1202004 (2016).

(会議抄録)

- [10] H. Togashi, A. Ejiri, H. Homma, T. Shinya, Y. Takase, K. Toida, N. Tsujii, T. Yamaguchi, Y. Yoshida, H. Furui, M. Sonehara, K. Nakamura, W. Takahashi, T. Takeuchi, S. Yajima, H. Yamazaki, M. Hasegawa, Y. Nagashima and H. Tojo: Thomson scattering measurements in low-density plasmas in the TST-2 spherical tokamak, JINST **10**, C12020 (2015).
- [11] A. Ejiri, T. Tokuzawa, N. Tsujii, K. Saito, T. Seki, H. Kasahara, S. Kamio, R. Seki, T. Mutoh, I. Yamada and Y. Takase: Measurements of ICRF wave-induced density fluctuations in LHD by a microwave reflectometer, JINST **10**, C12032 (2015).
- (学位論文)
- [12] 角田英俊: Wavenumber Measurement of the Lower Hybrid Wave by an Electrostatic Probe with and Embedded High Impedance Resistor in the TST-2 Spherical Tokamak (博士論文).
- [13] 新屋貴浩: Non-Inductive Plasma Current Ramp-up on the TST-2 Spherical Tokamak Using the Lower Hybrid Wave (博士論文).
- [14] 古井宏和: Study of equilibrium and instabilities using a Rogowski probe in the TST-2 spherical tokamak (博士論文).
- [15] 竹内敏洋: Spectroscopic measurements of impurity line radiation from TST-2 spherical tokamak plasmas (修士論文).
- [16] 矢嶋悟: Radiation profile measurements in TST-2 spherical tokamak plasmas driven by the lower hybrid wave (修士論文).
- [17] 吉田裕亮: Reconstruction of electron density profile in non-inductively driven plasmas in the TST-2 spherical tokamak (修士論文).
- [18] 本間寛人: トムソン散乱計測法を用いた QUEST 球状トカマクへの燃料入射に対するプラズマ応答の研究 (修士論文).
- [19] 中村建大: 硬X線計測システムの開発と TST-2 球状トカマクプラズマへの適用 (修士論文).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [20] N. Tsujii, M. Porkolab, P.T. Bonoli, E.M. Edlund, P.C. Ennever, Y. Lin, J.C. Wright, S.J. Wukitch, E.F. Jaeger, D.L. Green and R.W. Harvey: Measurement and simulation of ICRF wave intensity with a recalibrated phasecontrast imaging diagnostic on Alcator C-Mod, 21st Topical Conference on Radiofrequency Powers in Plasmas, Lake Arrowhead, California, USA, Apr. 27-29, 2015.
- [21] Y. Takase, A. Ejiri, T. Inada, C.P. Moeller, T. Shinya, N. Tsujii, S. Yajima, H. Furui, H. Homma, K. Imamura, K. Nakamura, K. Nakamura, M. Sonehara, T. Takeuchi, H. Togashi, S. Tsuda and Y. Yoshida: Plasma current start-up using the lower hybrid wave on the TST-2 spherical tokamak, 21st Topical Conference on RF Power in Plasmas, Lake Arrowhead, CA, USA, Apr. 27-29, 2015.
- [22] A. Ejiri: Basics and practical applications of plasma diagnostics for tokamak experiments, The Third A3 Foresight Summer School on Plasma Physics 2015, Southwestern Institute of Physics, Chengdu, China, Jul. 20-24, 2015.
- [23] H. Homma, Y. Takase, A. Ejiri, T. Yamaguchi, H. Togashi, N. Tsujii, S. Masateru, T. Shinya, H. Furui, T. Takeuchi, K. Nakamura, S. Yajima, Y. Yoshida, W. Takahashi, K. Toida, H. Yamazaki, G. Benoit, M. Hasegawa, K. Hanada, H. Zushi, Y. Nagashima, S. Fujisawa, E. Uetaki, K. Nakamura, K. Tokunaga, H. Watanabe, O. Watanabe, T. Onch, H. Idei, Y. Oyama, K. Miura, QUEST Team, N. Fukumoto, M. Nagata, CT Team: Thomson scattering measurement of plasma behavior by gas injection in QUEST, The Third A3 Foresight Summer School on Plasma Physics 2015, Southwestern Institute of Physics, Chengdu, China, Jul. 20-24, 2015.
- [24] T. Takeuchi, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, W. Takahashi, T. Shinya, H. Furui, Y. Yoshida, M. Sonehara, H. Togashi, K. Nakamura, H. Homma, S. Yajima, K. Toida, H. Yamazaki, TST-2 team: Spectroscopic measurement of impurity radiation in TST-2, The Third A3 Foresight Summer School on Plasma Physics 2015, Southwestern Institute of Physics, Chengdu, China, Jul. 20-24, 2015.
- [25] W. Takahashi, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, T. Takeuchi, H. Furui, Y. Yoshida, M. Sonehara, T. Shinya, H. Togashi, K. Nakamura, H. Homma, S. Yajima, K. Toida and H. Yamazaki: Ion flow measurement using a visible spectrometer in TST-2 ohmic plasmas, The Third A3 Foresight Summer School on Plasma Physics 2015, Southwestern Institute of Physics, Chengdu, China, Jul. 20-24, 2015.
- [26] K. Toida, A. Ejiri, H. Togashi, H. Homma, Y. Takase, N. Tsujii, M. Sonehara, T. Shinya, H. Furui, T. Takeuchi, K. Nakamura, S. Yajima, Y. Yoshida, W. Takahashi, H. Yamazaki: Development of a fiber alignment system for the Thomson scattering measurement in TST-2, The Third A3 Foresight Summer School on Plasma Physics 2015, Southwestern Institute of Physics, Chengdu, China, Jul. 20-24, 2015.
- [27] H. Yamazaki, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, M. Sonehara, T. Shinya, H. Furui, H. Togashi, T. Takeuchi, K. Nakamura, H. Homma, S. Yajima,

- Y. Yoshida, W. Takahashi and K. Toida: Properties of hard X-ray emission from TST-2 RF sustained plasmas, The Third A3 Foresight Summer School on Plasma Physics 2015, Southwestern Institute of Physics, Chengdu, China, Jul. 20- 24, 2015.
- [28] H. Togashi, A. Ejiri, H. Homma, T. Shinya, Y. Takase, K. Toida, N. Tsujii, T. Yamaguchi, Y. Yoshida, H. Furui, M. Sonehara, K. Nakamura, W. Takahashi, T. Takeuchi, S. Yajima, H. Yamazaki, M. Hasegawa, and Y. Nagashima: Electron temperature and density profile measurement on the TST-2, 18th International Spherical Torus Workshop (ISTW 2015) and 2015 US-Japan Workshop on ST Plasmas, Princeton, New Jersey, USA, Nov. 3-6, 2015.
- [29] H. Furui, Y. Nagashima, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, F. Cheng, M. Sonehara, T. Shinya, H. Togashi, H. Homma, K. Nakamura, T. Takeuchi, S. Yajima, Y. Yoshida, W. Takahashi, K. Toida and H. Yamazaki: The measurement of plasma equilibrium and fluctuations near the plasma edge using a Rogowski probe in the TST-2 spherical tokamak, 18th International Spherical Torus Workshop (ISTW 2015) and 2015 US-Japan Workshop on ST Plasmas, Princeton, New Jersey, USA, Nov. 3-6, 2015.
- [30] N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, H. Furui, H. Homma, K. Nakamura, W. Takahashi, T. Takeuchi, H. Togashi, K. Toida, T. Shinya, M. Sonehara, S. Yajima, H. Yamazaki and Y. Yoshida: Measurement of lower-hybrid waves with microwave scattering on TST-2, 18th International Spherical Torus Workshop (ISTW 2015) and 2015 US-Japan Workshop on ST Plasmas, Princeton, New Jersey, USA, Nov. 3-6, 2015.
- [31] N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, H. Furui, H. Homma, K. Nakamura, W. Takahashi, T. Takeuchi, H. Togashi, K. Toida, T. Shinya, M. Sonehara, S. Yajima, H. Yamazaki and Y. Yoshida: Design of a microwave scattering diagnostic for lower-hybrid waves on TST-2, 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Nov 16-20, 2015, Savannah, Georgia, USA.
- [32] T. Shinya, S. G. Baek, G. M. Wallace, S. Shiraiwa, R. R. Parker, D. Brunner, B. LaBombard, and Y. Takase: Wavenumber measurement of lower hybrid waves using multiple RF magnetic probes on Alcator C-Mod, 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Nov 16-20, 2015, Savannah, Georgia, USA.
- [33] H. Homma, A. Ejiri, H. Togashi, Y. Takase, K. Toida, Y. Nagashima, M. Hasegawa, K. Hanada, N. Fukumoto, TST-2 Team, QUEST Team: Thomson Scattering Overview in QUEST, Joint Meeting on VEST and QUEST, Kyushu University, Kasuga, Japan, Dec. 17, 2015.
- [34] Y. Takase for the TST-2 Group: Experimental Study of Plasma Current Ramp-Up by the Lower Hybrid Wave (LHW) in the TST-2 Spherical Tokamak, 10th Asia Plasma & Fusion Association Conference (APFA2015) Gandhinagar, India, Dec. 14-18 2015.
- [35] A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, S. Yajima, T. Shinya, H. Yamazaki, C.P. Moellera, H. Togashi, K. Toida, H. Homma, H. Furui, H. Kasahara, T. Mutoh, K. Nakamura, B. Roidl, K. Saito, T. Seki, M. Sonehara, W. Takahashi, T. Takeuchi, Y. Yoshida: Plasma start-up experiments on the TST-2 spherical tokamak, Japan-Korea Workshop on “Physics and Technology of Heating and Current Drive in Fusion Plasmas” Hitachi Civic Center, Hitachi, Ibaraki, Dec 21-22, 2015.
- [36] A. Ejiri and TST-2 team: Recent activities in TST-2, The Fourth A3 Foresight Workshop on Spherical Torus (ST), Seoul National University (SNU), Seoul, Korea, Mar 3-4, 2016.
- [37] K. Toida, A. Ejiri, H. Togashi, H. Homma, Y. Takase, N. Tsujii, R. Benedikt, M. Sonehara, T. Shinya, H. Furui, T. Takeuchi, K. Nakamura, S. Yajima, Y. Yoshida, W. Takahashi, H. Yamazaki: Electron temperature and density measurements by Thomson scattering in TST-2, The Fourth A3 Foresight Workshop on Spherical Torus (ST), Seoul National University (SNU), Seoul, Korea, Mar 3-4, 2016..
- [38] W. Takahashi, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, T. Takeuchi, H. Furui, Y. Yoshida, M. Sonehara, T. Shinya, H. Togashi, K. Nakamura, H. Homma, S. Yajima, K. Toida and H. Yamazaki: Study of ion flow in TST-2 ohmic plasma, The Fourth A3 Foresight Workshop on Spherical Torus (ST), Seoul National University (SNU), Seoul, Korea, Mar 3-4, 2016.
- [39] H. Yamazaki, H. Furui, K. Yamasaki, T. Ushiki, Y. Takase, Y. Ono, A. Ejiri, N. Tsujii, B. Roidl, M. Sonehara, T. Shinya, H. Togashi, T. Takeuchi, K. Nakamura, H. Homma, S. Yajima, Y. Yoshida, W. Takahashi and K. Toida: Measurement of the current inside the current sheet of UTST merging plasma using a Rogowski prob, The US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection, Napa, California, USA, Mar. 7-11, 2016.
- [40] W. Takahashi, Y. Takase, A. Ejiri, N. Tsujii, H. Furui, T. Takeuchi, Y. Yoshida, M. Sonehara, T. Shinya, H. Togashi, K. Nakamura, H. Homma, S. Yajima, K. Toida and H. Yamazaki: Measurement of ion flow in ohmic plasmas by Doppler spectroscopy on TST-2, The US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection, Napa, California, USA, Mar. 7-11, 2016.
- 招待講演
- [41] Y. Takase: Non-inductive plasma start-up experiments on the TST-2 spherical tokamak: 18th Inter-

national Spherical Torus Workshop (ISTW 2015) and 2015 US-Japan Workshop on ST Plasmas, Princeton, New Jersey, USA, Nov. 3-6, 2015.

(国内会議)

一般講演

- [42] 古井宏和、永島芳彦、江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、曾根原正晃、新屋貴浩、富樫央、竹内敏洋、中村建大、本間寛人、矢嶋悟、吉田祐亮、高橋航、戸井田和弥、山崎響: 球状トカマク TST-2 におけるロゴスキープローブを用いた電流揺動計測、第 11 回 QUEST 研究会、九州大学 筑紫キャンパス、2015 年 7 月 23-24 日.
- [43] 富樫央、江尻晶、高瀬雄一、戸井田和弥、本間寛人、永島芳彦、長谷川真、花田和明、TST-2 Team、QUEST Team: QUEST および TST-2 における トムソン散乱計測、第 11 回 QUEST 研究会、九州大学 筑紫キャンパス、2015 年 7 月 23-24 日.
- [44] 高瀬雄一、TST-2 グループ: TST-2 の最近の結果および TST-2 と LATE でのフロー測定結果、第 11 回 QUEST 研究会、九州大学 筑紫キャンパス、2015 年 7 月 23-24 日.
- [45] 富樫央、TST-2 チーム: TST-2 球状トカマクプラズマに対する電子温度・密度分布計測、2015 年度第 54 回 プラズマ若手夏の学校、熱川ハイツ、静岡県伊豆熱川、2015 年 8 月 4-7 日.
- [46] 吉田裕亮、TST-2 チーム: マイクロ波干渉計を用いた電子密度分布の再構成、2015 年度第 54 回 プラズマ若手夏の学校、熱川ハイツ、静岡県伊豆熱川、2015 年 8 月 4-7 日.
- [47] 矢嶋悟、TST-2 チーム: フォトダイオードアレイを用いた、TST-2 における低域混成波による加熱効果の測定、2015 年度第 54 回 プラズマ若手夏の学校、熱川ハイツ、静岡県伊豆熱川、2015 年 8 月 4-7 日.
- [48] Wataru Takahashi, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, T. Takeuchi, H. Furui, Y. Yoshida, M. Sonehara, T. Shinya, H. Togashi, K. Nakamura, H. Homma, S. Yajima, K. Toida and H. Yamazaki: TST-2 オミックプラズマにおける可視分光器を用いたイオンフローの測定、2015 年度第 54 回 プラズマ若手夏の学校、熱川ハイツ、静岡県伊豆熱川、2015 年 8 月 4-7 日.
- [49] 戸井田和弥、TST-2 チーム: TST-2 におけるトムソン散乱計測のファイバーアライメントシステムの開発、2015 年度第 54 回 プラズマ若手夏の学校、熱川ハイツ、静岡県伊豆熱川、2015 年 8 月 4-7 日.
- [50] 山崎響、TST-2 チーム: TST-2 における高周波電流駆動プラズマの硬 X 線計測とその特性、2015 年度第 54 回 プラズマ若手夏の学校、熱川ハイツ、静岡県伊豆熱川、2015 年 8 月 4-7 日.
- [51] 江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、曾根原正晃、新屋貴浩、古井宏和、富樫央、竹内敏洋、中村建大、本間寛人、矢嶋悟、吉田祐亮、高橋航、戸井田和弥、山崎響: 最近の TST-2 の研究、NIFS 共同研究 ST 研究会 核融合研、土岐、2015 年 8 月 18-19 日.
- [52] 古井宏和、江尻晶、永島芳彦、高瀬雄一、辻井直人、曾根原正晃、山口隆史、新屋貴浩、富樫央、竹内敏洋、中村建大、本間寛人、矢嶋悟、吉田裕亮 B、高橋航、戸井田和弥、山響: 小型ロゴスキークoilを用いた電流計測におけるプラズマシースの影響の研究、日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大学 千里山キャンパス) 2015 年 9 月 16-19 日.
- [53] 新屋貴浩、高瀬雄一、江尻晶、辻井直人、矢嶋悟、曾根原正晃、高橋航、竹内敏洋、戸井田和弥、富樫央、中村建大、古井宏和、本間寛人、山響、吉田裕亮、C. P. Moeller: LHW を用いた電流立ち上げ実験における波動計測、日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大学 千里山キャンパス) 2015 年 9 月 16-19 日.
- [54] 矢嶋悟、江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、曾根原正晃、山口隆史、新屋貴浩、古井宏和、富樫央、竹内敏洋、中村建大、本間寛人、吉田裕亮、高橋航、戸井田和弥、山響: TST-2 におけるフォトダイオードアレイを用いた軟 X 線計測によるエネルギー輸送の研究、日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大学 千里山キャンパス) 2015 年 9 月 16-19 日.
- [55] 富樫央、江尻晶、戸井田和弥、本間寛人、山口隆史、新屋貴浩、高瀬雄一、辻井直人、吉田裕亮、曾根原正晃、高橋航、竹内敏、中村建大、古井宏和、矢嶋悟、山響、永島芳彦、長谷川真: 球状トカマク TST-2 におけるトムソン散乱計測法を用いた電子温度・密度分布計測、日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大学 千里山キャンパス) 2015 年 9 月 16-19 日.
- [56] 吉田裕亮、高瀬雄一、江尻晶、辻井直人、曾根原正晃、山口隆史、新屋貴浩、古井宏和、富樫央、竹内敏洋、中村建大、本間寛人、矢嶋悟、高橋航、戸井田和弥、山響: マイクロ波干渉計による電子密度分布計測、日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大学 千里山キャンパス) 2015 年 9 月 16-19 日.
- [57] 古井宏和、永島良彦、江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、曾根原正晃、新屋貴浩、富樫央、竹内敏洋、中村建大、本間寛人、矢嶋悟、吉田祐亮、高橋航、戸井田和弥、山崎響: 球状トカマク TST-2 におけるロゴスキープローブを用いた電流揺動計測、第 32 回プラズマ・核融合学会年会、名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂 2015 年 11 月 24 日-27 日 (26pC03).
- [58] 辻井直人、高瀬雄一、江尻晶、古井宏和、本間寛人、中村建大、高橋航、竹内敏洋、富樫央、戸井田和弥、新屋貴浩、曾根原正晃、矢嶋悟、山響、吉田裕亮: TST-2 におけるマイクロ波後方散乱を用いた低域混成波による非誘導プラズマ立ち上げの研究、第 32 回プラズマ・核融合学会年会、名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂 2015 年 11 月 24 日-27 日 (26aD30P).
- [59] 富樫央、江尻晶、戸井田和弥、本間寛人、新屋貴浩、高瀬雄一、辻井直人、吉田裕亮、曾根原正晃、高橋航、竹内敏洋、中村建大、古井宏和、矢嶋悟、山崎響、永島芳彦、長谷川真: TST-2 における非誘導立ち上げ球状トカマクプラズマの電子温度・密度分布計測、第 32 回プラズマ・核融合学会年会、名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂 2015 年 11 月 24 日-27 日 (24pD28P).
- [60] 江尻晶、新屋貴浩、古井宏和、辻井直人、矢嶋悟、吉田祐亮、高瀬雄一、曾根原正晃、富樫央、竹内敏洋、中村建大、本間寛人、高橋航、戸井田和弥、山響: 球状トカマク TST-2 における交流オーミックコイル運転によるプラズマ電流立ち上げ、第 32 回プラズマ・核融合

学会年会、名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂 2015 年 11 月 24 日-27 日 (27pC04).

- [61] 辻井直人、TST-2 グループ: TST-2 における低域混成波を用いた非誘導電流立ち上げ、第 5 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、2015 年 12 月 3 日.
- [62] 矢嶋悟、高瀬雄一、江尻晶、辻井直人、新屋貴浩、山崎響、曾根原正晃、高橋航、竹内敏洋、戸井田和弥、富樫央、中村建大、古井宏和、B. Roidl、本間寛人、吉田裕亮、C. P. Moeller: TST-2 における LHCD 用上側アンテナの設計及び取り付け計画の進展、第 5 回 ICRFICRF 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、2015 年 12 月 3 日.

6.2 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、大自由度で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、生命現象を取り扱う。

非平衡系では、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、自発的な秩序やマクロな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、流体现象などにおいてその存在が知られていたが、力学系の分岐理論やアトラクターの概念、カオスなどの理解の進展により、流体系に限らず、より広範な物理現象を含む大きなクラスとしての非線形力学系を持つ一般的な性質として学問体系が再編成されつつある。そのような観点からは、流体力学、液晶やコロイドなどのソフトマター、化学反応系、生命システムまで含めて、パターン形成や非線形振動、カオスや乱流といった自己組織現象の動力学は共通した特徴を持っており、系の詳細によらず統一的に記述し扱うことが可能である。以上に加えて最近では、微小な系におけるゆらぎの法則や、系の記憶と制御に伴う情報量の寄与を含めた非平衡熱統計力学に関しても著しい進展が見られ、1 分子計測技術やナノテクノロジーの発展とも相まって、非平衡系におけるゆらぎの理解が飛躍的に進みつつある。さらに近年、細胞や分子モーター、異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。

以上の研究を通して我々は、広い範囲の非平衡系に適用可能で、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、非平衡度を制御して観測される新現象を詳細に観測するアプローチを取っている。また、実験結果と理論との緊密なフィードバックにより、新たな手法開発と概念構築を目指して研究を行っている。

スタッフの構成としては、助教の平岩徹也と客員共同研究員の太田隆夫（京大名誉教授）が在籍している。

6.2.1 非平衡系の動力学・統計力学

古典乱流転移の普遍性

パイプ流やチャンネル流のような、開放せん断流と呼ばれる流れでは、整った流れである層流が線形安定であるにもかかわらず乱流への遷移が見られる。このような遷移における普遍的な法則の解明は一世紀以上の間未解決問題である。本研究室では、この遷移現象が非平衡系における相転移現象として捉えられる可能性に着目して研究を行っている。特に、Directed Percolation 普遍クラス (DP) という吸収状態 (系が一度入ると 2 度と出て行けない状態) への転移を示す系が属する代表的な非平衡臨界現象の普遍クラスに、属する可能性がある。実際、前年度までの研究で、大型のチャンネル実験系を構築して秩序変数や相関長の測定を行い、3 つのうち少なくとも 2 つの独立な臨界指数について DP と整合する結果が得られていた。

今年度は、前年度までに確立した実験系を用いてさらなる統計の蓄積を行った。その結果、残りひとつの臨界指数であった、相関時間の発散を特徴付ける臨界指数について、DP と整合する結果が得られた。さらに、活性状態の境界条件と流れがある系において、境界から十分遠方における非活性状態の時間間隔分布が普遍的なスケールリング則に従うことを数値計算で見出し、実験でも同様のスケールリング則が成り立っていることを確認した。一連の結果から、我々は、チャンネル流における乱流への遷移が DP に属すると結論付けた [14, 28, 61, 68]。

成長界面ゆらぎの初期条件依存性に関する研究

ランダム界面の成長を記述する Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 方程式は、普遍クラスを形成し、初期条件に応じて異なる普遍的なゆらぎの性質を発現する。これまでの研究により、液晶電気乱流中での界面成長は KPZ 普遍性クラスに属し、直線から成長する界面 (直線界面)・一点から成長する界面 (円形界面) でのゆらぎの性質が、対応する初期条件での厳密解と一致することが示された。

我々は、直線界面・円形界面の「中間」と考えられる、曲率を持った界面初期条件からの成長過程を、数値モデル・液晶の電気乱流中での界面成長過程について調べた。その結果、正の曲率を持った初期条件では直線界面から円形界面へのゆらぎの性質のクロス

オーバーが起こる一方、負の曲率では直線界面の性質のみが見られることが強く示唆された [20, 55, 69]。

さらに、KPZ 普遍クラスと同一の指数を示すことが知られている決定論的な時空カオスの摂動について、ゆらぎの詳細な解析を行い、確率的な界面成長と同様の初期条件依存性が存在することを示した [20, 74]。

非ブラウン粒子懸濁液の粘弾性

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った。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モデルを構築し、流体を含む独立なモデルによる数値シミュレーションとの比較により、少数のパラメータで非線形性も含めた懸濁液の粘弾性を定性的に再現することに成功した [15, 19, 75]。

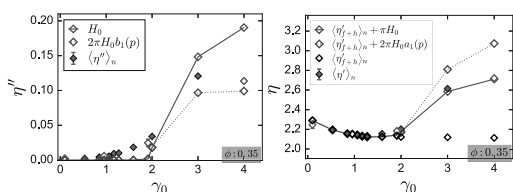


図 6.2.1: 粘弾性パラメータのひずみ振幅依存性

6.2.2 アクティブマターの動力学

カイラルな液晶液滴のらせん運動

油滴を界面活性剤水溶液の中に分散させると、油滴内部に自発的にマランゴニ流が発生し、油滴が自発運動を行うことが知られている。一方、カイラルな液晶は対称性の議論から場に応答し、回転することができる [29]。そこで、カイラルな液晶を界面活性剤水溶液の中に分散させるとマランゴニ流がカイラルな液晶の配向場とカップルし、回転運動が生まれ、自発的にらせん運動を行うのではないかと期待した。実際に実験を行ったところ、自発らせん運動が観察された。さらに、液晶のカイラリティを反転させると、らせん運動の軌跡のカイラリティも反転することがわかり、現象がカイラリティに起因するということを実験的に明らかにした。これらの実験結果をもとに、カイラルな液晶液滴のらせん運動を説明する理論を対称性の議論により構築した。その結果、らせん運動に加え、他のカイラルな運動が分岐現象の結果として発生することがわかった。この分岐現象に関しては実験的検証が可能であり、今後、検証予定である [36, 51, 56, 62, 67, 70]。

自己駆動コロイド粒子（ヤヌス粒子）の乱流状態と大域的秩序相

ポリスチレン粒子の半球を金属でコートした非対称なコロイド粒子（ヤヌス粒子）を水中に分散させ、ヤヌス粒子に交流電場を加えると、電場に垂直な 2 次元面内を駆動させることができる。電場の周波数を調整することで、ヤヌス粒子の相互作用を制御し、乱流状態と大域的秩序相を実現した [9, 1, 24, 18]。

自己駆動コロイド粒子（クインケローラー）の集団運動

直流電場下で誘電体コロイドが回転する現象により電場に垂直な電極上を転がり 2 次元面内を自己駆動する粒子（クインケローラー）はバリスティックに運動する。クインケローラー 1 粒子は適切な周波数の交流下ではその周波数で往復運動を行う。外場の周波数でストロボ的に見た運動は、多粒子性によって実効的に早い拡散現象を示すことを明らかにした。集団的挙動とその定常状態での振る舞いに注目すると、粒子はクラスタを作り、その構成粒子が同心の円運動する渦構造を発見した。外力の 1 周期の間に半周期で粒子が三角配置からスパイラル配置となり、残りの半周期で配置を回復するという配置に非対称性があることを示した [53, 57, 64, 71, 76, 21, 84]。

フィラメント状タンパク質の集団運動

自己駆動粒子が多数集まったときに見せる集団運動が見せるパターンを、フィラメント状の微小管とタンパク質分子モーターであるキネシンを用いた実験系で観察した。微小管の密度をある値より高くすると、微小管の運動に秩序が無い状態から何本かの微小管が同じ方向にクラスタを形成して動く秩序状態が形成された。さらに密度を上げるとクラスタ同士がぶつかり集積するパターン相が出現した。これらのようなクラスタを特徴とするパターンを説明するために低密度において相互作用を詳細に観察したところ、微小管同士が乗り越えないような衝突という局所的な現象が重要であることが分かった [22, 31, 50, 54, 65, 73, 77]。

バクテリア集団運動の長距離秩序相と巨大密度ゆらぎ

通常の大腸菌の 10-50 倍程度の長さのフィラメント状大腸菌を作成し、この大腸菌を擬 2 次元面内で高密度で泳がせることで、バクテリアの集団運動の長距離ネマチック秩序相を実現した。この長距離秩序相において、「巨大粒子数ゆらぎ」が観測された。これらの結果は、集団運動の理論研究・数値計算で予言され、集団運動の特徴とされていたものの、実験系で観測された初めての例である [1, 3, 4, 5, 24, 26, 27, 30, 34, 40, 52, 59, 63, 18]。

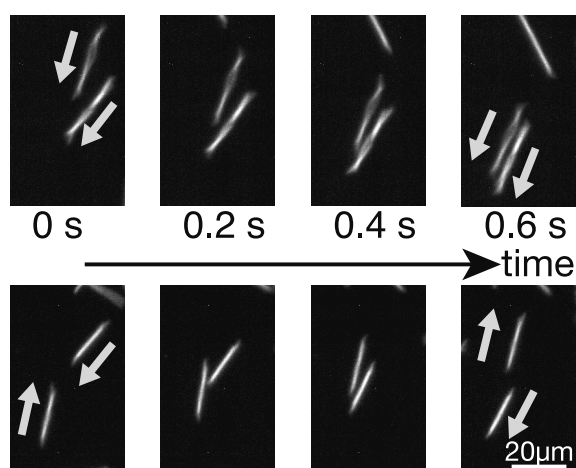


図 6.2.2: ネマチック相互作用をするフィラメント状大腸菌

6.2.3 非平衡系としての生命現象

神経幹細胞の集団運動における力場計測

マウス神経幹細胞 (NSC) の 2 次元培養系において、細胞シートを伝わる応力を測定した。紡錘状の細胞である NSC は、ネマチックに向きを揃えた集団運動を行うことにより、高密度下でも運動を継続する。我々は非常に柔らかいシリコンゲルを培養基質に用い、個々の細胞が基質に及ぼす応力場を測定し、その主方向と細胞の向きの間係を見出した [78]。

細胞と組織の動力学に関する理論的研究

細胞運動や多細胞組織形成を実現している力学について非平衡物理の観点から理論的研究を行っている。細胞骨格の粘弾性を計算するための粗視化手法を実空間線り込み群の概念を参考に構築した [32, 37]。分子モーターに由来する細胞骨格の応力を計算する力学的モデルを提案し、収縮応力が誘起される条件を調べた [11, 37, 79]。細胞骨格の力による多細胞運動の理論を基にしてショウジョウバエの蛹に見られる特徴的な組織運動の機構を説明することに成功した [8, 16, 33]。また、アクティブマターの理論を基に真核細胞の走化性遊走の理論モデルの提案も行っている [25, 72]。

<受賞>

- [1] D. Nishiguchi: Student Poster Presentation First Prize, Beijing Computational Science Research Center Spring School on Active Matter, May 20-23, 2015, Beijing, China.
- [2] K. Tamai: Best Poster Award for Young Researcher, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015, Aug. 20-23, Kyoto, Japan.

- [3] D. Nishiguchi: Best Poster Award for Young Researcher, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015, Aug. 20-23, Kyoto, Japan.
- [4] 西口大貴: 優秀ポスター賞, 第 9 回 物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会), 2015 年 11 月 13-15 日, 東京.
- [5] 西口大貴: ポスターレビュー賞, 第 9 回 物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会), 2015 年 11 月 13-15 日, 東京.
- [6] 加藤愛理: 優秀ポスター賞, 第 9 回 物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会), 2015 年 11 月 13-15 日, 東京.

<報文>

(原著論文)

- [7] S. Toyabe and M. Sano: Nonequilibrium Fluctuations in Biological Strands, Machines, and Cells, *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 102001 (2015).
- [8] K. Sato, T. Hiraiwa and T. Shibata: Cell chirality induces collective cell migration in epithelial sheets, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 118102 (2015).
- [9] D. Nishiguchi and M. Sano: Mesoscopic Turbulence and Local Order in Janus Particles Self-Propelling under an AC Electric Field, *Phys. Rev. E* **92**, 052309 (2015).
- [10] H. Ebata and M. Sano: Model of heap formation in vibrated gravitational suspensions *Phys. Rev. E* **92**, 053016 (2015).
- [11] K. Sato, T. Hiraiwa, E. Maekawa, A. Isomura, T. Shibata, and E. Kuranaga: Left-right asymmetric cell intercalation drives directional collective cell movement in epithelial morphogenesis, *Nat. Comm.* **6**, 10074 (2015).
- [12] T. Ohta: Interfacial Instability and Pattern Formation, *Forma* **30**, S59-S61 (2015).
- [13] T. Ohta, M. Tarama and M. Sano: Simple model of cell crawling, *Physica D* **318**, 3-11 (2016).
- [14] M. Sano and K. Tamai: A universal transition to turbulence in channel flow, *Nat. Phys.* **12**, 249 (2016).
- [15] J. J. Molina, K. Otomura, H. Shiba, H. Kobayashi, M. Sano, and R. Yamamoto: Rheological evaluation of colloidal dispersions using the smoothed profile method: formulation and applications, *J. Fluid Mech.* **792**, 590-619 (2016).
- [16] T. Hiraiwa and G. Salbreux: Role of turnover in active stress generation in a filament network, *Phys. Rev. Lett.*, in press (2016).

(国内雑誌)

- [17] 佐野雅己: 現象のモデル化と数理モデルの普遍性, 数理科学, サイエンス社, 2016 年 1 月号, pp1-4.

- [18] 西口大貴, 佐野雅己: 自己駆動粒子の集団運動 -群れから始まる非平衡統計力学-, 数理科学, サイエンス社, 2016年1月号, pp39-44.
- (学位論文)
- [19] K. Otomura: Rheology and Structure of Non Brownian Suspension under Large Amplitude Oscillatory Shear Strain, PhD Thesis (2016).
- [20] 深井 洋佑: 修士論文 KPZ 界面の初期条件依存普遍性に対する実験的・数値的研究, 修士論文, 2016年3月.
- [21] 加藤愛理: クインケ効果で自己駆動するコロイド粒子系の集団運動, 修士論文, 2016年3月.
- [22] 谷田桜子: キネシン駆動微小管の2次元高密度パターン形成, 修士論文, 2016年3月.
- (著書)
- [23] 太田隆夫: 界面ダイナミクスの数理 (改訂版), 98ページ, 日本評論社 2015.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [24] D. Nishiguchi and M. Sano: Collective Motions of Spherical Janus Particles and High Aspect Ratio Bacteria, Beijing Computational Science Research Center, May 9-10, 2015, Beijing Computational Science Research Center, Beijing, China.
- [25] T. Hiraiwa and T. Shibata: Theory on chemotactic migration of eukaryotic cells, BCSCCS 8th International Conference “Engineering of Chemical Complexity”, June 22-26, 2015, Garching near Munich, Germany.
- [26] D. Nishiguchi and M. Sano: Collective Motions of High Aspect Ratio Bacteria, Japan-France Joint Seminar “New Frontiers in Non-equilibrium Physics of Glassy Materials”, Aug. 11-14, 2015, Kyoto University, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Japan.
- [27] D. Nishiguchi and M. Sano: Collective Motions of High Aspect Ratio Bacteria, Yukawa International Seminar 2015 (YKIS2015): New Frontiers in Non-equilibrium Statistical Physics 2015, Aug. 17-19, 2015, Kyoto University, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Japan.
- [28] K. Tamai and M. Sano: Experimental Study on the Universal Route to Turbulence, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015, Aug. 20-23, Kyoto, Japan.
- [29] T. Yamamoto, M. Kuroda and M. Sano: 3D analysis of rotating chiral liquid crystal droplets under a temperature gradient, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015, Aug. 20-23, 2015, Kyoto, Japan.
- [30] D. Nishiguchi and M. Sano: Collective Motions of High Aspect Ratio Bacteria, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015, Aug. 20-23, 2015, Kyoto University, Japan.
- [31] S. Tanida, K. Furuta, K. Nishikawa, H. Kojima and M. Sano: Dynamical Structures in High Density Motility Assay, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015, Aug. 20-23, 2015, Kyoto, Japan.
- [32] T. Hiraiwa and R. R. Netz: Theory on mechanics of a cytoskeletal network, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015, Aug. 20-23, 2015, Kyoto, Japan.
- [33] T. Hiraiwa, K. Sato, E. Maekawa, A. Isomura, T. Shibata, E. Kuranaga: Collective cell movement driven by left-right asymmetric cell intercalation during *Drosophila* organogenesis, The 26th CDB Meeting “Mechanistic Perspectives of Multicellular Organization”, Sep. 08-09, 2015, Kobe, Japan.
- [34] D. Nishiguchi, K. H. Nagai, and M. Sano: Giant Number Fluctuation in an Ordered State of Filamentous Bacteria, DFG Priority Programme “From Single Particle Motion to Collective Behaviour” Microswimmers Summer School 2015, Sep. 21-25, 2015, Forschungszentrum Jülich, Jülich, Germany.
- [35] M. Sano, H. Nishiguchi, K. Kawaguchi: Large Scale Collective Behavior in Nematic State of Active Biological Systems, LMU-UT Cooperation in Physics Workshop, Feb. 29, 2016, Tokyo, Japan.
- [36] T. Yamamoto and M. Sano: Chirality-induced helical motion of cholesteric liquid crystal droplets, LMU-UT Cooperation in Physics Workshop, Mar. 1, 2016, Tokyo, Japan.
- [37] T. Hiraiwa: Theory on mechanics of a cytoskeletal network, LMU-UT Cooperation in Physics Workshop, Mar. 1, 2016, Tokyo, Japan.
- [38] M. Sano: Instabilities Leading to Chaos and Turbulence, International Workshop New Frontiers in Nonlinear Sciences, March 6, 2016, Niseko, Japan.
- [39] T. Yamamoto and M. Sano: Helical motion of chiral liquid crystal droplets, American Physical Society March meeting, Mar. 14-18, 2016, Baltimore, USA.
- [40] D. Nishiguchi, K. H. Nagai, M. San: Fluctuations and nematic order in collective motion of filamentous bacteria, American Physical Society March Meeting 2016, Mar 14-18, 2016, Baltimore, USA.
- 招待講演
- [41] M. Sano: Universal Transition Routes to Turbulence in Simple and Complex Fluids, Physics of Structural and Dynamical Hierarchy in Soft Matter, Mar. 16-18, 2015, Tokyo, Japan.

- [42] M. Sano: Active colloids: hydrodynamic and electrostatic interactions, Spring School on Active Matter, May 9-10, 2015, Beijing, China.
- [43] M. Sano: Different phases and patterns in biological active nematic systems, Conference on Physics of Active Matter, May 12-16, 2015, Suzhou, China.
- [44] M. Sano: Universal Transition Route to Turbulence in Simple and Complex Fluids, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015 (SFS2015), Aug. 20-23, 2015, Kyoto, Japan.
- [45] M. Sano, K. Kawaguchi, and H. Tanimoto, Uncovering cell mechanics: from single cell to multicellular dynamics, iCeMS International Symposium Hierarchical Dynamics in Soft Materials and Biological Matter, Sep. 23-26, 2015, Kyoto, Japan.
- [46] M. Sano: Interaction and Collective Dynamics of Self-Propelled Particles, Nonequilibrium Collective Dynamics: Bridging the Gap between Hard and Soft Materials (NECD15) Oct. 5-8, 2015, Potsdam, Germany.
- [47] M. Sano: An experimental study on universal transition to turbulence in channel flow, 2nd France-Japan Workshop on Subcritical Transition to Turbulence 2015, Oct. 14, 2015, Tokyo, Japan.
- [48] M. Sano and K. Tamai: A Universal Transition to Turbulence in Channel Flow [Keynote/Plenary], Extreme events and criticality in fluid mechanics: computations and analysis, Jan. 25-29, 2016, Toronto, Canada.
- (国内会議)
- 一般講演
- [49] 佐野雅己: 「ゆらぎと構造」領域の紹介, 「ゆらぎと構造」+「分子ロボティクス」合同研究会, 2015年6月27日, 東京大学.
- [50] 谷田桜子, 古田健也, 西川香里, 小嶋寛明, 佐野雅己: 微小管・キネシン高密度アッセイで生じる集団運動, 第15回東京大学生命科学シンポジウム, 2015年6月27日, 東京大学.
- [51] 山本尚貴, 佐野雅己: カイラルな液晶液滴のらせん運動, 第14回関東ソフトマター研究会, 2015年8月8日, 慶應義塾大学.
- [52] 西口大貴, 佐野雅己: フィラメント状バクテリアのネマチックな集団運動, 第14回関東ソフトマター研究会, 2015年8月8日, 慶應義塾大学.
- [53] 加藤愛理, 佐野雅己: クインケ回転で駆動するコロイド粒子系の集団運動, 第14回関東ソフトマター研究会, 2015年8月8日, 慶應義塾大学.
- [54] 谷田桜子, 古田健也, 西川香里, 小嶋寛明, 佐野雅己: Pattern formation of microtubules driven by kinesin, 第53回日本生物物理学会年会, 2015年9月13-15日, 金沢大学
- [55] 深井 洋佑・竹内一将: KPZ界面の曲率制御した初期条件での統計性と普遍サブクラス構造, 日本物理学会 2015 秋季大会, 2015年9月16-19日, 関西大学.
- [56] 山本尚貴, 佐野雅己: カイラルな液晶液滴のらせん運動, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015年9月16-19日, 大阪.
- [57] 加藤愛理, 佐野雅己: クインケ効果を用いた自己駆動粒子系の集団運動と熱力学的性質の探求, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015年9月16-19日, 関西大学.
- [58] 西口大貴, 佐野雅己: 高アスペクト比のバクテリアのネマチックな集団運動, 日本物理学界 2015 年秋季大会, 2015年9月16-19日, 関西大学.
- [59] 西口大貴, 永井健, 佐野雅己: Statistical properties of collective motion of filamentous bacteria, 研究会集「生物流体における運動の諸相」, 2015年10月26-28日, 京都大学 数理解析研究所.
- [60] 佐野雅己: 「ゆらぎと構造」領域の紹介, 第9回物性科学領域横断研究会(領域合同研究会), 2015年11月13-15日, 東京大学.
- [61] 玉井 敬一, 佐野 雅己: 乱流への遷移の実験的観測 - 非平衡相転移とその普遍性の観点から -, 第9回物性科学領域横断研究会(領域合同研究会), 2015年11月13-15日, 東京大学.
- [62] 山本尚貴, 佐野雅己: カイラルな液晶液滴のらせん運動, 第9回物性科学領域横断研究会(領域合同研究会), 2015年11月13-15日, 東京大学.
- [63] 西口大貴, 佐野雅己: フィラメント状バクテリアの集団運動の統計力学的性質, 第9回物性科学領域横断研究会(領域合同研究会), 2015年11月13-15日, 東京大学.
- [64] 加藤愛理, 佐野雅己: クインケ効果を利用した自己駆動粒子系の交流下での集団運動, 第9回物性科学領域横断研究会(領域合同研究会), 2015年11月13-15日, 東京大学.
- [65] 谷田桜子, 古田健也, 西川香里, 小嶋寛明, 佐野雅己: 自己駆動するフィラメントの二次元パターン形成, 第9回物性科学領域横断研究会(領域合同研究会), 11月13-15日, 東京大学.
- [66] 佐野雅己: 生命と自発性—ゆらぎを選ぶしくみ—, 山田研究会「生物と非生物をつなぐ」, 2015年11月16日, 修善寺.
- [67] 山本尚貴, 佐野雅己: カイラルな液晶液滴のらせん運動, ソフトマター研究会, 2015年12月18日, 宮城.
- [68] 玉井 敬一, 佐野 雅己: チャネル流の乱流への遷移で見られる非平衡臨界現象, 2016年1月5-7日, 東京大学物性研究所.
- [69] 深井 洋佑・竹内一将: 液晶電気乱流中の界面成長過程における普遍クラスと界面初期条件, 平成27年度物性研究所短期研究会 量子乱流と古典乱流の邂逅, 2016年1月5-7日, 東京大学物性研究所.
- [70] 山本尚貴, 佐野雅己: カイラルな液晶液滴のらせん運動, アクティブマター研究会 2016, 2016年1月22-23日, 九州大学.

- [71] 加藤愛理, 佐野雅己: 交流下クインケ粒子系の非対称な往復運動と渦生成, アクティブマター研究会 2016, 2016年1月22-23日, 九州大学.
- [72] 平岩徹也: 真核細胞の走化性遊走の理論, 交流下クインケ粒子系の非対称な往復運動と渦生成, アクティブマター研究会 2016, 2016年1月22-23日, 九州大学.
- [73] 谷田桜子, 古田健也, 西川香里, 小嶋寛明, 佐野雅己: 微小管フィラメントの二次元パターン形成, 新学術揺らぎと構造 第2回若手勉強会「ソフトマター若手勉強会」, 2016年3月10-11日, 東京大学.
- [74] 深井 洋佑・竹内一将: 時空カオスの摂動の初期条件依存性と Kardar-Parisi-Zhang 界面, 日本物理学会第72回年次大会, 2016年3月19-22日, 東北学院大学.
- [75] 乙村浩太郎, 佐野雅己: 非ブラウン粒子懸濁液における剪断誘導拡散による構造と非線形レオロジー, 日本物理学会第72回年次大会, 2016年3月19日-22日, 東北学院大学.
- [76] 加藤愛理, 佐野雅己: 交流下におけるクインケ回転粒子の渦生成, 日本物理学会第72回年次大会, 2016年3月19-22日, 東北学院大学.
- [77] 谷田桜子, 古田健也, 西川香里, 小嶋寛明, 佐野雅己: フィラメント状タンパク質の二次元高密度パターン形成, 日本物理学会第72回年次大会, 2016年3月19-22日, 東北学院大学.
- [78] 上道雅仁, 佐野雅己: 配向秩序を持つ細胞集団遊走における牽引力場, 日本物理学会第72回年次大会, 2016年3月19-22日, 東北学院大学.
- [79] 平岩徹也: アクチン細胞骨格においてミオシンフィラメントが誘起する応力, 日本物理学会 2016 年年次大会, 2016年3月19-22日, 東北学院大学.
- 招待講演
- [80] 佐野 雅己: ソフトマターと生物をつなぐアクティブマター, ソフトダイナミクス, 機能物性科学融合科学研究会 2, 2015年4月2日, 東京大学物性研究所.
- [81] 佐野雅己: 細胞運動と牽引力の関係: 単一細胞の運動と細胞集団における Interkinetic Migration の解析, 基礎生物学研究所研究会, 物理学は生物現象の謎を解けるか?, 2016年1月6日, 岡崎.
- [82] 佐野雅己: A Universal Transition to Turbulence in Channel Flow, 平成 27 年度物性研究所短期研究会, 「量子乱流と古典乱流の邂逅」, 2016年1月7日, 東京大学物性研究所.
- [83] 太田隆夫: アクティブソフトマター, 新学術揺らぎと構造 第2回若手勉強会「ソフトマター若手勉強会」, 2016年3月4日, 東京大学.
- (セミナー)
- [84] 加藤愛理: 自己駆動粒子の集団運動-クインケローラーを例として-: ワークショップ「情報統計力学研究会 2015」, 神奈川, 2015年10月4日.
- [85] M. Sano: A Universal Transition to Turbulence in Channel Flow, Argonne National Laboratory, Feb. 1 (2016), Chicago, USA.

<その他>

(講義)

- [86] 佐野雅己: 創発性とは何か, 東京大学 EMP 講義, 2015年6月13日, 東京大学.
- [87] 佐野雅己: 自己組織化とは何か, 東京大学 EMP 講義, 2015年12月5日, 東京大学.
- [88] 佐野雅己: 研究倫理講義, 2015年7月27日, 9月7日, 東京大学.
- (プレスリリース)
- [89] 佐野雅己, 玉井敬一: 乱流発生の法則を発見: 130年以上の未解決問題にブレイクスルー, <http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2016/4602/>

6.3 山本 研究室

【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、銀河系および系外銀河における星・惑星系形成とそこでの物質進化を、電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。

【ALMA (アルマ) の本格的稼働】

ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) A は、日本、北米、欧州の共同で、チリの標高 5000 m のアタカマ高原に建設された 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ある。2011 年 10 月から運用が始まっており、我々のグループでも以下に述べるように成果が出つつある。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つつある。

【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、 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。

6.3.1 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。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。この点についても、ALMA を用いた本研究室の研究により理解が大きく進みつつある。角運動量を保ちつつ回転落下するガスは、遠心力バリア（近日点）より内側には入り込めないため、その近傍で後から落下するガスと衝突して弱い降着衝撃波が発生する。その様子が ALMA で捉えられつつある。さらに遠心力バリア近傍を境として、ガスの分子組成が劇的に変化することが明らかになってきている。これらの成果は、原始惑星系円盤への物質進化を理解する上で非常に重要な一歩である。本研究室では、これらの点を中心に、星・惑星系形成に関する幅広い研究を展開している。

【TMC-1A における遠心力バリアの同定】

TMC-1A はおうし座にある進化の進んだ (Class I) WCCC 天体である。この天体における分子分布を ALMA を用いて 0.5" の分解能で調べた。CS は主に回転落下エンベロープに存在し、SO はその遠心力バリア近傍に存在することが確かめられた。これは、Class 0/I 段階にある WCCC 天体 L1527 における特

星間分子雲から惑星系への物質進化

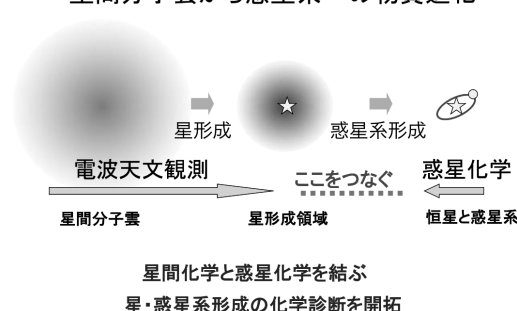


図 6.3.1: A schematic illustration of our goal

徴と非常に類似している。SO は遠心力バリア近傍で星間塵から蒸発してきたものと見られる。回転落下エンベロープの速度構造の解析から、遠心力バリアの半径が 50 AU、中心星の質量が 0.2-0.3 太陽質量であることがわかった。一方で、進化が進んだ結果として回転落下する分子ガスの非対称分布が顕著に見られた。本研究により、Class I 天体においても遠心力バリアが力学構造に重要な影響を与えており、また、その近傍で劇的な分子組成の変化が起こっていることが示された。

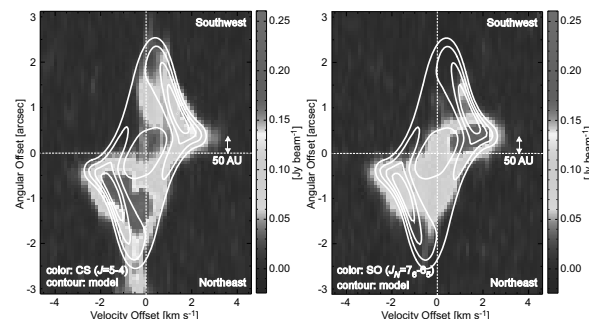


図 6.3.2: Position-velocity diagrams of CS and SO observed toward TMC-1A. Contours are intensities expected by the infalling-rotating envelope model. SO exists around the centrifugal barrier, while CS reside in the envelope.

【低質量原始星 IRAS 16293-2422】

IRAS 16293-2422 は、へびつかい座にある Class 0 原始星の連星 (Source A, B) であり、複雑な飽和有機分子を多く含む hot corino 天体の代表例として活発な研究対象となっている。ALMA のアーカイブデータの解析の結果、Source A において、エンベロープガスの回転落下運動が明瞭に捉えられた。その速度構造は回転しながら落下するガス円盤のモデルで再

現された。また分子種によって捉えられる成分が異なり、エンベロープからその内側の原始星円盤にかけて劇的な分子組成の変化が見られた(図 6.3.3)。特に、遠心力バリア付近に CH_3OH や HCOOCH_3 などの有機分子が局在していることがわかった。 H_2CS の観測から、この位置でガスの温度が高くなっていることが示され、力学構造と分子組成の関連性が示唆される。

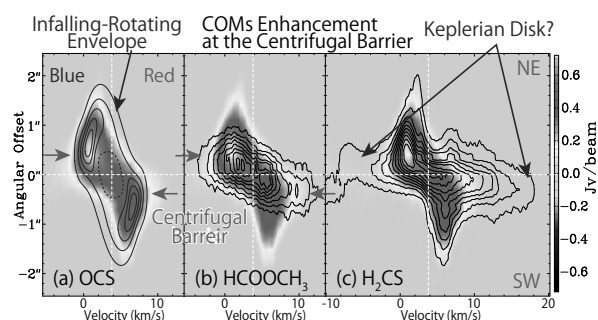


図 6.3.3: PV diagrams of OCS ($J=19-18$; color), HCOOCH_3 ($19_{9,10}-19_{8,11}$ E; contours in panel b), H_2CS ($7_{0,7}-6_{0,6}$; contours in panel c) along the line along which the disk/envelope system is extended. Blue contours in panel (a) represent the result of an infalling-rotating envelope model.

【低質量原始星 L483】

L483 は低質量 Class 0 原始星を擁する原始星コアである。この天体の数 1000 AU スケールでの分子組成は、炭素鎖分子を豊富に含む WCCC 天体の特徴を示すことが知られている。ALMA を用いて $0.5''$ (100 AU) の分解能で観測した結果、炭素鎖分子の一種である CCH や $c\text{-C}_3\text{H}_2$ の分布が数 100 AU スケールでも見られ、WCCC 天体の特徴が確認された。一方で、原始星近傍の数 10 AU スケールの領域には、 HCOOCH_3 や NH_2CHO などの大型飽和有機分子が検出された。これらの分子は hot corino 天体に特有のものであることから、この天体は hot corino の性質を内部に併せ持つ WCCC 天体と言える。このような中間的な分子組成を持つ天体の存在は数 1000 AU スケールでは示唆されていたが、本研究により高分解能観測で初めて捉えられた。

【低質量原始星 B335】

B335 は低質量 Class 0 天体であり、また、Bok Globule に存在する孤立した星形成領域としても知られる。本研究では、この天体に対して、ALMA による高分解能観測 ($0.5''$) を行った。その結果、 HCOOCH_3 や CH_3CHO などの多くの大型飽和有機分子を検出し、B335 が hot corino 天体であることを初めて示した。大型飽和有機分子は原始星近傍の 10 AU 程度のコンパクトな領域に存在することが速度幅の解析から明らかになった。この天体ではエンベロープの回転運動は明瞭ではなく、原始星近傍まで落下運動を続けていると見られる。今後各分子を詳細に解析することで、原始星天体の力学構造の理解につなが

ると考えられる。

【原始星 L1527 における CCH および CCD】

おうし座分子雲にある原始星 L1527 に対して CCH および CCD 分子を ALMA を用いて観測した。その結果、CCH が多く存在する原始星近傍のエンベロープとその外側とで CCD/CCH 比を比べると、原始星近傍で D/H 比が低いことがわかった。L1527 は WCCC 天体であり、原始星近傍ではダストから蒸発した CH_4 が CCH 分子を作ると考えられている。従って、 CH_4 の D/H 比が CCD/CCH 比に反映されていると考えられ、一方外側では星なしコア時代の CCD/CCH 比が残っていると考えられる。このように D/H 比から、原始星コア内部における分子形成の起源を多読することができることを示した。

【星形成領域での $c\text{-C}_3\text{H}_2$ 分子の ^{13}C 同位体比異常】

IRAM 30 m 望遠鏡を用いた進化段階の異なる 11 の星形成領域に対する 1-3 mm 帯のラインサーベイ観測 (ASAI プロジェクト) のデータを用いて、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$ 分子とその ^{13}C 同位体種の観測を行った。その結果、星なしコア TMC-1 および 2 つの原始星 B1, IRAS4A において、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$ 分子とその ^{13}C 同位体の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比が元素の同位体比 (60-70) より高く、さらに 2 種類の ^{13}C 同位体の存在量が異なることを明らかにした。これらの異常は低質量原始星 L1527 で確認されていたが、今回の結果からそれらが天体によらず見られることがわかった。

【NGC 2264 の ALMA によるラインサーベイ】

非常に若い進化段階の大質量原始星 NGC 2264 に対して、336 - 359 GHz 帯のラインサーベイ観測を ALMA を用いて行なった。原始星近傍のスペクトルは高励起の分子輝線が卓越しており、ASTE 望遠鏡による同一周波数帯のラインサーベイ観測の結果と大きく異なっていた。特に、ASTE で検出されていた高励起の CH_3OH 輝線は、原始星にも付随しており、ホットコアを形成していることがわかった。さらに、連続波の観測から、この原始星が連星系であることが示された。

【ペルセウス座分子雲における D 化物分子サーベイ】

hot corino 天体と WCCC 天体に代表される低質量原始星天体の化学的多様性を生み出す原因として、星間ガスが収縮して原始星が誕生するまでの「星なしコア」時代の時間の長短が考えられている。そこで、同様に「星なしコア」時代の時間を反映すると考えられる重水素濃縮度を 37 の低質量原始星天体で統計的に比較した。その結果、重水素濃縮度と天体の化学組成の間には相関が示唆され、上記の仮説を支持する。さらに、原始星天体の化学組成はそれが分子雲内のどの位置にあるかに依存している傾向が見られ、「星なしコア」の長短が周囲の星形成などの環境効果を反映している可能性がある。

【TMC-1 における大型有機分子の検出】

飽和有機分子の生成メカニズムについて理解を深めるため、星なしコア TMC-1 の観測研究を行って

いる。観測により、 CH_3CHO が星間塵上で生成される CH_3OH とよく似た輝線プロファイルを示し、 CH_3OH と同様に星間塵上で生成されることを示唆する結果を得た。一方、 H_2CCO 、 $\text{c-C}_3\text{H}_2\text{O}$ は気相反応で生成される炭素鎖分子や CS とよく似たプロファイルを示し、気相反応による生成が示唆された。また、 H_2CO はその中間的なプロファイルであり、気相と星間塵上の両方の反応の寄与が考えられる。また、TMC-1 近傍の CH_3OH ピーク位置で、 CH_3CHO 、 HCOOCH_3 、 $(\text{CH}_3)_2\text{O}$ のスペクトルを検出した。これらの結果は、星形成の初期の段階から複雑な有機分子は生成されており、その生成メカニズムの理解には気相と星間塵上の両方の反応を精査する必要があることを示す。

【おおかみ座領域における OH 18 cm 線観測】

おおかみ座分子雲の Lupus-1 は特徴的な直線構造を形成している。これに垂直なストリップに対して OH 18 cm 線の観測を行った。この遷移は 4 本の超微細構造遷移線 (1612, 1665, 1667, 1720 MHz) からなり、最近の我々の研究から、この 4 本の強度からガスの運動温度が決定できることが示されている。観測の結果、Lupus-1 では、直線構造に垂直な方向 (南西から北東) に温度勾配および速度勾配が見られ、北東で線幅が大きくなることがわかった。以上の結果は、Lupus-1 が北東にある OB アソシエーションと相互作用をもつ可能性を示唆している。

【OH 18 cm 線の強度異常 (1702 MHz 吸収線)】

おうし座分子雲の HCL2 領域は北東部に特徴的な直線構造をもつ。この直線構造に対して OH 18 cm 線の観測を行ったところ、1720 MHz 線の吸収線が検出された。この吸収線は、これまで用いてきた LVG 計算では再現することができなかったが、ダストの遠赤外線放射の効果を考慮することで、柱密度が大きい ($> 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) 場合にある程度再現することができた。即ち、1720 MHz の吸収線は直線構造の密度の高い構造を反映していると考えられ、直線構造の起源、即ち、分子雲形成過程に関連している可能性がある。

6.3.2 系外銀河の分子組成

系外銀河における分子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、中心核活動性と分子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 程度を超える系の分子組成を議論する場合、系内の分子雲コアの観測から得られた概念をそのまま適用することはできない。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明らかにすることが、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、本研究室では以下の研究を推進している。

【M83 のバーと渦状腕の化学組成】

近傍の棒渦巻銀河 M83 の渦状腕とバー領域に対して、ALMA を用いて巨大分子雲のサイズに相当する $\sim 30 \text{ pc}$ の空間分解能で観測を行ない、それぞれの領域で 8 種の分子の分布を明らかにした (図 6.3.4)。 CH_3OH の組成は、渦状腕よりもバー領域で高い傾向が見られた。その理由としてバー領域で発生した衝撃波によりダスト上の CH_3OH が蒸発したことが考えられる。これは分子雲の化学組成が大局的なガスの運動を反映することを示唆する重要な結果である。

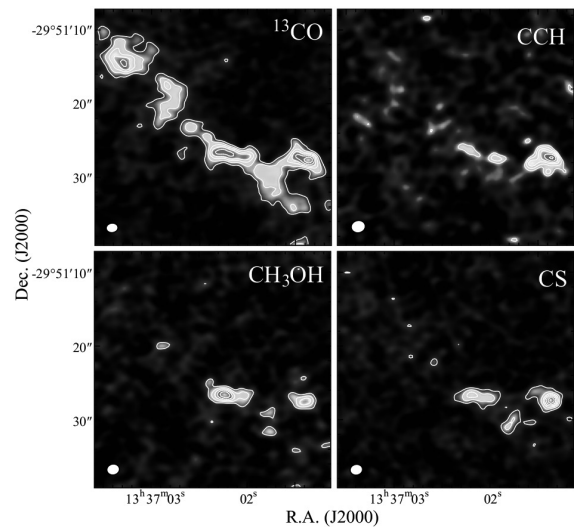


図 6.3.4: Distributions of ^{13}CO , CCH, CH_3OH , and CS observed toward the bar region in M83 with ALMA.

【NGC 3627 における化学組成】

近傍銀河 NGC 3627 の渦状腕とバーエンド領域に対して、IRAM 30 m 望遠鏡を用いて波長 3mm 帯のラインサーベイ観測を実施した。1 kpc スケールでの化学組成には領域ごとの違いが見られないが、星形成が活発なバーエンドの速度成分では化学組成にわずかな違いが見られた。その原因を明らかにするために、ALMA を用いて 60 pc スケールの空間分解能でのマッピング観測を行なっている。現在、 ^{13}CO 、 C^{18}O 、CS の観測は完了しており、詳細な解析が進行中である。

【IC10 におけるラインサーベイ】

重元素量の低い環境にある分子雲では、太陽系近傍とは質的に異なる化学組成が見られると考えられる。低重元素量の銀河である IC10 の化学組成を調べるため、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて波長 3 mm 帯のラインサーベイ観測した。得られたスペクトル線パターンは同様に重元素量の低い大マゼラン雲の星間

分子雲でのスペクトル線パターンと類似しており (図 6.3.5)、CCH 分子が豊富で CH_3OH が少ないという特徴が見られた。これらの特徴は、いずれも星間塵の存在量が少ないため光解離領域が分子雲内部まで広がることに起因していると思われる。このことから、これらの化学的特徴は低重元素量銀河に共通する性質であると考えられる。

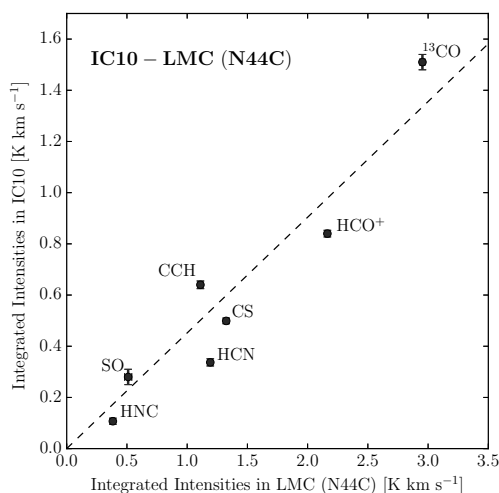


図 6.3.5: Correlation plot of integrated intensities between IC 10 and N44C (LMC).

【NGC6822 におけるラインサーベイ】

IC10 や大マゼラン雲で見られた化学組成の特徴が低重元素量の銀河で一般的なものをさらに検証するため、低重元素量の銀河 NGC6822 に対して、IRAM 30 m 望遠鏡を用いて波長 3 mm と 2 mm 帯のラインサーベイ観測を行った。その結果、NGC6822 の化学組成も IC10 の化学組成と同様の特徴を示すことがわかった。この観測により、低重元素量銀河に共通の化学的特徴がはっきりと同定され、今後、遠方銀河を含む低重元素量銀河における化学組成研究の重要な指針となると考える。

【低重元素量の矮小銀河における CO サーベイ】

上述のように、低重元素量環境に特徴的な化学組成が明らかになりつつある。新たな観測対象を開拓するため、ASTE 10 m 望遠鏡を用い、9 個の近傍低重元素量銀河で $\text{CO}(J=3-2)$ 輝線を観測した。結果として、6 つの銀河で輝線の検出に成功した。これらは今後、高感度の観測で化学組成を調べるための良い対象として期待できる。

【巨大分子雲 W51 のマッピングラインサーベイ】

銀河系内の巨大分子雲 W51 を Mopra 22m 望遠鏡で広域マッピング観測 (40 pc×50 pc) を行なった。分子雲全体で平均したスペクトルは、Hot Core でのスペクトルとは大きく異なり、M51 などの系外銀河の

渦状腕で観測されるスペクトルと酷似していることがわかった。これによりは、系外銀河で観測されるスペクトルは、空間的に広がった分子ガス成分が主要な寄与をしていることが示された。

6.3.3 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 (ヘテロダイクサ) の開発が不可欠である。そのための最も有力なデバイスが超伝導ホットエレクトロン・ボロメータ (HEB) ミクサ素子である。HEB ミクサ素子は電磁波吸収による超伝導状態の破壊を利用し、受信信号と局部発振信号の「うなり」(中間周波信号) に伴う電力変化をバイアス電流の変化として検知するものである。そのためには、超伝導体をサブミクロンサイズにすること、そして、素子内に生じた熱電子を「うなり」の周期よりも早く冷却し、超伝導状態を回復させる必要がある。この冷却メカニズムには、(1) 熱電子の拡散によって電極に逃がす方法 (拡散冷却) と、(2) フォノンとの相互作用を介して基板に逃がす方法 (格子冷却) がある。本研究室では、主に NbTiN や NbN を用いた「格子冷却型」HEB ミクサ素子の開発研究を進めている。

【ASTE への THz 受信機搭載実験】

2015 年 9 月下旬から 10 月下旬の約 1ヶ月間、チリ・アタカマ砂漠 (標高 5000 m) の ASTE 10 m 望遠鏡に、0.9THz と 1.5 THz を観測する HEB ミクサを利用した受信機の搭載実験を行った。前回の搭載では、基準周波数信号 (LO) をジュワー側面から準光学的に入射していたため、光学系調整の難しさとジュワーの振動による LO 強度の不安定性が問題であった。そこで今回、LO の最終通倍器をカートリッジ内に設置した新たな受信機を開発した。搭載した受信機は良好に動作し、降水量が 0.5 mm での 0.9 THz における大気込みの受信機雑音は約 3200 K であった。降水量が 1 mm 以下の条件で観測できたのは 7 日間のみであった。0.9 THz については、連続波による月と木星の観測と Orion KL の $^{13}\text{CO}(J=8-7)$ の分光観測に成功した。木星の観測から求めた主ビーム能率は 20 %程度であった。さらに、4 天体の中小質量星原始星において $^{13}\text{CO}(J=8-7)$ を検出した。1.5 THz については大気の状態が悪く、R-Sky の測定で受信機の性能を確認できなかった。

【ASTE 望遠鏡を用いた $^{13}\text{CO}(J=8-7)$ 輝線観測】

本研究室で開発した THz 受信機を用いて、低質量原始星領域 (RCrA IRS7B, NGC1333 IRAS2A, OMC2 FIR4) の $^{13}\text{CO}(J=8-7, 881 \text{ GHz})$ の輝線観測を行った。RCrA IRS7B における $^{13}\text{CO}(J=8-7)$ 輝線は、その速度構造から RCrA からの紫外線によって影響を受けている温かい領域をトレースしており、その分布を探るよいプローブとなることかわかった。また、NGC1333IRAS2A においては、原始星近傍の密度の高い領域から放射されているようであることが観測から示唆された。 $^{13}\text{CO}(J=8-7)$ 輝線が原始星周辺の高温ガスのよいトレーサとなることを示し、



図 6.3.6: THz experiment at ASTE

^{13}CO の高励起線観測の意味を示すことができた。

【AI 緩衝層を使った HEB ミクサーの評価】

HEB ミクサーの広帯域化を目指して、基板と超伝導薄膜の間に AlN の緩衝層を挟んだ素子を作成し、性能評価を行った。AlN 薄膜は基板と超伝導薄膜のマッチングを改善すると考えられており、これにより超伝導薄膜の厚みを従来の 10.8 nm から 8 nm 程度まで薄くすることができた。薄膜化によって、熱電子の格子冷却の効率が向上するため、HEB ミクサーの広帯域化につながる可能性がある。これまでのところ雑音温度 690 K を確認し、今後は帯域幅の測定を目指している。

【導波路型 1.9THz 帯 HEB ミクサーの開発】

有限要素法による 3次元高周波電磁界シミュレータと解析モデルを用いて、E/H 面の対称性やサイドロベレベルを改良したダイアゴナルホーンを設計し、これを実装したミクサマウントを切削加工した。マウントはレーザー顕微鏡で計測しながらアセンブリする。また、電子ビーム描画パターンや光露光マスクも製作し、超伝導 NbTiN 細線を集積した HEB ミクサー素子チップの製作を開始した。この研究は大阪府立大学の前澤裕之准教授との共同研究である。

<報文>

(原著論文)

- [1] Soma, T., Sakai, N., Watanabe, Y., and Yamamoto, S., “Methanol in the Starless Core, Taurus Molecular Cloud-1”, *ApJ*, 802, 74 (2015).
- [2] Yoshida, K., Sakai, N., Tokudome, T., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Takano, S., Lefloch, B., Ceccarelli, C., Bachiller, R., Caux, E., Vastel, C., & Yamamoto, S., “Abundance Anomaly of the ^{13}C Isotopic Species of $\text{c-C}_3\text{H}_2$ in the Low-Mass Star Formation Region L1527”, *ApJ*, 807, 66 (2015).
- [3] Watanabe, Y., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Furuya, R., Sakai, T., Hirota, T., Liu, S.-Y., Su, Y.-N., and Yamamoto, S. “Spectral Line Survey toward

the Young Massive Protostar NGC 2264 CMM3 in the 4 mm, 3 mm, and 0.8 mm Bands”, *Astrophys. J.* 809, 162 (2015).

- [4] Oya, Y., Sakai, N., Lefloch, B., Lopez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., and Yamamoto, S., “Geometric and Kinematic Structure of the Outflow/Envelope System of L1527 Revealed by Subarcsecond-Resolution Observation of CS”, *Astrophysical Journal*, 812, 59 (2015).
- [5] Ebisawa, Y., Inokuma, H., Sakai, N., Menten, K. M., Maezawa, H., & Yamamoto, S., “OH 18 cm Transition as a Thermometer for Molecular Clouds”, *ApJ*, 815, 13 (2015).
- [6] Nishimura, Y., Shimonishi, T., Watanabe, Y., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., and Yamamoto, S., “Spectral Line Survey toward Molecular Clouds in the Large Magellanic Cloud”, *ApJ*, 818, 161 (2016).
- [7] Watanabe, Y., Sakai, N., Sorai, K., Ueda, J., and Yamamoto, S., “Molecular Distribution in the Spiral Arm of M51”, *ApJ*, 819, 144 (2016).
- [8] Sakai, N., Oya, Y., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Sakai, T., Hirota, T., Aikawa, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., and Yamamoto, S., “Subarcsecond Analysis of the Infalling-Rotating Envelope around the Class I Protostar IRAS 04365+2535”, *ApJ*, 820, L34 (2016).

(学位論文)

- [9] 相馬達也, “Development of the HEB Receiver for Ground-Base THz Astronomical Observations” (博士論文)
- [10] 吉田健人, 「星形成領域における ^{13}C および重水素同位体比の研究」(修士論文)
- [11] 海老澤勇治, 「OH 18 cm 線の吸収線で探る分子雲の構造形成」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [12] Yoshimasa Watanabe, Yuri Nishimura, Nami Sakai, Kazuo Sorai, Satoshi Yamamoto “Chemical Composition of Molecular Gas from kpc- to 10 pc-scale in Nearby Galaxies” Star Formation Workshop 2015, From Clouds to Cores, NAOJ, 2015年6月29日-7月1日.
- [13] Satoshi Yamamoto & Nami Sakai “Carbon-Chain Molecules in Astrophysics” Symposium on Advanced Molecular Spectroscopy, NAOJ, 2015年6月29日-7月1日.
- [14] Nami Sakai, Yoko Oya, “Disk and Outflow System in Low-Mass Protostellar Sources” Protoplanetary Disk Dynamics and Planet Formation, JAMSTEC, 2015年9月29日-10月2日.

- [15] Yoko Oya, Nami Sakai, Yoshimasa Watanabe, Ana López-Sepulcre, Satoshi Yamamoto, Yuri Aikawa, Tomoya Hirota, Takeshi Sakai, Cecilia Ceccarelli, Bertrand Lefloch, “A drastic change in the disk forming regions”, Workshop on Astrochemistry in Star and Planet Formation, RIKEN, 2016年2月16日.
- (国内会議)
- 一般講演
- 【天文学会 2015 年秋季年会、甲南大学、2015 年 9 月 9-11 日】
- [16] 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、「低重元素量の銀河 IC10 にある分子雲の 3 mm 帯ラインサーベイ」、R05a
- [17] 渡邊祥正、西村優里、坂井南美、徂徠和夫、山本智、「近傍銀河で観測される分子雲スケールの化学組成の意味」、R06a
- [18] 大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、Ana López-Sepulcre、山本智、Bertrand Lefloch、Cecilia Ceccarelli、「Class 0 原始星 IRAS 16293-2422 におけるエンベロープの速度構造解析」、P123a
- [19] 坂井南美、Ana López-Sepulcre、大屋瑠子、今井宗明、渡邊祥正、山本智、酒井剛、廣田朋也、「Unbiased Chemical Survey of Protostellar Sources in Perseus」、P124a
- [20] 吉田健人、坂井南美、渡邊祥正、Ana López-Sepulcre、山本智、Bertrand Lefloch、ASAI メンバー、「星形成領域における $c\text{-C}_3\text{H}_2$ の ^{13}C 同位体存在量異常」、P125a
- [21] 海老澤勇治、猪熊宏士、渡邊祥正、坂井南美、前澤裕之、Karl Menten、山本智、「OH 18 cm 線の吸収線と構造形成の関係の研究」、P126a
- 【天文学会 2016 年春季年会、首都大学東京、2016 年 3 月 14-17 日】
- [22] 渡邊祥正、西村優里、坂井南美、徂徠和夫、原田ななせ、山本智、「棒渦巻銀河 M83 における GMC スケールの CS と CH_3OH 分布」、R10a
- [23] 西村優里、下西隆、渡邊祥正、坂井南美、山本智、「低重元素量の矮小銀河における CO 輝線の観測」、R11a
- [24] 坂井南美、大屋瑠子、Ana López-Sepulcre、渡邊祥正、山本智、酒井剛、廣田朋也、相川祐理、Cecilia Ceccarelli、Bertrand Lefloch、Claudine Kahane、Emmanuel Caux、Charlotte Vastel、「Centrifugal Barrier of Infalling-Rotating Envelope around the Class I Protostar IRAS 04365+2535」、P101a
- [25] 大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、Cecilia Ceccarelli、Bertrand Lefloch、Cécile Favre、「Class 0 原始星 IRAS 16293-2422 におけるエンベロープの速度構造解析 (2)」、P102a
- [26] 吉田健人、坂井南美、渡邊祥正、Ana López-Sepulcre、山本智、「星形成領域 L1527 における CCH および CCD の高分解能観測」、P104a
- [27] 海老澤勇治、猪熊宏士、前澤裕之、坂井南美、Karl Menten、山本智、「OH 18 cm 線の吸収線で探る HCL2 領域における構造形成」、P107a
- [28] 今井宗明、坂井南美、Ana López-Sepulcre、大屋瑠子、渡邊 祥正、山本 智、「ALMA による低質量原始星天体 B335 の化学組成の研究」、P219a
- 【その他】
- [29] 大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「若い低質量原始星に付随するエンベロープガスの速度構造の解析」、星形成の諸階層 -銀河から惑星まで-、フォレスト箱根、2015 年 9 月 14-16 日
- [30] 今井宗明、坂井南美、Ana López-Sepulcre、大屋瑠子、渡邊 祥正、山本 智、「ペルセウス座分子雲の原始星天体に対する重水素濃縮度のサーベイ観測」、星形成の諸階層 -銀河から惑星まで-、フォレスト箱根、2015 年 9 月 14-16 日

6.4 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。

6.4.1 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、先に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))。この手法を実現すべく、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、本研究室では先に、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。

既に、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 (J. H. Mun *et al.*, Phys. Rev. A **89**, 051402(R) (2014))。プラズマシャッターで整形したナノ秒パルスの立ち下がり、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、検出器面上側に観測されるものの割合 N_{up}/N_{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 ($\cos^2 \theta_{2D}$) の dephasing 時間と総合すると実質的に高い配向度を維持できるのは 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。

さらに、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 (論文を投稿中)。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-ジブromoチオフェン分子 ($C_4H_2Br_2S$) 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 8 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。

昨年度は、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。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などを地道に行った結果、当初の目標であった配向度 ($\cos \theta_{2D}$) > 0.1 を達成できる目処をつけることに成功した。一方、ナノ秒 Nd:YAG レーザーの基本波とその第2高調波を利用した分子配向制御においては、基本波のパルス幅よりも第2高調波のパルス幅の方が短いため、基本波が先に立ち上がり始めることが配向度の効率的な向上を妨げている根本原因であることを明らかにした。これは、基本波パルスのみが先に立ち上がると対称な2重井戸ポテンシャルが形成されて分子配列のみが進行し、遅れて第2高調波パルスが立ち上がり非対称ポテンシャルの形成が始まって断熱的に配向を制御するメリットを生かすことができないためである。この困難を克服し、理想的な条件で全光学的な配向制御法を開発するために、干渉計型の光路を導入して2波長間の立ち上がりのタイミングを合わせることにした。この干渉計型の光路を用いれば、2波長間の相対位相の測定結果を干渉計の一つのアームの反射ミラーの位置合わせにフィードバックすることにより、プラズマシャッター動作時の相対位相の揺らぎを補償する効果も期待できる。今年度は、実際に干渉計型の光路を導入し、2波長パルスのアライメントなどを進めた。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。

一方、気体分子の配向制御の実験を始めとし、本研究室ではポンプ-プローブ型の実験を数多く行っている。この場合、ポンプ光とプローブ光の空間的な重なりを最適化し、かつ長時間にわたって維持する

ことが重要である。この実験プロセスを効率化するための方策として、真空チャンバーの直前に配置するステアリングミラーのホルダーをアクチュエーター付きのものとし、ポンプ光とプローブ光の重なり具合をモニターして最適化を自動化するとともに、フィードバック制御を導入して長時間にわたって重なり具合の最適化を維持する手法について検討した。

6.4.2 フェムト秒2波長レーザーパルスによるCO分子の配向度の検証

近年、フェムト秒2波長レーザーパルスでCO分子などの非対称な分子の回転波束を励起し、プローブ光の照射により発生する偶数次を含む高次高調波を観測して非対称な分子の分子軌道イメージングに応用する研究が注目されている。しかし、この研究課題を巡っては、コミュニティで大きな混乱が起こっている。まず、カナダNRCを中心とするグループが配向したCO分子中から発生する高次高調波を観測したとする論文を発表した(E. Frumker *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 113901 (2012))。その後、この実験に参加していたWörnerが、自国のスイスETHにポジションを得て同様の実験を行い、配向したOCS分子中から発生する高次高調波を観測したとする論文を発表した(P. M. Kraus *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 233903 (2012))。彼らが試料分子が配向しているとする根拠は、一般に反転対称性の破れた系から発生すると考えられる偶数次高調波の観測である。また、彼らは配向分子が生成されるメカニズムについて、高強度フェムト秒2波長レーザー光で特定の方向を向いた分子のイオン化が選択的に起こり、残った中性分子が実質的に配向しているため高次高調波の発生に寄与したと説明し、偶数次と奇数次の高調波強度の比から配向度 ($\cos \theta_{2D}$) ~ 0.20 程度が達成されていると見積もった。しかし、配向度 ($\cos \theta_{2D}$) ~ 0.20 程度を達成するためには最低でも20%以上の分子をイオン化する必要があるが、それほど高いmedium depletionが起こった系から高調波が効率的に発生するという報告は聞いたことがなく、彼らの説明は説得力に欠ける。一方、Wörnerらはその後、prealignmentパルスも併用したより慎重な実験を行い、CO分子の配向メカニズムを酒井らが提案した2波長レーザー電場と超分極率の異方性によるものと解釈を変更した(P. M. Kraus, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 023001 (2014))。しかし、彼らが見積もる配向度 ($\cos \theta_{2D}$) ~ 0.38 は、prealignmentパルスを用いたとしても(高調波実験では実現困難な回転温度を仮定しない限り)量子力学計算が予言する値として高過ぎると考えられ、依然としてにわかには納得しがたい状況である。

そこで、本研究室ではフェムト秒2波長レーザーパルスでCO分子の回転波束を励起し、CO分子の回転周期近傍(8.85 ps)で偶数次高調波の信号強度を最大化する様にポンプ光の条件を最適化し、その同じポンプ光を用いて実際にCO分子がどれだけ配向しているかを速度マップ型のイオンイメージング装置を用い、クーロン爆裂イメージング法で明らかに

する研究を行った。この場合、プローブ光の偏光方向を検出器面に垂直にすることにより、配向度を正しく評価することが重要である。具体的な実験方法と結果の概要を以下に述べる。

CO 分子の回転波束励起用の 2 波長レーザーパルスには、フェムト秒 Ti:sapphire レーザーの出力 (中心波長 $\lambda \sim 800$ nm) と β -BaB₂O₄ 結晶で発生させた第 2 高調波を用いた。方解石 (CaCO₃) を用いて 2 波長間の群遅延を補償するとともに、その回転により 2 波長間の相対位相差を制御した。試料の CO 分子は Even-Lavie バルブを用いて背圧 8 気圧で供給した。高次高調波の観測は、平面結像型斜入射分光器と X 線 CCD カメラを用いて行った。その結果、ポンプ光を照射後に CO 分子が配列していると考えられる遅延時間付近 (8.8 ps と 9.3 ps) で偶数次高調波の観測に成功した。ただし、奇数次高調波が 30 次程度まで観測されるのに対し、偶数次高調波は 20 次程度までの強度が急速に減衰することを見出した。高次高調波発生の基本モデルとして知られている 3 ステップモデルでは、今回観測された奇数次と偶数次でカットオフが有意に異なる理由を説明できない。このことは、奇数次高調波と偶数次高調波の発生メカニズムにおける本質的な相違を反映している可能性がある。偶数次高調波の発生がフェムト秒 2 波長レーザーパルスによって CO 分子のマクロな配向が実現したためと「仮定」して、偶数次高調波と奇数次高調波の強度比から配向度 $\langle \cos \theta_{2D} \rangle$ を見積もると ~ 0.04 程度となる。

そこで、偶数次高調波の発生に最適化されたポンプ光を用い、CO 分子が実際にどの程度配向しているかを速度マップ型のイオンイメージング装置を用い、クーロン爆裂イメージング法で明らかにした。まず、ポンプ光とプローブ光の偏光方向を互いに平行にし、かつ検出器面に平行な配置で CO²⁺ から解離した O⁺ の信号の角度分布を測定したところ、偶数次高調波が観測されたのとほぼ同じ遅延時間で $\langle \cos \theta_{2D} \rangle$ の値に配向を示唆する信号が観測されたが、その値は最大でも ± 0.02 以下程度であった。ただし、このプローブ光の偏光配置では、プローブ光の偏光方向と平行な向きを向いた分子ほど多価イオン化しやすい傾向があるため、 $\langle \cos \theta_{2D} \rangle$ の値は確実に過大評価されていること、さらに、分子試料のマクロな配向を観測しているのではなく、単に解離過程の異方性を観測しているに過ぎない可能性があることに注意する必要がある。これらの懸念を払拭し、クーロン爆裂イメージング法を用いた $\langle \cos \theta_{2D} \rangle$ の評価を適切に行うため、プローブ光の偏光方向を検出器面に垂直にして観測したところ、 $\langle \cos \theta_{2D} \rangle$ の値は偶数次高調波が観測された遅延時間付近でも揺らぎの範囲に止まっており、実質的に $\langle \cos \theta_{2D} \rangle \sim 0$ 、即ち、マクロな分子配向は殆ど実現していないと結論せざるを得ないことが明らかになった。

高次高調波発生実験では、Even-Lavie バルブの直下にレーザー光を集光するため、試料分子の回転温度は数十 K と予想されるが、速度マップ型のイオンイメージング装置を用いたクーロン爆裂イメージング法の実験では、Even-Lavie バルブから数十センチ下流でレーザー光と相互作用することから回転温度は 10 K 程度以下になっていると予想される。した

がって、本当にマクロな分子配向が実現しているのであれば、偶数次高調波と奇数次高調波の強度比から見積もられた配向度 $\langle \cos \theta_{2D} \rangle \sim 0.04$ を上回る値が得られるはずであるが、結果は全く逆であり、高次高調波発生実験では偶数次高調波が観測されるものの、試料分子のマクロな配向は殆ど実現していないと考えるのが今回の一連の実験の論理的帰結である。

量子力学計算の予言を信じる立場からは、一般にフェムト秒 2 波長レーザーパルスで分子の回転波束を励起しても $\langle \cos \theta_{2D} \rangle > 0.1$ を実現することは困難であると予想される。すなわち、試料分子のマクロな配向度 $\langle \cos \theta_{2D} \rangle$ が低くても偶数次高調波が発生するメカニズムが存在すると考えるのが妥当である。偶数次高調波が発生するためには、例えば高調波発生の第 1 ステップであるトンネルイオン化に非対称性があればよい。一般に気体分子の配列・配向制御の理論計算では Born-Oppenheimer 近似に基づいた剛体回転モデルが仮定されるが、比較的高強度 (10^{13} W/cm² オーダー) のフェムト秒 2 波長レーザーパルスで励起された場合には、Born-Oppenheimer 近似を超えた現象が起こっている可能性がある。

6.4.3 フェムト秒 X 線自由電子レーザーパルスを用いた高強度レーザー電場中の分子構造の決定

近年、高強度電子線源と加速器関連技術の進歩を背景として X 線自由電子レーザーの開発とその応用研究が世界的に注目されている。日本では、理化学研究所の X 線自由電子レーザー施設 SACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) が 2011 年 6 月 7 日 16 時 10 分に 1.2 Å の X 線レーザーの発振に成功し、現在では X 線レーザーパルスを利用した様々な応用研究に供されている。本研究室では、高エネルギー加速器研究機構の柳下明シニアフェローらのグループと協力してフェムト秒 X 線自由電子レーザーパルスを用いた配列した分子中からの光電子回折像の観測に基づく「超高速光電子回折法」の開発を進めている。この手法は、X 線自由電子レーザーパルスの照射により分子を構成する原子の内殻から生成された光電子の波と、その一部が同一分子内の近傍の原子で弾性散乱した波の干渉効果を光電子回折像として観測し、理論モデルとの比較により核間距離や 3 原子分子の場合には屈曲角をも決定するものである (M. Kazama *et al.*, Phys. Rev. A **87**, 063417 (2013))。特に気体分子の構造決定を目的とする場合には、本研究室が世界をリードする気体分子の配列・配向制御技術が不可欠となる。

今年度、ナノ秒 Nd:YAG レーザーの基本波パルスで配列した I₂ 分子を試料とし、光子エネルギー 4.7 keV の X 線自由電子レーザーパルスの照射により生成される運動エネルギー ~ 140 eV をもつ I 2p 光電子の回折像を観測した。昨年度の実験で、「超高速光電子回折法」の原理実証に成功したとき (K. Nakajima *et al.*, Sci. Rep. **5**, 14065; doi: 10.1038/srep14065 (2015)) よりも I₂ 分子の配列度を高めることに成功

し、 $\langle \cos^2 \theta_{2D} \rangle = 0.73$ を達成した。光電子回折像と理論計算の比較の結果、 I_2 分子配列用のナノ秒 Nd:YAG レーザー電場中 ($6 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$) で、 I_2 分子の核間距離は、平衡核間距離 (2.666 \AA) よりも $0.1\text{--}0.2 \text{ \AA}$ 程度伸長していることを初めて明らかにした。このことは、YAG レーザー光の多光子励起により、 I_2 分子のアンサンプル中に励起分子が含まれていることを示唆している。今後はさらに分子試料の配列度を高めて分子構造決定の精度を高めるとともに、ポンプロープ法の導入により分子の構造変化の超高速ダイナミクスを明らかにする「分子ムービー」の実現に向けて研究を進める予定である。

なお、本研究は、高エネルギー加速器研究機構の柳下明シニアフェローを始めとし、寺本高啓氏 (立命館大学)、赤木浩氏 (日本原子力研究開発機構、現量子科学技術研究開発機構)、間嶋拓也氏 (京都大学)、中嶋享氏 (高輝度光科学研究センター)、小川奏氏 (理化学研究所)、富樫格氏 (高輝度光科学研究センター)、登野健介氏 (高輝度光科学研究センター)、吉田慎太郎氏 (京都大学)、和田健氏 (高エネルギー加速器研究機構)、矢橋牧名氏 (理化学研究所) との共同研究である。

6.4.4 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勝見亮太君、小松原航君 (S セメスター)、及び、梅本滉嗣君、住谷達哉君 (A セメスター) の活躍によるものである。また、今年度は、平成27年6月11日~7月22日の6週間にわたり、UTRIP (University of Tokyo Research Internship Program) 生として、Ms. Siobhan Maeve Tobin (The Australian National University, Canberra, Australia) と Mr. Hsu Liu (Reed College, Portland, OR, USA) の2名を受け入れた。一方、本研究室出身の加藤康作氏が、博士課程での研究業績に対し、原子衝突学会第16回若手奨励賞を受賞した。原子衝突学会若手奨励賞は、酒井広文研出身者として二人目の受賞である。また、特別実験Iを始めとし、その後の研究活動でも活躍した小松原航君が平成27年度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6.4.1と6.4.2は、科学研究費補助金の基盤研究(A)「配向した分子中から発生する高次高調波の物理過程の解明」(課題番号26247065、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。ここに記して謝意を表す。

<受賞>

- [1] 加藤康作、原子衝突学会第16回若手奨励賞、「高次高調波で探る高強度レーザー電場と原子・分子の相互作用の物理」、2015年9月29日。
- [2] 小松原航、平成27年度理学部学修奨励賞、2016年3月25日。

<報文>

(原著論文)

- [3] Kyo Nakajima, Takahiro Teramoto, Hiroshi Akagi, Takashi Fujikawa, Takuya Majima, Shinichirou Minemoto, Kanade Ogawa, Hirofumi Sakai, Tadashi Togashi, Kensuke Tono, Shota Tsuru, Ken Wada, Makina Yabashi, and Akira Yagishita, "Photoelectron diffraction from laser-aligned molecules with X-ray free-electron laser pulses," *Sci. Rep.* **5**, 14065; doi: 10.1038/srep14065 (2015).
- [4] Daisuke Takei, Je Hoi Mun, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Laser-field-free three-dimensional molecular orientation," to appear in *Phys. Rev. A*.

(解説)

- [5] 加藤康作、「分子から発生する高次高調波の研究 (若手奨励賞受賞研究)」、原子衝突学会誌「しょうとつ」、Vol. 12, pp. 195–204 (2015).
- [6] Hirofumi Sakai, "Manipulation of molecular quantum states," *Scientia*, <http://www.scientiapublications.com/hirofumi-sakai-science-diffusion/>, March 2016.

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [7] K. Nakajima, T. Teramoto, H. Akagi, T. Fujikawa, T. Majima, S. Minemoto, K. Ogawa, H. Sakai, T. Togashi, K. Tono, S. Tsuru, K. Wada, M. Yabashi, and A. Yagishita, "Photoelectron diffraction from laser-aligned molecules using an x-ray free-electron laser," ICPEAC satellites, International Symposium on (e,2e), Double Photo-ionization and Related Topics and the 18th International Symposium on Polarization and Correlation in Electronic and Atomic Collisions, San Sebastian, Spain, July 30–August 1, 2015.

一般講演

- [8] S. Minemoto, T. Teramoto, H. Akagi, T. Fujikawa, T. Majima, K. Nakajima, K. Ogawa, H. Sakai, T. Togashi, K. Tono, S. Tsuru, S. Yoshida, K. Wada, M. Yabashi, and A. Yagishita, "Ultrafast structure determination of a molecule in an intense laser field by photoelectron diffraction imaging using XFEL," International Conference on Electron Spectroscopy and Structure: ICES2015, Stony Brook University, New York, USA, September 28–October 2, 2015.
- [9] Shinichirou Minemoto, Koji Umamoto, Tatsuya Sumiya, Ryota Katsumi, Wataru Komatsubara, Siobhan Tobin, Hsu Liu, and Hirofumi Sakai,

“Nonadiabatic orientation with a femtosecond two-color laser field studied by high-order harmonic generation and ion imaging spectrometry,” to present at International Conference on Ultrafast Phenomena, Santa Fe Community Convention Center, Santa Fe, New Mexico, USA, July 17–22, 2016.

(国内会議)

受賞記念講演

- [10] 加藤康作、「高次高調波で探る高強度レーザー電場と原子・分子の相互作用の物理」、原子衝突学会第40回年会(原子衝突学会第16回若手奨励賞受賞講演)、首都大学東京南大沢キャンパス国際交流会館(東京都八王子市南大沢)、2015年9月29日。

一般講演

- [11] 峰本紳一郎、勝見亮太、小松原航、Tobin Siobhan、Liu Hsu、酒井広文、「高次高調波発生とイオンイメージング法の併用による非断熱的分子配向制御の検証」、第76回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場(愛知県名古屋市熱田区)、2015年9月13日。
- [12] 峰本紳一郎、酒井広文、「紫外域の時間依存偏光パルス測定のための偏光分解型スペクトル干渉計の開発」、第76回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場(愛知県名古屋市熱田区)、2015年9月13日。
- [13] 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状態の測定」、日本物理学会2015年秋季大会、関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市山手町)、2015年9月17日。
- [14] 峰本紳一郎、酒井広文、「フェムト秒2波長レーザーパルスを用いた非断熱的分子配向制御の検証」、日本物理学会2015年秋季大会、関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市山手町)、2015年9月17日。
- [15] 峰本紳一郎、小松原航、酒井広文、「フェムト秒2波長レーザーパルスで達成できる非断熱的分子配向度の評価」、レーザー学会学術講演会第36回年次大会、名城大学天白キャンパス(愛知県名古屋市天白区)、2016年1月10日。
- [16] 峰本紳一郎、梅本混嗣、住谷達哉、小松原航、酒井広文、「高次高調波発生とイオンイメージングを併用して評価したフェムト秒2波長レーザーパルスによるCO分子の非断熱的な配向度」、第63回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学大岡山キャンパス(東京都目黒区大岡山)、2016年3月21日。
- [17] 峰本紳一郎、寺本高啓、赤木浩、間嶋拓也、中嶋亨、小川奏、酒井広文、富樫格、登野健介、吉田慎太郎、和田健、矢橋牧名、柳下明、「XFELを用いた光電子回折法による高強度レーザー中の分子構造」、日本物理学会第71回年次大会、東北学院大学泉キャンパス(宮城県仙台市泉区天神沢)、2016年3月22日。
- [18] 峰本紳一郎、寺本高啓、赤木浩、間嶋拓也、中嶋亨、小川奏、酒井広文、富樫格、登野健介、吉田慎太郎、和田健、矢橋牧名、柳下明、「気相実験におけるXFELとフェムト秒レーザー光との同期法の開発」、日本物理学会第71回年次大会、東北学院大学泉キャンパス(宮城県仙台市泉区天神沢)、2016年3月22日。

6.5 中澤研究室

6.5.1 はじめに

中澤研究室では、高エネルギー天体からくるX線、ガンマ線を、軌道上にあげた人工衛星に搭載した検出器で観測し、宇宙の高エネルギー現象の研究を進めている。JAXA宇宙科学研究所とともに、日本で5番目の宇宙X線衛星「すざく」(2005年7月打ち上げ)に検出器開発、衛星運用、そしてそれを用いた宇宙観測の形で深く参加し、2007年からは次世代の衛星ASTRO-Hに取り組んできた。2015年2月17日にはASTRO-Hがついに打ち上げられ、「ひとみ」と命名された。観測装置は全て立ち上がったものの、3月26日にトラブルに見舞われ、今も復旧運用を続けているところである。しかし、その観測性能の高さは、初期観測のデータからも見て取れており、現在そのデータ解析を進めている。

6.5.2 科学衛星の運用と稼働状況

「すざく」は、2016年2月現在も軌道上を回っているが、電源系の経年劣化などにより観測を停止している状態である。後継機の「ひとみ」は、「すざく」と比較して、広いX線帯域を(帯域によっては2桁近く)高い感度で観測する能力に加え、鉄などの蛍光輝線をFWHM 5 eVというこれまでより30倍も優れたエネルギー分解能で観測することができる。

3月26日のトラブルは、JAXAの発表によれば姿勢制御系の設定ミスが原因であり、これにより衛星は数秒周期の早い自転に陥ってしまっている。衛星本体はまだ健在だと考えられるものの、幾つかの部品が離脱しており、状況は予断を許さない。しかし、観測能力を復旧できる可能性はあるため、これを試みるためのコマンドを送信し続けているところである。現在の早い自転がある程度収まれば、この作業の実現性が高まると想定され、今後数カ月をかけて地道に回復運用を継続する予定である。

合わせて、次世代の硬X線、ガンマ線衛星の検討を進めている。

6.5.3 中性子星とその親星の研究

強磁場中性子星への質量降着

中性子星は、太陽の1.4倍程度の質量が半径10 kmの中に閉じ込められている高密度天体で、形成時に親星の磁束を抱え込むことで、 10^{12} G (= 10^8 T)の強磁場を持つ場合があることが知られている。表面磁場 10^{12} Gの強磁場中性子星に連星系の相手星からガスが流れ込むと磁極に集中するため、中性子星の自転に合わせたパルス周期が見えることが多い(X線パルサー)。磁場が強いため、電子のサイクロン共鳴周波数のエネルギーは $h\nu = 11 \times (B/10^{12} \text{ G}) \text{ keV}$ と硬X線に対応し、X線スペクトルに強い吸収線が現れる。室田らは「すざく」衛星で得られた4U1700-37という天体の1–150 keVの広帯域スペクトルを解析した。この天体はX線パルスは検出されていない

が、そのスペクトルが他の X 線パルサーに酷似し、55 keV 付近にサイクロトロン共鳴の吸収構造をもつことを確認した。さらに、鉄の K 輝線の中心エネルギーを調べ、X 線高度に合わせて電離が進むことを明らかにした [22]。

弱磁場中性子星への質量降着

磁場が 10^9 G 程度になると、降着物質の磁極への収束しなくなり、中性子星周辺に形成される降着円盤と、付随する高温コロナの放射が卓越するようになる。このような天体の多くは、小質量星と連星をなし、中性子星 Low Mass X-ray Binary (NS-LMXB) と呼ばれる。我々のグループの櫻井ら (2015) の研究により、Aql X-1 という明るい NS-LMXB において、降着率が高い時に、降着円盤と中性子星の表面の一部が双方とも黒体放射で光り、顕著なコロナの存在しないフェーズ (ソフト状態) から、降着率が減ってゆくにつれ降着円盤の内縁半径が後退し、代わりに発達するコロナが中性子星表面の黒体放射を叩き上げて、硬 X 線まで伸びる広帯域放射をするフェーズ (ハード状態) へと遷移する様子を明らかにした。小野らは GS 1826-238 という NS-LMXB の「すぎく」スペクトルを調べ、ハード状態で最も明るい状態に近い段階にある時には、降着円盤の内縁をも覆う少し大きなコロナが発達することを確認した [6, 16, 47]。また、Zhang らは、降着円盤を真横に近い方向から見ている NX-LMXB EXO 0748-676 の「すぎく」スペクトルを調べ、同様の結論を得た [9]。

極強磁場中性子星の自由歳差運動

極強磁場中性子星はマグネターと呼ばれ、ここ 10 年ほどでその存在がクローズアップされてきた新しい天体で、 10^{15} G に達する極めて強い磁場を持つ。マグネターは全て孤立天体であり、連星をなしているものは知られていない。牧島、村上らは、京都大学の榎戸とともに、マグネターの 4U 0142+61 を「すぎく」で見た 2009 年のデータに、中性子星の自転を表している $P = 8.6$ sec のパルスの特に硬 X 線帯域が、周期 $T_{prec} = 55$ ks で位相変調される現象を発見した。中性子星の内部に $B \sim 10^{16}$ G に達する強いトロイダル磁場があり、これでわずかにレモン型に変形したことで自由歳差運動が現れ、スピン周期と歳差周期のビート (スリップ周期) が T として観測されたと考えると、周期の位相変調を説明できる (牧島ら、PRL 2014)。これは中性子星の内部磁場という「見えない」はずの物理量にアクセスする全く新しい観測手段であり、本年度は他のデータを使ってこの描像の検証、確立を試みている。村上らは 4U 0142+61 の 2011 年および 2013 年の「すぎく」データを解析し、同様の位相変調を確認した。また、別のマグネター 1E 1547.0-5408 のデータからは、周期 $T_{prec} \sim 36$ ks の位相変調を発見している [8, 28, 49]。

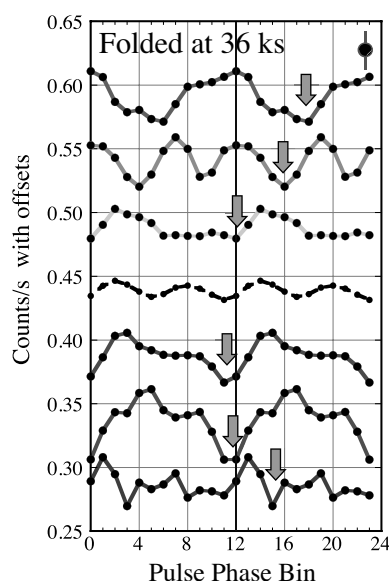


図 6.5.1: The 15–40 keV pulse profiles (shown for 2 cycles) of the magnetar 1E 1547.0–5408, observed in 2009 with the *Suzaku* HXD, folded at the barycentric pulse period of 2.07214 sec in 6 different phases of the $T = 36$ ksec slip period. The middle trace shows the overall average [8]. The periodic drift in the pulse minimum is indicated by arrows.

中性子星を産んだ超新星爆発の特徴

中性子星は超新星爆発の中で生まれるとされている。実際、超新星残骸 (Super Nova Remnant: SNR) の中に中性子星が観測される例は多い。中野、古田らは、SNR の性質を調べ、マグネターの親星と、通常の強磁場あるいは弱磁場中性子星の親星に違いがないか探っている。中野らを中心にマグネターを中心に持つ SNR CTB109 の観測から親星の質量が $\sim 40 M_{\odot}$ であることを確認した [2]。さらに古田らを中心に活動性の低い中性子星を中心に持つ RCW 103 にも同様の解析を行い、親星の質量が $18 \sim 40 M_{\odot}$ 程度と見積もった [30]。RCW 103 の中心天体 1E 161348-5055 は、6.7 hr という異常に遅い自転周期を持ち、実はマグネターの一種である可能性も高い。マグネターの親星はいずれも大質量星であるという説 (Gaensler+2005) があり、我々の結果はこの説を支持する。

6.5.4 ブラックホールの X 線研究

恒星質量 BH 連星 Cyg X-1 のソフト状態

ブラックホール (Black Hole: BH) は高密度ゆえに物質が降着する際に数千万度の高温になり、莫大なエネルギーを放出するため、X 線で非常に明るい天体となる。奥田らは、首都大学東京の山田らとともに、我々の銀河系内にある代表的な BH-大質量星連星 Cyg X-1 がソフト状態であった、2010-2014 年の「すぎく」の広帯域 X 線データを解析した。降着円盤からの放射に加えて、MeV まで伸びると言われ

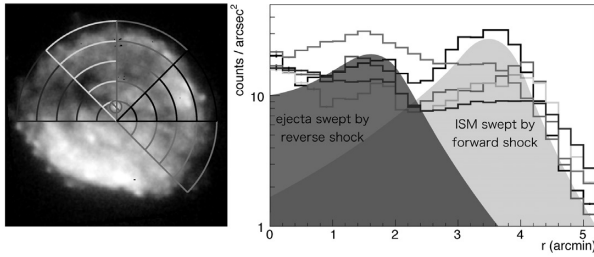


図 6.5.2: (左) SNR RCW 103 の XMM-Newton 衛星の X 線イメージ。爆発の中心から放射状に表面輝度を見ると、右図のように 2 つの典型的なスケールが見える。外側が、forward shock で掃かれた星間ガスが親星がそれまでに放出した星の外層のガス、内側が超新星からのイジェクタと考えられる。

るハード成分が見えているが、後者の光度が 30 倍も変化する一方で、スペクトルの形（特に傾き）が驚くほど不変であることを発見した。コロナ中の高温電子によるコンプトン叩き上げを考えると、電子数が増えるにせよ種光子数が増えるにせよ、この不変さは説明困難である。このことは、Cyg X-1 の周辺には幾何学的に小さなコロナが多数存在し、その数が大きく増えたり減ったりすることでソフト状態のハード成分の光度変動を生み出している、という描像で説明できる可能性があり、その研究を進めている [26, 40]。

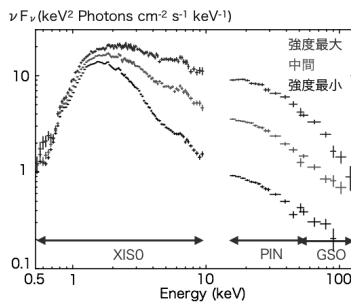


図 6.5.3: BH 連星 Cyg X-1 の X 線スペクトルを、X 線高度別にまとめたもの。

活動銀河中心核からの X 線放射

銀河の中心には $M = 10^6 \sim 10^{11} M_{\odot}$ に達する巨大 BH が存在する。ここに大規模にガスが降着すると、莫大なエネルギーを放射し活動銀河核 (Active Galactic Nuclei: AGN) という天体現象を起こす。三宅らは、首都大学東京の野田らとともに、AGN IC4329A の「すざく」広帯域 X 線データを解析した。野田ら (2013a, ApJ, 771, 100) で確立した、X 線スペクトルの時間変動からそのスペクトル成分を分解する C3PO 技法を適用して、IC4329A もまた光子指数 $\Gamma = 2.0$ の変動の大きなパワーロー成分に加え、 $\Gamma = 1.4$ の成分と、両者の反射成分でスペクトル

ルが解釈できることを確認した。巨大 BH の周りに、少なくとも 2 種のコロナ（と遠方の反射体）が存在するという描像が、最も明るいセイファート 1 型銀河でも成立することが示された。

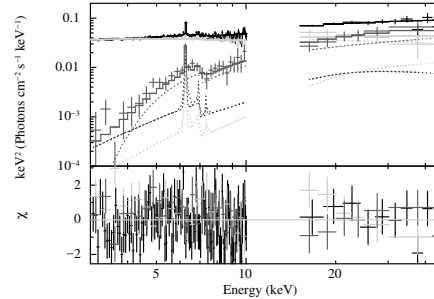


図 6.5.4: IC4329A の「すざく」2007 年観測スペクトル (黒)。C3PO 技法により分解された $\Gamma = 2.0$ の変動パワーロー成分 (緑) と、不変成分 (赤)。不変成分は、 $\Gamma = 1.4$ の成分 (マゼンタ) と、 $\Gamma = 2.0, 1.4$ の反射成分 (青、シアン) で構成される。

Ultra-Luminous X-ray sources (ULX)

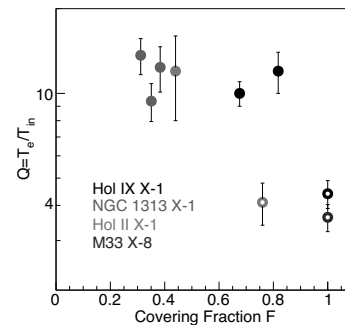


図 6.5.5: ULX 天体を、降着円盤からの黒体輻射とそれを高温コロナが叩き上げた成分で解釈した際の、円盤内縁温度とコロナの温度の比をたて軸に、コロナが円盤を覆う割合を横軸に取ったもの。4 つの ULX 天体の結果を示している。温度比は 2 つの特徴的な値を取り、これはスペクトル形状の差異を表す。2 つのフェーズの間では、天体ごとに明確な区切りがあるように見える。

Ultra-Luminous X-ray Sources (ULXs) は、近傍の銀河の腕に時折見られる、X 線光度が $10^{39-40} \text{ erg s}^{-1}$ を超える点源である。 $\sim M_{\odot}$ の天体の Eddington 限界光度 $1.5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ の 10 倍を超える明るさであり、通常の恒星質量 BH ($M \sim 10 M_{\odot}$) では光度が説明困難な謎の天体で、我々はこれが $M = 30 - 300 M_{\odot}$ 程度の中間質量 BH に、Eddington 限界を超える質量降着が起きている系ではないかと考えている (牧島ら 2000)。小林らは X 線フラックスの大きな ULX Hol IX X-1 と NGC1313 X-1 の「すざく」および XMM-Newton 衛星の X 線データ解析を進め、そのゆっくりとした光度変動に合わせて X 線スペクトルが変化する場合、2 つのピークを持つ状態から、より明るい 1 つのピークに統合される状態を行き来することを確認した [11, 18, 42]。2016 年 2 月にアメリカの LIGO グループが報告した世界初の

重力波源は、世紀の発見である。約 $30M_{\odot}$ の BH 同士合体現象と解釈されているが、この事実はこれまで理論的に形成困難と言われていた $M > 20 M_{\odot}$ の BH が宇宙に比較的多数存在する可能性を示しており、ULX 研究にも大きな追い風となっている。

6.5.5 白色矮星への質量降着

激変星 (Cataclysmic Variable: CV) は、白色矮星 (White Dwarf: WD) に連星からガスが降着している系であり、銀河系内に無数に存在する降着系である。WD の磁場の強さ次第では、降着物質は磁極に集中して落ち、自転周期のパルスを示す。降着物質の流れをそのスペクトル形状から推定し、WD の質量などの物理量を導出するため、和田らは、理研の湯浅らとともに、まず降着円盤が形成されその内縁が磁極にむかって落下する Intermediate Polar と呼ばれる CV の代表的な天体 V1223 Sagittarii の「すぎく」データを解析した。降着柱に発生する衝撃波の温度から WD の質量を導出し、その質量を $M = 0.8 \pm 0.1 M_{\odot}$ と求めた。

6.5.6 銀河団の衝突・合体

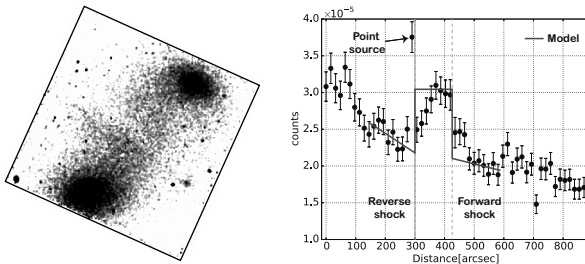


図 6.5.6: (左)Chandra 衛星で得た CIZA J1358.9-4750 銀河団の X 線画像。2つの銀河団の中心に衝撃波が立っている。(右) X 線輝度の断面図。幅 2 分角に渡って輝度が明るくなっているのが、post-shock 領域。

銀河団は、暗黒物質、X線を放つ高温プラズマ (Intra Cluster Medium: ICM)、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、その研究は宇宙論的な意義が大きい。銀河団は大規模構造の節であり、宇宙年齢の中で衝突合体を繰り返しながら、成長してきたと考えられている。加藤、中澤、Gu らは、銀河系から $z = 0.07$ 、距離 300 Mpc という近傍にある銀河団 CIZA J1358.9-4750 を「すぎく」で観測し、これが衝突の初期段階にあることを発見し、その研究を進めてきた [1]。「すぎく」による周辺領域の追観測 4 点に加え、角分解能に優れるアメリカの Chandra 衛星による観測を実施し、2つの銀河団の合体部でマッハ ~ 1.3 の衝撃波が発生していること、その前方・後方衝撃波を発見し、post-shock 領域が 170 kpc 幅しかないことを確認した。マッハ数および pre-shock 領域の ICM 温度から導出した音速を用いて、この衝撃波が post-shock 領域から見て 1200 km s^{-1} で動いていることを導出し、これが誕生から 70 Myr しか経っていない (銀河団としては) 極めて若い衝撃波であることを確認した [32, 36]。

中澤らは同等の温度をもつ他の銀河団よりも 1 桁近く暗い銀河団 Abell 548W の「すぎく」データの解析を進め、2つの小型の銀河団が、視線を高速 (3000 km s^{-1}) で衝突し、通常の銀河団よりも 2 倍ほど ICM 温度が上昇した状態と考えられることを議論した [7]。

6.5.7 雷雲ガンマ線の研究

2015-16 年シーズンの観測

近年になって雷雲そのものから 20-30 MeV に達する高エネルギーのガンマ線が数分間に渡って放射されていることが明らかになった (鳥居ら 2000)。落雷に同期するガンマ線も地上や衛星軌道上で観測されており、雷雲・雷において静電場による電子加速が起きていることがわかってきた。特に冬期の日本海岸の雷雲は、大きな落雷エネルギーと低い雲底が特徴でガンマ線観測に適している。我々は 2006 年冬期より新潟県柏崎市などにガンマ線検出器を設置してこれを観測している。

2015-2016 冬期は、奥田、古田、和田らを中心に、柏崎にガンマ線検出器を 1 台設置し 2015 年 11 月 12 日から翌 4 月 18 日まで観測を続けた。また、和田、奥田らが、京都大学の榎戸、理研の湯浅らと共に、初めて金沢市内に 3 台の検出器を設置した (2015 年 11 月 16 日から翌 2 月 19 日)。今年は北陸の雷が非常に少なかったが、11 月 14 日に柏崎で 1 イベント、2 月 9 日に金沢で 1 イベントの検出に成功した。金沢でも検出に成功したことは、今後予定している金沢市での検出器展開に向けて大きな弾みとなった [45]。

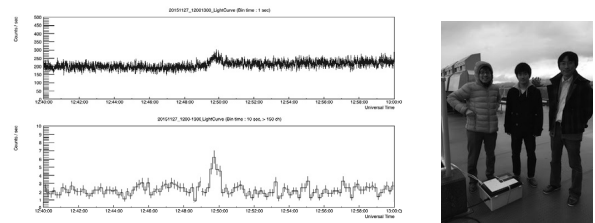


図 6.5.7: 柏崎で 2015 年 11 月 27 日に観測されたイベント。上が 100-20 MeV 全帯域、下が 3-20 MeV 帯域の時間変動。中央に 1 分ほどの継続時間をもつ典型的なロングバーストが検出されている。右は金沢の高校の屋上に設置した検出器の記念写真。

過去データの系統解析

楳本らはこれまでの全データ 23 イベントを、特に放射が 1 分以上続くロングバーストと名付けた現象を中心に系統的に解析した。一つだけ 511 keV の電子・陽電子対消滅線が際立って強かったイベントについては、これを論文にまとめた [4]。またその他のイベントについて、特にその継続時間を調査したところ、暗いイベントは継続時間が長く、明るいイベントは短いという傾向を得た。一方で、同一イベントを複数の検出器で見ている場合、明るいほうがより中心に近いと考えられるが、暗いほうでも同等

の継続時間であった。このことから、継続時間は雷雲加速器それぞれに固有であり、加速器の強度もしくは雲底の高度と相関があるのではないかという仮説がたてられる。現在そのほかのデータも合わせて、その検証を行っている [21, 46]。

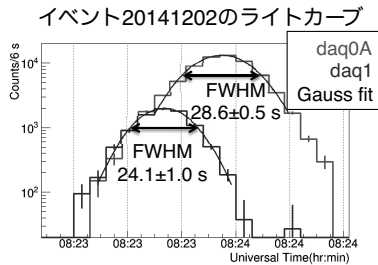


図 6.5.8: 雷ガンマ線の時間変動。1つのイベントを2つの検出器で捉えた例。タイムスケールがほぼ等しい。

6.5.8 宇宙 X 線衛星「ひとみ」の開発・運用

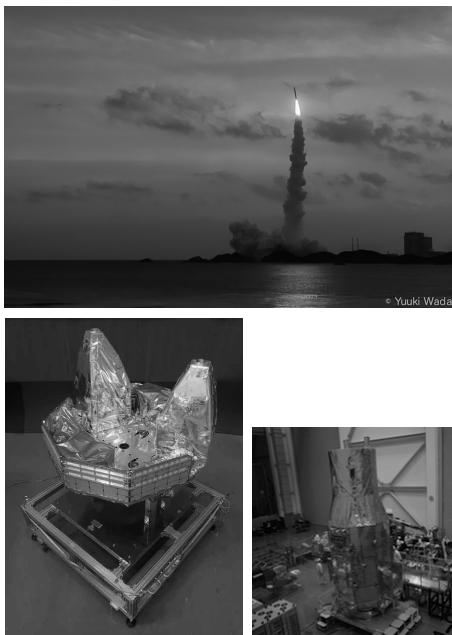


図 6.5.9: (上)「ひとみ」衛星の打ち上げ。2015年2月17日。(左下) 搭載される硬 X 線イメージャ 2 台。(右下) 打ち上げ前の組み立て中の「ひとみ」衛星。

我々が2007年よりその開発に取り組んできた ASTRO-H 衛星は、2016年2月17日に打ち上げられ「ひとみ」と名付けられた。「ひとみ」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、広い帯域での観測感度、高い精度の X 線分光能力において、これまでとより桁違いの性能をもち、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。この衛星には、0.5–10 keV 域で X 線エネルギーを5–7 eV の精度で分光する装置、38' の広視野 X 線 CCD 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 (HXI)、60–600 keV で働く軟ガンマ線検出器 (SGD) が搭載される。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、研究室の総力を挙げて HXI と SGD の開発に参加してきた。

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、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を搭載する。HXT と HXI の組み合わせは、従来の装置より2桁よい感度を実現する [52]。SGD は3×2台の「半導体コンプトンカメラ」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 の帯域で動作する。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する。

2015年度は、HXI、SGD ともに衛星へ搭載した状態で、小林、村上、三宅、中澤らを中心に、衛星全体での環境試験 (熱真空試験、振動試験、音響試験) を実施し、特に衛星熱真空試験において、要求する性能が達成できていることを確認した [25, 34, 39]。2月17日の打ち上げ後、2月28日には HXI 搭載部を6 m 伸展する作業を実施したのち、3月8日から15日にかけて検出器の立ち上げを実施し、検出器が正常に動作していることを確認した。幾つかの天体の初期観測の結果も得ている。3月26日に衛星が異常となつてからはデータは得られていないものの、それまでのデータを解析して検出器の性能を検証し、感度よい観測のためのデータスクリーニングの確立、将来の硬 X 線検出器を一段と高感度にするための指針を得るための軌道上でのバックグラウンドの起源を調査を進めている。

並行して HXI の主検出部である両面シリコンストリップ検出器の検出器応答を調べる実験を行った。これにより、p 層表面のストリップ電極間にある SiO₂ 層へ溜まる + 電荷により、p 側に一見「負」の波高値をもつイベントが形成されることを確認した [24, 43]。

6.5.9 将来衛星計画へ向けた装置開発

広帯域 X 線撮像観測 NGHXT/FORCE 衛星計画

FORCE 計画 (Focusing Optics for Relativistic universe and Cosmic Evolution, 旧名 NGHXT 計画) は、2020年代前半の打ち上げを目標に、ASTRO-H 同様の1–80 keV の広帯域を、角分解能を1桁改善し、同等の有効面積を1 t ほどの比較的小型の衛星で実現しようと言う計画である。中澤は、宮崎大、京都大、大阪大、NASA のゴダード宇宙センターの研究者とともに、この計画の発起人を勤めている。2015年度は、NEC とともに衛星のシステム検討を進め、電力・重量・サイズ、そしてコストの見積もりを行っ

た [33, 37, 51]。FORCE では 1 keV という軟 X 線までをカバーするため、そのアクティブシールドには特別の配慮が必要となる。古田らは簡単な地上実験とモンテカルロシミュレーションにより、BGO アクティブシールドからの蛍光 L、M 輝線を吸収しつつ、X 線の散乱によるバックグラウンドを増やさないようなパッシブシールド素材を、銅、アルミ、テフロンなどで実現できることを示した [12, 14, 19, 38]。

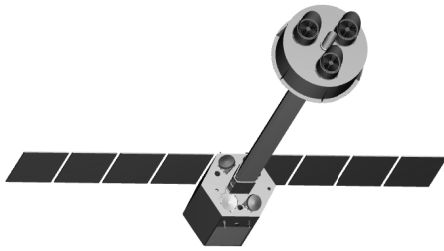


図 6.5.10: 検討中の FORCE の概念図。

MeV の将来計画

もう一つの方向性は、ASTRO-H の観測帯域より上のエネルギーを目指すことである。0.1 から数 MeV の帯域は物質と光子の相互作用のうちコンプトン散乱が支配的で、ガンマ線検出が難しい。ASTRO-H SGD は Si と CdTe を組み合わせた半導体コンプトンカメラでこの難題に取り組むが、同じ技術を使って広い視野をコンプトン撮像し、0.2–2 MeV という sub-MeV から MeV の帯域の全天観測を目指すのが CAST (Compton telescope for Astronomy and Solar Terrestrial physics) 計画である。国際計画としてはフランスを中心に計画している ASTROGAM 計画にも参加している。2015 年度はこれに加えて数 MeV の帯域を補うために、光電吸収断面積が桁違いに優れる BGO 結晶シンチレータを用いた改良の検討を行っている。長さ 30 cm、幅 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ の棒状のシンチレータの両端に光検出器を接合し、光量比から位置を、光量からエネルギーを得る。多数並べることで、簡素な読み出し系で 3 次元の位置・エネルギー検出を行うことを目指した。表面を粗面にする加工を適切に施すことで、光量とを損なうことなく、3 cm (FWHM) の位置分解能を得ることに成功した。半導体コンプトンカメラの外側にこれを用いることで、数 MeV 帯域での観測感度を大きく向上できる可能性が示された [15, 44]。

< 報文 (いずれも主要なもののみ) >

(原著論文 (Refereed))

- [1] Kato, Y., Nakazawa, K., Gu, Li., Akahori, T., Takizawa, M., Fujita, Y., & Makishima, K.: “Discovery of a nearby early-phase major cluster merger CIZA J1358.9–4750”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **67**, id.71 (2015)
- [2] Nakano, T., Murakami, H., Makishima, K. Hiraga, J. S., Uchiyama, H., Kaneda, H., & Enoto, T.:

“Suzaku studies of the supernova remnant CTB 109 hosting the magnetar 1E 2259+586” *Publ. Astr. Soc. Japan* **67**, id. 9 (2015)

- [3] Okabe, N., Umetsu, K., Tamura, et al. : “Central mass profiles of the nearby cool-core galaxy clusters Hydra A and A478”, *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* **456**, 4475–4487 (2015)
- [4] D. Umemoto, H. Tsuchiya, T. Enoto, et al. : “On-ground detection of an electron-positron annihilation line from thunderclouds”, *Phys. Rev. E* **93**, 021201(R) (2016)
- [5] Miyake, K., Noda, H., Yamada, S., Makishima, K., & Nakazawa, K.: “The New Primary X-ray Component Confirmed in the Seyfert I Galaxy IC 4329A”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **68**, in press (2016)
- [6] Ono, K., Sakurai, S., Zhang, Z., Nakazawa, K., & Makishima, K.: “A Suzaku observation of the low-mass X-ray binary GS 1826-238 in the hard state”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **68**, in press (2016)
- [7] Nakazawa, K., Kato, Y., Gu, L., Kawaharada, M., Takizawa, M., Fujita, Y., & Makishima, K.: “Suzaku observation of a high-entropy cluster Abell 548W”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **68**, in press (2016)
- [8] Makishima, K., Enoto, T., Murakami, H., Furuta, Y., Nakano, T., Sasano, M., & Nakazawa, K.: “Evidence for a 36 ks phase modulation in the hard X-ray pulses from the magnetar 1E 1547.0–5408”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **68**, in press (2016)
- [9] Zhang, Z., Sakurai, S., Makishima, K., Nakazawa, K., Ono, K., Yamada, S., & Xu, H.: “Suzaku Observation of the High-Inclination Binary EXO 0748-676 in the Hard State”, *Astrophys. J.*, in press (2016)
- [10] Gu, L., Wen, Z., Gandhi, P., Inada, N., Kawaharada, M., Kodama, T., Konami, et al. “Galaxy Infall by Interacting with its Environment: a Comprehensive Study of 340 Galaxy Clusters”, *Astrophys. J.*, in press (2016)
- [11] S. Kobayashi, K. Nakazawa & K. Makishima, “A New Characterization of the Compton Process in the ULX Spectra”, *Astronomische Nachrichten*, (2016) in press

(会議抄録)

国際学会

- [12] Furuta, Yoshihiro, et al. “A Study of Active Shielding Optimized for 1-80 keV Wide-Band X-ray Detector in Space”, International Workshop on SOI Pixel Detector (SOIPIX2015) 2015 年 6 月 2–6 日; 東北大学, 査読なし, arXiv:1507.00876v2

- 天文・天体物理若手夏の学校 2015 (長野: 2015 年 7 月 27 日–30 日) 集録

- [13] 和田有希 (東大理) ら「すざく」による激変星 V1223 Sagittarii の白色矮星質量の推定 (太陽・恒星分科会 a7)
(学位論文)
- [14] 古田 禄大: 「次世代 X 線衛星での応用を目指した 1–80 keV の広帯域におけるアクティブシールドの最適化」、修士学位論文
- [15] 室田 優紀: 「棒状シンチレータを用いたガンマ線 3 次元位置検出の技法の開発」、修士学位論文
- <学術講演>
- (国際会議講演)
- European Week of Astronomy and Space Science, 22–26 June 2015, La Laguna, Tenerife, Canary Islands, Spain
- [16] 小野光、櫻井壮希、ZhangZhongli、中澤知洋、牧島一夫 “Broadband X-ray Study of LMXBs in the Hard State with Suzaku”, poster
- [17] Murakami, H., Makishima, K., Enoto, T., Furuta, Y., Nakano, T., & Nakazawa, K.: “Evidence of Free-Precession in Magnetars” (Poster), id.Sp1.7
- “The Extremes of Black Hole Accretion”, ESAC, MADRID, SPAIN, 8–10 June, 2015
- [18] S. Kobayashi, et al. “A New Characterization of the Compton Process in the ULX Spectra”, 口頭, 2015 年 6 月 10 日
- International Workshop on SOI Pixel Detector (SOIPIX2015) 2015 年 6 月 2–6 日; 東北大学
- [19] Furuta, Y., Murota, Y., Hiraga, J. S., Sasano, M., Murakami, H., Nakazawa, K.: “A Study of Active Shielding Optimized for 1–80 keV Wide-Band X-Ray Detector in Space”, ポスター発表
- ASTRO-H Summer School (2015 年 8 月 27 日–8 月 29 日 奈良女子大学)
- [20] Yuuki Wada, Kazuhiro Nakazawa (University of Tokyo), Kazuo Makishima, Takayuki Yuasa (RIKEN), “Phase-resolved spectroscopy of V1223 Sagittarii with ASTRO-H”
(国内会議/招待講演/一般講演/ポスター講演)
- 日本地球惑星科学連合 2015 年大会 (2015 年 5 月 24 日 (日)~5 月 28 日 (木); 幕張メッセ; 口頭)
- [21] 榎本大悟, ら: 「冬の日本海沿岸に到来する雷雲由来のガンマ線バースト観測」, M-IS29-15(2015/05/29)
- 日本物理学会・秋季分科会 (2015 年 9 月 25 日 ~28 日; 大阪市大; 口頭)
- [22] 室田優紀, ら: 「すざく」衛星で探る大質量星と中性子星の連星系 4U 1700-37 の磁場強度と降着の幾何」、25aSJ-1
- [23] 牧島一夫, ら: 「すざく」によるマグネター自由歳差運動の二例目の発見: 1E1547.0-5408」、25aSL-9
- [24] 三宅克馬, ら: 「ASTRO-H 搭載の Si 両面ストリップ検出器の表面付近の応答特性」、25aSN-7
- [25] 小林翔悟, ら: 「ASTRO-H 搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の地上試験における最終性能」、25pSJ-4
- 日本天文学会・秋季年会 (2015 年 9 月 9 日 ~11 日; 甲南大学; 特記なき場合は口頭)
- [26] 奥田和史, ら: 「すざく」によるブラックホール連星 Cygnus X-1 のソフト状態におけるハードテイル成分の解析」、J101a
- [27] 牧島一夫, ら: 「すざく」によるマグネター 1E1547.0 – 5408 の自由歳差運動の検出 (2)」、J135a
- [28] 村上浩章, ら: 「マグネター 1E1841-045 および 1RXSJ170849.0-400910 の「すざく」による硬 X 線パルス復調解析」、J136a
- [29] 和田有希, ら: 「すざく」観測による激変星 V1223 Sagittarii の X 線スペクトル解析」、J211a
- [30] 古田禄大, ら: 「長周期のパルサー 1E161348-5055 に付随する超新星残骸 RCW103 の親星質量の推定」、K03a
- [31] 小野光, ら: 「太陽フレア MeV 中性子の検出に向けた基礎開発実験」、M44a
- [32] 加藤佑一, ら: 「衝突銀河団 CIZA J1358.9-4750 の衝撃波付近における鉄原子の電離状態」、T06a
- [33] 森浩二, ら: 「軟 X 線から硬 X 線の広帯域を高感度で撮像分光する小型衛星計画 NGHXT の現状 (2)」、V316a
- [34] 中澤知洋, ら: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の現状打上げに向けて」、V330a
- 日本天文学会・春季年会 (2016 年 3 月 14 日 (月)~17 日 (木); 首都大学東京 南大沢キャンパス; 特記なき場合は口頭)
- [35] 牧島一夫, ら: 「誰も気づかなかった銀河と銀河団高温プラズマの相互作用」、Z232b
- [36] 加藤佑一, ら: 「衝突銀河団 CIZA J1358.9-4750 における 2 つの衝撃波の観測的研究」、Z 233c (ポスター)
- [37] 森浩二, ら: 「軟 X 線から硬 X 線の広帯域を高感度で撮像分光する小型衛星計画 NGHXT の現状 (3)」、V324a
- [38] 古田禄大, ら: 「次世代 X 線衛星での応用を目指した 1–80keV の広帯域におけるアクティブシールドの最適化」、V328a
- [39] 中澤知洋, ら: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の現状~打ち上げ~」、V345a
- [40] 奥田和史, ら: 「すざく」によるブラックホール連星 Cygnus X-1 のソフト状態におけるハードテイル成分の解析 (2)」、W121a
- [41] 牧島一夫, ら: 「マグネター 4U0142+61 の硬 X 線パルス位相変調: NuSTAR データの解析」、W137a

- [42] 小林翔悟, ら:「熱的コンプトン過程を用いた ULX 天体の統一的な描像」、W144a
- 日本物理学会・春季大会 (2016 年 3 月 19~22 日; 東北学院大学; 口頭)
- [43] 三宅克馬, ら:「ASTRO-H 搭載の Si 両面ストリップ検出器の表面付近の応答特性 (2)」、21aAH-4
- [44] 室田優紀, ら:「棒状シンチレータを用いた光量差によるガンマ線位置検出技法の基礎研究」、21aCD-5
- [45] 和田有希, ら:「雷雲ガンマ線の多地点観測に向けた検出装置の小型化と 2015 年度冬季における北陸地方への展開」、21pAZ-13
- [46] 榎本大悟, ら:「GROWTH 実験: 2006-2015 年における柏崎刈羽原発内における雷雲ガンマ線検出データの全解析」、21pAZ-13
- [47] 小野光, ら:「ハード状態における GS 1826-238 の「すざく」によるワイドバンド分光」、21pCD-7
- [48] 牧島一夫, ら:「硬 X 線スペクトルで探る中性子星の表面状態」、21pCD-8
- その他
- [49] 村上浩章:「マグネターの自由歳差運動と ASTRO-H への見通し」、理研シンポジウム「中性子星の包括的研究」(2015 年 11 月 24-25 日, 理研和光キャンパス 仁科ホール)
- [50] 小野 光:「『すざく』を用いたハード状態における LMXB 降着流の研究」、~中性子星の観測と理論~研究活性化ワークショップ (2015 年 12 月 21-22 日, 京都大学理学研究科セミナーハウス)
- [51] 中澤知洋:「次世代の硬 X 線観測装置」、第 1 回 XRT 勉強会 (2015 年 11 月 16 日, 名古屋大学)
- [52] 中澤知洋: 招待講演:「The Hard X-ray Imager on-board ASTRO-H」、第 13 回 X 線結像光学シンポジウム (2015 年 11 月 17-18 日, 名古屋大学)

6.6 五神一湯本一吉岡研究室

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。一方、従来の光物性研究の手法では捉えることが困難な、光励起

された固体の電子励起状態を直接かつ精緻に観測するため、狭線幅レーザーを光源とする角度分解レーザー光電子分光法を開発した。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。さらに、文部科学省、最先端研究基盤事業「コヒーレント光科学研究基盤の整備」プログラムのもとで整備された、高輝度高線り返しの新型コヒーレント光源 (“フォトンリング” 施設) の開発に理化学研究所との共同で取り組んでいる。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的高温成分が閾值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% 程度と推測される。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ポテンシャルの形状によって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てきた。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、時間分解発光測定により、サブケルビン温度でパラ励起子がトラップ中で蓄積される様子を詳細に観測し、寿命や拡散係数、移動度といったダイナミクスを決定する重要なパラメータの抽出に必要な情報を取得した。

さらに、発光禁制となる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捉える実験を構築し、液体ヘリウム温度において歪トラップした $1s$ パラ励起子の誘導吸収イメージを取得することに成功した [1, 20, 13]。また、このとき得られる誘導吸収スペクトルが印加応力に依存して変化することを見出し、これを理論的に取り扱うため $1s$ 準位だけでなく $2p$ 準位の印加応力依存性の導出を進めた。さらに、100mK の極低温領域で実現する実験系の構築を進め、特に、温度上昇の原因となる希釈冷凍機内への室温の熱輻射の侵入を最小限にするため、中赤外域において必要な波長だけを透過する特殊なフィルタを窓に採用し、また窓の開口も制限することで、希釈冷凍機温度を保ちつつ誘導

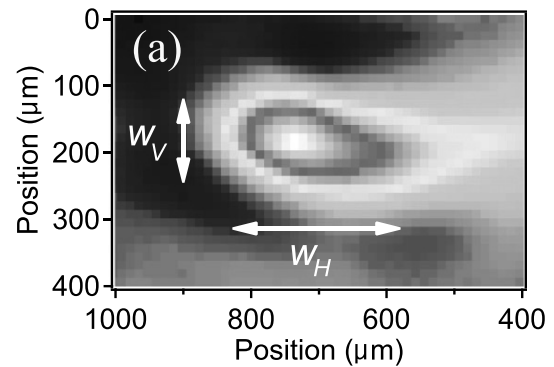


図 6.6.1: 液体ヘリウム温度で実現した歪トラップした $1s$ パラ励起子の誘導吸収イメージ

吸収イメージを取得することに成功した [21, 24, 10]。

冷却原子実験による希薄中性子物質の状態方程式の決定

中性子の温度や密度で決まる内部エネルギー、つまり中性子物質の状態方程式 (EOS) は、原子核の内部構造や超新星爆発から中性子星が誕生する過程を特徴付ける。そのため中性子物質の EOS の決定は、原子核物理および天体物理で重要な研究課題である。加速器を用いた原子核の衝突実験により、飽和核密度領域での中性子物質の EOS の研究は進んでいるが、低密度領域での測定はこれまで成されていなかった。我々は、冷却フェルミ原子系が、希薄中性子物質と同じ温度領域、相互作用領域に属する事に注目し、冷却フェルミ原子系で中性子物質を実験的にシミュレートし、その状態方程式を明らかにした [29, 37]。

冷却原子系と中性子物質は、温度スケールやエネルギースケールを直接比較すると何桁も異なり、また粒子間の相互作用も電磁気力と核力で異なるため、両者はまったく異なる物理法則に従うと考える。しかし両者とも、近距離ポテンシャルで相互作用しており、さらに平均粒子間距離や熱的波長はその相互作用ポテンシャルのサイズに比べて大きい。このような粒子系の相互作用は粒子間の相互作用ポテンシャルの詳細に依らず、散乱長や有効長というパラメータで記述できることが散乱理論によって説明できる。よって、冷却原子系で中性子物質に相当する相互作用領域で密度と内部エネルギーの関係を決定すれば、それは即ち希薄中性子物質の EOS を決定する事に相当する。

中性子は負の散乱長を持つため、中性子物質は低密度から高密度への変化に伴い BCS 領域からユニタリ極限まで変化する。我々はゼロ温度極限に近い極低温 6Li 原子気体を用い、中性子物質に相当するフェルミ粒子系を実現した。我々は高精度な撮像システムでこのフェルミ粒子系を観測し、厳密手法でトラップ系から一様系の物理量の抽出を行った。さらに慶応大学の理論研究との共同研究により、クー

パー対間の相互作用や有効長の影響等が明らかになってきた。

我々は実験結果に中性子の散乱長と密度を与え、初めて希薄中性子物質の EOS を明らかにした。下図に本研究結果と原子核理論との比較を示した。本研究により初めて低密度領域での EOS が実験で示されたが、飽和核密度の半分領域まで驚くほど良く一致していることが判った。つまり本研究によって、希薄な中性子物質は s 波相互作用しているフェルミ気体として理解できることが明らかになった。さらに本研究結果により物性物理と原子核物理の間で共通の物理が存在する事が明確になった。今後有限温度の効果を実験で示すことにより、中性子星の冷却メカニズムや、重イオン衝突実験の理解に貢献できると考えている。

6.6.2 非自明な光学現象の探索とその応用

MEMS スパイラルアレイ構造を用いたテラヘルツ波偏光制御素子の開発

テラヘルツ波を用いた偏光計測は、非接触ホール測定や構造の異方性計測、生体分子のキラリティ検出など、様々な応用が期待されており、その偏光制御技術の開発は重要な課題の一つである。この点において、自然界に存在する物質よりもはるかに大きな光学活性を持つ、キラルメタマテリアルと呼ばれる構造が注目を集めている。これは、波長と同等もしくはそれ以下の寸法で、鏡映対称性を有しない構造体ユニットをアレイ化した構造であり、右円偏光と左円偏光に対して異なる屈折率を示すことによる光学活性が発現する。このような構造のキラリティの向きをスイッチすることができれば、透過率は一定のまま偏光状態のみが反転するため、テラヘルツ帯の円偏光変調素子として活用することが可能となる。我々は、平面の渦巻き構造に対して、垂直方向への変位方向を変えることで、右回りと左回りのキラリティをスイッチすることが可能であることを見出した (図 6.6.2(a))。このような動作を実現するために、直径 150 ミクロンの変形可能な金属の渦巻き構造を平面状に配列した MEMS メタマテリアルを作製した (図 6.6.2(b))。この構造に対して、空気圧を用いて上側方向もしくは下側方向への変形を行うことで、スパイラルのキラリティ反転が実現可能である。この MEMS メタマテリアル透過後のテラヘルツ波の楕円率スペクトルを図 6.6.2(c) に示す。構造の縦方向の変化に応じて旋光性が発現し、変位の方向を逆にすると、偏光変化のスペクトルの方向も逆転していることがわかる。偏光変化の大きさは最大で 28 に達しており、テラヘルツ領域における実用的なアクティブ偏光変調デバイスとしての活用が期待される [4]。

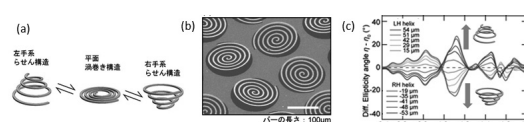


図 6.6.2: (a) スパイラル構造を用いたキラリティ切り替えの概念図 (b) 作製した MEMS スパイラル構造の電子顕微鏡像 (c) 過テラヘルツ波の楕円率角スペクトルの変位量依存性

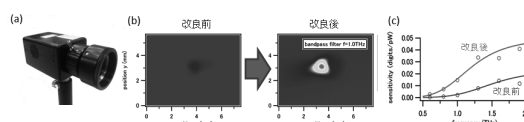


図 6.6.3: (a) 開発した高感度テラヘルツカメラの外観図 (b) テラヘルツカメラで撮影した 1THz のテラヘルツ波のビームスポット像 (c) テラヘルツカメラの感度スペクトル

高感度テラヘルツカメラの開発

テラヘルツ周波数領域の電磁波は、さまざまな分子の特徴的な指紋スペクトルが観測され、なおかつ可視光が透過しない多くの物質を透過するため、セキュリティー応用等に向けたテラヘルツイメージング技術の開発が進められている。しかしながら、光領域の CCD カメラのような、リアルタイムで二次元画像を取得するデバイスは、応用上重要な 1THz 近傍での感度が非常に低くなってしまおうという問題があった。我々は NEC 社と共同で、非冷却ボロメーターアレイ型のテラヘルツカメラの素子構造を改良することによって、1THz 近傍の感度を大きく向上させることに成功した。今回開発したテラヘルツカメラの外観図を図 6.6.2(a) に、改良前と改良後の 1THz で取得したテラヘルツビームスポットのイメージを図 6.6.2(b) に示す。今回の改良によって、低周波数領域での感度が著しく向上し、明瞭なテラヘルツ像が取得可能になっていることがわかる。また、高強度テラヘルツ光源とテラヘルツフィルターを組み合わせることで、広い周波数領域における感度スペクトルを取得する手法を開発し、テラヘルツカメラの感度の定量的評価を行った (図 6.6.2(c))。この結果、今回の改良によって、感度が約一桁向上していることが明らかになった。本研究で開発したテラヘルツカメラは、テラヘルツイメージング技術を支える重要な基盤技術になると考えられる [5]。

光による選択的加熱を用いた反強磁性ドメイン分布の制御

磁性体中では、臨界温度以下でスピン空間における回転対称性が自発的に破れて秩序が生じる。このとき秩序変数が異なる部分が空間的に分布しドメ

インを形成することがある。この磁性体のドメインを空間的に制御することで、磁気メモリなどへの応用が可能であり、その効率的なメカニズムを見出すことは今日も重要な課題であり続けている。反強磁性体では2つの副格子でスピンの逆向きに配列するため、全体の磁気モーメントが打ち消し合う。そのため、強磁性ドメインに比べて反強磁性ドメインの制御手法は限られている。例えば近年、強磁性体に円偏光のレーザーを入射することによって実効的な磁場を発生させて、強磁性スピン配列を局所的に制御したという報告がされているが、同様の光による反強磁性ドメインの制御はこれまで行われていない。

そこで本研究では、磁気直線二色性を用いて光によって MnF₂ 反強磁性ドメインを選択的に加熱することで、ドメインの分布を変化させられることを明らかにした。MnF₂ 結晶は反強磁性転移温度 TN 以上では一軸性結晶である。しかし TN 以下の温度でその [001] 軸に平行に磁場を印加すると、[110] 軸と [1-10] 軸にそれぞれ沿った偏光の光に対して吸収係数に違いが生じることが知られている。この直線二色性は特に波長 $\lambda = 396.25$ nm の光に対して顕著であり、その符号は秩序変数である反強磁性ベクトル L の符号を変えると反転する特徴がある。そこで TN をまたいで MnF₂ 結晶の温度を冷やす際に、0.5 T の磁場を印加しながらこの波長の直線偏光レーザー (CW, 11mW) による光加熱を行うことで特定の反強磁性秩序の形成を抑制し、ドメイン境界が空間的に異なる場所に形成されることを実験的に確かめた [6]。さらに偏光角を変化させると、ドメイン境界の位置が系統的に変化した。これらの結果は L の符号の異なるドメイン間で、光吸収の効率が異なり、2種類のドメインの生成エネルギーの間に違いが生じた結果と考えられる。

ワイドバンドギャップ誘電体の光破壊メカニズムの探索

フェムト秒レーザーによる光破壊プロセスを活用したレーザー加工は、非接触・高精細等の、他の加工技術にない特徴を備えており、次世代の自由形状加工技術を実現する重要なツールとして応用の観点から近年注目を集めている。一方で、フェムト秒レーザーによる透明物質の光破壊は、高強度コヒーレント光によって誘起される極限領域での非線形現象であり、その物理的メカニズムには未解明な点が多く、光科学における重要な研究課題の一つとなっている。多光子吸収やアバランシェイオン化などの、光破壊につながる様々な非線形現象を考える上で、光の波長は重要なパラメータであるにもかかわらず、これまでに光破壊の波長依存性を系統的に直接調べた報告はほとんどなされていなかった。本研究では、ワイドバンドギャップ誘電体の光破壊閾値を広い波長範囲で精緻に測定し、その波長依存性を明らかにすることによって、光破壊の物理プロセスに関する新たな知見を得ることを目的とした。

本研究ではサンプルとして α -Al₂O₃ を使い、その破壊フルーエンス閾値を紫外から近赤外におよぶ広い

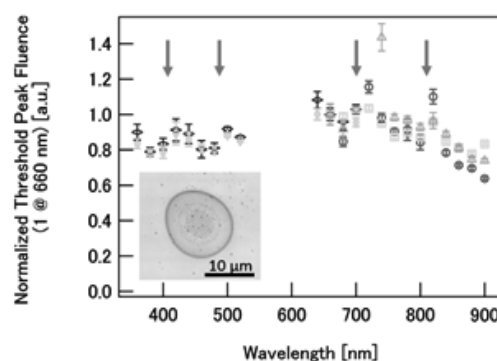


図 6.6.4: 実験で求めた破壊閾値の波長依存性 (入射波長 660nm の値で規格化)。矢印は多光子吸収の次数変化に対応する波長を示す。内図は光学顕微鏡像の一例。

範囲で系統的に測定した [41]。光源はパルス幅 190fs、中心波長 1028nm の Yb:KGW 再生増幅器によりポンプされた光パラメトリック増幅器を用い、シングルパルスをサンプル表面へと集光することで、表面破壊を誘起した。顕微鏡観察によって得られる加工痕の大きさのフルーエンス依存性を詳細に調べることによって、高い再現性で破壊閾値の波長依存性を抽出することに成功した (図 6.6.4)。このグラフには、多光子吸収の次数変化に対応するピーク形状が現れている。さらに、従来の励起電子密度レート方程式に基づく数値計算によって求めた破壊閾値と比較し、破壊閾値電子密度やアバランシェ係数のような、直接観測が困難なパラメータを抽出することが可能となった。

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

高次高調波を用いた真空紫外領域の精密分光

繰り返し周波数 5 kHz、パルス幅 30fs のフェムト秒チタンサファイア再生増幅器の出力を希ガスに絞り込むことで約 30eV から 130eV までの高次高調波を発生し、これを利用した真空紫外領域の固体の精密分光を進めている。これまでにヤングの干渉縞を応用し、干渉像の位相と明暗度から試料の屈折率分散を計測できる位相敏感な干渉計を開発した。

本年度は、真空紫外領域の波長校正や高次高調波の発生効率の向上により、エネルギー分解能は 0.6eV から 0.3eV へ、位相精度は 12mrad から 5mrad へ向上したことを確認した。さらに、この計測法を固体系の過渡応答を真空紫外領域で探る時間分解分光法に発展させた。再生増幅器の出力を二つに分け、一方をポンプ光にし、もう一方から発生させる高次高調波の光をプローブ光とする。この二つの光パルス間の遅延はディレイプレートにより制御し、0.4ps の時間スケールの応答を 30fs の時間分解能で追跡する

ポンププローブ分光系を構築した。その結果、近赤外パルス照射下での金属において、遅延時間に依存する内殻励起の微小な位相変化量を捉えることに成功した [28, 19]。

レーザー励起角度分解光電子分光の開発

レーザー光源をベースとする高分解能角度分解光電子分光法を開発し、とくに低温において光励起された固体電子系に焦点を当て、電子系の状態を直接かつ詳細に調べることで、光物性物理学において解決できなかった問題の解決に挑むことを計画している。そのため角度分解光電子分光装置の分解能を改善する試みを進めた。運動エネルギーや放出角度の正確な把握を阻害する、光電子分光装置内の残留磁場を 0.13 マイクロテスラ以下に低減させ、また、電子レンズにおける電極の電位の微調整を行った。ピコ秒モード同期チタンサファイア発振器の繰り返し周波数を高電子分光装置に合わせて適切に低下させ、その第四高調波を狭線幅の光電子励起用の光源として使用し、6 ケルビンに冷却した多結晶の金を試験用試料として角度分解光電子分光を行うことで、完成した装置を評価した。その結果、金属界面のフェルミ縮退した電子状態を観測し、光電子分光のエネルギー分解能が約 12meV から 3.6meV に向上し、角度分解能が 0.47 から 0.33° (ただし同時測定可能範囲 $\pm 15^\circ$) へ向上したことを確認した。これは類似の装置として世界最良レベルの分解能である。

次に、同一のモード同期発振器の第二高調波を比較的高い強度で試料に照射し、その励起パルスの直後に光電子放出用の第四高調波を照射することで、光励起されたトポロジカル絶縁体の固体表面近傍の非平衡電子系の時間分解光電子分光を行えるよう実験系を拡張した。その結果、固体の表面に形成される金属状態において、光励起することで初めて形成される過渡的な励起電子状態の角度分解光電子分光を室温において行うことに成功し、その分散関係を観測できることを実証した。

また、半球型光電子アナライザを用いたレーザー励起角度分解光電子分光では、高分解能と高効率測定を両立するため、ピコ秒モード同期チタンサファイア発振器の基本波の第四次高調波 5.9eV を深紫外フアブリーペロー共振器に通すことで、光源の繰り返し周波数の通倍化を実現している。共振器を透過する高繰り返しパルス列を強度安定化するため、レーザーの縦モード周波数の安定化を進めている。

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た「コヒーレント光科学研究基盤の整備 (H22 年度～H25 年度)」をベースとして、最先端のレーザー技術を活用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を進めている。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。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 [5]。本事業は、工学系研究科附属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現在も進められている。

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。本研究室においては、誘電体レーザー破壊の物理的メカニズムの解明とそのレーザー加工への応用を目指した研究に取り組んでいる。

<報文>

(原著論文)

- [1] K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami: Absorption imaging of trapped 1s paraexcitons in bulk Cu₂O, Phys. Rev. B **91**, 195207 (2015).
- [2] T. Ishikawa, A. A. Eilanlou, Y. Nabekawa, Y. Fujihira, T. Imahoko, T. Sumiyoshi, F. Kannari, M. Kuwata-Gonokami, and K. Midorikawa: Kerr

- lens mode-locked Yb:Lu₂O₃ bulk ceramic oscillator pumped by a multimode laser diode, *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 072703 (2015).
- [3] A. Ozawa, Z. Zhao, M. Kuwata-Gonokami, and Y. Kobayashi: High average power coherent vuv generation at 10 MHz repetition frequency by intracavity high harmonic generation, *Optics Express* **23**, 15107 (2015).
- [4] T. Kan, A. Isozaki, N. Kanda, N. Nemoto, K. Konishi, H. Takahashi, M. Kuwata-Gonokami, K. Matsumoto, and I. Shimoyama: Enantiomeric switching of chiral metamaterial for terahertz polarization modulation employing vertically deformable MEMS spirals, *Nature Communications* **6**, 8422 (2015).
- [5] Y. Suzuki, T. Shimojima, T. Sonobe, A. Nakamura, M. Sakano, H. Tsuji, J. Omachi, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, T. Watashige, R. Kobayashi, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, Y. Yamakawa, H. Kontani, K. Ishizaka: Momentum-dependent sign inversion of orbital order in superconducting FeSe, *Phys. Rev. B* **92**, 205117 (2015).
- [6] N. Nemoto, N. Kanda, R. Imai, K. Konishi, M. Miyoshi, S. Kurashina, T. Sasaki, N. Oda, and M. Kuwata-Gonokami: High-Sensitivity and Broadband, Real-Time Terahertz Camera Incorporating a Micro-Bolometer Array With Resonant Cavity Structure, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **6**, 175 (2016).
- [7] T. Higuchi and M. Kuwata-Gonokami: Control of antiferromagnetic domain distribution via polarization-dependent optical annealing, *Nature Communications* **7**, 10720 (2016).
- (修士論文)
- [8] 荒武幸仁：
縮退フェルミ気体中でのボース粒子の衝突緩和，(2016年3月、東京大学大学院理学系研究科)
- [9] 櫻井治之：
Investigations on optical breakdown induced by intense ultrashort laser pulses, (2016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
- [10] M. Kuwata-Gonokami: Towards stable Bose-Einstein condensation of dark excitons in bulk cuprous oxide at 100 mK, *Fundamental optical processes in semiconductors (FOPS2015)*, Tu1.4, Double Tree Hotel, Breckenridge, USA (2015/8/4) (invited).
- [11] K. Konishi and M. Kuwata-Gonokami: Circular Polarization Effects in Metamaterials, Oxford, UK, The 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (Metamaterials'2015), (2015/9/10) (invited).
- [12] K. Konishi: Circular Polarization Control Using Metallic Artificial Structures, The 76th JSAP Autumn Meeting 2015, JSAP-OSA Joint Symposia, Nagoya Congress Center, Japan (2015/9/14) (invited).
- [13] K. Yoshioka: The quest for Bose-Einstein condensation of excitons in a bulk semiconductor at 100 mK, 12th US-Japan Seminar, Many body quantum systems from quantum gases to metrology and information processing, Madison, Wisconsin, US (2015/9/23) (invited).
- [14] Kuniaki Konishi: Metamaterial-based circular polarization control, The Second STEPS Symposium on Photon Science, St. Petersburg University, Russia (2016/3/15) (invited).
- [15] Junji Yumoto: Coherent photon technology -Light matter interaction, The Second STEPS Symposium on Photon Science, St. Petersburg University, Russia (2016/3/15) (invited).
- 一般講演 (口頭)
- [16] N. Nemoto, T. Higuchi, N. Kanda, K. Konishi, K. Yoshioka, and M. Kuwata-Gonokami: Highly precise and accurate terahertz polarization measurement by using photoelastic modulation, *CLEO/Europe-IQEC 2015*, Munich, Germany, (2015/6/23) (oral).
- [17] X. Fan, S. Kamioka, T. Inada, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, J. Omachi, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami: Search for Vacuum Magnetic Birefringence with Pulsed Magnet, 8th international Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FUPA2015), RIKEN (2015/12/1) (oral).
- [18] K. Shu, X. Fan, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, K. Yoshioka and M. Kuwata-Gonokami: Study on Cooling of Positronium for Bose-Einstein Condensation, 8th international Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FUPA2015), RIKEN (2015/12/1) (oral).
- [19] Y. Nagakubo: Phase sensitive detection of refractive indices at inner-shell transitions by the double slit interferometry using high-order harmonics, The Second ALPS Symposium on Photon Science, Auditorium, 5th Floor, Chemistry Main Building, The University of Tokyo (2016/3/29).
- 一般講演 (ポスター)
- [20] K. Yoshioka, E. Chae, and M. Kuwata-Gonokami: Absorption imaging of 1s paraexcitons in a strain-induced trap in Cu₂O using excitonic 1s-2p transitions, *Fundamental optical processes in semiconductors (FOPS2015)*, Double Tree Hotel, Breckenridge, USA (6, August, 2015) (poster).

- [21] Y. Morita, H. Suzuki, K. Yoshioka, M. Kuwta-Gonokami: Lyman spectroscopy of quantum degenerate excitons in Cu_2O , Fundamental optical processes in semiconductors (FOPS2015), Double Tree Hotel, Breckenridge, USA (5, August, 2015) (poster).
- [22] H. Suzuki, Y. Morita, K. Yoshioka, M. Kuwta-Gonokami: Cooling dynamics of trapped paraexcitons in Cu_2O at sub-Kelvin temperatures, Fundamental optical processes in semiconductors (FOPS2015), Double Tree Hotel, Breckenridge, USA (6, August, 2015) (poster).
- [23] Junko Omachi, Nobuko Naka, Kosuke Yoshioka, Makoto Kuwata-Gonokami: Mid-infrared response of Fermi-degenerate electron-hole droplets in diamond, Fundamental optical processes in semiconductors (FOPS2015), Double Tree Hotel, Breckenridge, USA (6, August, 2015) (poster).
- [24] Y. Morita, Lyman absorption imaging of quantum degenerate excitons in Cu_2O , 12th US-Japan Seminar, "Many body quantum systems from quantum gases to metrology and information processing", Madison, Wisconsin, US (21, September, 2015) (poster).
- (国内会議)
招待講演
- [25] 小西邦昭: エナジー構造の対称性を活用した円偏光制御, メタマテリアル第187委員会 平成27年度第1回研究会, 機械振興会館 (2015/6/12).
- [26] 小西邦昭: 広帯域テラヘルツベクトルビーム・光渦の発生とその応用, 応用物理学会テラヘルツ電磁波研究会 2015年度若手研究者サマースクール, かんぼの宿 奈良 (2015/8/20).
- [27] 大間知潤子: 光励起した半導体における電子・正孔系のドロップレット, 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(中性子星核物質)」主催 第四回ウィンタースクール, 国立天文台 (2016/2/25).
- 一般講演
- [28] 永久保祐紀, 平野大輔, 大間知潤子, 吉岡孝高, 五神真: 波長可変高次高調波を用いた二重スリット干渉計による内殻遷移共鳴エネルギー近傍の位相敏感複素屈折率測定 II 日本物理学会 2015年秋季大会, 関西大学 (2015/9/16).
- [29] 堀越宗一, 池町拓也, 荒武幸仁, 五神真: 冷却フェルミ原子実験による中性子星 M-R 曲線の構築, 日本物理学会 2015年秋季大会, 関西大学 (2015/9/18).
- [30] 周健治, 樊星, 山崎高幸, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 五神真: ボーズ・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却, 日本物理学会 2015年秋季大会, 大阪市立大学 (2015/9/26).
- [31] 樊星, 周健治, 稲田聡明, 山崎高幸, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 大間知潤子, 五神真: パルス磁石を用いた真空複屈折の探索, 日本物理学会 2015年秋季大会, 大阪市立大学 (2015/9/26).
- [32] 周健治, 樊星, 山崎高幸, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 五神真: ボーズ・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却の考察, 京都大学原子炉実験所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」, 京都大学 (2015/11/26).
- [33] 樊星, 上岡修星, 稲田聡明, 山崎高幸, 難波俊雄, 浅井祥仁, 大間知潤子, 吉岡孝高, 五神真: パルス磁石を用いた真空複屈折の探索 2015年度応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会「極限計測の科学と技術」東京大学山中寮内藤セミナーハウス (2015/12/18).
- [34] 菅哲朗, 磯崎瑛宏, 根本夏紀, 神田夏輝, 小西邦昭, 高橋英俊, 五神真, 松本潔, 下山勲: キラリティ切替可能な MEMS スパイラルメタマテリアル THz 応答解析, 第63回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学 (2016/3/20).
- [35] 周健治, 村吉諄之, 樊星, 山崎高幸, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 五神真: ボーズ・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却 I, 日本物理学会 第71回年次大会, 東北学院大学 (2016/3/20).
- [36] 村吉諄之, 周健治, 樊星, 山崎高幸, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 五神真: ボーズ・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却 II, 日本物理学会 第71回年次大会, 東北学院大学 (2016/3/20).
- [37] 堀越宗一, 荒武幸仁, 五神真: 冷却原子実験による希薄中性子物質の状態方程式の決定, 日本物理学会 第71回年次大会, 東北学院大学 (2016/3/21).
- [38] 荒武幸仁, 堀越宗一, 吉岡孝高, 五神真: ボース原子と強く相互作用するフェルミ原子間の衝突断面積測定, 日本物理学会 第71回年次大会, 東北学院大学 (2016/3/21).
- [39] 樊星, 上岡修星, 稲田聡明, 山崎高幸, 難波俊雄, 浅井祥仁, 大間知潤子, 吉岡孝高, 五神真: パルス磁石を用いた真空複屈折の探索 I, 日本物理学会 第71回年次大会, 東北学院大学 (2016/3/22).
- [40] 上岡修星, 樊星, 稲田聡明, 山崎高幸 A, 難波俊雄 A, 浅井祥仁, 大間知潤子, 吉岡孝高, 五神真: パルス磁石を用いた真空複屈折の探索 II, 日本物理学会 第71回年次大会, 東北学院大学 (2016/3/22).
- [41] 櫻井治之, 飯田耀, 水谷彬, 小西邦昭, 湯本潤司, 五神真: ワイドバンドギャップ誘電体の表面光破壊閾値の波長依存性, 日本物理学会 第71回年次大会, 東北学院大学 (2016/3/22).
- セミナー
- [42] 湯本潤司: コヒーレントフォトン技術によるイノベーションの創出～加工技術への展開と産学連携～, 日本学術振興会 将来加工技術第136委員会, 武蔵野 (2015/06/05).
- [43] 湯本潤司: コヒーレントフォトン技術によるものづくり-学理と技術の融合-, 第39回レーザー協会セミナー「進化するレーザー応用技術の最前線」, パシフィコ横浜 (2015/10/16).
- [44] 湯本潤司: コヒーレントフォトン技術による生産技術の革新, ImPACT プログラム「ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現」, JST 東京本部別館 (2015/11/06).

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、重力波望遠鏡の開発とそれによる天文学は一貫して研究室の中心テーマとなっている。2016年2月には米国のLIGOによって、重力波信号の初観測が報告され、「重力波天文学」が幕をあげた。国内でも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完了し、2014年度からは本格的なインストールが開始されている。また、2015年度末にはiKAGRAと呼ばれる比較的単純な干渉計構成で、システム全体を用いた試験運転も行われ、2018年頃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。宇宙空間重力波アンテナPre-DECIGOの実現へ向けた検討や基礎開発も行われている。独自の方式のねじれ型重力波検出器TOBAに関しては、プロトタイプ機の開発が進められ、それを用いた観測運転と重力波信号探索も行われた。それらと並行して、われわれは重力波研究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 大型重力波望遠鏡 KAGRA

大型低温重力波望遠鏡KAGRA(かぐら)は岐阜県神岡の地下に一辺3kmのL字型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。神岡鉱山地下の静寂な環境の中に建設することで地面振動による雑音を軽減し、鏡を20Kの低温に冷やすことで熱雑音の低減を図る計画となっている。2010年10月にプロジェクトがスタートし、2016年3月に常温かつ簡易な構成での試験運転が開始された。2018年には低温での運転を行う予定である。

2016年2月にアメリカのLIGOグループにより重力波の初観測が発表されたが、重力波源の位置特定には複数台による観測が必須である。そのため、KAGRAが重力波の国際観測ネットワークに一刻も早く参加することが期待されている。当研究室ではKAGRAの根幹部分となる、主干渉計光学系や制御系の設計開発を行っている。

iKAGRA 試験運転

KAGRAは2016年3月に試験運転を開始したが、このフェーズをiKAGRAと呼ぶ。iKAGRAは常温懸架鏡を用いた一辺3kmのMichelson干渉計となっており、簡易な干渉計構成であるため重力波の検出は難しい。全長6kmに及ぶ真空槽・真空ダクト(図

6.7.1)のレイアウト確認や計算機やそのネットワーク系の動作確認、データ取得系の動作確認、観測シフト体制の確認を目的とした試験運転である。当研究室は、このiKAGRA主干渉計の制御で用いる電気回路や配線の取りまとめ、3km光を往復させるための鏡の初期アラインメント、干渉計の制御と重力波信号の較正、雑音源の特定などにおいて、主要な役割を担った。また、当研究室所属の全スタッフ、全学生が観測シフトに参加した。

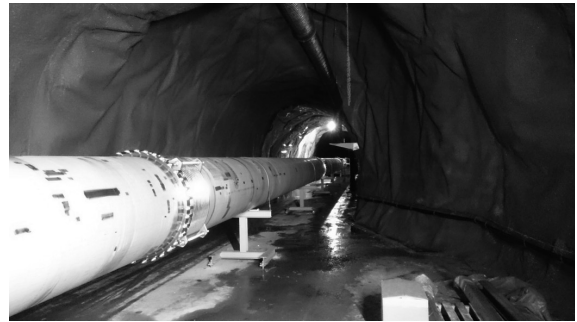


図 6.7.1: KAGRA の X 腕 3 km 真空ダクト

iKAGRA主干渉計に入射するレーザーの空間モードの整形や周波数安定化のために用いられるプリモードクリーナー、インプットモードクリーナーの開発も、東京大学宇宙線研究所の重力波グループなどと共に進めた。特に、計算機を用いたプリモードクリーナーの自動制御システムや、インプットモードクリーナーの自動制御システムの開発や性能評価を行った。インプットモードクリーナーに関しては、変調サイドバンドと呼ばれる光を使うことにより、その周回長を6桁の精度で測定し、設計値から1.5cmのずれがあることを確認した。また、インプットモードクリーナーが設計値通りの500程度のフィネスを持つことを確認し、十分なクリーン環境下でインストールが行われたことを確認した。

iKAGRA主干渉計の動作確認も順調であり、制御系やデータ取得系が期待通りに動いており、90%近い高い稼働率を誇っている。感度は重力波によるひずみ換算で $3 \times 10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}} @ 100\text{Hz}$ と、原理的な雑音に比べて3桁程度悪くなっており、試験運転と平行して、現在雑音源特定のための測定や計算が行われている。iKAGRAの試験運転は2016年4月末まで続けられる予定である。

主干渉計制御設計

iKAGRAの試験運転後は、bKAGRAと呼ばれる低温での運転を行うフェーズに移行する。当研究室ではbKAGRAに向けた入射光学系や主干渉計の制御設計も進めている。

主干渉計に入射するレーザー光には高い強度安定度と周波数安定度が要求される。そこで、今年度はレーザー光の強度安定化や周波数安定化のための光

学系配置と制御システムの設計をほぼ固めた。特に、周波数安定化は複数の光共振器を用いた多段安定化が必要となるため、制御システムをモデル化し、雑音や制御帯域の検討を行った。今後は実際にこの設計での入射光学系統合テストが宇宙線研究所で行われ、性能評価が行われる予定である。

また、主干涉計制御に用いる鏡のアクチュエータについても、設計を進めた。レーザー干涉計を高感度な重力波検出器として用いるためには鏡の位置と姿勢を高精度に制御しなければならないが、この制御にはコイル-マグネットアクチュエータが用いられる。鏡に磁石を貼り付け、近くにおいたコイルに電流を流すことで鏡を駆動する。この磁石のサイズが大きいほど、大きな駆動力が得られるが、環境磁場の変動によって鏡の位置が揺らいでしまい、雑音となる。この磁場雑音と駆動レンジの検討を行い、全ての常温鏡に対して、磁石サイズの決定を行った。低温鏡については低温懸架系の設計とともに、現在計算を進めている。

6.7.2 宇宙重力波望遠鏡

DECIGO は基線長 1000km のファブリペロー型レーザー干涉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涉計と、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涉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_{uv} を打ち上げ、そのデータを用いた重力波探査解析を行っている。

2015 年度は、DECIGO の前段階となる宇宙重力波望遠鏡 Pre-DECIGO の検討を進めた。LIGO が観測したような $30 M_{\odot}$ の質量をもつブラックホールの連星であれば、赤方偏移 30 の遠方まで観測可能であること、長時間の観測によって位置の特定も可能であることなどが示され、その科学的な意義の検討を進めた。また、中性子星連星や中間質量ブラックホールの合体といった観測の可能性で得られる科学的成果の検討や、その観測を行うためのミッション検討も進めた。

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、地上の干涉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。

光学系の検討・開発

これまでの TOBA では試験マスの変位センサとしてファイバー干涉計を用いていたが、ファイバー干涉計を用いたことによる位相雑音によって感度が制限されていた。そこで我々は空間光を用いた光学系、特にモノリシック光学系を用いた変位センサの開発を進めている。

今年度はモノリシック光学系の設計、試験マスや光学素子、光学系土台の設計、発注を行った。

今後はモノリシック光学系を組み上げ、その変位読み取り雑音を評価し、TOBA の変位センサとして十分な性能があることを確認する。

防振・懸架装置の検討・開発

検出器の感度を制限する主要な雑音源の一つが地面振動による試験マスの回転である。回転方向の地面振動が伝達され回転するものと、並進方向の地面振動がねじれ振り子の非対称性などを通して回転にカップルするものがあり、いずれも目標感度を達成できるレベルまで抑える必要がある。

本年度は、回転地面振動雑音を低減するための設計や、並進地面振動からのカップリング経路の系統的研究およびその低減実証のための実験が進められた。回転地面振動雑音に関しては、既存の構成に中段マスを 1 つ追加し 3 段ねじれ振り子とすることで受動防振を強化する設計を行った。また中段マスを防振効率のよい形状にすることで、さらなる防振性能の向上もはかっている。並進地面振動からのカップリングに関しては、カップリングが導入される経路の洗い出しにより、マイケルソン干涉計を用いる単純なねじれ振り子の場合には少なくとも 5 つの経路が存在することが明らかになった。そこから各経路について目標感度を達成するための低減方法が考えられ、ねじれ振り子の非対称性に対する要求値も導かれた。現在はそのうちの 1 つの経路について低減の実証実験が進められている。

アクチュエータの検討・開発

これまでの TOBA では試験マスの制御にコイルマグネットアクチュエータを用いていたが、アクチュエータ磁石と環境磁場とのカップリング雑音が問題になっていた。そこで我々は磁石を用いず、かつ駆動力の大きい、コイルコイルアクチュエータという新型のアクチュエータの開発を進めている。

今年度は TOBA に用いられる試験マスと同じサイズの試験マスをコイルコイルアクチュエータによって制御することに成功し、その感度評価を行った。

今後はコイルコイルアクチュエータの磁場雑音や熱雑音といった雑音の評価を進め、TOBAのアクチュエータとして十分な性能があることを確認する。

データ解析研究

TOBAの観測データを用いた重力波探査として、これまでは数10mHzから数Hz帯における背景重力波探査や特定の質量(200 M_{\odot} -200 M_{\odot})を持つ中間質量ブラックホール連星からの重力波探査、特定のパルサー(PSR J2144-3933)からの連続波探査などが行われてきた。今年度はPhase-II TOBAの2014年12月の観測データを用いて、6-7 Hz帯における全天連続波探査、100 M_{\odot} から500 M_{\odot} の広い質量範囲での中間質量ブラックホール連星からの重力波探査を行うことで、TOBAにおける解析パイプラインの開発を進めた。

全天連続波探査については、 \mathcal{F} -statisticと呼ばれる統計を用いて、6-7 Hz帯において上限値をつけた。この周波数帯での最も厳しい上限値は6.84 Hzにおける重力波によるひずみに対する上限値で、95%信頼区間で 3.6×10^{-12} であった。この上限値は天文学的に面白い領域には達していないが、TOBAのアップグレードによって $\sim 10^{-19}/\sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$ の感度が達成されれば、重力波の検出や連星中性子星の楕円度への上限値の設定ができると期待されている。

また、中間質量ブラックホール連星からの重力波探査では1つのブラックホールの質量を100 M_{\odot} から500 M_{\odot} の範囲で刻み、2つのブラックホールの質量が同じとして162個のテンプレート波形を作り、マッチドフィルターを用いて探査を行った。現時点では重力波の候補は見つかっていないが、2つのブラックホールの質量が異なる場合のテンプレート波形を作成し、より広い質量範囲での探査を行う予定である。Phase-II TOBAのこの質量範囲でのブラックホール連星に対する検出可能距離は0.1 pc程度であり、重力波が見つかることはまずないが、イベントレートなどに上限値がつけられると考えられる。

6.7.4 低温光共振器を用いた超高安定化レーザー光源

安東研究室では次世代の周波数標準として期待される光格子時計の性能を向上させるための周波数安定化光源の開発を行っている。本研究では低温重力波検出器KAGRAの開発で培った技術を応用して、単結晶シリコンで製作した光共振器を低温に冷却することによって、従来の周波数安定化の妨げとなっていた熱雑音を低減し、1秒のアラン標準偏差で 10^{-17} という非常に高い周波数安定度を実現する。これにより、光格子時計は100-1000秒という非常に短時間の積算時間で 10^{-18} の安定度が実現可能になる。

今年度は昨年度に構築を終えた周波数安定化セットアップを用いて10 Kまで冷却したシリコン光共振器にレーザーの周波数を安定化し、開発したレー

ザーの周波数安定度を測定した。得られた周波数安定度は0.8秒のアラン標準偏差で $7.03^{+0.38}_{-0.34} \times 10^{-15}$ の安定度で、この結果は1秒近傍の時間スケールにおいて、極低温の光共振器にレーザー周波数を安定化した先行研究の結果を上回る周波数安定度となっている。

しかしながら、現在達成されている $7.03^{+0.38}_{-0.34} \times 10^{-15}$ という周波数安定度は目標としていた 10^{-17} に到達していない。したがって、今後の安定度向上のためには現状の安定度を制限している雑音源を特定する必要がある。そこで、周波数雑音源となり得る雑音を定量的に評価することにより現在の安定度を制限している雑音源の特定を行った。

その結果、1 Hz以上の高周波数帯では共振器に加わる振動の影響が大きく、1 Hz以下の低周波数帯では共振器の温度変動の影響が大きかった。また、今回調査したその他の雑音については目標を達成するのに十分なレベルまで雑音が小さいことも確認できた。これにより、振動の低減・温度安定度の向上を行うことで目標が達成可能であることがわかった。

6.7.5 相対論・量子光学精密実験

三角光共振器を用いたオプトメカニクス研究

熱浴から十分に孤立した巨視的な、特に質量の大きな振動子は、質量依存性のある未知の量子デコヒーレンス(重力デコヒーレンス)の検証や、空間の最小単位の高精度な検証など、様々な基礎物理に実験的な知見を与える可能性を秘めている。これらの検証のため、我々は重力波検出器で用いられているような細線で懸架された鏡に着目し、レーザー光を利用して懸架鏡の振り子モードを基底状態まで冷却することを目指している。

基底状態冷却のために、まずレーザー光の量子的な揺らぎ(量子輻射圧揺らぎ)によって励起される振り子運動が熱雑音よりも大きくなるような懸架鏡の開発に取り組んだ。5 mg鏡を一端とした三角光共振器を構成し回転方向を光ねじればねで束縛することで、これまで問題となっていた共振器内光量と懸架線から導入される振り子の熱雑音のトレードオフを解消した。量子輻射圧揺らぎの直接測定には至らなかったものの、振り子運動の大きさの入射レーザー光量依存性を測定することに成功し、量子輻射圧揺らぎと振り子の熱雑音の信号雑音比は 1.4 ± 0.2 と推定される[5]。

続いて、懸架鏡の振り子モードを基底状態まで冷却する冷却主婦の原理検証を行った。共振周波数の低い懸架鏡においては、基底状態まで冷却するにはフィードバック冷却が必要となるが、小さな5 mgの鏡にアクチュエータを取り付けることは困難である。そこで、三角光共振器を構成する別の大きな鏡にアクチュエータを取り付け、この大きな鏡と5 mg鏡を光ばねで束縛することで、光ばねを介し遠隔的に5 mg鏡を冷却する手法を用いた。これにより、振り

子モードの実効温度を 15 ± 3 mK まで冷却することに成功した [45, 27].

さらに、例えば基底状態まで冷却されたとしても、基底状態を 1 周期以上保てなければその振動子を基礎物理の検証に用いることはできない。基底状態を何周期保つことができるのかを実測することには大きな意義があるが、いまだ測定例はない。そこで我々は、基底状態まで冷却された場合にその基底状態を保つ周期数の測定に取り組んだ。実測に成功し、懸架鏡の共振周波数 2.14 Hz を光ばねで 1.06 kHz まで上昇させた効果で、周期数を 10^{-11} 程度から 10^{-7} 程度と 4 桁改善することにも成功した [27].

現在、実効温度や基底状態を保つ周期数を制限しているのはレーザー光の周波数雑音であることが分かっている。今後は周波数安定化をはじめ、真空度の向上、懸架線の改良 [46] など古典的な雑音を抑える工夫を施し、基底状態到達、基底状態を保つ周期数 1 以上を目指す。

光学浮上鏡の開発

熱浴から十分に孤立した巨視的な振動子の実現を目指し、前節で用いられた振り子とは別の手法として、鏡を光輻射圧で浮上させる方法の開発を行っている。基底状態への到達を目指すにあたって、振り子の場合には鏡の懸架に伴う熱雑音が問題となりうるということが分かっていた。そこでそのような熱雑音を導入しない鏡の支持方法として、光輻射圧で鏡を浮上させることが考えられる。光学浮上鏡が実現できれば、その他の雑音を十分に低減することで基底状態への到達が見込まれている。

この光学浮上が可能となるためには、浮上した鏡が安定となる必要がある。安定な構成として、私たちは鏡の上下から光を当てるサンドイッチ構成を提案し、その実現に向けてこれまでに 1.6 mg の浮上鏡の製作とねじれ振り子を用いた基礎実験を行ってきた。浮上鏡は mg 程度以下かつ曲率つきという条件があり、このような鏡の製作は容易ではない。そこでねじれ振り子の端に鏡をつけることで微小な力を感じうる系を作り、この鏡を用いて Fabry-Perot 共振器を作ることで光学浮上に向けた技術開発を行ってきた。本年度は、基礎実験を超えて実際にねじれ振り子を用いてサンドイッチ構成の安定性の検証を行うべく、装置を設計し直して組み上げた。その上で装置の特性評価を行い、要求値を満たす仕様であることを確認した [11, 28]。今後はこの装置を用いてサンドイッチ構成の検証を行い、光学浮上鏡の実現を目指していく。

光リング共振器を用いた光速の等方性検証

アインシュタインの特殊相対性理論の登場から、Lorentz 不変性は宇宙の基本的な対称性であると考えられてきた。しかし、重力と他の相互作用を統一的に理解しようとする理論的研究から、あるエネルギースケールでは Lorentz 不変性が破れている可能

性が示唆されている。そのため、よりよい精度での Lorentz 不変性の破れ探査が世界中で行われている。

Lorentz 不変性の検証実験の中で、古くから行われている種類に光速の異方性探査実験がある。特に、直交する方向で往復する光速の差を測る、Michelson-Morley 型の実験が数多く行われてきた。しかし、このタイプの実験では光速の行き帰りの差、つまり片道光速の異方性を測定することができない。そこで我々はこの片道光速の異方性に着目し、その探査実験を行っている。

光速の行きと帰りの差は、非対称な光リング共振器を用いて測定することができる。非対称性は光リング共振器の中にシリコンを入れ、光路の一部の屈折率を変えることで導入している。この非対称性により、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し、異方性の null 測定が可能となる。また、この測定を光リング共振器を回転させながら行うことで、異方性信号の変調を行う。

我々はこれまでに 1 年間に渡る異方性探査を行い、そのデータ解析を行うことで片道光速の異方性に世界最高精度となる 10^{-15} レベルの上限値をつけた。拡張標準理論と呼ばれる検証理論の枠組みでデータ解析を行い、光子における高次の Lorentz 不変性の破れを表すカモフラージュ係数のうち、奇パリティ成分へ世界最高精度の、または世界初の上限値をつけた。

今年度はさらなる高い精度での検証を目指した装置改良を進めた。これまでの感度は装置の回転に伴う振動によって制限されていたため、振動感度の低いセミモノリシック光学系 (図 6.7.2) を製作した。また、これまでは信号取得や電源供給のためのワイヤがねじれてしまうことを防ぐため、回転と逆回転を交互に繰り返していたが、今後は連続回転を行うことで周波数分解能を上げて雑音レベルを下げることを考えている。そのため連続回転しながら電源を供給するためのスリップリングを導入するとともに、回転する装置からデータを無線で取得するためのシステムを開発した。

新しい装置での雑音レベルは今のところ、前のものよりも高くなってしまっている。散乱光雑音ではないかと考えているが、現在その原因究明中である。また、スリップリング経由での電源供給由来と思われる、回転に同期した雑音が見つかった。これは Lorentz 不変性の破れ信号と区別がつかないため、対策が必要である。今後は電源供給の見直しなどを進めていく。

<受賞>

- [1] 道村唯太: 第 10 回日本物理学会若手奨励賞 (宇宙線・宇宙物理領域), 日本物理学会, 2015 年 10 月 16 日.
- [2] Nobuyuki Matsumoto: Classical Pendulum Feels Quantum Back-Action, Springer Theses Prize (2015).
- [3] 佐藤遼太郎: 東京大学 理学部学修奨励賞 (2015 年度). (原著論文)

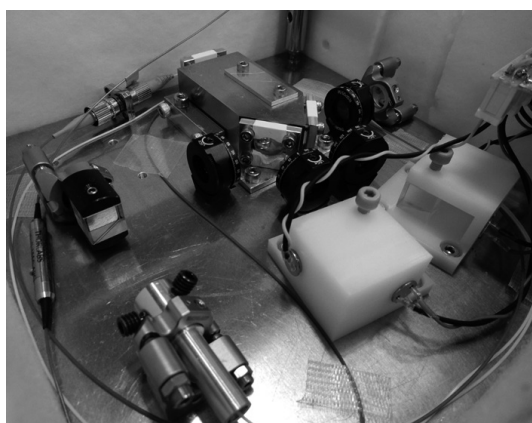


図 6.7.2: セミモノリシック光学系

[4] Kazunari Eda, Ayaka Shoda, Yuya Kuwahara, Yousuke Itoh and Masaki Ando: All-sky coherent search for continuous gravitational waves in 6-7 Hz band with a torsion-bar antenna, Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 011F01.

[5] N. Matsumoto, K. Komori, Y. Michimura, G. Hayase, Y. Aso, K. Tsubono: 5-mg suspended mirror driven by measurement-induced backaction, Phys. Rev. A, 92, 033825 (2015).

[6] K. Okutomi, T. Akutsu, M. Ando, et al.: Residual Gas Noise in the Test-mass Module for DECIGO Pathfinder Journal of Physics Conference Series 610 (2015) 012040.

(国内雑誌)

[7] S. ドワイヤー, 安東正樹 (訳): 量子雑音のスケーリング, パリティ (丸善出版) 2015 年 8 月号.

(学位論文)

[8] 牛場崇文: Laser Frequency Stabilization with a Cryogenic Optical Cavity, 博士論文 (2016 年 3 月).

[9] 道村唯太: Tests of Lorentz Invariance with an Optical Ring Cavity, 博士論文 (2015 年 6 月).

[10] 小森健太郎: 巨視的振動子の遠隔光冷却, 修士論文 (2016 年 3 月).

[11] 桑原祐也: 巨視的量子現象の観測に向けた光輻射圧による鏡の支持方法の開発, 修士論文 (2016 年 3 月).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

[12] Naoki Aritomi: Monolithic Optics and Coil-Coil Actuator, Low Frequency Gravitational Wave Antenna Workshop (March 3rd, 2016, Canberra, Australia).

[13] T. Shimoda, M. Ando: Design of New TOBA - Vibration Isolation Systems, Low Frequency Gravitational Wave Antenna Workshop (March 3rd, 2016, Canberra, Australia).

[14] M. Ando: Torsion Bar Antenna Experiments, Low-Frequency Gravitational Wave Antenna Workshop (March 2nd 2016, ANU, Canberra, Australia).

[15] M. Ando: bKAGRA Schedule, KAGRA Face-to-Face Meeting (Feb. 22, 2016, Kashiwa, Tokyo).

[16] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: Initial Alignment Procedure for iKAGRA, 13th KAGRA Face to Face Meeting (Feb 2016, Kashiwa).

[17] M. Ando: Possibility of contribution to ESA L3 from Japan, ESA L3 GOAT#5 (September 17th, 2015, Noordijk, NL).

[18] M. Ando: Preliminary bKAGRA Plan, KAGRA Face-to-Face Collaboration Meeting (August 29th, 2015, Toyama).

[19] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: KAGRA MIF Status Report, 12th KAGRA Face to Face Meeting (Aug 2015, Toyama).

[20] Tomofumi Shimoda: Shift Work Report, 12th KAGRA Face to Face Meeting (Aug 2015, Toyama).

[21] Yuta Michimura, Jake Guscott, Matthew Mewes, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando: Higher Order Test of Lorentz Invariance with an Optical Ring Cavity, Fourteenth Marcel Grossmann Meeting (July 2015, Rome).

[22] Y. Kuwahara, A. Shoda, K. Eda, and M. Ando: Search for stochastic gravitational wave background at 1-3 Hz with Torsion-bar Antenna, GWPAW2015 (June 17-20, 2015, Osaka, Japan).

[23] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: KAGRA Lock Acquisition Overview, GWADW 2015 (May 2015, Alaska).

招待講演

[24] M. Ando: The GW Research in Japan - Current Status of KAGRA -, ELiTES 4th General Meeting (December 3rd 2015, Delegation of the European Union to Japan, Tokyo).

[25] M. Ando: Space Gravitational-Wave Antenna: DECIGO and Pre-DECIGO, GWPAW2015 (June 19th, 2015, INTEX-Osaka, Osaka).

[26] M. Ando, A. Shoda, K. Yamamoto, Y. Aso, R. Takahashi: Lessons learned and the next steps of Torsion-Bar Antenna experiments, GWADW2015 (May 19th, 2015, Alaska, USA).

(国内会議)

一般講演

[27] 小森健太郎, 松本伸之, 道村唯太, 安東正樹: 光学トラップによる懸架鏡の遠隔冷却および熱的デコヒーレンスの低減, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学).

- [28] 桑原祐也, 道村唯太, 牛場崇文, 安東正樹: 光輻射圧による鏡支持方法の開発, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学).
- [29] 道村唯太, 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 中野雅之, 苔山圭以子, 廣瀬榮一, 山元一広, 辰巳大輔, 阿久津智忠, 安東正樹, 齊藤高大, 加川智大, 我妻一博, 和泉究, 新井宏二, 山本博章: 重力波望遠鏡 KAGRA における主干涉計制御, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月, 東北学院大学).
- [30] 牛場崇文, 大前宣昭, 香取秀俊: 低温シリコン光共振器を用いたレーザー周波数安定化, 日本物理学会 第 71 回年次大会 (2016 年 3 月, 東北学院大学).
- [31] 下田智文, 有富尚紀, 桑原祐也, 道村唯太, 正田亜八香, 麻生洋一, 高橋竜太郎, 山元一広, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA の開発 (1), 日本物理学会 第 71 回年次大会 (2016 年 3 月, 東北学院大学).
- [32] 有富尚紀, 下田智文, 桑原祐也, 道村唯太, 正田亜八香, 麻生洋一, 高橋竜太郎, 山元一広, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA の開発 (2), 日本物理学会 第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学).
- [33] 安東正樹, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (68): DECIGO 計画の概要, 日本物理学会 第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学, 仙台).
- [34] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 Pre-DECIGO, JGWC 総会 (2016 年 3 月 10 日, 大阪市立大学).
- [35] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 Pre-DECIGO, CRC 将来計画タウンミーティング (2016 年 2 月 11 日, 東京大学 宇宙線研究所).
- [36] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO と Pre-DECIGO, 第 16 回 宇宙科学シンポジウム (2016 年 1 月 7 日, 宇宙科学研究所).
- [37] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO / Pre-DECIGO, CRC 将来計画タウンミーティング (2015 年 12 月 21 日, 東京大学柏キャンパス).
- [38] 安東 正樹: DECIGO 戦略と取りまく状況, DECIGO Workshop (2015 年 10 月 18 日, 京都大学).
- [39] 有富尚紀: Pre-DECIGO の加速度雑音の評価 (1), DECIGO ワークショップ (2015 年 10 月 18 日, 京都大学).
- [40] 下田智文, 有富尚紀, 奥富弘基: PreDECIGO システム検討 PreDECIGO の加速度雑音の評価 (2), DECIGO ワークショップ (2015 年 10 月, 京都大学).
- [41] 安東 正樹: DECIGO 戦略と取りまく状況, DECIGO ワークショップ (2015 年 10 月 18 日, 京都大学).
- [42] 牛場崇文, 大前宣昭, 香取秀俊: 高安定光共振器開発に向けた低温環境下での温度安定化, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月, 大阪市立大学, 大阪).
- [43] 道村唯太, 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 中野雅之, 山元一広, 辰巳大輔, 阿久津智忠, 安東正樹, 齊藤高大, 加川智大, 我妻一博, 和泉究, 新井宏二, 山本博章, KAGRA Collaboration: 重力波望遠鏡 KAGRA の主干涉計制御設計 II, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月, 大阪市立大学).
- [44] 安東 正樹, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (64): DECIGO 計画の概要, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月 28 日, 大阪市立大学).
- [45] 小森健太郎, 松本伸之, 道村唯太, 安東正樹: 光ばねを用いた懸架鏡の遠隔冷却, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月 28 日, 大阪市立大学).
- [46] 桑原祐也, 松本伸之, 牛場崇文, 井上翼, 荻田基志, 小森健太郎, 道村唯太, 安東正樹: カーボンナノチューブ線を用いた低損失振り子の開発, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月 28 日, 大阪市立大学).
- 招待講演
- [47] 道村唯太: 光リング共振器を用いたローレンツ不変性の検証, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月, 東北学院大学).
- [48] 安東正樹: 重力波が切り拓く新たな天文学, NHK 視点・論点 (2016 年 2 月 22 日).
- [49] 安東 正樹: 重力波で見る宇宙 - 重力波の観測 -, 東京大学 駒場祭公開講座 (2015 年 11 月 21 日, 東京大学 駒場キャンパス).
- [50] 安東 正樹: アインシュタインの宿題 — 重力波 —, 一般相対性理論誕生 100 年記念市民講演会 (2015 年 10 月 03 日, 弘前大学).
- [51] 安東 正樹: アインシュタインの相対論と重力波天文学, 高校生のための夏休み講座 2015 (2015 年 8 月 18 日, 東京大学).
- [52] 安東 正樹: 重力波望遠鏡でさぐる宇宙の姿, 物理学教室オープンラボ (2015 年 5 月 29 日, 小柴ホール, 東京大学).
- (セミナー)
- [53] M. Ando: KAGRA and Pre-DECIGO, ANU CGP Group Seminar (March 1st 2016, Australian National University, Canberra).
- [54] Yuta Michimura: Testing Lorentz Invariance with an Optical Ring Cavity, Department of Physics Lunch Talk (Nov 2015, Tokyo).

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、バイオイメーキングや遺伝子操作を用いて軸索やシナプスを可視化することにより、神経の配線が形成される仕組みを明らかにしてきた。現在、この研究を回路レベルに発展させ、複数の神経配線からなる機能的な神経回路が、どのようにして構築され、機能するのかを調べる研究を進めている。特に、近年急速に発達した光技術と遺伝子工学とを組み合わせた手法を用いて、神経細胞の活動を可視化・操作する実験を行なっている。また、このような実験に理論的考察を加えることにより、神経回路の動作原理を探る研究も開始した。配線パターンの分かっているモデル神経回路において、個々の神経細胞の活動をリアルタイムに追跡することにより、神経回路の情報処理の仕組みを明らかにすることが私達の夢である。

7.1.1 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、光遺伝学（オプトジェネティクス）の発展により、神経細胞の活動を光照射によって局所的・一過的に制御できるようになった。我々はこれらの技術をショウジョウバエ幼虫の中枢神経系に適用することによって、神経回路の動的特性の解明を目指している。

局所的神経刺激と神経活動可視化の同時適用による運動神経細胞の機能解析（松永光幸、高坂洋史、能瀬聡直）

これまで、歩行や遊泳などの運動パターン・リズムを生起する神経回路は、主に介在神経細胞（INs: Interneurons）によって構成され、その最終出力が運動神経細胞（MNs: Motoneurons）に伝えられるという描像が主流であった。しかし、近年、ヒルやゼブラフィッシュなどでMNsは効果器へ出力するだけでなく、同時に中枢へシナプス入力を与えることが積極的に運動パターン・リズムを制御することが示唆されていた。同様にショウジョウバエ幼虫でもMNsは中枢内でシナプス入力を与えること、さらにそのシナプス入力は運動の伝播ダイナミクスに影響を与えることが示唆されてきたが、その仕組みは明らかとなっていなかった。そこで本研究では、MNsがどのように運動回路に作用し運動を制御するのかを解明することを目的とした。このため、光遺伝学によりMNsの活動を局所的に操作しながら、Ca²⁺イメージング法によりMNsの中枢内活動伝播ダイナミクスを可視化することを可能にする実験系を構築し、MNsの局所的な活動操作が波の生成を制御する仕組みを探った。ショウジョウバエ幼虫は尾端から頭端へかけて連続的に筋収縮を伝播させるぜん動運動により前進する。この運動は、腹部神経節内において尾側から頭側へかけて各神経分節内のMNsの活動が連続的に伝播することにより生成される。したがって、中枢神経単離下でも、Ca²⁺イメージング法により、腹部神経節内のMNsの連続的な活動の波を捉えることができる（“運動波”）。

我々はこれまでに、Ca²⁺イメージング法により運動波を観測しながら、オプトジェネティクスにより、局所的な光遺伝学的抑制を特定の神経根内のMNsに与え、その結果、中央部の神経節のMNsを局所的に活動抑制すると、運動波の頻度が劇的に減少することを見いだしていた。これらの結果からMNsの局所的な活動操作が、運動波の生成頻度に影響を与えることを明らかとしていた。

平成27年度は、上記過程に関わる分子機構の解明を進めた。電気シナプスの構成要素であるshakBの変異体において、MNsの局所的な活動抑制を行った結果、正常体において運動波の頻度を大きく減少させた中央部の神経分節MNsの局所的な活動抑制が、shakB変異体では効果を与えなかった。このことから、MNsの活動操作による波の生成頻度変化は電気シナプスを介していることが示唆された。

以上の知見は運動回路の作動機構の理解において重要な貢献を果たすものである。

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（尹永扱、高坂洋史、能瀬聡直）

4Dカルシウムイメージング手法を用い、ショウジョウバエ幼虫の腹部神経節を構成する神経回路のダイナミクスを調べた。3次元空間に分布している

神経細胞からのカルシウムシグナルを測定するため、共焦点顕微鏡の焦点面を圧電素子を用いて上下させながら撮影を行った。

この方法で取得したデータには数千個の神経細胞の活動が含まれており、それらの活動を読み取るにはすべての細胞の位置を特定しなければならない。原理的には手作業できるはずであるが、細胞の数が多くなると困難な作業になってくる。また、再現性やバイアスのなど問題から、細胞の位置を計算機で特定することにした。サンプルにはカルシウムレポーター以外に核局在性の蛍光蛋白質を発現させておいて、その蛍光データを用いて細胞の位置を検出するようにした。具体的には low-pass filter をかけたのち、watershed 手法と類似した計算を行った。あと、最後に segmentation の結果を細胞各の形状が球であるという仮定のものに、細胞の領域を球として表した。細胞が自動抽出できた結果、短時間で再現性がとれる前処理をすることが可能になった。

もう一つの問題点は細胞体の数が多いため、個体間の比較や統計処理が困難である点があげられる。それを克服するためにまた計算機を使った自動対応付けを試みた。具体的には、基準となる「標準腹部神経節」を作成し、すべてのサンプルをその座標空間上で解析することを実装しようとした。サンプルの中からテンプレートとなる個体の一つを選び、それに対してレジストレーションを行ったのちワープさせて平均化をすることで標準腹部神経節を作った。

出来上がった標準腹部神経節上で、細胞自動検出から得られた活動シグナルを解析することができるようになり、多数のサンプルからのデータを統計的に扱うことが可能になった。今回はすべての神経細胞の活動をいくつかのグループに分類しようとした。その過程で様々な活動パターンを示す細胞が見つかったが、特に、回路全体として運動パターンを出力していないときに活動する細胞を見つけることができた。比較的少数の細胞からなるこのグループは運動神経細胞の活動とはほぼ逆相関の関係にあり、すべてのサンプルで見られていた。

本研究は京都大学情報研究科の石井信教授、中江健博士との共同研究である。

ショウジョウバエを用いた、胚期の神経回路の協同的活動の発達機構の研究 (川崎達平、能瀬聡直)

我々の中枢神経系 (以下 CNS) は、複数の神経細胞による機能的な神経回路が多数集まることによって階層的に構成されている。神経回路の発達機構を調べることはすなわち、脳の神経ネットワークの設計図を調べることであり、神経回路の動作機構の解明に繋がるのが期待できる。

今年度、我々は胚発生後期のショウジョウバエ胚において、CNS を単離して Ca²⁺イメージングを行い、筋肉、運動神経回路、GABA 作動性神経回路、コリン作動性神経回路、そして神経回路全体における、詳細な活動パターンの発達の様子を観察し、胚発生における器官の発達段階を基準にして比較した。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、始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している部分を広げていき、VNC 全体としての波状の活動に統合されていく様子を観察できた。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様子を観察できた。

また、運動神経回路の発達に関わっていると考えられるいくつかの神経伝達物質やシナプスに関わるタンパク質において、それらの変異体における運動神経回路の活動の発達を観察した。その結果、電気シナプスを構成するタンパク質である innexin の変異体や innexin の RNAi、GAP 結合のブロッカーを用いた個体の単離した CNS (感覚入力がない状態) において、胚期から孵化直後の運動神経回路の活動に異常が見られた。この結果から、胚期の運動神経回路活動の発達に電気シナプスを介した神経活動が関わっている可能性が示唆された。

今後は、観察条件を整えるなどにより詳細な神経活動の時間発展を明らかにする予定である。また、様々な GAP 結合を分子的に操作することで、電気シナプスの運動神経回路発達における役割について探るつもりである。

7.1.2 運動神経回路を構成する神経細胞の同定

神経ネットワーク内の個々の介在神経細胞が互いに神経活動を介して相互作用することで回路全体として統合された時空間的活動パターンが生成される。しかし、介在神経細胞に関する知見は、運動神経細胞や感覚神経細胞に比して著しく少ない。我々は、回路内で生起するこの神経活動の集団現象を構成的に理解するために、遺伝学的手法、及びコネクトミクスを効果的に用いることで、運動パターン生成に関与する介在神経細胞群の同定を進めている。

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、高鳥達也、能瀬聡直)

運動神経細胞の活動のリズムとパターンの形成の理解には、まず運動神経細胞に直接シナプスを形成している神経細胞群を同定することが重要である。本研究では特に運動神経細胞を直接興奮させるような介在神経細胞の機能解明を目指している。これまでに、CLI1/2 (cholinergic lateral neuron 1 and 2) という、運動神経細胞を直接活性化させていると考えられる介在神経細胞を二種類同定していた。CLI1/2 は各体節に存在しており、ぜん動運動時に尾端から頭端にかけて連続した波状の活動を示す。光遺伝学的手法を用いて局所的に CLI1/2 の活動を亢進させた結果、CLI1/2 は同じ体節または一つ前の体節の筋肉の収縮を局所的に制御していることがわかった。

CLI1 と CLI2 は同じ細胞系譜由来であるため、基本的にはよく似た性質を持っているが、異なる性質も有していた。例えば、CLI1 と CLI2 の入力領域と出力領域は異なっており、違う神経細胞群に対して入出力を行っていると考えられる。CLI1/2 は異なる運動神経細胞の活動を協調的に活性化させることでぜん動運動を制御していると考えられる。

CLI1/2 以外の興奮性神経細胞の候補を得るために、米国 Janelia Research Campus 研究所の Dr. Albert Cardona らが所有している幼虫中枢神経系の電子顕微鏡写真データを用いた。これにより、運動神経細胞の一種である RP5 の上流ニューロンの候補をいくつか得ていた。これらの中には、ほぼ全ての体節に突起を伸ばしている投射ニューロン数種類も含まれていたため、今回、これらの投射ニューロンで発現していると考えられる Gal4 系統 5 種類を用いて機能解析を行った。光遺伝学を用いてこれらのニューロンを強制的に活動亢進した結果、全身収縮など運動神経細胞に興奮性の入力を行っていると考えられる結果が得られた。現在、これらの投射ニューロンが実際に運動神経細胞とシナプスを形成しているのかどうか検討中である。本研究は Janelia Research Campus 研究所 Dr. Albert Cardona 及び Dr. James Truman との共同研究である。

前進ぜん動運動トリガーニューロンの探索 (宮本道人、二木佐和子、高木優、松永光幸、高坂洋史、能瀬聡直)

ショウジョウバエ幼虫の前進ぜん動運動を引き起こすニューロンの同定を目標とした研究を行った。まず、前進をトリガーするニューロンを含む Gal4 系統の探索を行った。Gal4-UAS システムを用いて、少数のニューロンにおいて光感受性陽イオンチャネル Channelrhodopsin2 (ChR2) を発現させ、幼虫の自由行動中に、490nm 付近の波長の光照射によって ChR2 発現ニューロン群の一過的な活動亢進を行った (幼虫の皮は半透明であり、中枢神経系まで光が透過する)。これを複数の Gal4 系統に対し行い、前進ぜん動運動が誘発される Gal4 系統を 3 系統発見した (野生型の幼虫は当該波長の光を忌避するため、光照射は逃避行動により前進の回数は減少する)。

次に、Gal80 タンパク質での Gal4 発現一部抑制による、前進トリガーニューロン候補の絞り込みを行った。上述した 3 系統に対し、一部の Gal4 細胞の発現を抑制する Gal80 タンパク質を Gal4-UAS システムに組み合わせ、前進をトリガーするニューロンの候補を絞り込んだ。ここでは、うち 1 系統の詳細を記述する。この Gal4 発現細胞群では、脳と SEG とごく一部の尾端側体節の感覚ニューロン群のみの活動亢進によって前進ぜん動運動が引き起こされる現象が観察された。なお、この前進ぜん動運動は、活動亢進の直後に尾端が激しく反応してから始まるもので、ぜん動運動の生成頻度も通常よりも高いことから、逃避行動の一種である Escape Crawling であると推察される。

更にこの Gal4 細胞群に ChR2 を発現させた幼虫を解剖し、尾側の体壁のみに局限して光を照射することで、体壁に発現している感覚ニューロンのみを選択的に活動亢進した。その結果、尾端のニューロンの活動亢進のみでも前進ぜん動運動に対応した波が生成される現象を観察した。また、モザイク解析により、この Gal4 細胞群の一部のみに ChR2 を発現させた個体の行動実験を行った。その結果、感覚ニューロンのみで発現がある個体において、前進の表現型が観察された。これにより、尾側 A4-A7 体節に存在する感覚ニューロンの一種が、前進ぜん動運動 (特に Escape Crawling) をトリガーしている可能性が示唆された。

現在、その他の Gal4 系統でも、前進のトリガーとなるニューロン候補の絞り込みを進めている。今後これらの Gal4 発現細胞間の入出力関係を調べ、前進ぜん動運動生成の回路メカニズムを明らかにする予定である。

モザイク解析を用いたショウジョウバエ幼虫の後退運動を惹起する神経細胞の同定 (平本篤紀、二木佐和子、宮本道人、能瀬聡直)

全ての生物は、取り巻く環境に対応して適宜最適な行動を選択することで生存を可能としている。本研究では、どの様なニューロンによってこれらの行動が選択されているか、つまりどの様なニューロンが動物の定型的な行動を惹起するか、ということに注目している。具体的には、ショウジョウバエの幼虫において、定型的な運動として後退蠕動運動があるが、この行動を惹起するニューロンの同定を目的としている。まず我々は、カルシウムイメージングによるスクリーニングを行い、中枢神経内で後退蠕動運動に対応する神経活動と同時に活動するニューロンを発見した。我々はこのニューロンを B5 ニューロンと名付け、これを含む GAL4 細胞群を持つ GAL4 系統 NIK68S の個体に対して、カルシウムイメージングとチャンネルロドプシンを用いた活動亢進を同時に行った。結果、このニューロンが後退蠕動運動を惹起することが示唆された。そこで我々はこの系統の個体に対して mosaic analysis for repressible cell marker (MARCM) という手法を用いて、チャンネルロドプシンの 1 種である CsChrimson をこのニューロンにのみ発現させた個体を作成し、活動亢進実験を試みた。結果として、このニューロンを含む細胞群に CsChrimson が発現した個体で後退蠕動運動が引き起こされることが分かった。さらに我々は優位に後退蠕動運動が引き起こされた個体の中で CsChrimson の発現が 10-15 個の細胞にとどまる個体を選び、細胞の形態を用いて、どの様なニューロンが含まれているかを調べることにした。いくつかの形態の分がらいつらニューロンが見つかったので、multi-color flip out (MCFO) という手法を用いて、この GAL4 細胞群に含まれるニューロンの形態を調べた。結果として、B5 ニューロンのみが共通して CsChrimson が発現した細胞群に含まれていることが分かり、B5 ニューロンが後退蠕動運動を惹起することを示すこ

とに成功した。

ショウジョウバエ幼虫における刺激特異的な後退逃避反応を媒介する神経回路 (高木 優、二木 佐和子、宮本 道人、能瀬 聡直)

あらゆる動物は、外部環境の変化を感じ、適切な運動によって反応する生存戦略を有する。本研究では、ショウジョウバエ幼虫をモデルとして、外部からの刺激に反応して特定の運動が惹起される神経回路機構の解明を推進した。

ショウジョウバエ幼虫の逃避行動のひとつに、後退運動がある。この運動は、頭部に侵害的な刺激を受けた幼虫が示す定型的な運動の一種であり、安全な環境下で見るとは稀である。我々は本年度、このような後退運動を司令する介在神経細胞 (AM neuron) を同定した。すなわち、この AM neuron をオプोजェネティクスによって活動亢進したとき、幼虫は後退運動を示す。逆に、AM neuron を温度遺伝学的手法によって活動抑制をしたとき、幼虫が侵害刺激に対応して後退運動を行う頻度が有意に減少する。これらの結果から、AM neuron は後退運動の惹起に必要な十分な介在神経細胞 (コマンドニューロンと呼ばれる) の一種であることが示唆された。

次に、AM neuron がどのような神経細胞からシナプス入力を受けているかを調べるため、我々は連続電子顕微鏡画像を用いたショウジョウバエ幼虫の中枢神経系のコネクトーム解析を行った。その結果、AM neuron は侵害刺激を受容する MD class IV 感覚神経細胞からシナプス入力を受けていることが分かった。幼虫は体節構造をしており、この感覚神経細胞は各体節にそれぞれ存在する。興味深いことに、AM neuron は、頭部の体節に存在する MD class IV 感覚神経細胞からのみシナプス入力を受けていることがわかった。

幼虫が侵害刺激を受容したときの反応には、後退、加速、回転など複数のレパートリが存在する。その中で、頭部に侵害刺激を受けた幼虫は、後退によって対応することが合理的であると考えられる。本研究の結果から、AM neuron は頭部に受けた侵害刺激に反応して、後退運動を確実に惹起する役割を担うことが示唆された。今後は、AM neuron が MD class IV 感覚神経細胞の活動亢進に対して興奮的反応を示すかを、電気生理学的手法とカルシウムイメージング法を組み合わせることによって評価する予定である。本研究は、米国ハワードヒューズ医学研究所ジャーナリサーチキャンパスの Albert Cardona 博士および同 Richard Fetter 博士との共同研究である。

神経伝達物質受容体遺伝子の発現細胞による行動の切り替え機構の解析 (朴正ヒョク、尹永扱、高坂洋史、能瀬聡直)

神経細胞は電気的な信号と化学的な信号で情報伝達を行う。神経伝達物質は神経間の情報伝達において

化学的な信号となる物質である。シナプス前細胞から放出された神経伝達物質はシナプス後細胞にある特定の受容体に結合して情報伝達を行う。しかし、神経伝達物質は局所的に微量で働くため、その役割を調べることは困難であった。また、その受容体がある細胞の分布についても詳しくは知られていない。本研究ではその分布と役割を調べるために CRISPR/Cas9 を用いた遺伝子 Knock-in 法を用いた。神経伝達物質としてドーパミン、セロトニン、チラミン、オクトパミンに着目し、その受容体の遺伝子に GAL4 を導入したハエを作成した。さらに、作られた受容体 GAL4 系統に UAS 系統を掛け合わせる実験を行った。UAS 系統で mCD8GFP を発現させると受容体を持つ細胞の分布を、Halorhodopsin (機能喪失) と CsChrimson (機能獲得) を発現させることでその細胞の役割を調べた。スクリーニングの結果、セロトニン受容体を持つ細胞の集団が行動の切り替えに関係があることが分かった。今後はセロトニン受容体を持つ細胞の中、行動の切り替えにもっと重要である細胞を同定する予定である。

本研究は、国立遺伝学研究所の近藤周博士と、東北大学の谷本拓博士との共同研究である。

<報文>

(原著論文)

- [1] Itakura Y, Kohsaka H, Ohyama T, Zlatić M, Pulver SR, Nose A.: Identification of Inhibitory Premotor Interneurons Activated at a Late Phase in a Motor Cycle during *Drosophila* Larval Locomotion. *PLoS One* (2015) 10(9): e136660
- [2] Fushiki A, Zwart MF, Kohsaka H, Fetter RD, Cardona A, Nose A.: A circuit mechanism for the propagation of waves of muscle contraction in *Drosophila*. *eLife* (2016) 5. pii: e13253
- [3] Thoma V, Knapek S, Arai S, Hartl M, Kohsaka H, Siririvatanawong P, Abe A, Hashimoto K, Tanimoto H. Functional dissociation in sweet taste receptor neurons between and within taste organs of *Drosophila*. *Nature Communications* (2016) 7:10678

(学位論文)

- [4] 松永光幸: Local motoneuronal activity regulates the frequency of larval fictive locomotion in a segment-specific manner. (博士論文、新領域創成科学研究科)
- [5] 高木 優: Study of neural circuits underlying motor decision making by connectomic and functional analyses. (コネクトミクスと機能解析を用いた運動選択回路に関する研究) (修士論文)
- [6] 李康秀: ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動における多体節ダイナミクスの定量解析 (修士論文、新領域創成科学研究科)
- [7] 圓尾仁志: ショウジョウバエ神経回路における運動速度制御を担う受容体遺伝子の同定 (修士論文、新領域創成科学研究科)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [8] Hiroshi Kohsaka, Maarten F. Zwart, Richard Fetter, Albert Cardona, James W. Truman, Akinao Nose.: Local feedback is important for the regulation of intersegmental activity propagation during *Drosophila* larval locomotion. Cold Spring Harbor laboratory, Meetings-Neurobiology of *Drosophila*, 2015.9.29-10.3, Cold Spring Harbor Lab, U.S.A.
- [9] Teruyuki Matsunaga, Hiroshi Kohsaka, Akinao Nose.: Local Motoneuronal activity regulates the frequency of fictive larval locomotion in a segment-specific manner. Cold Spring Harbor laboratory, Meetings-Neurobiology of *Drosophila*, 2015.9.29-10.3, Cold Spring Harbor Lab, U.S.A.
- [10] Youngtaek Yoon, Ken Nakae, Hiroshi Kohsaka, Shin Ishii, Akinao Nose.: Statistical analysis of the activity of whole central neurons in a standard nerve cord of *Drosophila* larvae. Cooperation in Physics Workshop: LMU-UT, 2016.2.29-3.1, 東京
- [11] Suguru Takagi, Sawako Niki, Dohjin Miyamoto, Hiroshi Kohsaka, Richard D. Fetter, Albert Cardona, Akinao Nose.: Dissecting neural circuits regulating behavioural switching in *Drosophila* larvae by connectomic and functional analyses. Cooperation in Physics Workshop: LMU-UT, 2016.2.29-3.1, 東京

招待講演

- [12] 高坂洋史, Optogenetic dissection of *Drosophila* larval locomotion.: Developmental Neurobiology Course 2015, 沖縄科学技術大学院大学 Okinawa Institute of Science and Technology 2015.7.25, Okinawa
- [13] Nose, A. :Neuronal dynamics underlying motor decision making, Cooperation in Physics Workshop: LMU-UT , 2016.2.29-3.1, 東京

(国内会議)

一般講演

- [14] Tappei Kawasaki, Sawako Niki, Yuki Itakura, Akinao Nose.: Development of patterned activity in the motor circuits of *Drosophila* embryos. (ショウジョウバエ胚の神経回路における協調的活動の発達の研究), 第 48 回日本発生生物学会, 2015.6.3-5, 筑波
- [15] Hiroshi Kohsaka, Richard Fetter, Albert Cardona, Akinao Nose.: Connectivity-based analysis of locomotion circuits in *Drosophila* larvae (シナプス結合情報に基づいたショウジョウバエ幼虫の運動制御回路の解析), 第 38 回日本神経科学大会, 2015.7.28-31, 神戸
- [16] Dohjin Miyamoto, Sawako Niki, Suguru Takagi, Teruyuki Matsunaga, Hiroshi Kohsaka, Akinao Nose.: Regulation of the direction of *Drosophila*

larval locomotion: a study using activity manipulation of interneurons and simultaneous recording of motor pattern, 第 38 回日本神経科学大会, 2015.7.28-31, 神戸

- [17] Suguru Takagi, Sawako Niki, Dohjin Miyamoto, Hiroshi Kohsaka, Richard D. Fetter, Albert Cardona, Akinao Nose.: Dissecting neural circuits regulating behavioural switching by connectomic and functional analyses. 第 38 回日本神経科学大会, 2015.7.28-31, 神戸
- [18] Hasegawa, E., Truman, J.W., Nose, A.: Search for cholinergic interneurons that regulate larval locomotion in *Drosophila*. 第 7 回光操作研究会国際シンポジウム「神経回路と神経修飾」, 2015.12.4-5, 東京
- [19] Suguru Takagi, Sawako Niki, Dohjin Miyamoto, Hiroshi Kohsaka, Richard D. Fetter, Albert Cardona, Akinao Nose.: Dissecting neural circuits regulating behavioural switching in *Drosophila* larvae by connectomic and functional analyses. 第 7 回光操作研究会国際シンポジウム「神経回路と神経修飾」, 2015.12.4-5, 東京
- [20] 李康秀, 能瀬聡直, 高坂洋史: ショウジョウバエ幼虫の運動パターンダイナミクスに環境温度が与える効果の定量解析, 第 38 回日本分子生物学会年会, 2015.12.1-4, 神戸
- [21] Tappei Kawasaki, Sawako Niki, Hiroshi Kohsaka, Akinao Nose.: ショウジョウバエ運動回路の発生過程における協調的な神経活動の出現: ギャップ結合の役割, 第 38 回日本分子生物学会年会, 2015.12.1-4, 神戸

(講義等)

- [22] 高坂洋史, Optogenetic.: Lab course in Developmental Neurobiology Course 2015, 沖縄科学技術大学院大学 Okinawa Institute of Science and Technology 2015.7.25, Okinawa
- [23] 能瀬聡直, Functional dissection of the central circuits that regulate *Drosophila* larval locomotion.: OIST Collaborative International Undergraduate Workshop "Decoding the Brain", 沖縄科学技術大学院大学 Okinawa Institute of Science and Technology 2015.8.2-6, Okinawa
- [24] 能瀬聡直, 学習院大学大学院集中講義「統合生命科学特論 III」, 2015.9.7-8

7.2 樋口 研究室

生物は、分子、細胞、動物個体といった構造や機能の階層性を持っている。個体や細胞の機能も基をただせば、分子の機能であるわけであるが、生体分子の多さや複雑さゆえに、分子機能から個体や細胞機能を直接導くことは困難であるのが現状である。我々研究室では、この溝を埋め分子の機能を詳しく理解するために、1 分子計測法を用いて研究を行った。また、細胞と分子との関係を結ぶために、分子の機能があらわになるような輸送機能や細胞運動機

能を研究した。個体機能は、分子と結ぶことが困難であるが、これを可能にすべく、マウス個体内の細胞や分子の観測を行った。

7.2.1 分子研究

ミオシン多分子の運動特性の測定と計算機シミュレーション

筋収縮を担う骨格筋ミオシン分子の力発生において、分子間力発生の協同性メカニズムを検証するため、17分子程度がアクチン1本と相互作用するミオシンフィラメントを人工的に重合させ、これらの分子が発する力を光ピンセットを用いて計測した。その結果、ステップ上に変化するアクチンの滑り運動が観測され、この結果からミオシン数分子が同調して力を発生していることがわかった。さらにシミュレーションモデルの結果から、こうしたミオシン分子間力発生を同調させる重要な要因として以下の3つが判明した。1) ミオシン頭部のストレインに依存する化学反応変化、2) パワーストロークと呼ばれるミオシン頭部の構造変化が複数段階に分かれていること、3) 生理学的な条件に近い高濃度ATP。以上のように、骨格筋ミオシンの特性はミオシンが複合体を形成して力発生する上でより協同的になるようにデザインされ、またこうした機能発現により高効率な筋収縮が実現すると考えられる。

キネシンネックリンカー移動距離の測定

キネシンの運動特性については1分子計測技術や蛍光観察技術の発展と共に、精力的に研究がおこなわれてきたが、ATP加水分解エネルギーを力学的な仕事に変換し、一方向性を生み出すメカニズムについては解っていない。これまでの研究により、キネシンの運動にはネックリンカー(～3nm)と呼ばれるペプチド鎖が引き起こす構造変化が極めて重要とされている。そこでまず、～1nm、～10msの分解能で変位計測することができる光ピンセット装置を組み立てた。この装置にロックインアンプを組み込み、キネシンと微小管が相互作用したことを検出し自動的に負荷をかけることができるようにすることで、実験効率が大きく向上した。次に、この装置を用いてネックリンカーが構造変化するときの変位の大きさを測定した。その結果、構造変化の大きさは5.1nmとなり、この値は結晶構造から予測されるサイズとよく一致する。一方、構造変化の遷移速度を統計的に処理することで平衡定数を求め、その負荷依存性から2状態間の自由エネルギー差を求めると、0.9kTという値が得られた。また、この自由エネルギー差は3pN程度で0となり、さらに負荷を大きくすると負の値となる。この結果から、驚いたことに2状態間の自由エネルギー差は、キネシンが行うことが出来る最大仕事(14kT)に対して非常に小さいということが明らかとなった。

7.2.2 細胞研究

心筋細胞の振動運動の解析とモデル計算

心筋細胞内には、長さ約2 μ m、太さ1 μ mの筋節構造があり、これは収縮の構造単位である。筋節の収縮時には、約10nmのモーター分子が構造変化を行い変位や力発生をおこなっている。心筋のエネルギー効率率は、50%にも達し、しかも一生の間休まず動き続ける耐久性を備えている。ネズミ(Rat)心筋細胞内の収縮系単位である筋節の長さ変化を測定するために、筋節の仕切りに蛍光ナノ物質であるGFP(緑色蛍光タンパク質)を発現させ、蛍光顕微鏡観察を行った。心筋細胞の温度を37 $^{\circ}$ Cから～40 $^{\circ}$ Cに上昇したところ、驚いたことに、筋節が高速に振動することを発見した。これまでの計測では、画像取得レート(33frames/sec)が、振動周波数8Hzに近かったため、波形の詳細が明らかではなかった。そこで、画像取得レート500frames/sにあげ、かつ筋節長の位置精度も5nm(25frame/secなら1nm)となるように装置を改良した。この装置を用いて振動波形の詳細を調べたところ、振動の振幅は大きく変化(約6倍)したにもかかわらず、振動数は、8Hzと一定に保たれた。振動の最小振幅は約30nm(最大振幅200nm)しかなく、モーター分子のサイズに近いことから分子の挙動を反映していると考察できる。このように、振動数一定、振幅の顕著な変化、最小半筋節での振幅30nmがどのような分子動態によって生み出されているのか明らかにするために、モーター分子の化学力学反応シミュレーションを行った。振動の起源は、モーター分子(ミオシン)の可逆的構造変化に起因するとの結論が得られた。分子数の時間変化と振幅の幅が打ち消しあうために、振動数が一定となることも明らかとなった。これらの結果により、nmスケールの分子振動と μ mスケールの筋節振動を関係づけることが初めてできた。筋節振動は、心臓の拍動の起源であり、今回得られた分子振動を心臓の拍動と結びつけることが可能となった。

がん幹細胞の選択的除去の試み

近年、がん細胞の中でもがん幹細胞は抗がん剤耐性や放射線耐性を示すため、抗がん剤治療が十分にがんを撲滅できない主要な要因となっている。我々は、脳の悪性腫瘍からライン化された細胞(Brain tumorstem cells, BTSCs)の紫外線に対する耐性を調べた。がん幹細胞と幹細胞ではない腫瘍細胞U87に紫外線(280nm)10分照射した後に、幹細胞に結合した量子ドット-EGFRの細胞膜上の運動を追跡した。その結果、がん幹細胞のEGFRの膜上の運動は、照射前とほとんど変化しなかった。それに対して、幹細胞ではないU87では、膜上の運動は大きく阻害された(遅くなった)。これらのことから、がん幹細胞が、紫外線に対する耐性があることが明らかとなった。がん幹細胞耐性について調べるもう一つの方法として、赤色(700nm)の蛍光を発するとともに、活性酸素を発生する蛍光色素IR700を利用した。このIR700にがん幹細胞特有の細胞膜タンパク質(CD133)に

対する抗体を結合した。この IR700 と抗体との複合体をがん幹細胞と反応をさせた後、赤色 (645nm) で照射を行った結果、5 分程度の照射によって、がん幹細胞がネクローシスを起こすことがあきらかとなった (図 1)。この方法を用いれば、選択的にターゲットとする細胞を死滅させることができると期待される。この IR700 の照射によって、小胞運動が遅くなることを指標として、細胞の活性化を定量的に評価できる新しい方法を開発した。これは、細胞の位相差像を撮影し、約 500nm×500nm の面積内の強度ゆらぎの時系列を独自のプログラムにより解析を行った。その結果、接着がん細胞においては、揺らぎが時間とともに減少したのに対して、がん幹細胞においては、むしろ揺らぎが大きくなった。この揺らぎ減少は、モータータンパク質の不活性化によると思われる。一方、揺らぎが大きくなったのは、細胞がブレブリングを起こしたことで、細胞内の自由空間がどうかしたためであると考えた。

培養細胞内小胞の運動測定

研究計画では、細胞内の分子や小器官を高精度で計測する装置を作り、それらの測定を行う計画であった。研究では細胞内小胞の位置を高位置高時間分解での測定するために、GFP-PAR1 を高発現した細胞内小胞がどのような運動をしているのか突き止めるために、位相差法と蛍光顕微鏡法で小胞の位置を同時に測定した。GFP-PAR1 は細胞膜タンパク質であるが、多くの PAR1 は細胞内に輸送されている。細胞内小胞の多くは、early endosome であることを突き止めたのち、運動を調べた結果、直線的な運動とのろい運動の組み合わせ運動が多数みられて、現在精度を上げて測定中である。また、ウイルス表面に発現している Tat peptide が多分子化することで、細胞内に単分子の時に比べて約 100 倍も素早くマクロピノサイトーシスすることが明らかになった。したがって、細胞内に入れたい分子や粒子表面に多分子化された TatPeptide を結合すれば、細胞内に素早く入ることができると期待される。

7.2.3 個体研究

非侵襲がん細胞の観察

がん組織・細胞の非侵襲 in vivo イメージングにおいて、従来の研究では、1 枚の画像を取得するために、数秒を要していたが、この速度では、速い反応を追うことが困難である。我々は、ニポウ板式の共焦点顕微鏡を利用することで、GFP を発現した乳がん細胞である MDA-MB-231 細胞を高時間分解能で観察することするために装置の改良を行った。レーザーが長時間がん組織に照射しないようにシャッターをとりつけ、また、励起強度を素早くあげる工夫を行った。また、励起光で照射する面積をこれまでの半分適度に減らし、励起強度を上げた。これらの工夫によって、皮膚の表面から 100 マイクロメートル

の深さにある単一細胞を 0.1 秒の露光時間で動画撮影が可能となった。

<報文>

(原著論文)

- [1] Kohsuke Gonda, Minoru Miyashita, Hideo Higuchi, Hiroshi Tada, Tomonobu M. Watanabe, Mika Watanabe, Takanori Ishida, Noriaki Ohuchi, "Predictive diagnosis of the risk of breast cancer recurrence after surgery by single-particle quantum dot imaging", *Scientific Reports* **5**, 14322 (2015).
- [2] Chikako Shingyoji, Izumi Nakano, Yuichi Inoue and Hideo Higuchi, "Dynein arms are strain-sensitive direction-switching force generators", *Cytoskeleton* **72**, 388-401 (2015).
- [3] Naoaki Bekki, Seine A. Shintani, Shin'ichi Ishiwata and Hiroshi Kanai, "A Model for Measured Traveling Waves at End-Diastole in Human Heart Wall by Ultrasonic Imaging Method", *J. Phys. Soc. Jpn.* **85**, 044802-1-6 (2016).
- [4] Naoaki Bekki and Seine A. Shintani, "Simple Dispersion Equation Based on Lamb-Wave Model for Propagating Pulsive Waves in Human Heart Wall", *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 124802-1-6 (2015).

(著書)

- [5] 樋口 秀男 「普遍生物学」生物物理学会誌 巻頭言 55, 285. (2015.12)
- [6] 樋口 秀男 「石渡牧場」早稲田応用物理会物理会報 27 (2016.3)
- [7] 新谷正嶺、戸次直明、福田紀男、石渡信一、樋口秀男「心筋細胞に備わった昇温誘起の高速サルコメア振動」国士館大学紀要 情報科学 第 37 号 (2015.12)
- [8] 戸次直明、新谷正嶺「レイリー・ラム方程式の心室中隔壁への応用」国士館大学紀要 情報科学 第 37 号 (2016.3)
- [9] 新谷正嶺、戸次直明、樋口秀男、福田紀男、石渡信一「心筋細胞に備わった温度依存の高速自励振動特性」統計数理研究所共同研究リポート「動的生体情報の現状と展望」 21 27page. (2016.3)
- [10] 木下慶美「Opinion-研究の現場から ~研究交流から共同研究への実現に向けた挑戦~」, 羊土社『実験医学』 34 (3) (2016.2)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [11] Hideo Higuchi Noninvasive in-vivo imaging of neutrophil and tumor cells in mouse auricles. *PacificChem Hawaii USA* (2016.12.14-20)
- [12] Hideo Higuchi 「Toward Medical Biophysics」3rd international nanomedicine symposium. *Univ Tokyo* 11/25-26, 2015

- [13] Motoshi Kaya. Molecular mechanism of efficient muscle contraction revealed by single molecule approach. 5th Asian and Pacific-Rim Symposium on Biophotonics (Pacifco Yokohama) 4/23, 2015a
- 一般講演
- [14] Motoshi Kaya, Yoshiaki Tani, Takumi Washi, Toshiaki Hisada and Hideo Higuchi. Mechanism of Cooperative Force Generations between Skeletal Myosins. The 60th Annual Meeting of the Biophysical Society (Los Angeles CA, USA) 3/2, 2016
- [15] Sayaka Kita and Hideo Higuchi : Novel mouse xenograft model for in vivo imaging in a nanomedicine field, The international chemical congress of Pacific Basin Societies 2015, (Honolulu, Hawaii, USA.) 12/15-20, 2015.
- (国内会議)
- 招待講演
- [16] Hideo Higuchi: Motility of motor proteins, myosin, kinesin and dynein. Cooperation in Physics Workshop: LMU-UT Univ Tokyo (2016.2.29-3.1)
- [17] 樋口 秀男 「モータータンパク質運動の統合的理解」 第2回理工バイオの集い 早大 東京 (2016.3.12)
- [18] 樋口 秀男 「忍野・追分セミナーがもたらしたものの」藤目セミナー 軽井沢 (2015.8.8)
- [19] 木下慶美「謎の多い分子モーター”ダイニン”の1分子測定」, 『第55回生物物理若手の会 夏の学校』若手セッション, 滋賀県高島市 (2015.8.21-24)
- [20] 新谷正嶺、戸次直明、福田紀男、石渡信一、樋口秀男「心筋細胞に備わった昇温誘起の高速サルコメア振動」第7回森和英記念計算科学研究会 (東京) (2015.12.19)
- [21] 茅 元司, 鷲尾巧, 久田俊明, 樋口秀男 効率的な筋収縮を実現するミオシン分子間の協同的な分子メカニズム. 日本生理学会シンポジウム (札幌コンベンションセンター) (2016.3.24)
- [22] 茅 元司 効率的な骨格筋収縮を担うミオシン分子の仕組みを紐解く. 日本体育学会 バイオメカニクス領域キーノートレクチャー (国士舘大学) (2015.8.25)
- [23] 茅 元司 1分子計測から見えてきた筋収縮の効率的な仕組み, 理研シンポジウム「細胞システムの動態と論理」(国立研究開発法人理化学研究所) (2015.4.3)
- 一般講演
- [24] Hideo Saitou, Seine Shintani, Sayaka Kita and Hideo Higuchi (2015) Activation of motility of macrophage at temperature jump. The 53th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Kanazawa, Japan (2015.9.13-15)
- [25] 木下慶美, 神原丈敏, 西川香里, 茅元司, 樋口秀男 「ダイニンのパワーstroke距離の測定」, 『生体運動合同班会議』, 88, 京都, (2016.1.8-10)
- [26] Yuichi Kondo, Hideo Higuchi Measurement of transition between docking and undocking of kinesin neck linkers. The 53th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Sapporo, Japan (2015.9.13-15).
- [27] Seohyun Lee, Motoshi Kaya, Kohsuke Gonda, Hideo Higuchi 「Three dimensional trafficking of membrane protein PAR-1 labelled with quantum dot carried by endocytotic vesicles」 ナノ学会 (May 11-13, 2015) 東北大学
- [28] Seohyun Lee, Motoshi Kaya, Kohsuke Gonda, Hideo Higuchi 「3 dimensional tracking of endocytotic PAR-1 carriers」 生物物理学会 (2015.9.13-15) 金沢大学
- [29] 佐伯喜美子, 茅元司, 樋口秀男: 物理学実験における蛍光スペクトル測定, 日本物理学会 2015年秋季大会 関西大学千里山キャンパス (2015.9.16-19)
- [30] 佐伯喜美子, 茅元司, 樋口秀男: 学生実験における蛍光タンパク質のスペクトル測定, 日本物理学会 第71回年次大会 東北学院大学 (2016.3.19-22)
- [31] 新谷正嶺、戸次直明、樋口秀男、福田紀男、石渡信一「心筋細胞に備わった温度依存の高速自励振動特性」平成27年度統計数理研究所共同研究集会「動的生体情報の現状と展望」(東京) 2015.9.10.
- [32] Seine A. Shintani, Hideo Higuchi, Norio Fukuda, Shin'ichi Ishiwata “Hyperthermal Sarcomeric Oscillations in cardiac muscle” The 53rd Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan (Kyoto) (2015.9.14)
- [33] 新谷正嶺, 鷲尾巧, 樋口秀男「心筋細胞内サルコメアの高速振動の観察と分子シミュレーション」生体運動研究合同班会議 2016 (京都) (2016.1.9)
- [34] 戸次直明, 新谷正嶺「レイリー・ラム方程式の心室中隔壁への応用」第7回森和英記念計算科学研究会 (東京) (2015.12.19)
- [35] Motoshi Kaya, Yoshiaki Tani, Takumi Washi, Toshiaki Hisada and Hideo Higuchi. Mechanism of cooperative force generation between skeletal myosins. The 53th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan (Kanazawa University, Japan) (2015.9.14)
- [36] Motoshi Kaya, Yoshiaki Tani, Takumi Washi, Toshiaki Hisada and Hideo Higuchi. Mechanism of cooperative force generation between skeletal myosins. The 53th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan (Kanazawa University, Japan) (2015.9.14)
- [37] Morito Sakuma, Sayaka Kita, Hideo Higuchi (2015) Molecular dynamics of brain tumor stem cell induced by specific cell damage. The 53th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Kanazawa, Japan (2015.9.13-15).
- [38] Sayaka Kita and Hideo Higuchi : Novel mouse xenograft model for noninvasive in vivo imaging of human tumor cell and tissue in the auricle, BIO UT, 東京都文京区 (東京大学), 6/26-27, 2015

- [39] Sayaka Kita and Hideo Higuchi: Noninvasive in vivo imaging of tumor cells in mouse auricles. In vivo イメージングフォーラム 2015 住商ファーマインターナショナル株式会社, 東京都品川区 (コクヨホール) (2015.9.17-18)
- [40] Sayaka Kita and Hideo Higuchi : Noninvasive in vivo imaging of human cancer cell and mouse macrophage in the auricle of mouse, 日本解剖学会, 福島県郡山市 (ビックパレットふくしま), (2016.3.28-30)

<アウトリーチ>

- [41] 樋口秀男 講義「傷を治す白血球と分子の活躍」 沼津西高校 1, 2 年生 (東大) (2015.10.19)
- [42] 喜多清 出前講義 「最先端 がん細胞のナノイメージングと生き物の誕生～研究の仕事～」 茨城県つくばみらい市市立小絹小学校 5 年生 (2015.7.9)

8 技術部門

(佐伯、八幡、柏葉、南野、大塚、南城*、阿部*)

* 技術補佐員

技術部門では、実験装置試作室業務、安全衛生業務、IT 関連業務、学生実験、学生実習、研究支援などの業務を行っている。技術部門の担当教員(福山教授、長谷川教授、吉田教授、岡本准教授)とで月に1度の物理技術室ミーティングを行った。また、試作室担当の地惑専攻教員のゲラー教授、化学専攻教員の塩谷教授も加え試作室ミーティングを3回行った。

8.1 実験装置試作室

(大塚、南城、阿部)

8.1.1 利用状況

2015年4月から2016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(322件)
- 設計及び部品等の問い合わせ(外注を含む)
- 外注発注(141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、地球惑星科学専攻、吉川研、日屋根研、小暮研、清水研、鈴木研、化学専攻 長谷川研、山内研、岩崎研、鍵研、佃研、合田研、近松研、地殻化学実験施設、超高速強光子場科学研究センター)

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、9月7日~9月18日まで下記の内容で工作講習会を行った。

- 参加人員:14名(物理14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

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わる業務を行った。
- 理学系防災連絡会のメンバーとして、コアとなる防災WGに参加した。

8.2.2 IT 関連業務

(南野)

- 専攻業務
ウェブサイトと大学院入試システムの改修を行った。
- 理学系研究科業務
ネットワークインフラの管理および研究科全体の脆弱性スキャンを行った。
ノーベル物理学賞受賞記者会見の中継を行った。
- ヘルプデスク業務

8.2.3 学生実験

- 物理学実験I、II(佐伯)
グループ編成、スケジュールリング
- 物理学実験I
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。(八幡)
3年生夏学期の物理学実験Iの「真空技術」を技術指導した。(佐伯)
- 物理学実験II
3年生冬学期の物理学実験IIの「生物物理学」を指導した。(佐伯)
3年生冬学期の物理学実験IIの「パルス技術」を指導した。(八幡)

8.2.4 研究支援

(八幡)

2013 年度から行っている、大学院生向けの Field Programmable Gate Array (FPGA) 講習会 (3 日間) を実施した。

- 全参加人数 21 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 各種委員会

- 日本物理学会 領域運営委員 (領域 13 物理教育 2014 年～2015 年) (八幡)
- 日本物理学会 代議員 (71～72 期) (八幡)
- 全学高圧ガスワーキンググループ (八幡)
- 総合技術本部 技術職員研修企画委員会 (佐伯)
- 全学技術発表会実行委員会 (佐伯)
- 寒剤管理連絡担当者 (八幡)
- 理学系研究科・理学部 技術委員会 (佐伯)
- 理学系研究科・理学部 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 技術部ウェブサイト改訂ワーキンググループ (南野、佐伯)

<受賞>

- [1] 小原和、小坂規、下見淳一郎、本城剛毅、丸山美紀、南野真容子、森木京子、佐々木太一：2015 年度東京大学業務改革総長賞「人事異動における業務フロー見直しへの取り組み ～着任当日から教員に研究教育活動を始めていただくために、実践していること～」。

<報文>

(原著論文)

- [2] 技術部報告集 2015 (東京大学大学院理学系研究科理学部技術部、2016 年 2 月)。

<学術講演>

(国内会議)

一般講演

- [3] 八幡和志：新世代 FPGA 教材開発とアクティブ・ラーニング、平成 27 年度山形大学 機器・分析技術研究会 (山形大学、2015 年 9 月)。
- [4] 八幡和志：新世代 FPGA を用いたデジタル回路教材開発、日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大学、2015 年 9 月)。
- [5] 佐伯喜美子、茅元司、樋口秀男：物理学実験における蛍光スペクトル測定、日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大学、2015 年 9 月)。
- [6] 佐伯喜美子：放射分光照度計を用いた蛍光スペクトル測定、第 27 回生物学技術研究会 (岡崎コンファレンスセンター、2016 年 2 月)。
- [7] 八幡和志：新世代 FPGA を用いたデジタル回路教材、カリキュラムの更新、平成 27 年度 実験・実習技術研究会 in 西京 (山口大学、2016 年 3 月)。
- [8] 八幡和志：FPGA 教材カリキュラムの開発と学生実験、技術講習会、第 1 回 東京大学技術発表会 (東京大学、2016 年 3 月)。
- [9] 八幡和志、笹尾愛、阿部美玲、土屋光：ヘリウムガス回収における純度管理のネットワーク化、第 1 回 東京大学技術発表会 (東京大学、2016 年 3 月)。
- [10] 南野真容子：理学系研究科情報システムチームでの e ラーニング業務、第 1 回 東京大学技術発表会 (東京大学、2016 年 3 月)。
- [11] 佐伯喜美子、八幡和志：物理学生実験における技術職員の業務、第 1 回 東京大学技術発表会 (東京大学、2016 年 3 月)。
- [12] 黒岩真弓、栄慎也、福田裕子、佐伯喜美子、半澤明範、渡辺綾子、中嶋佑奈、菅沼諭：本学学生実験関連技術交流会の紹介、第 1 回 東京大学技術発表会 (東京大学、2016 年 3 月)。
- [13] 八幡和志：新世代 FPGA を用いたデジタル回路教材開発 (II)、日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大学、2016 年 3 月)。
- [14] 佐伯喜美子、茅元司、樋口秀男：学生実験における蛍光タンパク質のスペクトル測定、日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大学、2016 年 3 月)。

招待講演

- [15] 八幡和志：東京大学の技術職員研修について、第 1 回 東京大学技術発表会 シンポジウム (東京大学、2016 年 3 月)。

II

Summary of group activities in 2015

1 Theoretical Nuclear Physics Group

Subjects: Structure and reactions of unstable nuclei, Monte Carlo Shell Model, Shell Evolution, Mean Field Calculations, Quantum Chaos, Curved spacetime, QCD phase diagram, Lattice simulation

Member: Takaharu Otsuka, Kenji Fukushima, Takashi Abe and Arata Yamamoto

In the nuclear theory group, a wide variety of subjects are studied. The subjects are divided into two major categories: Nuclear Structure Physics and Theoretical Hadron Physics.

Nuclear Structure Physics

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[8]. 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 new magic number 34 in an exotic nucleus ^{54}Ca was confirmed experimentally for the first time in 2013 and was reported in Nature.

The structure of such unstable nuclei has been calculated by Monte Carlo Shell Model, for instance to Ni isotopes. Their applications have been made in collaborations with experimentalists internationally spread, e.g., [3, 5]. Collaborations with many groups produce various interesting results.

The Monte Carlo Shell Model has been improved with further developments, and we have carried out a number of calculations on the K computer[2, 5, 8].

We are studying on dilute neutron systems[7], time-dependent phenomena like fusion and multi-nucleon transfer reactions in heavy-ion collisions[1], double-beta-decay nuclear matrix element[4], and nuclear level density [6].

- [1] K. Tsukiyama, T. Otsuka and R. Fujimoto: “Low-lying continuum states of drip-line oxygen isotopes”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2015**, 093D01 (2015).
- [2] C. J. Chiara, D. Weisshaar, R. V. F. Janssens, Y. Tsunoda, T. Otsuka, et al., ”Identification of deformed intruder states in semi-magic ^{70}Ni ”, *Phys. Rev. C* **91**, 044309 (2015).
- [3] D. Steppenbeck, S. Takeuchi, N. Aoi, P. Doornenbal, M. Matsushita, H. Wang, Y. Utsuno, H. Baba, S. Go, J. Lee, K. Matsui, S. Michimasa, T. Motobayashi, D. Nishimura, T. Otsuka, H. Sakurai, Y. Shiga, N. Shimizu, P. -A. Soderstrom, T. Sumikama, R. Taniuchi, J.J.Valiente-Dobon, K. Yoneda: “Low-Lying Structure of ^{50}Ar and the N=32 Subshell Closure ”, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 252501 (2015).
- [4] Y. Iwata, N. Shimizu, T. Otsuka, Y. Utsuno, J. Menendez, M. Honma, and T. Abe: “Large-scale shell-model analysis of the neutrinoless $\beta\beta$ decay of ^{48}Ca ”, *Phys. Rev. Lett.* **116** 112502 (2016).
- [5] Y. Shiga, K. Yoneda, D. Steppenbeck, N. Aoi, P. Doornenbal, M. Matsushita, S. Takeuchi, H. Wang, H. Baba, P. Bednarczyk, Zs. Dombradi, Zs. Fulop, S. Go, T. Hashimoto, M. Honma, E. Ideguchi, K. Ieki, K. Kobayashi, Y. Kondo, R. Minakata, T. Motobayashi, D. Nishimura, T. Otsuka, H. Otsu, H. Sakurai, N. Shimizu, D. Sohler, Y. Sun, A. Tamii, R. Tanaka, Z. Tian, Y. Tsunoda, Zs. Vajta, T. Yamamoto, X. Yang, Z. Yang, Y. Ye, R. Yokoyama, and J. Zenihiro: “Investigating nuclear structure in the vicinity of ^{78}Ni : Low-lying excited states in the neutron-rich isotopes $^{80,82}\text{Zn}$ ”, *Phys. Rev. C* **93** 024320 (2016).

- [6] N. Shimizu, Y. Utsuno, Y. Futamura, T. Sakurai, T. Mizusaki and T. Otsuka: “Stochastic estimation of nuclear level density in the nuclear shell model: An application to parity-dependent level density in ^{58}Ni ”, *Phys. Lett. B* **753** 13 (2016).
- [7] T. Suzuki, T. Otsuka, C. Yuan, and N. Alfari, “Two-neutron “ halo ” from the low-energy limit of neutron-neutron interaction: Applications to drip-line nuclei ^{22}C and ^{24}O ”, *Phys. Lett. B* **753** 199 (2016).
- [8] T. Otsuka, and Y. Tsunoda: “The role of shell evolution in shape coexistence”, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **43** 024009 (2016).

Theoretical Hadron Physics

In Theoretical Hadron Physics group (K. Fukushima and A. Yamamoto), many-body problems of quarks and gluons are studied theoretically on the basis of the quantum chromodynamics (QCD). The subjects studied include quark-gluon plasma in relativistic heavy-ion collisions, particle production mechanism, lattice gauge simulations, matter under extreme conditions, neutron stars, etc.

Highlights in research activities of this year are listed below:

1. New formulation of the complex Langevin method with Lefschetz thimble [4]
 2. Nonrelativistic Banks-Casher relation [6]
 3. Effects of rotation in field theories
 4. Anomaly-induced phenomena in rotating electric fields [9]
- [1] A. Flachi, K. Fukushima, and V. Vitagliano, “Geometrically induced magnetic catalysis and critical dimensions”, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 181601 (2015).
 - [2] S. Benic, I. Mishustin, C. Sasaki, “Effective model for the QCD phase transitions at finite baryon density ”, *Phys. Rev. D***91**, 125034 (2015).
 - [3] K. Fukushima, “Simulating net particle production and chiral magnetic current in a CP-odd domain”, *Phys. Rev. D***92**, 54009 (2015).
 - [4] K. Fukushima, Y. Tanizaki, “Hamilton dynamics for Lefschetz-thimble integration akin to the complex Langevin method”, *PTEP* 111A01 (2015).
 - [5] T. Hayata, A. Yamamoto, “Complex Langevin simulation of quantum vortices in a Bose-Einstein condensate”, *Phys. Rev. A***92**, 043628 (2015).
 - [6] T. Kanazawa, A. Yamamoto, “Nonrelativistic Banks-Casher relation and random matrix theory for multi-component fermionic superfluids”, *Phys. Rev. D***93**, 016010 (2016).
 - [7] K. Fukushima, T. Kojo, “The Quarkyonic Star”, *Astrophys. J.* **817**, 180 (2016).
 - [8] D. E. Alvarez-Castillo, A. Ayriyan, S. Benic, D. Blaschke, H. Grigorian, S. Typel, “New class of hybrid EoS and Bayesian M-R data analysis”, *Eur. Phys. J. A***52**, 69 (2016).
 - [9] S. Ebihara, K. Fukushima, T. Oka, “Chiral pumping effect by rotating electric fields”, *Phys. Rev. B***93**, 155107 (2016).
 - [10] K. Fukushima, K. Hattori, H.-U. Yee, Y. Yi, “Heavy quark diffusion in strong magnetic fields at weak coupling and implication to elliptic flow”, *Phys. Rev. D***93**, 074028 (2016).

2 Theoretical Particle and High Energy Physics Group

Research Subjects: The Unification of Elementary Particles & Fundamental Interactions

Member: Takeo Moroi, Koichi Hamaguchi, Yutaka Matsuo, Yuji Tachikawa

The main research interests at our group are in string theory, quantum field theory and unification theories. String theory, supersymmetric field theories, and conformal field theories are analyzed relating to the fundamental problems of interactions. In the field of high energy phenomenology, supersymmetric unified theories are extensively studied and cosmological problems are also investigated.

We list the main subjects of our researches below.

1. High Energy Phenomenology
 - 1.1. Higgs phenomenology [1]
 - 1.2. Vacuum decay [2]
 - 1.3. Phenomenology of supersymmetric model [3, 4]
 - 1.4. LHC phenomenology [5, 6, 7, 8]
 - 1.5. Physics of e^+e^- linear collider [9]
 - 1.6. Cosmic-ray anti-protons from dark matter [10]
 - 1.7. Cosmological constraint on dark matter annihilation [11, 12]
 - 1.8. Diquark Bethe-Salpeter equation [13]
 - 1.9. Heavy quarkonium [14, 15]
 - 1.10. Gravitational particle production [16, 17, 18]
 - 1.11. Cosmology of Higgs field [19, 20]
 - 1.12. Pseudo-scaling scalar dynamics [21]
 - 1.13. Inflation models [22, 23]
2. Superstring Theory and Formal Aspects of Quantum Field Theories
 - 2.1. Aspects of supersymmetric field theories [24, 25]
 - 2.2. Compactification of $6d$ SCFTs [26, 27]
 - 2.3. $5d$ $\mathcal{N} = 2$ SuperYang-Mills Theory [28]
 - 2.4. Instanton partition functions [29]
 - 2.5. Conformal field theory and integrable lattice model [30]
 - 2.6. Study of the representation theory of SH^c algebra [31]
 - 2.7. String theory in Ambitwistor space and scattering amplitudes [32]
 - 2.8. Holography and entanglement entropy [33]
 - 2.9. Entanglement entropy in quantum field theories [34, 35]

References

- [1] M. Endo, T. Moroi and M. M. Nojiri, *JHEP* **1504**, 176 (2015) [arXiv:1502.03959 [hep-ph]].
- [2] M. Endo, T. Moroi, M. M. Nojiri and Y. Shoji, *JHEP* **1601**, 031 (2016) [arXiv:1511.04860 [hep-ph]].
- [3] K. Hamaguchi and K. Ishikawa, *Phys. Rev. D* **93**, no. 5, 055009 (2016) [arXiv:1510.05378 [hep-ph]].
- [4] K. J. Bae, H. Baer, H. Serce and Y. F. Zhang, *JCAP* **1601**, 012 (2016) [arXiv:1510.00724 [hep-ph]].
- [5] X. Lu, S. Shirai and T. Terada, *JHEP* **1509** (2015) 204 [arXiv:1506.07161 [hep-ph]].
- [6] S. P. Liew, A. Mariotti, K. Mawatari, K. Sakurai and M. Vereecken, *Phys. Lett. B* **750** (2015) 539 [arXiv:1506.08803 [hep-ph]].
- [7] S. P. Liew and S. Shirai, *JHEP* **1511** (2015) 191 [arXiv:1507.08273 [hep-ph]].
- [8] H. Ito, T. Moroi and Y. Takaesu, *Phys. Lett. B* **756** (2016) 147 [arXiv:1601.01144 [hep-ph]].
- [9] S. Kanemura, T. Moroi and T. Tanabe, *Phys. Lett. B* **751** (2015) 25 [arXiv:1507.02809 [hep-ph]].
- [10] K. Hamaguchi, T. Moroi and K. Nakayama, *Phys. Lett. B* **747**, 523 (2015) [arXiv:1504.05937 [hep-ph]].
- [11] M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi and Y. Takaesu, *Phys. Lett. B* **751** (2015) 246 [arXiv:1509.03665 [hep-ph]].
- [12] M. Kawasaki, K. Nakayama and T. Sekiguchi, *Phys. Lett. B* **756**, 212 (2016) [arXiv:1512.08015 [astro-ph.CO]].
- [13] G. Mishima, R. Jinno and T. Kitahara, *Phys. Rev. D* **91**, no. 7, 076011 (2015) [arXiv:1502.05415 [nucl-th]].
- [14] Y. Kiyo, G. Mishima and Y. Sumino, *JHEP* **1511**, 084 (2015) [arXiv:1506.06542 [hep-ph]].
- [15] Y. Kiyo, G. Mishima and Y. Sumino, *Phys. Lett. B* **752**, 122 (2016) [arXiv:1510.07072 [hep-ph]].

- [16] Y. Ema, R. Jinno, K. Mukaida and K. Nakayama, JCAP **1505**, no. 05, 038 (2015) [arXiv:1502.02475 [hep-ph]].
- [17] Y. Ema, R. Jinno, K. Mukaida and K. Nakayama, JCAP **1510**, no. 10, 049 (2015) [arXiv:1505.04670 [gr-qc]].
- [18] Y. Ema, R. Jinno, K. Mukaida and K. Nakayama, JCAP **1510**, no. 10, 020 (2015) [arXiv:1504.07119 [gr-qc]].
- [19] K. Nakayama and M. Takimoto, Phys. Lett. B **748**, 108 (2015) [arXiv:1505.02119 [hep-ph]].
- [20] R. Jinno, K. Nakayama and M. Takimoto, Phys. Rev. D **93**, no. 4, 045024 (2016) [arXiv:1510.02697 [hep-ph]].
- [21] Y. Ema, K. Nakayama and M. Takimoto, JCAP **1602**, no. 02, 067 (2016) [arXiv:1508.06547 [gr-qc]].
- [22] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B **757**, 32 (2016) [arXiv:1601.00192 [hep-ph]].
- [23] S. V. Ketov and T. Terada, Phys. Lett. B **752** (2016) 108 [arXiv:1509.00953 [hep-th]].
- [24] Y. Tachikawa and N. Watanabe, JHEP **1506** (2015) 186 [arXiv:1504.00121 [hep-th]].
- [25] Y. Tachikawa, PTEP **2015** (2015) no.11, 11B102 [arXiv:1504.01481 [hep-th]].
- [26] K. Ohmori, H. Shimizu, Y. Tachikawa and K. Yonekura, JHEP **1512**, 131 (2015) [arXiv:1508.00915 [hep-th]].
- [27] K. Ohmori and H. Shimizu, JHEP **1603**, 024 (2016) [arXiv:1509.03195 [hep-th]].
- [28] T. Kawano and N. Matsumiya, Nucl. Phys. B **898** (2015) 456 [arXiv:1505.06565 [hep-th]].
- [29] S. Nakamura, PTEP **2015**, no. 7, 073B02 (2015) [arXiv:1502.04188 [hep-th]].
- [30] R. D. Zhu and Y. Matsuo, PTEP **2015**, no. 9, 093A01 (2015) [arXiv:1504.04150 [hep-th]].
- [31] M. Fukuda, S. Nakamura, Y. Matsuo and R. D. Zhu, JHEP **1511**, 168 (2015) [arXiv:1509.01000 [hep-th]].
- [32] K. Ohmori, JHEP **1506**, 075 (2015) [arXiv:1504.02675 [hep-th]].
- [33] Y. Nakaguchi, N. Ogawa and T. Ugajin, JHEP **1507**, 080 (2015) [arXiv:1412.8600 [hep-th]].
- [34] S. Banerjee, Y. Nakaguchi and T. Nishioka, JHEP **1603**, 048 (2016) [arXiv:1508.00979 [hep-th]].
- [35] T. Nishioka and A. Yarom, JHEP **1603** (2016) 077 [arXiv:1509.04288 [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

Laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms Metastable antiprotonic helium atom ($\bar{p}\text{He}^+$) is three-body Rydberg atom, which consists of a helium nuclei surrounded by a ground state electron and an antiproton with large principal ($n \sim 38$) and orbital ($\ell \sim n + 1 \sim 38$) quantum numbers.

The antiproton-to-electron mass ratio ($M_{\bar{p}}/m_e$) can be derived by comparing the experimental atomic transition frequencies of antiprotonic helium atoms measured by high-precision laser spectroscopy, with three-body QED calculations by the group of V.I. Korobov, L. Hillico, and J.-P. Karr. The agreement of this value and proton-to-electron mass ratio with a precision of 1.3×10^{-9} is one of the verification of the CPT symmetry. In order to reduce systematic uncertainties caused by the particle masses and various QED and finite nuclear-size effects, it is important to measure many transitions precisely.

In 2015, non-linear two-photon transition of antiproton $(n, \ell) = (36, 34) \rightarrow (34, 32)$ was measured by using two-photon laser spectroscopy with gas buffer cooling. We will continue to study systematic uncertainties such as the AC Stark effect, power broadening effect, and collisional shift effect in 2016. The mass ratio will be determined with a precision of $< 3 \times 10^{-10}$.

The evolutions of the population of four $\bar{p}\text{He}^+$ states $(n, \ell) = (35, 33), (37, 35), (38, 35)$ and $(40, 36)$ were measured at low target pressure ($p \sim 1$ mb) and low temperature ($T \sim 1.5$ K) for the first time. The most lifetimes, except $(n, \ell) = (38, 35)$, does not change between two different target densities $\rho = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$

\bar{p} -nucleus annihilation cross section at low energies The antiproton is absorbed by the nucleus and annihilates with a surface nucleon. The cross sections, called annihilation cross sections, has been measured in order to study the interactions between them. In 2012, we performed an experiment with antiproton beam of 5.3 MeV/ c , and identify the signal of its annihilation for the first time in that region.

In 2015, we measured the cross section in a momentum region of 100 MeV/ c . In that region, annihilation cross sections of antineutron on some nucleus show unexpected enhancement, we can understand this behaviors by comparing to these data to the one of antiprotons. In this experiment, we measured the cross sections with carbon target.

Shapes of the antiproton beams were critical for this experiment, and they were tuned especially carefully. The timing of the kicker in the accelerator was optimized to make the pulse length shorter in time, and the pulse length became ~ 60 ns(in usual it is ~ 200 ns). The multiple extraction was performed to reduce the intensity of the beam not to saturate our detectors. Concerning the detector, we developed a Cherenkov counter monitoring intensities of the beams. For it we used lead fluoride crystals to maximize the number of Cherenkov photons, avalanche photodiodes to reduces background events caused by the nuclear counter effect and to guarantee the linearity.

The experiment was carried out for 2 weeks and obtained data successfully. We are now analyzing the data, and results will be summarized as a doctoral thesis.

2) Spectroscopy of pionic atoms using a proton beam

Restoration of chiral symmetry breaking at finite density has been one of the most important problems in recent hadron physics. We are studying this problem by performing spectroscopic experiments of pionic atoms of heavy nuclei such as Pb or Sn isotopes. It is known that the binding energy of deeply bound states such as 1s or 2s is related to the order parameter of chiral symmetry breaking at finite density. Experiments were performed in GSI and RIKEN using missing-mass spectroscopy of ($d, {}^3\text{He}$) reaction and the evidence of chiral symmetry restoration in nuclear medium was shown.

We are now planning a new experiment of pionic atom spectroscopy using ($p, {}^2\text{He}$) reaction in RCNP. In this experiment, the binding energy is determined by analyzing two protons, which are decay products of ${}^2\text{He}$, by Grand Raiden spectrometer. A strong proton beam is employed with a GRAF beamline, which was recently installed. We will try to achieve better resolution than existing experiments, by employing the high resolution spectrometer and the technique of dispersion matching that eliminates the momentum spread of the incident beam.

In the fiscal year of 2015, we performed a test experiment as a feasibility study. We confirmed that beam transportation to the new beam line was good enough to performed the experiment. In addition, we measured ${}^{12}\text{C}(p, {}^2\text{He}){}^{11}\text{B}$ reaction and could observe a peak of the ${}^{11}\text{B}$ grand state. This is the first case to observe ($p, {}^2\text{He}$) by the Grand Raiden spectrometer. We will analyze the properties of background of ($p, {}^2\text{He}$) reactions with this data.

4 Sakurai Group

Research Subjects: Nuclear structure and dynamics of exotic nuclei

Member: Hiroyoshi Sakurai and Megumi Niikura

Exotic nuclei located far from the stability are new objectives for nuclear many-body problems. Our group 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 mainly utilize fast radioactive isotope (RI) beams available at RI Beam Factory (RIBF) at RIKEN. RIBF is the 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 as well as to exploit new types of experiments and new methods of spectroscopy via new ideas and detector developments. Our research subjects to be covered are followings.

SEASTAR campaign

In May 2015 and May 2016, the SEASTAR experiments to systematically measure the excitation energy of extremely exotic nuclei were conducted at RIBF. The de-excitation γ -rays were detected by the NaI(Tl) scintillator array DALI2 after the proton-knockout-reactions with a 10-cm-thick liquid hydrogen target surrounded by the recoil proton tracking system MINOS. The obtained level structure of the neutron rich Cr and Fe isotopes revealed the enhanced deformation around that region. The analysis for the de-excitation γ -rays of ^{78}Ni has been performed and the discussion with theoretical calculations are on going.

Neutron configuration of ^{29}Ne ground state

The inclusive cross-section and parallel momentum distribution of single-neutron removal reaction have been measured at the nuclei supposed to be on the edge of an “island of inversion”; ^{29}Ne . A combined analysis of distinct nuclear- and Coulomb-dominated reaction with C and Pb targets, respectively, shows that this nuclei locates inside an “island of inversion” and exhibits a halo-like neutron spacial distribution.

Neutron single-particles states in ^{35}Mg populated by one-neutron knockout reaction

The in-beam γ -ray spectroscopy experiment of ^{35}Mg was performed at RIBF via an one-neutron knockout reaction to clarify the neutron single-particle configuration in ^{36}Mg . The γ -ray energy spectrum of ^{35}Mg , the exclusive one-neutron removal cross sections and the parallel momentum distribution were obtained. The level structure is discussed by comparison with several theoretical model calculations.

Exotic cluster structure in ^{16}C

We performed an invariant mass spectroscopy in order to search for α -cluster states in ^{16}C via α -inelastic scattering at 200 MeV/u. The excitation energies of ^{16}C are reconstructed from $^{16}\text{C}^* \rightarrow ^{12}\text{Be} + ^4\text{He} (+\gamma)$ and $^{16}\text{C}^* \rightarrow ^{10}\text{Be} + ^6\text{He}$ decay channels by measuring their four momenta with the SAMURAI spectrometer and γ -ray energy. Candidates of α -cluster states are found in the excitation energy spectrum.

BRIKEN project

We are planning to systematically measure a β -delayed neutron emission probability (P_n) at RIBF, named the BRIKEN project. The P_n value will be deduced by measuring implanted ions and β rays with Advanced Implantation Detector Array (AIDA) combined with 166 ^3He neutron detectors (BRIKEN array). The performance test of AIDA was carried out in 2015 and the BRIKEN array is now under construction at RIKEN. The measurement will be performed in fall 2016.

Development of neutron scintillator NiGIRI

We are developing neutron detector, NiGIRI (Neutron, ion and Gamma-ray Identification for Radioactive Isotope beam), to investigate equation of states of high-density matter. The detector consists of a organic scintillator aiming at identifying detected γ rays and neutrons using a pulse shape discrimination (PSD) technique. As a result of a PSD analysis, a 3σ separation between γ rays and neutron from a ^{252}Cf source was achieved.

NINJA detector at SAMURAI spectrometer

We are developing a proton detector, NINJA, in addition to the currently using SAMURAI standard detectors at RIBF. NINJA consists of plastic scintillator array using MPPC readout in order to operate inside of a high magnetic field in the SAMURAI dipole magnet. This detector was tested in November 2015 and succeeded to identify charged particles in the dipole magnet.

5 Wimmer Group

Research Subjects: Nuclear structure and reactions, shape coexistence in exotic nuclei

Member: Kathrin Wimmer

There are several experimental as well as theoretical indications that the structure of exotic nuclei differs significantly from what is known from well-studied stable nuclei. Our group performs spectroscopic studies

of neutron-rich nuclei using direct reactions. These kinds of reactions are an excellent tool to probe the single-particle properties of nuclei. Therefore information on the nuclear wave functions can be obtained. With this technique we investigate the phenomena of shape-coexistence and new magic numbers across the nuclear chart.

Triple shape coexistence at $N = 28$

One of the most interesting forms of shape coexistence is the occurrence of three different shapes within one nucleus. Such a behavior is expected for ^{44}S , where three low-lying 0^+ states of the nucleus, exhibit spherical, prolate (rugby-ball shaped) and oblate (disk shaped) deformation. Measurements of single-particle properties of these exotic nuclei give further insights in the wave function composition of states. In this FY we have performed an experiment on one-neutron knockout reaction from ^{44}S at the National Superconducting Cyclotron Laboratory (NSCL) to investigate the ground state wave function of this nuclei. From this experiment we can obtain the occupation of the $f_{7/2}$ and $p_{3/2}$ orbitals in the ground state of ^{44}S and thus a measure of the shape mixing in this interesting nucleus, which is supposed to have three different shapes at the same time.

Spectroscopy of the $T_z = -1$ nucleus ^{70}Kr

Extremely proton-rich nuclei provide an interesting test ground for isospin symmetry in nuclei. Isospin non-conserving interactions lead to different structures of nuclei which have proton and neutron number interchanged. So far such tests are limited to lighter nuclei. In an experiment at the RIBF at RIKEN ^{70}Kr was studied by nucleon removal reactions and Coulomb excitation.

Rapid shape changes at $N = 60$

The shape transition at $N = 60$ in the Sr, Zr, Mo region exhibits one of the most dramatic ground state shape transitions known today. In order to develop a better understanding of the underlying wave functions of the states, more information on the underlying single-particle structure is required. Previously, we performed two very successful experiments at TRIUMF (Canada) using the transfer reactions $^{94,95,96}\text{Sr}(d,p)$ to track the evolution of the single-particle energies and their occupation as $N = 60$ is approached. The next step is to investigate pair-transfer reactions using a radioactive tritium target.

Magicity at $N = 32$

$N = 32$ has recently been established as a new magic number, which does not show up in nuclei close to stability. We will probe the magicity of ^{52}Ca at neutron number 32 by two complementary techniques. We will quantify the collectivity for this doubly magic nucleus through Coulomb excitation. The single-particle orbital occupation in the ground state of ^{52}Ca will be obtained by measuring the one-neutron and proton removal reactions. The combination of two complementary measurements at RIBF will give new insights in the magicity of ^{52}Ca .

6 Komamiya group

Research Subjects: (1) Preparation for an accelerator and an experiment for the International linear e^+e^- collider ILC, including beam focus study at ATF2 of KEK using nano-meter beam size monitor (Shintake Monitor), research and development of electromagnetic calorimeter for the ILC Experiment; (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

Member: Sachio Komamiya, Yoshio Kamiya, Daniel Jeans

We, particle physicists, are entering an exciting period in which new paradigm of the field will be opened on the TeV energy scale triggered by the new discovery of a Higgs Boson at LHC. The details of the

observed Higgs Boson and other new particles will be studied in a cleaner environment of e^+e^- collisions at the International Linear Collider ILC.

1) Preparation for the International e^+e^- Linear Collider ILC: ILC is the energy frontier machine for e^+e^- collisions in the near future. In 2004 August the main linac technology was internationally agreed to use superconducting RF system. The Technical Design Report 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 Linear Collider Board (LCB), chaired by Sachio Komamiya is an oversight body of LCC. 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 measured about 40[nm] beam size which is a world record. Also we have been studying possible physics scenario and the large detector concept (ILD) for an experiment at ILC. Since 2012 autumn, a new staff scientist from UK who is an expert on the silicon electromagnetic calorimeter was joined our group. Since then hardware and simulation studies of silicon-tungsten sandwich electromagnetic calorimeters have been extensively performed. He is also working on precise tau-lepton reconstruction at ILC to investigate, for example, CP properties of heavy Higgs bosons.

2) ATLAS experiment at LHC: The epoch of new paradigm for particle physics is going to open with the experiments at LHC. In July 2012, a Higgs Boson was discovered by the ATLAS and CMS experiments at LHC. We call this event as "2012 July Revolution". After the Higgs Boson discovery our students have been working on physics analysis beyond the Standard Model, especially on the searches for supersymmetric partners of gluon and partners of electroweak gauge bosons/ Higgs bosons. Some of the results are already published in journals.

2) Experiment for studying quantum bound states due to the earth's gravitational potential to study the equivalent theorem in the quantum level, and searching for new short-range force using ultra-cold neutron (UCN) beam: A detector to measure gravitational bound states of UCNs is developed. We decided to use CCD's for the position measurement of the UCN's. The CCD is going to be covered by a ^{10}B layer to convert neutron to charged nuclear fragments. The UCNs are going through a neutron guide of 100 [μ] height and their density is modulated in height as forming bound states within the guide due to the earth's gravity. In 2008 we tested our neutron detector at ILL Grenoble. In 2009 we started the test experiment at ILL. We significantly improved our detector system and performed the experiment in 2011, and the analysis was completed in 2012. The observed modulations in the vertical distribution of UCNs due to the quantization is in good agreement with the prediction by quantum mechanism using the Wigner function. This is the first observation of gravitationally bound states of UCNs with 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 in 2014. The new world record of the short range force was established by this experiment and was published in PRL.

7 Minowa Group

Research Subjects: Experimental Particle Physics without Accelerators

Member: MINOWA, Makoto and INOUE, Yoshizumi

Minowa group stopped its activities after professor Minowa retired at the end of the 2015 fiscal year. This is the report of the final year.

We have been developing 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 Ohi Power Station in Fukui, Japan 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 succeeded in the world's first aboveground antineutrino detection of a nuclear reactor.

Unexpected gamma ray bursts were detected with PANDA36 detector during the operation at the power plant reactor with a typical duration of 180 s and a peak detection rate of $\sim 5 \times 10^2/\text{s}$. The energy spectrum is continuous and extends upto 10–15 MeV. Similar bursts were also detected by a larger prototype PANDA64 of 640 kg mass at the Norikura Observatory, located at 2,770m above sea level, of Institute for

Cosmic Ray Research, the University of Tokyo. The bursts are most probably due to electromagnetic showers of relativistic electrons created in thunder clouds.

The construction of an ultimate 100-module detector, PANDA100 is now completed and waiting for the power plant reactor to go online.

The existence of the hidden sector photons and other hidden sector particles are predicted by extensions of the Standard Model, notably the ones based on the 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 demonstrated the effectiveness of this method of hidden photon search experiments in two wavelength bands corresponding to $\sim eV$ and $\sim 50\mu eV$ hidden photon mass ranges.

We invented a new method for the latter mass range to use a commercially available dish antenna with a plane reflector in front of the dish. Though the dish antennas usually have parabolic shape, which cannot be approximated as spherical shape because of their short focal lengths compared to their diameters. Plane radio wave of HP CDM origin would be emitted from the plane reflector perpendicularly to the surface. Because parabolic dishes concentrate plane wave to their focal point, the amplification of HP CDM signal properly works.

8 Aihara-Yokoyama Group

Research Subjects: Experimental Particle Physics and Observational Cosmology.

- (1) Study of CP -violation and search for physics beyond the Standard Model in the B meson and the τ lepton systems (Belle);
- (2) Search for physics beyond the Standard Model at the Super B Factory (Belle II);
- (3) Dark energy survey at the Subaru telescope (Hyper Suprime-Cam);
- (4) Long baseline neutrino oscillation experiment (T2K);
- (5) Search for proton decays (Super-Kamiokande);
- (6) R&D for the next generation neutrino and nucleon decay experiment (Hyper-Kamiokande);
- (7) R&D of new generation photodetectors.

Members: Hiroaki Aihara, Masashi Yokoyama, Yoshiuki Onuki, and Denis 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). We continue 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. We are also studying an improved measurement of the CP violating parameter, ϕ_3 , which is currently the least well-measured of the three CKM angles.

2. Physics at luminosity frontier: Belle II experiment The SuperKEKB project started in 2010. The upgraded accelerator, SuperKEKB, will have a 40 times more luminosity than KEKB. The Belle detector is also being upgraded as the “Belle II” detector with cutting-edge technologies. One of the 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 the outermost layer of the Belle II SVD. This year we completed the first full-quality ladder of the Belle II SVD and started the mass production. In addition, we have been developing the track finder software with SVD for long-lived particles, such as K_S . The R&D for the upgrade of the Belle II electromagnetic calorimeter was also carried out. We studied the counter based on a pure CsI crystal and avalanche photodiodes, and found that the wavelength shifting plates with nanostructured organosilicon luminophores (NOL-9) provide a large improvement of the light output.

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 an extensive wide-field deep survey to investigate the weak lensing. This data will be used to develop a 3-D mass mapping of the universe. It, in turn, will be used to study Dark Energy. This year, we developed a novel method of measuring the cluster lensing distortion profiles, and adopted it to Suprime-Cam data. We will continue to study dark matter and dark energy with the data from wide-field survey started last year.

4. Study of neutrino oscillation with accelerator neutrino beam: T2K experiment T2K is a long baseline neutrino experiment using the J-PARC accelerator complex and Super-Kamiokande, 295 km away. By combining both muon-type and electron-type neutrino interaction events observed at the Super-Kamiokande detector, we placed the world best constraint on the neutrino mixing angle θ_{23} , and the first-ever constraint on the CP asymmetry parameter in the lepton sector. This year T2K has released the first neutrino oscillation results from anti-neutrino data. A discussion is underway towards a possible extension of T2K data taking (called T2K Phase II) with an upgrade of near detectors. Such an extension will allow us to observe CP violation in the lepton sector with a significance of 3σ , if the parameters are in a favorable region.

In order to improve the systematic uncertainty from neutrino-nucleus interaction cross sections, we have proposed a new experiment at J-PARC neutrino beam facility. The experiment, named WAGASCI, was approved as a test experiment at J-PARC. This year, we have constructed a prototype of WAGASCI detector, which will be installed in front of existing T2K near detector to measure the neutrino cross section on water.

5. Search for proton decays: Super-Kamiokande Proton decay is the only way to directly prove the Grand Unified Theory, which is an attractive candidate for a model of physics beyond the Standard Model. We aim to enhance the sensitivity to proton decay at Super-Kamiokande with an improved event reconstruction. This year, we have established the calibration of the detector that is necessary for the new algorithm, and started estimating the systematic uncertainties.

6. Next generation large water Cherenkov detector: Hyper-Kamiokande project In order to pursue the study of neutrino properties beyond T2K, we propose 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 the 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. The sensitivity to proton decay lifetime, which is expected to be an order of magnitude better than current Super-K sensitivity, is also studied in our group.

9 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, A.Ishida

- (1) LHC (Large Hadron Collider) has the excellent physics potential. Our group is contributing to the ATLAS group in the Physics analyses: focusing especially on three major topics, the Higgs boson, Supersymmetry, and new diboson resonances(WW and $\gamma\gamma$).
 - Higgs: After the discovery of Higgs Boson, We are measuring the Yukawa coupling precisely.

- SUSY: We have excluded the light SUSY particles (gluino and squark) whose masses are lighter than 1.4 and 1.5TeV, respectively.
- New dibson Resonance: A small excess is found at $M=750\text{GeV}$ for $\gamma\gamma$ resonance. We need more data to confirm the excess is new physics or just statistical fluctuation.
- (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:
 - Bose Einstein Condensation of positronium.
 - Axion searches using Spring 8
 - $\gamma\gamma$ scatter Using FEL Xray.
 - Vacuum Birefringence using Strong Magnetic field or Strong light.

10 Aoki Group

Subject: Theoretical condensed-matter physics

Members: Hideo Aoki, Shintaro Takayoshi

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** and novel **non-equilibrium** phenomena should be realised. Studies in the 2015 academic year include:

- **Superconductivity**
 - Electron correlation and High-Tc superconductivity [1]
 - Organic and carbon-based superconductors
 - Superconductivity in non-equilibrium [2]
- **Topological systems**
 - Topological Mott insulator designed for cold atoms [3]
 - Topological and chiral properties of graphene and silicene [4-7]
 - Optically detected quantum Hall effect [8]
 - Graphene quantum dot
- **Non-equilibrium phenomena**
 - Non-equilibrium dynamical mean field and dynamical cluster theories
 - Floquet topological insulator [9]
 - Design of organic topological systems [10]
 - Relaxation in electron-phonon systems [11]
 - Higgs modes in superconductors [12,13]

[1] M. Kitatani, N. Tsuji, H. Aoki: FLEX+DMFT approach to the d-wave superconducting phase diagram of the two-dimensional Hubbard model, *Phys. Rev. B* **92**, 085104 (2015).

[2] Sota Kitamura and Hideo Aoki: η -pairing superfluid in periodically-driven fermionic Hubbard model with strong attraction, arXiv:1511.07890.

[3] Sota Kitamura, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: An interaction-driven topological insulator in fermionic cold atoms on an optical lattice, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 045304 (2015).

[4] Yasuhiro Hatsugai, Tohru Kawarabayashi and Hideo Aoki: Survival of sharp $n = 0$ Landau levels in massive tilted Dirac fermions — Role of the generalized chiral operator, *Phys. Rev. B* **91**, 085112 (2015).

[5] Y. Hatsugai, K. Shiraishi and H. Aoki: Flat bands in Weaire-Thorpe model and silicene, *New J. Phys.* **17**, 025009 (2015).

- [6] Mikito Koshino and Hideo Aoki: Dirac electrons on three-dimensional graphitic zeolites — a scalable mass gap, *Phys. Rev. B* **93**, 041412(R) (2016).
- [7] M. Watanabe, H. Komatsu, N. Tsuji and H. Aoki: Electronic structure of helicoidal graphene — massless Dirac particles on a curved surface with a screw symmetry, *Phys. Rev. B* **92**, 205425 (2015).
- [8] A. V. Stier et al, Terahertz dynamics of a topologically protected state: Quantum Hall effect plateaus near the cyclotron resonance of a two-dimensional electron gas, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 247401 (2015).
- [9] Takahiro Mikami et al: Brillouin-Wigner theory for high-frequency expansion in periodically driven systems — Application to Floquet topological insulators, *Phys. Rev. B*, to be published (arXiv:1511.00755).
- [10] M. Yamada, T. Soejima, N. Tsuji, D. Hirai, M. Dinca and H. Aoki: First-principles design of a half-filled flat band of the Kagome lattice in two-dimensional metal-organic frameworks, arXiv:1510.00164.
- [11] Y. Murakami, P. Werner, N. Tsuji and H. Aoki: Interaction quench in the Holstein model — Thermalization crossover from electron- to phonon-dominated relaxation, *Phys. Rev. B* **91**, 045128 (2015).
- [12] Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Theory of Anderson pseudospin resonance with Higgs mode in a superconductor, *Phys. Rev. B* **92**, 064508 (2015).
- [13] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Multiple amplitude modes in strongly coupled phonon-mediated superconductors, *Phys. Rev. B* **93**, 094509 (2016).

11 Miyashita Group

Research Subjects: Statistical Mechanics, Phase Transitions, Quantum Spin systems,
Quantum Dynamics, Non-equilibrium Phenomena

Member: Seiji Miyashita and Takashi Mori

Quantum dynamics

Quantum dynamics under time dependent field is one of the most important subjects in our group.

We studied properties of quantum systems in periodically driven systems. Last year, we have obtained new insights for the distribution of the states under driving force. We have studied conditions that the stationary state of a system at a finite temperature driven by periodic external field is given by a canonical distribution of Floquet quasi-eigenstates, and found the conditions are rather severe. In the last year we examine possibility to relax them, and found that strong coupling between the thermal bath and the system, and suppression of high frequency of the spectrum density of the thermal bath work for the purpose.[17, 19] We also studied properties of quasi-stationary state of the system driven by high frequency external force by making use of Floquet-Magnus expansion method. [12, 13, 35, 59]

Relaxation from metastable state under sweeping field in a uniaxial magnetic systems was studied. We found that the classical spinodal type dynamics is characterized by singular distribution of energy gap. Beating of the spin-amplitude after the critical point was found, and mechanism of the beating was explained from the view point of quantum interference.[8, 21, 34]

Quantum response to the external field has been one of projects of our group. We studied the line shape of ESR spectrum and examined the size and temperature dependence of the double peak structure of the 1DXXZ spin model. [5, 20, 57]

Fluctuation of current in mesoscopic semiconductor is also an interesting problem. We studied a system including electric coupling between the quantum dots and lead, and found particular I-V property by making use of a functional renormalization group method.

[16, 24, 67, 51]

Cooperative Phenomena and Phase Transitions

Phase transitions and critical phenomena are also important subjects of our group.

Systems with local bistable state can be modeled by the Ising model. But if the lattice structure of the bistable states are different, transition between the bistable states causes changes of the elastic energy, which introduces an effective long-range interaction.[31] Competition between the long-range interaction and short-range interaction causes new types of ordering processes. In the last year, we studied the case of fully frustrated short-range interaction of antiferromagnet on the triangular lattice with next nearest

neighbor interaction (Mekata model), and found that the dual Kosterlitz-Thouless transitions is modified. [4] In systems of antiferromagnetic short range interaction without frustration, it has been known that the long-range interaction does not cause intrinsic change of the phase transition at no magnetic field. However, we found that at finite field the competition between the long-range interaction and short-range interaction introduce a gas-liquid phase transition. [9, 32, 33, 58] We also analyzed experimental data of a system which has the ANNNI model type short-range interaction and successfully explained the successive phase transitions of the system.[7]

We also studied mechanisms of permanent magnets at finite temperatures. [2, 36, 43, 61]

Stochastic process

Dunkl process is a diffusion process replacing the thermal kernel by the so-called Dunkl operator. We studied asymptotic scaling properties of stochastic process of this type. [3]

Fundamental properties of thermodynamics ensembles

We studied thermodynamic properties of systems which are extensive but not additive, and found the Gibbs-Duhem theorem is violated when the thermodynamic properties depend on the shape of the system, and, in contrast, it must hold when the shape is fixed.[14] Equivalence between two statistical ensembles, which are not necessarily thermal, is formulated, and it is shown that the specific relative entropy of two ensembles gives crucial information on the macroscopic equivalence of these ensembles. [15]

12 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, topological materials, Dirac electron systems in solids, organic conductors, and magnetic systems such as chiral magnets with spin-orbit interactions. 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.
 - Flux states as a symmetry-breaking state in high- T_c superconductivity.[1]
- Dirac electron systems in solids
 - Unscreening effect on electron-phonon coupling and superconductivity in Dirac electron systems.[2]
 - Meissner effects in the superconducting states in Dirac electron systems.[3]
- Orbital magnetic susceptibility
 - Orbital magnetism of Bloch electrons: General theory and application to single-band models. [4–6]
- Organic conductors
 - Effect of tilting on the magnetoconductivity of Dirac electrons in organic compounds.[7]
- Theories on topological materials
 - Spin current and axial current generation in a Dirac semimetal.[8]
 - Relationship between fractal and quantum Hall coefficients.[9]
- Theories on heavy fermion systems and multi-band electron systems
 - Quasiparticles in f^2 -configuration. Charge Kondo effect.
- Spin systems, chiral magnets, and spin-orbit interaction
 - Generic model and phase diagram for hyperkagome Iridates.[10]
 - Dzyaloshinskii-Moriya interaction induced from RKKY at an interface.[11]
 - Dynamics of antiferromagnetic domain walls.

[1] H. Yokoyama, S. Tanuma and M. Ogata: in preparation. “Staggered Flux State in Two-Dimensional Hubbard Model”

- [2] T. Mizoguchi and M. Ogata: in preparation. “Unscreening Effect on Electron-Phonon Coupling in Dirac Electron Systems”
- [3] T. Mizoguchi and M. Ogata: *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 084704-1-7 (2015). “Meissner Effect of Dirac Electrons in Superconducting State due to Inter-band Effect”
- [4] M. Ogata and H. Fukuyama: *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 124708-1-13 (2015). “Orbital Magnetism of Bloch Electrons I. General Formula”
- [5] M. Ogata: to appear in *J. Phys. Soc. Jpn.* “Orbital Magnetism of Bloch Electrons II. Application to Single-Band Models and Corrections to Landau-Peierls Susceptibility”
- [6] H. Matsuura and M. Ogata: submitted to *J. Phys. Soc. Jpn.* “Theory of Orbital Susceptibility in the Tight-Binding Model: Corrections to the Peierls Phase”
- [7] I. Proskurin, M. Ogata, and Y. Suzumura: *Phys. Rev. B* **91**, 195413-1-14 (2015). “Longitudinal conductivity of massless fermions with tilted Dirac cone in magnetic field”
- [8] N. Okuma and M. Ogata: to appear in *Phys. Rev. B*. “Unconventional Spin Hall Effect and Axial Current Generation in a Dirac Semimetal”
- [9] N. Yoshioka, H. Matsuura and M. Ogata: to appear in *J. Phys. Soc. Jpn.* “Quantum Hall effect of massless Dirac fermions and free fermions in Hofstadter’s butterfly”
- [10] T. Mizoguchi, K. Hwang, K.-H. Lee and Y. B. Kim: submitted to *Phys. Rev. B*. “Generic Model for Hyperkagome Iridate in the Local Moment Regime”
- [11] T. Shibuya, H. Matsuura and M. Ogata: submitted to *J. Phys. Soc. Jpn.* “Magnetic chirality induced from RKKY interaction at an interface of a ferromagnet/heavy metal heterostructure”

13 Tsuneyuki Group

Research Subjects: Theoretical Condensed-Matter Physics

Member: Shinji Tsuneyuki and Ryosuke Akashi

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.

In FY2015, we investigated superconducting transition of sulfur hydride under ultra high pressure with DFT for superconductors (SC-DFT). We proposed a sequential structural transformation from H₂S to H₃S by compression at around 180-200GPa to explain gradual but drastic increase of the superconducting transition temperature. We also developed a method of first-principles phonon calculation of highly anharmonic lattice based on the self-consistent phonon approach, which is applicable even when the material has imaginary phonon modes with ordinary harmonic approximation. With the method, we successfully calculated the lattice thermal conductivity of SrTiO₃ in high-temperature cubic phase. Development of the first-principles electronic structure theory for strongly correlated electrons is also one of our important activities, for which we have studied the first-principles transcorrelated (TC) method for periodic systems. In FY2015, we implemented an iterative scheme for the solution of the TC self-consistent equation and succeeded in drastic speed-up of the calculation.

Our research subjects in FY2015 are as follows:

- New methods of first-principles calculation of material properties
 - Sparse modeling of anharmonic lattice vibration
 - First-principles transcorrelated method

- A method for electronic structure calculation of large systems based on a divide and conquer method
- A method of calculating magneto-crystalline anisotropy
- Applications of first-principles calculation
 - Charge state of hydrogen impurity in crystalline SiO₂
 - Theoretical design of perovskite-type oxy-hydrides
 - Magnetic anisotropy in Cu-doped Nd₂Fe₁₄B sintered magnet
 - Interface structure of Nd₂Fe₁₄B sintered magnet
 - Non-thermal structural transformation in phase-change recording materials
 - Stability of excitonic complexes in a multi-valley/band semiconductor

14 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 simulations

Member: Synge Todo and Hidemaro Suwa

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 methods. We also develop new computational algorithms for quantum many-body systems, such as the tensor-network algorithms, 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

Critical Phenomena of quantum systems with strong spatial and temporal 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 two-dimensional Bose-Hubbard model with dynamical exponent $z > 1$. We also extended our method to systems with quenched randomness and studied the dynamical property of the Superfluid-Bose-Glass transition.

Analysis of quantum phases and quantum phase transitions by local Z_N 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_N Berry phase that is a topological order parameter for low-dimensional quantum magnets.

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 established the non-trivial dependence of the critical exponents on the exponent of interaction σ .

Development of new simulation algorithms for quantum many body systems

The energy gap of a quantum system not only characterizes the system, such as the Z_2 topological phase, but also provides an effective analysis for quantum criticality. It is, however, hard to estimate the gap precisely in the quantum Monte Carlo simulations because it is not simply expressed by an average with respect to the Boltzmann distribution. Reducing the bias of the conventional estimator to zero asymptotically, we devised an unbiased and reliable gap-estimation method in the worldline quantum Monte Carlo simulations. It was shown that the criticality of the spin-phonon model is described by the Wess-Zumino-Witten model and the quantum nature of the lattice degrees of freedom is essential to the one-dimensional quantum spin or spinless fermion systems.

Many quantum spin systems are effectively described by the $O(N)$ non-linear sigma model. The theory provides the comprehensive understanding of the magnetically ordered phase, the disordered phase, and the critical point. Three parameters, the magnetization, the stiffness, and the excitation velocity, naturally

appear in the effective model. The velocity has been tough to estimate precisely, while the calculation methods have been established for the other two. We calculated precisely the velocity of the one-dimensional, the two-dimensional, and the bilayer antiferromagnets without any approximation. It was clarified that the finite $N(=3)$ critical point has a non-trivial correction from the large- N limit in the effective theory.

We have also investigated and developed several novel algorithms and methodologies, such as the tensor-network algorithm, irreversible Markov chain Monte Carlo, continuous-space worm algorithm quantum Monte Carlo method, machine-learning, application of information science to materials science, etc.

Development of open-source software for next-generation parallel simulations

We have developed various open-source software packages: simulation software package for quantum lattice models “ALPS” (<http://alps.comp-phys.org>), loop algorithm quantum Monte Carlo method “ALPS/looper” (<http://wistaria.comp-phys.org/alps-looper>), balance condition library “BCL” (<https://github.com/cmsi/bcl>), cluster algorithm Monte Carlo method “Cluster-MC” (<https://github.com/wistaria/cluster-mc>), collection of install scripts of MateriApps applications “MateriApps Installer” (<https://github.com/wistaria/MateriAppsInstaller>), portal site for materials science simulation “MateriApps” (<http://ma.cms-initiative.jp>), Live USB Linux system “MateriApps LIVE!” (<http://cmsi.github.io/MateriAppsLive>), parallel exact diagonalization package “Rokko” (<https://github.com/t-sakashita/rokko>), etc.

15 Katsura Group

Research Subjects: Condensed Matter Theory and Statistical Physics

Member: Hosho Katsura and Yutaka Akagi

In our group, we study various aspects of condensed matter and statistical physics. In particular, our research focuses on strongly correlated many-body systems which would give rise to a variety of quantum phases. We study theoretically these systems, with the aim of predicting novel quantum phenomena that have no counterpart in weakly-interacting systems. We are currently interested in (i) topological phases of matter, (ii) spin-charge coupled systems, and (iii) periodically driven quantum systems. In addition, we are also interested in the mathematical aspects of the study of the above mentioned fields. Our research projects conducted in FY 2015 are the following:

- Strongly correlated systems
 - Topological order in interacting Kitaev/Majorana chains [1]
 - Kagome network and Dirac half-semimetal in ferromagnetic Kondo lattices [2]
- Topological phases of matter
 - Disordered topological insulators [3]
 - Topological defects in quantum spin nematics [4]
 - Thermal Hall effect of magnons and phonons
- Solvable models and statistical physics
 - Sine-square deformation and supersymmetric quantum mechanics [5]
 - Transient dynamics of periodically driven quantum systems [6, 7]

[1] Hosho Katsura, Masahiro Takahashi, and Dirk Schuricht, *Phys. Rev. B*, **92**, 115137 (2015).

[2] Yutaka Akagi and Yukitoshi Motome, *Phys. Rev. B* **91**, 155132 (2015).

[3] Hosho Katsura and Tohru Koma, *J. Math. Phys.* **57**, 021903 (2016).

[4] Hiroaki T. Ueda, Yutaka Akagi, and Nic Shannon, *Phys. Rev. A* **93**, 021606(R) (2016).

[5] Kouichi Okunishi and Hosho Katsura, *J. Phys. A: Math. Theor.* **48**, 445208 (2015).

[6] Tomotaka Kuwahara, Takashi Mori, and Keiji Saito, *Ann. Phys.* **367**, 96 (2016).

[7] Takashi Mori, Tomotaka Kuwahara, and Keiji Saito, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 120401 (2016).

16 Fujimori Group

Research Subjects: Spectroscopy of Strongly Correlated Systems

Member: Atsushi Fujimori and Goro Shibata

We study the electronic structure of superconductors and spintronics materials by 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 [1], metal-insulator transitions [2], giant magnetoresistance, and spin/charge/orbital ordering in strongly correlated systems such as transition-metal compounds, ferromagnetic semiconductors [3], and their interfaces.

[1] M. Horio, T. Adachi, Y. Mori, A. Takahashi, T. Yoshida, H. Suzuki, L. C. C. Ambolode II, K. Okazaki, K. Ono, H. Kumigashira, H. Anzai, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, D. Ootsuki, K. Sawada, M. Takahashi, T. Mizokawa, Y. Koike, and A. Fujimori: Suppression of the antiferromagnetic pseudogap in the electron-doped high-temperature superconductor by protect annealing, *Nat. Commun.* **7**, 10567–1-8 (2016).

[2] K. Ishigami, K. Yoshimatsu, D. Toyota, M. Takizawa, T. Yoshida, G. Shibata, T. Harano, Y. Takahashi, T. Kadono, V. K. Verma, V. R. Singh, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, T. Koide, M. Oshima, H. Kumigashira, and A. Fujimori: Thickness-dependent magnetic properties and strain-induced orbital magnetic moment in SrRuO₃ thin films, *Phys. Rev. B* **92**, 064402–1-5 (2015).

[3] S. Sakamoto, L. D. Anh, P. N. Hai, G. Shibata, Y. Takeda, M. Kobayashi, Y. Takahashi, T. Koide, M. Tanaka, and A. Fujimori; Magnetization process of the *n*-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As:Be studied by x-ray magnetic circular dichroism, *Phys. Rev. B* **93**, 035203–1-5 (2016).

17 Hasegawa Group

Research Subjects: Experimental Surface/Nano Physics

Member: Shuji HASEGAWA, Akari TAKAYAMA, and Ryota AKIYAMA

Surfaces of materials are platforms of our research where rich physics is expected due to the low-dimensionality, symmetry breakdown, a wide variety of structures, and direct access for measurements. (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 surfaces of metals, semiconductors, topological insulators, and nano-scale phases such as surface superstructures, ultra-thin films including monolayer materials such as graphene and silicene. We use various kinds of ultrahigh-vacuum experimental techniques, such as electron diffraction, scanning electron microscopy, scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy, *in-situ* four-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-four-point probes, and surface magneto-optical Kerr effect apparatuses. Main results in this year are as follows.

(1) Surface electronic/spin transport:

- Detection of superconductivity in Ca-intercalated double-layer graphene grown on Silicon Carbide crystal surface
- Detection of carrier localization in double-layer graphene at low temperatures, depending on thermal-treatment history
- Detection of superconductivity of double-layer Thallium on Silicon crystal
- Detection of electrical resistance across atomic steps on topological insulator crystals, revealing suppression of backscattering in the topological surface states
- Detection of Shubnikov-de Haas oscillation in topological surface states, revealing high mobility depending on the Fermi-level position

- Transport, magnetism, and atomic structure at interface between a topological insulator and magnetic insulator

- Detection of Photogalvanic effect in Rashba-type spin-splitting surface states
- Measurements of conductivity of organic molecule sheets by using four-tip STM

(2) Surface phases, ultra-thin films, and phase transitions:

- STM/S measurement at ultra-low temperature under magnetic field, on a monolayer superconductor Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl+Pb), revealing the superconducting energy gap and vortex structure.
- Angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) of topological crystalline insulators
- ARPES of metal-covered Ge(111) surface structures, possible monolayer superconductors

(3) Construction of new apparatuses:

- Fabrication of a pure-spin-current injection probe

- [1] S. Ichinokura, K. Sugawara, A. Takayama, T. Takahashi, and S. Hasegawa: *Superconducting Calcium-Intercalated Bilayer Graphene*, ACS Nano **10**, 2761 (Jan, 2016)).
- [2] T. Hirahara, T. Shirai, T. Hajiri, M. Matsunami, K. Tanaka, S. Kimura, S. Hasegawa, and K. Kobayashi: *Role of Quantum and Surface-State Effects in the Bulk Fermi Level Position of Ultrathin Bi films*, Phys. Rev. Lett. **115**, 106803 (Sep, 2015).
- [3] A.V. Matetskiy, S. Ichinokura, L.V. Bondarenko, A.Y. Tupchaya, D.V. Gruznev, A.V. Zotov, A.A. Saranin, R. Hobara, A. Takayama, and S. Hasegawa: *Two-dimensional superconductor with giant Rashba effect: One-atomic-layer Tl-Pb compound on Si(111)*, Phys. Rev. Lett. **115**, 147003 (Oct, 2015).
- [4] A.V. Matetskiy, I. A. Kibirev, T. Hirahara, S. Hasegawa, A.V. Zotov, and A.A. Saranin: *Direct observation of a gap opening in topological interface states of MnSe/Bi₂Se₃ heterostructure*, Appl. Phys. Lett. **107**, 091604 (Sep, 2015).
- [5] R. Akiyama, K. Fujisawa, T. Yamaguchi, R. Ishikawa and S. Kuroda, *Two-dimensional quantum transport of multivalley (111) surface state in topological crystalline insulator SnTe thin films*, Nano Research **9**, 490 (Feb, 2016).
- [6] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, and T. Takahashi : *Rashba effect of bismuth thin film on silicon studied by spin-resolved ARPES*, J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena, **201**, 105 (May, 2015).

18 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 interested in (i) novel quantum phases with strong correlations and frustration in two dimensional (2D) helium three (³He), four (⁴He) and their mixture, (ii) novel electronic properties of 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. Quantum Spin Liquid state in two dimensional ³He:

Quantum spin liquid (QSL) is a state where the spins at each lattice site are not frozen even at $T = 0$. Two dimensional ³He is one of the promising candidates which shows the QSL state as magnetic ground state because of the following characters. (1) Impurity-free 2D solid can be obtained on an atomically flat substrate. (2) ³He atom forms triangular lattice with strong geometrical frustrations. (3) The interaction (J_p) between ³He atoms can be described with the multiple spin exchange (MSE) of up to six atoms. (4) The physical properties, such as heat capacity and magnetism, can be described only by the degree of freedom of nuclear spins.

We are currently focusing on a monatomic layer of ^3He solid prepared on graphite, which is preplated by bilayer of HD ($^3\text{He}/\text{HD}/\text{HD}/\text{gr}$) and studying its heat capacity (C) in wide temperature range of $0.35 < T < 90$ mK. Since the areal density of 2D HD is smaller than that of ^3He and ^4He , one can obtain larger $|J_P|$ for 2D ^3He on bilayer HD than on ^3He and ^4He . The T -dependence of C for $^3\text{He}/\text{HD}/\text{HD}/\text{gr}$ shows a single broad peak different from the double peak feature for $^3\text{He}/^4\text{He}/\text{gr}$ and $^3\text{He}/^3\text{He}/\text{gr}$. The peak shifts to lower temperature by increasing areal density of ^3He . Here, the C - T curves are found to cross at $T = 22.5$ mK for $4.95 \leq \rho \leq 5.25 \text{ nm}^{-2}$ and at $T = 11.6$ mK for $5.25 \leq \rho \leq 5.55 \text{ nm}^{-2}$, which suggests that 4/7 phase and Fermi fluid (C2-like phase) coexist at lower (higher) ρ region. The C2 phase is expected to be quantum liquid crystal, or in other words "hexatic" phase, where there is no long range order while hexagonal bond order is preserved locally. On the other hand, 4/7 phase can be a novel QSL with exotic elementary excitations. The C and χ shows peculiar T dependence, i.e., $C \propto T^{2/3}$ and $\chi \propto T^{-1/3}$. Theoretically, this unique T -dependence can be explained by considering spinons or majorana fermions as magnetic excitations.

2. Novel electronic properties of graphene:

Graphene 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. One of the important topics to study in graphene research is the spin polarized state expected at zigzag edges of graphene. It is well known that there are two types of edges in graphene, i.e. zigzag and armchair types. At the edge of zigzag structure, electrons are strongly localized along the edge to form a zigzag edge state. We had confirmed the state experimentally by STM/S at a monatomic step edge of graphite. In addition, 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 considered to stabilize in a nano-ribbon between two zigzag edges (zigzag nanoribbon) through anti-ferromagnetic coupling between edges.

To obtain such zigzag edges and zigzag nanoribbons, we tried hydrogen-plasma etching of graphite surfaces. By exposing graphite to hydrogen-plasma under high temperatures, hexagonal pits with monatomic depth are found to be created. The size and the density of nanopit can be controlled by tuning the excitation power to produce plasma, temperature and time duration of the process. Moreover, and most importantly, the edges of the nanopit are found to be aligned to the zigzag direction. Therefore, one can obtain zigzag nanoribbon in between two hexagonal pits, where the spin polarized zigzag edge state can be expected to observe by STM/S measurement. In addition, we also found that the shape of nanopits are changed from hexagonal to circular by etching at lower temperatures. The spin polarized nature of zigzag edges can be confirmed more clearly by comparing the electronic properties of circular and hexagonal nanopits.

19 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.

An adsorbate-induced quantum Hall system at the cleaved InSb surfaces is investigated in magnetic fields up to 14 T using low-temperature scanning tunneling microscopy and spectroscopy combined with transport measurements. We show that an enhanced Zeeman splitting in the Shubnikov-de Haas oscillations is explained by an exchange enhancement of spin splitting and potential disorder, both of which are obtained from the spatially averaged density of states (DOS). Moreover, a strong magnetic-field suppression of a correlation gap is observed in the spatially averaged DOS near the QH transition.

2. Superconductivity of monolayer 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 2015, we have studied the effect of an adsorbate material on superconductivity of an ultrathin Pb film grown on semiconductor surfaces. The temperature dependence of the parallel critical field for monolayer ultrathin Pb films over-deposited by Sb or Se is almost the same as that for a pristine ultrathin Pb film. In contrast, for the bilayer system of Pb/Sb/Pb, the temperature dependence of the parallel critical field is different from that for the monolayer system. Further experiments are ongoing to understand the observed results.

20 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, aiming at the quantum phase control of many body systems by light. In order to investigate the role of electron and/or spin correlations in the excited states as well as the ground states, we focus on the low energy electromagnetic responses, in particular in the terahertz (THz) (1THz \sim 4meV) frequency range where quasi-particle excitations and various collective excitations exist. The research summary in this year is as follows.

1. **Exciton Mott transition:** We have investigated the exciton Mott transition in a bulk GaAs under the condition of resonant excitation of excitons by using optical pump and terahertz probe spectroscopy. At low excitation densities, the conductivity spectrum is dominated by the excitonic 1s-2p transition. With increasing excitation densities, the spectrum changes to Drude-like metallic one, indicating the exciton Mott transition. However, a precise analysis of the spectrum shows that it largely deviates from the Drude-type conductivity and apparently shows the anomalous metallic behavior above the Mott transition density. This result indicates that charge carrier dynamics in the low temperature electron-hole(e-h) metal phase is significantly influenced by electron-hole Coulomb correlations. First order like phase transition from oversaturated exciton gas to e-h metal was also observed.
2. **Higgs amplitude mode in superconductors:** We have extended the study of Higgs amplitude mode in conventional s-wave superconductors to that in a multiband superconductor MgB₂ and unconventional superconductors. We observed the third harmonic generation (THG) from a MgB₂ thin film. The temperature dependence of THG for a fixed incident frequency shows a resonant enhancement when twice of the incident frequency coincides with the higher gap energy 2Δ , suggesting the existence of Higgs mode resonance. In cuprate superconductors, terahertz pump and optical probe experiments were performed to explore the Higgs modes with d-wave pairing symmetry.
3. **Ultrafast nonlinear optics in Landau-quantized graphene:** We have studied the ultrafast nonlinear optics in Landau-quantized graphene by using terahertz pump and terahertz probe spectroscopy under the strong magnetic field. Large and ultrafast nonlinear responses were observed associated with the inter-Landau level transitions in the terahertz frequency range.

References

- [1] Fumiya Sekiguchi and Ryo Shimano: Excitonic correlation in the Mott crossover regime in Ge, *Phys. Rev. B* **91**, 155202 (2015).

21 Takagi-Kitagawa Group

Research Subjects: Physics of Correlated Electron Systems

Member: Hidenori Takagi, Kentaro Kitagawa, Naoka Ohta

We are exploring new compounds with transition metal elements in which novel, exotic and/or functional electronic phases are realized. Our main targets in FY2015 included, 5d complex Ir oxides with interplay of electron correlations and strong spin orbit coupling, spin liquids, anti-perovskites with Dirac electrons and layered $\text{Ta}_2\text{Ni}(\text{S}, \text{Se})_5$ with excitonic ground states.

Possible realization of Kiteev spin liquid state in $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$:

We discovered a new iridium oxide $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ which comprises edge-sharing network of IrO_6 octahedra in the three dimensions. Each Ir^{4+} ion has 3 bonds to the neighboring Ir^{4+} ions which are rotated by 120 degrees. $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ undergoes a magnetic ordering at 38 K and its positive Weiss temperature $\theta_W \sim 40$ K indicates the predominance of ferromagnetic interaction. The proximity to a ferromagnetic state and the presence of large fluctuation suggest that the ground state of $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ is close to Kitaev spin liquid. Under a high pressure of 2 GPa, we discovered that the static magnetic moment disappear and moment remains fluctuating, suggestive of the emergence of Kitaev quantum spin liquid state.

Fabrication of strongly-correlated Dirac semimetal AIrO_3 ($A=\text{Sr}, \text{Ca}$) and carrier doping:

AIrO_3 ($A=\text{Sr}, \text{Ca}$) perovskites have been thought to be semimetal, composed of three-dimensional Dirac-nodal electron and heavier hole bands. We fabricated epitaxially grown AIrO_3 thin films on 3 kinds of substrates, and studied transport properties which depend on the epitaxial strains. The above two-carrier model successfully reproduced our transport results. In addition, we found that the two-carrier coexisting state can be tuned into a simple Dirac-electron metal through electron doping of La substitution. In other words, we have successfully demonstrated doping on strongly-correlated $J_{\text{eff}} = 1/2$ Ir oxide with the thin-film technology.

New three-dimensional Dirac electron systems:

We have obtained evidences for 3D Dirac electrons in anti-perovskite oxide Sr_3PbO , and realized the quantum-limit state where all of carriers fall into the lowest Landau level. This year, we have investigated the quantum oscillations of the magnetoresistance in Sr_3PbO single crystals, and found anisotropic Dirac fermi surfaces, in good accordance with band calculations by Kariyado and Ogata. The experiment revealed that only a part of 6-fold degenerated Dirac fermi surfaces reaches the quantum limit under the magnetic field between 5 T and 15 T. We continue to search for chiral anomaly or various phenomena related to this quantum-limit physics.

22 Theoretical Astrophysics Group

Research Subjects: Observational Cosmology, Extrasolar Planets, First Star Formation

Member: Yasushi Suto, Naoki Yoshida, Takashi Hosokawa, & Masamune Oguri

Theoretical Astrophysics Group conducts a wide range of research programmes. Observational cosmology is our primary research area, but we also pursue other forefront topics such as extrasolar planet and star formation.

“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 PhD and Master’s theses in our group;

2015

- Chemo-thermal evolution of collapsing gas clouds and the formation of metal-poor star
- Cosmology with Weak Gravitational Lensing and Sunyaev-Zel’dovich Effect
- Far-infrared emission from SDSS galaxies in AKARI all-sky maps: Image stacking analysis and its implications for galaxy clustering
- Photo-evaporation of a proto-planetary disk

2014

- Stacking image analysis of SDSS galaxies in far-infrared and its implications for the Galactic extinction map
- Probing Cosmic Dark Matter and Dark Energy with Weak Gravitational Lensing Statistics

- Statistics of Submillimeter Line Emitters in Cosmological Simulation
- Characterization of a planetary system PTFO 8-8695 from the variability of its transit lightcurve induced by the nodal precession
- Neutrino-heating mechanism of core-collapse supernovae explosions
- Formation of Super-Massive Stars and Super-Massive Black Holes in the Early Universe

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

23 Murao Group

Research Subjects: Quantum Information Theory

Member: Mio Murao and 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 the last two decades.

In this year, our group consisted of two faculty members, Mio Murao (Professor), Akihito Soeda (Assistant Professor), 8 graduate students— Seiseki Akibue (D3), Kotaro Kato (D2), Jisho Miyazaki (D2), Atsushi Shimbo (D1), Ryosuke Sakai (M2), and Hayata Yamasaki (M2). We investigate several aspects of theoretical quantum information. Our projects worked in the academic year of 2015 were the following:

- Distributed quantum information processing
 - Coding theorem for bipartite unitaries in distributed quantum computation by A. Soeda and M. Murao in collaboration with E. Wakakuwa at The University of Electro-Communications
 - Implementability of unitary operations over the butterfly and cluster networks with free classical communication by S. Akibue and M. Murao
 - Operational characterization of multipartite entanglement through construction tasks by H. Yamasaki, A. Soeda, and M. Murao
- Quantum information theoretic analysis of multipartite quantum states
 - Quantum Hammersley-Clifford Theorem for 1D Gibbs states with non-commuting Hamiltonian by K. Kato in collaboration with F. Brandao at Microsoft Research Redmond (currently, at California Institute of Technology)
 - Topological entanglement entropy and non-locality of the entanglement Hamiltonian by K. Kato and M. Murao in collaboration with F. Furrer at NTT Basic Research Laboratories
 - Markovianizing cost of tripartite quantum states by A. Soeda and M. Murao in collaboration with E. Wakakuwa at The University of Electro-Communications
- Foundations of quantum mechanics
 - Non-locality and non-causality of quantum operations by S. Akibue and M. Murao in collaboration with G. Kato and M. Owari at NTT Basic Research Laboratories (MO is now affiliated with Shizuoka University)
 - Extensions and composites in topos quantum theory by J. Miyazaki, A. Soeda, and M. Murao in collaboration with C. Heunen at University of Oxford (currently, at The University of Edinburgh)
- Quantum algorithms
 - Reproduction of unitary operations via quantum learning by A. Shimbo, A. Soeda, and M. Murao
 - Quantum input-output algorithms for quantum systems with limited controllability by R. Sakai, A. Soeda, and M. Murao

Please refer our webpage: <http://www.eve.phys.s.u-tokyo.ac.jp/indexe.htm>. The publication list for the year is available at the end of the Japanese version of the group research summary.

24 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 controllable 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 FY2015 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms
 - Diffraction-unlimited position measurement for quantum gases and biomolecules [1, 2]
 - Universal relations in a Fermi gas with a resonant p -wave interaction [3]
 - Excitation band topology in Bose-Einstein condensates in optical lattices [4]
 - Entanglement pre-thermalization in a one-dimensional Bose gas [5]
- Quantum Information, quantum measurement, and foundation of statistical mechanics
 - Quantum nonequilibrium equalities with absolute irreversibility [6]
 - Work fluctuation-dissipation trade-off in heat engines [7]
 - Accuracy of the microcanonical ensemble in small isolated quantum systems [8]
 - Generalized Gibbs ensemble in a nonintegrable system with local symmetries [9]
 - Trade-off relation between information and disturbance in quantum measurement [10]

- [1] Y. Ashida and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **115**, 095301 (2015). Editor's suggestion.
 [2] Y. Ashida and M. Ueda, Optics Letters **41**, 72 (2016).
 [3] S. M. Yoshida and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **115**, 135303 (2015).
 [4] S. Furukawa and M. Ueda, New J. Phys. **17**, 115014 (2015).
 [5] E. Kaminishi, T. Mori, T. N. Ikeda, and M. Ueda, Nat. Phys. **11**, 1050 (2015).
 [6] K. Funo, Y. Murashita, and M. Ueda, New J. Phys. **17**, 075005 (2015).
 [7] K. Funo and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **115**, 260601 (2015).
 [8] T. N. Ikeda and M. Ueda, Phys. Rev. E **92**, 020102 (2015).
 [9] R. Hamazaki, T. N. Ikeda, and M. Ueda, Phys. Rev. E **93**, 032116 (2016).
 [10] T. Shitara, Y. Kuramochi, and M. Ueda, Phys. Rev. A **93**, 032134 (2016).

25 Yokoyama(J) Group

Research Subjects: Theoretical Cosmology and Gravitation

Members: Jun'ichi Yokoyama and Teruaki Suyama

This group being a part of Research Center for the Early Universe (RESCEU) participates in research and education of Department of Physics in close association with Theoretical Astrophysics Group of Department of Physics. We are studying various topics on cosmology of the early universe, observational cosmology, and gravitation on the basis of theories of fundamental physics such as quantum field theory, particle physics, and general relativity. We are also working on gravitational wave data analysis to prepare for completion of KAGRA, which will be succeeded by the newly established KAGRA gravitational wave data analysis international cooperation section at RESCEU. Below is the list of topics studied during the academic year 2015.

Cosmology of the early universe

- Creation of the inflationary universe without initial singularity
- Consistency of the Generalized G-inflation
- Creation of the inflationary universe out of a black hole
- Resolution of the domain-wall problem in NMSSM
- Properties of spatially covariant scalar-tensor theory
- Global phase transition and thermal history of the early universe
- CMB anisotropy induced by cosmic strings in the delayed scaling scenario
- Primordial black holes and long-wave solutions of cosmological perturbation theory
- Primordial gravitational waves probed by primordial black holes

Observational cosmology

- Probing small scale density perturbations using minihalos
- Cosmology of SKA
- Inflationary universe models probed by future radio observations
- Vector perturbations probed by weak gravitational lensing

Quantum field theory in curved space

- New interpretation of the Hawking-Moss instanton
- Schwinger effect in de Sitter space
- QED correction to dipole magnetic radiation
- Probing the Unruh effect by a high-intensity laser

Gravitation

- Spontaneous scalarization
- Scalar-tensor theories and black holes
- Instability of black holes in D dimensional Lovelock-Galileon theory

Gravitational waves

- Construction of analysis pipeline for continuous gravitational waves
- Low frequency gravitational waves probed by Phase-II TOBA
- Estimation method of the mass of a neutron star using continuous gravitational waves
- Non-gaussianity in gravitational wave data analysis

26 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 also collaborate with other fusion experiments in Japan and abroad, including JT-60SA, LHD, LATE, QUEST, Alcator C-Mod (US), and MAST (UK).

In FY2015, non-inductive plasma start-up experiments were performed using the capacitively-coupled combline (CCC) antenna on TST-2. The antenna was developed in collaboration with General Atomics (US). With a small increase in the toroidal field and installation of the top and bottom limiters, plasma current ramp-up up to 25 kA has been achieved. Since the maximum plasma current is strongly correlated with the toroidal magnetic field, increasing the toroidal field coil power supply is necessary for further current ramp-up. A new top-launch antenna was developed for better wave accessibility to the plasma core at higher density. The antenna was installed at the end of FY2015, and plasma current ramp-up up to 13 kA has been achieved so far.

The hard X-ray detector using APD to read out the NaI scintillation light was developed. Energy resolution was better than the previously used system with a photo-multiplier. Soft X-ray emission profile was measured using a photo-diode array. It was inferred that the power absorption profile shifted to the plasma edge at higher density. Copper impurity radiation from CCC antenna current straps was observed but the radiated power was found not to be substantial. The electron density profile was evaluated with the horizontal interferometer chords. It was found that significant parasitic ionization exists around $z = 200$ mm when the plasma current is above 10–15 kA.

An LHW plasma configuration at $I_p=9$ kA was numerically investigated using MEGA, a non-linear magneto-hydrodynamic (MHD) solver to describe the bulk plasma in combination with a full-f particle method. The distribution function f provided by a coupled GENRAY/CQL3D simulation or tailored functions based on semi-empirical analytic distribution functions was used for the initial condition. The resulting time averaged pressure and temperature distributions were compared to the outcome of a three-fluid-equilibrium code [6] and a qualitatively and quantitatively satisfying agreement was obtained. However, the time-dependent electric fields that show modal structures will require in-depth analysis.

Inductively formed TST-2 plasmas were studied using a Rogowski probe. The sheath generated inside the probe was found to increase the width of the angular current profile. It was found that, during IRE events, the local current reverses direction at the plasma edge.

A multi-pass Thomson scattering system is being developed to measure electron temperature and density in low density plasmas created by LHW. A ten-fold increase in the scattered signal was observed after optimization of the optical system.

A microwave scattering diagnostic is being developed for direct measurement of the lower-hybrid waves. The system will be installed in FY2016.

As a collaboration, Thomson scattering of RF driven steady-state plasmas is being developed on the QUEST spherical tokamak at Kyushu University. Using a laser pulse timing system, compact torus injection experiments were investigated.

Waves in the ion cyclotron range of frequencies (ICRF) in LHD plasmas were measured using a microwave reflectometer. The system was extended for two microwave frequencies. The analysis of the relative phases at the two points showed an inward propagating fluctuation. When the absorption was weak, a standing wave structure was observed.

27 Sano Group

Research Subjects: Physics of out-of-equilibrium systems and living matter

Member: Masaki Sano and Tetsuya Hiraiwa

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) statistical mechanics in which non-equilibrium fluctuations overwhelm the thermal effects, (ii) active matters, as characteristic phenomena in far-from-equilibrium systems, (iii) biological systems, as important instances where non-equilibrium dynamics takes the essential role. Our current research topics include:

1. Statistical mechanics out of equilibrium
 - (1) Universality in transition to turbulence [8]
 - (2) Non-equilibrium fluctuation of a growing surface
 - (3) Rheology of a non-Brownian suspension [9]
2. Active matters
 - (1) Helical motion of a chiral liquid crystal droplet
 - (2) Collective motion of self-driven colloidal particles [3]
 - (3) Collective motion of filamentous proteins
 - (4) Long-range order and giant number fluctuation in collective motion of bacteria
3. Biological systems
 - (1) Traction force of collectively migrating neural stem cells
 - (2) Theory on mechanics of cellular dynamics and morphogenesis [5, 2, 10]

References

- [1] S. Toyabe and M. Sano: Nonequilibrium Fluctuations in Biological Strands, Machines, and Cells, *Journal of the Physical Society of Japan* **84**, 102001/1-17 (2015).
- [2] K. Sato, T. Hiraiwa and T. Shibata: Cell chirality induces collective cell migration in epithelial sheets, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 118102 (2015).
- [3] D. Nishiguchi and M. Sano: Mesoscopic Turbulence and Local Order in Janus Particles Self-Propelling under an AC Electric Field, *Phys. Rev. E*, **92**, 052309 (2015).
- [4] H. Ebata and M. Sano: Model of heap formation in vibrated gravitational suspensions, *Phys. Rev. E* **92**, 053016 (2015).
- [5] K. Sato, T. Hiraiwa, E. Maekawa, A. Isomura, T. Shibata, and E. Kuranaga, Left-right asymmetric cell intercalation drives directional collective cell movement in epithelial morphogenesis, *Nat. Comm.* **6**, 10074 (2015).
- [6] T. Ohta: Interfacial Instability and Pattern Formation, *Forma* **30**, S59-S61 (2015).
- [7] T. Ohta, M. Tarama and M. Sano: Simple model of cell crawling, *Physica D*, **318**, 3-11 (2016).
- [8] M. Sano and K. Tamai: A universal transition to turbulence in channel flow, *Nat. Phys.* **12**, 249 (2016).
- [9] J. J. Molina, K. Otomura, H. Shiba, H. Kobayashi, M. Sano, and R. Yamamoto: Rheological evaluation of colloidal dispersions using the smoothed profile method: formulation and applications, *J. Fluid Mech.* **792**, 590-619 (2016).
- [10] T. Hiraiwa and G. Salbreux: Role of turnover in active stress generation in a filament network, *Phys. Rev. Lett.*, in press (2016).

28 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 a astrochemical viewpoint.

Since the temperature of a molecular cloud is as low as 10 K, an only way to explore its physical structure and chemical composition is to observe the radio wave emitted from atoms, molecules, and dust particles. In particular, there exist a number of atomic and molecular lines in the millimeter to terahertz region, and we are observing them with various large radio telescopes including ALMA.

We are conducting a line survey of low-mass star forming regions with Nobeyama 45 m telescope and ASTE 10 m telescope, aiming at detailed understanding of chemical evolution from protostellar disks to protoplanetary disks. In the course of this effort, we have recently established a new chemistry occurring in the vicinity of a newly born star, which is called Warm Carbon Chain Chemistry (WCCC). In WCCC, carbon-chain molecules are produced by gas phase reactions of CH_4 which is evaporated from ice mantles. This has recently been confirmed by our detection of CH_3D in one of the WCCC sources, L1527. Existence of WCCC clearly indicates a chemical diversity of low-mass star forming regions, which would probably reflect a variety of star formation. We are now studying how such chemical diversity is brought into 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 ^{13}CO $J = 8 - 7$ 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.

29 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) Photoelectron diffraction from laser-aligned molecules with X-ray free-electron laser pulses [1]

We report on the measurement of deep inner-shell $2p$ X-ray photoelectron diffraction (XPD) patterns from laser-aligned I_2 molecules using X-ray free-electron laser (XFEL) pulses. The XPD patterns of the I_2 molecules, aligned parallel to the polarization vector of the XFEL, were well matched with our theoretical calculations. Further, we propose a criterion for applying our molecular-structure-determination methodology to the experimental XPD data. In turn, we have demonstrated that this approach is a significant step toward the time-resolved imaging of molecular structures.

This work was done as a collaborative study with researchers from KEK, Ritsumeikan University, Japan Atomic Energy Agency, Chiba University, Kyoto University, Riken SPring-8 Center, and Japan Synchrotron Radiation Research Institute.

(2) Laser-field-free three-dimensional molecular orientation [2]

Laser-field-free three-dimensional orientation, corresponding to the complete control of spatial directions of asymmetric top molecules, is achieved with combined weak electrostatic and elliptically polarized laser fields with an 8-ns turn on and a 150-fs turn off, which is shaped by a plasma shutter. Rotationally cold 3,4-dibromothiophene molecules are used as a sample and their lower-lying rotational states are selected by a molecular deflector to increase the degrees of orientation. After the rapid turn off of the pump pulse, higher degrees of orientation are maintained for 5-10 ps, which is long enough for various applications including electronic stereodynamics in molecules with femtosecond pulses. It is found that the dynamics after the rapid turn off of the pump pulse is very sensitive to the intensity of the pump pulse.

[1] Kyo Nakajima, Takahiro Teramoto, Hiroshi Akagi, Takashi Fujikawa, Takuya Majima, Shinichirou Minemoto, Kanade Ogawa, Hirofumi Sakai, Tadashi Togashi, Kensuke Tono, Shota Tsuru, Ken Wada, Makina Yabashi, and Akira Yagishita, "Photoelectron diffraction from laser-aligned molecules with X-ray free-electron laser pulses," *Sci. Rep.* **5**, 14065; doi: 10.1038/srep14065 (2015).

[2] Daisuke Takei, Je Hoi Mun, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Laser-field-free three-dimensional molecular orientation," to appear in *Phys. Rev. A*.

30 Nakazawa Group

Research Subjects: High-energy astrophysics, mainly utilizing X-ray observatories in orbit. Targets are, black-holes, neutron-stars, magnetars, white dwarf, cluster of galaxies, as well as thunder-cloud gamma-rays.

Member: Lecturer: Kazuhiro Nakazawa, Post doctoral fellow: Zhongli Zhang

We analyze the X-ray data of, neutron star high-mass X-ray binaries, neutron star low-mass X-ray binaries, magnetars, and associated supernova remnants. Also black-hole binaries, active galactic nuclei, as well as Ultra-Luminous X-ray sources, are analyzed. White dwarf binaries are also important. Clusters of galaxies, especially in its merging phase, are also important target for us.

For further better observations, we are also developing a new generation X-ray satellite. Hitomi, the Japanese 6th X-ray satellite, was successfully launched on 17 Feb. Its initial observation was performed before the incident on 26 March. Now we lose contact to it, and trying to resume it as soon as possible. We also work on more future development, the FORCE mission.

We are also working on the enigmatic MeV gamma-ray emission from thunder-clouds itself.

- [1] Kato, Y., Nakazawa, K., Gu, Li., Akahori, T., Takizawa, M., Fujita, Y., & Makishima, K.: “Discovery of a nearby early-phase major cluster merger CIZA J1358.9–4750”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **67**, id.71 (2015)
- [2] Nakano, T., Murakami, H., Makishima, K. Hiraga, J. S., Uchiyama, H., Kaneda, H., & Enoto, T.: “Suzaku studies of the supernova remnant CTB 109 hosting the magnetar 1E 2259+586”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **67**, id. 9 (2015)
- [3] Okabe, N., Umetsu, K., Tamura, et al. : “Central mass profiles of the nearby cool-core galaxy clusters Hydra A and A478”, *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* **456**, 4475–4487 (2015)
- [4] D. Umemoto, H. Tsuchiya, T. Enoto, et al. : “On-ground detection of an electron-positron annihilation line from thunderclouds”, *Phys. Rev. E* **93**, 021201(R) (2016)
- [5] Miyake, K., Noda, H., Yamada, S., Makishima, K., & Nakazawa, K.: “The New Primary X-ray Component Confirmed in the Seyfert I Galaxy IC 4329A”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **68**, in press (2016)
- [6] Ono, K., Sakurai, S., Zhang, Z., Nakazawa, K., & Makishima, K.: “A Suzaku observation of the low-mass X-ray binary GS 1826-238 in the hard state”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **68**, in press (2016)
- [7] Nakazawa, K., Kato, Y., Gu, L., Kawaharada, M., Takizawa, M., Fujita, Y., & Makishima, K.: “Suzaku observation of a high-entropy cluster Abell 548W”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **68**, in press (2016)
- [8] Makishima, K., Enoto, T., Murakami, H., Furuta, Y., Nakano, T., Sasano, M., & Nakazawa, K.: “Evidence for a 36 ks phase modulation in the hard X-ray pulses from the magnetar 1E 1547.0–5408”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **68**, in press (2016)
- [9] Zhang, Z., Sakurai, S., Makishima, K., Nakazawa, K., Ono, K., Yamada, S., & Xu, H.: “Suzaku Observation of the High-Inclination Binary EXO 0748-676 in the Hard State”, *Astrophys. J.*, in press (2016)
- [10] Gu, L., Wen, Z., Gandhi, P., Inada, N., Kawaharada, M., Kodama, T., Konami, et al. “Galaxy Infall by Interacting with its Environment: a Comprehensive Study of 340 Galaxy Clusters”, *Astrophys. J.*, in press (2016)
- [11] S. Kobayashi, K. Nakazawa & K. Makishima, “A New Characterization of the Compton Process in the ULX Spectra”, *Astronomische Nachrichten*, (2016) in press

31 Gonokami, Yumoto and Yoshioka 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, Junji Yumoto and 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. 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. This is one of the Advanced Research Foundation initiatives from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. Within this initiative, we are developing intense and stable coherent light sources at a high repetition rate (That facility is named "Photon Ring").

This year the following activities were done:

1. The quest for macroscopic quantum phenomena in photo-excited systems:
 - 1.1. Systematic study of the Bose-Einstein condensation transition of excitons using a dilution refrigerator
 - 1.2. Preparation of new quantum many-body systems using ultra-cold atomic gases and their application to nuclear physics
2. The quest for non-trivial optical responses and development of applications:
 - 2.1. Development of active terahertz polarization control device using MEMS spiral metamaterials
 - 2.2. Development of high-sensitivity terahertz camera
 - 2.3. Control of antiferromagnetic domain distribution via optical annealing
 - 2.4. Investigation of laser-breakdown process in wide band-gap dielectric materials
3. Development of novel coherent light sources and spectroscopic methods:
 - 3.1. VUV precision spectroscopy using higher-order harmonics
 - 3.2. Laser-based angle resolved photoemission spectroscopy
 - 3.3. "Photon ring" project
 - 3.4. Institute for Photon Science Technology

References

- [1] K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami: Absorption imaging of trapped 1s paraexcitons in bulk Cu_2O , *Phys. Rev. B* **91**, 195207 (2015).
- [2] T. Ishikawa, A. A. Eilanlou, Y. Nabekawa, Y. Fujihira, T. Imahoko, T. Sumiyoshi, F. Kannari, M. Kuwata-Gonokami, and K. Midorikawa: Kerr lens mode-locked $\text{Yb}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ bulk ceramic oscillator pumped by a multi-mode laser diode, *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 072703 (2015).
- [3] A. Ozawa, Z. Zhao, M. Kuwata-Gonokami, and Y. Kobayashi: High average power coherent vuv generation at 10 MHz repetition frequency by intracavity high harmonic generation, *Optics Express* **23**, 15107 (2015).
- [4] T. Kan, A. Isozaki, N. Kandam N. Nemoto, K. Konishi, H. Takahashi, M. Kuwata-Gonokami, K. Matsumoto, and I. Shimoyama: Enantiomeric switching of chiral metamaterial for terahertz polarization modulation employing vertically deformable MEMS spirals, *Nature Communications* **6**, 8422(2015).
- [5] N. Nemoto, N. Kanda, R. Imai, K. Konishi, M. Miyoshi, S. Kurashina, T. Sasaki, N. Oda, and M. Kuwata-Gonokami: High-Sensitivity and Broadband, Real-Time Terahertz Camera Incorporating a Micro-Bolometer Array With Resonant Cavity Structure, *IEEE TRANSACTIONS ON TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY* **6**, 175 (2016).
- [6] T. Higuchi and M. Kuwata-Gonokami: Control of antiferromagnetic domain distribution via polarization-dependent optical annealing, *Nature Communications* **7**, 10720 (2016).

32 Ando Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Gravitational Wave, Laser Interferometer

Member: Masaki Ando and Yuta Michimura

In February 2016, the LIGO gravitational-wave observatory announced detection of a gravitational-wave signal. The new field of gravitational-wave astronomy was opened. Gravitational waves have a potential to open a new window onto the Universe and bring us a new type of information about catastrophic events such as supernovae or coalescing binary neutron stars or binary black holes; this 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 and improve detectors.

In Japan, we are constructing a large-scale cryogenic gravitational-wave antenna, named KAGRA (former LCGT). 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.

The current research topics in our group are followings:

- KAGRA gravitational wave detector
 - Construction and test observation run
 - Optical design of the interferometer
- Space laser interferometer, DECIGO
- Development of TOBA (Torsion Bar Antenna)
 - A new type sensor for TOBA
 - Design and development of the next generation TOBA
- Development of the ultra stable laser source using cryogenic cavity
- High-precision experiments on relativity and opto-mechanics
 - Opto-mechanics experiments with triangular cavity
 - Optical levitation experiments
 - Experimental study of space isotropy

Reference

- [1] Kazunari Eda, Ayaka Shoda, Yuya Kuwahara, Yousuke Itoh and Masaki Ando: All-sky coherent search for continuous gravitational waves in 6-7 Hz band with a torsion-bar antenna, Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 011F01.
- [2] N. Matsumoto, K. Komori, Y. Michimura, G. Hayase, Y. Aso, K. Tsubono: 5-mg suspended mirror driven by measurement-induced backaction, Phys. Rev. A, 92, 033825 (2015).
- [3] K. Okutomi, T. Akutsu, M. Ando, et al.: Residual Gas Noise in the Test-mass Module for DECIGO Pathfinder Journal of Physics Conference Series 610 (2015) 012040.

33 Nose Group

Research Subjects: Formation and function of neural networks

Member: Akinao Nose and Hiroshi Kohsaka

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.A circuit mechanism for the propagation of waves of muscle contraction in *Drosophila* larvae.

Animals move by adaptively coordinating the sequential activation of muscles. The circuit mechanisms underlying coordinated locomotion are poorly understood. In this study, we revealed a novel circuit for the propagation of waves of muscle contraction, using the peristaltic locomotion of *Drosophila* larvae as a model system. We found an intersegmental chain of synaptically connected neurons, alternating excitatory and inhibitory, necessary for wave propagation and active in phase with the wave. The excitatory neurons (A27h) are premotor and necessary only for forward locomotion, and are modulated by stretch receptors and descending inputs. The inhibitory neurons (GDL) are necessary for both forward and backward locomotion, suggestive of different yet coupled central pattern generators, and its inhibition is necessary for wave propagation. The circuit structure and functional imaging indicated that the commands to contract one segment promote the relaxation of the next segment, revealing a mechanism for wave propagation in peristaltic locomotion. (Collaboration with Drs. Cardona A, Zwart MF, and Fetter RD at the Janelia Research Institute in the USA)

2. Identification of Inhibitory Premotor Interneurons Activated at a Late Phase in a Motor Cycle during *Drosophila* Larval Locomotion.

Rhythmic motor patterns underlying many types of locomotion are thought to be produced by central pattern generators (CPGs). We use the motor circuitry underlying crawling in larval *Drosophila* as a model to try to understand how segmentally coordinated rhythmic motor patterns are generated. We reported on the identification of a distinct class of glutamatergic premotor interneurons called Glutamatergic Ventro-Lateral Interneurons (GVLIs). We used calcium imaging to search for interneurons that show rhythmic activity and identified GVLIs as interneurons showing wave-like activity during peristalsis. Optogenetic activation of GVLIs with the red-shifted channelrhodopsin, CsChrimson ceased ongoing peristalsis in crawling larvae. Simultaneous calcium imaging of the activity of GVLIs and motoneurons showed that GVLIs' wave-like activity lagged behind that of motoneurons by several segments. Thus, GVLIs are activated when the front of a forward motor wave reaches the second or third anterior segment. We propose that GVLIs are part of the feedback inhibition system that terminates motor activity once the front of the motor wave proceeds to anterior segments. (Collaboration with Drs. Pulver SR Zlatic M, and Ohyama T at the Janelia Research Institute in the USA)

References

- [1] Itakura Y, Kohsaka H, Ohyama T, Zlatic M, Pulver SR, Nose A.: Identification of Inhibitory Premotor Interneurons Activated at a Late Phase in a Motor Cycle during *Drosophila* Larval Locomotion. *PLoS One* (2015) 10(9): e136660
- [2] Fushiki A, Zwart MF, Kohsaka H, Fetter RD, Cardona A, Nose A.: A circuit mechanism for the propagation of waves of muscle contraction in *Drosophila*. *eLife* (2016) 5. pii: e13253
- [3] Thoma V, Knappek S, Arai S, Hartl M, Kohsaka H, Sirigrivatanawong P, Abe A, Hashimoto K, Tanimoto H. Functional dissociation in sweet taste receptor neurons between and within taste organs of *Drosophila*. *Nature Communications* (2016) 7:10678

34 Higuchi Group

Research Subjects: Motor proteins in in vitro, cells and mice

Member: Hideo Higuchi and Motoshi Kaya

Works of Purified single molecule

1. Kinesin is a molecular motor which carries cargo such as organelles moving along microtubules unidirectionally using ATP hydrolysis energy in a cell. The mechanisms determining the moving direction remain unknown. Here we have established optical tweezers system in order to detect the displacement generated by the conformational change of the neck linkers, which is an essential for kinesin's unidirectional movement. Then we determined the energy gap between two conformations. The displacement of 5.1nm is consistent with that estimated by kinesin crystal structure. Unexpectedly the energy gap between two conformations of 0.9kBT was considerably smaller than the mechanical work produced by single kinesin motor.

2. Cytoplasmic dynein is a motor protein moving along microtubules toward the minus-end with the energy of ATP hydrolysis in cellular processes. Dynein's large conformational change, called power stroke, is assumed to generate driving forces moving along the microtubule. First, we predicted that the rate-limiting states were on both ATP+Pi and non-nucleotide states, evaluated from the difference value of the FRET efficiency. Then, we measured the distance driven by dynein's power stroke and the dwell time that single-headed human cytoplasmic dynein binds to a microtubule with optical tweezers. The ATP concentration dependence of dwell time can be definitely consistent with the two rate-limiting states with chemical reaction rate constants. Taken it into consideration, the distance by dynein also depends on ATP concentration. We concluded that we found new knowledge of the detailed mechanochemical cycle of human cytoplasmic dynein by quantitative evaluation experiments.

3. To understand the molecular mechanism of cooperative force generation between skeletal myosin molecules, we measured forces generated by synthetic myofilaments, in which approximately 17 myosin molecules interact with an single actin filament. Optical tweezers was used to measure forces generated by myosins, providing stepwise actin displacements, which imply that forces are generated by synchronous actions of active myosin motors. Combined with results from the computational model, three factors are important for synchronization of power strokes (i.e., conformational changes in myosin head during force generations) between myosin motors. First, strain-dependent kinetics are necessary to couple mechanochemical cycles between myosins. Second, multiple power stroke states further enhance a chance of power stroke synchronization. Finally, the physiological ATP concentration is another important factor to enhance a chance of power stroke synchronization. Our findings reveal how molecular properties of skeletal myosin are specifically tuned to cooperative force generations and its ensemble effects towards efficient muscle contractions

Cell works

1. Brain tumor stem cells (BTSCs) are recent topics in cancer science because it showed distinctive characteristics such as high resistance to radiotherapy and chemotherapy, invasion, metastasis, multiline age and self-renewal potential. For removing the brain tumor, the therapy resistance of BTSCs should be evaluated and compared with normal tumor cells. Thus, we selectively damage BTSCs and normal tumor cells by laser activation of near-infrared dyes. We observed the dynamics of membrane proteins and intracellular granules of the damaged cells with a confocal microscope. The motility of membrane proteins and granules in damaged BTSCs was more accelerated than that of normal tumor cells, suggesting that dynamics of proteins would be a key property in therapy resistance of BTSCs.

2. Sarcomere is an essential unit of cardiomyocyte. It is well known that sarcomere has three state (i.e. contraction, relaxation and spontaneous oscillation state) dependent of the solution condition. In intact cardiomyocytes, we found hyperthermal sarcomeric oscillations (HSOs) that is Ca-ion independent and high-frequency (5-10 Hz) auto-oscillations induced by a rapid increase in temperature to ≥ 38 o C. This finding suggest that the temperature shift the state from relaxation to oscillation. We found that the HSOs was occurred in skinned cardiac myofibrils. The skinned myofibrils are suitable for exchanging chemical compounds and proteins. Therefore using this system, we will understand the molecular aspect of HSOs.

III

2015年度 物理学教室全般に関する報告

1 学部講義概要

1.1 2年生 A セメスター

1.1.1 電磁気学 I : 早野 龍五

1. 特殊相対性理論

- 1.1 ニュートン力学とガリレイの相対性
- 1.2 ガリレイの相対性と電磁気
- 1.3 光速
- 1.4 ローレンツ変換
- 1.5 ローレンツ変換のいくつかの帰結
- 1.6 ユークリッド空間とミンコフスキー空間
- 1.7 4元速度
- 1.8 エネルギー運動量ベクトル
- 1.9 4元加速度と4元力

1.10 ローレンツ力

2. SI 単位系

- 2.1 SI 単位系と秒の定義の変遷
- 2.2 m の定義の変遷
- 2.3 kg 原器の問題点
- 2.4 kg 原器の廃止に向けて

3. 静電場

- 3.1 自然界の4つの力
- 3.2 クーロンの法則
- 3.3 重ね合わせの原理
- 3.4 保存力
- 3.5 電場、電気力線
- 3.6 Gauss の法則
- 3.7 静電エネルギー
- 3.8 Maxwell の応力
- 3.9 静電ポテンシャル
- 3.10 Laplace 方程式と Earnshaw の定理
- 3.11 Poisson 方程式

4. 静電場中の導体

- 4.1 導体
- 4.2 導体表面の電場
- 4.3 鏡映法

4.4 静電容量

4.5 平行平板コンデンサー

4.6 静電エネルギー

4.7 電流・電流密度

4.8 電荷の保存

4.9 電気伝導度

4.10 ジュール熱

4.11 キルヒホッフの法則と直流回路

5. 静磁場

5.1 磁気単極子は存在しない

5.2 ローレンツ力

5.3 直線電流が作る磁場

5.4 2本の平行な直線電流に働く力

5.5 磁場の発散と回転

5.6 アンペールの法則

5.7 ベクトルポテンシャル

5.8 ゲージ

5.9 ビオ・サバルの法則

5.10 磁気エネルギー

6. 時間とともに変化する電磁場

6.1 磁場中を運動する導体棒

6.2 誘導電流

6.3 ファラデーの法則

6.4 インダクタンス

6.5 変位電流

6.6 Maxwell 方程式

6.7 真空中の Maxwell 方程式の解

6.8 ポインティングベクトル

6.9 電磁波の運動量

7. Maxwell 方程式の相対論的共変性

7.1 共変ベクトルと反変ベクトル

7.2 ローレンツ共変性とは

7.3 電磁テンソル

- 7.4 電磁テンソルのローレンツ変換
- 7.5 Maxwell 方程式の相対論的共変性
- 7.6 電磁テンソルとローレンツ力

8. 物質中の電磁場

- 8.1 誘電体と分極
- 8.2 電束密度、誘電率、分極率

- 8.3 物質中の静電場の法則
- 8.4 電場と電束密度の境界条件
- 8.5 磁性体
- 8.6 物質中の静磁場の法則
- 8.7 物質中の Maxwell 方程式
- 8.8 誘電体中の電磁波

1.1.2 解析力学：吉田 直紀

- 1 ニュートンの法則からラグランジュ形式へ
- 2 ラグランジュ方程式とその応用
- 3 最小作用の原理

- 4 対称性と保存則
- 5 ハミルトン形式と正準変換
- 6 ハミルトン-ヤコビの偏微分方程式

1.1.3 量子力学 I：村尾 美緒

- 1 量子力学の導入と波動関数
- 2 シュレディンガー方程式と定常状態
- 3 矩形ポテンシャルとトンネル効果

- 4 調和振動子と不確定性原理
- 5 ヒルベルト空間と状態ベクトル
- 6 ハミルトニアン動力学と量子測定

1.1.4 物理実験学：福山 寛, 山本 智

自然科学の最先端は日々進化し、融合し続けている。その発展の礎には物理学の法則とそれを利用した新しい実験技術や装置の開発がある。物理学は実証科学であり、新しい物理概念は実験で検証される必要がある。また多くの物理法則が実験から見出されてきた。ここでは、物理学の発展に寄与した歴史的な実験から最先端の実験も紹介しつつ、物理実験に必要な基礎知識（単位、実験技術、誤差論、レポート作成法など）を講義する。

1. 序論

- 1.1 物理実験の魅力（歴史的実験から最先端実験まで）

2. 単位

- 2.1 SI 基本単位の定義
- 2.2 各種の常用単位系とその変換

3. 基礎物理定数と標準

- 3.1 基礎物理定数（プランク定数、ボルツマン定数など）

- 3.2 標準（時間、質量、電流、電圧、電気抵抗）

4. 基礎的な実験技術

- 4.1 実験（真空、低温、磁場）
- 4.2 実験環境と安全（実験室実験、フィールド実験、飛翔体実験など）
- 4.3 測定法（電氣的・磁氣的・熱的物性測定、X線回折、分光測定など）
- 4.4 試料作成（単結晶、薄膜、ナノ構造など）

5. 誤差論

- 5.1 実験誤差
- 5.2 確率統計
- 5.3 実験データの解析

6. 実験レポートや論文の作成法と研究倫理

- 6.1 レポート・論文の目的と構成
- 6.2 研究倫理

1.1.5 物理数学 I：常行 真司

1. 複素関数の性質

複素平面、複素関数、リーマン面、初等関数と収束半径、対数関数とべき乗関数、無限乗積

コーシー・リーマンの関係式、調和関数

2. 複素関数の微分と正則性

3. 複素積分

定義と性質、コーシーの積分定理

- 4. コーシーの積分公式とその応用
コーシーの積分公式、テーラー展開、ローラン展開、特異点と留数、解析接続、 δ 関数と主値積分
- 5. 等角写像
- 6. ガンマ関数
- ガンマ関数、スターリングの公式、漸近展開
- 7. フーリエ級数とフーリエ変換の基礎
固有関数展開、フーリエ級数、フーリエ変換
- 8. 常微分方程式
常微分方程式の基本概念、解の存在と一意性、1階常微分方程式の初等的解法、定数係数をもつ2階の線形微分方程式の解法

1.1.6 物理数学 II : 桂 法称

- 1. 偏微分方程式とフーリエ解析
 - 1.1 計量線形空間と直交関数系
 - 1.2 フーリエ級数とフーリエ変換
 - 1.3 2階線形偏微分方程式
 - 1.4 フーリエ級数・変換の応用
- 2. 直交多項式
 - 2.1 直交多項式の一般論と具体例
 - 2.2 直交多項式の満たす漸化式
- 2.3 微分方程式と代数的解法
- 2.4 ルジャンドル陪関数と球面調和関数
- 2.4 球面調和関数と角運動量
- 3. 超幾何関数
 - 3.1 確定特異点型微分方程式
 - 3.2 ガウスの超幾何関数
 - 3.3 合流型超幾何関数
 - 3.4 ベッセル関数

1.2 3年生 S セメスター

1.2.1 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

1.2.2 量子力学 II : 立川 裕二

- 0. はじめに
- 1. 角運動量
 - 1.1 軌道角運動量
 - 1.2 角運動量演算子の固有状態
- 1.3 角運動量の固有状態を座標表示すると球面調和関数
- 1.4 角運動量の合成と Clebsch-Gordan 係数
- 1.5 スピン
- 1.6 $s=1/2$ のとき : パウリ行列

2. 球対称ポテンシャル内での粒子

- 2.1 この章でやること
 - 2.2 球対称ポテンシャルのとき、ハミルトニアンと角運動量は可換
 - 2.3 動径方向
 - 2.4 水素原子
- 3. スピンと磁気モーメント**
- 3.1 一様磁場中のループ電流
 - 3.2 角運動量と磁気モーメント
 - 3.3 LS 結合
 - 3.4 これまでの話を全部合わせると …
 - 3.5 一様磁場中のスピン

4. 様々な近似法

- 4.1 摂動論 (定常状態)
 - 4.2 摂動論 (時間発展)
 - 4.3 準古典近似 (WKB 近似)
- 5. 対称性と保存則**
- 5.1 運動量 p は並進、角運動量 L は回転の生成子
 - 5.2 ユニタリー演算子とエルミート演算子
 - 5.3 対称性と保存則
 - 5.4 保存量
 - 5.5 対称性
- 6. オマケ**

1.2.3 現代実験物理学 I : (前半) 松田 巖, (後半) 樋口 秀男**1. 物性実験**

- 1.1 真空技術
- 1.2 表面物理学
- 1.3 電子を用いた実験

1.4 X線を用いた実験**2. 一般物理学**

- 2.1 レーザー物理学
- 2.2 非平衡系物理学・生物物理学

1.2.4 流体力学 : 江尻 晶

これまで学習した古典力学, ベクトル解析, 複素関数, 偏微分方程式を踏まえつつ, 流体の基礎的な扱い方を講義する。また, 電磁気学との関連性, さまざまな応用についても触れる。

1. 様々な流体**2. 流体の基礎方程式**

- 2.1 流体を特徴づける量
- 2.2 連続の式
- 2.3 力と運動方程式
- 2.4 粒子の方程式から流体の方程式へ
- 2.5 渦度と渦度方程式

3. 関数による流れの表現

- 3.1 ポテンシャル流
- 3.2 複素速度ポテンシャル式

3.2 揚力**3. 粘性流**

- 3.1 レイノルズ数
- 3.2 ストークス近似
- 3.3 一様等方乱流とコルモゴロフ則
- 3.4 フラクタルによる乱流の表現

4. 水波

- 4.1 長い波
- 4.2 表面波
- 4.3 表面張力波

5. 不安定性波

- 5.1 安定・不安定
- 5.2 ケルビン・ヘルムホルツ不安定性
- 5.3 レイリー・テイラー不安定性

1.2.5 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、黒体輻射)
- 3.6 ボース・アインシュタイン凝縮

1.2.6 計算機実験 : 藤堂 眞治

- 1. UNIX の基礎・C 言語・LaTeX・バージョン管理システム
- 2. 数値誤差・数値積分・ニュートン法
- 3. 常微分方程式
- 4. 連立一次方程式
- 5. 特異値分解・画像圧縮・回帰分析
- 6. 最適化問題
- 7. 乱数・モンテカルロ積分・マルコフ連鎖モンテカルロ
- 8. スパコンと計算物理

1.3 3年生 A セメスター

1.3.1 物理数学 III: 上田 正仁

- 1. 群論の基礎
- 2. 表現論
- 3. リー群の基礎
- 4. リー群と多様体
- 5. ルートとウエイト
- 6. 微分形式
- 7. ベクトル解析の諸公式の導出
- 8. 多様体上の積分
- 9. 閉形式と完全微分
- 10. 微分形式の応用

1.3.2 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
 - 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
- 3. 非平衡場の量子論入門
 - 3.1 Wigner 関数の性質
 - 3.2 Schwinger-Keldysh 形式

1.3.3 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

1.3.4 現代物理実験学 II： 駒宮幸男、安東正樹

- 1. 素粒子・原子核・宇宙物理学の基礎
 - 1.1 宇宙と素粒子
 - 1.2 粒子と物質の相互作用
 - 1.3 断面積と崩壊率
 - 1.4 粒子検出器
 - 1.5 加速器
 - 1.6 今後の展開
- 2. 物理実験における統計的データ解析
 - 2.1 物理実験と統計学
 - 2.2 基本的な統計量・確率分布
 - 2.3 統計モデルの応用
 - 2.4 パラメータ推定
 - 2.5 仮説検定
 - 2.6 モンテカルロ法とベイズ統計

1.3.5 電磁気学 III： 櫻井 博儀

- 1. 電磁波の基礎
 - 1.1 自由電磁場とその性質
- 2. 電磁波の放射
 - 2.1 遅延ポテンシャルと先進ポテンシャル
 - 2.2 遅延ポテンシャルの多重極展開
- 3. 荷電粒子の出す電磁波
 - 3.1 リエナール-ヴィーヘルトのポテンシャル
 - 3.2 運動する荷電粒子の作る電磁波
- 3.3 制動放射
- 3.4 点電荷による電磁波の散乱
- 3.5 チェレンコフ放射
- 4. 電磁波の伝播
 - 4.1 導波管
 - 4.2 空洞共振器
 - 4.3 電磁波の回折
- 5. 電磁場の角運動量

1.3.6 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 | 5. 遺伝子操作技術 |
| 2. 遺伝情報の流れ | 6. ゲノム科学とバイオインフォマティクス |
| 3. 蛋白質の構造と機能 | 7. バイオイメージング、生体分子計測 |
| 4. 細胞内タンパク質のダイナミクス | 8. 脳・神経系の生物物理 |

1.3.7 統計力学 II : 小形 正男

- | | |
|-------------------|-------------------------|
| 1. 相転移現象 | 2. 非平衡統計力学 |
| 1.0 イントロダクション | 2.1 応答関数とゆらぎ |
| 1.1 気体-液体相転移 | 2.2 線形応答理論 |
| 1.2 相転移：対称性の自発的破れ | 2.3 種々の輸送係数 |
| 1.3 スピン系の統計力学 | 2.4 ブラウン運動とアインシュタインの関係式 |
| 1.4 平均場近似 | 2.5 ランダム・ウォーク |
| 1.5 イジングモデル | 2.6 拡散方程式 |
| 1.6 ランダウの2次相転移理論 | 2.7 境界のある場合の拡散方程式 |
| 1.7 スケーリング理論 | 2.8 ランジュバン方程式 |
| 1.8 くりこみ群の基礎 | |

1.4 4年生 S セメスター

1.4.1 場の量子論 I : 松尾 泰

- | | |
|---------------------------|-------------------------------|
| 1. 相対論的量子力学 | 2.1 場の正準量子化 |
| 1.1 Lorentz 変換とその表現 | 2.2 Klein-Gordon, Dirac 場の量子化 |
| 1.2 Klein-Gordon 方程式 | 2.3 電磁場の量子化 |
| 1.3 Dirac 方程式 | 2.4 S 行列 |
| 1.4 対称性と保存量 : Noether の定理 | 2.5 相互作用描像 |
| 1.5 第二量子化とその必然性 | 2.6 Feynman 則 |
| 2. 場の量子化 | |

1.4.2 サブアトム物理学 : Kathrin Wimmer

- | | |
|--|---|
| 1. Global properties of the nucleus: mass and binding energy | 6. Nuclear structure models |
| 2. Radioactive decay | 7. Nuclear astrophysics |
| 3. Particle accelerators | 8. Quarks and gluons, strong interaction |
| 4. Particle and gamma-ray detectors | 9. The standard model of particle physics |
| 5. Scattering | 10. Neutrinos |

1.4.3 一般相対論 : 須藤 靖

1. 重力の世界

- 1.1 ニュートン重力の普遍性
- 1.2 物理学の方法論
- 1.3 講義の構成
- 2. 4次元時空とシュワルツシルド計量
 - 2.1 線素と計量
 - 2.2 シュワルツシルド時空の性質
 - 2.3 GPS とシュワルツシルド時空
- 3. 一般相対性原理とその数学的表現
 - 3.1 特殊相対論の限界: 慣性系とは? 重力は“力”か?
 - 3.2 一般相対論の概念構成
 - 3.3 物理量の表現: ベクトル
 - 3.4 ベクトルの基底と成分
 - 3.5 基底変換と座標変換
 - 3.6 ベクトルの微分
 - 3.7 接続係数の変換則
 - 3.8 物理量の表現: 双対ベクトル
 - 3.9 物理量の表現: テンソル
 - 3.10 まとめ: 物理量とテンソル
- 4. 測地線の方程式
 - 4.1 重力場のもとでの粒子の運動方程式
 - 4.2 ニュートン理論との対応
- 5. 重力場の方程式
 - 5.1 マッハの原理と重力場の方程式
 - 5.2 エネルギー運動量テンソル
 - 5.3 アインシュタイン方程式への道
 - 5.4 ニュートン理論との対応
 - 5.5 宇宙定数
 - 5.6 変分原理による定式化
 - 5.7 重力場: アインシュタイン-ヒルベルト作用
 - 5.8 物質場: エネルギー運動量テンソル
- 6. シュワルツシルド時空とブラックホール
 - 6.1 球対称重力場の計量
 - 6.2 シュワルツシルド解導出の概略
 - 6.3 シュワルツシルド解
 - 6.4 シュワルツシルド計量
 - 6.5 ブラックホールは観測できるか? エディントン光度
 - 6.6 天文学的ブラックホール
 - 6.7 一般相対論の検証
- 7. 相対論的宇宙モデル
 - 7.1 宇宙原理と宇宙の一様等方性
 - 7.2 ロバートソン・ウォーカー計量
 - 7.3 アインシュタイン方程式からフリードマン方程式へ
 - 7.4 宇宙の状態方程式
 - 7.5 アインシュタイン・ドジッター宇宙モデル
 - 7.6 フリードマン宇宙モデル
 - 7.7 宇宙論パラメータ
 - 7.8 宇宙の膨張則と宇宙の未来
 - 7.9 宇宙定数とダークエネルギー
 - 7.10 インフレーションシナリオ

1.4.4 宇宙物理学: 中澤 知洋

学部で学ぶ力学、電磁気学、相対論などを用いて、宇宙そのものや天体の特性を物理の言葉で理解することを目的とする。恒星や銀河、中性子星やブラックホール、ビッグバン宇宙と其中での物質進化を、観測の最前線を交えつつ議論する。

- 1. 重力と天体
 - 1.1 重力とケプラー回転
 - 1.2 自己重力系の基礎
- 2. 電磁放射の基礎
 - 2.1 黒体放射
 - 2.2 光子ガスの熱力学
- 3. 星の物理学
 - 3.1 星の熱力学
 - 3.2 主系列星のパラメータスケール
 - 3.3 星の内部の核反応
- 4. 星の進化と終末
 - 4.1 星の進化
 - 4.2 電子縮退した星: 白色わい星
 - 4.3 隠し縮退した星: 中性子星
- 5. ビッグバン宇宙論
 - 5.1 膨張宇宙の記述と宇宙論パラメータ
 - 5.2 物質の起源と宇宙の熱史
 - 5.3 ビッグバンにおける元素合成
 - 5.4 宇宙の晴れ上がり

1.4.5 プラズマ物理学：高瀬 雄一

0. プラズマとは？

1. 単一荷電粒子の運動

1.1 一様電磁場中の粒子ドリフト

1.2 非一様磁場中の粒子ドリフト

1.3 時間変化する電磁場中の粒子ドリフト

1.4 マッピング

2. 流体としてのプラズマ

2.1 プラズマの流体方程式

2.2 流体方程式と粒子ドリフトの関係

2.3 一流体電磁流体力学

2.4 電磁流体力学的平衡

3. プラズマ中の衝突過程

3.1 完全電離と非完全電離プラズマ

3.2 完全電離プラズマ中の衝突

3.3 プラズマの拡散

4. 流体プラズマ中の波動

4.1 非等方分散媒体中の小振幅波動

4.2 磁場のないプラズマ中の波動

4.3 磁場のあるプラズマ中の波動

5. 流体プラズマの不安定性

6. プラズマの運動論

6.1 ヴラソフ方程式

6.2 プラズマ波動の運動論的效果

6.3 速度空間不安定性と非線形理論

1.4.6 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

2.3 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

3. 低次元電子系の量子現象

5.1 量子ホール効果

5.3 電荷密度波

1.4.7 量子光学：酒井広文

1. 原子と放射の相互作用

1.1 時間に依存する Schrödinger 方程式

1.2 相互作用ハミルトニアン

1.3 遷移速度

1.4 B 係数の表式

1.5 光学 Bloch 方程式

1.6 Rabi 振動

1.7 放射広がり

1.8 飽和広がり

1.9 放射減衰を伴う Rabi 振動

1.10 衝突広がり

1.11 Doppler 広がり

1.12 合成吸収線の形状

2. 電磁場の量子化

2.1 古典電磁場のポテンシャル論

2.2 Coulomb ゲージ

- 2.3 自由古典場
- 2.4 量子力学的調和振動子
- 2.5 場の量子化
- 2.6 場の交換の性質
- 2.7 零点エネルギー
- 2.8 モード位相演算子
- 2.9 単一モード個数状態の物理的性質
- 2.10 コヒーレント光子状態
- 2.11 単一モードコヒーレント状態の物理的性質
- 3. 量子化した場と原子との相互作用
 - 3.1 原子の多極モーメント
 - 3.2 多極相互作用ハミルトニアン
 - 3.3 電気双極子近似
 - 3.4 原子ハミルトニアンの第2量子化
 - 3.5 光子の吸収速度と放出速度
- 4. レーザーの基礎
 - 4.1 光共振器のモード
 - 4.2 光共振器の安定性
 - 4.3 発振条件
 - 4.4 各種のレーザー
 - 4.4.1 3準位レーザーと4準位レーザー
 - 4.4.2 固体レーザー
 - 4.4.3 気体レーザー
 - 4.4.4 色素レーザー
 - 4.4.5 半導体レーザー

1.4.8 生物物理学特論：樋口 秀男, 酒井 邦嘉, 陶山 明

- 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
 - 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

1.4.9 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

1.5 4年生 A セメスター

1.5.1 化学物理学：藤森 淳

- 1. 原子の電子状態
 - 1.1 一電子状態
 - 1.2 多電子原子
 - 1.3 周期律
- 2. 分子の電子状態
 - 2.1 水素分子・二原子分子
 - 2.2 ベンゼン等の分子
 - 2.3 金属錯体

1.5.2 素粒子物理学: 横山 将志

- | | |
|--------------------|----------------|
| 1. 標準模型以前の素粒子物理 | 5. クォークとその混合 |
| 2. ゲージ理論と対称性の自発的破れ | 6. 強い相互作用と QCD |
| 3. ワインバーグ-サラムモデル | 7. 標準模型を超えて |
| 4. GWS モデルの実験的検証 | |

1.5.3 場の量子論 II : 諸井 健夫

本講義では、場の量子論 I で学ぶ相対論的場の理論の基礎的知識を前提として、以下の事項について解説する。

1. 経路積分による場の量子化
2. ゲージ場の量子化
3. 輻射補正

1.5.4 原子核物理学 : 大塚 孝治

- | | |
|-------------------|---------------------|
| 1. 原子核のスケールと単位 | 7. 殻構造 |
| 2. 原子核の大きさや密度 | 8. シェルモデル、アイソスピンと核力 |
| 3. 原子核の質量と結合エネルギー | 9. 原子核の形 |
| 4. フェルミガス模型 | 10. 原子核の崩壊と放射線 |
| 5. 平均ポテンシャル | 11. エキゾチックな原子核 |
| 6. 調和振動子ポテンシャル | |

1.6 4年生 冬学期

1.6.1 固体物理学 III : 青木 秀夫

1. 序 — ゲージ対称性とトポロジー
2. 超伝導の基礎
 - 2.1 超伝導とは何か
 - 2.2 超伝導の基本的性質
 - 2.3 従来型超伝導 — 背景と現象論
 - 2.4 従来型超伝導 — BCS 理論
3. 高温超伝導
 - 3.1 電子相関
 - 3.2 超伝導の電子機構
4. 他の物質における超伝導
5. 整数量子ホール効果
6. 分数量子ホール効果
7. 展望

1.6.2 物性物理学特論 (大学院「表面物理学」共通) : 長谷川修司, 小森文夫,

固体物理の知識を前提にして、固体表面の物理を、基礎概念から最新のトピックスを交えて解説する。

1. 概論

表面科学とは、歴史、ナノサイエンス・ナノテクと表面

2. 表面構造

表面超構造と相転移、回折法、顕微鏡法、動的過程

3. 表面電子状態

表面電子状態・トポロジカル表面状態、バンド分散・原子結合状態測定法 ((逆) 光電子分光法、トンネル分光法、光電子分光)、電子ダイナミクス

4. 走査プローブ顕微鏡

走査トンネル顕微鏡の原理、表面原子構造観察、局所電子状態・表面バンドの観測、表面電子定在波、原子マニピュレーション

5. 表面電子輸送

表面空間電荷層の2次元電子系、表面電子バンドの2、1次元電子系、表面スピン輸送、表面・単原子層超伝導

6. 表面超薄膜磁性

磁気モーメントと相転移、強磁性超薄膜、表面ナノ強磁性体、スピンダイナミクス

1.6.3 電子回路論 : 勝本 信吾

1. 電子回路序論

1.1 「電子回路論」という講義

1.2 電子回路とは

1.3 2端子素子

1.4 回路図

1.5 抵抗器

1.6 キャパシタ

1.7 インダクタ

2. 線形回路序論

2.1 線形システムと電子回路

2.2 各種電源

2.3 回路網

2.4 共鳴現象と共鳴回路

2.5 エネルギー散逸と電力

2.6 クラマース-クロネックの関係

2.7 4端子(2端子対)回路

2.8 端子対回路の諸定理

2.9 インピーダンスの整合

3. 増幅回路

3.1 増幅度(利得)

3.2 周波数特性とボード線図

3.3 OP アンプ

3.4 トランジスタ

3.5 電場効果トランジスタ

4. 過渡応答と分布定数回路

4.1 過渡応答

4.2 分布定数回路

4.3 伝送路の伝播現象

4.4 S行列(Sパラメタ)

4.5 シュレディンガー方程式とLC伝送路

4.6 非線形LC伝送路と戸田格子

5. 信号, 雑音, 波形解析

5.1 ゆらぎ

5.2 増幅器の雑音

5.3 EMI(EMC)

5.4 変調とアナログ信号伝送

5.5 離散化信号

6. デジタル信号とデジタル回路

6.1 デジタル信号序論

6.2 論理ゲート

6.3 論理ゲートの実装

6.4 論理演算の回路化と簡単化

6.5 A-D/D-A コンバータ

6.6 デジタルフィルター

6.7 ハードウェア記述言語: HDL

1.6.4 現代物理学入門: 吉岡 孝高, 北川 健太郎

1. レーザー物理 (担当: 吉岡)

- 1.1 最近のレーザー科学の展開、レーザーの原理と特徴
- 1.2 超短パルスレーザー
- 1.3 光と物質の相互作用、2次の非線形光学効果と波長変換
- 1.4 3次の非線形光学効果
- 1.5 多光子過程と高次高調波発生
- 1.6 フェムト秒光周波数コム
- 1.7 アト秒分光

2. 強相関電子系物性測定 (担当: 北川)

- 2.1 近年の固体物性研究の話題
- 2.2 物性測定基礎と極限環境下物性測定
- 2.3 マクロ物性測定
- 2.4 核磁気共鳴法の測定原理
- 2.5 核の電気四重極相互作用
- 2.6 超微細相互作用、ナイトシフトと緩和
- 2.7 磁性体における核磁気共鳴測定

1.6.5 普遍性生物学: 金子 邦彦

1. 生命システムのマクロ状態理論の可能性

- 1.1 基本的性質: 多様性、活動性、ロバストネス、可塑性
- 1.2 階層整合性: 定常成長系の普遍法則
- 2. 化学反応から複製細胞へ: 生命における「非平衡性」、少数性制御、区画化、成長のマクロ法則と相 (付録: 人工複製系構築実験について)
- 3. 細胞の適応: 揺らぐ成長系の帰結、ノイズによる環境依存アトラクター選択
- 4. 細胞ホメオスタシスと適応: 触媒量制御、多自由度適応系、
- 5. 細胞の記憶: 動的記憶とガラス

6. 細胞分化と発生過程の不可逆性: マクロ現象論、分化多能性の表現、相互作用による内部状態の分岐、分化能の喪失とリプログラミング

- 7. 表現型の進化 (I): 進化揺動応答関係、ノイズによる分散と遺伝分散の関係、安定性の進化、
- 8. 表現型の進化 (II): 適応進化におけるルシャトリエ原理
- 9. 発生-進化対応:
- 10. 多様性の進化; 表現型変化の遺伝的固定, 共生, 種分化, 多様性の進化
- 11. まとめと展望: 生物普遍性の現象論へ

2 各賞受賞者紹介

2.1 櫻井博儀 教授

— 仁科記念賞 —

櫻井博儀教授が、2015年度の仁科記念賞を受賞されました。業績は「中性子過剰核における魔法数の異常性の発見」で、理化学研究所特別顧問の本林徹氏との共同受賞です。原子の周期表の一番右の列には、稀ガス元素が並び、その安定性が、電子軌道が「閉殻」になることに由来することは良く知られています。原子核においても類似の規則性があることを約70年前にMayerとJensenが指摘し、原子核の殻模型を確立しました。このモデルでは、陽子数と中性子数が各々2、8、20、28、50、82、126の「魔法数」を取る場合に閉殻となり安定性が高いとされてきました。櫻井教授らは、特に中性子が極めて過剰な核の研究を進め、それらの原子核では上記の常識に反して魔法数が消滅したり、新たな魔法数が発現したりする異常性があることを、世界に先駆けて発見しました。両氏の研究は、理化学研究所の加速器施設において行われましたが、特に櫻井教授が提唱したウラン核分裂による中性子過剰核ビーム発生方式と高い粒子識別能力をもつ分析器の建設は今回の受賞対象となった研究で重要な役目を果たしました。これらの研究は、核図表の全域における魔法数の説明に繋がる包括的な原子核構造理論の構築を促すものです。またこれらの魔法数の実験的理論的な解明は、例えば宇宙物理学における元素合成の理論等にも影響を与え得るもので、より広い物理学の観点からも非常に重要です。

2.2 島野亮 教授

— 井上學術賞 —

島野亮教授が第32回井上學術賞を受賞されました。島野先生はテラヘルツ周波数領域の物性物理学の研究に分野開拓的に取り組み、多くの先駆的な研究成果を挙げられました。中でも特筆すべき業績として超伝導体におけるヒッグスモードの発見があります。超伝導体ではヒッグス機構と同様の機構が働いており、ヒッグス場におけるヒッグス粒子と同様に超伝導という場の集団励起、ヒッグスモードが存在することは理論的に約50年前に予言されていましたが、光（電磁波）との相互作用が小さいため未だにその明瞭な観測はなされていませんでした。島野先生は、テラヘルツ波パルスという特殊な光を用いることで加熱を避けて超伝導体を強く励起するという画期的な手法を考案し、そのための光源を世界に先駆けて独自に開発し、ヒッグスモードの観測に成功しました。この研究は、物理学におけるヒッグス機構の普遍性を明確に示したものとして、分野を越えて世界的に大きな反響をもたらしました。さらに振動外場の下での量子多体系のダイナミクスに関する先駆的な研究としても国際的に高く評価されています。他にも、半導体の高密度電子正孔系での励起子モット転移の研究や、光学量子ホール効果と呼ばれる現象の発見など顕著な成果を次々と挙げられ、その光物性物理学への傑出した貢献が高く評価されました。

2.3 島野亮 教授、松永隆佑 助教（島野研）、辻直人 氏（元青木研助教、現 理化学研究所）、青木秀夫 教授

— 第19回超伝導科学技術賞 —

島野亮教授、松永隆佑助教、辻直人氏、青木秀夫教授が「超伝導体中のヒッグスモードに関する開拓的実験および理論研究」に対して第19回超伝導科学技術賞を受賞されました。素粒子のヒッグス粒子の理論の誕生の背景に、超伝導のBCS理論があったことはよく知られています。超伝導体でも秩序パラメータの振幅の励起である「ヒッグスモード」が存在することは半世紀前に予測されていましたが、明瞭な観測は実現してい

ませんでした。島野教授と松永助教は、超伝導体を光で制御する研究を進める中で、テラヘルツ波パルスという特殊な光を瞬時に照射することにより初めて明瞭にヒッグスモードを観測することに成功しました。さらに、特定の周波数のテラヘルツ波を超伝導体に照射すると、その第3高調波発生が高効率に発生することを見出しました。辻助教と青木教授は理論的にこの現象が、超伝導を担う電子対を或る種のスピン(アンダーソンの擬スピン)と捉えたとき、擬スピンの集団的な歳差運動がヒッグスモードと共鳴する効果であること、その結果として大きな非線形応答が現れることを示しました。この研究は、超伝導体のヒッグスモードの発見という歴史的な意義に加え、実験と理論両面から、光による超伝導の制御や超伝導体の新規な光機能という新たな応用の可能性を拓いたという点でも高く評価されました。

2.4 立川裕二 准教授

— 2016 New Horizons in Physics Prize —

本学科の立川裕二准教授が Breakthrough Foundation より 2016 New Horizons in Physics Prize を受賞した。公式な受賞理由は“*For penetrating and incisive studies of supersymmetric quantum field theories*”となっている。立川准教授は、2009年に L. F. Alday 及び D. Gaiotto 両氏と共同で、四次元の超対称ゲージ理論の超球面上の分配関数が二次元の共形場理論の分配関数と一致するという予想を提出した。後に AGT 予想とよばれるようになったこの予想は、その後理論物理および数学の双方で盛んに研究され、数年後には数学者により厳密な証明が与えられた。受賞はこの予想やその他関連する業績が評価されたことによると思われる。准教授は受賞にあたって、「このような形で評価していただけたのも、これまで所属した各研究機関が素晴らしい研究環境を提供してくださったこと、また、素晴らしい指導教員、共同研究者に恵まれたこと、また、家族が暖かく見守ってくれていることのお陰ですので、皆様に感謝するばかりです。今後とも、この賞で満足してしまうことなく、良い研究が出来るよう努力していきたいと思います」と述べている。

2.5 道村唯太 助教 (安東研)

— 日本物理学会若手奨励賞 —

光速の不変性は相対論だけでなく全ての物理法則の基礎となっているローレンツ不変性と結びついています。道村氏は、光速の行きと帰りの差、つまり片道光速の異方性に着目し、これまで検証されてこなかった高次の空間異方性について初めての上限值を与えとともに、いくつかの既存の上限值を更新しました。開発した装置では、単一レーザー光源を用いて非対称光リング共振器の時計回りと反時計回りの共振周波数を比較するダブルパスと呼ばれる手法を用いるとともに、その光路上に屈折率の高いシリコンを入れる構成を用いることで高精度でのヌル測定を可能にするなど、独自のアイデアが盛り込まれていました。この研究は宇宙の枠組みそのものを対象とした実験的研究です。新たな手法を用いることで空間の異方性に対してかつてなく厳しい上限を与え、物理法則の根源そのものをさらに強固なものにした研究成果でした。

2.6 藤井友香 氏 (須藤研、現 NASA Goddard Institute for Space Studies)

— 第32回井上研究奨励賞 —

須藤研出身の藤井友香氏が、優れた学位論文に対して与えられる第32回井上研究奨励賞を受賞した。藤井氏の学位論文は、地球型惑星の反射光の自転による変動を利用した多バンド測光観測からその表面の性質を再構築するというユニークな理論的研究の方法論の構築とシミュレーション解析、さらには実際の地球の観測データへの応用例を中心としてまとめたものである。これらの主目的は、地球型惑星の海の存在、さらには植物の存在を検出する可能性を探ることで、今後の天文学の必然ともいえる宇宙生物学への展開を牽引することにある。具体的には、実際の地球の観測データを用いて、惑星光反射を、海、土、植生、雪、雲などの成分の典型的な“色”をテンプレートとして用いて成分分解したのち、各成分の寄与の時間変化から表面の経度分布をマッピングした。さらに、自転による変動のみならず、公転による年周変化まで取り込む事によって経度方向・緯度方向の2次元地図を作製する方法論を作り上げた。

本学位論文で提案された方法論は、将来必ずや打ち上げられるであろう系外惑星直接撮像宇宙探査機の科学の根幹を支えるものである。実際この研究によって、地球の、海と陸の共存・陸上植物・部分的な雲被覆・水循環などといった際立った特徴が、原理的には系外からでも探査可能であることが示された。これは、系外惑星の表層環境の詳細を探る新しい可能性を具体的に提示しており、将来の直接撮像計画の科学的可能性に迫った優れた内容である。

2.7 加藤康作 氏 (酒井広文研、現 大阪大学)

— 原子衝突学会第 16 回若手奨励賞 —

加藤康作氏 (2014 年度に博士 (理学) の学位取得、現在大阪大学レーザーエネルギー学研究中心特任研究員) が、原子衝突学会第 16 回若手奨励賞を博士課程で行った「高次高調波で探る高強度レーザー電場と原子・分子の相互作用の物理」に関する研究業績で受賞しました。加藤氏は、分子軌道イメージングの高度化に資する研究を精力的に進め、顕著な成果をあげました。まず、高次高調波の強度スペクトルと位相スペクトルを同一条件下で測定できる装置の開発を行いました。開発した装置を用い、強光子場近似を越えてクーロン電場の影響が強く反映されるため、原子・分子軌道の超高速イメージングへの応用の観点から重要視されているイオン化ポテンシャル近傍の高調波に着目してデータを取得しました。その結果、サイドバンド次数 12 次の高調波については、Ar 中から発生する高調波の位相差の方が N₂ 分子中からのそれよりも有意に大きいことを初めて見出すとともに、独自の解析手法を駆使し、両者の違いがイオン化ポテンシャルの形状の違いに由来することを指摘しました。一連の業績はアト秒サイエンスの展開においても極めて波及効果の高いものと評価され、今回の受賞に至りました。なお、原子衝突学会若手奨励賞は、酒井広文研の出身者として二人目の受賞となりました。

2.8 川口喬吾 氏 (佐野研、現 Department of Systems Biology, Harvard Medical School)

— 日本物理学会若手奨励賞 —

近年、ゆらぎの支配的な世界における熱機関を想定した研究が活発に行われている。これらの研究により、ゆらぎを含む理論に熱力学の拡張がなされただけでなく、非平衡環境下や情報操作を含む系における関係式が議論されるなど、熱力学の根幹にかかわる問題が数多く提起されてきた。川口氏は、生体分子モーター F1-ATPase に関する現象論と、粗視化に伴って隠れるエントロピー生成の基礎理論の研究を通じて、ゆらぎ世界の熱力学の理解を進めた。F1-ATPase は細胞内で稼働する極微の回転モーターであり、近年の精緻な実験により、その恐るべき熱力学効率の高さが明らかになってきた。川口氏は、実験により見積もられた F1-ATPase の散逸のデータを基に、これまでの微小系熱力学の枠をこえた詳細な設計原理が生体分子モーターに潜んでいる可能性を指摘した。また、川口氏は、微小世界での熱測定の実験技術に触発され、熱力学現象の記述の階層に依存して一見変化してしまう散逸の問題を考察し、特に変数の粗視化により隠れてしまうエントロピー生成に関して、新しい熱力学等式を発見した。川口氏は、熱統計力学の基礎的理論と生物物理学の先端的な実験の境界に研究の興味を持っており、今後多細胞生物においてもマイクロとマクロをつなぐ研究を進めたいと考えている。

2.9 平成 27 年度 理学系研究科 研究奨励賞・理学部 学修奨励賞

以下の方々が、平成 27 年度 理学系研究科 研究奨励賞・理学部 学修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) 栗原貴之君、一ノ倉聖君、関口文哉君、谷崎佑弥君
- 理学系研究科 研究奨励賞 (修士課程) 蘆田祐人君、池内光希君、大里健君、藤田浩之君
- 理学部 学修奨励賞 佐藤遼太郎君、董青秀雄君、小松原航君

皆様の今後の更なるご活躍を期待します。

3 人事異動

[物理学教室に来られた方々]

湯本 潤司	教授	H27/4/1	採用	工学系研究科付属光量科学研究センター教授兼務
高橋 麻美子	物理教務	H27/4/1	配置換え	理学系研究科等学務課主任
水落 利明	物理図書	H27/4/1	配置換え	医学部・医学系研究科情報サービス係長
小倉 聡司	物理事務	H27/7/1	復帰	独立行政法人国立大学財務・経営センター
太田 奈緒香	助教 (高木研)	H27/9/16	採用	千葉大学
Bea KYUJUNG	特任研究員 (濱口研)	H27/9/16	採用	オクラホマ大学
赤城 裕	助教 (桂研)	H27/11/1	採用	沖縄科学技術大学院大学
前橋 英明	特任研究員 (小形研)	H27/12/1	採用	東京大学物性研究所
庭田 まゆ子	学術支援職員 (第1分室)	H28/1/1	採用	
尾澤 あや	事務補佐員 (教務)	H28/1/16	採用	
村瀬 功一	特任研究員 (福嶋研)	H28/2/1	採用	
Majumder Mayukh	特任研究員 (高木研)	H28/3/16	採用	

[物理学教室から移られた方々]

東野 剛之	特任研究員 (長谷川研)	H27/5/31	辞職	東北大学 未来科学技術共同センター 助手
田嶋 洋恵	物理事務	H27/6/30	配置換え	放送大学学園 東京、文京学習センター総務係長
大西 早苗	学術支援職員 (樋口研)	H27/7/31	辞職	
高吉 慎太郎	助教 (青木研)	H27/8/31	辞職	ジュネーブ大学 ポスドク研究員
Epifanov Denis	特任研究員 (相原研)	H27/9/30	辞職	
嶋田 健悟	特任研究員 (濱口研)	H27/9/30	辞職	Laboratoire Annecy-le-Vieux de Physique 博士研究員
牟田 真理子	事務補佐員 (樋口研)	H27/11/30	辞職	
平井 大介	特任研究員 (常行研)	H27/12/31	辞職	株式会社村田製作所 研究員
伊藤 彩美	学術支援職員 (第1分室)	H28/1/31	辞職	
遠藤 基	助教 (濱口研)	H28/2/29	辞職	高エネルギー加速器研究機構 准教授
蓑輪 真	教授	H28/3/31	定年退職	
青木 秀夫	教授	H28/3/31	定年退職	
立川 裕二	准教授	H28/3/31	辞職	カブリ数物連携宇宙研究機構 教授
吉岡 孝高	講師	H28/3/31	辞職	工学系研究科付属光量科学研究センター 准教授
高江洲 義太郎	特任研究員	H28/3/31	辞職	岡山大学 非常勤講師
Andraus Sergio	特任研究員 (宮下研)	H28/3/31	辞職	中央大学 助教
加藤 陽	特任研究員 (蓑輪研)	H28/3/31	辞職	宇宙線研究所 特任研究員
田中 賢	特任研究員 (吉田研)	H28/3/31	辞職	筑波大学 研究員
朝倉 良夫	職員 (物理事務室)	H28/3/31	配置換え	史料編纂所 財務・研究支援チーム主任
天野 有紀	学術支援職員 (村尾研)	H28/3/31	辞職	
大鹿 裕子	学術支援職員 (第1分室)	H28/3/31	辞職	

4 役務分担

役務	担当教員	技術職員・事務職員
専攻長・学科長	佐野	熊崎、高橋、田寄
幹事	須藤、上田、宮下	
専攻主任	蓑輪	
専攻副主任	樋口	
常置委員	高木、諸井	
優先配置	村尾	
教務	小形、酒井(大学院)、松尾(ガイダンス)、 中澤(学生相談)、濱口(留学)	
学生実験	長谷川、浅井、岡本、山本	佐伯、八幡
就職	櫻井	仁井田
奨学金	青木	
博士課程学生支援制度	濱口	
部屋割	駒宮	熊崎、朝倉
安全衛生	岡本	八幡
放射線	浅井	
管理技術室	福山(統括、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
	吉田(IT関連)、藤堂	南野
図書	宮下、松尾、中澤、酒井	水落
コロキウム	須藤、藤森、諸井、浅井、金子	小林、田寄
年次報告	立川、馬場(URA)	仁井田、八幡
記録係	福嶋、藤堂、桂、北川	
物品供用官	早野	
事務分室	第一：藤森、第二：宮下	
理交会	長谷川	熊崎
親睦会	藤堂	
進学指導	専攻長、駒宮、村尾、桂	物理教務
進振委員	福嶋	
ホームページ、IT	吉田、藤堂	南野
オープンキャンパス	安東	
リーディング大学院	相原、藤森、高木、宮下、横山	物理事務、物理教務
アーカイブ室	専攻長、宮下	
駒場対策	吉田(5月)、村尾、小形(教務)、立川、能瀬、 横山(順)、Wimmer、松尾(12月)、福嶋、 進学指導委員(専攻長、駒宮、村尾、桂)	
新大学院制度 WG	相原、浅井、長谷川、村尾、吉田	

5 教室談話会

- 2015年7月17日(金) 16:30-18:00
古澤 力氏 (理化学研究所 生命システム研究センター (QBiC))
適応進化ダイナミクスの解明:微生物実験と理論解析
- 2015年8月21日(金) 13:00-14:30
George Sudarshan 氏 (Center for Complex Quantum Systems, University of Texas at Austin)
Quantum Zeno Effect
- 2015年8月21日(金) 15:00-16:30
真鍋 淑郎 氏 (プリンストン大学)
Exploring Global Warming with Climate Models
- 2015年10月30日(金) 16:30-18:00
Yves Couder 氏 (Université Paris Diderot - Paris7)
A wave-particle duality at a macroscopic-scale: the role of a path memory
- 2015年11月12日(木) 10:30-12:30
L. P. Kouwenhoven 氏 (Delft University of Technology, The Netherlands)
Majorana Fermions, from particle physics on a chip to topological quantum computing
D. Loss 氏 (University of Basel, Switzerland and RIKEN Center for Emergent Matter Science)
From Majorana- to Para-Fermions in Nanowires and Atomic Chains
- 2015年12月9日(水) 17:00-18:00 【第三回仁科アジア賞受賞講演】
Ke He 氏 (Tsinghua University, Beijing, China)
Quantum anomalous Hall effect in magnetic topological insulators
- 2016年2月12日(金) 16:30-18:00
Kipp Cannon 氏 (東京大学ビッグバン宇宙国際研究センター)
Results From Advanced LIGO's First Science Run
- 2016年2月18日(木) 17:00-18:20
佐藤 琢哉氏 (九州大学大学院理学研究院) 【Sir Martin Wood Prize Lecture】
偏光を用いた反強磁性体・フェリ磁性体における磁気励起の光学的生成と制御

- 2016年3月10日(木)15:30-17:00
青木 秀夫教授 (最終講義)
物性物理学のルネサンス — 超伝導、トポロジカル系、非平衡
- 2016年3月14日(月) 17:00-18:00
Gordon Baym 氏 (Department of Physics, University of Illinois at Urbana)
A half century of physics in Japan: from low temperatures to neutron stars

6 物理学教室コロキウム

- 2015年4月24日(金)16:30-18:00
佐藤 文隆氏(京都大学名誉教授)
日本の物理いまむかし：京都と東京
- 2015年5月29日(金)16:30-18:00
酒井 敏氏(京都大学)
都市を冷やすフラクタル日除け
- 2015年6月19日(金)16:30-18:00
Edwin L.Turner氏(プリンストン大学)
The Origin of Life : A Much Deeper Mystery Than Dark Energy
- 2015年7月10日(金)16:30-18:00
土岐 博氏(大阪大学名誉教授)
マクスウェルが教える電磁ノイズの削減方法
- 2015年10月2日(金)16:30-18:00
Lev Vaidman氏(テルアビブ大学)
Are Potentials in Physics Just Auxiliary Mathematical Tools ?
- 2015年10月23日(金)16:30-18:00
若本 祐一氏(総合文化研究科)
生と死の1細胞生物学
- 2015年11月27日(金)16:30-18:00
霜田 光一氏(東京大学名誉教授)
連成振り子と光の誘導放出と弾性振り子
- 2016年1月8日(金)16:30-18:00
大野 英男氏(東北大学通研)
スピントロニクス:物理から工学への道
- 2016年1月22日(金)16:30-18:00
郷 通子氏(情報・システム研究機構、名古屋大学)
物理学から生物学へ:面白いテーマとの出会いと所属先を選ぶこと

7 金曜ランチトーク

- 2015年4月10日 茅 元司 (樋口研)
「Intermolecular cooperativity of skeletal myosins enhances force output in myofilament」
- 2015年4月24日 明石 遼介 (常行研)
「First-principle study on superconductivity in compressed sulfur hydride」
- 2015年5月8日 秋山 了太 (長谷川研)
「Two dimensional electrical transport in topological crystalline insulator SnTe thin films」
- 2015年5月22日 松井 朋裕 (福山研)
「Spin-polarized zigzag edge state in Graphene」
- 2015年6月12日 鈴木 隆敏 (早野研)
「Non-mesonic reaction branches of stopped K-reaction」
- 2015年6月26日 古川 俊輔 (上田研)
「Excitation band topology and edge matter waves in Bose-Einstein condensates」
- 2015年7月10日 内山 隆准 (宇宙線研)
「My study for gravitational wave astronomy」
- 2015年7月24日 井上 慶純 (蓑輪研)
「Searching for hidden photon dark matter with dishes」
- 2015年10月2日 栢富 龍一 (岡本研)
「Adsorbate-induced quantum Hall system probed by scanning tunneling spectroscopy combined with transport measurements」
- 2015年10月16日 高坂 洋史 (能瀬研)
「A neuronal network for axial motion in fly larvae」
- 2015年11月6日 森 貴司 (宮下研)
「General scenario of relaxation in periodically driven quantum systems」
- 2015年11月20日 道村 唯太 (安東研)
「Testing Lorentz Invariance with an Optical Cavity」
- 2015年12月4日 添田 彬仁 (村尾研)
「Projective measurement of energy for unknown Hamiltonians」

- 2015年12月18日 関谷 洋之 (宇宙線研)
「Low Energy Investigations at Kamioka Observatory」
- 2016年01月08日 松浦 弘泰 (小形研)
「Role of Spin-Orbit Interaction in Materials: 5d oxides and Chiral materials」
- 2016年01月15日 Haozhao Liang (理化学研究所)
「Nuclear spin-isospin physics: From labs to stars」
- 2016年01月22日 後田 裕 (KEK)
「KEK B-factory and its upgrade」
- 2016年02月19日 小貫 良行 (相原研)
「The Belle II experiment and the silicon vertex detector development」
- 2016年03月11日 神谷 好郎 (駒宮研)
「Testing gravity using neutrons」

2015年度 年次研究報告

2016年 5 月 30 日

東京大学大学院理学系研究科・理学部
物 理 学 教 室

発 行 長谷川 修 司

編 集 桂 法 称、八 幡 和 志
