

*Department of Physics*  
*School of Science*  
*The University of Tokyo*

# Annual Report

2018

平成30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



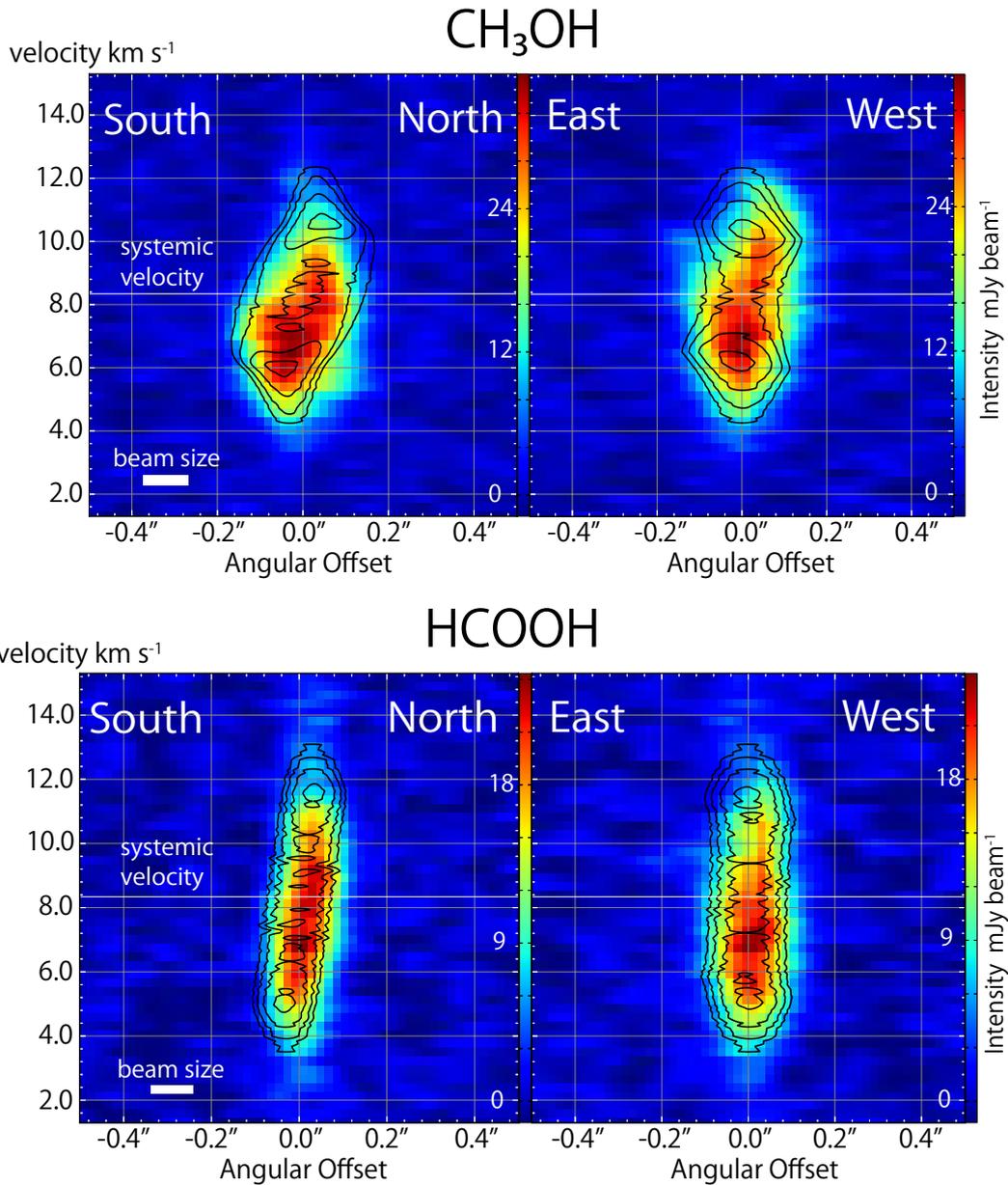


図 0.0.1: ALMA で捉えた太陽型原始星 B335 のごく近傍 (10 天文単位スケール以下) でのガスの回転運動。メタノール分子とギ酸分子の回転方向 (左) およびそれに垂直な方向 (右) での位置-速度図を示す。メタノール分子はエンベロープガスの比較的外側にも広がってまで存在するが、ギ酸分子は最内側の部分に局在する。それぞれの分子の速度構造は、回転しながら落下するエンベロープガスモデルで説明され、速度構造の違いは分子の空間分布の違いによって再現できることがわかった (等高線)。この結果は、惑星系スケールでの化学組成変化を意味する。(山本研究室)

ALMA detected rotation motion of the gas in the vicinity of the protostar on the 10 astronomical unit scale or smaller. Position-velocity diagrams of the CH<sub>3</sub>OH and HCOOH emissions along the envelope direction (left) and the direction perpendicular to it (right) are shown. The CH<sub>3</sub>OH emission traces a relatively extended region, while the HCOOH emission is mainly concentrated in the innermost part. The kinematic structure traced by each molecule is successfully explained by the infalling-rotating envelope model with different molecular distributions (contours). This result indicates a significant change in chemical composition on a planetary system scale. (Yamamoto group)

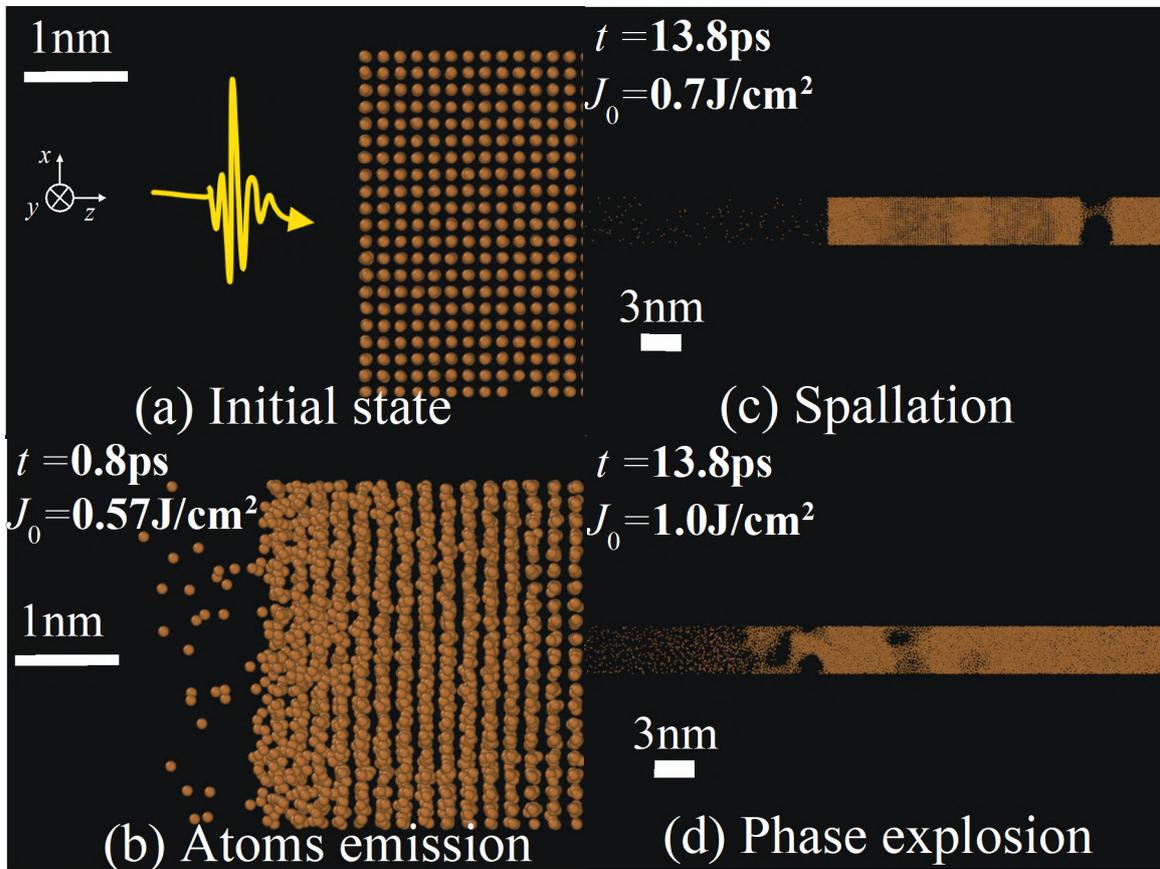


図 0.0.2: 電子エントロピー誘起機構に基づくレーザーアブレーションのシミュレーション。超短パルスレーザーを標的金属に照射すると、電子温度が高温で格子温度が低温の非平衡状態が実現される。このとき格子温度が低いままでもアブレーションが起きることを、第一原理電子状態計算に基づき電子エントロピーの効果を考慮したマルチスケールモデルのシミュレーションで示した。銅の結晶表面に (a) 左からレーザーパルス照射すると、レーザー強度に応じて、(b) 原子放出、(c) spallation、(d) phase explosion が観測される。(常行研究室)

Simulation of laser ablation based on electronic entropy-driven mechanism. Irradiating the target metal with an ultrashort pulse laser achieves a non-equilibrium state in which the electron temperature is high and the lattice temperature is low. At this time, it is shown by the simulation of multi-scale model considering the effect of electron entropy based on the first-principles electronic state calculation that ablation occurs even if the lattice temperature is low. (a) When a laser pulse is irradiated to the copper crystal surface from the left, (b) atoms emission, (c) spallation, and (d) phase explosion are observed according to the laser intensity. (Tsuneyuki Group)

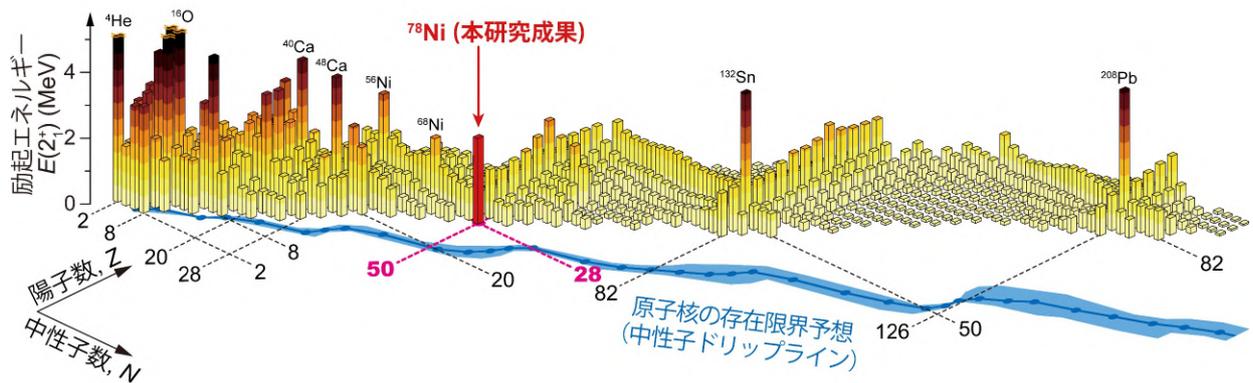


図 0.0.3: これまで実験的に観測された原子核の励起エネルギーをそれぞれの棒の高さで図示した。原子核は、陽子または中性子が魔法数をとるとき、励起エネルギーが高くなる。同時に、現在理論的に予測されている原子核の存在限界 (中性子ドリップライン) を青線で図示。 $^{78}\text{Ni}$  原子核は、二重魔法数を持つ原子核 ( $^4\text{He}$ 、 $^{16}\text{O}$ 、 $^{40}\text{Ca}$ 、 $^{56}\text{Ni}$ 、 $^{132}\text{Sn}$ 、 $^{208}\text{Pb}$ ) の中で、最も中性子ドリップラインに近い最後の原子核とされている。本研究により、 $^{78}\text{Ni}$  の魔法性を示す直接的証拠が得られた。(櫻井研究室 : R. Taniuchi et al., “ $^{78}\text{Ni}$  revealed as a doubly magic stronghold against nuclear deformation”, Nature (2019).)

Excitation energy of the first  $2^+$  state on the nuclear chart. The nucleus has a high excitation energy when proton or neutron numbers are *magic*. The blue line shows a limit of the nuclear existence (neutron drip-line).  $^{78}\text{Ni}$  is the most neutron-rich doubly-magic nucleus among known ones;  $^4\text{He}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{56}\text{Ni}$ ,  $^{132}\text{Sn}$  and  $^{208}\text{Pb}$ . Our result reveals a direct evidence of the magic character of  $^{78}\text{Ni}$ . (Sakurai group: R. Taniuchi et al., “ $^{78}\text{Ni}$  revealed as a doubly magic stronghold against nuclear deformation”, Nature (2019).)



## 序

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・理学部物理学科の平成30年度（2018年4月-2019年3月）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、新しく入ってこられた教員ですが、准教授として、竹内一将氏（非平衡物理学実験：東京工業大学より）が、助教として、小高裕和氏（馬場研）、Hartwig Tilman氏（吉田研・知の物理学研究センター）が着任されました。また、森貴司助教（宮下研）が理化学研究所研究員として、芝田悟朗助教（藤森研）が東京理科大学助教として、平岩徹也助教（佐野研）がシンガポール国立大学 MBI フェローとして、古川俊輔助教（上田研）が慶應義塾大学専任講師として、転出されました。また、佐野雅己教授、藤森淳教授、宮下精二教授が本年度定年を迎えられました。

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。佐藤勝彦名誉教授が瑞宝重光章を、小林俊一名誉教授が瑞宝中綬章をを授与されました。また、永嶺謙忠名誉教授が日本学士院賞を受賞されました。さらに、櫻井博儀教授が平成30年度全国発明表彰21世紀発明賞を、北川健太郎講師が日本物理学会第24回（2019年）論文賞を、松永隆佑氏（島野研助教・現物性研究所）が平成30年度文部科学大臣若手科学者賞を、大栗真宗助教（須藤研）が第23回日本天文学会林忠四郎賞を、森貴司氏（宮下研助教・現理化学研究所）が第22回久保亮五記念賞を、大屋瑤子助教（山本研）が第35回井上研究奨励賞を、蘆田祐人氏（上田研）が第9回（平成30年度）日本学術振興会育志賞を、高木優氏（能瀬研）が平成30年度時実利彦記念神経科学優秀博士研究賞を受賞し、大小田結貴氏（山本研）が「BBCが選ぶ今年的女性100人」に選出されました。また、蘆田祐人氏（上田研）、川畑幸平氏（上田研）が東京大学総長賞を、蘆田祐人氏（上田研）、陳詩遠氏（駒宮研）、一ノ倉聖氏（長谷川研・現東京工業大学）、本郷優氏（初田研・現理化学研究所）が日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。さらに、蘆田祐人氏、大下翔誉氏、播金優一氏、東川翔氏が平成30年度理学系研究科研究奨励賞（博士課程）を、川畑幸平氏、内藤智也氏、中塚洋佑氏、中西健氏が研究奨励賞（修士課程）を、稲村寛生氏、黒岩広大氏、田中宏明氏が平成30年度理学部学修奨励賞を受賞しました。

あらためて言うまでもないことですが、物理学はあらゆる自然科学の重要な基礎をなすとともに、周辺分野とのかかわりでも大きく発展しつつあります。このことは、この年次報告にある各研究室の活躍を見てもおわかりになることと思います。物理学のこの役割は、今後も変わりませんが、一方で、物理学教室を取り巻く社会的環境は、激動する時代の中であって大きく、また、急速に変化していることも確かです。その中で、しっかり物理学教室における教育、研究を強化し、研究成果を挙げ、社会で活躍する次世代の人材を育成していくには、主体的なアクションを起こしていくことが必要になっています。その一つとして、平成30年度には、物理学教室が主体となって、「知の物理学研究センター」（センター長：上田正仁教授）を設立しました。近年、進展が著しく、また社会的にも注目されている人工知能（AI）、深層学習を物理の研究に応用するだけでなく、それらを物理の力で理解することを目指しています。この方向は、物理学を大きく革新する可能性を持っていると考えており、今後も物理学教室として強力に推進していきたいと考えています。もう一つの大きな課題は国際化です。研究において国際共同研究は日常のこととなっていますが、一方で、教育の国際化はまだ端緒についたばかりです。わが国の教育の特徴を保ちつつ、GSGCの拡大など、国際的に開かれた教育環境の実現にむけて、鋭意取り組んでいきます。先輩の先生方、関係各位の皆様のご支援、ご鞭撻とご協力をよろしくお願い申し上げます。また、学生、院生の諸君には、新しい時代を迎える年に、また新しい気持ちで勉学・研究に益々励んでいただきたいと思っております。

この年次研究報告は、竹内一将准教授、日下暁人准教授、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。

2019年5月1日  
物理学専攻 専攻長・物理学科 学科長  
山本 智

# 目次

<b>I</b>	<b>研究室別 2018 年度 研究活動報告</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>原子核・素粒子理論</b>	<b>2</b>
1.1	原子核理論 (福島) 研究室	2
1.2	素粒子論研究室	5
1.2.1	現象論	5
1.2.2	弦理論、場の理論全般	6
<b>2</b>	<b>原子核・素粒子実験</b>	<b>11</b>
2.1	原子核実験グループ (櫻井研究室・Wimmer 研究室)	11
2.1.1	不安定核の構造研究	11
2.1.2	エキゾチック原子の分光	13
2.1.3	加速器開発	13
2.2	相原・横山研究室	16
2.2.1	(スーパー) B ファクトリー実験	16
2.2.2	加速器ニュートリノ実験	17
2.2.3	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	19
2.2.4	HSC 暗黒エネルギー研究	19
2.2.5	アクシオンおよび軽い暗黒物質探索実験	20
2.3	浅井研究室	23
2.3.1	LHC・ATLAS 実験での研究	23
2.3.2	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	24
<b>3</b>	<b>物性理論</b>	<b>29</b>
3.1	宮下研究室	29
3.1.1	量子 Cavity 系における低光子濃度状態での光双安定性 (Optical Bistability) とヒステリシス	29
3.1.2	断熱時間発展の加速	29
3.1.3	孤立多体系の緩和過程	29
3.1.4	ダークソリトン	30
3.1.5	$d^5$ モット絶縁体での electronic magnetoelectric 効果	30
3.1.6	量子スピン鎖における局在スピンの行列積波動関数 (MPS) による解析	30
3.1.7	局所格子構造のちがう双安定系での弾性相互作用による新奇現象の研究	30
3.1.8	保磁力の統計力学機構解明	30
3.2	小形研究室	33
3.2.1	高温超伝導の理論	33
3.2.2	ディラック電子系	33
3.2.3	熱応答の理論	34
3.2.4	トポロジカル物質の理論	34
3.2.5	有機伝導体	35
3.2.6	ポロフェン関連物質	35
3.2.7	スピン系およびスピン軌道相互作用	35
3.3	常行研究室	39

3.3.1	シミュレーション手法の開発	39
3.3.2	第一原理電子状態計算の応用	41
3.4	藤堂研究室	44
3.4.1	強相関係のシミュレーション手法	45
3.4.2	統計的機械学習による物質科学	45
3.4.3	量子コンピュータ基礎理論	46
3.4.4	強相関多体系における新奇な状態・相転移現象	46
3.4.5	動的協調現象・非平衡ダイナミクス	47
3.4.6	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	47
3.5	桂研究室	50
3.5.1	強相関係	50
3.5.2	トポロジカル系	51
3.5.3	可解模型・統計力学	52
3.5.4	その他	53
<b>4</b>	<b>物性実験</b>	<b>56</b>
4.1	藤森研究室	56
4.2	長谷川研究室	60
4.2.1	表面での電子・スピン輸送	60
4.2.2	表面・原子層ナノ構造	62
4.2.3	新しい装置・手法の開発	62
4.3	福山研究室	66
4.3.1	2次元ヘリウムの量子相の研究	66
4.3.2	グラフェンのエッジ状態の研究	68
4.3.3	極低温実験技術の開発	69
4.4	岡本研究室	71
4.4.1	劈開表面に形成された2次元電子系	71
4.4.2	金属超薄膜の超伝導	72
4.4.3	ピスマス超薄膜の電気伝導	74
4.5	島野研究室	75
4.5.1	超伝導体	75
4.5.2	半導体電子正孔系	78
4.6	高木・北川研究室	81
4.6.1	スピン軌道相互作用を利用した擬スピン量子相	81
4.6.2	3次元ディラック電子	82
4.7	林研究室	85
4.7.1	スピン流生成とその物性	85
4.7.2	界面スピン軌道相互作用とカイラル磁性	85
4.7.3	光-スピン変換	86
<b>5</b>	<b>一般物理理論</b>	<b>89</b>
5.1	宇宙理論研究室(須藤・吉田)	89
5.1.1	観測的宇宙論	89
5.1.2	系外惑星	92
5.1.3	星・ブラックホール形成	92
5.1.4	高エネルギー天文現象	93
5.2	村尾研究室	101
5.2.1	分散量子情報処理	101
5.2.2	高階量子演算	102
5.2.3	量子力学基礎論	102
5.2.4	ハイブリッド量子系の量子情報処理	103

5.3	上田研究室	106
5.3.1	冷却原子気体	106
5.3.2	量子論・統計力学と情報理論の融合	107
5.4	横山 (順) 研究室	112
5.4.1	初期宇宙論	112
5.4.2	天体素粒子物理	114
5.4.3	観測的宇宙論	114
5.4.4	重力波	114
<b>6</b>	<b>一般物理実験</b>	<b>118</b>
6.1	高瀬研究室	118
6.1.1	TST-2 実験の概要	118
6.1.2	高周波実験	118
6.1.3	OH 実験	119
6.1.4	計測器開発	119
6.1.5	共同研究	121
6.2	佐野研究室	123
6.2.1	非平衡系の動力学・統計力学	124
6.2.2	アクティブマターの動力学	124
6.2.3	非平衡系としての生命現象	125
6.3	山本研究室	127
6.3.1	星形成の観測研究	128
6.3.2	テラヘルツ帯観測技術の開拓	130
6.4	酒井広文 研究室	132
6.4.1	レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展	133
6.4.2	全光学的配向制御法で配向度を向上させるための考察	134
6.4.3	マクロな 3 回対称性をもつ分子アンサンブルの生成	134
6.4.4	フェムト秒 EUV 自由電子レーザーパルスと近赤外パルスによる原子・分子の角度分解 光電子分光	135
6.4.5	その他	136
6.5	五神-湯本-井手口研究室	137
6.5.1	物質系の巨視的量子現象の探索	138
6.5.2	非自明な光学現象の探索とその応用	140
6.5.3	新規コヒーレント光源開発と新しい分光手法開拓	141
6.5.4	コヒーレント光科学研究基盤の整備	142
6.5.5	フォトンサイエンス研究機構	142
6.6	安東研究室	145
6.6.1	大型重力波望遠鏡 KAGRA	145
6.6.2	周波数依存スクイーズ光の開発	146
6.6.3	宇宙空間レーザー干渉計	146
6.6.4	ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA	147
6.6.5	相対論・量子光学精密実験	148
6.7	馬場 研究室	152
6.7.1	はじめに	152
6.7.2	超新星残骸に関する研究室での進展	152
6.7.3	コンパクト天体に関する進展	153
6.7.4	観測装置開発	154
6.7.5	雷雲からのガンマ線に関する研究	154
6.8	日下 研究室	158
6.8.1	POLARBEAR 実験と Simons Array 実験	158
6.8.2	Simons Observatory 実験	159

6.8.3	次世代 CMB 実験用 装置開発	159
6.9	竹内研究室	160
6.9.1	液晶乱流を使った普遍的な非平衡スケーリング則の探求	161
6.9.2	細菌集団の物理を探る微小流体実験	161
6.9.3	その他の非平衡実験・関連研究	162
<b>7</b>	<b>生物物理</b>	<b>165</b>
7.1	能瀬研究室	165
7.1.1	神経回路の活動ダイナミクス	165
7.1.2	運動出力ダイナミクスの定量的解析	166
7.1.3	運動神経回路を構成する神経細胞の同定と機能解析	167
7.1.4	機能的神経回路の発達機構	167
7.2	樋口研究室	170
7.2.1	はじめに	170
7.2.2	キネシンの広い負荷領域における振るまい	170
7.2.3	ミオシン頭部の運動の超解像イメージング	171
7.2.4	心筋ミオシンにみられる逆方向運動	171
7.2.5	鞭毛屈曲運動の分子メカニズム	171
7.2.6	細胞集団にみられる運動様式	172
7.3	岡田研究室	173
7.3.1	ライブセルイメージングのための技術開発	173
7.3.2	神経細胞軸索輸送の解析	174
7.4	古澤研究室	177
7.4.1	マクロレベルの細胞状態論の構築	177
7.4.2	自動培養システムを用いた進化実験	177
7.4.3	フェイズフィールドモデルによるアメーバ細胞のマクロピノサイトーシス動態の解析	177
7.4.4	代謝物漏出による細胞成長率の促進	178
7.4.5	微生物生態系の進化シミュレーションを用いた多種共存条件の探索	178
7.4.6	ヒト ES 細胞における遺伝子発現制御ネットワークの推定	178
7.4.7	機械学習によるマウス糞便画像からの腸内細菌叢の推定	178
7.4.8	深層学習を用いた、細胞形状を記述する特徴量の抽出	178
7.4.9	遺伝子発現量のゆらぎと環境応答量の量的関係の解析	179
<b>8</b>	<b>技術部門</b>	<b>182</b>
8.1	実験装置試作室	182
8.1.1	利用状況	182
8.2	技術室	182
8.2.1	安全衛生	182
8.2.2	IT 関連	182
8.2.3	学生実験	182
8.2.4	研究支援	183
8.2.5	各種委員会	183
<b>II</b>	<b>Summary of group activities in 2018</b>	<b>185</b>
1	Theoretical Nuclear Physics (Fukushima) Group	186
2	High Energy Physics Theory Group	186
3	Sakurai Group	187
4	Wimmer Group	189
5	Aihara-Yokoyama Group	190
6	Asai group	191

7	Miyashita Group	191
8	Ogata Group	192
9	Tsuneyuki Group	193
10	Todo Group	194
11	Katsura Group	195
12	Fujimori Group	196
13	Hasegawa Group	197
14	Fukuyama Group	198
15	Okamoto Group	199
16	Shimano Group	200
17	Takagi-Kitagawa Group	201
18	Hayashi Group	202
19	Theoretical Astrophysics Group	203
20	Murao Group	205
21	Ueda Group	206
22	Yokoyama (J) Group	207
23	Takase Group	208
24	Sano Group	209
25	Yamamoto Group	210
26	Sakai (Hirofumi) Group	210
27	Gonokami, Yumoto and Ideguchi Group	211
28	Ando Group	212
29	Bamba Group	213
30	Kusaka Group	214
31	Takeuchi Group	215
32	Nose Group	216
33	Higuchi Group	217
34	Okada Group	218
35	Furusawa Group	219

### III 2018年度 物理学教室全般に関する報告 221

<b>1</b>	<b>学部講義概要</b>	<b>222</b>
1.1	2年生 A セメスター	222
1.1.1	電磁気学 I: 櫻井博儀	222
1.1.2	解析力学: 常行 真司	222
1.1.3	量子力学 I: 福嶋健二	223
1.1.4	物理実験学: 酒井 広文, 藤森 淳	223
1.1.5	物理数学 I: 松尾 泰	223
1.1.6	物理数学 II: 吉田 直紀	224
1.1.7	物理のための科学英語基礎: 小野 義正	224
1.2	3年生 S セメスター	224
1.2.1	電磁気学 II: 岡本 徹	224
1.2.2	量子力学 II: 上田 正仁	225
1.2.3	現代実験物理学 I: 岡田 康志, 北川 健太郎	225
1.2.4	流体力学: 江尻 晶	225
1.2.5	統計力学 I: 桂 法称	225
1.2.6	計算機実験 I: 藤堂 眞治	226
1.3	3年生 A セメスター	226
1.3.1	光学: 井手口 拓郎, 湯本 潤司	226

1.3.2	物理数学 III : 立川 裕二	226
1.3.3	量子力学 III : 諸井 健夫	227
1.3.4	生物物理学 : 岡田 康志, 樋口 秀男	227
1.3.5	固体物理学 I : 小形 正男	227
1.3.6	電磁気学 III : 安東 正樹	227
1.3.7	現代実験物理学 II : 浅井 祥仁, 馬場 彩	228
1.3.8	統計力学 II : 宮下 精二	228
1.3.9	計算機実験 II : 藤堂 眞治	228
1.4	4年生 S セメスター	228
1.4.1	場の量子論 I : 濱口 幸一	228
1.4.2	サブアトムック物理学 : 相原 博昭	229
1.4.3	一般相対論 : 横山 順一	229
1.4.4	宇宙物理学 : 須藤靖・馬場彩	230
1.4.5	固体物理学 II : 林 将光	230
1.4.6	量子光学 : 島野 亮	231
1.4.7	プラズマ物理学 : 高瀬 雄一	231
1.4.8	統計力学特論 : 川島 直輝	231
1.4.9	計算科学概論 : 大久保 毅 ほか 6 名	232
1.4.10	生物物理学特論 II : 樋口 秀男, 能瀬 聡直, 野口 博司	232
1.4.11	現代物理学入門 : 日下 暁人, 竹内 一将	232
1.5	4年生 A セメスター	232
1.5.1	化学物理学 : 山本 智	232
1.5.2	素粒子物理学 : 大谷 航	233
1.5.3	場の量子論 II : 筒井 泉	233
1.5.4	原子核物理学 : Kathrin Wimmer	233
1.5.5	固体物理学 III : 北川 健太郎, 高木 英典	233
1.5.6	重力波物理学 : Kipp Cannon, Raffaele Flaminio	234
1.5.7	電子回路論 : 勝本信吾	234
1.5.8	普遍性生物学 : 金子 邦彦, 古澤 力	234
1.5.9	系外惑星 : 須藤 靖, 相川 祐理	235
1.5.10	物理のための科学英語特論 : 小野 義正	235
<b>2</b>	<b>各賞受賞者紹介</b>	<b>237</b>
2.1	佐藤勝彦 名誉教授	237
2.2	小林俊一 名誉教授	237
2.3	永嶺謙忠 名誉教授	237
2.4	櫻井博儀 教授	238
2.5	北川健太郎 講師	238
2.6	松永隆佑 氏 (島野研助教、現 物性研究所)	238
2.7	大栗真宗 助教 (須藤研)	238
2.8	森貴司 氏 (宮下研助教、現 理化学研究所)	238
2.9	大屋瑤子 助教 (山本研)	239
2.10	蘆田祐人 氏 (上田研)	239
2.11	川畑幸平 氏 (上田研)	239
2.12	陳詩遠 氏 (駒宮研)	240
2.13	高木優 氏 (能瀬研)	240
2.14	一ノ倉聖 氏 (長谷川研、現 東京工業大学)	240
2.15	本郷優 氏 (初田研、現 理化学研究所)	240
2.16	大小田結貴 氏 (山本研)	240
2.17	平成 30 年度 理学系研究科 研究奨励賞・理学部 学修奨励賞	241

---

3	人事異動	242
4	役務分担	243
5	教室談話会	244
6	物理学教室コロキウム	245
7	金曜ランチトーク	246

I

# 研究室別 2018年度 研究活動報告

# 1 原子核・素粒子理論

## 1.1 原子核理論 (福嶋) 研究室

原子核理論研究室では、福嶋健二教授、山本新助教、博士研究員と大学院生らによって最先端のフロンティアを開拓する世界的な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。

ハドロン (バリオン、メソンの総称) を形成するクォークとグルーオンは、量子色力学 (QCD) により定式化された相互作用に従う。QCD は一見単純なラグランジアンで記述されるが、その非摂動性、非線型性のために、量子場の理論として他に類を見ないユニークな性質を持つ。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、強電場・磁場中のクォーク物質の物性とトポロジー、中性子星研究、回転する相対論的量子系で発現する磁化など、原子核ハドロン物理よりも更に大きな「場の量子論」的な枠組みから、QCD を初めとする様々な難問に挑戦している。

### 格子ゲージ理論における非可換渦

一般に超伝導体に磁場を印可すると量子渦が生成されるが、QCD におけるカラー超伝導体の場合には、非可換な内部自由度のために、非可換渦と呼ばれる量子渦が生成される。本研究では、格子ゲージ理論を用いて非可換渦の数値シミュレーションを実行し、非可換渦の特徴である分数トポロジカル電荷とその空間分布が得られた。

### 強磁場下におけるハドロンの変形

強磁場中でハドロンが変形する様子を、格子 QCD を用いて解析した。ハドロン中のクォーク密度相関によってハドロンの形状を定義し、それが磁場中でどのように変化するかを調べた。解析の結果、ハドロンは磁場に沿って長く伸びることが明らかになった。また、異なるハドロンの結果を比較することによって、変形の理由を現象論的視点から議論した。

### CP(N-1) 模型のモンテカルロ計算

2次元 CP(N-1) 模型は閉じ込めポテンシャルや自発的質量生成などの性質から、QCD の簡単な模型として古くからよく用いられている。本研究では、こ

の模型が格子上でも整数値に離散化されたトポロジカル電荷を持つことに着目し、トポロジカル電荷密度の結合定数依存性を解析した。その結果、トポロジカル電荷密度のフーリエスペクトル、特にその  $p=0$  での微係数が、非自明な結合定数依存性をすることが見出された [7](現在投稿中)。

### カイラル化学ポテンシャル中での高密度再和法

低温高密度における QCD 摂動計算はグルーオンの集団励起による補正をうける。本研究ではフェルミオンとボソンが相互作用する最も簡単な系である湯川模型を用いて、ボソンの集団励起による補正を計算している。特に、フェルミオン密度のカイラルバランスが崩れている状況で、集団励起の分散関係がどのような変更を受けるのかについて計算を行っている。

### Real Time Axial Ward Identity and the Schwinger Mechanism

Chirality under parity breaking background electromagnetic fields due to the Schwinger pair production is studied. The axial Ward identity is calculated exactly using an in-in, or out-of equilibrium Schwinger-Keldysh, formalism from which it is found that chirality is exponentially suppressed with fermion mass in a way solely indicative of the Schwinger mechanism. Likewise, it is inferred analogously an in-out formalism describes a scenario of equilibrium; notably, it is found in-out equilibrated chirality is conserved for any mass. Also, applications to the chiral magnetic effect and chiral condensate under the Schwinger mechanism are studied[8].

### Magnus 展開の収束性

周期外場駆動系においては、時間依存しない有効 Hamiltonian を定義でき、これを周波数の逆数で級数展開することが可能である。これは Magnus 展開と呼ばれる。本研究では駆動二準位系を取り上げ、その有効 Hamiltonian を解析した。低次項の具体的計算により、Magnus 展開は、高周波領域において厳密解とよく一致することが確認された。また、その漸近級数としての数理的構造をリサージュの観点から解析した。

### 原子核構造の物理における統計的手法の応用

核力を出発点に原子核構造を理解することは、原子核物理の積年の課題であるが、その実現には、厳密な第一原理計算の発展に加えて、構造計算における

不定性の適切な評価が不可欠となる。たとえば、パラメータの不定性を適切に物理量に反映したり、大規模な数値計算を現実的な時間で遂行するため必要な近似に由来した不定性を系統的に評価することにより、模型の記述能力・適応限界が検証でき、さらには模型に依らない普遍的な事実が浮かび上がることも期待される。これらの方法論を確立することは単に予測にエラーバーをつけるという以上の重要な意味を持ち、数値計算と物理量の(一般に)非線形な関係を可視化することに繋がる。前者のパラメータ由来の不定性に関しては、配置間相互作用の方法における不定性評価の一般的な方法論を論文で提示した [10]。後者に関しても現在精力的に取り組んでいる [23, 27]。

### 核・クォーク物質における量子異常流入

核・クォーク物質には種々のカイラルな渦糸が現れる。本研究は、これらの渦糸の中を流れる、量子的な対称性の破れ(量子異常)に誘起されたカレントを一般的に導いた。さらに、渦糸の内外を流れるカレントの増減が相殺することでカレントの総和が保存する機構(量子異常流入機構)を明らかにした [11, 15, 28, 34]。

### 中性子星状態方程式の機械学習による推定

中性子星の構造を決める高密度核・クォーク物質の状態方程式の理論計算には様々な困難が存在する。一方で、中性子星の観測は、今後利用できる情報の量と精度が向上すると考えられており、これらを利用して状態方程式を推定することは特に有用である。本研究では、形式的に1対1の対応がつく質量-半径の観測量と状態方程式との間の関係に注目した。この関係を最適化された人工ニューラルネットワークとして与える、観測量から状態方程式を推定するための方法論を確立し、それを実際の観測量に応用した [12, 16, 29, 35]。

### Eddy magnetization from the chiral Barnett effect

We discuss the spin, the angular momentum, and the magnetic moment of rotating chiral fermions using a kinetic theory. We find that, in addition to the chiral vortical contribution along the rotation axis, finite circular spin polarization is induced by the spin-momentum correlation of chiral fermions, which is canceled by a change in the orbital angular momentum. We point out that the eddy magnetic moment is nonvanishing due to the  $g$ -factors, exhibiting the chiral Barnett effect.

### AdS/CFT 対応を用いた QGP 中での電気伝導率の磁場依存性計算

QGP とは QCD 相図上カイラル対称な非閉じ込め相の事を指し、初期宇宙の状況にも対応している。この領域では輸送係数の計算には一般的に QCD の非線形性による困難が伴う。従来の研究によって、磁場が非常に弱い領域では緩和時間の導入などでランダム運動理論としての計算で電気伝導率が  $B$  の二乗に比例する依存性を持つことが分かり、磁場が非常に強い領域では Lowest Landau Level 近似を仮定した下で電気伝導率が  $B$  に比例する依存性を持つことが分かった。しかし、その間の領域では以上のような近似が用いられず、未開拓のままであった。そこで、今年度の業績として、クォーク化学ポテンシャルがゼロのときの電気伝導率依存性を解析的に計算し、磁場の強い極限と弱い極限の依存性も共に満たすことも示した。

### Lefschetz thimble による Dykhne-Davis-Pechukas 公式の解析

2準位系の遷移確率の近似公式である Dykhne-Davis-Pechukas 公式は1変数の積分で与えられる。この積分公式を Lefschetz thimble 法で解析した。その結果、この積分公式を導出する際に非自明な積分経路が選択されていることを明らかにした。

### The topological nontrivial objects in gauge field theories

Topological nontrivial configurations are generally believed to be responsible for various non-perturbative phenomena of gauge field theories. At 0 temperature, investigations on the instanton revealed the nontrivial vacuum structure of non-Abelian gauge theories. At finite temperature, some topological objects are supposed to be responsible for the behavior of the Polyakov's loop and the phase transition. Such objects like calerons and vortices are worthwhile to investigate.

<報文>

(原著論文)

- [1] M. G. Alford, G. Baym, K. Fukushima, T. Hatsuda and M. Tachibana, "Continuity of vortices from the hadronic to the color-flavor locked phase in dense matter," Phys. Rev. D **99**, no. 3, 036004 (2019)
- [2] S. Benić, K. Fukushima, O. Garcia-Montero and R. Venugopalan, "Constraining unintegrated gluon distributions from inclusive photon production in proton-proton collisions at the LHC," Phys. Lett. B **791**, 11 (2019)

- [3] K. Fukushima, “Extreme matter in electromagnetic fields and rotation,” *Prog. Part. Nucl. Phys.* (in press) arXiv:1812.08886 [hep-ph].
- [4] S. Pu, A. Yamamoto, “Abelian and non-Abelian Berry curvatures in lattice QCD”, *Nucl. Phys. B* **933**, 53 (2018).
- [5] A. Yamamoto, “Non-Abelian vortex in lattice gauge theory”, *PTEP* **2018**, 103B03 (2018).
- [6] K. Hattori, A. Yamamoto, “Meson deformation by magnetic fields in lattice QCD”, *PTEP* **2019**, in press (2019).
- [7] Y. Abe, K. Fukushima, Y. Hidaka, *et al.*, “Image-processing the topological charge density in the CP(N-1) model”, arXiv:1805.11058[hep-lat]
- [8] P. Copinger, K. Fukushima, and S. Pu, “Axial Ward Identity and the Schwinger Mechanism: Applications to the Real-Time Chiral Magnetic Effect and Condensates”, *Phys. Rev. Lett.*, **121**, 261602 (2018).
- [9] S. Yoshida, Y. Utsuno, N. Shimizu, and T. Otsuka, “Systematic shell-model study of  $\beta$ -decay properties and Gamow-Teller strength distributions in  $A \sim 40$  neutron-rich nuclei”, *Phys. Rev. C* **97**, 054321 (2018),
- [10] S. Yoshida, N. Shimizu, T. Togashi, and T. Otsuka, “Uncertainty quantification in the nuclear shell model”, *Phys. Rev. C* **98**, 061301 (R) (2018),
- [11] K. Fukushima and S. Imaki, “Anomaly inflow on QCD axial domain- walls and vortices”, *Phys. Rev. D* **97**, 114003 (2018).
- [12] Y. Fujimoto, K. Fukushima, K. Murase, “Methodology study of machine learning for the neutron star equation of state”, *Phys. Rev. D* **98**, 023019 (2018)
- [13] K. Fukushima, S. Pu, Z. Qiu “Eddy magnetization from the chiral Barnett effect” *Phys. Rev. A* **99**, 032105 (2019)
- (会議抄録)
- [14] Y. Hidaka, S. Pu and D. L. Yang, “Non-Equilibrium Quantum Transport of Chiral Fluids from Kinetic Theory”, *Nucl.Phys. A* **982** (2019) 547-550
- (学位論文)
- [15] 今木翔太, “Chiral Perturbation Theory Analysis on Dense QCD Matter”, 修士論文.
- [16] 藤本悠輝: “Reconstruction of Neutron Star Equation of State by Machine Learning”, 修士論文
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [17] A. Yamamoto: “Computation of the Berry curvature in lattice QCD”, The XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Venice Convention Center, Venice, Italy, May 13-19, 2018.
- [18] P. Copinger, K. Fukushima, and S. Pu, “Schwinger’s formula and the axial Ward identity for chirality production”, *New Frontiers in QCD*, Kyoto, June 11-18, 2018.
- [19] S. Ebihara: “Chiral Phenomena in Periodically Driven Systems”, *Floquet Theory: Fundamentals and Applications*, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Japan, Apl. 9–20, 2018.
- [20] S. Ebihara: “Magnetic SU(4) Skyrmions in  $\alpha$ -ZrCl<sub>3</sub> with Non-Abelian Fluxes”, *Topological phases of matter: from the quantum Hall effect to spin liquids*, Institut de Physique Théorique, France, Jun. 11–Jul. 6, 2018.
- [21] S. Yoshida, N. Shimizu, T. Togashi, T. Otsuka, “Uncertainty quantification in nuclear shell model”, 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Waikoloa, Hawaii, October 23-27, 2018.
- [22] S. Yoshida, “Uncertainty quantification in nuclear shell model”, *Recent advances in nuclear structure physics 2018 (RANSP2018)*, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan, November 29-December 3, 2018.
- [23] S. Yoshida, “Non-parametric Bayesian approach to the extrapolation in configuration interaction methods”, *TRIUMF Theory Workshop 2019, Progress in Ab initio Techniques in Nuclear Physics*, TRIUMF, Vancouver, BC Canada, Feb. 26 - Mar. 1, 2019.
- 招待講演
- [24] A. Yamamoto: “Non-Abelian vortex in lattice gauge theory”, *Workshop on Recent Developments in Chiral Matter and Topology*, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, Dec. 6-9, 2018
- (国内会議)
- 一般講演
- [25] P. Copinger, K. Fukushima, and S. Pu, “Chirality Production with Mass Effects - Schwinger Pair Production and the Axial Ward Identity”, *JPS Autumn Meeting*, Nagano, Sep. 15, 2018.
- [26] 吉田聡太, “原子核構造の物理における統計的手法の応用”, *RIBF 若手放談会:エキゾチック核物理の将来*, 理研神戸, 2019年2月18日-2月20日.
- [27] 吉田聡太, “ガウス過程を用いた No-core shell model における新たな外挿法”, *日本物理学会第74回年次大会*, 九州大学伊都キャンパス, 2019年3月14-17日.
- [28] 今木翔太, 福嶋健二, “QCD 物質における量子異常流入”, *日本物理学会第74回年次大会*, 九州大学伊都キャンパス, 2019年3月14日.

- [29] 藤本悠輝、福嶋健二、村瀬功一: “中性子星の状態方程式の機械学習による観測からの推定”、日本物理学会第 74 回年次大会、九州大学、2019 年 3 月 14-17 日。

招待講演

- [30] P. Copinger, K. Fukushima, and S. Pu, “Axial Ward identity and the Schwinger mechanism—Applications to the real-time chiral magnetic effect and condensates—”, Avenues of Quantum Field Theory in Curved Space, Yokohama, July 28, 2018.

(セミナー)

- [31] P. Copinger, K. Fukushima, and S. Pu, “Chirality Production with Mass Effects - Schwinger Pair Production and the Axial Ward Identity”, YITP Nuclear Theory Seminar, Kyoto, Dec. 18, 2018.
- [32] Sota Yoshida, “Uncertainty Quantification in Nuclear Shell Model”, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Hessen, Germany, August 27, 2018.
- [33] 吉田聡太, “核力に基づく殻模型計算の進展と Uncertainty Quantification”, 京都大学 原子核理論研究室, 2018 年 11 月 16 日。
- [34] 今木翔太: “Anomaly inflow on QCD axial domain-walls and vortices”, (慶應義塾大学日吉キャンパス, 2018 年 5 月 30 日)
- [35] 藤本悠輝: “Methodology study of machine learning for the neutron star equation of state”, (理化学研究所 量子ハドロン物理学研究室, 2018 年 6 月 18 日)

## 1.2 素粒子論研究室

### 1.2.1 現象論

#### swampland と Higgs

近年、de Sitter swampland conjecture と呼ばれる予想が注目を集めている。特に当初提唱された swampland conjecture は Higgs ポテンシャルの修正を要求し、Higgs が quintessence 場と呼ばれる非常に軽く弱い相互作用をするスカラー場と結合することを要請する。浜口、諸井は伊部 (宇宙線研) と共にこうした修正 Higgs ポテンシャルのシナリオを解析し、一般に Higgs の期待値が quintessence 場の値に依存し、厳しい現象論的制限 (長距離力や陽子電子質量比の時間依存性などから来る制限) を受けることを示した [1]。

#### 超対称標準模型

Zheng は、Bagnaschi (Paul Scherrer Institut) らと共に、最小超対称標準模型におけるヒッグス粒子質量の理論予想を FeynHiggs 2.14.1 を用いて精密

化した上で、模型のパラメーター空間に対する現象論的制限を議論した [2]。

永田は、川村 (慶応大)、小林 (北海道大) とともに、CNMSSM とよばれる超対称標準模型のスカラー・ポテンシャル構造を解析し、大統一スケールにおいてゲージノ質量の統一を仮定しない場合望ましい真空が得られやすくなることを示した [3]。

#### 超対称フラクシオン模型

素粒子標準模型の問題である強い CP 問題、フレーバー階層性問題、暗黒物質問題を同時に解決する最も単純な模型としてフラクシオン模型が近年提案された。江間、萩原、浜口、諸井、中山はこれに超対称性を課した「超対称フラクシオン模型」を提案し、上記に加えゲージ階層性問題も解決し、さらにこの模型の枠内でインフレーションが実現可能であることを示した [4]。

#### 暗黒物質

江間、中山、Tang は最も単純な暗黒物質の模型として、暗黒物質が重力相互作用しか持たない模型を提案し、インフレーション終了後の再加熱期における重力的粒子生成と呼ばれる現象により、観測値と合致する程度の暗黒物質を生成できることを示した [5]。

柳は鎌田 (IBS)、金田 (Minnesota U.)、Yu (UC, Riverside) とともに、標準模型の  $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$  対称性をゲージ化することで、ミューオン異常磁気モーメントの理論と実験とのずれ、及び暗黒物質の small scale problem を同時に解決可能なモデルを提案した。暗黒物質は軽いスカラー粒子を媒介して自己相互作用をしており、bullet cluster の制限を逃れつつ、dwarf galaxy などで確認されている観測と CDM モデルとのずれをうまく説明できる。我々は提案したモデルに対する実験・観測からの制限を詳細に調べ、興味あるパラメータ領域を明らかにした [6]。

永田は、Ellis (King's College London & CERN), Olive (U. of Minnesota) とともに、暗黒物質核子散乱断面積を計算する際に必要な核子行列要素の再評価を行い、計算の理論的不定性がどの程度あるのかについて議論した [7]。

永田は、久野 (名古屋大)、長井 (東北大) とともに、標準模型粒子と輻射補正を通じてのみ相互作用を行うディラック・フェルミオン暗黒物質模型を研究した。この種の暗黒物質は量子効果によって磁気・電気双極子モーメントを獲得するが、それらを通じて将来の暗黒物質直接探索実験によってこの模型を検証することができることを明らかにした [8]。

#### アクシオンと 21cm 線観測

最近、EDGES 実験が宇宙の再イオン化時期に対応する 21cm 線の観測を行い、予想より大きな吸収線を

発見した。諸井、中山、Tang は宇宙背景放射のレイリー・ジーンズ波長域において、背景アクシオンが原子磁場のもとで光子に転換することにより、EDGES の観測結果を説明可能であることを示した [9]。

### 重力波

中山、Tang はインフラトン崩壊の過程において必然的に重力子の制動放射が起き、これが宇宙背景重力波の短波長領域に一定の寄与をすることを示した [10]。

### フレーバー対称性模型

ニュートリノ混合の測定値を自然に説明する模型として、非可換離散フレーバー対称性を課す模型が多数提案されている。しかしこれらの模型には宇宙論的ドメインウォール問題があることが知られている。千草、中山は一般に QCD アノマリーによる非可換離散対称性の破れの効果を調べ、これがドメインウォール問題を解決するには十分ではないことを示した [11]。また、千草、中山は粕谷（神奈川大）とともに、フレーバー対称性を破るヒッグス場の真空期待値を正しく与える新たな機構を提案し、この機構においては自然にドメインウォール問題が解決されることを示した [12]。

浅井、濱口、永田、Tseng は、津村（京大）とともに、一連の最小  $U(1)_{L_\alpha - L_\beta}$  ゲージ理論におけるニュートリノ質量構造を調べ、ニュートリノ振動実験および CMB 観測の最新の結果を考慮することにより、これらの模型の大部分は既に実験的に排除されていることを明らかにした [13]。さらに、唯一実験的に許されている  $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$  模型も、近い将来の実験によって検証することが可能であることを示した。

### 弱い重力予想と素粒子模型

近年、弦理論からの予想として、弱い重力予想 (Weak Gravity Conjecture) が注目を集めており、さらにその帰結として、標準模型を 3 次元以下にコンパクト化した模型が超対称性を破る安定な AdS 真空を持ってはいけことが提案されている。中山は高橋（東北大）、柳田（IPMU）とともに、B-L 対称性にもとづいた軽い暗黒物質模型を再考し、軽い粒子のカシミアエネルギーがコンパクト化した標準模型の真空を不安定にすることを示し、弱い重力予想と相性が良いことを示した [14]。

### モジュライ問題

超重力理論や弦理論において、しばしば相互作用の弱いスカラー場が宇宙論的に深刻な問題を引き起こすことが知られている（モジュライ問題）が、モ

ジュライ場が十分に重ければこの問題を回避できると言われていた。萩原、浜口、中山はこのような場合にさえ再加熱期のインフラトンのダイナミクスとそれに伴う粒子生成の効果により、必然的にモジュライ場の振動が誘起され、モジュライ問題が完全には解決しないことを示した [15]。

### インフレーション

Tang は、Wu (ICTP-AP) とともに、ワイル対称性の破れがインフレーションを生じさせている可能性について議論した [16]。

永田は、Ellis (King's College London & CERN), Garcia (Rice U.), Nanopoulos (Texas A&M U., HARC, Academy of Athens), Olive (U. of Minnesota) とともに、no-scale flipped  $SU(5) \times U(1)$  超対称大統一理論においてシングレット場がインフラトンになっている模型を考察し、インフレーション後の大統一ゲージ対称性の破れがおよぼす宇宙論的效果を調べた上で、この模型が現象論的に妥当であることを示した [17]。

### 中性子星冷却とアクシオン

濱口、永田、柳、Zheng は、超新星残骸カシオペア A の中心にある中性子星を研究し、その冷却曲線の観測値と中性子星標準冷却理論とが無矛盾であるべしとの要請によりアクシオン崩壊定数に対して新たな制限が得られることを示した [18]。

### 長寿命粒子探索

伊藤、諸井、永田は、陣内（東工大）、音野（九州大）とともに、LHC および 100 TeV コライダーにおける長寿命グルイーノ探索で、衝突点から 100  $\mu\text{m}$  程度離れた場所でグルイーノが崩壊した場合に、その情報を再構成することでグルイーノ探索の感度を飛躍的に向上させることができることを示した [19]。

永田は、Lara (UAM), López-Fogliani (U. of Buenos Aires), Muñoz (UAM), 音野 (九州大), Ruiz de Austri (CSIC-UV) と共に、 $\mu\nu\text{SSM}$  模型において左巻きスニュートリノが最軽量超対称粒子となっている場合、衝突点から離れた崩壊点を再構成することでスニュートリノ探索の感度を飛躍的に向上させることができることを示した [20]。

## 1.2.2 弦理論、場の理論全般

### 格子上の場の理論

吾郷は Grabowska と Kaplan によって提案されたカイラルオーバーラップ演算子を用いて導出される格子上的有効作用に基づいて一般次元でゲージアノマリーを導出できることを示した。そして具体的に

2、4、6次元の場合で連続理論において知られているゲージアノマリーと等しくなることを確認した [21].

### 弦理論の代数構造の研究

松尾研ではここ数年共同研究者とともに弦理論やゲージ理論に現れる無限次元量子対称性である量子トロイダル代数の研究を行っている。今年度もその路線でいくつかの研究を行った。

数年前、Gaiotto と Rapcak が 3 枚のブレーンの交差上の対称性として corner vertex operator algebra を提案した。その後、この対称性は量子トロイダル代数のある種の reduction として解釈されることがわかり、また Feynman 図的な合成を行う事により様々な新しい対称性を生成できることを示した。原田と松尾はこれらの代数に対するミニマル模型のシステムチックな導出法として、double reduction を提案した。またこの提案による計算を具体的にを行うことにより W 代数や  $N=2$  超共形代数のミニマル模型の指標を具体的に計算し、それらが知られている結果と一致していることを示した [22, 52, 53, 54].

量子トロイダル代数の大きな特徴は IIB 型超弦理論に現れる双対性  $SL(2, Z)$  の自己同型を持っている点である。このことは量子トロイダル代数が超弦理論の世界面の対称性である Virasoro 代数を部分代数として含むだけでなく、より高次元 (4 次元超対称ゲージ理論やストリング理論) の表現が可能な対称性になっていることを示している。笹、渡辺、松尾はこの双対性構造を自由フェルミオン系で詳しく調べ S 変換のもとでの基底の変換について調べた。また、位相的弦の振幅の双対性を S 変換した基底の性質により示した。

松尾は KIAS の J. E. Bourgin 氏、Melbourne 大学の Omar Foda 氏と共同で Real topological vertex について研究を行った。Real topological vertex はゲージ群が  $SO$ ,  $Sp$  型の場合に位相的弦模型の振幅を与える構成要素となる。

松尾は、量子トロイダル代数とその縮退版である  $SH^c$  を用いた Alday-Gaiotto-Tachikawa 予想の証明について集中講義を行った [86].

朱は Omar Foda (University of Melbourne) との共同研究で、6次元  $\mathcal{N} = (1, 0)$  ゲージ理論のインスタントン分配関数の背後にある楕円的代数構造を elliptic topological vertex の構成によって明らかにした [23, 24]. この仕事に基づいて朱は学位論文 [31] を製作した。

朱、笹は西中 (立命館大) とともに、Argyres-Douglas 理論における surface operator と双対な 2 次元共形理論の表現との間の対応ルールを superconformal index の位相的場の理論による計算法で調べた [25].

松尾、笹、渡辺は、Ding-Iohara-Miki 代数の plane partition 表現を  $gl_\infty$  代数を用いて表す方法を考え、その過程で Young 対称子の一般化を定義した [75].

### エンタングルメントエントロピーとホログラフィー原理

西岡は、近年の場の量子論およびホログラフィー原理を用いた量子エンタングルメントの発展に関する総括論文を執筆した [26].

西岡、佐藤、渡辺は小林 (IPMU) とともに defect CFT におけるエンタングルメントエントロピーおよび球面上の分配関数がくりこみ群の下でどう振る舞いかを、場の量子論およびホログラフィック模型の具体例を通して調べた [27]. その結果、エンタングルメントエントロピーは必ずしもくりこみ群の下で単調減少しないが、球面上の分配関数は単調減少することが分かった。この事実から一般的な defect CFT において球面上の分配関数がくりこみ群の下で単調減少する  $C$ -定理と呼ばれる予想を立てた。

### 欠損演算子入りの共形場理論

西岡は小林 (IPMU) とともに defect CFT においてスピンをもつ欠損演算子を導入し、その相関関数を対称性の観点から分類し決定した [28]. またスピンを持つ欠損演算子の局所演算子による展開を決定し、その性質を系統的に調べ上げた。

佐藤は Karch (Washington U.) とともに、boundary CFT や defect CFT における conformal manifold に関する研究をした。conformal perturbation theory を用いて、摂動論的に conformal manifold が存在するための必要条件を明らかにした。具体的に 4 次元  $U(1)$  ゲージ理論に 3 次元のフェルミオンが結合した模型が conformal manifold の例になっていることを確かめた [29].

<受賞>

<報文>

(原著論文)

- [1] K. Hamaguchi, M. Ibe and T. Moroi, JHEP **1812** (2018) 023 [arXiv:1810.02095 [hep-th]].
- [2] E. Bagnaschi *et al.*, Eur. Phys. J. C **79**, no. 2, 149 (2019) [arXiv:1810.10905 [hep-ph]].
- [3] J. Kawamura, T. Kobayashi and N. Nagata, JHEP **1810**, 120 (2018) [arXiv:1808.07985 [hep-ph]].
- [4] Y. Ema, D. Hagihara, K. Hamaguchi, T. Moroi and K. Nakayama, JHEP **1804**, 094 (2018) [arXiv:1802.07739 [hep-ph]].
- [5] Y. Ema, K. Nakayama and Y. Tang, JHEP **1809**, 135 (2018) [arXiv:1804.07471 [hep-ph]].
- [6] A. Kamada, K. Kaneta, K. Yanagi and H. B. Yu, JHEP **1806**, 117 (2018) [arXiv:1805.00651 [hep-ph]].
- [7] J. Ellis, N. Nagata and K. A. Olive, Eur. Phys. J. C **78**, no. 7, 569 (2018) [arXiv:1805.09795 [hep-ph]].
- [8] J. Hisano, R. Nagai and N. Nagata, JHEP **1812**, 059 (2018) [arXiv:1808.06301 [hep-ph]].

- [9] T. Moroi, K. Nakayama and Y. Tang, Phys. Lett. B **783**, 301 (2018) [arXiv:1804.10378 [hep-ph]].
- [10] K. Nakayama and Y. Tang, Phys. Lett. B **788**, 341 (2019) [arXiv:1810.04975 [hep-ph]].
- [11] S. Chigusa and K. Nakayama, Phys. Lett. B **788**, 249 (2019) [arXiv:1808.09601 [hep-ph]].
- [12] S. Chigusa, S. Kasuya and K. Nakayama, Phys. Lett. B **788**, 494 (2019) [arXiv:1810.05791 [hep-ph]].
- [13] K. Asai, K. Hamaguchi, N. Nagata, S. Y. Tseng and K. Tsumura, Phys. Rev. D **99**, no. 5, 055029 (2019) [arXiv:1811.07571 [hep-ph]].
- [14] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B **790**, 218 (2019) [arXiv:1811.01755 [hep-ph]].
- [15] D. Hagihara, K. Hamaguchi and K. Nakayama, JCAP **1903**, 024 (2019) [arXiv:1811.05002 [hep-ph]].
- [16] Y. Tang and Y. L. Wu, Phys. Lett. B **784**, 163 (2018) [arXiv:1805.08507 [gr-qc]].
- [17] J. Ellis, M. A. G. Garcia, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, JCAP **1904**, 009 (2019) [arXiv:1812.08184 [hep-ph]].
- [18] K. Hamaguchi, N. Nagata, K. Yanagi and J. Zheng, Phys. Rev. D **98**, no. 10, 103015 (2018) [arXiv:1806.07151 [hep-ph]].
- [19] H. Ito, O. Jinnouchi, T. Moroi, N. Nagata and H. Otono, JHEP **1806**, 112 (2018) [arXiv:1803.00234 [hep-ph]].
- [20] I. Lara, D. E. López-Fogliani, C. Muñoz, N. Nagata, H. Otono and R. Ruiz De Austri, Phys. Rev. D **98**, no. 7, 075004 (2018) [arXiv:1804.00067 [hep-ph]].
- [21] T. Ago, Prog. Theor. Exp. Phys. **2018**, 113B01 (2018) [arXiv:1808.02701 [hep-lat]].
- [22] K. Harada and Y. Matsuo, JHEP **1902**, 050 (2019) [arXiv:1810.08512 [hep-th]].
- [23] R.-D. Zhu, JHEP **1808**, 050 (2018) [arXiv:1712.10255 [hep-th]].
- [24] O. Foda and R.-D. Zhu, JPhysA **51**, 46 (2018) 465401 [arXiv:1805.12073 [hep-th]].
- [25] T. Nishinaka, S. Sasa and R.-D. Zhu, JHEP **1903**, 091 (2019) [arXiv:1811.11772 [hep-th]].
- [26] T. Nishioka, “Entanglement entropy: holography and renormalization group,” Rev. Mod. Phys. **90**, no. 3, 035007 (2018) [arXiv:1801.10352 [hep-th]].
- [27] N. Kobayashi, T. Nishioka, Y. Sato and K. Watanabe, “Towards a  $C$ -theorem in defect CFT,” JHEP **1901**, 039 (2019) [arXiv:1810.06995 [hep-th]].
- [28] N. Kobayashi and T. Nishioka, “Spinning conformal defects,” JHEP **1809**, 134 (2018) [arXiv:1805.05967 [hep-th]].
- [29] A. Karch and Y. Sato, “Conformal Manifolds with Boundaries or Defects,” JHEP **1807** (2018) 156 [arXiv:1805.10427 [hep-th]].
- (会議抄録)
- (国内雑誌)
- [30] 中山和則, “重力子”, 数理科学 2018 年 12 月号.
- (学位論文)
- [31] 博士論文: 朱睿東, “Topological Vertex Formalism on Generalized Brane Web via Ding-Iohara-Miki Algebra.”
- [32] 修士論文: 萩原大佑, “Supersymmetric Extension of Axion Model with Flavor Symmetry (フレーバー対称性を持つアクシオン模型の超対称化).”
- [33] 修士論文: 笹晋也, “Ding-Iohara-Miki 代数における  $S$  双対性の研究.”
- (著書)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [34] D. Hagihara, “Supersymmetric Flaxion,” COSMO-18, IBS, Korea, Aug. 30, 2018.
- [35] Natsumi Nagata, “Theoretical Developments in Dark Matter-Nucleon Scattering, Dark Side of the Universe 2018, LAPTh, Annecy, France, Jul. 25–29, 2018.
- [36] Kazunori Nakayama, “Production of Purely Gravitational Dark Matter”, COSMO2018, IBS, Korea (2018/8/28).
- [37] Yong Tang, “Stochastic Gravitational Wave from Particle Origin”, KEK-PH, Dec 4-7, 2018.
- [38] S. Sasa, “Construction of the  $S$ -dual basis in the Ding-Iohara-Miki algebra”, Kavli Asian Winter School 2019, Sogang University, Seoul, Korea, 7-17 Jan, 2019.
- [39] Y. Sato, “Conformal manifolds with boundaries and defects”, Strings and Fields 2018, Kyoto University, 1 August, 2018.
- [40] Y. Sato, “Towards a  $C$ -theorem in defect CFT”, East Asia Joint Workshop on Fields and Strings 2018, KIAS, 5 November, 2018.
- [41] Shih-Yen Tseng, “Minimal Gauged  $U(1)_{L_\alpha-L_\beta}$  Models Driven into a Corner”, 5th International Workshop on Dark Matter, Dark Energy and Matter-Antimatter Asymmetry, Fo-Guang-Shan, Kaohsiung, Taiwan, 2018 年 12 月 31 日.
- [42] K. Watanabe, “Towards a  $C$ -theorem in defect CFT”, KEK Theory Workshop 2018, KEK, December 17-21, 2018.

- [43] Keisuke Yanagi, Self-interacting dark matter and muon  $g - 2$  in a gauged  $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$  model, The Dark Side of the Universe, Annecy, France, 2018 年 6 月.
- [44] Keisuke Yanagi, Self-interacting dark matter and muon  $g - 2$  in a gauged  $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$  model, SUSY2018, Barcelona, Spain, 2018 年 7 月.
- [45] Keisuke Yanagi, A Limit on Axion from the Cooling Neutron Star in Cassiopeia A, The 8th KIAS workshop on particle physics and cosmology, KIAS, Seoul, Korea, 2018 年 10 月.
- [46] Jiaming Zheng, “A Limit on Axion from the Cooling Neutron Star in Cassiopeia A”, COSMO, Aug 2018, Daejeon, Korea.
- 招待講演
- [47] Koichi Hamaguchi, “Leptogenesis,” Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research 2019, March. 7, 2019, 東北大学.
- [48] Koichi Hamaguchi, “Flaxion, Axion and Neutron Star,” Yonsei university Cosmology and High Energy physics workshop, 2019 年 2 月 26 日, Yonsei Univerisy, Seoul, Korea.
- [49] Koichi Hamaguchi, “A Limit on Axion from the Cooling Neutron Star in Cassiopeia A,” Light Dark World 2018, 2018 年 12 月 28 日, KAIST, Daejeon, Korea.
- [50] Koichi Hamaguchi, “Neutrinoless double beta decay, Leptogenesis, and gauged  $U(1)_{\mu-\tau}$  models,” Double beta decay and underground science (DBD18)/第 5 回 日米物理学会 合同核物理分科会, 2018 年 10 月 23 日, ハワイ.
- [51] Koichi Hamaguchi, “A Limit on Axion from the Cooling Neutron Star in Cassiopeia A,” Particle Astrophysics and Cosmology Including Fundamental Interactions (PACIFIC 2018.9), 2018 年 9 月 2 日, Moorea, French Polynesia.
- [52] Yutaka Matsuo, “Web of W algebras and their minimal models”, workshop “Topological Field Theories, String theory and Matrix Models - 2018”, Moscow, August 20-25, 2018.
- [53] Yutaka Matsuo, “Plane Partition Realization of (Web of) W-algebra Minimal Models”, workshop “International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics”, Osaka City University December 12-14, 2018.
- [54] Yutaka Matsuo, “Plane Partition Realization of (Web of) W-algebra Minimal Models”, workshop “NCTS Annual Theory Meeting 2018”, Hsinchu Taiwan, December 17-20, 2018.
- [55] Takeo Moroi, “State-of-the-art calculation of the decay rate of the electroweak vacuum in the standard model,” KPS meeting (April 25 – 27, 2018), Daejeon, Korea.
- [56] Takeo Moroi, “Stability of electroweak vacuum in the standard model and beyond,” Cosmological probes of BSM – from the Big Bang to the LHC (May 6 – 12, 2018), Benasque, Spain.
- [57] Takeo Moroi, “Conversion of dark radiation to photon in early universe and 21cm signal,” COSMO2018 (August 28 – 31, 2018), Daejeon, Korea.
- [58] Takeo Moroi, “Conversion of axion to photon in early universe and 21cm signal,” PACIFIC 2018.09 (August 31 – September 4, 2018), Moorea, French Polynesia.
- [59] Takeo Moroi, “Studying Gauginos at Future 100TeV  $pp$  Collider,” Yonsei university Cosmology and High Energy physics workshop (February 25 – 27, 2019), Seoul, Korea.
- [60] Natsumi Nagata, “Dark Matter Theory: Current status of WIMP DM”, Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research 2019, Tohoku University, Sendai, Japan, Mar. 7–9, 2019.
- [61] Natsumi Nagata, “Limit on the Axion Decay Constant from the Cooling Neutron Star in Cassiopeia A”, KEK-PH 2018 winter, KEK, Tsukuba, Japan, Dec. 4–7, 2018.
- [62] Natsumi Nagata “Long-Lived Particle Searches as a Probe of Dark Sectors: Theoretical Overview” LLP workshop 2018, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, Sep. 18, 2018.
- [63] T. Nishioka, “OPE for Conformal Defects and Holography” GGI workshop “Entanglement in Quantum Systems”, Galileo Galilei Institute, Italy, May 21 - July 13, 2018.
- [64] T. Nishioka, “Entanglement entropy with defects”, Mini-workshop for the entanglement entropy at SKKU, Sungkyunkwan University, Korea, June 22, 2018.
- [65] T. Nishioka, “Quantum information measures in QFT and holography”, Indian Strings Meeting 2018, IISER, India, December 16 - 21, 2018.
- [66] T. Nishioka, “Quantum Information Measures in QFT”, Kavli Asian Winter School on Strings, Particles and Cosmology, Sogang University, Korea, January 7 - 17, 2019.
- [67] Yong Tang, “Axion-photon conversion and effects on 21cm signal”, New Physics Forum in University of Tokyo, March 2019, Tokyo, Japan.
- [68] Jiaming Zheng, “A Limit on Axion from the Cooling Neutron Star in Cassiopeia A”, New Physics Forum in University of Tokyo, March 2019, Tokyo, Japan.
- (国内会議)
- 一般講演

- [69] 吾郷太一, “カイラルオーバーラップ演算子に基づくゲージアノマリーの計算”, 日本物理学会第 74 回年次大会, 九州大学伊都キャンパス, 2019 年 3 月 14 日.
- [70] 萩原大佑, “Supersymmetric Flaxion”, 基研研究会 PPP2018, 京都大学基礎物理学研究所, 2018 年 8 月 8 日
- [71] 永田夏海, “Non-Universal Gaugino Masses in the NMSSM” 日本物理学会 74 回年次大会, 九州大, 2019 年 3 月 14–17 日.
- [72] 永田夏海, 「Cassiopeia A 中性子星の冷却曲線とアクション」基研研究会 PPP2018, 京都大学基礎物理学研究所, 2018 年 8 月 10 日.
- [73] 中山和則, “Axion-photon conversion and effects on 21cm observation”, 日本物理学会 2018 年秋期大会, 信州大学 (2018/9/14).
- [74] 笹晋也, “Ding-Iohara-Miki 代数における S 双対基底の構成”, 日本物理学会 2019 年春季大会, 九州大学, 2019 年 3 月 15 日.
- [75] 渡辺彬生, “DIM 代数における plane partition 表現の  $gl_\infty$  代数を用いた構成について”, 日本物理学会第 74 回年次大会, 九州大学, 2019 年 3 月 15 日.
- [76] 柳圭祐, 中性子星の表面温度観測による暗黒物質の探索可能性, 日本物理学会春季大会, 九州大学, 2019 年 3 月.
- [77] 朱睿東, “Elliptic Extension of Topological Vertex”, 日本物理学会 2018 年度秋季大会, 2018 年 9 月 14 日.
- [78] 朱睿東, “Correspondence between Surface Operators in Argyres-Douglas Theories from Higgsing and Non-vacuum Modules in Chiral Algebra”, 日本物理学会 2019 年度春季大会, 2019 年 3 月 15 日.

## 招待講演

- [79] 濱口幸一, 「物理 Overview」ILC 夏の合宿 2018, 2018 年 9 月 11 日, 笠戸島.
- [80] 永田夏海, 「フレーバー構造と陽子崩壊」ニュートリノで拓く素粒子と宇宙研究会, 東京大学, 2018 年 10 月 6 日.
- [81] 永田夏海, 「WIMP 暗黒物質の現状」新テラスケール研究会, 名古屋大, 2018 年 7 月 27 日.
- [82] 永田夏海, 「暗黒物質と新物理」第 8 回高エネルギー物理春の学校, びわこクラブ, 北小松, 2018 年 5 月 17–19 日.
- [83] Takeo Moroi, “Implication of the LHC results and future prospects,” JSP meeting (September 14 – 17, 2018), Matsumoto, Japan.
- [84] Takeo Moroi, “Beam-Dump Experiment at the ILC,” Workshop on Long lived particle searches in various energy scales (September 18, 2018), Tokyo, Japan.
- [85] Takeo Moroi, “Beam-Dump Experiment at the ILC,” JSP meeting (March 14 – 17, 2019), Fukuoka, Japan.

(セミナー)

## 2 原子核・素粒子実験

### 2.1 原子核実験グループ (櫻井・Wimmer)

原子核実験グループは、現在櫻井研、Wimmer 研の二つの研究室で構成され、国内外の加速器を利用して原子核物理の実験研究を行っている。それぞれの研究室が取り組んでいる研究テーマは異なるが、大学院生の居室や実験室は共通とし、セミナーやコキウムも共催している。

櫻井研究室では、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）や、天然に安定存在する原子核よりも中性子数または陽子数が極端に多い不安定核（エキゾチック原子核）の分光研究をしている。大阪大学の核物理研究センターではパイ ( $\pi$ ) 中間子やミューオン ( $\mu$ ) で作られるエキゾチック原子の分光研究を、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) やアメリカ超電導サイクロトロン研究所 (NSCL)、フランス国立大型重イオン加速器施設 (GANIL) では、高強度な不安定核ビームを利用したガンマ線核分光研究を進めている。

Wimmer 研究室では、直接原子核反応によって核を構成する核子の一粒軌道の波動関数を実験的に求めることで、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) などで行っている。

#### 2.1.1 不安定核の構造研究

##### 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ガンマ線核分光測定を通じて、陽子・中性子比率が安定核とは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、2015 年 5 月、2017 年 5 月の 3 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する、SEASTAR 国際共同実験 (Shell Evolution And Search for Two-plus energies At RIBF) を主導してきた。SEASTAR 実験では、核反応によって励起状態を効率的に生成し、かつビーム重心系でのガンマ線のエネルギーを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 を組み合わせた高機能液

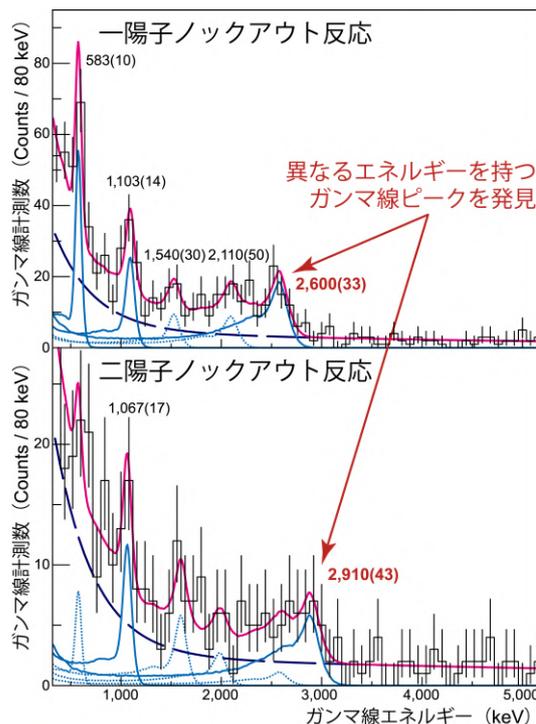


図 2.1.1: 一陽子および二陽子ノックアウト反応によって得られたガンマ線のエネルギースペクトル。

体水素標的装置 MINOS システムと、高検出効率で脱励起ガンマ線を測定する 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る。これら最先端の測定器と高い強度を持つ不安定核生成施設 RIBF により、世界で最も中性子過剰なエキゾチック原子核の核分光が可能である。

第一次 SEASTAR 実験では、陽子数が 28、中性子数が 50 とどちらも魔法数を持つ中性子過剰なニッケル同位体  $^{78}\text{Ni}$  の二重魔法性の直接的証拠、さらには魔法性消失の開始地点となっている可能性を発見した。図 2.1.1 は実験で測定したガンマ線のエネルギースペクトルで、一陽子ノックアウト反応で測定した 2.6 MeV のエネルギーを持つピークを  $^{78}\text{Ni}$  の第一  $2^+_1$  励起準位から基底準位への脱励起ガンマ遷移と同一化した。 $^{78}\text{Ni}$  近傍核ではこの第一励起準位のエネルギーはおおよそ 1 MeV 程度であり、それらに比べて極端に大きな励起エネルギーを持つことは、中性子過剰な  $^{78}\text{Ni}$  原子核においても陽子 28 および中性子 50 はその魔法性が保持されていることを示す直接的で強い証拠となった。また、二陽子ノックアウト反応ではガンマ線スペクトルに 2.9 MeV のガンマ線ピークが測定され、これは第二  $2^+_2$  から基底準位への遷移ガンマ線と想定される。この第二  $2^+$  励起準位の性質を解明するため準位スーパーコンピュータを用いた大規模殻構造計算を行った結果、この準位は魔法性が破られ変形した状態であることが示唆される。この理論計算に基づく、 $^{78}\text{Ni}$  は魔法性が保たれる最後の原子核であり、より中性子過剰な核



図 2.1.2: NSCL で使用したトラッキング型ガンマ線検出器アレイ GREINA。GREINA は全部で 32 台のゲルマニウム半導体結晶で構成される高分解能高効率ガンマ線検出器である。

では陽子数 28、中性子数 50 の魔法性が失われ変形した状態にあることがわかった。[24, 32]

第三次 SEASTAR 実験では中性子過剰なカルシウム同位体の分光研究を行った。カルシウム同位体は陽子魔法数 20 を持つが、それに加えて中性子数が 32、34 を持つ  $^{52,54}\text{Ca}$  では陽子・中性子がともに魔法数となる二重魔法数構造を持つことが近年の研究でわかってきている。安定核では中性子数 32、34 は魔法数にはならないが、中性子過剰核では陽子と中性子の一粒子軌道間に存在する核子間のテンソル力により核を構成する殻構造が変化することで、新しい魔法数 32、34 が発現すること理解されている。しかし、実験データの不足からその定量的な評価はなされていない。そこで、我々は二重魔法数核である  $^{54}\text{Ca}$  近傍の奇核を核子ノックアウト反応によって励起することで一粒子励起準位を測定し、中性子過剰領域にのみ存在する新魔法数 34 の定量的評価を行った。これまでに、 $^{55}\text{Ca}$  及び  $^{55}\text{K}$  の脱励起ガンマ線の測定に成功し、現在得られた準位構造の解明を進めている。[35, 50]

#### 中性子数 28 における閉殻消失: $^{43}\text{S}$ の単一粒子構造

一般的に核子数が魔法数である原子核は球形であることが知られているが、中性子数が魔法数 28 を持つ中性子過剰な原子核ではオブレート型（みかん型）変形やプロレート型（ラグビーボール型）変形が共存・混合することが知られている。中性子魔法数 28 の消失である。これまでも多くの実験・理論研究によりその巨視的な「形」が議論されてきたが、微視的な観点から魔法数消失や変形状態発現のメカニズムを研究した実験例は少ない。我々はこの変形と魔法数の破れに対する微視的な理解を進めるため、中性子ノックアウト反応による中性子配位の測定実験を  $^{43}\text{S}$  について行った。

実験はアメリカのミシガン州立大学にある超電導サ

イクロトロン研究所 (NSCL) において行った。 $^{48}\text{Ca}$  の核破碎反応によって生成した  $^{44}\text{S}$  を A1900 スペクトロメーターによって分離し、ベリリウム標的に照射した。反応によって核内の中性子を一つノックアウトした  $^{43}\text{S}$  は、S800 スペクトロメーターで粒子識別をした。これまで  $^{43}\text{S}$  の分光を困難にしていたのは、この原子核が核異性体を持つため触発ガンマ線の同時測定だけではその準位構造を決定できなかったことにある。そこで、標的周辺に配置した触発ガンマ線のためのトラッキング型ガンマ線検出器アレイ GREINA (図 2.1.2) に加えて、S800 の最終焦点面に遅延ガンマ線検出器 IsoTagger を配置することで遅延同時測定も行った。ガンマ線の同時計測解析の結果、 $^{43}\text{S}$  の束縛状態の準位構造とガンマ線崩壊様式をほぼ完全に決定することに成功した。また、S800 による  $^{43}\text{S}$  の運動量分布測定により励起準位のスピン・パリティの同定も行った。本実験では軌道角運動量  $L=1$  を持つ中性子ノックアウトが強く測定された。これは、 $^{44}\text{S}$  において中性子数 28 の閉殻を破る配位が優勢であることを示し、中性子魔法数 28 の破れを示す直接的・微視的な証拠である。[33]

#### 陽子非束縛核 $^{7,8}\text{C}$ の核分光

近年、質量数 10 以下程度の軽い原子核のなかでも、 $^7\text{H}$  や  $^4n$  といった陽子数に対して中性子数が極端に多い系の共鳴状態の存在が実験的に報告されるようになってきた。こうしたエキゾチックな系を違う角度から実験的に研究する方法として、陽子数と中性子数を入れ替えた鏡映核の分光がある。鏡映核の存在によって  $^7\text{H}$  (陽子数 1、中性子数 6) のような陽子数と中性子数が極端に異なる原子核の存在が裏付けられるだけでなく、鏡映核同士の間でクーロン力を考慮した上で比較することによって、陽子数と中性子数が極端に異なる系でのアイソスピン対称性が保たれているのかを検証することにもつながる。

我々は、極端に陽子過剰な軽い炭素同位体の欠損質量分光実験を 2018 年 7 月にフランス国立大型重イオン加速器施設 (GANIL) で行った。 $^9\text{C}$  を含む二次ビームを  $^{12}\text{C}$  の核破碎反応によって生成し、LISE スペクトロメーターで分離した後に液体水素標的に入射した。逆運動学での欠損質量分光実験を行うためには薄く大口径の液体水素標的が必要であり、理化学研究所の既存の液体水素標的システムを中心厚 1.5 mm、口径 2 cm で使用できるように改良して使用した。中性子移行 ( $p, t$ )、( $p, d$ ) 反応で生じた  $t$  や  $d$  の四元ベクトルを、標的周りに配置した反跳粒子検出器 MUST2 (図 2.1.3) で測定することで、目的の  $^{7,8}\text{C}$  核の共鳴状態のエネルギースペクトルを得ることに成功した。[51]



図 2.1.3: GANIL で使用した MUST2 検出器。MUST2 はストリップ型シリコン半導体検出器と CsI(Tl) 検出器で構成される反跳荷電粒子検出器で、本実験では全部で 8 台の MUST2 を使用した。

### 2.1.2 エキゾチック原子の分光

#### 陽子ビームを用いたパイ中間子原子の分光

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。パイ中間子原子の深い束縛状態では、原子軌道にあるパイ中間子の波動関数の一部が原子核の有限密度中にあるため、カイラル対称性が部分的に回復することが知られている。我々は大阪大学核物理研究センター (RCNP) において陽子ビームを用いた新たなパイ中間子原子の分光実験を行った。陽子ビームを用いた ( $p, {}^2\text{He}$ ) 反応によるパイ中間子原子の生成と、RCNP のもつ高分解能スペクトロメーター Grand RAIDEN による班跳  ${}^2\text{H}$  測定により、従来の重陽子ビームによる ( $d, {}^3\text{He}$ ) 反応に比べて高い分解能での分光測定が可能である。およそ 7 日間の実験で  ${}^{123}\text{Sn}$  のパイ中間子原子  $1p$  状態を  $2\sigma$  の確かさで測定し、また 250 keV という高い分解能でのエネルギースペクトル測定に成功した。この新しいパイ中間子原子分光手法は、従来の手法に比べると統計量は劣るものの、高いエネルギー分解能を持つことから将来の高精度測定への可能性を切り開いた。[34]

#### パラジウム同位体のミュオン捕獲

ミュオン捕獲は電子捕獲の類似反応で、ミュオンの質量 ( $106 \text{ MeV}/c^2$ ) に対応して数十 MeV の高い励起状態の原子核を生成する。この励起状態は通常中性子と  $\gamma$  線を複数個放出して崩壊する。実験的・理論的難しさから、ミュオン捕獲後の励起状態の構造やその後の中性子放出崩壊過程を記述する統一的な描像は得られていない。この過程の微視的理解を進めるためには、最も基礎的な観測量である

中性子放出個数と放出中性子のエネルギーの測定を広い核種について行うことが重要である。

我々は特にパラジウムの同位体に着目し、大阪大学核物理研究センターの DC ミュオンビームと J-PARC および英国 RAL 研究所のパルスミュオンビームを併用してミュオン捕獲の実験を行なった。DC ミュオンビームを用いて中性子と  $\gamma$  線の同時測定を行い、パラジウムを含む中重核領域で初めてミュオン捕獲後の放出中性子のエネルギーの直接測定を行なった。またパルスミュオンビームを用いてミュオン捕獲後の不安定核が  $\beta$  崩壊する際の  $\gamma$  線を測定し、ミュオン捕獲後の中性子放出個数の分布を精度よく求めることに成功した。[31, 49, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64]

### 2.1.3 加速器開発

#### 核変換用加速器における大電流入射ビームラインの開発

近年、原子炉の使用済み核燃料に含まれる長寿命不安定核種の処理手法として、加速器で生成した数百 MeV/u の重陽子ビームを核燃料廃棄物に照射し短寿命化する核変換処理法が提案されている。核変換用加速器には従来加速器では実現できない 1A 程度の大電流なビームが求められており、その実現には大電流ビームの輸送と加速に関する技術開発が必須となっている。我々は大電流ビーム輸送において特に課題となる空間電荷効果の影響が大きいイオン源直後の低エネルギービーム輸送系において、その空間電荷効果の影響を考慮した輸送中ビームの空間的広がりや運動量広がりやを評価する手法を構築している。これまでの検討結果では、空間電荷効果由来の線形発散力を補償する為に大口径ソレノイド磁石を用いた収束が有効であることが判明しており、 $\phi 600 \text{ mm}$  程度の大口径のソレノイド磁石 3 台を設けたビームラインによって、1 A ビームの後段加速器への入射が可能となる見通しを得た。大口径ビームラインではビームサイズが従来のビームラインよりも大きくなる為、磁石がもつ多重極磁場成分の影響の評価が不可欠である。現在、多重極磁場成分の影響を考慮したビームエンベロープの計算手法の開発に取り組んでいる。[56]

#### <受賞>

- [1] 櫻井博儀、他 8 名、「21 世紀発明賞」、公益財団法人発明協会、2018 年 6 月 12 日。

#### <報文>

##### (レビュー論文)

- [2] K. Wimmer, “Nucleon transfer reactions with radioactive beams”, J. Phys. G, 45, 033002 (2018).  
 [3] H. Sakurai, “Nuclear physics with RI Beam Factory”, Frontiers of Physics, 13(6), 132111 (2018).

##### (原著論文)

- [4] M. L. Cortes *et al.*, “Inelastic scattering of neutron-rich Ni and Zn isotopes off a proton target”, *Phys. Rev. C* 97, 044315 (2018).
- [5] A. Corsi *et al.*, “Spectroscopy of nuclei around  $^{100}\text{Sn}$  populated via two-neutron knockout reactions”, *Phys. Rev. C* 97, 044321 (2018).
- [6] J. Litzinger *et al.*, “Transition probabilities in neutron-rich Se-80, Se-82 and the role of the nu g(9/2) orbital”, *Phys. Rev. C* 97, 044323 (2018).
- [7] J. Park *et al.*, “Beta decays of the heaviest  $N = Z - l$  nuclei and proton instability of  $^{97}\text{In}$ ”, *Phys. Rev. C* 97, 051301 (2018).
- [8] A. I. Morales *et al.*, “Is seniority a partial dynamic symmetry in the first  $\nu g_9/2$  shell?”, *Phys. Lett. B* 781, 706 (2018).
- [9] Z. Vajta *et al.*, “Proton single particle energies next to  $^{78}\text{Ni}$ : Spectroscopy of  $^{77}\text{Cu}$  via single proton knock-out reaction”, *Phys. Lett. B* 782, 99 (2018).
- [10] K. Wimmer *et al.*, “Shape coexistence and isospin symmetry in  $A = 70$  nuclei: Spectroscopy of the  $T_z = -1$  nucleus  $^{70}\text{Kr}$ ”, *Phys. Lett. B* 785, 411 (2018).
- [11] X. Y. Liu *et al.*, “Spectroscopy of  $^{65,67}_{2}\text{Mn}$ : Strong coupling in the  $N = 40$  “island of inversion””, *Phys. Lett. B* 785, 441 (2018).
- [12] O. Wieland *et al.*, “Low-lying dipole response in the unstable  $^{70}\text{Ni}$  nucleus”, *Phys. Rev. C* 98, 064313 (2018).
- [13] O. B. Tarasov *et al.*, “Discovery of  $^{60}\text{Ca}$  and Implications For the Stability of  $^{70}\text{Ca}$ ”, *Phys. Rev. Lett.* 121, 022501 (2018).
- [14] R. Yokoyama *et al.*, “Beta-gamma spectroscopy of the neutron-rich  $^{150}\text{Ba}$ ”, *Prog. Theo. Exp. Phys.* 2018, 037 (2018).
- [15] C. Santamaria *et al.*, “Tracking with the MINOS Time Projection Chamber”, *Nucl. Instrum. Method A* 905, 138 (2018).
- [16] S. Cruz *et al.*, “Shape coexistence and mixing of low-lying  $0^+$  states in  $^{96}\text{Sr}$ ”, *Phys. Lett. B* 786, 94 (2018).
- [17] T. Isobe *et al.*, “Application of the Generic Electronics for Time Projection Chamber (GET) read-out system for heavy Radioactive isotope collision experiments”, *Nucl. Instrum. Methods* 899, 43 (2018).
- [18] J. Yasuda *et al.*, “Extraction of the Landau-Migdal Parameter from the Gamow-Teller Giant Resonance in  $^{132}\text{Sn}$ ”, *Phys. Rev. Lett.* 121, 132501 (2018).
- [19] P. J. Davies *et al.*, “Toward the limit of nuclear binding on the  $N = Z$  line: Spectroscopy of  $^{96}\text{Cd}$ ”, *Phys. Rev. C* 99, 021302 (2019).
- [20] A. I. Murray *et al.*, “Spectroscopy of strongly deformed  $^{32}\text{Ne}$  by proton knockout reactions”, *Phys. Rev. C* 99, 011302 (2019).
- [21] Z. Elekes *et al.*, “Nuclear structure of  $^{76}\text{Ni}$  from the  $(p, 2p)$  reaction”, *Phys. Rev. C* 99, 014312 (2019).
- [22] H. L. Crawford *et al.*, “First Spectroscopy of the Near Drip-line Nucleus  $^{40}\text{Mg}$ ”, *Phys. Rev. Lett.* 122, 052501 (2019).
- [23] H. N. Liu *et al.*, “How Robust is the  $N = 34$  Subshell Closure? First Spectroscopy of  $^{52}\text{Ar}$ ”, *Phys. Rev. Lett.* 122, 072502 (2019).
- [24] M. Stryczyk *et al.*, “ $\beta$ -decay study of the  $^{66}\text{Mn}$ - $^{66}\text{Fe}$ - $^{66}\text{Co}$ - $^{66}\text{Ni}$  decay chain”, *Phys. Rev. C* 98, 064326 (2018).
- [25] K. Wimmer *et al.*, “First spectroscopy of  $^{61}\text{Ti}$  and the transition to the Island of Inversion at  $N = 40$ ”, *Phys. Lett. B* 792, 16 (2019).
- [26] R. Taniuchi *et al.*, “ $^{78}\text{Ni}$  revealed as a doubly magic stronghold against nuclear deformation”, *Nature* accepted (2019).
- (会議抄録)
- [27] Y. X. Watanabe *et al.*, “Production of  $N = 126$  Nuclei and Beyond Using Multinucleon Transfer Reactions”, *Fission and Properties of Neutron-rich Nuclei*, 227 (2018).
- [28] K. Hadynska-Klek *et al.*, “Quadrupole collectivity in  $^{42}\text{Ca}$  from low-energy Coulomb excitation with AGATA”, *Phys. Rev. C* 97, 024326 (2018).
- [29] F. Recchia *et al.*, “Neutron knockout from  $^{68,70}\text{Ni}$  ground and isomeric states”, *J. Phys. Conf. Ser.* 966, 012048 (2018).
- [30] M. Lettmann *et al.*, “Signatures of triaxiality in low-spin spectra of  $^{86}\text{Ge}$ ”, *J. Phys. Conf. Ser.* 1023, 012023 (2018).
- (国内雑誌)
- [31] 新倉潤 *et al.*, “負ミューオン捕獲反応による核変換”, *中間子科学学会誌「めそん」* No. 49 (2019).
- (学位論文)
- [32] 谷内稜, “In-beam gamma-ray spectroscopy of  $^{78}\text{Ni}$ ” 博士論文 (2019).
- [33] 靱山悟至, “Collapse of the  $N = 28$  shell closure: single-particle structure of  $^{43}\text{S}$ ” 博士論文 (2019).
- [34] 渡辺珠以, “Spectroscopy of deeply bound pionic states via  $^{124}\text{Sn}(p, ^2\text{He})$  reaction” 博士論文 (2019).
- [35] 小岩井拓真, “In-beam gamma-ray spectroscopy of  $^{55}\text{K}$  and  $^{53}\text{Ca}$  via nucleon knockout reactions” 修士論文 (2019).
- <学術講演>
- (国際会議)

## 招待講演

- [36] H. Sakurai, “Recent activities and perspectives”, 1st Symposium on Intermediate-energy Heavy Ion Collisions (iHIC2018), April 2018, Beijing, China.
- [37] H. Sakurai, “The RIBF Facility and Its Future”, 20th Northeastern Asian Symposium-2018 on Nuclear Physics in the 21st Century, Nagoya, 2018.
- [38] H. Sakurai, “Recent activities and highlights at the RIBF”, International Conference on Simplicity, Symmetry and Beauty of Atomic Nuclei, September 2018, Shanghai, China.
- [39] H. Sakurai, “Recent highlights and future programs at RIBF”, The 10th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium, November 2018, Huizhou, China.
- [40] H. Sakurai, “Facility-upgrade of RIBF for diversity enhancement in nuclear physics”, 13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collision, December 2018, Omiya, Japan.
- [41] K. Wimmer, “In-beam gamma-ray spectroscopy at the RIBF”, NUSTAR Annual meeting, February 26 - March 2 2018, GSI Darmstadt, Germany
- [42] K. Wimmer, “In-beam gamma-ray spectroscopy at the RIBF”, 2nd Workshop in the framework of JSPS-FWO collaboration, March 13 2018, Tokyo, Japan
- [43] K. Wimmer, “Shape coexistence and isospin symmetry along  $N = Z$ ”, 14th Nordic Meeting on Nuclear Physics, May 22 - 25 2018, Longyearbyen, Norway
- [44] K. Wimmer, “Towards two-neutron transfer reactions with OEDO beams”, International Workshop of OEDO, June 11 2018, RIKEN, Wako, Japan
- [45] K. Wimmer, “Shape Coexistence at  $N = Z$ : In-beam  $\gamma$ -ray spectroscopy of  $^{70}\text{Kr}$  at the RIBF”, TU Darmstadt SFB Workshop, July 4 -7 2018, Waldthausen, Germany
- [46] K. Wimmer, “Structure of exotic nuclei”, International School of Nuclear Physics 40th Course, September 16-24 2018, Erice, Italy
- [47] K. Wimmer, “Studies of the evolution of collectivity and shell structure in exotic nuclei at RIKEN”, 13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions NN2018, December 4-8 2018, Omiya, Japan
- [48] K. Wimmer, “In-beam gamma-ray spectroscopy of exotic nuclei at the RIBF”, ISOLDE Workshop and Users meeting 2018, December 5-7 2018, CERN, Switzerland
- [50] T. Koiwai, “In-beam  $\gamma$  spectroscopy of  $^{55}\text{Ca}$  and  $^{55}\text{K}$  via nucleon knockout reactions”, HAWAII2018, Hilton Waikoloa village, US, October 23-27, 2018.
- [51] S. Koyama, “Missing mass spectroscopy of light nuclei beyond proton-drip line”, LISE Workshop 2019, Caen, France, February 6-8, 2019.
- [52] K. Wimmer, “Shape coexistence and isospin symmetry along  $N = Z$ ”, Nuclear Structure 2018, August 5 - 10, East Lansing, USA
- [53] K. Wimmer, “Analysis of Coulomb excitation experiments at the RIBF”, 7<sup>th</sup> Sunflower Workshop, September 6 - 7 2018, Wako, Japan
- [54] K. Wimmer, “Shape coexistence and isospin symmetry along  $N = Z$ ”, 5<sup>th</sup> APS/JPS Joint Meeting, October 23 - 27, 2018, Waikoloa, USA

## (国内会議)

## 招待講演

- [55] 櫻井博儀, “元素の進化、合成と変換”, 学術会議公開シンポジウム「基礎科学研究の意義と社会 (物理分野から)」, 東京, 2018年12月17日.
- [56] 櫻井博儀, “元素変換の基礎研究と将来”, 学術会議公開シンポジウム「素粒子物理・原子核物理分野の大型施設計画・大規模研究計画マスタープラン」, 東京, 2019年2月19日.
- [57] 新倉潤, “不安定核物理のこれから”, RIBF 若手放談会, 理化学研究所神戸キャンパス, 2019年2月18-20日.

## 一般講演

- [58] 新倉潤, “Muon nuclear capture reaction of palladium isotope”, J-PARC 成果報告会, KEK 東海, 2018年7月4-5日.
- [59] 齋藤岳志, “Neutron emission following nuclear muon capture”, 第9回 Muon 科学と加速器研究, 大阪大学, 2019年1月7-8日.
- [60] 新倉潤, “ミューオン捕獲による Pd 同位体の核変換”, 日本物理学会年次大会, 九州大学伊都キャンパス, 2019年3月14-17日.
- [61] 齋藤岳志, “パラジウムのミューオン捕獲に伴う放出中性子の直接測定”, 日本物理学会年次大会, 九州大学伊都キャンパス, 2019年3月14-17日.
- [62] 齋藤岳志, “Measuring nuclear charge radii using muonic X rays”, 第十回 停止・低速 RI ビームを用いた核分光研究会, 九州大学伊都キャンパス, 2019年3月18-19日.
- [63] 齋藤岳志, “Measuring nuclear charge radii using muonic X rays”, 東北大学電子光学研究センター, 2019年3月19-20日.
- [64] 新倉潤, “ミューオン原子核捕獲反応による核変換”, 日本原子力学会 2019 春の年会, 茨城大学水戸キャンパス, 2019年3月20-22日.

## 一般講演

- [49] T. Y. Saito, “Study of neutron emission properties after muon capture on palladium isotopes”, HAWAII2018, Hilton Waikoloa village, US, October 23-27, 2018.

- [65] K. Wimmer, “Collectivity at  $N = Z$ : Coulomb excitation of  $^{70,72}\text{Kr}$ ”, 日本物理学会年次大会, 九州大学伊都キャンパス, 2019年3月14-17日.

(セミナー)

- [66] 櫻井博儀, 特別講義「親子で先端科学者から科学を学ぼう!」, 荒川区自然科学フォーラム, 東京大学, 2018年7月7日.
- [67] 櫻井博儀, 「はかる!」, 埼玉県立不動岡高校, 2018年10月26日.
- [68] 櫻井博儀, 「自立と自律」, 川口市立川口高等学校, 2019年2月14日.
- [69] K. Wimmer, “Shapes and Symmetries of Exotic Nuclei”, Lunch Talk, University of Tokyo, June 22 2018, Tokyo, Japan
- [70] K. Wimmer, “Towards the drip-lines: In-beam  $\gamma$ -ray spectroscopy at the RIBF”, GSI seminar, GSI, December 19 2018, Darmstadt, Germany

## 2.2 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)のスーパーBファクトリー加速器を使った実験(Belle II実験)、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、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)によるダークマターやダークエネルギーの研究、アクシオンおよび軽い暗黒物質の探索実験のための開発、さらに、将来の研究計画に向けた新型光検出器の開発、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。

### 2.2.1 (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 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精密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 $\phi_1$ と $\phi_3$ の測定に関する研究を行っている。

基本粒子のひとつであるタウレプトンは、標準理論の厳密な検証を行い新物理を探索するために非常に良いプローブである。新物理の寄与の大きさはモデルや測定する物理量に依存するが、典型的には、新物理の発現するエネルギースケールを $\Lambda$ とすると、レプトン質量( $m_\ell$ )と $\Lambda$ の比の二乗( $m_\ell/\Lambda$ )<sup>2</sup>に比例する。タウレプトンの質量はミュオンの質量の約17倍であり、新物理に対してその二乗、約290倍の感度を有する。

本年度は、これまで未測定であった、タウレプトンがパイ中間子と2つの荷電レプトンおよびニュートリノに崩壊するモード $\tau^- \rightarrow \pi^- \ell^+ \ell^- \nu_\tau$  ( $\ell = e, \mu$ )の崩壊分岐比の測定を行った。この崩壊はステライルニュートリノなどの新物理に感度があると考えられている。約5.2億のタウ・反タウ対生成を含むデータを解析した結果、電子を含む崩壊を $5.9\sigma$ の有意度で世界で初めて発見することに成功し、その分岐比を $\mathcal{B}(\tau^\pm \rightarrow \pi^\pm e^+ e^- \nu_\tau) = (2.33 \pm 0.19 \pm 0, 30) \times 10^{-5}$ と測定した。また、ミュオンを含む崩壊に対しても $\mathcal{B}(\tau^\pm \rightarrow \pi^\pm \mu^+ \mu^- \nu_\tau) < 0.55 \times 10^{-5} (90\% \text{CL})$ と世界で最も厳しい上限値を与えた(Jin博士論文[44])。これらの結果は、標準模型の理論予測と無矛盾であった。

また、レプトン崩壊のパラメータであるMichelパラメータを測定し標準模型の予言する値と比較することでV-A型以外の結合を持つ新物理の寄与を探索する研究や、 $\tau^- \rightarrow \ell^- \ell'^+ \ell'^- \bar{\nu}_\ell \nu_\tau$  ( $\ell, \ell' = e, \mu$ )の崩壊分岐比を測定することで新しい相互作用を探索する研究も進めている。

#### 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測定器による実験が始まろうとしている。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検出器の開発・量産を主導してきた。

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精度で再構成するための崩壊点検出器の性能が鍵となる。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検出器(PXD)2層と両面ストリップ型検出器(SVD)4層の計6層からなり、それぞれラダーと呼ばれる短冊状の検出器モジュールが円筒状に配置された形状をとる。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特に $K_S$ を含む崩壊モードの検出効率が向上し、超対称性模型などの標準模型を超えた新物理からの影響が見えると期待される $b \rightarrow s$ 崩壊や $b \rightarrow s\gamma$ 崩壊などの感度が向上する。一方、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た。

本研究室は、最外層の6層目ラダーモジュールの



図 2.2.1: 本研究室が貢献した BelleII 実験 SVD 崩壊点検出器。最外層の 6 層目ラダーが見えている。



図 2.2.2: 崩壊点検出器の Belle II 検出器へのインストール。

製造を東京大学 国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) 内で行ってきた。2011 年に開発を始め、設計、試作から量産へと技術開発を進めてきたが、2018 年 6 月に、ついに実験で使用されるラダーの量産を完了した。製作されたラダーは KEK で崩壊点検出器として組み上げられ (図 2.2.1)、2018 年 12 月に Belle II 検出器にインストールされた (図 2.2.2)。2019 年 3 月には完成した Belle II 検出器で電子と陽電子の初衝突が観測され、フェーズ 3 と呼ばれる本格的な物理実験が開始された (図 2.2.3)。

Belle II 実験では最終的に Belle 実験の 50 倍のデータを蓄積する予定である。この膨大な統計量を活用し、標準理論が支配的な崩壊と新物理の寄与が入り得る稀崩壊において互いの測定値を比較することで、新物理の探索が可能である。本研究室では  $B \rightarrow K_S K_S K_S$  崩壊や  $B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$  崩壊を用いて標準理論の値からズレを検出し、新物理を探索するべく研究を進めている。

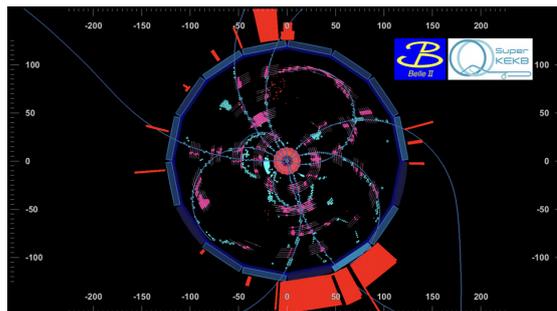


図 2.2.3: Belle II 実験の本格的な物理解析のためのデータ取得 (フェーズ 3) において B 中間子・反 B 中間子が生成したと思われる最初のイベント。

## 2.2.2 加速器ニュートリノ実験

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得られる可能性がある。

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 of 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、研究室規模で可能な比較的小規模な実験を立案・遂行している。

### 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 (または、ミューオン反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反応事象を観測することで、世界最高精度でニュートリノ振動を測定している。

2018 年度には、前年度に比べて反ニュートリノモードのデータ量を倍以上に増やした。2010 年の実験開始からこれまでに取得したデータの総量は、標的に照射した総陽子数にして  $3.16 \times 10^{21}$  個相当に達した。この全てのデータを用いて、3 世代の標準的なニュートリノ混合行列を仮定した場合の CP 対称性を破る複素位相  $\delta_{CP}$  に対する許容区間を求めた (図 2.2.4)。質量階層性の仮定にかかわらず、CP を保存する値  $\delta_{CP} = 0$  または  $\delta_{CP} = \pm\pi$  は  $2\sigma$  の信頼度で信頼区間の外にあり、CP 対称性が破れていることを強く示唆する結果を得た。これは、今後のニュートリノおよび素粒子研究の指針となる画期的な成果である。また、同じデータセットを用いて、反

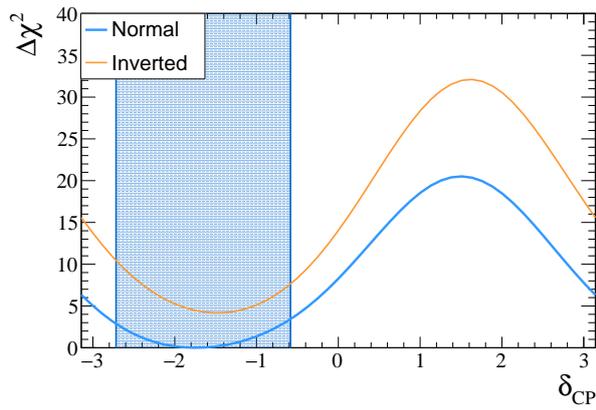


図 2.2.4: T2K 実験の 2018 年の解析による, CP 対称性を破る複素位相  $\delta_{CP}$  に対する  $\Delta\chi^2$  と信頼区間。質量階層性に関して順階層 (Normal) と逆階層 (Inverted) の両方の仮定のもとに解析を行った。逆階層の場合は  $2\sigma$  信頼区間が存在しない。順階層の場合も, CP 対称性が保存される値 ( $\delta_{CP} = 0$  または  $\delta_{CP} = \pm\pi$ ) は  $2\sigma$  信頼区間の外にある。

ニュートリノでのミューオン型から電子型のニュートリノ出現現象の探索を行った。期待されるバックグラウンド 9.4 事象に対して 15 事象を観測し, 有意度は  $2.25\sigma$  であった (古賀 博士論文 [43])。

### T2K 前置検出器アップグレード

我々は, 今後予定されている J-PARC の大強度化を最大限に生かし, T2K 実験の解析手法の改良と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提案している。特に, レプトンセクターの CP 対称性に関して, 現在の結果から示唆されるようにその破れが比較的大きい場合には,  $3\sigma$  以上の有意度で観測が可能となると期待される。

本研究室では, J-PARC 内に置かれた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提案し, 2021 年のインストールを目標に国際共同プロジェクトを主導している。2018 年度には, J-PARC および CERN に正式な提案を出して審査を受け, 好意的な評価を得た。国際協力体制の構築と並行して, シミュレーションによる検出器設計の最適化や性能評価や, SuperFGD と呼ばれるプラスチックシンチレータのキューブを多数並べて 3 方向から読み出す新構造の検出器の設計・要素開発を進めている。

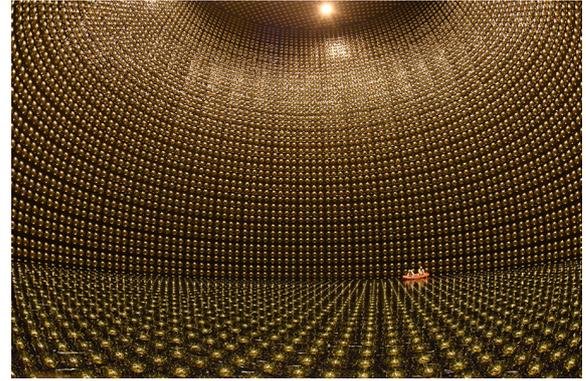


図 2.2.5: 2018 年夏, 改修中のスーパーカミオカンデ検出器。(東京大学宇宙線研究所)

### 水標的でのニュートリノ反応断面積測定実験

我々は, T2K 実験の系統誤差を削減するための新実験の検討を行い, 水標的かつ大角度まで高いアクセプタンスを持つ新しい検出器 (WAGASCI 検出器) を開発してきた。前置検出器ホールスペースに WAGASCI 検出器を設置する計画 (J-PARC T59) を立案し, さらに, この検出器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・遂行した。

本年度は, INGRID water module でのデータ解析を完遂し, 水とプラスチックの反応断面積の比を約 5% の精度で測定した。さらに, 長基線ニュートリノ振動実験において世界で初めての試みとして, 我々の測定を既存の前置検出器による測定と比べることで, 前置検出器の測定を後置検出器に外挿する手法の検証を行った (古賀 博士論文 [43])。また, 前年度に J-PARC 前置検出器ホール最深部に設置した 2 台目の検出器モジュールを用い, 反ニュートリノビームによる反応断面積測定を行った (竹馬 博士論文 [46])。

### スーパーカミオカンデの改修

スーパーカミオカンデ検出器は, ニュートリノ振動の発見およびそれに続く種々の測定をはじめとして, 20 年以上にわたり素粒子物理および宇宙物理学で世界をリードする成果を上げ続けている。これまでの観測は 5 万トンの超純水で行ってきたが, そこに 0.01-0.1% のガドリニウム (Gd) を添加することで中性子の効率的な検出を可能にし検出器の性能を高める SK-Gd 計画が進行中である。この計画の一環として, 本年度は水を全て抜いて水槽を補修し, 不具合のある光電子増倍管を交換する大幅な改修が行われた (図 2.2.5)。装置の内部が見られたのは 2005-2006 年に行われた前回の改修以来 12 年ぶりとなる。改修作業は 2018 年 6 月に開始され, 2019 年 1 月末に全ての作業を終えて観測が再開された。

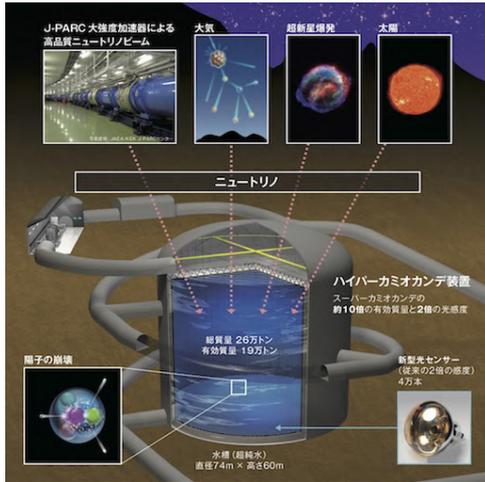


図 2.2.6: ハイパーカミオカンデ検出器の概念図。

### 2.2.3 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の CP 非対称性を詳細に研究するためには、T2K 実験の数十倍の統計が必要となる。また、これまで 20 年にわたってスーパーカミオカンデで行ってきた陽子崩壊の探索感度を飛躍的に向上させるためにも、より大きく高性能の検出器の建設が望まれる。当研究室では、このような次世代の実験を行うために、現行のスーパーカミオカンデよりひと桁大きな実験装置、「ハイパーカミオカンデ」検出器 (図 2.2.6) 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、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、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研究を主導してきた。また、実験全体の方針策定を主導し、検出器設計のまとめ役を担うほか、国際協力体制の構築にも注力している。今後も計画の実現に向け、開発・研究をさらに精力的に進めていく。

### 2.2.4 HSC 暗黒エネルギー研究

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

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

HSC の開発は 2012 年 8 月に完了し、2014 年 3 月より大規模サーベイ観測を開始している。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。2014 年度から HSC での本格的な観測が始まり、2016 年度にはサーベイの観測の第 1 期データが公開された。

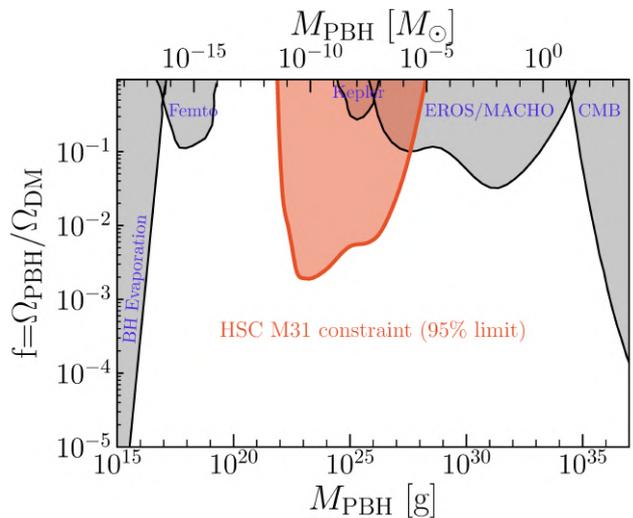


図 2.2.7: HSC によるアンドロメダ銀河の観測から得られた原始ブラックホールの存在量の制限領域 [38]。

本年度、当研究室では、暗黒物質の候補の一つと考えられている、宇宙初期に形成された原始ブラックホールの探索を行った。HSC でアンドロメダ銀河の観測を行い、そのデータを詳しく解析して重力マイクロレンズ効果と呼ばれる現象を探索することで、図 2.2.7 に示すように  $10^{23}$  g 程度の質量を持つ原始ブラックホールの存在量に対して初めて制限を与えた (新倉 博士論文 [45] および [38])。

今後 HSC の探査観測は 2019 年末まで推進される予定であり、更なる解析から暗黒物質の正体に迫る物理結果を出していきたい。

### 2.2.5 アクシオンおよび軽い暗黒物質探索実験

アクシオンは量子色力学の強い CP 問題を解決するために導入された擬スカラー粒子であり、世界中の様々な実験で探索されている。本研究室では、ハドロニックアクシオンと呼ばれるアクシオン模型に特化した探索実験装置の開発を行っている。太陽コア中心で熱的に励起した  $^{57}\text{Fe}$  原子核の M1 エネルギー準位から放出されるアクシオンを地上の  $^{57}\text{Fe}$  で吸収し、脱励起で放出される 14.4 keV の  $\gamma$  線を最先端の X 線ピクセル検出器で検出する計画である。

また、この実験をさらに高感度化することで軽い暗黒物質探索を行う可能性も神戸大・京都大とともに研究している。暗黒物質の存在は確実視されており、様々な大規模実験で直接生成・直接探索による試みが行われているが、発見には至っていない。このような実験では主に 100 GeV 以上の重い暗黒物質をターゲットとしているため、数 GeV 以下の軽い暗黒物質に対する感度は高くない。シリコン検出器は軽い暗黒物質の直接探索にも適しており、低エネルギー閾値が比較的容易に実現でき、検出器をコンパクトにできる点で有利である。

本年度は実験の背景事象となる、検出器自身に含まれる天然放射性同位元素からの放射線を低減するための検出器設計を行なった。一般にリジッド（ガラスエポキシ）回路基板は安価で多層化が容易であるが、ガラス繊維が使用されるためウラン-トリウム系列の天然放射性元素が微量含まれる。一方、フレキシブル回路基板は天然放射線元素が少ないが、ガラスエポキシ基板よりも高価である。そこで、リジッド基板とフレキシブル基板が合体したリジッドフレキシブル基板を用い、ピクセル検出器センサーをフレキシブル基板側に実装し、信号線をリジッド基板まで導いて後段の読み出し回路と接続する回路基板を設計した。この基板を用いるとセンサーとリジッド基板の間に鉛を設置することでリジッド基板からの放射線を遮蔽でき、従来比で検出器由来の背景事象を 1000 分の 1 に低減することが可能になると期待される。現在、この基板を用いて実験準備を進めている。

<報文>

(原著論文)

B ファクトリー関連

- [1] A. Sibidanov *et al.* [Belle Collaboration], “Search for  $B^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$  Decays at the Belle Experiment,” *Phys. Rev. Lett.* **121**, no. 3, 031801 (2018).
- [2] M. Berger *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the Decays  $\Lambda_c \rightarrow \Sigma\pi\pi$  at Belle,” *Phys. Rev. D* **98**, no. 11, 112006 (2018).
- [3] U. Tamponi *et al.* [Belle Collaboration], “Inclusive study of bottomonium production in association with an  $\eta$  meson in  $e^+e^-$  annihilations near  $\Upsilon(5S)$ ,” *Eur. Phys. J. C* **78**, no. 8, 633 (2018).
- [4] A. Vossen *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the branching fraction of  $B \rightarrow D^{(*)}\pi l\nu$  at Belle using hadronic tagging in fully reconstructed events,” *Phys. Rev. D* **98**, no. 1, 012005 (2018).
- [5] H. Nakano *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of time-dependent  $CP$  asymmetries in  $B^0 \rightarrow K_S^0\eta\gamma$  decays,” *Phys. Rev. D* **97**, 092003 (2018).
- [6] E. Guido *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of  $\Upsilon(4S) \rightarrow \eta'\Upsilon(1S)$ ,” *Phys. Rev. Lett.* **121**, no. 6, 062001 (2018).
- [7] I. Adachi *et al.* [BaBar and Belle Collaborations], “First evidence for  $\cos 2\beta > 0$  and resolution of the CKM Unitarity Triangle ambiguity by a time-dependent Dalitz plot analysis of  $B^0 \rightarrow D^{(*)}h^0$  with  $D \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$  decays,” *Phys. Rev. Lett.* **121**, no. 26, 261801 (2018).
- [8] I. Adachi *et al.* [BaBar and Belle Collaborations], “Measurement of  $\cos 2\beta$  in  $B^0 \rightarrow D^{(*)}h^0$  with  $D \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$  decays by a combined time-dependent Dalitz plot analysis of BaBar and Belle data,” *Phys. Rev. D* **98**, no. 11, 112012 (2018).
- [9] S. Jia *et al.* [Belle Collaboration], “Search for  $\Upsilon(1S, 2S) \rightarrow Z_c^+ Z_c^{(\prime)-}$  and  $e^+e^- \rightarrow Z_c^+ Z_c^{(\prime)-}$  at  $\sqrt{s} = 10.52, 10.58, \text{ and } 10.867$  GeV,” *Phys. Rev. D* **97**, no. 11, 112004 (2018).
- [10] Q. N. Xu *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of  $\eta_c(1S), \eta_c(2S)$  and non-resonant  $\eta'\pi^+\pi^-$  production via two-photon collisions,” *Phys. Rev. D* **98**, no. 7, 072001 (2018).
- [11] J. Yelton *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of an Excited  $\Omega^-$  Baryon,” *Phys. Rev. Lett.* **121**, no. 5, 052003 (2018).
- [12] J. H. Yin *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\chi_{b1,2}(1P)$  and search for  $e^+e^- \rightarrow \phi\chi_{b1,2}(1P)$  at  $\sqrt{s} = 10.96\text{--}11.05$  GeV,” *Phys. Rev. D* **98**, no. 9, 091102 (2018).
- [13] Y. B. Li *et al.* [Belle Collaboration], “Evidence of a structure in  $\bar{K}^0\Lambda_c^+$  consistent with a charged  $\Xi_c(2930)^+$ , and updated measurement of  $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^0\Lambda_c^+\bar{\Lambda}_c^-$  at Belle,” *Eur. Phys. J. C* **78**, 928 (2018).
- [14] B. G. Fulsom *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of  $\Upsilon(2S) \rightarrow \gamma\eta_b(1S)$  decay,” *Phys. Rev. Lett.* **121**, no. 23, 232001 (2018).
- [15] S. Sandilya *et al.* [Belle Collaboration], “Search for the lepton-flavor-violating decay  $B^0 \rightarrow K^{*0}\mu^\pm e^\mp$ ,” *Phys. Rev. D* **98**, no. 7, 071101 (2018).
- [16] S. Watanuki *et al.* [Belle Collaboration], “Measurements of isospin asymmetry and difference of direct  $CP$  asymmetries in inclusive  $B \rightarrow X_s\gamma$  decays,” *Phys. Rev. D* **99**, no. 3, 032012 (2019).
- [17] P.-C. Lu *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of  $B^+ \rightarrow p\bar{\Lambda}K^+K^-$  and  $B^+ \rightarrow \bar{p}\Lambda K^+K^+$ ,” *Phys. Rev. D* **99**, no. 3, 032003 (2019).
- [18] Y. Guan *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of Transverse  $\Lambda/\bar{\Lambda}$  Hyperon Polarization in  $e^+e^-$  Annihilation at Belle,” *Phys. Rev. Lett.* **122**, no. 4, 042001 (2019).

- [19] I. S. Seong *et al.* [Belle Collaboration], “Search for a light  $CP$ -odd Higgs boson and low-mass dark matter at the Belle experiment,” *Phys. Rev. Lett.* **122**, no. 1, 011801 (2019).
- [20] B. Pal *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the branching fraction and time-dependent  $CP$  asymmetry for  $B^0 \rightarrow J/\psi\pi^0$  decays,” *Phys. Rev. D* **98**, no. 11, 112008 (2018).
- [21] Y. Yusa *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of time-dependent  $CP$  violation in  $B^0 \rightarrow K_S^0\pi^0\pi^0$  decays,” *Phys. Rev. D* **99**, no. 1, 011102 (2019).
- [22] M. Sumihama *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of  $\Xi(1620)^0$  and evidence for  $\Xi(1690)^0$  in  $\Xi_c^+ \rightarrow \Xi^-\pi^+\pi^+$  decays,” *Phys. Rev. Lett.* **122**, no. 7, 072501 (2019).
- [23] J. B. Kim *et al.* [Belle Collaboration], “Search for  $CP$  violation with kinematic asymmetries in the  $D^0 \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$  decay,” *Phys. Rev. D* **99**, 011104 (2019).
- [24] S. Jia *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of  $e^+e^- \rightarrow \gamma\chi_{c1}$  and search for  $e^+e^- \rightarrow \gamma\chi_{c0}, \gamma\chi_{c2}$ , and  $\gamma\eta_c$  at  $\sqrt{s}$  near 10.6 GeV at Belle,” *Phys. Rev. D* **98**, no. 9, 092015 (2018).
- [25] M. Gelb *et al.* [Belle Collaboration], “Search for the rare decay of  $B^+ \rightarrow \ell^+\nu_\ell\gamma$  with improved hadronic tagging,” *Phys. Rev. D* **98**, no. 11, 112016 (2018).
- [26] Y. B. Li *et al.* [Belle Collaboration], “First Measurements of Absolute Branching Fractions of the  $\Xi_c^0$  Baryon at Belle,” *Phys. Rev. Lett.* **122**, 082001 (2019)
- [27] A. B. Kaliyar *et al.* [Belle Collaboration], “Measurements of branching fraction and direct  $CP$  asymmetry in  $B^\pm \rightarrow K_S^0K_S^0K^\pm$  and a search for  $B^\pm \rightarrow K_S^0K_S^0\pi^\pm$ ,” *Phys. Rev. D* **99**, 031102 (2019)
- ニュートリノ実験関連
- [28] K. Abe *et al.* [Hyper-Kamiokande Collaboration], “Physics potentials with the second Hyper-Kamiokande detector in Korea,” *PTEP* **2018**, no. 6, 063C01 (2018).
- [29] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Atmospheric neutrino oscillation analysis with external constraints in Super-Kamiokande I-IV,” *Phys. Rev. D* **97**, no. 7, 072001 (2018).
- [30] C. Kachulis *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Search for Boosted Dark Matter Interacting With Electrons in Super-Kamiokande,” *Phys. Rev. Lett.* **120**, no. 22, 221301 (2018).
- [31] Z. Li *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Measurement of the tau neutrino cross section in atmospheric neutrino oscillations with Super-Kamiokande,” *Phys. Rev. D* **98**, 052006 (2018).
- [32] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Measurement of inclusive double-differential  $\nu_\mu$  charged-current cross section with improved acceptance in the T2K off-axis near detector,” *Phys. Rev. D* **98**, 012004 (2018).
- [33] Y. Hayato *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Search for Neutrinos in Super-Kamiokande Associated with the GW170817 Neutron-star Merger,” *Astrophys. J.* **857**, no. 1, L4 (2018).
- [34] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Characterization of nuclear effects in muon-neutrino scattering on hydrocarbon with a measurement of final-state kinematics and correlations in charged-current pionless interactions at T2K,” *Phys. Rev. D* **98**, no. 3, 032003 (2018).
- [35] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Search for CP Violation in Neutrino and Antineutrino Oscillations by the T2K Experiment with  $2.2 \times 10^{21}$  Protons on Target,” *Phys. Rev. Lett.* **121**, 171802 (2018).
- [36] L. Wan *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Measurement of the neutrino-oxygen neutral-current quasielastic cross section using atmospheric neutrinos at Super-Kamiokande,” *Phys. Rev. D* **99**, 032005 (2019).
- HSC 関連
- [37] C. Hikage *et al.*, “Cosmology from cosmic shear power spectra with Subaru Hyper Suprime-Cam first-year data,” *PASJ psz010* (2019).
- [38] H. Niikura *et al.*, “Microlensing constraints on primordial black holes with the Subaru/HSC Andromeda observation,” *Nature Astronomy* (2019), DOI: <https://doi.org/10.1038/s41550-019-0723-1>.
- (会議抄録)
- [39] Yoshiyuki Onuki, Johnny Alejandro Mora Grimaldo, Tatsuki Ose, Hiroaki Aihara *et al.*, “Studies of radioactive background in SOI pixel detector for solar axion search experiment,” *Nucl. Instrum. Meth. A* **924**, 448-451 (2019).
- [40] Yifan Jin, Denis Epifanov, Hiroaki Aihara, “Latest Belle results on Tau decays,” *Proceedings of The 15th International Workshop on Tau Lepton Physics*, *SciPost Phys. Proc.* **1**, 002 (2019).
- (国内雑誌)
- [41] 相原博昭, 「ILC 計画とその科学的意義」, 応用物理学会放射線分科会誌「放射線」44-2, September 2018.
- [42] 相原博昭, 「高エネルギー物理学分野のオープンサイエンス」, 化学と工業, Vol. 71-11, November 2018.
- (学位論文)
- 博士論文
- [43] Taichiro Koga, “Measurement of neutrino interactions on water and search for electron anti-neutrino appearance in the T2K experiment,” Sep. 2018.
- [44] Yifan Jin, “Measurement of the branching fraction of tau lepton decay to the final state of pion, lepton, lepton and neutrino at Belle,” Sep. 2018.

- [45] Hiroko Niikura, “Constraining primordial black holes with gravitational microlensing effect,” Mar. 2019.
- [46] Naruhiro Chikuma, “Measurements of neutrino charged-current interactions on water and hydrocarbon targets using a sub-GeV anti-neutrino beam,” Mar. 2019.

修士論文

- [47] Ryo Fujita, “Research and development of a new fine-grained scintillator tracker for the upgrade of T2K near detector,” Mar. 2019.

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [48] Masashi Yokoyama, “Long-baseline neutrino experiments,” plenary talk, The 39th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2018), 4–11 July, 2018, Seoul, Korea
- [49] Hiroaki Aihara, “Funding outlook in Japan,” European Neutrino Town Meeting, October 23, 2018, CERN
- [50] Yoshiyuki Onuki, “Hot Topics at Belle and Belle II” KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2018 winter) and 3rd KIAS-NCTS-KEK workshop on Particle Physics Phenomenology, 2018 Dec 4–7, KEK, Japan
- [51] Hiroko Niikura, “Search of primordial black holes from microlensing observations with HSC and OGLE,” Recontres de Moriond EW, March 20, 2019, La Thuile.

一般講演

- [52] Masashi Yokoyama, “Hyper-Kamiokande,” XIV International Conference on Heavy Quarks and Leptons, May 27 – June 1, 2018, Yamagata, Japan
- [53] Konosuke Iwamoto, “The upgrade project of the T2K near detector,” 39th International Conference on High Energy Physics, Seoul, Korea, July 4–11, 2018
- [54] Masashi Yokoyama, “Searches for Nucleon Decay at Hyper-Kamiokande,” *ibid.*
- [55] Yifan Jin, “Latest Belle results on Tau decays,” The 15th International Workshop on Tau Lepton Physics, Amsterdam, Netherlands, September 24–28, 2018.
- [56] Masashi Yokoyama, “Hyper-Kamiokande project update,” Workshop “The Future of Particle Physics: A Quest for Guiding Principles,” October 1, 2018 Karlsruhe Institute of Technology.
- [57] Hiroko Niikura, “Constraining primordial black holes with gravitational microlensing effect,” Berkeley Week, January 10, 2019, IPMU.

- [58] Hiroko Niikura, “New constraints on PBH abundance from microlensing observation of M31 with HSC,” 23rd Microlensing Conference, January 29, 2019, Flatiron Institute.
- [59] Alejandro Mora, “Searches for new Physics in the  $B \rightarrow K + \ell^+ + \ell^-$  processes at Belle II,” Moscow International School of Physics 2019, February 25, 2019, Moscow, Russia.

ポスター発表

- [60] Yifan Jin, Denis Epifanov, Hiroaki Aihara, “Measurement of the  $\tau^\pm \rightarrow \pi^\pm e^+ e^- \nu_\tau$  branching fraction by Belle,” The 39th International Conference on High Energy Physics, Seoul, South Korea, July 4–11, 2018.
- [61] Kohei Matsushita, “Design and performance of MPPC-array readout system for the WAGASCI neutrino detector,” 5th International Workshop on New Photon-Detectors (PD18), Tokyo, Japan, November 27–29, 2018
- [62] Hiroko Niikura, “Constraining primordial black holes with gravitational microlensing effect,” Accelerating Universe in the Dark, March 4–8, 2019, YITP, Kyoto, Japan

(国内会議)

招待講演

- [63] 横山将志, 「T2K ニュートリノ振動実験による反電子ニュートリノ出現と CP 対称性の破れの探索の最新結果」, 企画講演, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 信州大学松本キャンパス, 2018 年 9 月 14 日–17 日

一般講演

- [64] 竹馬匠泰, 「水標的格子型検出器 WAGASCI を用いた反ニュートリノビーム測定の実況」, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 信州大学松本キャンパス, 2018 年 9 月 14 日–17 日
- [65] 松下昂平, 「ニュートリノ検出器 WAGASCI における時間情報取得システムの改善」, 同上
- [66] 岩本康之介, 「T2K ND280 前置検出器アップグレードの概要とシミュレーションによる性能評価」, 同上
- [67] 藤田亮, 「T2K 実験前置検出器アップグレードのためのキューブ積層型プラスチックシンチレータ検出器の性能測定」, 同上
- [68] 岩本康之介, 「東海 to 神岡長基線ニュートリノ実験 T2K」, 平成 30 年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表会, 東京大学 (柏キャンパス), 2018 年 12 月 21 日–22 日
- [69] 岩本康之介, 「T2K 実験前置検出器アップグレード計画における細分型プラスチックシンチレータ検出器の性能評価」, 2018 年度電子光物理学研究拠点共同利用成果報告会, 東北大学 電子光物理学研究センター, 2019 年 3 月 1 日

- [70] 岩本康之介, 「T2K 前置検出器アップグレードのための SuperFGD プロトタイプのビーム試験」, 日本物理学会 2019 年春季大会, 九州大学伊都キャンパス, 2019 年 3 月 14-17 日

(セミナー, その他)

- [71] Hiroko Niikura, “Tightest bounds on primordial black hole abundance with HSC observation of M31,” August 30, 2018, Max Planck Institute for Astrophysics, Garching, Germany
- [72] 相原博昭, 「夢の加速器国際リニアコライダー International Linear Collider (ILC)」, ILC 講演会, 2018 年 6 月 29 日, 福島県立福島高等学校
- [73] 相原博昭, 「高エネルギーコミュニティにおける ILC に係るコンセンサス」, 日本学術会議 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会 (第 24 期・第 3 回) 平成 30 年 8 月 29 日
- [74] 相原博昭, 「データ活用社会創成プラットフォーム構想」, 平成 30 年度第 1 回 東京大学産学連携協議会アドバイザーボードミーティング, 2018 年 10 月 16 日
- [75] Hiroaki Aihara, “Pushing the forefront of research at UTokyo,” 2018 Tsinghua University Global Strategic Academic Partnership Symposium, Shenzhen on October 18, 2018
- [76] 相原博昭, 「東京大学における U.N. Sustainable Development Goals (SDGs) に向けての取組」, 日本化学連合シンポジウム「国連決議: 持続可能社会 (SDGs) をめざす科学技術の課題」, 平成 30 年 11 月 27 日
- [77] Hiroaki Aihara, “Introducing Tokyo Forum 2019,” UTokyo Global Advisory Board meeting, November 28, 2018.

## 2.3 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。

### 2.3.1 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 2.3.1) は、2015 年から重心系エネルギーが 13 TeV に増強されて運転を再開している。2018 年までに、積算ルミノシティーで約  $140 \text{ fb}^{-1}$  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・重いヒッグス粒子の探索を行っている。



図 2.3.1: LHC 加速器

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  $125 \text{ GeV}$  をうけて、naturalnessなどを一部緩和し直して新物理を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. 電弱ゲージノがウィーノ/ヒグシーノだったときの異常な飛跡
3. 2 つのタウ粒子に崩壊する重いヒッグス粒子

今年度は特に、2. と 3. のモードに関して研究が進められた。

#### 電弱ゲージノがヒグシーノだったときの異常な飛跡

ウィーノやヒグシーノが最も軽い超対称性粒子 (LSP) のとき、消えたように見える短い飛跡 (消失飛跡) が観測される。これまで、ATLAS 実験で取得されたデータに対して、4 点のヒットだけを使った非常に短い飛跡を捉えるアルゴリズムを適用し、ウィーノ・ヒグシーノモデルに対する厳しい制限を与えてきた。今年度は 100 TeV の重心系エネルギーを持つ Future Circular Collider (FCC) における超対称性粒子探索についての研究を進めた。飛跡検出器の最適化及び時間情報を用いたトラッキングを行うことにより、ウィーノに対して 3 TeV、ヒグシーノに対して 1 TeV まで発見感度を持つことを示した (図 2.3.2)。

#### 2 つのタウ粒子の崩壊する重いヒッグス粒子の探索

MSSM 理論で予言される重いヒッグス粒子 (H 粒子や A 粒子と呼ばれる) の探索において、タウ粒子対に崩壊するチャネルは最も高い発見感度が期待されている。2015 年から 2018 年までに ATLAS 検出器で取得した実データを用いて解析を行った。新たに、(1) タウ粒子を識別する変数を用いて 9 個のカテゴリーを作る手法を導入した。(2) 2 本のトラックからタウ粒子を再構成することは、高い運動量を持つタウ粒子を識別するために重要である。この手法

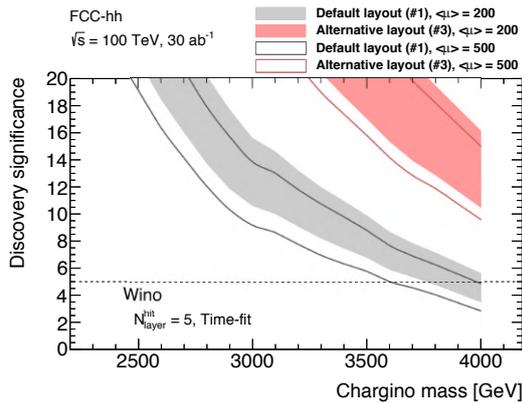


図 2.3.2: FCC におけるウィーノの探索感度。[117]

は今まで ATLAS グループで使われてこなかったもので、その識別手法と校正の研究を行い、感度の改善を図った。この (1) と (2) を導入し、新しい結果として全質量領域に対する感度が最大 2.5 倍に改善した。

### 2.3.2 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。

#### 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

電子とその反粒子 (陽電子) の束縛系であるポジトロニウム ( $\text{Ps}$ ) 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。 $\text{Ps}$ -BEC を実現し、反物質にはたらく重力の研究や物質と反物質の対称性の研究、ガンマ線レーザー実現などに応用する。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た新しい冷却手法を提案した。まず 2019 年度中に  $\text{Ps}$  レーザー冷却を実現すべく、KEK 低速陽電子施設で実験を行っている。今年度は、レーザー冷却実験に向けた KEK 陽電子ビームの性質最適化、 $\text{Ps}$  レーザー冷却を可能とする材料開発、冷却用レーザー開発を行った。陽電子最適化では、時間プロファイルとして遅い陽電子成分を除去するための高電圧パルスチョッパーを導入し遅い成分を 7 割減少させ、また空間プロファイルとして試作磁気集束レンズを導入しビーム径 0.3 倍に集束することに成功した。 $\text{Ps}$  生成材料としては 0.5 mm 厚の薄いシリカエアロゲルを開発し、レーザー冷却に用いるための条件を満たしていることを確認した。レーザーシステムは五

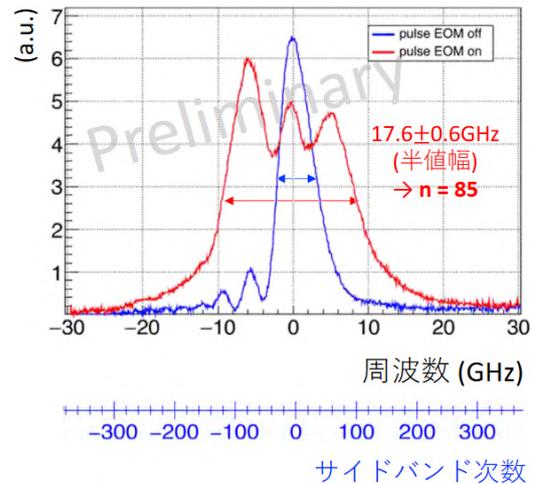


図 2.3.3: 729 nm パルスの高次サイドバンド生成。[116, 137]

神研究室・工学系研究科吉岡研究室と共同で開発しており、Ti:Sapphire 結晶を用いた共振器によって安定した  $400 \mu\text{J}$  の高強度かつ  $500 \text{ ns}$  の長パルス発振、また電気光学変調 (EOM) を共振器内で駆動しパルスレーザーとして初めての  $\pm 85$  次の高次サイドバンド生成に成功した (図 2.3.3)。このほか、産総研、九州大学、KEK、量研、原研と協力して高輝度陽電子ビームや高密度ポジトロニウム生成ターゲットの開発を行っている。

#### 放射光施設を用いた光と弱い結合をもつ粒子の探索

X 線自由レーザーを光源とし、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。本年度は、ラウエ型チャンネルカット結晶内の強い周期電場を利用して SPring-8 のビームライン BL19LXU で  $1 \text{ keV}$  までの比較的重い粒子を探索した結果について報告した。

#### 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 (OVAL 実験)

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、真空偏極によってそこを通った光の偏光状態が変化すると予想される。本研究室では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計画であり、光路長を稼ぐための高フィネスのファブリ・ペロー共振器を五神研究室・工学系研究科吉岡研究室と共同で開発している。昨年度までの結果から、量子電磁力学の検証には 3.5 桁の感度向上が必要と判明した。そこで今年度は主にノイズの削減に取り組む、ノイズ源の理解と対策を進めた。また長期運転

化、より強力な磁石の開発に向けた研究も進めている。今後は共振器及び磁石のアップグレードを行い、真空複屈折の世界初観測を目指す。

### SACLA と大強度レーザーを用いた真空回折の探索

強場下の QED の物理として、真空回折も挙げられる。真空偏極によって真空の屈折率が変化するため、非一様磁場中では屈折率勾配が生じ、そこを通った光（プローブ光）は一部が回折されると予想される。この真空回折を世界で初めて観測するため、高強度場として高強度レーザーを、プローブ光として SACLA を用いる。昨年度のプロトタイプ実験を踏まえ、今年度はデフォーダブルミラーを用いたレーザー集光サイズの 1 桁改善、X 線ビーム shaper による X 線集光に取り組んだ。現状ではレーザー集光サイズを 1/3 にすることに成功しており、今後は集光前のビームサイズを拡大してさらに 1/3 を目指す。また X 線集光については shaper を用いて回折限界の 2.3 倍の大きさまで集光することに成功し、今後は回折限界まで集光を可能にするレンズ形状の検討を進める。さらに、真空回折の初観測に向け、偏光変化の効果も組み合わせた探索の検討を開始した。

### ミリ波を用いた光と弱い結合をもつ粒子の探索

標準模型を超えた新しい物理で予言される extra  $U(1)$  ゲージボソンとして Hidden Photon (HP) が挙げられる。これは電磁場と混ざり合うので、もしこれが暗黒物質であれば、導体表面から垂直に電磁波を放出させると予想される。この電磁波をパラボラアンテナを用いて集光し SBD で検出することで、特に今迄未開拓であったミリ波領域で暗黒物質を探索している。福井大学にある電波暗室にて 3 ヶ月間データを取得し、HP Dark Matter (HPDM) について  $0.67\text{--}0.92\text{ meV}$  の質量領域で kinetic mixing  $\chi \gtrsim 10^{-8}$  を 90% 信頼水準で棄却した (図 2.3.4)。将来的には SIS 検出器などを用いてより高感度な探索を目指す。

#### <受賞>

- [1] 上岡修星, Best Experimental New Talent Presentation award, International School of Subnuclear Physics 2018, 2018 年 6 月.
- [2] 周健治, 学生奨励賞, 2018 年度量子ビームサイエンスフェスタ, 2019 年 3 月.

#### <報文>

(原著論文)

- [3] T. Yamaji, K. Tamasaku, T. Namba, T. Yamazaki and Y. Seino, “Search for Axion like particles using Laue-case conversion in a single crystal”, *Phys. Lett. B* **782**(2018)523.

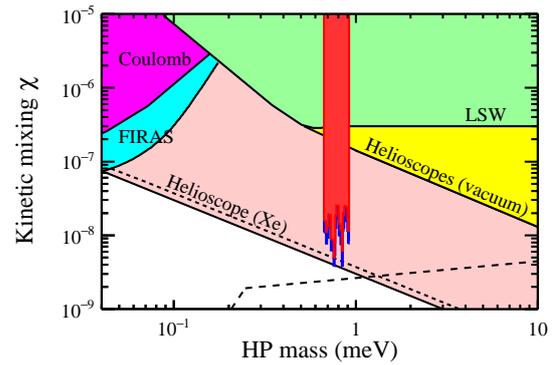


図 2.3.4: ミリ波を用いた HPDM の探索結果。 [5]

- [4] X. Fan, S. Kamioka, K. Yamashita, S. Asai and A. Sugamoto, “Vacuum magnetic birefringence experiment as a probe of the dark sector”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2018**(2018)063B06.
- [5] S. Knirck, T. Yamazaki, Y. Okesaku, S. Asai, T. Idehara and T. Inada, “First results from a hidden photon dark matter search in the meV sector using a plane-parabolic mirror system”, *JCAP* **11**(2018)031.

The ATLAS Collaboration

- [6] *Eur.Phys.J. C* **78**(2018)110, Erratum: *Eur.Phys.J. C* **78**(2018)898.
- [7] *Eur.Phys.J. C* **78**(2018)401.
- [8] *Phys.Rev. C* **97**(2018)024904.
- [9] *Phys.Lett. B* **777**(2018)303-323.
- [10] *Phys.Lett. B* **777**(2018)91-113.
- [11] *Eur.Phys.J. C* **78**(2018)154.
- [12] *Phys.Lett. B* **776**(2018)318-337.
- [13] *JHEP* **03**(2018)009.
- [14] *Eur.Phys.J. C* **78**(2018)142.
- [15] *Eur.Phys.J. C* **78**(2018)171.
- [16] *Eur.Phys.J. C* **78**(2018)163.
- [17] *Eur.Phys.J. C* **78**(2018)129.
- [18] *JHEP* **04**(2018)033.
- [19] *Phys.Lett. B* **779**(2018)24-45.
- [20] *JHEP* **01**(2018)055.
- [21] *Phys.Rev. D* **97**(2018)032005.
- [22] *Eur.Phys.J. C* **78**(2018)102.
- [23] *Eur.Phys.J. C* **78**(2018)24.
- [24] *Phys.Lett. B* **780**(2018)557-577.
- [25] *Phys.Rev. D* **97**(2018)052012.
- [26] *Phys.Rev. D* **97**(2018)032003.

- [27] Eur.Phys.J. C **78**(2018)250.  
 [28] JHEP **03**(2018)042.  
 [29] Phys.Lett. B **776**(2018)295-317.  
 [30] Eur.Phys.J. C **78**(2018)199.  
 [31] Eur.Phys.J. C **78**(2018)18.  
 [32] JHEP **06**(2018)107.  
 [33] JHEP **05**(2018)195.  
 [34] JHEP **05**(2018)077.  
 [35] JHEP **01**(2018)126.  
 [36] Phys.Rev.Lett. **121**(2018)092001.  
 [37] JHEP **06**(2018)108.  
 [38] Eur.Phys.J. C **78**(2018)186.  
 [39] JHEP **06**(2018)022.  
 [40] JHEP **03**(2018)095.  
 [41] Phys.Rev. D **97**(2018)112001.  
 [42] JHEP **07**(2018)127.  
 [43] Eur.Phys.J. C **78**(2018)293.  
 [44] JHEP **03**(2018)174, Erratum: JHEP **11**(2018)051.  
 [45] Eur.Phys.J. C **78**(2018)487.  
 [46] Phys.Lett. B **781**(2018)55-76.  
 [47] Phys.Rev. D **97**(2018)052010.  
 [48] Phys.Rev. D **97**(2018)072003.  
 [49] Phys.Rev. D **97**(2018)072016.  
 [50] Phys.Lett. B **780**(2018)578-602.  
 [51] Phys.Rev. D **98**(2018)012003.  
 [52] Phys.Rev.Lett. **120**(2018)161802.  
 [53] Phys.Lett. B **781**(2018)327-348.  
 [54] Phys.Rev.Lett. **120**(2018)202007.  
 [55] Phys.Rev. D **97**(2018)092006.  
 [56] JHEP **06**(2018)166.  
 [57] Phys.Rev. D **98**(2018)052005.  
 [58] Phys.Rev.Lett. **120**(2018)211802.  
 [59] JHEP **10**(2018)159.  
 [60] Eur.Phys.J. C **78**(2018)903.  
 [61] Eur.Phys.J. C **78**(2018)995.  
 [62] JHEP **07**(2018)089.  
 [63] JHEP **07**(2018)176.  
 [64] Phys.Rev. D **98**(2018)032008.  
 [65] Phys.Lett. B **782**(2018)750-767.  
 [66] Phys.Lett. B **783**(2018)392-414.  
 [67] Phys.Rev.Lett. **121**(2018)081801.  
 [68] Phys.Rev. D **98**(2018)032009.  
 [69] Phys.Lett. B **785**(2018)136-158.  
 [70] Phys.Rev. D **98**(2018)092010.  
 [71] Eur.Phys.J. C **78**(2018)565.  
 [72] JHEP **08**(2018)089.  
 [73] Phys.Rev. D **98**(2018)032015.  
 [74] JHEP **09**(2018)050.  
 [75] Eur.Phys.J. C **78**(2018)847.  
 [76] Eur.Phys.J. C **78**(2018)762.  
 [77] JHEP **10**(2018)047.  
 [78] Phys.Rev. D **98**(2018)032002.  
 [79] Phys.Rev. C **98**(2018)044905.  
 [80] Phys.Rev. D **98**(2018)092004.  
 [81] Phys.Rev. C **98**(2018)024908.  
 [82] Phys.Rev. D **98**(2018)032016.  
 [83] Phys.Lett. B **786**(2018)114-133.  
 [84] Eur.Phys.J. C **78**(2018)625.  
 [85] Phys.Lett. B **784**(2018)345-366.  
 [86] Phys.Lett. B **784**(2018)173-191.  
 [87] Phys.Lett. B **787**(2018)68-88.  
 [88] JHEP **08**(2018)048.  
 [89] Phys.Rev. D **98**(2018)092012.  
 [90] Eur.Phys.J. C **78**(2018)987.  
 [91] Phys.Rev. D **98**(2018)092002.  
 [92] Phys.Rev.Lett. **121**(2018)152002.  
 [93] JHEP **10**(2018)031.  
 [94] Phys.Rev.Lett. **121**(2018)212301.  
 [95] Phys.Rev. D **98**(2018)112010.  
 [96] Phys.Lett. B **786**(2018)134-155.  
 [97] Eur.Phys.J. C **78**(2018)784.  
 [98] JHEP **11**(2018)040.  
 [99] Phys.Rev. D **98**(2018)092008.  
 [100] JHEP **09**(2018)139.  
 [101] Eur.Phys.J. C **78**(2018)1007.  
 [102] Phys.Rev. D **98**(2018)052003.  
 [103] JHEP **10**(2018)180.  
 [104] JHEP **12**(2018)039.  
 [105] Phys.Lett. B **786**(2018)223-244.  
 [106] Phys.Rev. D **98**(2018)092005.  
 [107] Phys.Rev. D **98**(2018)052008.  
 [108] Phys.Rev.Lett. **121**(2018)211801.  
 [109] JHEP **11**(2018)085.  
 [110] Eur.Phys.J. C **78**(2018)997.  
 [111] Phys.Lett. B **786**(2018)59-86.  
 [112] JINST **13**(2018)P12006.  
 [113] JHEP **12**(2018)010.

(会議抄録)

- [114] A. Ishida, K. Shu, T. Murayoshi, X. Fan, T. Namba, S. Asai, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, N. Oshima, B. E. O'Rourke and R. Suzuki, "Study on positronium Bose-Einstein condensation", JJAP Conf. Proc. **7**(2018)011001.  
(学位論文)
- [115] 桶作愛嬉, "LHC-ATLAS 実験初段ミュオントリーガーの高速・高度化の研究", 修士論文 (2019).  
<学術講演>  
(国際会議)  
一般講演
- [116] K. Yamada, "Recent Progress towards Positronium Bose-Einstein Condensation", The 11th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2019), March 4, 2019, Okinawa, Japan.
- [117] M. Saito, "Tracking at FCC", Workshop for Development and Applications of Fast-Timing Semiconductor Devices, December 8, 2018, Tokyo, Japan.  
18th International Conference on Positron Annihilation (ICPA-18), August 22, 2018, Orlando, USA
- [118] K. Shu, "Development of cooling system for positronium".
- [119] A. Ishida, "Positron focusing system and positronium thermalization measurement for realizing positronium Bose-Einstein condensation".  
招待講演
- [120] A. Ishida, "Precision tests of fundamental physics using positronium", 3rd Kyoto Workshop on Positron Sciences "Positron Annihilation Spectroscopy: Fundamentals and Applications", November 6, 2018, Kyoto University, Japan.
- [121] S. Asai, "Tabletop experiments using light and atoms", Visions for table-top dark matter experiments, February 27, 2019, Tokyo, Japan.  
ポスター
- [122] K. Yamada, "Development of Cooling Laser System for Positronium Bose-Einstein Condensation", The 11th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2019), March 2, 2019, Okinawa, Japan.  
(国内会議)  
一般講演
- [123] 周健治, "ボース・アインシュタイン凝縮実現を目指したポジトロニウム冷却", 第 55 回アイソトープ・放射線研究発表会, 2018 年 7 月 5 日, 東京大学弥生講堂.
- [124] 浅井祥仁, "Top spin correlations と Higgs coupling", 新テラスケール研究会, 2018 年 7 月 27 日, 名古屋大学坂田平田ホール.  
京都大学複合原子力科学研究所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」:京都大学複合原子力科学研究所:2018 年 12 月
- [125] 山田恭平, "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 I".
- [126] 周健治, "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 II".  
日本物理学会秋季大会:信州大学:2018 年 9 月
- [127] 上岡修星, "OVAL 実験: パルス磁石と高フィネス共振器を用いた真空複屈折の探索".
- [128] 清野結大, "X 線自由電子レーザー施設 SACLA における高強度レーザーを用いた真空回折の探索".
- [129] 周健治, "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 I".
- [130] 山田恭平, "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 II".
- [131] 邱奕寰, "LHC-ATLAS 実験 Run2 における 2-prong タウ崩壊を用いた MSSM ヒッグス粒子探索の感度向上".  
日本物理学会:第 74 回年次大会:九州大学:2019 年 3 月
- [132] 石田明, "ボース・アインシュタイン凝縮を目指した高密度ポジトロニウム生成材料の開発".
- [133] 上岡修星, "OVAL 実験: パルス磁石と高フィネス共振器を用いた真空複屈折の探索".
- [134] 成田佳奈香, "OVAL 実験の感度の向上を目指した新型パルス磁石の考察".
- [135] 周健治, "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 I".
- [136] 橋立佳央理, "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 II".
- [137] 山田恭平, "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 III".
- [138] 清野結大, "X 線自由電子レーザー施設 SACLA における高強度レーザーを用いた真空回折の探索".
- [139] 邱奕寰, "LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるハドロニックタウ粒子対に崩壊する MSSM ヒッグス粒子探索の感度測定".  
招待講演
- [140] 石田明, "陽電子を用いた基礎物理研究 ~ポジトロニウムの精密測定とボース・アインシュタイン凝縮~", 第 11 回陽電子科学研究交流会, 2018 年 12 月 5 日, 関空ジョイテルホテル.  
ポスター
- [141] 周健治, "ポジトロニウムによるボース・アインシュタイン凝縮実現を目指した研究", 第 4 回 TIA 光・量子計測シンポジウム, 2019 年 3 月 8 日, つくば国際会議場.

2018 年度量子ビームサイエンスフェスタ:つくば国際会議場:2019 年 3 月

- [142] 周健治, “ポジトロニウムレーザー冷却のための新しいシリカキャビティとガンマ線検出手法の試験”.
- [143] 山田恭平, “ポジトロニウムのレーザー冷却に向けた陽電子ビームの集束及び時間分解能改善”.

(セミナー)

- [144] 石田明, “陽電子を用いた基礎物理研究 —ポジトロニウムのボース・アインシュタイン凝縮で探る反物質の謎—”, 第 4 回 MCM コロキウム (材料系), 2018 年 7 月 26 日, 産業技術総合研究所つくば中央第五事業所.
- [145] K. Shu, “Towards realization of antimatter laser”, Sakura Science (Japan-Asia Youth Exchange Program in Science), November 2, 2018, Tokyo, Japan.
- [146] 石田明, “「反物質」で探る宇宙の起源”, 大阪大学桜花会 (応用化学部門同窓会) 東京支部例会, 2018 年 11 月 5 日, 学士会館.

## 3 物性理論

### 3.1 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。30 年度の研究概要は以下の通りである。

#### 3.1.1 量子 Cavity 系における低光子濃度状態での光双安定性 (Optical Bistability) とヒステリシス

光双安定性 (Optical Bistability) は光の透過率が入力強度の関数として不連続に変わる現象である。我々はこの現象をミクロな立場から調べるために、マイクロキャビティに閉じ込められた原子の離散準位やスピン自由度など離散自由度と、外部から駆動されたキャビティ光子の相互作用からなるモデルを調べている。この系で相互作用の強さと駆動外場の強さの関数として起こる現象を高度にパラレル化した量子マスター方程式によって、量子効果、有限サイズ効果、周期的に強度が変化する入力に関する性質を明らかにしてきた。マイクロキャビティを特徴づける量として、離散自由度の数  $N$  (スピン数) とキャビティ内の光子数  $n$  の比によって、特徴ある 2 つ領域があることが知られている。 $N > n$  の領域 (I) では相互作用のため強い量子効果 (真空 Rabi 分裂) が現れ、 $N < n$  の領域 (II) では、光子は古典電磁場とみなされ通常の共鳴現象 (Rabi 振動) が現れることが知られている。これまでの光双安定性 (Optical Bistability) 転移は主に、領域 (I) と領域 (II) をまたぐ変化として調べられてきた。しかし、我々は、量子効果が強い領域 (I) 内部でも光双安定性 (Optical Bistability) 転移が起こることを指摘し、実際の実験状況に即して、有限の粒子数でのその遷移を量子マスター方程式の固有値問題を数値的に解析することによって明らかにした [9] さらに、周期的に強度が変化する入力に対して系が示すヒステリシスをフロケ演算子の固有値問題として定式化し、双安定での特徴を明らかにした。

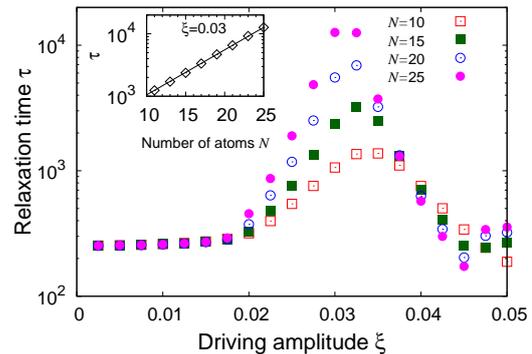


図 3.1.1: 光双安定性 (Optical Bistability) 転移の緩和時間のサイズ依存性。1 次相転移を反映してサイズとともに指数関数的に増大する。

#### 3.1.2 断熱時間発展の加速

断熱時間発展の加速に関して、任意の古典スピン系に対して適用可能な反非断熱項を提案し、それによって古典の意味での定常状態を追うダイナミクスとしての断熱時間発展を任意の時間で実現するものであることを解析的に示した [11]。つまり、古典の多体系である古典スピン模型に対して厳密な反非断熱項を発見した。また、一次転移や臨界点といった現象に伴いどのような挙動を示すかを数値計算によって明らかにした。さらに、その理論を量子アニーリングの古典模型に適用し、その性能を調べた。この研究結果は第 38 回量子情報技術研究会と日本物理学会 2018 年秋季大会で報告をおこない、それぞれ学生発表賞と日本物理学会学生優秀発表賞を受賞した。

断熱時間発展の加速の量子アニーリングの古典模型への応用、断熱時間発展の加速の Bose-Einstein 凝縮中の猫状態生成への応用、に関して研究をさらに進め、Bose-Einstein 凝縮体で猫状態を高速で生成する方法の開発を進めた [12]。特に、パリティ演算子を用いた解析により、この手法を含む断熱および超断熱生成では、様々な大きさの猫状態の重ね合わせ状態ができること、パリティ測定により猫状態の検出および解析が可能であること、パリティ測定を用いた干渉実験が未知のパラメータを推定するのに最適な方法であることなどを明らかにした。また、実際の実験では防ぐことのできない粒子損失が起きる場合も解析した。パリティ演算子を用いた解析により、粒子損失がある場合でも密度演算子がブロック対角化されることを示し、猫状態の検出および解析の可能性を明らかにした。

#### 3.1.3 孤立多体系の緩和過程

孤立多体系の緩和過程を明らかにすることは統計物理学の基本的問題の一つである。系が完全に熱平

衡状態に緩和する前に、準安定な定常状態に緩和する「前期熱平衡化現象」(prethermalization)は孤立量子系の緩和過程に広くみられる現象である。

長距離相互作用系では短距離相互作用系とは定性的に異なる緩和過程が見られることが知られているが、長距離相互作用が働くために普遍的に生じる前期熱平衡化現象の存在を明らかにした [14]。さらに、周期外場で駆動された古典スピン系を研究し、対応する量子系で見られる Floquet 前期熱平衡化現象が古典スピン系でも生じることを明らかにした [15]。

### 3.1.4 ダークソリトン

ソリトンの局所的構造が対応する量子系でどのように現れるかは興味深い問題である。この問題を可解系である相互作用がある 1 次元ボース粒子系で調べた。これまでの先駆研究から、局所的にソリトンの変位を生成する演算子を導入しその線形結合で量子状態を生成する方法を開発し、また逐次的な観測によって古典ソリトンを見つける方法の量子力学的機構についても調べた。

### 3.1.5 $d^5$ モット絶縁体での electronic magnetoelectric 効果

最近、 $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  でのテラヘルツ分光などにより興味を集めている  $d^5$  モット絶縁体での octahedral crystal field 下での electronic magnetoelectric (ME) 効果を調べた 4d and 5d 物質では、比較的広がった軌道のため局在電子の電荷ゆらぎが重要になり、ME 効果が重要になる。強いスピン軌道結合をもつ 3 軌道ハバード模型から電気分極の機構を導き、辺共有あるいは頂点共有の場合のスピン演算子対による電気分極を求めた。この結果はキタエフ物質でのイリジウムペロブスカイトのテラヘルツ光学伝導で重要となる [13]。

### 3.1.6 量子スピン鎖における局在スピンの行列積波動関数 (MPS) による解析

基底状態と励起状態の間にエネルギーギャップのあるいわゆるギャップドスピン系では、端や不純物、格子欠陥などで局在スピンの誘起される。このようなスピン自由度については実験的な検証も盛んに行われており、ロバストな量子ビットとしての応用などが提案されている。そのような状態の具体的な波動関数を行列積波動関数 (MPS) で表し、その特徴を明らかにした。VBS の基底状態を基底状態を持つ典型的な模型として AKLT 模型でそのような状態を厳密に再現し、その外部磁場への依存性などを明らかにした。さらに、一般のギャップドスピン系の代表として反強磁性相互作用の強さに交替構造を持つハイゼンベルグ模型 (BAHC) において AKLT

模型と同様な MPS の構築がどの精度で行うことができるかを明らかにした。[33]。

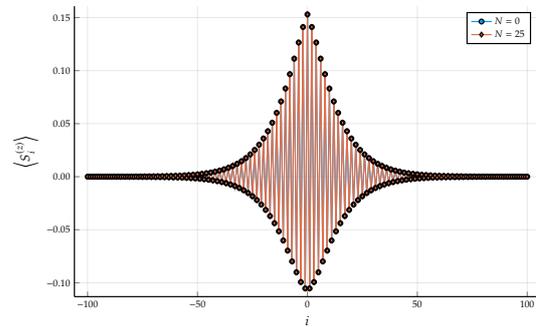


図 3.1.2: 行列積波動関数 (MPS) によって求めた BAHC で格子欠陥に誘起された実効的  $S = 1/2$  スピンの磁化配位

### 3.1.7 局所格子構造のちがう双安定系での弾性相互作用による新奇現象の研究

格子が 2 つの局所的な安定な構造を持ちそれらの間の相転移を示す場合に格子ひずみによる弾性相互作用が系の相転移やダイナミクスに重要な役割をすることを明らかにして来た。今年度は、これまで研究を進めてきた短距離反強磁性相互作用と長距離強磁性相互作用空なる系の角状の強磁性-常磁性相転移線に関して高度なクラスター平均場近似を用いて多種の相の共存状態について詳しい解析を行った [10, 49, 51]。また、パルスレーザーによる励起後生じる、系の HS-LS 密度の時間変化に関して弾性相互作用による圧力伝搬に関する速い HS-LS 転移成分と熱効果による遅い成分の分離に関するモデルを構築し、モデルに内在する多種のタイムスケールについて考察を与えた。

### 3.1.8 保磁力の統計力学機構解明

元素戦略・磁性材料拠点 (ESICMM) の活動として、磁石の保磁力の温度効果や空間構造への依存性に関して研究を微視的に現象を把握するため原子スケールのスピン模型を用いて進めている。系の準安定性を明らかにするため、磁化の関数としての自由エネルギーを Wang-Landau 法を用いたモンテカルロ法で調べ、保磁力の温度変化を明らかにした。また、強磁性体であるため系が大きくなると重要になる双極子相互作用を効率よく取り入れる数値計算法として、有限温度での系の粗視化を行うアルゴリズムの開発、実際の時間変化を取り扱えるモンテカルロ法の開発などを行った。[6, 8, 50] また、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  は Nd の異方性エネルギーが c 軸から傾いているこ

とを反映して低温では磁化の向きが変化する再配置転移が起こる。このように磁化が傾いている状況での強磁場共鳴 (FMR) の特徴を明らかにした。

#### <受賞>

- [1] 森貴司 (東京大学理学系研究科物理学専攻 (受賞時), 理化学研究所研究員 (現在)) 第 22 回久保亮五記念賞, 「量子系の非平衡時間発展における厳密な結果」井上科学振興財団 2018 年 10 月 13 日
- [2] 鳩村拓矢, 学生発表賞, 量子情報技術特別研究専門委員会, 2018 年 11 月 26 日
- [3] 鳩村拓矢, 日本物理学会学生優秀発表賞, 日本物理学会, 2019 年 3 月 15 日
- [4] 鳩村拓矢, 2019 MERIT Award, 東京大学大学院 統合物質科学リーダー養成プログラム (MERIT), 2019 年 3 月 25 日

#### <報文>

##### (原著論文)

- [5] M. Nishino and S. Miyashita, Erratum: Realization of the thermal equilibrium in inhomogeneous magnetic systems by the Landau-Lifshitz-Gilbert equation with stochastic noise, and its dynamical aspects [Phys. Rev. B **91**, 134411 (2015)], Phys. Rev. B **97**, 019904 (1) (2018).
- [6] T. Hinokihara, M. Nishino, Y. Toga, and S. Miyashita, Exploration of the effects of dipole-dipole interactions in Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B thin films based on a stochastic cutoff method with a novel efficient algorithm, Phys. Rev. B **97**, 104427(1-8) (2018).
- [7] A. Bolens, H. Katsura, M. Ogata, and S. Miyashita, Mechanism for subgap optical conductivity in honeycomb Kitaev materials, Phys. Rev. B **97**, 161108 (R), (1-5) (2018).
- [8] Yuta Toga, Masamichi Nishino, Seiji Miyashita, Takashi Miyake, and Akimasa Sakuma, Anisotropy of exchange stiffness based on atomic-scale magnetic properties in the rare-earth permanent magnet Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B Phys. Rev. B **98**, 054418 (2018).
- [9] Tatsuhiko Shirai, Synge Todo, Hans de Raedt, and Seiji Miyashita, Optical bistability in a low-photon-density regime Phys. Rev. A **98**, 043802 (2018).
- [10] Masamichi Nishino, Per Arne Rikvold, Conor Omand, and Seiji Miyashita Multistability in an unusual phase diagram induced by the competition between antiferromagnetic-like short-range and ferromagnetic-like long-range interactions Phys. Rev. B **98**, 144402 (2018).
- [11] T. Hatomura and T. Mori, Shortcuts to adiabatic classical spin dynamics mimicking quantum annealing, Physical Review E **98**, 032136 (2018).
- [12] T. Hatomura and K. Pawłowski, Superadiabatic generation of cat states in bosonic Josephson junctions under particle losses, Accepted for publication in Physical Review A.

- [13] A. Bolens, Theory of electronic magnetoelectric coupling in  $d^5$  Mott insulators, Phys. Rev. B **98**, 125135 (2018).
- [14] T. Mori, Prethermalization in the transverse-field Ising chain with long-range interactions”, J. Phys. A **52**, 054001 (2018).
- [15] T. Mori, Floquet prethermalization in periodically driven classical spin systems, Phys. Rev. B **98**, 104303 (2018).
- [16] N. Shiraishi and T. Mori, Shiraishi and Mori Reply”, Phys. Rev. Lett. **121**, 038902 (2018).
- [17] T. Ishii, T. Kuwahara, T. Mori, and N. Hatano, Heating in integrable time-periodic systems, Phys. Rev. Lett. **120**, 220602 (2018)
- [18] T. Mori, Tatsuhiko N. Ikeda, E. Kaminishi, and M. Ueda, ”Thermalization and prethermalization in isolated quantum systems: a theoretical overview” J. Phys. B **51**, 112001 (2018).

##### (会議抄録)

- [19] Proceedings

##### (学位論文)

- [20] B. Adrien, Novel properties of the optical conductivity due to electric-dipole-induced magnetic transitions in the Hubbard model, 博士論文, 東京大学, 2018 年 9 月.
- [21] H. Hatomura, Shortcuts to Adiabaticity Applied to Many-Body Systems (多体系における断熱時間発展の加速), 博士論文, 東京大学, 2019 年 3 月.
- [22] H. Nakano Study of effective localized spin structure induced by inhomogeneities in quantum spin chain from the view point of matrix product state representation (量子スピン鎖における不均一構造によって誘起される局在スピン構造の行列積状態を用いた研究), 修士論文, 東京大学, 2019 年 3 月

#### <学術講演>

##### (国際会議)

##### 一般講演

- [23] T. Hinokihara, Efficient coarse-grained spin model reflecting atomistic properties 8 月 26 日-30 日 The ZhongGuanYuan Global Village Hotel (Peking University), The 25th International Workshop on Rare-Earth and Future Permanent Magnets and their Applications (repm2018)

##### 招待講演

- [24] S. Miyashita, Elastically driven expansion with various time scales, UCM2018(international school and symposium on Ultrafast Control of Materials Rennes, France 2018/6/11 14.
- [25] S. Miyashita, Optical bistability in a strong-coupled quantum low photon-density regime, ENS-US workshop, Paris, 2018/9/27-28

- [26] T. Mori, Floquet prethermalization and eventual heating in classical spin systems, Floquet Theory: Fundamentals and Applications, Kyoto, 2018/4/16-18  
(国内会議)  
一般講演
- [27] 鳩村拓矢, 断熱時間発展の加速に基づく量子アニーリングの古典アルゴリズム, 第 38 回量子情報技術研究会 (QIT38) 広島国際会議場 6 月 4 日~5 日
- [28] 宮下 精二, スピンモデルによる磁化反転核の生成挙動, 及び単磁区粒子の磁化反転挙動の解析, 第 13 回磁性材料研究拠点成果報告会物質・材料研究機構, 6 月 29 日~30 日
- [29] 檜原 太一, Coarse-graining method for atomistic scale spin model, 物質・材料研究機構 第 13 回磁性材料研究拠点成果報告会物質・材料研究機構, 6 月 29 日~30 日
- [30] 上西 慧理子, 森 貴司, 宮下 精二, ダークソリトンの量子測定による構成法, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 同社大学 (京田辺キャンパス), 2018 年 9 月 9 日~9 月 12 日
- [31] 鳩村拓矢, 量子アニーリングにおける断熱時間発展の加速, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 同社大学 (京田辺キャンパス), 2018 年 9 月 9 日~9 月 12 日
- [32] 森貴司, 「長距離相互作用スピン系における prethermalization」, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 同社大学 (京田辺キャンパス), 2018 年 9 月 9 日~9 月 12 日
- [33] 中野 颯, 宮下 精二, 量子スピン系の不純物に誘起される局在したスピン自由度の行列積表現とその構造, 日本物理学会 2018 年秋季大会同社大学 (京田辺キャンパス), 2019 年 9 月 9 日~9 月 12 日
- [34] 榎 裕太, 檜原 太一, 三宅 隆, 佐久間 昭正, 宮下 精二, 磁気双極子相互作用かでの局所磁化反転時における自由エネルギー障壁, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 同社大学 (京田辺キャンパス), 2019 年 9 月 9 日~9 月 12 日
- [35] 檜原 太一, 西野 正理, 榎 裕太, 宮下 精二, 有限温度解析のための粗視化スピンモデルの構築, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 同社大学 (京田辺キャンパス), 2019 年 9 月 9 日~9 月 12 日
- [36] 鳩村 拓矢, 森 貴司, 量子アニーリングにおける断熱時間発展の加速, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 同社大学 (京田辺キャンパス), 2019 年 9 月 9 日~9 月 12 日
- [37] 森 貴司, 長距離相互作用スピン系における prethermalization, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 同社大学 (京田辺キャンパス), 2019 年 9 月 9 日~9 月 12 日
- [38] 檜原 太一, 長距離相互作用のあるスピン系でのスピンダイナミクス解析手法日本物理学会 2018 年秋季大会, 同社大学 (京田辺キャンパス), 2019 年 9 月 9 日~9 月 12 日
- [39] 檜原 太一, Constructing Macro Spin Model from Atomistic Spin Model NIMS 学術シンポジウム「磁性材料イノベーション」東京国際フォーラム, 東京 2018 年 10 月 15 日
- [40] 檜原 太一, Coarse-graining method for atomistic spin model 物質・材料研究機構 CMSM-ESICMM Permanent Magnet Seminar, 筑波, 2018 年 11 月 20 日
- [41] 鳩村拓矢, 粒子損失下における 2 成分 BEC 猫状態の断熱および超断熱生成, 日本物理学会 第 74 回年次大会, 福岡, 2019 年 3 月 14 日~3 月 17 日
- [42] 檜原太一, 宮下精二, 双極子相互作用の形状異方性と磁気相図日本物理学会 第 74 回年次大会, 福岡, 2019 年 3 月 14 日~3 月 17 日
- [43] 西野正理, P. A. RikvoldA, Conor OmandB, 宮下精二, 反強磁性様短距離相互作用と強磁性様長距離相互作用の競合による多重安定性, 日本物理学会 第 74 回年次大会, 福岡, 2019 年 3 月 14 日~3 月 17 日
- [44] 上西慧理子 A, 森貴司 B, 宮下精二 C 量子ダークソリトンのダイナミクス日本物理学会 第 74 回年次大会, 福岡, 2019 年 3 月 14 日~3 月 17 日
- [45] 白井達彦 A, 藤堂真治 B, A, 宮下精二 B 時間的に変調された外場の下での光双安定性のダイナミクス- フロケを用いた解析- 日本物理学会 第 74 回年次大会, 福岡, 2019 年 3 月 14 日~3 月 17 日
- [46] 石井隆志, 森貴司 A 相互作用のない可積分系の一般化シエルにおける強い意味での固有状態熱化, 日本物理学会 第 74 回年次大会, 福岡, 2019 年 3 月 14 日~3 月 17 日
- [47] 森貴司, 白井達彦, 開放量子系の非平衡定常状態と ETH, 日本物理学会 第 74 回年次大会, 福岡, 2019 年 3 月 14 日~3 月 17 日
- [48] 森貴司, 白井達彦, 開放量子系の非平衡定常状態と ETH, 日本物理学会 第 74 回年次大会, 福岡, 2019 年 3 月 14 日~3 月 17 日
- (セミナー)
- [49] S. Miyashita, Novel aspects of ordering processes in spin-crossover materials due to elastic interactions, Saclay-seminar, 5 September (2018).
- [50] S. Miyashita, Thermal and dynamical properties of the permanent magnet Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B at finite temperatures, CNRS Grenoble, 14 September (2018).
- [51] S. Miyashita, Effects of elastic interaction on ordering processes of spin-crossover materials, Max-Planck Institute, Stuttgart, 18 FEB. (2019).

## 3.2 小形研究室

小形研では強相関電子系 (高温超伝導、モット絶縁体)、トポジカル物質、ディラック電子系、フラストレーションやスピン軌道相互作用のある磁性体、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。

### 3.2.1 高温超伝導の理論

#### 擬ギャップ状態における異常な準粒子分散関係

銅酸化物超伝導体の有限温度・低ホールドープ領域に見られる擬ギャップ状態の起源は未だに明らかになっていない。その一つに、角度分解光電子分光 (ARPES) 実験によって発見された擬ギャップ状態における特異な準粒子分散関係が挙げられる。我々は、交替フラックス状態と呼ばれる状態を仮定し、 $t$ - $J$  模型を用いて Gutzwiller 近似の範囲で準粒子分散関係を調べた。その結果、ARPES による観測結果をよく再現する分散関係が得られた。これにより、擬ギャップ状態において交替フラックス状態の強いゆらぎが存在する可能性が示唆される。[14, 42]

#### T' 型銅酸化物超伝導体における超伝導

最近、T' 型とよばれる構造をもつ電子ドープ型の銅酸化物超伝導体において、低電子キャリア領域においても超伝導転移が見られるという実験結果が報告されている。我々は、 $\text{CuO}_2$  面における酸素の自由度を明示的に取り入れた 2 バンド有効模型を用いて、揺らぎ交換近似 (FLEX) の範囲で超伝導転移の可能性を調べた。その結果、電荷移動ギャップが小さいときに、T' 型の実験で報告されているような超伝導転移が確かに見られることが分かった。[13, 41]

### 3.2.2 ディラック電子系

#### 物質中の量子電磁力学

ビスマスのようなディラック電子系物質の低温バルクの性質は、ディラックハミルトニアンによって記述されることが知られている。また、TaAs や TaP のようなワイルフェルミオン系物質を記述するワイルハミルトニアンはディラックハミルトニアンの質量ゼロの極限であり、ワイルフェルミオン系はディラック電子系の特殊な極限として位置付けることができる。このようなディラック電子系・ワイルフェルミオン系物質の電磁場に対する応答は、量子電磁力学における電荷のくりこみや電磁的双対性と対応した興味深い現象を示すことが期待される。そこで、フェルミ準位が伝導帯あるいは価電子帯の中に位置する場合のディラック電子系、フェルミ準位がワイル点からずれている場合のワイルフェルミオン系に着目し、それらの系の複素誘電率と複素磁化率の波数・振動数依存性を解析的に導出した。特に、得られた複素誘電率の表式からプラズマ振動数および

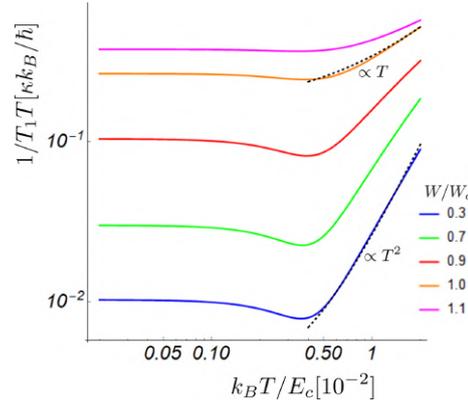


図 3.2.1: 自己無撞着ボルン近似によって計算された乱れたワイル半金属の  $1/T_1 T$  の温度依存性。化学ポテンシャルの温度依存性も取り入れている。 $W_c$  は臨界点における不純物散乱強度を表す。

ラズマモードの分散関係を導いた。このような「金属的」領域におけるディラック・ワイル物質の誘電的性質は、プラズマ振動数の測定から決定される背景誘電率と呼ばれる量によって特徴付けられる。さらに、ディラック電子系・ワイルフェルミオン系の背景誘電率のフェルミ準位依存性を求め、背景誘電率は磁場のバンド間効果の結果として知られる大きな反磁性の増大にともなって増大していくことを見出した。このような大きな反磁性と連動した背景誘電率の増大は、量子電磁力学における電磁的双対性と対応した興味深い現象である。[4, 20, 21, 32, 33]

#### 不純物によるワイル半金属の臨界現象と核スピン緩和率のスケーリング則

不純物ポテンシャルがある場合、半金属・バンド絶縁体から乱れた金属へと転移する臨界現象の存在が理論的に知られている。我々はワイル半金属における不純物による臨界現象に着目し、臨界点近傍で核スピン緩和率がどのように変化するかを調べた。

一般に臨界点近傍の物理量の振舞いは臨界指数によって記述できる。不純物の効果を自己無撞着なボルン近似によって評価したところ、臨界点近傍では核スピン緩和率の温度依存性が温度の 3 乗から 2 乗へと変化することが分かった。また、スケーリング則によると  $1/T_1 T$  の温度のべきは  $T^{2/z}$  で与えられる。ボルン近似では  $z = 2$  に対応するため、上記の結果はスケーリング則と一致している。また、核スピン緩和率の低温での振舞いを理解するために、化学ポテンシャルの温度依存性について考察した。ボルン近似ではなく  $t$ -matrix 近似を用いた場合、状態密度がワイル点の上下で非対称となる。この非対称性によって化学ポテンシャルの温度変化がより大きくなる場合があると分かった。これは低温での核スピン緩和率の振舞いを理解する上で重要となる可能性がある。(図 3.2.1) [36]

### 3次元ディラック電子系の磁気抵抗

多くのディラック電子系物質において、高磁場下での磁気抵抗が磁場の大きさに比例するという異常な現象が見られている。これに関して、ギャップがある場合と、ギャップが無い場合のディラック電子系において、遮蔽されたクーロン相互作用をもつ不純物散乱の場合に第一ボルン近似のもとで磁気抵抗を調べた。高磁場の極限で、ギャップが無い場合は磁気抵抗が磁場に比例するが、ギャップがある場合には磁場に反比例することがわかった。一方、低磁場ではギャップの大きさには依らないという結果を得た。また、低磁場でも磁場に比例する磁気抵抗をしめすような現象論的な緩和率を提唱した。[3, 25, 45]

### 3.2.3 熱応答の理論

#### Sommerfeld-Bethe 関係式の成立範囲

温度差により電圧が生じる現象としてゼーベック効果が知られている。これについてはボルツマン方程式による Sommerfeld-Bethe 関係式が知られているが、この関係式がどの範囲において成立するかは、微視的には明らかになっていなかった。我々は、一般的な線形応答の理論の枠組みに基づき、この成立範囲を明らかにした。その結果、Sommerfeld-Bethe 関係式を満たさない寄与が3種類あることが分かった。これらの寄与は、ボルツマン方程式を越えた新しい現象を与える期待される。[1, 30, 60]

#### 線形応答理論に基づいたゼーベック係数に関するフォノンドラッグの理論

最近、狭いバンドギャップを持つ物質である  $\text{FeSb}_2$  において、10K 付近の低温で 50mV/K 程度の非常に大きなゼーベック効果が観測された。銅や金などの金属に比べ3桁近く大きく、その巨大ゼーベック効果の起源が注目されている。その起源として、これまで、電子-格子相互作用に由来するフォノンドラッグ効果が提案されているが、Boltzmann 方程式を用いた現象論的な理論が行われているのみで、微視的な観点からの理論構築は行われていない。また、 $\text{FeSb}_2$  の伝導帯の底に現れる不純物バンドを微視的に正確に扱うことは行われていない。そこで、不純物バンドを適切に扱うことが可能な自己無撞着  $t$ -matrix 近似と線形応答理論を併用することによって、微視的にゼーベック係数を解析した。その結果、実験で見られるような巨大なゼーベック効果が低温で現れることを明らかにした。さらに、フォノンドラッグ効果によるゼーベック係数が伝導帯の有効質量に顕著に依存することを明らかにした。[2, 28, 31, 61, 62]

#### エキシトニック絶縁体の低温での熱伝導

半導体や半金属中で、電子と正孔がクーロン力によって束縛状態(エキシトン)を形成し、それが超伝導の場合と同様に凝縮した状態はエキシトニック

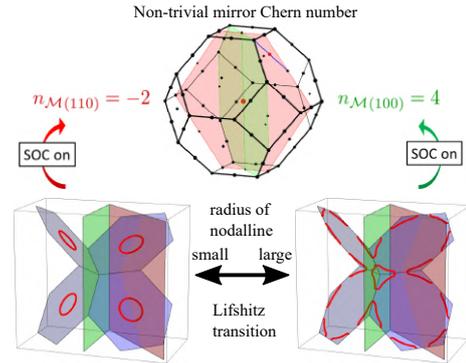


図 3.2.2: ノーダルラインの経路とミラーチャーン数の関係

絶縁体と呼ばれる。2004 年にはエキシトニック絶縁体候補物質の  $\text{TmSe}_{0.45}\text{Te}_{0.55}$  において、低温での熱伝導率の増大が報告されている。この熱伝導率の増大の理由としてエキシトン素励起による熱伝導が起こっている可能性を考え、エキシトニック絶縁体のモデルとしてよく知られる 2 バンドモデルを用いて先行研究をもとに熱伝導率の計算を行った。計算の結果、不純物の影響を考慮することが重要であることが分かった。現在までの計算結果によると、不純物の扱い方によっては、転移温度より低温での熱伝導率が増大しえることが分かった。[58]

### 3.2.4 トポロジカル物質の理論

#### $Z_2$ 指数とディラックノーダルライン

近年、ディラックノーダルラインと呼ばれる分散関係に線的に繋がった縮退がある系が注目されている。そのような物質の探索においては、主に計算コストの事情から、ブリルアンゾーンの対称点の情報を用いた手法を用いるのが望ましい。その一例として、スピン軌道相互作用を無視した場合について、空間反転固有値から計算される  $Z_2$  指数を用いた方法が提案されている。また、そのような系にスピン軌道相互作用を導入した場合には、トポロジカル絶縁体やディラック電子系など、他のトポロジカルに非自明な電子状態が現れることが知られている。我々は第一原理計算などを用いて、従来の  $Z_2$  指数では自明と判定されるが、スピン軌道相互作用を無視した場合にディラックノーダルラインを持つ系の例を発見した(面心立方格子の  $\text{SnSe}$ 、 $\text{Ca}_2\text{As}$  など)。また、これらの物質においてスピン軌道相互作用の効果を考察することで、ディラックノーダルラインの通る経路とミラーチャーン数との間に一定の関連性があることを見出した(図 3.2.2)。[8, 24, 46]

#### ハニカム格子模型におけるベリー曲率の磁化への寄与

グラフェンの模型に staggered on-site potential とスピン軌道相互作用を導入すると、パラメータ領域によって、通常の絶縁体相とトポロジカル相が現れ

ることが知られている。この系において磁化率を計算すると、これら2つの相で磁化率の振る舞いに違いが現れた。この結果を数値的な手法も組み合わせで評価すると、ブリルアンゾーン中のベリー曲率を反映していることがわかった。これまでもベリー曲率が磁化率などの物理量に現れることが指摘されているが、このモデルはそのような効果を具体的に示す新たな例であると考えられる。[49, 59]

### 3.2.5 有機伝導体

#### 有機錯体における軌道磁性

有機錯体 HMTSF-TCNQ は、HMTSF 分子から TCNQ 分子に電子が供与されることによって、一軸方向に大きな伝導度を持つ擬一次元有機伝導体となっている。この物質は室温で金属的にふるまうが、低温において絶縁体に転移する。このとき、室温から温度が下がるにしたがって反磁性磁化率が増大し、低温では大きな反磁性磁化率を示すことが報告されているが、その起源は明らかにされていない。そこで、本物質の強束縛模型から低エネルギー有効模型を構築し、軌道磁化率を厳密に解析可能な福山公式を用いて、磁化率の化学ポテンシャル依存性を調べた。その結果、磁化率は反磁性を示し、質量ゼロのディラック電子系と類似の化学ポテンシャル依存性を示すことがわかった。

#### 量子スピン液体候補物質 $\kappa\text{-H}_3(\text{Cat-EDT-TTF})_2$ の低温熱伝導率

$\kappa\text{-H}_3(\text{Cat-EDT-TTF})_2$  は2次元三角格子上の電子系が水素結合によって何層も連結された構造を持つ物質であり、低温で量子スピン液体状態を示唆する実験結果が得られたことから注目を集めている。我々は、この物質の低温におけるフォノン熱伝導率が特異な温度依存性を示すことに注目し、量子スピン液体に特有のスピン励起とフォノンの間の相互作用を考慮することで、この特異な温度依存性の説明を試みた。その結果、実験で得られたフォノン熱伝導率の温度依存性がスピノンフォノン相互作用から生じること、実験を再現する結合定数が他の実験結果と矛盾しないことを明らかにした。[16, 48]

### 3.2.6 ボロフェン関連物質

#### 2次元ホウ素シートの電子状態

近年、2次元単原子層物質が、その特異な物理的性質と新奇量子デバイスへの応用の観点から注目を集めている。特に、Xenes と総称されるグラフェンの類似物質であるシリセン (Si)、ゲルマネン (Ge)、ビスマセン (Bi) など、トポロジカルに非自明な相が報告されている。ホウ素を用いたボロフェンは、グラフェン同様ディラックフェルミオンを有する系であることが明らかにされ、グラフェンを超えるデバイス材料としての可能性が模索されている。一方、これら Xenes は基板上のみで得られ、独立な単原子

層として得る手法の開発が求められていた。近年の研究により、 $\text{MgB}_2$  結晶からボロフェンシートを生成し、それを水素化することで、独立な水素化ボロフェン単原子シート (borophane、ボロファンとも言う) を得る手法が確立された。本研究では、軟 X 線分光による実験と第一原理計算の結果を組み合わせ、この水素化ボロフェンの電子状態について考察した。その結果、水素化ボロフェンは、それぞれ Y 点と  $\Gamma$  点に電子ポケットとホールポケットを持つ半金属であることがわかった。また、それらのバンドの波動関数の対称性に注目し、ホールポケットは  $\text{MgB}_2$  結晶中のホウ素の性質を受け継いでいることも明らかにした。この結果は、ホウ素を用いた新たな超伝導デバイスへの応用に繋がるものであると期待できる。[9, 56]

### 3.2.7 スピン系およびスピン軌道相互作用

#### 磁気モノポール間相互作用がある系における磁化過程とスピン液体状態の形成

パイロクロア格子等におけるイジング模型では、アイスルールに従う巨視的に縮退した基底状態、すなわち古典スピン液体が出現する。この古典スピン液体の励起状態は、分数励起の性格を持つ磁気モノポールとして記述され、さらに、磁気モノポールには「ガウス則」という局所保存則が働くことが分かっている。近年、ガウス則と磁気モノポール間の相互作用の競合から、磁気モノポールがクラスタを組む新奇な古典スピン液体状態が基底状態として実現することが明らかになった。

我々は、磁気モノポール数密度の変化が相互作用した磁気モノポール系に与える影響を調べるために、カゴメ格子およびチェッカーボード格子上の  $J_1 - J_2 - J_3$  イジング模型に磁気モノポール間相互作用を加えた模型を用いて、その磁化過程を議論した。その結果、それぞれの模型において、有限の磁場中で新しい古典スピン液体状態が発現することがわかった。また、この状態は磁化曲線中のプラトーによって特徴づけられることがわかった (図 3.2.3)。[34, 44]

#### 一次元量子スピン系における異常な準位交差

フラストレーションがある量子スピン系では、簡単なモデルにおいても非自明な物理現象が起きることが知られている。近年、こうした量子現象が実際に観測されるようになった。 $\text{Cu}_2\text{N}/\text{Cu}(100)$  基板上の Co 原子がその好例である。この系では、様々な相互作用を持つ量子スピン鎖を実現できる可能性があり、理論実験両面から注目を集めている。この物質を念頭に、最近接が強磁性、次近接が反強磁性の有限サイトの  $J_1 - J_2$  XXZ 模型の磁化過程を調べた。その結果、ある相互作用領域において、サイトの数が奇数の時は準位交差が起こるが、偶数の時は準位交差が起こらないことがわかった。また、 $\text{Cu}_2\text{N}/\text{Cu}(100)$  基板上の Co 原子で実験的にこの系を再現する具体的な方法の提案も行った。[35]

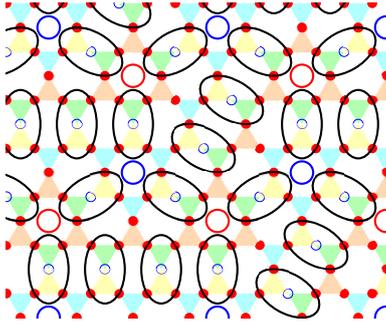


図 3.2.3: トポジカル電荷間に相互作用がある時の、磁場下カゴメ格子上古典イジング模型の基底状態。トポジカル電荷がクラスタを組むことにより、 $M=17/27$  という新奇な磁化プラトーが出現する。

### 5d 電子系におけるジャロシンスキー・守谷相互作用

スピン軌道相互作用の大きい系として注目を集める 5d 電子系においては新たな形のジャロシンスキー・守谷相互作用 (DMI) の発現が期待される。この問題の理解のため、我々は反転対称性が破れた立方晶に対応する 2 サイトモデルを厳密対角化および 2 次摂動の手法により解析した。その結果、通常のスピんで記述される DMI とは異なったふるまいを持つ、全角運動量で記述される新たな形の DMI を見出した。さらに、5d<sup>1</sup> 電子系においては、多極子モーメント間で DMI に類似した相互作用が生じることが明らかになった。[12, 15, 26]

### カイラル磁性体 CsCuCl<sub>3</sub> における高圧高磁場下磁気相図

カイラル磁性体 CsCuCl<sub>3</sub> は三角格子反強磁性に伴うフラストレーションと系の反転対称性の破れに伴う DM 相互作用の協奏により多彩な磁気構造が生じることが知られていた。近年、高圧高磁場下で従来知られていた磁気構造に加え新たな構造が現れることが実験的に示唆された。この新奇の磁気構造を同定すべく、従来の理論を拡張しスピン波近似により解析を行った。その結果、高圧下では uud 構造や Y 構造といった新たな磁気構造が安定化する磁場領域が存在することが明らかになった。[6, 15, 19, 29, 38, 55, 57]

### カイラル磁性体 CsCuCl<sub>3</sub> における磁気構造に依存した熱輸送特性

カイラル磁性体 CsCuCl<sub>3</sub> においては多様な磁気構造が現れることを見出してきた。その磁気構造と輸送特性との関連性を明らかにするため、本物質における縦熱伝導度の磁気構造依存性を調べた。まず熱輸送の主要な媒体と考えられるマグノンに対して磁性不純物による散乱を考え、その緩和時間の波数依存性を微視的に計算し、Boltzmann 方程式と組み合わせることにより熱伝導度テンソルの定式化を行っ

た。得られた表式により縦熱伝導度を計算したところ、少なくとも低磁場の領域では実験と整合する結果を得た。[15, 47]

### <報文>

(原著論文)

- [1] M. Ogata and H. Fukuyama, submitted to J. Phys. Soc. Jpn. “Range of Validity of Sommerfeld-Bethe Relation Associated with Seebeck Coefficient and Phonon Drag Contribution”
- [2] H. Matsuura, H. Maebashi, M. Ogata, and H. Fukuyama: to appear in J. Phys. Soc. Jpn. “Effect of Phonon Drag on Seebeck Coefficient Based on Linear Response Theory: Application to FeSb<sub>2</sub>”
- [3] V. Könye and M. Ogata: Phys. Rev. B **98**, 195420 (2018). “Magnetoresistance of a three-dimensional Dirac gas”
- [4] H. Maebashi, T. Hirose, M. Ogata, and H. Fukuyama: to appear in J. Phys. Chem. Solids (2018), doi:10.1016/j.jpcs.2017.12.034. “Nuclear Magnetic Relaxation and Knight Shift Due to Orbital Interaction in Dirac Electron Systems”
- [5] Y. Suzumura and M. Ogata: Phys. Rev. B **98**, 161205(R) (2018). “Role of acoustic phonons in exotic conductivity of two-dimensional Dirac electrons”
- [6] M. Hosoi, H. Matsuura, M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 075001 (2018). “New Magnetic Phases in the Chiral Magnet CsCuCl<sub>3</sub> under High Pressures”
- [7] K. Miyake and H. Matsuura: arXiv:1806.00254. “Theory for Anomalous NMR Response in Pb<sub>1-x</sub>Tl<sub>x</sub>Te on Charge Kondo Effect”
- [8] I. Tateishi, H. Matsuura: J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 073702 (2018). “Face Centered Cubic SnSe as a Z<sub>2</sub> Trivial Dirac Nodal Line Material”
- [9] I. Tateishi, N. T. Cuong, C. A. S. Moura, M. Cameau, R. Ishibiki, A. Fujino, S. Okada, A. Yamamoto, M. Araki, S. Ito, S. Yamamoto, M. Niibe, T. Tokushima, D. E. Weibel, T. Kondo, M. Ogata, and I. Matsuda: Phys. Rev. Materials **3**, 024004 (2019). “Semi-metallicity of free-standing hydrogenated monolayer boron from MgB<sub>2</sub>”
- [10] A. Bolens, H. Katsura, M. Ogata, and S. Miyashita: Phys. Rev. B **97**, 161108(R) (2018). “Mechanism for sub-gap optical conductivity in honeycomb Kitaev materials”
- [11] Y. Togawa, J. Kishine, P. A. Nosov, T. Koyama, G. W. Paterson, S. McVitie, Y. Kousaka, J. Akimitsu, M. Ogata, and A. S. Ovchinnikov: Phys. Rev. Lett. **122**, 017204 (2019). “Anomalous Temperature Behavior of the Chiral Spin Helix in CrNb<sub>3</sub>S<sub>6</sub> Thin Lamellae”

- [12] M. Hosoi, T. Mizoguchi, T. Hinokihara, H. Matsuura, and M. Ogata: arXiv:1804.04874. “Dzyaloshinskii-Moriya Interaction between Multipolar Moments in  $5d^1$  Systems”  
(会議抄録)
- [13] K. Yamazaki, H. Tsuchiura, T. Yoshioka, and M. Ogata: J. Phys.: Conf. Series **969**, 012044 (2018). “Superconductivity in the underdoped region of the  $T'$ -structure cuprates based on an effective two-band model”
- [14] H. Tsuchiura, M. Ogata, K. Yamazaki, and R. Asaoka, arXiv:1711.04982, J. Phys.: Conf. Series **969**, 012066 (2018). “Anomalous dispersion relations in the staggered flux state”  
(学位論文)
- [15] 細井将史: “空間反転対称性が破れた系における種々のスピン構造に関する理論的研究” (Theoretical study on various spin structures in systems with broken inversion symmetry) (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)
- [16] 徳永睦月: “量子スピン液体候補物質  $\kappa\text{-H}_3(\text{Cat-EDT-TTF})_2$  の低温熱伝導率” (Low temperature thermal conductivity in a candidate material of quantum spin liquid,  $\kappa\text{-H}_3(\text{Cat-EDT-TTF})_2$ ) (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)  
(著書)
- [17] 小形正男: 『物性物理のための場の理論・グリーン関数 — 量子多体系をどう解くか?』臨時別冊・数理学科学 SGC ライブラリ 142.
- <学術講演>  
(国際会議)  
一般講演
- [18] M. Ogata, J.-I. Kishine, and H. Fukuyama: International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals (ICSM2018) (BEXCO, Busan, Korea, July 1-6, 2018). “Energy Landscape of Charge Excitations in Boundary Region between Dimer-Mott and Charge Order State in Molecular Solids”
- [19] H. Matsuura: International Symposium on Chiral Magnetism (IRAKA-Nara Kasugano International Forum, Nara, Japan, July. 25–28, 2018). “Theory of Magnetic Phase Diagram in Chiral Magnet  $\text{CsCuCl}_3$  under High Pressures”
- [20] H. Maebashi, M. Ogata, and H. Fukuyama: APS March Meeting 2019 (Boston, USA, March 4–8, 2019). “Duality between dielectricity and diamagnetism in Dirac materials in analogy with quantum electrodynamics”
- [21] H. Maebashi, M. Ogata, and H. Fukuyama: International workshop “Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts” (BEC2018X) (Univ. Tsukuba, December 9–13, 2018). “Quantum Electrodynamics in Solids: Dielectric and Diamagnetic Properties of Dirac Materials”
- [22] I. Tateishi: International workshop BEC2018X (Univ. Tsukuba, December 9-13, 2018). “Nodalline semimetal and Topological Crystalline Insulator”
- [23] I. Tateishi: Workshop “Symmetry and Topology in Condensed-Matter Physics” (Tokyo, June 19–21, 2018). “Nodalline semimetal and Topological Crystalline Insulator”
- [24] I. Tateishi: Workshop “Trends in Theory of Correlated Materials” (TTCM2018) (Geneva, Switzerland, October 8–10, 2018). “Nodalline semimetal and Topological Crystalline Insulator”
- [25] V. Könye: Workshop TTCM2018 (Geneva, Switzerland, October 8–10, 2018). “Magnetoresistance of a Three-dimensional Dirac Electron Gas”
- [26] M. Hosoi, T. Mizoguchi, T. Hinokihara, H. Matsuura, and M. Ogata: International Symposium on Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems (TPFC2019) (Kashiwa, February 18–20, 2019). “Multipolar DM interaction in  $5d$  electron systems”  
招待講演
- [27] M. Ogata (Plenary): 4th International Conference on Functional Materials Science 2018 (ICFMS2018) in conjunction with 2nd RIKEN Symposium International Workshop on Organic Molecular System (Bali, Indonesia, November 12–15, 2017). “Organic Materials as Low-Dimensional Strongly Correlated Electron Systems”
- [28] H. Matsuura: Workshop on Thermal and Charge Transport across Flexible Nano-Interfaces (TCTFN2018) (Tokyo Metropolitan University, Japan, November 11–12, 2018). “Effect of Phonon Drag on Seebeck Coefficient Based on Linear Response Theory”
- [29] H. Matsuura: 4th ICFMS 2018 in conjunction with 2nd RIKEN Symposium International Workshop on Organic Molecular System (Bali, Indonesia, November 12–15, 2017). “Theory of Magnetic Phase Diagram in Chiral Magnet  $\text{CsCuCl}_3$  under High Pressures”  
(国内会議)  
一般講演
- [30] 小形正男、福山秀敏: 日本物理学会、同志社大学 2018, 9.9–9.12 (秋季大会) “ゼーベック係数に関する Sommerfeld-Bethe 関係式の成立範囲とフォノンドラッグの位置づけ”

- [31] 松浦弘泰、前橋英明、小形正男、福山秀敏：日本物理学会、同志社大学 “線形応答理論におけるゼーベック係数へのフォノンドラッグ効果”
- [32] 前橋英明、広沢智紀、小形正男：日本物理学会、同志社大学 “トポロジカル絶縁体の核磁気共鳴：表面電子状態の軌道効果”
- [33] 前橋英明、小形正男、福山秀敏：日本物理学会、同志社大学 “ディラック電子系物質の分極テンソルとプラズマモード”
- [34] 徳宿邦夫、溝口知成、宇田川将文：日本物理学会、同志社大学 “ガウス則を用いたフラストレートスピンの磁化過程解析と古典スピン液体形成”
- [35] 徳宿邦夫、D. Bimla、F. Mila：日本物理学会、同志社大学 “フラストレーションがある量子スピン系におけるサイト数の偶奇性に依存した異常な準位交差”
- [36] 広沢智紀、前橋英明、小形正男：日本物理学会、同志社大学 “不純物下のワイル半金属における軌道核スピン緩和率とその臨界点近傍での振る舞いの研究”
- [37] 立石幾真：日本物理学会、同志社大学 “Z<sub>2</sub> 自明なノーダルライン半金属とトポロジカル結晶絶縁体の対応”
- [38] 細井将史、松浦弘泰、小形正男：日本物理学会、同志社大学 “キラル磁性体 CsCuCl<sub>3</sub> における高圧下磁気相図の理論的研究”
- [39] 末次祥大、北川健太郎、苅宿俊風、葉山慶平、A. W. Rost、J. Nuss、C. Muhle、小形正男、高木英典：日本物理学会、同志社大学 “アンチペロブスカイト Sr<sub>3</sub>PbO における 3 次元ディラック電子の巨大軌道反磁性”
- [40] 鈴村順三、小形正男、小林晃人：日本物理学会、同志社大学 “有機ディラック電子系の電気伝導度に対する電子-格子相互作用効果”
- [41] 福田周平、山崎国人、土浦宏紀、小形正男：日本物理学会、同志社大学 “擬ギャップ状態における異常な分散関係に関する理論的研究”
- [42] 土浦宏紀、小形正男、山崎国人、福田周平：日本物理学会、同志社大学 “4 回対称性が破れた系における交替フラックス相”
- [43] 小形正男：日本物理学会、九州大学伊都キャンパス 2019, 3.14-17 (年次大会) “ゼーベック係数に対する (SB 関係式を満たさない) 電子間相互作用の効果”
- [44] 徳宿邦夫、溝口知成、宇田川将文：日本物理学会、九州大学 “フラストレート格子上的のモノポール相互作用による磁化プラトーの形成”
- [45] V. Könye and M. Ogata：日本物理学会、九州大学 “Transport properties of Dirac electrons in a magnetic field”
- [46] 立石幾真：日本物理学会、九州大学 “Ca<sub>2</sub>As 等におけるノーダルラインと表面状態の解析”
- [47] 細井将史、松浦弘泰、小形正男：日本物理学会、九州大学 “キラル磁性体 CsCuCl<sub>3</sub> におけるスピン構造に依存した熱伝導特性”
- [48] 徳永睦月、松浦弘泰、小形正男：日本物理学会、九州大学 “量子スピン液体候補物質 κ-H<sub>3</sub>(Cat-EDT-TTF)<sub>2</sub> の低温熱電導度”
- [49] 尾崎壮駿、小形正男：日本物理学会、九州大学 “ギャップのあるグラフェンにおける軌道磁性”
- [50] 末次祥大、北川健太郎、苅宿俊風、葉山慶平、A. W. Rost、J. Nuss、C. Muhle、小形正男、高木英典：日本物理学会、九州大学 “アンチペロブスカイト Sr<sub>3</sub>PbO における 3 次元ディラック電子の巨大軌道反磁性”
- [51] 福田周平、山崎国人、土浦宏紀、小形正男：日本物理学会、九州大学 “d 波超伝導及び交替スラックスの共存状態における 4 回対称性の破れ”
- [52] 小形正男：科研費合同研究会「真性 T' 構造銅酸化物における電子状態とノンドープ超伝導機構の解明」 「中性子スピンプリズム法の確立と超伝導体の電子多自由度マルチダイナミクスの研究」 登別温泉 2018, 12.22-23. “ワイル電子系における軌道運動による NMR 1/T<sub>1</sub>、および高温超伝導体の pair density wave について”
- [53] 松浦弘泰：SPRUC, 分野融合 (実用) 固液界面ミーティング、東京理科大 2018, 4.20 “固液界面の電子状態：リチウムイオン電池における負極界面上被膜 (SEI) の厚さの見積もり”
- [54] 松浦弘泰：SPRUC, 分野融合 (実用) 固液界面ミーティング、大阪大学 2019, 2.28 “固液界面の電子状態：リチウムイオン電池における負極界面上被膜 (SEI) の厚さの見積もり”
- [55] 細井将史、松浦弘泰、小形正男：スピン系物理の最前線、京都大学 “キラル磁性体 CsCuCl<sub>3</sub> における高磁場高圧下での多様な磁気構造”
- [56] I. Tateishi, *et al.*: 第 13 回ホウ素ホウ化物研究会、長岡技術科学大学 2019, 2.23 “Semi-metallicity of free-standing hydrogenated monolayer boron from MgB<sub>2</sub>”
- [57] 細井将史、松浦弘泰、小形正男：第 63 回物性若手夏の学校、ホテルたつき 2018, 7.24-28 “キラル磁性体 CsCuCl<sub>3</sub> における高圧下磁気構造と熱輸送特性”
- [58] 寶田真太：第 63 回物性若手夏の学校、“エキシトニック絶縁体の熱伝導率について”
- [59] 尾崎壮駿、松浦弘泰、小形正男：第 63 回物性若手夏の学校、“ビスマセンの軌道帯磁率”

## 招待講演

- [60] 小形正男：熱電研究の新展開ワークショップ Workshop on “New Development of Thermoelectric Effect”. (NIMS 2019, 10.3). “ゾンマーフェルト・ペーテの関係式について”
- [61] 松浦弘泰：熱電研究の新展開ワークショップ Workshop on “New Development of Thermoelectric Effect”. (NIMS 2019, 10.3). “線形応答理論におけるゼーベック係数へのフォノンドラッグ効果の理論的研究”

## (セミナー)

- [62] M. Ogata Seminar in Max Planck Institute, Stuttgart (2018, October 12). “Large Seebeck Effect and Phonon Drag in FeSb<sub>2</sub>”
- [63] 松浦弘泰：第 8 回キラル物性若手の会 2018 年度冬の学校 (大阪府立大学 i-site なんば, 2018, 12 12-14). “磁性入門”

### 3.3 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、物性物理学および物質科学の基礎研究を行っている。新しい第一原理電子状態計算手法の開発、不完全な回折実験データを利用したデータ同化結晶構造探索手法の開発、物質の光励起と光加工、遅い物理現象を取り扱うシミュレーション手法の開発、超伝導転移温度の第一原理計算手法の開発、結晶の熱物性、水素を含む新物質と物性の理論予測などが主要な研究テーマである。

#### 3.3.1 シミュレーション手法の開発

データ同化を用いた結晶構造探索：アルゴリズムの構築と実装、およびその応用

結晶構造は物性を決定する重要なファクターである。実験では、X線、中性子、および電子回折法などの多くの結晶構造解析手法が発展してきた。しかしながら、超高压実験であったりサンプルの結晶性が悪かったりして、回折実験データが不完全な場合は、構造決定は困難になる。一方、理論においては、エネルギーが安定な結晶構造を予測するためにさまざまな最適化手法が活用されてきたが、原子数が多くなると探索空間の自由度が急激に増大し、構造探索が事実上不可能になるという問題がある。

そこで我々は、理論計算と実験データの解析を同時に行うという発想のもと、不完全な実験データを利用した効率的な“データ同化”結晶構造探索手法を開発した。本手法では、ポテンシャルエネルギーと不完全な粉末回折実験データで定義されたペナルティ関数とを組み合わせて新たな評価関数を構成し、それを最適化することで、安定かつ実験データを再現する結晶構造を探索する(図3.3.1)。ペナルティ関数には様々な構成法が考えられるが、本研究では特に、X線回折パターンのピーク位置のみで定式化された結晶化度という量を用いてペナルティ関数を構成した[3]。

この手法を用いて、 $\text{SiO}_2$ 、カーボン、 $\text{MgB}_2$ 、 $\text{H}_3\text{S}$ の既知構造の構造予測を行った結果、従来の手法よりも効率的に安定構造を発見することができた。また、 $\text{Y}_2\text{CH}_x$ の未知構造の予測を行った結果、従来報告されていた構造よりも安定であり、かつ実験データをよりよく再現する構造を複数発見した[13]。

さらにX線回折パターンのピーク位置情報だけでは探索の成功率が低い場合も、対称性の低い結晶の場合、ペナルティ関数としてピーク強度まで使うと、成功率が向上することを確認した。たとえばユニットセルに48原子を含み、対称性も低い $\text{SiO}_2$ コーサイトの場合、ピーク位置だけでは10%しかない成功率が、強度まで使うと最大で60%まで向上する。試行回数は少ないが、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{17}$ (19原子)でも、ほぼゼ

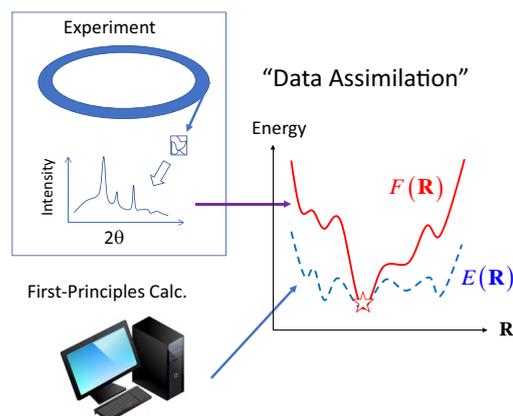


図 3.3.1: 不完全な粉末 X 線回折データを利用したデータ同化構造探索手法の概念図。第一原理計算で得られたポテンシャルエネルギー関数  $E(R)$  と回折データから構成したペナルティ関数とを、適切な重みで足し合わせて評価関数  $F(R)$  を構成し、これを仮想的なポテンシャルエネルギー曲面とみなして構造探索を行うことで、局所安定構造にかまらずに最安定構造に容易に到達することができる。

ロに近い成功率が50%ほどにまでなり、明らかな改善が見られた。

このほか、ポテンシャルエネルギー関数とペナルティ関数を独立に扱いつつ、それらの同時最適化を行う手法も提案した[10]。

ペナルティ関数には、原子位置情報からシミュレーションでできる任意の実験データが利用できるため、既存の手法では決定が難しい表面や界面といった複雑な構造の決定にも、本手法は応用可能と考えられる。なお本研究の多くの部分は、藤堂研究室との共同研究である。

フェムト秒レーザーによる金属微細加工の物理的機構の解明とマルチスケールシミュレーション手法の開発

レーザーによる金属加工は、医療器具・電子デバイスの加工をはじめとする幅広い用途に使用されている。一般に金属微細加工を行うには、パルス幅がフェムト( $10^{-15}$ )秒レベルのレーザーを使う必要があることは広く知られているが、その物理機構はよく理解されていない。実験と理論計算の食い違いも多く報告されている。そのため、レーザー加工時の最適なレーザー照射条件は経験則に頼ることが多く、シミュレーションや理論から決定することは困難である。我々の目標は、金属微細加工の物理機構の解明である。

我々はこれまで、第一原理計算の結果に基づき、金属微細加工の条件でのレーザーアブレーションにおいては、非平衡条件で励起された電子のエントロピーの寄与が支配的な役割を担っていると「電子エントロピー誘起機構」を提案してきた。本年度は、提案した機構の正当性を議論し、金属微細加工

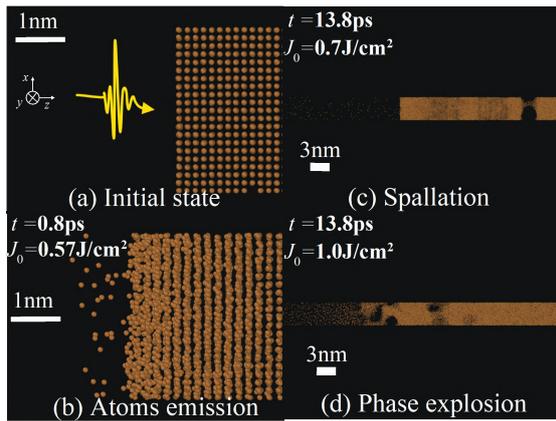


図 3.3.2: 電子エントロピー機構に基づくレーザーアブレーションのマルチスケールシミュレーション。銅の結晶表面に (a) 左からレーザーパルスを照射すると、レーザー強度に応じて、(b) 原子放出、(c) spallation、(d) phase explosion が観測される。

の物理現象を原子スケールから理解するために、電子温度に対する連続体モデルと古典分子動力学計算を組み合わせた、金属微細加工のマルチスケールシミュレーションを試みた。その際、レーザーによって励起された電子状態を表現するための、原子間ポテンシャルの作成とエネルギー保存則を満たす計算手法の開発を行った。開発した手法を用いたシミュレーションの結果、いかなる実験結果とも定性的な矛盾なく、実験の加工深さを定量的に再現できる計算結果が得られた (図 3.3.1)[12]。

### 集団座標フリーのポテンシャル極小脱出経路生成アルゴリズム

原子から成る系がとりうる構造は、その配置空間におけるポテンシャル平面によって決まる。特に興味深いのは局所安定な原子配置の間を移り変わるためのエネルギー障壁が最小となる経路の探索である。最近明石と Nagornov はこのタスクを経路の方向や終点に関する事前知識なしで行う計算手法を開発している [2]。本年度はこの手法をより大きな系へ適用できるよう改良し、アルゴンクラスターについてベンチマークテストを行った。

### ニューラルネットワークを用いた Kohn-Sham 交換相関ポテンシャル

第一原理計算に用いる Kohn-Sham 方程式においては、電子の間の相互作用の効果は交換相関ポテンシャルによって記述される。交換相関ポテンシャルは原理的には厳密形が存在するが、その具体的な形は長年不明であった。そこで当研究室では、交換相

関ポテンシャルを機械学習手法により数値的に構成する方法を開発してきた [4]。今年度、明石は杉野研究室 (東大物性研) と共同で、交換相関ポテンシャルを機械学習手法により数値的に構成する方法をさらに推し進め、これを局所的なリミットから非局所効果を系統的に考慮して改善していく方法を提案した。

### 相対論的密度汎関数理論の構築と超重元素の電子状態

近年、原子力研究開発機構のタンデム加速器において、アクチノイドの最後の元素であるローレンシウムのイオン化エネルギーが測定され、他のアクチノイド元素に比べて非常に小さいこと、また他のランタノイド・アクチノイド元素は、アクチノイド元素のほうがイオン化エネルギーが大きいが、ローレンシウムのイオン化エネルギーは、ランタノイドの最後の元素であるルテチウムよりも小さな値であることが発見された。このローレンシウムのイオン化エネルギーの特異的なふるまいは、相対論効果によって引き起こされていると考えられている。本研究では、これらの原子の電子構造を理解するため、相対論的密度汎関数理論を開発した。その際、Dirac 方程式から生じる相対論効果だけでなく、光速が有限であることに起因する Coulomb 力に対する補正項 (Breit 補正) を電子間相互作用に取り込むことで、すべての  $O(1/c^2)$  の相対論補正を密度汎関数理論に取り込むことに成功した。

ルテチウムとローレンシウムの電子構造を計算したところ、非相対論的な計算では、双方とも最外殻電子が  $d$  軌道である一方、本手法の計算結果では、ルテチウム、ローレンシウムの最外殻電子がそれぞれ  $d, p$  軌道であることがわかった [14]。

### 電子系における密度汎関数の、原子核密度汎関数理論への応用

原子核物理学では、核力の荷電対称性の破れの研究が広く行われている。しかし実験的に観測される荷電対称性の破れには、核力のみならず、電磁気力も寄与をしているため、核力由来の効果を取り出すためには、電磁気力の計算精度の向上が必要である。

密度汎関数理論は、電子系のみならず原子核構造研究にも広く使われているが、原子核密度汎関数理論では、電磁気力の交換項は局所密度近似 (LDA) で取り扱われていた。本研究では、電子系での密度汎関数理論で広く用いられている一般化勾配近似 (GGA) を用いることで、電磁気力の計算精度が向上することがわかった [1, 7]。

### 原子間相互作用の非調和効果と熱物性

原子間相互作用の非調和効果は、物質の格子熱伝導を担うだけでなく、結晶構造相転移に関係するフォノンソフトモード振動数の温度依存性をもたらし、ま

た産業応用上重要な物質の熱膨張率を決定する重要な効果である。我々はこれまで、第一原理計算を用いて精密に非調和効果を計算し、格子熱伝導率や有限温度のフォノン分散を計算する手法を開発してきた(公開アプリ名: ALAMODE) [11]。今年度は、幅広い温度領域で負の熱膨張率を示すことが見いだされた  $\text{Sc}_3$  のシミュレーションとその解析を論文にまとめた [9]。

### 3.3.2 第一原理電子状態計算の応用

#### 磁石材料 $\text{Nd}_2(\text{Fe},\text{X})_{14}\text{B}$ の元素置換効果

ネオジム磁石(主相は  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  の一部を他の元素で置換したものは、最強の永久磁石としてモーターや発電機等で広く使われている。現在も、保磁力向上のために添加する希少金属元素の削減や、さらなる性能向上に向けて、活発な研究がおこなわれているものの、元素置換効果や界面の効果が必ずしも明らかとなっていない。本研究ではネオジム磁石の保磁力への元素置換効果を明らかにするため、東工大の合田グループと共同で、 $\text{Nd}_2(\text{Fe},\text{X})_{14}\text{B}$  ( $\text{X}=\text{Mg}, \text{Al}, \text{Si}, \text{Ca}, \text{Sc}, \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu}, \text{Zn}, \text{Ga}, \text{Ge}$ ) の第一原理計算を行った。生成エネルギーと磁気異方性の計算結果から、 $\text{Mg}, \text{Ca}, \text{Sc}, \text{Cu}, \text{Zn}, \text{Ga}$  の添加が、磁石性能を向上させる可能性を示し、その物理的起源を明らかにした [5]。

#### 最高の強磁性転移温度をもつ新絶縁物質 $\text{Sr}_3\text{OsO}_6$ の電子状態計算

ダブルペロブスカイト構造を持つ  $\text{Sr}_3\text{OsO}_6$  が NTT のグループによって合成され、780 °C 以上の強磁性転移温度(キュリー温度)を示すことが見出された。我々はこの系の精密な電子状態計算を行い、その強磁性絶縁状態が Os の大きなスピン軌道相互作用に由来することを明らかにして、NTT グループと共同で新物質発見の報告を行った。この物質は、88 年ぶりに絶縁体のキュリー温度の記録を更新することとなった(図 3.3.2) [6]。

#### 高圧下鉄の超伝導におけるスピンゆらぎ効果

近年、超伝導密度汎関数理論(SCDFT)に基づく超伝導転移温度計算手法にスピンゆらぎの効果をとり入れる拡張手法が提案された(Essenberger et al, 2014)。我々はこの手法を高圧下における鉄に応用し、スピンゆらぎ媒介相互作用のエネルギー依存性が遅延効果を通じて転移温度を上昇させることを明らかにした [15]。

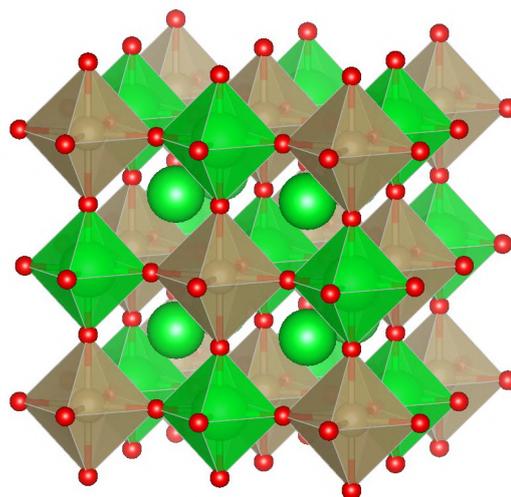


図 3.3.3: 絶縁体のキュリー温度の記録を更新した、ダブルペロブスカイト構造を持つ  $\text{Sr}_3\text{OsO}_6$  の結晶構造。

#### $\text{CeRh}_3\text{B}_2$ の電子状態計算

磁性元素を含まない強磁性体としては異常に高いキュリー温度(120 K)を示す六方晶  $\text{CeRh}_3\text{B}_2$  について、Ce サイト周辺に局在した 4f 軌道の取り扱いに着目して LDA+U 法および自己相互作用補正法による電子状態計算を実行し、強磁性状態を記述する有効スピンモデルのパラメータ決定を通じて、この系の特異な強磁性状態に整合する電子構造の探索を行った。結果、(1). 飽和磁化 (2). キュリー温度 (3). 局在 4f バンドの位置 (4). フェルミ面の形状、について実験事実をよく説明する電子状態が得られた。

#### PtDT ナノシートの電子状態計算

近年、2D トポロジカル絶縁体の候補物質として、(遷移金属)-dithiolene(DT) ナノシートが注目を集めているが、最近、理学系研究科化学専攻の西原研究室で実際に合成された Pt(プラチナ)DT ナノシートについて、実験的に同定された三次元積層構造に対して、電子状態計算を実行した。HSE06 ハイブリッド汎関数を用いた場合に、伝導度測定の実験結果と整合する、最高被占軌道と最低空軌道の間バンドギャップを持つバンド構造が得られた。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Tomoya Naito, Ryosuke Akashi and Haozhao Liang, Application of a Coulomb energy density functional for atomic nuclei: Case studies of local density approximation and generalized gradient approximation, Phys. Rev. C97, 044319 (2018).

- [2] R. Akashi and Y. S. Nagornov "Stochastic Formalism for Thermally Driven Distribution Frontier: A Nonempirical Approach to the Potential Escape Problem" *J. Phys. Soc. Jpn.* 87, 063801 (2018).
- [3] N. Tsujimoto, D. Adachi, R. Akashi, S. Todo and S. Tsuneyuki, Crystal structure prediction supported by Insufficient experimental data, *Phys. Rev. Materials* 2, 053801 (2018).
- [4] R. Nagai, R. Akashi, S. Sasaki, and S. Tsuneyuki "Neural-network Kohn-Sham exchange-correlation potential and its out-of-training transferability" *J. Chem. Phys.* 148, 241737 (2018).
- [5] Yasutomi Tatetsu, Shinji Tsuneyuki, and Yoshihiro Gohda: First-principles study on substitution effects in  $\text{Nd}_2(\text{Fe}, \text{X})_{14}\text{B}$ , *Materialia*, 4, 388 (2018).
- [6] Y. K. Wakabayashi, Y. Krockenberger, N. Tsujimoto, T. Boykin, S. Tsuneyuki, Y. Taniyasu and H. Yamamoto, Ferromagnetism above 1000 K in a highly cation-ordered double-perovskite insulator  $\text{Sr}_3\text{OsO}_6$ , *Nature Communications* 1, 535 (2019).
- [7] Tomoya Naito, Xavier Roca-Maza, Gianluca Colò, and Haozhao Liang, Coulomb exchange functional with generalized gradient approximation for self-consistent Skyrme Hartree-Fock calculations, *Phys. Rev. C* 99, 024309 (2019).
- [8] Takeru Yokota and Tomoya Naito, Functional-renormalization-group aided density functional analysis for the correlation energy of the two-dimensional homogeneous electron gas, *Phys. Rev. B* 99, 115106 (2019).
- [9] Yusuke Oba, Terumasa Tadano, Ryosuke Akashi and Shinji Tsuneyuki, First-principles study of phonon anharmonicity and negative thermal expansion in  $\text{ScF}_3$ , *Phys. Rev. Materials* 3, 033601 (2019).
- [10] D. Adachi, N. Tsujimoto, R. Akashi, S. Todo and S. Tsuneyuki, Search for common minima in joint optimization of multiple cost functions, *Comput. Phys. Commun.*, in press.
- [11] T. Tadano and S. Tsuneyuki, Ab initio prediction of structural phase-transition temperature of  $\text{SrTiO}_3$  from finite-temperature phonon calculation, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, in press.
- (学位論文)
- [12] 田中悠太, Effect of the electronic entropy on structural change and ablation of metals by an ultrashort laser pulse (超短パルスレーザーが照射された金属の構造変化とアブレーションに対する電子エントロピーの効果) (東京大学, 2019年3月 博士(理学))
- [13] 辻本直人, Data assimilation for crystal structure prediction: Construction and implementation of the algorithm and its application (データ同化を用いた結晶構造予測: アルゴリズムの構築と実装, およびその応用) (東京大学, 2019年3月 博士(理学))
- [14] 内藤智也, Density functional theory with finite-light-speed correction (有限光速補正を考慮した相対論的密度汎関数理論) (東京大学, 2019年3月 修士(理学))
- [15] 日詰湧真, Theoretical study on the effect of spin-fluctuation in superconductivity in iron under high pressure (高圧下鉄の超伝導におけるスピンゆらぎ効果の理論的研究) (東京大学, 2019年3月 修士(理学))
- (著書)
- [16] R. Akashi "First-Principles Computational Approaches to Superconducting Transition Temperatures: Phonon-Mediated Mechanism and Beyond" *Computational Materials Discovery*, p.198 (Royal Society of Chemistry; 2018).
- [17] 吉澤香奈子, 奥田基, 吉本芳英, 常行真司: 「第一原理計算アプリケーションの利用について」*マテリアルズ・インフォマティクスによる材料開発と活用集*, (株)技術情報協会 (2019), ISBN : 978-4-86104-732-9.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [18] Tomoya Naito, Ryosuke Akashi, Gianluca Colò, Haozhao Liang, and Xavier Roca-Maza: Coulomb Energy Density Functionals for Nuclear Systems, The International Summer workShop 2018 on First-Principles Electronic Structure Calculations: Advanced Lecture Series, Kashiwa, Japan, Jul. 11, 2018.
- [19] Tomoya Naito: Relativistic Density Functional Theory—Toward Fundamental Physics—, RCNP Workshop on Fundamental Physics using Neutrons and Atoms, Ibaraki, Japan, Aug. 19, 2018.
- [20] Tomoya Naito, Ryosuke Akashi, Gianluca Colò, Haozhao Liang, and Xavier Roca-Maza: Coulomb Energy Density Functionals for Nuclear Systems, The 17th International CNS Summer School, Wako, Japan, Aug. 23, 2018.
- [21] Daisuke Ohashi, Tomoya Naito, and Haozhao Liang: How to Improve Functionals in Density Functional Theory?, The 17th International CNS Summer School, Wako, Japan, Aug. 23, 2018.
- [22] Seiji Yoshikawa, Naoto Tsujimoto, Daiki Adachi, Ryosuke Akashi, Synge Todo and Shinji Tsuneyuki: Crystal structure simulation by assimilating incomplete powder diffraction data: First application to magnetic material, 3rd International Symposium on Research and Education of Computational Science (RECS2018), The University of Tokyo, Tokyo, Japan, Sep. 21, 2018.

- [23] Tomoya Naito, Ryosuke Akashi, Gianluca Colò, Haozhao Liang, and Xavier Roca-Maza: Coulomb Energy Density Functionals for Nuclear Systems 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and Physical Society of Japan, Hawaii, United States of America, Oct. 27, 2018.
- [24] Tomoya Naito: Coulomb Energy Density Functionals for Nuclear Systems, Recent Advances in Nuclear Structure Physics 2018, Kyoto, Japan, Dec. 01, 2018.
- [25] Tomoya Naito: Coulomb Energy Density Functionals for Nuclear Systems, Tsukuba-CCS workshop on "microscopic theories of nuclear structure and dynamics, Tsukuba, Japan, Dec. 12, 2018.
- [26] Tomoya Naito: Coulomb Energy Density Functionals for Nuclear Systems, Recent Developments in Nuclear and Hadron Physics, Hefei, People's Republic of China, May. 26, 2018.
- [27] "Development of the non-empirical method of seeking diverse escape paths on the potential surface", Yuri S. Nagornov and Ryosuke Akashi, Computational Sciences Workshop 2019 (CSW2019), KFC Hall, Tokyo, 2019/01/16-18
- [28] "A Stochastic Non-empirical approach in the problem of the reaction path seeking", Yuri S. Nagornov and Ryosuke Akashi, APS March Meeting 2019, Boston Convention and Exhibition Center, Boston, USA 2019/03/04-08
- 招待講演
- [29] Tomoya Naito: Coulomb Energy Density Functionals for Nuclear Systems, Recent progress of nuclear structure and reaction theory, Sendai, Japan, Apr. 26, 2018.
- [30] Shinji Tsuneyuki, "Crystal structure prediction by assimilating incomplete powder diffraction data", Symposium at Spetses, Spetses, Greece, Jun. 11-15, 2018.
- [31] R. Akashi "Exploring pressure-induced superconducting phases in hydrides from first principles" APCTP seminar Jan. 28, 2019; Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea.
- [32] Tomoya Naito: Coulomb Energy Density Functionals for Nuclear Systems, One-day workshop on "New Vistas on Nuclear Dynamics: Shapes, Spin, and Isospin, Milan, Italy, Feb. 27, 2019.
- (国内会議)
- 一般講演
- [33] 吉澤香奈子, 吉本芳英, 常行真司: 「GUI 支援ツール C-Tools による電子状態計算の実行経過時間の評価」物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会, 東京大学物性研究所 (柏市), 2018 年 4 月 2 日.
- [34] "How to escape from potential basins non-empirically through the minimum-energy paths" Yuri S. Nagornov, Ryosuke Akashi, 第 2 回ポスト「京」萌芽的課題「基礎科学の挑戦」・「極限マテリアル」合同公開シンポジウム, 東北大学金属材料研究所, 2018 年 7 月 3 日.
- [35] 吉澤香奈子, 吉本芳英, 常行真司: 「GUI 支援ツール C-Tools の分析: DFT コードの連携を見据えて」, H30 年度ポスト「京」重点課題 (7) 第 3 回 CDMSI 研究会, 東京大学本郷キャンパス (文京区), 2017 年 7 月 19 日.
- [36] 内藤智也: 「相対論的密度汎関数理論の構築～超重元素電子状態の理解に向けて～」超重元素の新展開, 九州大学伊都キャンパス (福岡市), 2018 年 07 月 30 日.
- [37] "Stochastic Non-empirical approach to the reaction path seeking" Yuri S. Nagornov, Ryosuke Akashi, H30 年度 ポスト「京」重点課題 (7) 第 3 回 CDMSI 研究会, 東京大学本郷キャンパス, 2018 年 7 月 19 日-20 日.
- [38] 辻本直人, 足立大樹, 明石遼介, 藤堂眞治, 常行真司: 「化学組成比と結晶構造を決定するためのデータ同化シミュレーション手法」, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 同志社大学京田辺キャンパス (京田辺市), 2018 年 9 月 10 日.
- [39] 土居抄太郎, 松本宗久: 「CeRh<sub>3</sub>B<sub>2</sub> の電子状態計算」, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 同志社大学京田辺キャンパス (京田辺市), 2018 年 9 月 11 日.
- [40] 永井瞭, 明石遼介, 佐々木秀, 常行真司, 杉野修: 「機械学習手法による非局所な交換相関汎関数の構築」, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 同志社大学京田辺キャンパス (京田辺市), 2018 年 9 月 11 日.
- [41] 内藤智也: 「相対論的密度汎関数理論の構築～超重元素電子状態の理解に向けて～」, Threshold Rule 50, 京都大学基礎物理学研究所 (京都市), 2018 年 10 月 04 日.
- [42] 只野央将, 常行真司: 「非調和効果を考慮した第一原理フォノン計算: 手法開発と SrTiO<sub>3</sub> への応用」, 第 38 回エレクトロセラミックス研究討論会, ユニオンビル (川崎市), 2018 年 11 月 15 日.
- [43] 明石遼介, Yu. S. Nagornov, "ポテンシャル極小から最適脱出経路をたどる非経験的方法" 第 32 回分子シミュレーション討論会 産業技術総合研究所 2018 年 11 月 28 日-30 日.
- [44] Yuri S. Nagornov, Ryosuke Akashi, "Seeking the high energy saddle points for argon cluster by stochastic non-empirical approach", 第 32 回分子シミュレーション討論会, 産業技術総合研究所 (つくば) 2018 年 11 月 28 日-30 日.
- [45] 吉川誠司, 辻本直人, 足立大樹, 明石遼介, 藤堂眞治, 常行真司: 「不完全な粉末回折データを用いたデータ同化による結晶構造探索」, 第 12 回物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会) (奈良先端科学技術大学院大学, 奈良), 2018 年 11 月 30 日.
- [46] "反応座標を用いない反応経路探索: クラスタ・分子系への応用", Yuri S. Nagornov, 明石遼介, 第二回

- ポスト「京」萌芽的課題「基礎科学の挑戦」・「極限マテリアル」 合同公開ワークショップ, ステーションカンファレンス東京, 2019年1月10日.
- [47] 内藤智也: 「机上の Coulomb」, RIBF 若手放談会 エキゾチック核物理の将来, 理研神戸キャンパス (神戸市), 2019年02月18日.
- [48] 田中悠太, 常行真司: 「金属におけるフェムト秒レーザーアブレーションの二温度モデル分子動力学計算」, 第66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), 2019年3月10日.
- [49] "Stochastic Non-empirical approach to the reaction path seeking: applications to clusters and molecules", Yuri S. Nagornov and Ryosuke Akashi, 日本物理学会第74回年次大会, 九州大学伊都キャンパス, 2019年3月14日-17日.
- [50] 内藤智也, 明石遼介, 梁豪兆, 常行真司: 「有限光速補正を考慮した相対論的密度汎関数理論」, 日本物理学会第74回年次大会, 九州大学伊都キャンパス (福岡市), 2019年03月15日.
- [51] 横田猛, 内藤智也: 「汎関数くりこみ群に基づいた密度汎関数理論による二次元電子ガスの相関エネルギーの計算」, 日本物理学会第74回年次大会, 九州大学伊都キャンパス (福岡市), 2019年03月15日.
- [52] 内藤智也: 「相対論的密度汎関数理論の構築～超重元素電子状態の理解に向けて～」, 2019 重元素核化学ワークショップ, 理化学研究所和光キャンパス (和光市), 2019年03月27日.
- 招待講演
- [53] 常行真司 「データ科学と計算・実験の連携による材料研究への期待」, 第24期日本学術会議 第3部化学委員会 材料化学分科会 第3回 (日本学術会議, 東京), 2018年7月23日.
- [54] 常行真司 「物質中の水素は計算機でどう見えるか?」, 第1回ヒドリドイオニクス研究会 (分子研), 2018年10月28日.
- [55] 常行真司 「データ科学と計算・実験の連携による物質・材料研究」, 2018年表面真空学会学術講演会 企画シンポジウム「表面・真空科学研究を加速するマテリアルズインフォマティクスの最前線」(神戸国際会議場), 2018年11月19日.
- [56] 常行真司 「先端計測と第一原理シミュレーションの水素データ同化」, 第12回物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会) (奈良先端科学技術大学院大学, 奈良), 2018年11月30日.
- [57] 明石遼介「重み付き Langevin ダイナミクスのポテンシャル脱出問題への応用」レア・イベントの計算科学 第2回ワークショップ (筑波大学), 2018年12月1日.
- [58] 常行真司 「データ科学と計算・実験の連携による物質・材料研究」, 第24回電子デバイス界面テクノロジー研究会-材料・プロセス・デバイス特性の物理- (三島, 東レ総合研修センター), 2019年1月24日.
- [59] 常行真司 「産業競争力に貢献する次世代スーパーコンピューティング技術の動向 I」, 日本学術会議公開シンポジウム「AI時代のもの・コトづくりに向けた新たな計算科学活用における課題と期待」 (日本学術会議, 東京), 2019年2月14日.
- [60] 只野史将, 常行真司: 「ALAMODE を使った格子熱伝導・有限温度フォノン計算」, 第5回大型実験施設とスーパーコンピュータとの連携利用シンポジウム (秋葉原 UDX, 東京), 2019年3月15日.
- [61] 常行真司 「物質と材料の計算科学」, 日本物理学会第74回年次大会 (2019年) シンポジウム「計算物理学への誘い」(九州大学伊都キャンパス, 福岡), 2019年3月16日.
- [62] 明石遼介「超伝導密度汎関数理論の発展: 理論および応用」2018年度第2回界面ナノ科学研究会 野地温泉ホテル (福島県) 2019年3月25日-26日
- [63] 国内会議 (セミナー)
- [64] 内藤智也: 「Density Functional Theory with Electromagnetic Interaction」, 核多体セミナー, 京都大学理学部原子核理論研究室 (京都市), 2018年06月15日.
- [65] S. Tsuneyuki, Atomistic Modeling of Materials from First Principles, 65th CEMS Colloquium (理化学研究所創発物性科学研究センター, 和光), 2018年10月31日.
- [66] 内藤智也: 「密度汎関数理論とその応用～超重元素の理解に向けて～」, 学際研究・課外セミナー, 近畿大学大学院総合理工学研究科 (東大阪市), 2019年02月21日.

### 3.4 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、統計的機械学習の手法などを駆使し、古典/量子スピン系やボーズハバード系などに代表される強相関多体系から現実の物質にいたるまで、さまざまな量子多体系に特有の状態、相転移現象、ダイナミクスの探索・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: <https://exa.phys.s.u-tokyo.ac.jp>

### 3.4.1 強相関係のシミュレーション手法

#### マルコフ連鎖モンテカルロ法における局所遷移行列の設計

マルコフ連鎖モンテカルロ法は高次元系における物理量を計算する手法として古くから用いられているが、次の状態への遷移確率の選び方によって物理量の推定誤差が大きく変わる。最近では棄却率最小化や詳細釣りあい破れといった方法が提案されている。我々は、物理量の自己相関を陽に減らす新しい局所更新法を提案した。この方法には、物理量の推定誤差が小さくなる理由を定性的に説明できるという利点がある。また、従来の方法に比べて物理量の推定誤差が実際に小さくなることを実際のモンテカルロシミュレーションにより確認した [18]。

#### 量子モンテカルロ法による Rényi エンタングルメントエントロピーの測定

エンタングルメントエントロピーは、量子多体系における量子相関を表す指標のひとつであり、特に基底状態におけるエンタングルメントエントロピーを秩序変数とみなすことで量子相転移を特徴付けることが出来る。一方、量子多体系を解析する上で強力な計算手法として虚時間経路積分に基づく有限温度量子モンテカルロ法が従来より用いられてきたが、相関長が有限の場合においては絶対零度 (基底状態) を直接サンプリングすることも可能である。この基底状態をサンプリングする量子モンテカルロ法とレプリカ法を組み合わせることで基底状態の Rényi エントロピーを直接計算する手法を開発した [35]。

#### 連続空間における経路積分モンテカルロ法

He4 の 2 次元系は低温で並進対称性とゲージ対称性が同時に破れ、超固体と呼ばれる量子相へ転移することが予想されている。有限温度での He4 の平衡分布を調べ超固体の予想を裏付けるため、連続空間における経路積分モンテカルロ法の改良を進めている。Event-chain モンテカルロの手法と、worm algorithm の手法を援用し、詳細釣り合い条件を破るアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムを Bose 粒子系に適用し、従来の方法より分布の収束が速く、 Trotter 数に対する時間計算量が改善した結果を得た [14]。

#### 量子ダイマー模型における非局所更新モンテカルロ法

量子ダイマー模型は 1988 年に Rokhsar と Kivelson によりフラストレートした磁性体の低エネルギー有効模型として提案された。それ以来精力的に様々な研究が行われている。量子ダイマー模型のハミルトニアンには負符号問題はないが、ダイマーの配置に強い幾何学的な制限があるため、モンテカルロシミュ

レーションは非常に困難であった。近年、2 次元量子ダイマー模型に対して、Stochastic Series Expansion 法に基づく新しい量子モンテカルロ法が提案された。我々はその手法を他の格子やさらに複雑な制限を持つ量子ダイマー模型に拡張した。さらに、異なるトポロジカルセクターの間を遷移することのできる手法を開発した。これらの手法により絶対零度に加え有限温度の相図を議論することが可能となった。

#### 非一様な系に対するテンソルネットワーク繰り込み

テンソルネットワークは、厳密対角化といった従来の指数的にコストがかかる計算手法に比べ、ベキ的な計算量のコストですむ計算手法として近年注目されている。代表的な手法に TRG や、HOTRG といったものがあるが、それ以外に Projector による手法も注目されている。これまでテンソルネットワークは一様な系に対して用いられてきたが、我々は、HOTRG と Projector による計算手法を非一様系に拡張し、ボンド希釈を含むイジングモデルに適用し、非一様系において Projector による手法が収束が速いことを確認した [40]。

### 3.4.2 統計的機械学習による物質科学

#### 機械学習を用いた強相関電子系の分子動力学

近年、機械学習を用いた第一原理的計算の高速化・大規模化が大きな注目を浴びている。多くの現実的な物理系の計算では、電子相関が重要となり計算コストが高くなるため、構造最適化が困難な問題となっている。そこで我々は強相関電子系にグッツウィラー近似を用いたイオンポテンシャルを機械学習し、分子動力学による構造最適化を可能とした。その結果、直接計算が困難な 2700 原子系に対して、100 万倍程度の高速化を実現した。この新しいアプローチを用いて、連続空間上のハバード模型における金属・モット絶縁体クロスオーバーを明らかにした。機械学習による高速化は様々な手法と組み合わせることが可能で、本研究は大規模強相関電子系計算の先駆的研究と言える [12]。

#### 実験データと第一原理計算のデータ同化による結晶構造予測

結晶構造推定は非常に難しい問題として古くから知られており、様々な推定方法が開発されてきた。特に最近では、エネルギーの最適化と実験データの再現を同時に行うことによって結晶構造推定を行う「データ同化」と呼ばれる方法が盛んに研究されている。我々はこのような 2 つの評価関数の同時最適点を探る最適化法の開発/性能調査を行なっている。例えば SiO<sub>2</sub> 系ではエネルギーの局所最適点が多く存在するため結晶構造を決定するのが難しいが、重ね

合わせ最適化法という我々の開発した方法を用いることで結晶構造の推定精度が大幅に上昇することを確認した [2, 13, 26, 27, 37, 52, 56, 57]。

#### 機械学習を用いた高ヤング率材料探索

機械学習、特にベイズ推定などを用いた統計的手法による新材料探索 (マテリアルズインフォマティクス) が注目を浴びている。機械学習を用いることで、既存物質データを元により性能の高い新物質を予測し、探索することが可能となると期待されている。我々は、特にベイズ最適化を用いた手法を応用し、高ヤング率材料の候補となる物質を探索し、第一原理計算によってそのヤング率を調べた。結果、ベイズ推定とベイズ最適化を用いることで、非常に少ない回数で探索範囲内の最も高いヤング率を示す材料を発見することができた [46]。

### 3.4.3 量子コンピュータ基礎理論

#### 励起エネルギー計算のための量子古典ハイブリッドアルゴリズム

近年ノイズがありスケールしない量子コンピュータと古典コンピュータを組み合わせて計算を行う量子古典ハイブリッドアルゴリズムが注目されている。ハミルトニアン基底状態を求める変分量子固有値ソルバー (VQE) はその代表例である。その他にも量子化学計算や組合せ最適化などの分野で幅広い応用が考えられている。我々は、励起状態を効率的に計算する部分空間変分量子固有値ソルバーを提案した。この手法により、VQEの適用範囲を励起状態およびそれに関連する特性まで広げることができる。加えて、量子古典ハイブリッドアルゴリズム内部で使用する新しい最適化アルゴリズムを提案した。これは、量子古典ハイブリッドアルゴリズムに用いる変分量子回路のパラメータに対する出力特性を活かした最適化アルゴリズムであり、検証実験ではVQEにおいて一般的に使われている最適化アルゴリズムを大きく超える性能を示した。これらのアルゴリズムは、量子古典ハイブリッドアルゴリズムの実用化を大きく加速すると期待できる [1, 15, 24, 45]。

### 3.4.4 強相関多体系における新奇な状態・相転移現象

#### キタエフ物質の基底状態

近年、スピン軌道相互作用による異方的な相互作用を持つ物質群が注目を集めている。これらの物質の一部では有効スピン  $J = 1/2$  が2次元ハニカム格子を形成し、キタエフ相互作用と呼ばれる異方的なスピン相互作用が存在する場合がある。キタエフ相

相互作用のみが存在する  $S = 1/2$  量子スピン模型 (キタエフ模型) の基底状態は厳密に非磁性のスピン液体状態になっている。我々は、テンソルのつながりで波動関数を効率的に表現するテンソルネットワーク表現により、キタエフ模型の基底状態を非常に精度良く表せることを示し、キタエフスピン液体が String Gas と呼ばれる構造を持っていることを明らかにした。また、テンソルネットワーク表現を変分波動関数として用いることにより、キタエフ模型近傍の基底状態を計算し、 $\text{Na}_2\text{IrO}_3$  の近傍で多様な磁気秩序状態が安定化することや、わずかな非対角相互作用の影響でスピン液体が不安定になることを可能性を明らかにした [19, 25, 31, 36, 49, 54]。

#### フラストレート磁性体の磁場中秩序

相互作用にフラストレーションが存在するフラストレート磁性体は、基底状態のみならず磁場中でも興味深い秩序を示す。我々は、フラストレートした相互作用を持つ  $S = 1/2$  正方格子ハイゼンベルグ磁性体と考えられる電荷移動塩において、飽和磁化の  $1/2$  の磁化近傍で、大きな量子ゆらぎが生じる事を明らかにした。さらに、テンソルネットワーク変分法により、この大きな量子ゆらぎは、この物質近傍の理想化された模型で生じる、磁化プラトーが起源となっていることを示した。また、カゴメ格子  $S = 1/2$  反強磁性体、Cd-kapellasiteds では、磁場中で複数の磁化プラトーが生じ、それらはマグノンが様々な結晶格子を形成したものと理解できることを明らかにした [4, 11, 39, 55]。

#### ランダムネスに相関を持つ RFIM の有効次元

ランダム磁場イジング模型 (RFIM) では、ランダム性のない純粋系と比較して有効次元の低い系に相当する臨界現象が現れることが知られている。さらに、ランダム場が独立ではなくべき的 (減衰指数  $\rho$ ) な相関を持つ場合においては  $D = d - \rho$  で表される  $D$  次元非相関ランダム系に相当する振る舞いとなる事がくりこみ理論により予想されている。我々は、3次元及び4次元の空間的相関をもつ RFIM の臨界的振る舞いを、モンテカルロシミュレーションを用いて数値的に評価した。その結果、上部臨界次元と下部臨界次元の中間領域において、有効次元が指数  $\rho$  に比例して変化する様子が示唆された。さらに、ランダム場の相関が強くなるほど系の有効次元が下部臨界次元に近づき、物理量の有限サイズ効果が顕在化だけでなく、同時に比熱に新たなピーク構造が現れるなど、これまで予想されていなかった特異な振る舞いが明らかとなった [34]。

### 3.4.5 動的協調現象・非平衡ダイナミクス

#### 共振系での動的な協力現象

レーザー照射下で現れる光双安定性は、レーザー強度に対して共振器中のフォトン数が双安定な状態を示し、またその間を不連続に跳ぶといった一次相転移現象に似た振る舞いの現れる相転移現象である。このような非平衡系で現れる動的な協力現象を、大規模な数値計算によって量子力学的な微視的モデルから解析を行った。具体的には多数のフォトンと多数の準位原子からなる量子マスター方程式を近似なく解く並列計算を実行した。量子マスター方程式の時間発展演算子の固有値・固有状態から、定常状態でのフォトン数分布関数のサイズ依存性、および緩和時間のサイズ依存性を調べ、平衡系での一次相転移に対応する結果を得た。従来の研究と比べフォトン数密度の小さな領域では、準安定状態のレーザー周波数依存性が定性的に異なることを明らかにした。また、レーザー強度を時間周期的に変調させることで、その周期に対し動的な相転移現象が現れることを明らかにした [6, 33, 42, 47, 51, 53]。

#### 古典調和振動子モデルの非エルゴード性

記憶を含んだランジュバン方程式である一般化ランジュバン方程式は、通常のランジュバン方程式と異なり、その記憶効果によって特異な拡散現象を示すことが知られている。近年、異常拡散の解析で活発に利用され、またこの異常拡散の示す非エルゴード性が注目を集めている。しかしながら、従来の研究ではエルゴード性の定義について混乱があり、また具体的な物理的モデルを用いた解析は少なく、その物理的意味は明らかではなかった。我々は、非エルゴード性を示す古典調和振動子系を提案し、系における注目粒子の振る舞いを、分子動力学計算、厳密対角化、解析計算を用いて調べた。また同時に、エルゴード性の定義について再考した。その結果、本モデルにおける非エルゴード性の起源は注目粒子の周りに励起される孤立局在モードであることが明らかとなった [8]。

### 3.4.6 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

#### 物質科学シミュレーションのポータル MateriApps

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 USB 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。

#### 並列厳密対角化パッケージ

強相関量子多体系の研究において、数値対角化法は最も基本的かつ最も汎用性の高い手法として幅広く使われている。しかしながらその一方で、必要となるメモリ量や計算時間が系のサイズに対して指数関数的に爆発するため、その利用範囲は限られてきた。我々は、並列計算機の進歩や、新しい量子統計力学の計算手法を取り入れた現代的な量子格子モデルソルバー「HΦ」を開発・公開してきた。この並列厳密対角化パッケージでは、ハイゼンベルグモデルやハバードモデル、近藤格子モデルなど、幅広い格子モデルを解析することが可能となっている。また、従来のランチョス法による基底状態の計算だけでなく、熱的純粋量子状態を用いた比熱や構造因子の温度依存性やシフト型クリロフ部分空間法を用いた高速かつ安定した励起スペクトル計算も可能となっている。シフト型クリロフ部分空間法のルーチンについては、「Kω」という独立した数値ライブラリとしても整備・公開した。

#### <受賞>

- [1] 中西 健、理学系研究科奨励賞、東京大学、2019年3月

#### <報文>

#### (原著論文)

- [2] Naoto Tsujimoto, Daiki Adachi, Ryosuke Akashi, Synge Todo, Shinji Tsuneyuki, Crystal structure prediction supported by incomplete experimental data, *Phys. Rev. Materials* **2**, 053801 (7pp) (2018).
- [3] Lin Hao, D. Meyers, Hidemaro Suwa, Junyi Yang, Clayton Frederick, Tamene R. Dasa, Gilberto Fabris, Lukas Horak, Dominik Kriegner, Yongseong Choi, Jong-Woo Kim, Daniel Haskel, Philip J. Ryan, Haixuan Xu, Cristian D. Batista, M. P. M. Dean, Jian Liu, Giant magnetic response of a two-dimensional antiferromagnet, *Nat. Phys.* **14**, 806–810 (2018).
- [4] H. Yamaguchi, Y. Sasaki, T. Okubo, M. Yoshida, T. Kida, M. Hagiwara, Y. Kono, S. Kittaka, T. Sakakibara, M. Takigawa, Y. Iwasaki, Y. Hosokoshi, Field-enhanced quantum fluctuation in an  $S = 1/2$  frustrated square lattice, *Phys. Rev. B* **98**, 094402 (6pp) (2018).
- [5] Tatsuhiko Shirai, Takashi Mori, Seiji Miyashita, Floquet-Gibbs state in open quantum systems, *Eur. Phys. J. Special Topics* **227**, 323–333 (2018).
- [6] Tatsuhiko Shirai, Synge Todo, Hans de Raedt, Seiji Miyashita, Optical bistability in a low-photon-density regime, *Phys. Rev. A* **98**, 043802 (13pp) (2018).

- [7] Yuichi Motoyama, Synge Todo,  $Z_N$  Berry phase and symmetry protected topological phases of  $SU(N)$  antiferromagnetic Heisenberg chain, *Phys. Rev. B* **98**, 195127 (6pp) (2018).
- [8] Fumihiko Ishikawa, Synge Todo, Localized mode and nonergodicity of a harmonic oscillator chain, *Phys. Rev. E* **98**, 062140 (8pp) (2018).
- [9] Synge Todo, Haruhiko Matsuo, Hideyuki Shitara, Parallel loop cluster quantum Monte Carlo simulation of quantum magnets based on global union-find graph algorithm, *Comp. Phys. Comm.* **239**, 84–93 (2019).
- [10] Hiroshi Watanabe, Satoshi Morita, Synge Todo, Naoki Kawashima, Fast algorithm for generating random bit strings and multispin coding for directed percolation, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 024004 (8pp) (2019).
- [11] R. Okuma, D. Nakamura, T. Okubo, A. Miyake, A. Matsuo, K. Kindo, M. Tokunaga, N. Kawashima, S. Takeyama, Z. Hiroi, A series of magnon crystals appearing under ultrahigh magnetic fields in a kagomé antiferromagnet, *Nat. Comm.* **10**, 1229 (7pp) (2019).
- [12] Hidemaro Suwa, Justin S. Smith, Nicholas Lubbers, Cristian D. Batista, Gia-Wei Chern, Kipton Barros, Machine learning for molecular dynamics with strongly correlated electrons, *Phys. Rev. B* **99**, 161107 (5pp) (2019).
- [13] Daiki Adachi, Naoto Tsujimoto, Ryosuke Akashi, Synge Todo, Shinji Tsuneyuki, Search for Common Minima in Joint Optimization of Multiple Cost Functions, to appear in *Comp. Phys. Comm.* (2019).
- (学位論文)
- [14] Motoi Suzuki, Event-chain path-integral Monte Carlo and its application to novel quantum phase of Bosons (修士論文)
- [15] Ken M. Nakanishi, Quantum-classical hybrid algorithm for estimating excited energies of quantum many-body systems (修士論文)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [16] T. Shirai, J. Thingna, T. Mori, S. Denisov, P. Hänggi, S. Miyashita, “Floquet Gibbs states for dissipative quantum systems,” *Floquet Theory : Fundamentals and Applications*, April 2018, Kyoto.
- [17] T. Shirai, T. Mori, S. Miyashita, “Floquet-Gibbs state for dissipative quantum systems,” *ICAP2018*, July 2018, Barcelona.
- [18] Daiki Adachi, Synge Todo, “Acceleration of Markov chain Monte Carlo method with multiple Markov chains,” *RECS: 3rd International Symposium on Research and Education of Computational Science*, September 2018, Tokyo.
- [19] T. Okubo, Y. Yamaji and Naoki Kawashima, “Tensor network study of Kitaev materials,” *RECS: 3rd International Symposium on Research and Education of Computational Science*, September 2018, Tokyo.
- [20] T. Shirai, T. Mori, “Thermalization of driven dissipative systems based on eigenstate thermalization hypothesis,” *RECS: 3rd International Symposium on Research and Education of Computational Science*, September 2018, Tokyo.
- [21] T. Shirai, T. Mori, “Emergence of the Gibbs state in weakly dissipative quantum systems based on the eigenstate thermalization hypothesis,” *International Symposium on Frontiers of Quantum Transport in Nano Science*, November 2018, Kashiwa.
- [22] Ken M. Nakanishi, Shin-ichi Maeda, Takeru Miyato, Daisuke Okanohara, “Neural Multi-scale Image Compression,” *ACCV2018*, December 2018, Perth.
- [23] Hidemaro Suwa, “Dynamical response of weak Mott insulator,” *The 2nd Asia Pacific Workshop on Quantum Magnetism*, December 2018, Bengaluru.
- [24] Ken M Nakanishi, Kosuke Mitarai, Keisuke Fujii, “Subspace-search variational quantum eigensolver for excited states,” *APS March meeting 2019*, March 2019, Boston.
- 招待講演
- [25] Tsuyoshi Okubo, “Tensor network study on Kitaev materials,” *International Conference on Magnetism*, July 2018, San Francisco.
- [26] Synge Todo, “Crystal structure prediction by assimilating experimental data and simulation,” *PCoMS Seminar*, August 2018, Akiu.
- [27] Synge Todo, “Data assimilation in materials science – crystal structure prediction supported by incomplete experimental data,” *RECS: 3rd International Symposium on Research and Education of Computational Science*, September 2018, Tokyo.
- [28] Synge Todo, “Algorithms and Libraries in Computational Condensed Matter Physics,” *The 2nd Innovation Camp for Computational Materials Science*, October 2018, Yonago.
- [29] Tsuyoshi Okubo, “Information compression by tensor networks and its application to condensed matter physics,” *The 2nd Innovation Camp for Computational Materials Science*, October 2018, Yonago.

- [30] Tsuyoshi Okubo, "Tensor network quantum states and their application to quantum spin systems," Interdisciplinary Workshop on Tensor Network, October 2018, Wako.
- [31] Tsuyoshi Okubo, "Tensor network study on Kitaev materials: Search for Kitaev spin liquid," The 2nd Asia Pacific Workshop on Quantum Magnetism, December 2018, Bengaluru.
- (国内会議)
- 一般講演
- [32] 大久保毅, 川島直輝, 「並列テンソルネットワーク法の開発と2次元量子スピン模型への適用」, 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」, 2018年4月, 東大物性研.
- [33] 白井達彦, 藤堂眞治, 宮下精二, 「共振器系で起こる光双安定性の微視的模型による記述」, 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」, 2018年4月, 東大物性研.
- [34] 堀田俊樹, 藤堂眞治, 「空間相関をもつランダム場イジング模型の臨界現象と有効次元の解析」, 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」, 2018年4月, 東大物性研.
- [35] 近藤千尋, 「SSE QMC による量子スピン系の計算」, 第63回物性若手夏の学校, 2018年7月, 西浦.
- [36] 大久保毅, 金子隆威, 山地洋平, 川島直輝, 「テンソルネットワーク法によるキタエフ物質の基底状態研究」, 量子情報・物性の新潮流, 東大物性研, 2018年8月, 東大物性研.
- [37] 藤堂眞治, 「実験データとシミュレーションの同化による構造推定」, 第1回データ活用研究コミュニティワークショップ, 2018年9月, 東大.
- [38] 白井達彦, 森貴司, 「固有状態熱化仮説の非平衡定常状態への応用」, 日本物理学会2018年秋季大会, 2018年9月, 同志社大.
- [39] 大久保毅, 山口博則, 「フラストレート正方格子量子スピン模型の磁化過程における大きなスピン揺らぎ」, 日本物理学会2018年秋季大会, 2018年9月, 同志社大.
- [40] 山本卓矢, 藤堂眞治, 「非一様系な古典イジング模型に対する射影演算子を用いたテンソルネットワーク繰り込み」, 日本物理学会2018年秋季大会, 2018年9月, 同志社大.
- [41] Daiki Adachi, Tsuyoshi Okubo, Synge Todo, 「Anisotropic Tensor Network Renormalization」, 萌芽的課題「基礎科学の挑戦」サブ課題Dワークショップ, 2018年10月, 柏.
- [42] 白井達彦, 藤堂眞治, 宮下精二, 「微視的な共振器模型での光双安定領域で起こるヒステリシス曲線の特徴付け」, 萌芽的課題「基礎科学の挑戦」サブ課題Dワークショップ, 2018年10月, 柏.
- [43] Ken M. Nakanishi, Shin-ichi Maeda, Takeru Miyato, Masanori Koyama, 「Adaptive Sample-space and Adaptive Probability coding: a neural-network based approach for compression」, 第21回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS 2018), 2018年11月, 札幌.
- [44] 藤堂眞治, 「ぜんぶ方程式のせいだ〜That's all because of equation」, 理化学研究所計算科学研究センター一般公開, 2018年11月, 神戸.
- [45] Ken M Nakanishi, Kosuke Mitarai, Keisuke Fujii, 「Subspace-search variational quantum eigensolver for excited states」, 第39回量子情報技術研究会 (QIT39), 2018年11月, 東京.
- [46] 石川文啓, 「Machine Learning Approach To Explore New High Rigid Materials With First Principle Calculation」, TIA かけはしポスター交流会2018「-計算と計測のデータ同化による革新的物質材料解析手法の調査-」, 2018年12月, 柏.
- [47] 白井達彦, 藤堂眞治, 宮下精二, 「Microscopic description of Optical Bistability」, TIA かけはしポスター交流会2018「-計算と計測のデータ同化による革新的物質材料解析手法の調査-」, 2018年12月, 柏.
- [48] 藤堂眞治, 「Materials Science Simulation by using MateriApps LIVE!」, TIA かけはしポスター交流会2018「-計算と計測のデータ同化による革新的物質材料解析手法の調査-」, 2018年12月, 柏.
- [49] 大久保毅, 「テンソルネットワーク法の開発とキタエフスピン液体への適用」, ポスト「京」重点課題(7)第4回シンポジウム, 2018年12月, 東大物性研.
- [50] 白井達彦, 森貴司, 「非平衡環境と接したマクロ量子系への固有状態熱化仮説の応用」, 非平衡系の物理学一階層性と普遍性一, 2018年12月, 京大.
- [51] 白井達彦, 藤堂眞治, 宮下精二, 「光双安定現象の微視的な共振器模型による記述」, 第2回ポスト「京」萌芽的課題「基礎科学の挑戦」・「極限マテリアル」合同公開ワークショップ, 2019年1月, 東京.
- [52] 藤堂眞治, 「第一原理計算と実験のデータ同化による結晶構造予測」, 第4回 TIA 光・量子計測シンポジウム, 2019年3月, つくば.
- [53] 白井達彦, 藤堂眞治, 宮下精二, 「時間的に変調された外場の下での光双安定性のダイナミクス-フロケを用いた解析-」, 日本物理学会第74回年次大会, 2019年3月, 九大.
- 招待講演
- [54] 大久保毅, 川島直輝, 「並列モンテカルロ法によるフラストレート磁性体におけるトポロジカル転移の探求」, 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」, 2018年4月, 東大物性研.
- [55] 大久保毅, 「フラストレートした正方格子ハイゼンベルグ模型における大きなスピン揺らぎと1/2磁化プラトー」, スピン系物理の最前線, 2018年11月, 京大基研.
- [56] 藤堂眞治, 「データ同化による結晶構造予測」, 物性研究所短期研究会「軟X線放射光科学のアップデート」, 2018年12月, 東大物性研.

- [57] 藤堂真治, 「第一原理計算と実験のデータ同化による結晶構造予測」, 第7回材料系ワークショップ~第一原理計算と実験のデータ同化による材料開発手法~, 2019年2月, 秋葉原.
- [58] 藤堂真治, 「進歩したか、物質科学の見える化」, 見える化シンポジウム 2019 パーチャルでリアルを超える ~難解サイエンスを映像で感覚的につたえる~, 2019年3月, 秋葉原.

### 3.5 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。同時に、量子多体系や可解模型に関する数理物理学的研究も行っている。

#### 3.5.1 強相関系

##### Kitaev スピン液体における光学応答

Kitaev 模型は、ハニカム格子上に定義されるスピン  $1/2$  の量子スピン系で、スピン間には方向に依存したイジング的な相互作用が働く。この模型は、局所的保存量の存在に着目することで、自由フェルミオン系に帰着させることができ、そのため任意の固有状態を求めることができるという特筆すべき性質を持つ。また、その励起は粒子と反粒子が同一となるマヨラナフェルミオンによって記述されるため、注目を集めている。Kitaev 模型の相互作用項は、通常のスピン系としては不自然なものだが、Jackeli と Khaliullin は、Ir 酸化物などのスピン・軌道相互作用の強い系では、そのような項が、スピンと軌道モーメントの合成からなる擬スピン間の相互作用として自然に現れることを示した。このことを契機に、Kitaev 模型に近い現実の物質の探索が進展している。

桂は、東大理物の Bolens・宮下・小形と、そのような Kitaev 物質の中でも最も精力的に研究が行われている、 $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  における最近の実験結果に着目した。Little らは、この物質のテラヘルツ領域での光学伝導度に、スピン自由度に起因すると考えられる寄与があることを指摘している [A. Little *et al.*, Phys. Rev. Lett. **119**, 227201 (2017)]。これを理解するため、まず多軌道 Hubbard 模型から出発し、局所的電気分極をスピン自由度で表す表式を導出した。この表式は、Kitaev 模型だけに限らず、その他の補正項が存在する場合にも適用できるものである。次に求めた表式を用いて、Kitaev 模型の面内の光学伝導度を調べた。この場合には、自由フェルミオン系へのマッピングを用いることで、光学伝導度を（数値的に）厳密に計算することができる。これにより、観測

されている低エネルギー領域における光学伝導度のスペクトルを定性的に説明できることを示した。これらの結果は、原著論文にまとめられ [1]、国際会議などで発表された [27]。

##### 相互作用するマヨラナフェルミオン系の基底状態

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。桂は以前、この Kitaev 模型に最近接相互作用を導入した模型について調べ、フラストレーション・フリーと呼ばれる条件を満たす場合には基底状態が厳密に求まることを示した [H. Katsura, D. Schuricht, and M. Takahashi, Phys. Rev. B **92**, 115137 (2015)]。今年度、桂は、Utrecht 大 (オランダ) の Wouters, Schuricht とともに、この模型を非一様なオンサイト・ポテンシャルを含む場合に拡張した。また、この模型についても、(i) 基底状態 (周期系) のトポロジカル数が非自明であること、(ii) 縮退した二つの基底状態の厳密な表式、(iii) エネルギーギャップの存在、(iv) 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、などを明らかにした。また、この模型と非一様磁場中の XYZ および XXZ スピン鎖との関係についても詳しく議論した。これらの結果は、原著論文 [4] にまとめられ、国内学会などで発表された [48, 58]。

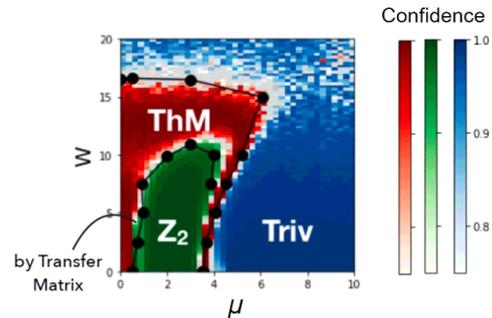


図 3.5.1: 機械学習により得られた、乱れの強さ  $W$  と化学ポテンシャル  $\mu$  に対する相図。 $Z_2$ , Triv, ThM は、それぞれトポロジカル超伝導相、自明相、thermal metal 相の各相を表し、色の濃さは確信度を表す。実線は、転送行列法によって得られた独立な結果を示す。

### 3.5.2 トポロジカル系

#### 乱れたトポロジカル超伝導体における対称性の統計的回復による学習と分類

非従来型超伝導体の中でも、特に波動関数のもつトポロジカルな性質により特徴付けられるトポロジカル超伝導体は、基礎から応用まで様々な観点から注目を集めている。代表的な候補物質である  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  や  $\text{FeTe}_x\text{Se}_{1-x}$  では、試料表面や接合界面での、2次元的なトポロジカル超伝導相の実現が報告されている。これらは、時間反転対称性を保ち、かつスピン回転対称性をもたないクラス DIII に属するとされる。このような実験的進展を鑑みると、クラス DIII の2次元系を理論的に調べることに大きな意義がある。一方で、乱れの存在下では、従来のトポロジカル不変量の公式が適用できないことが知られている。

吉岡・赤城・桂は、画像認識などで特に有効性の認められている、ニューラルネットワークの手法と、並進対称な場合のトポロジカル不変量の結果を組み合わせることで、乱れの存在下での相判定を行った。ランダムポテンシャルを導入すると、並進対称性は一般に失われ、例えば準粒子分布などの局所的な量に、空間的非一様性が現れるが、いくつもの分布に関して平均をとると、失われた対称性が「統計的に」回復する。従って、乱れない極限で構築した、準粒子分布に関する分類器を適用することが可能となる。この手法で作成された相図(図 3.5.1)は、転送行列法・非可換幾何による手法と整合することが示された。さらに、本研究で提案された手法は、従来の手法では扱えないような、より一般的な格子状でも適用が可能である。これらの結果は、国際学会等 [17, 54] で発表されたほか、原著論文 [2] にまとめられた。

#### ノードを伴う 3 次元カイラル超伝導体における内因性熱ホール効果

時間反転対称性の自発的な破れに起因して、クーパー対が有限の角運動量を持つものを、「カイラル超伝導体」と呼ぶ。超伝導性と有限磁化の共存というエキゾチックな性質を示すカイラル超伝導性に関して、検証方法が複数考案されている。中でも決定的証拠としての役割を期待されているのが、自発的な熱ホール効果、すなわち磁場印加のない状況で熱勾配に対し垂直方向に温度差を生ずる現象の観測である。

現在知られている 3 次元カイラル超伝導体の候補物質の内因性熱ホール効果を議論する上で重要なのが、ノードの影響である。ノードとは、準粒子スペクトルにおいてギャップの閉じる点もしくは領域を指す。例えば点ノードが存在する場合には、2次元のトポロジカル不変量であるチャーン数が第三方向に関して空間依存性を持つ。そのため、内因性熱ホール係数は量子化されない一方で、ブリルアンゾーンにおけるノード間距離に比例する。吉岡と岡山理科大の今井、チューリッヒ工科大の Sigrist は、このこと

を数値的に確認した。さらに、温度に関する高次項を考慮すると、準粒子スペクトルのノード周辺における分散を反映した補正が加わることを示した。さらに両者を組み合わせることにより、ペアリングに強力な制限を課すことが可能であることを明らかにした。これらの結果は、原著論文 [6] にまとめられた。

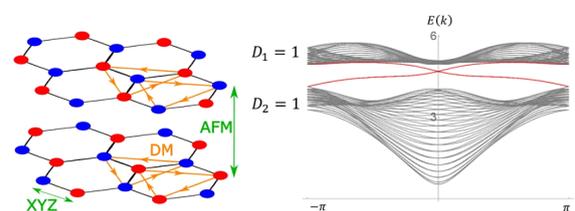


図 3.5.2: (左図) マグノンスピンホール系の模式図。二層のハニカム格子状の反強磁性体からなる。(右図) バルクおよびヘリカルエッジ状態のエネルギー分散。  $D_1, D_2$  は、対応する  $\mathbf{Z}_2$  トポロジカル不変量。

#### マグノンスピンホール系における $\mathbf{Z}_2$ トポロジカル不変量

電子系において様々な成果をもたらしたトポロジカル絶縁体の研究は、ボゾン系にも波及している。その一例として、磁性体におけるボゾンの素励起であるマグノンによる熱 Hall 効果が理論・実験両面から盛んに研究されている。また、マグノン系におけるスピンホール効果の対応物が理論的に提案されているものの、ボゾン系における時間反転対称性が Kramers 対の存在を保証しないことから、この系の相をトポロジカル不変量によって特徴づけるという研究は現在までなされてこなかった。

近藤・赤城・桂は、このようなボゾン系においても Kramers 対の存在を議論できるような擬時間反転演算子を導入し、その対称性に基づいてマグノンスピンホール系の  $\mathbf{Z}_2$  トポロジカル不変量を定義した。また、2つのマグノンスピンホール系のモデルを構築し、トポロジカル数と系のヘリカルエッジ状態の有無との対応関係を議論した(図 3.5.2)。このうちの1つは、マグノンスピンホール系の文脈では議論されてこなかった、スピン非保存項をとらなうモデルである。これらの結果は、国内外の学会 [15, 18, 20, 22, 30, 31, 34, 38, 43, 46, 56] で発表されたほか、原著論文 [7] にまとめられた。また、近藤は、これらの結果を修士論文としてまとめた [12]。

#### 非エルミート Kitaev 模型とその端状態

トポロジカル絶縁体・超伝導体の分類は、近年では非エルミートな系への拡張され、それらの系を特徴づけるトポロジカル数や端状態などが議論されている。桂は、東大理物の川畑・蘆田・上田とともに、ト

ポロジカル超伝導体の典型例である Kitaev 模型に、非エルミート性を導入した系について調べた。この系では、両端に複素のポテンシャルが課されており、これによりエルミート性は破れているが、系全体は PT (パリティ・時間反転) 変換のもとで不変である。この複素ポテンシャルの大きさ  $\gamma$  がゼロの場合には、系を記述するハミルトニアンはエルミートで、マヨラナ・ゼロモードの存在するトポロジカル相と存在しない自明相の 2 つに分かれる。 $\gamma$  が小さい場合には、ハミルトニアンは非エルミートであるが固有値は全て実であり、PT 対称性は破れていない。この場合には、相似変換により、ハミルトニアンをエルミートなものにマップできるが、我々はそのような相似変換をあらわに求めた。一方、 $\gamma$  が大きい値を超えると複素固有値が現れ、PT 対称性は破れる。この場合には、固有値をシフトするモードが端に局在しており、これにより複素固有値が現れることを明らかにした。これらにより、この系では、マヨラナ・ゼロモードの有無、複素シフトモードの有無に応じた 4 つの異なる相が現れることが分かった。これらの結果は、原著論文 [3] にまとめられた。

### 3.5.3 可解模型・統計力学

#### スピン 2 Bose-Hubbard 模型についての厳密な結果

光学格子上に閉じ込められたスピン自由度をもつアルカリ原子系は、相互作用の効果により多彩な相を実現することが期待されている。このような系を記述する有効模型として、スピン自由度をもつ Bose-Hubbard 模型がよく知られている。しかし、強相関電子系の標準的な模型である (Fermi-)Hubbard 模型に比べて、この模型について厳密に示されている結果は少なく、先行研究でのスピン 1 の Bose-Hubbard 模型に対する結果などに限られている [H. Katsura and H. Tasaki, Phys. Rev. Lett. **110**, 130405 (2013)]。

Yang と桂は、スピン 2 の Bose-Hubbard 模型の基底状態に関する厳密な結果を新たに導出した。この模型には、スピンに依存する相互作用が 2 種類存在する。これらの相互作用の係数に応じて、基底状態は (i) 強磁性状態、(ii) スピン一重項 or 五重項状態、(iii) SU(5) 強磁性状態、となることを、Perron-Frobenius の定理などを用いて示した。また、特に (ii) に対応する場合には、ハミルトニアンに SO(5) 対称性があることを明らかにした。結果は、空間次元や格子構造、粒子数によらず普遍的に成り立つものである。これらの結果は、国際学会等 [24, 40] で発表されたほか、原著論文 [8] にまとめられた。

#### 一般化イジング模型のボルツマン機械への変換

近年の機械学習の目覚ましい成功に触発され、ニューラルネットワークによる物理状態の表現に関する研究が数多く行われている。特に、量子多体系の基底状態・励起状態・時間発展などへのボルツマン機械の応用が急速に進む一方で、古典系における応用

可能性については、ほとんど調べられていない。新しく登場した変分関数の表現能力を包括的に理解するためには、古典系への適用を議論することが不可欠である。吉岡・赤城・桂は、バイナリ変数に関するボルツマン因子の代数変形によって、任意の一般化イジング模型と等価なボルツマン機械を構築可能であることを示した。言い換えれば、補助的なイジング自由度を適切に導入すると、二体相互作用のみを用いて元の多体相互作用を表現できることを、具体的な構成法とともに示した。

さらに吉岡らは、上記の変換をモンテカルロ・シミュレーションに応用し、その計算効率を議論した。一般に、多体相互作用を含む系に対してクラスター更新法を適用することはできないが、二体相互作用のみを用いて記述される場合には、従来の手法が適用できる。特に、二体相互作用および三体相互作用を含むカゴメ格子上的の模型について、この手法を用いることで、強磁性-常磁性相転移近傍における臨界減衰を大幅に緩和できることを数値的に示した。以上の成果は、原著論文として [10] にまとめられたほか、国内外の学会などで発表された [16, 19, 39, 57]。

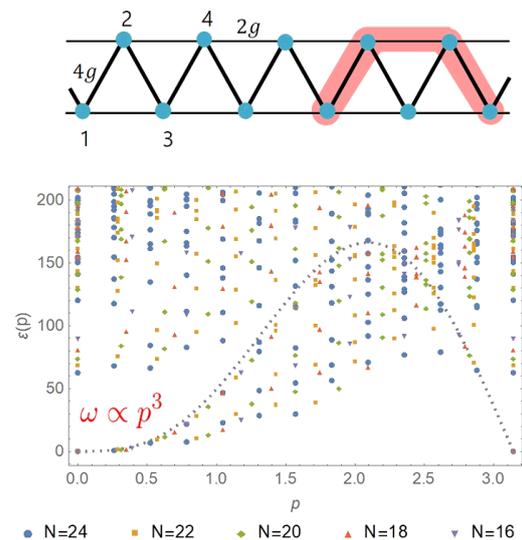


図 3.5.3: Majorana-Nicolai 模型の模式図 (上図) と、厳密対角化により求めた  $g = 8.0$  の場合の低エネルギー励起の分散関係 (下図)。波数  $p = 0$  の近傍では、 $p^3$  に比例する分散関係が見られる。

#### $\mathcal{N} = 1$ 超対称性の破れと南部・ゴールドストーンフェルミオン

連続的かつ大域的な内部対称性の自発的な破れにともない、南部・ゴールドストーンボゾンと呼ばれるギャップレスな励起モードが現れることが知られている。近年、非相対論的な系での自発的対称性の破れと南部・ゴールドストーンボズンの関係が大きな

注目を集めている。また、相対論的な系ではフェルミオンの対称性である超対称性の破れに伴って、南部・ゴールドストーンフェルミオンと呼ばれる励起モードが現れることが知られている。しかし、非相対論的な系での超対称性の破れおよび、それに伴う励起モードに関して包括的な理解に至っていない。

三ノ宮と桂は、Majorana-Nicolai 模型という  $\mathcal{N} = 1$  の超対称性を有する  $(1+1)$  次元の格子フェルミオン模型を導入し、その性質を超対称性の破れの観点から調べた。具体的には、数学的および数値的手法を用いて、有限系および無限系でも超対称性が自発的に破れる場合があり、この時には自発的な超対称性の破れに伴ってギャップな励起モードが出現することを示した。また、有限系では超対称性が破れるにも関わらず、無限系では超対称性が回復することがあることを数値計算により示した。さらに、超対称性が破れない場合には相互作用があるにも関わらず、解析的に基底状態を計算できることを示した。これらに加えて、超対称性の破れに伴うギャップな励起が波数の 3 乗に比例する分散関係をもつことを厳密対角化により示した (図 3.5.3)。これらの結果は原著論文 [9] としてまとめられたほか、国内外の学会で発表された [23, 44]。

### Wishart 型 Sachdev-Ye-Kitaev 模型とその性質

Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) 模型は、フェルミオン間にランダムな 4 体相互作用が働く模型で、AdS/CFT 対応のトイモデルとしても近年注目を集めている。この系では、粒子数  $N$  が大きい極限で、out-of-ordered-time correlator (OTOC) と呼ばれる相関の減衰率が理論上の最大値を取る。このことから、この系は最大カオス的とも呼ばれている。桂と伊與田・沙川 (東大物工) は、この SYK 模型の亜種として、乱れない場合を含む Wishart-SYK 模型と呼ばれるクラスの模型を新たに構成した。また、フェルミオン系、ハードコア・ボゾン系それぞれの拡張において、基底状態の縮退度は、粒子数に対して指数関数的に増大することを示した。このことは、残留エントロピーが示量的であることを意味する。さらに、この系の OTOC の振る舞いを、フェルミオン・ボゾンの場合についてそれぞれ数値的に調べた。その結果、フェルミオン系の場合には、OTOC は長時間平均の周りに大きな時間ゆらぎを示すことを明らかにした。このことは、OTOC が時間的に滑らかに変化する元々の SYK 模型とは対照的である。この現象の原因はまだ明らかになっていないが、基底状態の巨視的縮退が効いているのではないかと考えられる。我々はさらに、これらの模型の準位統計を調べ、フェルミオン系の場合にはポアソン分布であることを明らかにした。このことは、系が可積分であることを示唆するが、実際に、フェルミオン系の Wishart SYK 模型は、適切な変換により、Richardson-Gaudin 模型と呼ばれる、既知の量子可積分系にマップできることを示した。これらの結果は、原著論文 [5] にまとめられた。

### 3.5.4 その他

赤城は、非可換幾何の手法を用いて、乱れのあるマグノンホール系における Chern 数に対応するトポロジカル不変量を定義した。フェルミオン系では見られなかった特有の数学的性質 (非エルミート性) に注意し、ボゾン系における“フェルミ”射影演算子を導入することで、自然な拡張に成功した。定義の妥当性を確かめるため、乱れのあるマグノンホール系を記述する 2 次元スピナイス模型に適用したところ、乱れない極限での Chern 数と整合的な結果が得られた。これらの結果は、国内外の学会で発表された [14, 37, 41, 46, 55, 59]。

赤城・吉岡・桂は、教師なし学習の一手法であるオートエンコーダを用いて、様々な量子スピン鎖の量子相を判定した。顕著な結果として、対称性に守られたトポロジカル相である Haldane 相と自明相である large- $D$  相間の相転移の検出に成功した。この相転移は、局所的な秩序変数の変化では特徴付けられないと従来考えられているが、入力データとして 4 サイト程度までの相関関数を用いても検出できた点は興味深い。これらの結果は、国内外の学会で発表された [21, 32, 36, 42, 45, 49]。

桂と柴田は、量子コンパス模型と呼ばれるスピン鎖に散逸が加わった場合のダイナミクスを、Lindblad 方程式を厳密に解析することで調べた。特に量子コンパス模型が臨界的な場合の緩和時間の厳密な表式を得た。また端スピンの自己相関関数を組み合わせ論的手法を用いて調べた。これらの結果は、国内外の学会で発表された [25, 50]。また、柴田の修士論文としてまとめられている [13]。

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や光学系を用いた実現も話題を集めている。田村と桂は、平坦あるいはほとんど平坦なバンドをもつ Hubbard 模型における強磁性に関する厳密な結果を、 $SU(n)$  対称性をもつ Fermi-Hubbard 模型に拡張した。この結果は、国内学会で発表された [47]。

#### <報文>

(原著論文)

- [1] Adrien Bolens, Hosho Katsura, Masao Ogata, and Seiji Miyashita: Mechanism for subgap optical conductivity in honeycomb Kitaev materials, *Phys. Rev. B* **97**, 161108(R) (2018).
- [2] Nobuyuki Yoshioka, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura: Learning disordered topological phases by statistical recovery of symmetry, *Phys. Rev. B* **97**, 205110 (2018) (Editors' Suggestion).
- [3] Kohei Kawabata, Yuto Ashida, Hosho Katsura, and Masahito Ueda: Parity-time-symmetric topological superconductor, *Phys. Rev. B* **98**, 085116 (2018) (Editors' Suggestion).
- [4] Jurriaan Wouters, Hosho Katsura, and Dirk Schuricht: Exact ground states for interacting Kitaev chains, *Phys. Rev. B* **98**, 155119 (2018).

- [5] Eiki Iyoda, Hosho Katsura, and Takahiro Sagawa: Effective dimension, level statistics, and integrability of Sachdev-Ye-Kitaev-like models, *Phys. Rev. D* **98**, 086020 (2018).
- [6] Nobuyuki Yoshioka, Yoshiki Imai, and Manfred Sigrist: Spontaneous Thermal Hall Effect in Three-dimensional Chiral Superconductors with Gap Nodes, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 124602 (2018).
- [7] Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura:  $\mathbf{Z}_2$  topological invariant for magnon spin Hall systems, *Phys. Rev. B* **99**, 041110(R) (2019).
- [8] Hong Yang and Hosho Katsura: Rigorous Results for the Ground States of the Spin-2 Bose-Hubbard Model, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 053401 (2019).
- [9] Noriaki Sannomiya and Hosho Katsura: Supersymmetry breaking and Nambu-Goldstone fermions in interacting Majorana chains, *Phys. Rev. D* **99**, 045002 (2019).
- [10] Nobuyuki Yoshioka, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura: Transforming generalized Ising models into Boltzmann machines, *Phys. Rev. E* **99**, 032113 (2019).
- (国内雑誌)
- [11] 赤城裕: 機械学習によるトポロジカル相転移の検出, 「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」NEWSLETTER No. 4, コラム記事.
- (学位論文)
- [12] 近藤寛記: Topological invariants and surface states in magnon systems (修士論文).
- [13] 柴田直幸: Exact solutions of quantum spin models with dissipation (修士論文).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [14] Yutaka Akagi: Topological Invariant for Magnon Hall Systems with Disorder, *International Workshop on Symmetry and Topology in Condensed-Matter Physics*, Tokyo, Japan, June 2018.
- [15] Hiroki Kondo:  $\mathbf{Z}_2$  Topological Invariant for Magnon Spin Hall Systems, *International Workshop on Symmetry and Topology in Condensed-Matter Physics*, Tokyo, Japan, June 2018.
- [16] Nobuyuki Yoshioka: Cluster updating classical spin systems by equivalent Boltzmann machines, *Machine Learning for Quantum Many-body Physics*, Dresden, Germany Jun. 2018.
- [17] Nobuyuki Yoshioka: Learning Disordered Topological Phases by Statistical Recovery of Symmetry, *Machine Learning for Quantum Many-body Physics*, Dresden, Germany Jun. 2018.
- [18] Hiroki Kondo:  $\mathbf{Z}_2$  topological invariant for magnon spin Hall systems, *BEC2018X*, Tokyo, Japan, Nov. 2018.
- [19] Nobuyuki Yoshioka: Transforming Generalized Ising Model into Boltzmann Machine, *At the Crossroad of Physics and Machine Learning*, California, USA, Feb. 2019.
- [20] Hiroki Kondo:  $\mathbf{Z}_2$  topological invariant for magnon spin Hall systems, *Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2019 (TPFC2019)*, Kashiwa, Japan, Feb. 2019.
- [21] Yutaka Akagi, Nobuyuki Yoshioka, and Hosho Katsura: Detection of Phase Transitions in Quantum Spin Chains via Unsupervised Machine Learning, *APS March Meeting 2019*, Boston, US, Mar. 2019.
- [22] Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura:  $\mathbf{Z}_2$  topological invariant for magnon spin Hall systems, *APS March Meeting 2019*, Boston, US, Mar. 2019.
- [23] Noriaki Sannomiya and Hosho Katsura: Spontaneous SUSY breaking and NG modes in interacting Majorana chains, *APS March Meeting 2019*, Boston, US, Mar. 2019.
- [24] Hong Yang and Hosho Katsura: Rigorous Results for the Ground States of the Spin-2 Bose-Hubbard Model, *APS March Meeting 2019*, Boston, US, Mar. 2019.
- [25] Naoyuki Shibata and Hosho Katsura: Exact solutions of dissipative quantum spin chains using Majorana fermions, *APS March Meeting 2019*, Boston, US, Mar. 2019.
- [26] Eiki Iyoda, Hosho Katsura, and Takahiro Sagawa: Effective dimension, level statistics, and integrability of Sachdev-Ye-Kitaev-like models, *APS March Meeting 2019*, Boston, US, Mar. 2019.
- 招待講演
- [27] Hosho Katsura: Majorana excitations in Kitaev spin liquids, *SAMAHANG PISIKA NG PILIPINAS Physics Society of the Philippines*, Puerto Princesa, Philippines, Jun. 2018.
- [28] Hosho Katsura: Fradkin, Fredkin or Fridkin?, *EXACTLY SOLVABLE QUANTUM CHAINS*, Natal, Brazil, Jun. 2018.
- [29] Hosho Katsura: Sine-square deformation of one-dimensional critical systems, *Integrable systems in Condensed Matter / Statistical Physics*, Bangalore, India, Aug. 2018.
- [30] Hosho Katsura:  $\mathbf{Z}_2$  topological invariants of fermionic and bosonic insulators, *Progress in the Mathematics of Topological States of Matter*, Sendai, Japan, Aug. 2018.
- [31] Hosho Katsura:  $\mathbf{Z}_2$  invariant for topological magnon insulators, *Quantum Magnetism: Frustration, Low-dimensionality, Topology*, Beijing, China, Sept. 2018.

- [32] Yutaka Akagi: Detection of Phase Transition in Quantum Spin Chains via Unsupervised Machine Learning, *Mini-workshop on "Machine Learning in Physics"*, Tokyo, Japan Sept. 2018.
- [33] Hoshio Katsura: Fradkin, Fredkin, or Fridkin?, *Exactly Solvable Models of Quantum Field Theory and Statistical Mechanics*, Stony Brook, US, Nov. 2018.
- [34] Hoshio Katsura:  $\mathbf{Z}_2$  invariants for disordered topological insulators and superconductors, *Theoretical studies of topological phases of matter*, Tokyo, Japan, Feb. 2019.
- (国内会議)
- 一般講演
- [35] 赤城裕: 機械学習を用いた多体系トポロジカル相の探求, 新学術領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」公募研究キックオフミーティング, 2018年6月, 京都大学基礎物理学研究所.
- [36] 赤城裕, 吉岡信行, 桂法称: 教師無し学習による量子スピン鎖の相判定, 量子情報・物性の新潮流 -量子技術が生み出す多様な物性と情報処理技術-, 2018年8月, 東京大学物性研究所.
- [37] 赤城裕: 乱れのあるマグノンホール系におけるトポロジカル不変量, 日本物理学会 2018年秋季大会, 2018年9月, 同志社大学.
- [38] 近藤寛記, 赤城裕, 桂法称: マグノンスピンホール系における  $\mathbf{Z}_2$  トポロジカル不変量, 日本物理学会 2018年秋季大会, 2018年9月, 同志社大学.
- [39] 吉岡信行, 赤城裕, 桂法称: フラストレート・スピン系と等価なボルツマン機械による大域的更新法, 日本物理学会 2018年秋季大会, 2018年9月, 同志社大学.
- [40] Hong Yang, Hoshio Katsura: Rigorous Results for the Ground States of the Spin-2 Bose-Hubbard Model, 日本物理学会 2018年秋季大会, 2018年9月, 同志社大学.
- [41] 赤城裕: 乱れのあるマグノンホール系におけるトポロジカル不変量, 基研研究会「スピン系物理の最前線」, 2018年11月, 京都大学基礎物理学研究所.
- [42] 赤城裕, 吉岡信行, 桂法称: 教師無し学習による量子スピン鎖の相転移検出, 基研研究会「スピン系物理の最前線」, 2018年11月, 京都大学基礎物理学研究所.
- [43] 近藤寛記: マグノンスピンホール系における  $\mathbf{Z}_2$  トポロジカル不変量, 基研研究会「スピン系物理の最前線」, 2018年11月, 京都大学基礎物理学研究所.
- [44] 三ノ宮典昭: 格子フェルミオン模型における超対称性の破れと南部・ゴールドストーンフェルミオン, 2018年金沢大学量子ダイナミクス研究会, 2018年12月, 金沢大学.
- [45] 赤城裕: 教師無し学習による量子スピン鎖の相転移検出, 第4回 TMS 領域研究会 (TMS2019), 2019年1月, 名古屋大学.
- [46] 赤城裕: マグノン系トポロジカル相とその不変量, 第八回「強相関電子系理論の最前線」, 2019年2月, 熱海.
- [47] 田村健祐, 桂法称:  $SU(n)$  Hubbard 模型における強磁性, 日本物理学会 第74回年次大会, 2019年3月, 九州大学.
- [48] 桂法称, Jurriaan Wouters, Dirk Schuricht: 縮退した基底状態をもつ非一様な XXZ スピン鎖, 日本物理学会 第74回年次大会, 2019年3月, 九州大学.
- [49] 赤城裕, 吉岡信行, 桂法称: 教師無し学習による量子スピン鎖の相転移検出, 日本物理学会 第74回年次大会, 2019年3月, 九州大学.
- [50] 柴田直幸, 桂法称: 厳密に解ける散逸のあるスピン鎖とその端スピンの動的相関関数, 日本物理学会 第74回年次大会, 2019年3月, 九州大学.
- [51] 近藤寛記, 赤城裕, 桂法称: 3次元  $\mathbf{Z}_2$  トポロジカルマグノン系とその表面ディラック状態, 日本物理学会 第74回年次大会, 2019年3月, 九州大学.
- 招待講演
- [52] 桂法称: 量子ハングル (Quantum Hangel), 物性理論のフロンティアと社会への展開, 2018年5月, 東京大学.
- (セミナー)
- [53] 赤城裕: 量子スピンネマティック相におけるトポロジカル励起とそのシミュレーションのための効率的なスピンフリップ, 理論物理学セミナー 2018年5月, 東京理科大学.
- [54] 吉岡信行: Machine Learning Disordered Topological Phases by Statistical Recovery of Symmetry, BEC セミナー 2018年6月, 筑波大学.
- [55] 赤城裕: Topological Invariant for Magnon Hall Systems with Disorder, Seminar 2018年8月, 沖縄科学技術大学院大学.
- [56] 桂法称:  $\mathbf{Z}_2$  invariant for topological magnon insulators, Topological Science Seminar 2018年11月, 慶應大学.
- [57] 吉岡信行: Transforming Generalized Ising Model into Boltzmann Machine, 統計力学セミナー 2018年12月, 東京大学.
- [58] 桂法称: Topological order and zero modes in interacting Kitaev/Majorana chains, Particle Physics Theory Group Seminars, 2019年1月, 大阪大学.
- [59] 赤城裕: Topological Invariant for Magnon Hall Systems with Disorder, Seminar 2019年3月, 京都大学基礎物理学研究所.

## 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。

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、その後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。

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、重金属-遷移金属接合界面は、従来のエレクトロニクスにスピンの自由度を導入したスピントロニクスの材料として期待されている。これらの物質・試料における磁気異方性、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、偏光方向を自由に変えられるベクトル型超伝導マグネット装置を開発して行っている。

#### 電子ドーブ型銅酸化物高温超伝導体における電子ドーブ量の実測

近年、いわゆる T' 型結晶構造を持つ電子ドーブ型銅酸化物超伝導体  $R_{2-x}Ce_xCuO_{4-\delta}$  ( $R =$  希土類元素) において、「プロテクト・アニール」法により還元をおこなったバルク単結晶や多段アニールで還元をおこなった薄膜単結晶が従来より低濃度の Ce 原子置換でも高い  $T_c$  の超伝導を示したり、Ce 原子置換を全く行わなくても超伝導を示すことが報告され話題となっている。我々は、Ce 原子置換を行わずに超

伝導を示す  $Pr_2CuO_{4-\delta}$  薄膜の ARPES 測定で求めたフェルミ面の面積から、およそ 17% に上る電子がドーブされていることを見出した [3]。また、X 線光電子分光による  $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4-\delta}$  薄膜の化学ポテンシャルシフトの測定からも、多段アニールによる還元で多量の電子がドーブされることを示した [2]。

#### ファンデルワールス強磁性体の電子構造

ファンデルワールス力で原子層同士が結合した 2 次元系物質が近年盛んに研究されている。とくに最近、類似の構造を持ち強磁性を示す「ファンデルワールス強磁性体」が、基礎物理とデバイス応用の両面から注目を集めている。我々は、代表的なファンデルワールス強磁性体のひとつである  $Cr_2Ge_2Te_6$  の ARPES 測定と第一原理計算 (LDA+ $U$  計算) を行い、ARPES 実験と LDA+ $U$  計算との比較から、Cr  $3d$  電子間相互作用  $U$  の大きさを約 1.1 eV と見積もった。この大きさの  $U$  は Cr 原子を層内で強磁性的に結合させる一方で、層間では強磁性的な結合と反強磁性的な結合の境界付近に位置させることがわかり、層間の磁氣的結合が層数に依存することを定性的に説明した [8]。

#### < 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Nonaka, G. Shibata, R. Koborinai, K. Ishigami, S. Sakamoto, K. Ikeda, Z. Chi, T. Koide, A. Tanaka, T. Katsufuji, and A. Fujimori: Electronic states and possible origin of the orbital-glass state in a nearly metallic spinel cobalt vanadate: An x-ray magnetic circular dichroism study, *Phys. Rev. B* **97**, 205126–1-7 (2018); arXiv:1802.07074
- [2] M. Horio, Y. Krockenberger, K. Yamamoto, Y. Yokoyama, K. Takubo, Y. Hirata, S. Sakamoto, K. Koshiishi, A. Yasui, E. Ikenaga, S. Shin, H. Yamamoto, H. Wadati, and A. Fujimori: Electronic structure of Ce-doped and -undoped  $Nd_2CuO_4$  superconducting thin films studied by hard x-ray photoemission and soft x-ray absorption spectroscopy, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 257001–1-6 (2018); arXiv:1710.09028
- [3] M. Horio, Y. Krockenberger, K. Koshiishi, S. Nakata, K. Hagiwara, M. Kobayashi, K. Horiba, H. Kumigashira, H. Irie, H. Yamamoto, and A. Fujimori: Angle-resolved photoemission spectroscopy of the low-energy electronic structure of superconducting  $Pr_2CuO_4$  driven by oxygen nonstoichiometry, *Phys. Rev. B* **98**, 020505(R)–1-5 (2018); arXiv:1801.03702
- [4] M. Horio, Y. Takeda, H. Namiki, T. Katagiri, Y. K. Wakabayashi, S. Sakamoto, Y. Nonaka, G. Shibata, K. Ikeda, Y. Saitoh, H. Yamagami, T. Sasagawa, and A. Fujimori: Local magnetic states of the weakly ferromagnetic iron-based superconductor  $Sr_2VFeAsO_{3-\delta}$  studied by x-ray magnetic

- circular dichroism, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 105001-1-2 (2018).
- [5] Y. K. Wakabayashi, Y. Nonaka, Y. Takeda, S. Sakamoto, K. Ikeda, Z. Chi, G. Shibata, A. Tanaka, Y. Saitoh, H. Yamagami, M. Tanaka, A. Fujimori, and R. Nakane, Cation distribution and magnetic properties in ultrathin  $(\text{Ni}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x = 0-1$ ) layers on Si(111) studied by soft x-ray magnetic circular dichroism, *Phys. Rev. Mater.* **2**, 104416-1-12 (2018); arXiv:1808.02624
- [6] G. Shibata, K. Yoshimatsu, K. Ishigami, T. Harano, Y. Takahashi, S. Sakamoto, Y. Nonaka, T. Kadono, M. Furuse, S. Fuchino, M. Okano, J. Fujihira, A. Uchida, K. Watanabe, H. Fujihira, S. Fujihira, A. Tanaka, H. Kumigashira, T. Koide, and A. Fujimori, Anisotropic charge distribution induced by spin polarization in  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$  thin films studied by x-ray magnetic linear dichroism, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 11471-1-5 (2018); arXiv:1810.09077.
- [7] S.-i. Fujimori, M. Kobata, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagami, Y. Haga, E. Yamamoto, and Y. Onuki: Manifestation of electron correlation effect in U 5f states of uranium compounds revealed by U  $4d \rightarrow 5f$  resonant photoemission spectroscopy, *Phys. Rev. B* **99**, 035109-1-5 (2019); arXiv:1901.00956.
- [8] M. Suzuki, B. Gao, K. Koshiishi, S. Nakata, K. Hagiwara, C. Lin, Y. X. Wan, H. Kumigashira, K. Ono, Sungmo Kang, Seungjin Kang, J. Yu, M. Kobayashi, S.-W. Cheong, and A. Fujimori: *Phys. Rev. B* **99**, 161401(R)-1-4 (2019); arXiv:1810.12564.
- (綜説, 解説, その他)
- [9] A. Fujimori: Oxygen-hole pairs drive bond order and superconductivity in bismuth oxides, *Journal Club for Condensed Matter Physics*, March, 2017. Available at <https://www.condmatjclub.org/?p=3333>.
- [10] 野中洋亮, 若林勇希, 芝田悟朗, 酒巻真粧子, 雨宮健太, 田中雅明, 中根了昌, 藤森淳: Si(111) 基板上に作製した  $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$  の界面付近の磁性と電子状態の研究, *PF News* **36**, 32-36 (2018).
- [11] M Horio and A Fujimori: ARPES studies on new types of electron-doped cuprate superconductors (Topical Review), *J. Phys.: Condens. Matter* **30** 503001-1-11 (2018).
- [12] 芝田悟朗, 北村末歩, 簗原誠人, 吉松公平, 門野利治, 石上啓介, 原野貴幸, 高橋文雄, 坂本祥哉, 野中洋亮, 池田啓祐, 池震棟, 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, 田中新, 組頭広志, 小出常晴, 藤森淳:  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  薄膜における基板応力により誘起された異方的スピン分布の角度依存 X 線磁気円二色性による観測, *PF NEWS Vol. 36 No. 3*, pp.13-18 (2018).
- (学位論文)
- [13] 林 春: Angle-resolved photoemission studies of hole- and electron-doped cuprate superconductors (修士論文)
- [14] 芝田悟朗: Soft-x-ray magnetic dichroism studies of magnetic and orbital anisotropies in  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  thin films (博士論文)
- [15] 野中洋亮: Magnetic and electronic states of spinel ferrites studied by x-ray magnetic circular dichroism (博士論文)
- [16] 輿石佳佑: Angle-resolved photoemission spectroscopy studies of electronic structure and its relationship to transport properties of iron-based superconductors (博士論文)
- [17] 鈴木雅弘: Photoemission and x-ray magnetic circular dichroism studies of the van der Waals ferromagnet  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$  (修士論文)
- [18] 万 宇軒: Photoemission and x-ray magnetic circular dichroism studies of diluted ferromagnetic semiconductors with the 122-type layered structure (修士論文)
- <学術講演>  
(国際会議)  
招待講演
- [19] A. Fujimori: Magnetic anisotropy of ferromagnetic oxide thin films studied by angle-dependent XMCD, *5th International Workshop on Complex Oxides* (Capri, Italy, May 20-24, 2018).
- [20] A. Fujimori: X-ray dichroism studies of magnetic anisotropies in thin films, *9th Vacuum and Surface Science Conference of Asia and Australia (VASSCAA-9)* (Sydney, August 13-16, 2018).
- [21] A. Fujimori: Effects of reduction annealing on electron-doped cuprates revealed by ARPES and core-level spectroscopy, *12-th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M<sup>2</sup>S-2018)* (Beijing, August 19-24, 2018).
- [22] A. Fujimori: Effects of reduction annealing on electron-doped cuprates revealed by ARPES and core-level spectroscopy, *European Materials Research Society (E-MRS) 2018 Fall Meeting* (Warsaw, September 17-20, 2018).
- [23] A. Fujimori: Understanding electron correlation from photoemission spectroscopy: Single-site to multi-site pictures, *International Workshop on Trends in Advanced Spectroscopy in Materials Science (TASPEC)* (Hiroshima University, October 4-6, 2018).
- [24] A. Fujimori: Soft x-ray dichroism studies of magnetic anisotropies in correlated transition-metal oxides, *14-th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure (ICESS-14)* (Shanghai, October 8-12, 2018).

- [25] A. Fujimori: Origin of the pseudogap in electron-doped and hole-doped cuprates from ARPES, *Kavli-APW-Tsinghua-Riken Workshop on "Highlights of Condensed Matter Physics"* (Kavli Institute for Theoretical Sciences, Beijing, November 1-3, 2018).
- [26] A. Fujimori: Impurity bands and inhomogeneous magnetism in diluted ferromagnetic semiconductors, *Kavli ITS Workshop on Diluted Magnetic Semiconductors: Challenges and Opportunities*, (Kavli Institute for Theoretical Sciences, Beijing, November 4-5, 2018).
- [27] A. Fujimori: Antiferromagnetic correlation in protect-annealed electron-doped cuprates, *2018 Workshop of Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials*, (Koshiba Hall, University of Tokyo, December 10-11, 2018).
- [28] A. Fujimori: Electronic structure of 2D ferromagnets, *19-th Japan-Korea-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (JKT19)*, (Waseda University, 11-13, January 2019).
- [29] A. Fujimori: Electronic structure of 2D ferromagnets, *8-th Indo-Japan Seminar "Designing Emergent Materials"*, (University of Tokyo, January 31-February 2, 2019).
- [30] M. Kitamura, M. Kobayashi, E. Sakai, M. Minohara, R. Yukawa, D. Shiga, K. Amemiya, Y. Nonaka, G. Shibata, A. Fujimori, H. Fujioka, and H. Kumigashira: Origin of interfacial ferromagnetism between perovskite oxides  $\text{LaNiO}_3$  and  $\text{LaMnO}_3$  studied by synchrotron-radiation spectroscopy, *Congress of Smart Materials-2019 (WCSM2019)* (Rome, March, 2019).
- 一般講演
- [31] M. Kitamura, K. Horiba, M. Kobayashi, E. Sakai, M. Minohara, R. Yukawa, D. Shiga, K. Amemiya, Y. Nonaka, G. Shibata, A. Fujimori, H. Fujioka, and H. Kumigashira: Origin of interfacial ferromagnetism between perovskite oxides  $\text{LaNiO}_3$  and  $\text{LaMnO}_3$ , *14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14)* (Sendai, October 21-25, 2018).
- [32] Y. X. Wan, G. Q. Zhao, K. Ikeda, M. Suzuki, M. Kobayashi, S. Sakamoto, Z. Deng, K. Zhao, B. J. Chen, Y. Takada, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, Y. J. Uemura, C. Q. Jin, A. Fujimori: X-ray magnetic circular dichroism of the diluted ferromagnetic semiconductor  $(\text{Ba,K})(\text{Zn,Mn})_2\text{As}_2$ , *2018 Workshop of Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials*, (Koshiba Hall, December 10-11, 2018).
- [33] G. Shibata, K. Yoshimatsu, K. Ishigami, T. Harano, Y. Takahashi, S. Sakamoto, Y. Nonaka, T. Kadono, M. Furuse, S. Fuchino, M. Okano, J.-i. Fujihira, A. Uchida, K. Watanabe, H. Fujihira, S. Fujihira, A. Tanaka, H. Kumigashira, T. Koide, and A. Fujimori: Anisotropic charge distribution induced by spin polarization in  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$  thin films, *ibid.*
- [34] G. Shibata, Y. Nonaka, K. Ikeda, Y.-X. Wan, M. Suzuki, J.-W. Kim, S.-W. Cheong, and A. Fujimori: X-ray magnetic circular dichroism study of Fe-intercalated transition-metal dichalcogenide  $\text{Fe}_x\text{TiS}_2$  with perpendicular magnetic anisotropy, *19-th Japan-Taiwan-Korea Workshop on Strongly Correlated Electron Systems (JTK-19)* (Waseda University, January 11-13, 2019).
- [35] M. Suzuki, B. Gao, G. Shibata, S. Sakamoto, K. Koshiishi, Y. Nonaka, K. Ikeda, Z. Chi, S. Nakata, K. Hagiwara, C. Lin, Y. X. Wan, H. Kumigashira, K. Ono, Y. Takeda, Sungmo Kang, Seungjin Kang, J. Yu, M. Kobayashi, and A. Fujimori: Photoemission and x-ray magnetic circular dichroism studies of the van der Waals ferromagnet  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ , *ibid.*
- [36] Y.X. Wan, G. Q. Zhao, K. Ikeda, M. Suzuki, M. Kobayashi, S. Sakamoto, Z. Deng, K. Zhao, B. J. Chen, Y. Takada, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, Y. J. Uemura, C. Q. Jin, A. Fujimori: X-ray magnetic circular dichroism study of the 122-type diluted ferromagnetic semiconductor  $(\text{Ba,K})(\text{Zn,Mn})_2\text{As}_2$ , *ibid.*
- [37] G. Shibata, J.-W. Kim, Y. Nonaka, K. Ikeda, Y.-X. Wan, M. Suzuki, A. Tanaka, S.-W. Cheong, and A. Fujimori: X-ray magnetic circular dichroism study of Fe-intercalated intercalated titanium disulfide  $\text{Fe}_x\text{TiS}_2$  with perpendicular magnetic anisotropy, *Indo-Japan Seminar "Designing Emergent Materials"*, (University of Tokyo, January 31-February 2, 2019).
- [38] Y. Nonaka, Y. K. Wakabayashi, G. Shibata, K. Ikeda, Z. Chi, Y.-X. Wan, M. Suzuki, T. Takeda, A. Tanaka, Y. Saitoh, H. Yamagami, Y. Takeda, M. Suzuki-Sakamaki, K. Amemiya, M. Kobayashi, M. Tanaka, R. Nakane, A. Fujimori: Origin of the magnetically dead layer in spinel ferrites  $M\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $M = \text{Co}, \text{Ni}$ ) thin films and its restoration by post-deposition annealing, *ibid.*
- [39] K. Koshiishi, T. Otsuka, S. Nakata, K. Hagiwara, C. Lin, Y. Wan, H. Kumigashira, K. Horiba, S. Ideta, K. Tanaka, T. Watanabe, and A. Fujimori: High-resolution ARPES study of Te-annealed 11-type iron-based superconductor  $\text{FeTe}_{1-x}\text{Se}_x$ , *ibid.*
- [40] M. Suzuki, B. Gao, G. Shibata, S. Sakamoto, K. Koshiishi, Y. Nonaka, K. Ikeda, Z. Chi, S. Nakata, K. Hagiwara, C. Lin, Y.-X. Wan, H. Kumigashira, K. Ono, Y. Takeda, A. Tanaka, Sungmo Kang, Seungjin Kang, J. Yu, M. Kobayashi, S.-W. Cheong, and A. Fujimori: Photoemission and x-ray magnetic circular dichroism studies of a van der Waals ferromagnet  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ , *ibid.*
- [41] Y. X. Wan, G. Q. Zhao, K. Ikeda, M. Suzuki, M. Kobayashi, S. Sakamoto, Z. Deng, K. Zhao, B. J.

- Chen, Y. Takada, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, Y. J. Uemura, C. Q. Jin, and A. Fujimori: X-ray magnetic circular dichroism study of the 122-type diluted ferromagnetic semiconductor (Ba,K)(Zn,Mn)<sub>2</sub>As<sub>2</sub>, *ibid*
- [42] M. Kobayashi, M. Seki, M. Suzuki, M. Kitamura, A. Fujimori, K. Horiba, H. Kumigashira, M. Tanaka, and H. Tabata: Inter-valence charge transfer in Ru-doped cobalt ferrite CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, *ibid*
- [43] S. Sakamoto, G. Zhao, G. Shibata, Z. Deng, K. Zhao, B. Chen, Y. Nonaka, K. Ikeda, Z. Chi, Y. Wan, M. Suzuki, T. Koide, S. Maekawa, Y. J. Uemura, C. Q. Jin, and A. Fujimori: Large perpendicular magnetic anisotropy and anisotropic electronic structure of the new ferromagnetic semiconductor (Ba,K)(Zn,Mn)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> single crystal studied by angle-dependent x-ray magnetic circular dichroism, *APS March Meeting*, (Boston, USA, March 4-8, 2019).
- (国内会議)  
招待講演
- [44] 藤森淳, 芝田悟朗: ベクトルマグネットを用いた磁気異方性計測の研究, 日本磁気学会第 82 回ナノマグネティクス専門研究会「ひずみと磁性の相関における新展開」(中央大学, 2018 年 8 月 3 日)
- [45] M. Kitamura, K. Horiba, M. Kobayashi, E. Sakai, M. Minohara, R. Yukawa, D. Shiga, K. Amemiya, T. Nagai, Y. Nonaka, G. Shibata, A. Fujimori, H. Fujioka, and H. Kumigashira: Origin of interfacial ferromagnetism between perovskite transition-metal oxides LaNiO<sub>3</sub> and LaMnO<sub>3</sub>, 第 42 回日本磁気学会学術講演会 (日大理工学部, 2018 年 9 月 11-14 日)
- [46] 藤森淳: 銅酸化物超伝導体の擬ギャップ研究の現状, 日本物理学会第 74 回年次大会, シンポジウム「非従来型超伝導体の未解決問題と今後の課題」(九州大学, 2019 年 3 月 14-17 日) .
- 一般講演
- [47] 野中洋亮, 若林勇希, 芝田悟朗, 竹田幸治, 坂本祥哉, 池田啓祐, 池 震棟, 万宇軒, 鈴木雅弘, 斎藤祐児, 山上浩志, 田中新, 酒巻真粧子, 雨宮健太, 田中雅明, 中根了昌, 藤森淳: Si 基板上に作製したスピネルフェライトにおける基板界面付近の磁性と価数分布の分析, 第 10 回放射光学会若手研究会「放射光科学×インフォマティクス」(東大工学部, 2018 年 9 月 3-4 日)
- [48] 北村未歩, 小林正起, 坂井延寿, 簗原誠人, 湯川龍, 志賀大亮, 雨宮健太, 野中洋亮, 芝田悟朗, 藤森淳, 藤岡洋, 堀場弘司, 組頭広志: ペロブスカイト型遷移金属酸化物 LaNiO<sub>3</sub>/LaMnO<sub>3</sub> ヘテロ構造における界面強磁性の起源, 同上.
- [49] 野中洋亮, 若林勇希, 芝田悟朗, 坂本祥哉, 池田啓祐, 池震棟, 万宇軒, 鈴木雅弘, 田中新, 酒巻真粧子, 雨宮健太, 田中雅明, 中根了昌, 藤森淳: Si 基板上に作製した CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 多層膜界面における磁氣的デッドレイヤーの起源とその修復, 日本物理学会秋季大会 (同志社大, 2018 年 9 月 9-12 日) .
- [50] 鈴木雅弘, B. Gao, A. Solomon, 芝田悟朗, 坂本祥哉, 輿石佳佑, 野中洋亮, 池田啓祐, 池震棟, 中田勝, 萩原健太, 林春, 万宇軒, 堀場弘司, 小野寛太, 組頭広志, 出田真一郎, 田中清尚, Sungmo Kang, Seungjin Kang, J. Yu, 小林正起, S-W. Cheong, 藤森淳: van der Waals 強磁性体 Cr<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>Te<sub>6</sub> の ARPES, XMCD, 第一原理計算, 同上.
- [51] 輿石佳佑, 大塚匠, 中田勝, 萩原健太, C. Lin, Y. X. Wan, 鈴木雅弘, 小野寛太, 堀場弘司, 組頭広志, 出田真一郎, 田中清尚, 渡辺孝夫, 藤森淳: ARPES による Te アニール FeTe<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> の電子状態の研究, 同上.
- [52] 芝田悟朗, 野中洋亮, 池田啓祐, 万宇軒, 鈴木雅弘, J. Kim, S-W. Cheong, 藤森淳: Fe をインターカレートした遷移金属ダイカルコゲナイド Fe<sub>x</sub>TiS<sub>2</sub> の X 線磁気円二色性, 同上.
- [53] Y. Wan, G. Zhao, K. Ikeda, M. Suzuki, M. Kobayashi, S. Sakamoto, Z. Deng, K. Zhao, B. Chen, Y. Takada, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, Yasutomo.J. Uemura, C. Q. Jin, and A. Fujimori: X-ray magnetic circular dichroism study of the diluted ferromagnetic semiconductor (Ba,K)(Zn,Mn)<sub>2</sub>As<sub>2</sub>, 同上.
- [54] 池田啓祐, 伊藤啓太, 関剛斎, 芝田悟朗, 坂本祥哉, 野中洋亮, 池 震棟, 万宇軒, 鈴木雅弘, 酒巻真粧子, 雨宮健太, 高梨弘毅, 和達大樹, 藤森淳: 磁場角度依存 XMCD によるエピタキシャル CoNi 多層膜の結晶磁気異方性の研究, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会 (名古屋国際会議場, 2018 年 9 月 18-21 日) .
- [55] M. Kobayashi, L. D. Anh, P. N. Hai, H. Kiuchi, H. Niwa, J. Miyawaki, Y. Harada, T. Schmitt, A. Fujimori, V. N. Strocov, M. Oshima, and M. Tanaka: Unveiling origin of ferromagnetism in Fe-doped ferromagnetic semiconductor by synchrotron radiation spectroscopy, 第 23 回半導体スピ工学の基礎と応用 (東工大すずかけホール, 2018 年 12 月 6-7 日) .
- [56] 輿石佳佑, 大塚匠, 中田勝, 萩原健太, C. Lin, Y. X. Wan, 鈴木雅弘, 小野寛太, 組頭広志, 堀場弘司, 出田真一郎, 田中清尚, 渡辺孝夫, 藤森淳: Te アニール FeTe<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> の高分解能角度分解光電子分光, 第 10 回低温センター研究交流会 (小柴ホール, 2019 年 2 月 22 日) .
- [57] 鈴木 雅弘, B. Gao, A. Solomon, 芝田悟朗, 坂本祥哉, 輿石佳佑, 野中洋亮, 池田啓祐, 池震棟, 中田勝, 萩原健太, 林春, 万宇軒, 堀場弘司, 小野寛太, 組頭広志, 竹田幸治, 田中新, Sungmo Kang, Seungjin Kang, J. Yu, 小林正起, S-W. Cheong, 藤森淳: ファンデルワールス強磁性体の光電子分光と X 線磁気円二色性による研究, 同上.
- [58] 野中洋亮, 若林勇希, 芝田悟朗, 池田啓祐, 池震棟, 万宇軒, 鈴木雅弘, 武田崇仁, 田中新, 斎藤祐児, 山上浩志, 竹田幸治, 鈴木真粧子, 雨宮健太, 小林正起, 田中雅明, 中根了昌, 藤森淳: スピンフィルター構造 MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (M = Co, Ni) / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Si の磁氣的デッドレイヤーの起源及びアニールによる修復効果, 日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学, 2019 年 3 月 14-17 日) .

- [59] 武田崇仁, 鈴木雅弘, L. D. Anh, 野中洋亮, T. Schmitt, 吉田訓, 坂野昌人, 石坂香子, 竹田幸治, 藤森伸一, 関宗俊, 田畑仁, 藤森淳, 田中雅明, V. N. Strocov, 小林正起: *p* 型強磁性半導体 (Ga,Fe)Sb の価電子帯バンド構造と不純物バンド, 同上.
- [60] 小林正起, 関宗俊, 鈴木雅弘, 北村未歩, 藤森淳, 堀場弘司, 組頭広志, 田中雅明, 田畑仁: Ru ドープコバルトフェライト  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  薄膜における原子価間電荷移動, 同上.
- [61] 池田啓祐, 伊藤啓太, 関剛斎, 芝田悟朗, 坂本祥哉, 野中洋亮, 池 震棟, 万 宇軒, 鈴木雅弘, 酒巻真粧子, 雨宮健太, 高梨弘毅, 和達大樹, 藤森 淳: X 線磁気円二色性による fcc-CoNi 多層膜の結晶磁気異方性の研究, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 (東工大, 2019 年 3 月 9-12 日).

セミナー等

- [62] A. Fujimori: Origins of magnetic anisotropies in ferromagnetic thin films studied by angle-dependent XMCD (University of British Columbia, April 6, 2018).
- [63] 藤森淳: ARPES から見た高温超伝導体の擬ギャップの起源 (固体物理セミナー, 大阪大学基礎工学研究科, 2018 年 7 月 12 日)
- [64] A. Fujimori: Synchrotron radiation spectroscopic studies of correlated, functional two-dimensional systems (Master class, La Trobe University, August 7, 2018).
- [65] A. Fujimori: Soft x-ray spectroscopy of magnetic materials for spintronics (FLEET Center, Monash University, August 8, 2018).
- [66] A. Fujimori: Synchrotron radiation spectroscopy of advanced materials (Beirut Arab University, September 18, 2018).
- [67] A. Fujimori: Photoemission studies of high-temperature superconductors under mechanical strain (Center for High Pressure Science and Technology Advanced Research, Shanghai, October 12, 2018).
- [68] A. Fujimori: Pseudogap in high-temperature superconductors (Tata Institute for Fundamental Research, October 17, 2018).
- [69] A. Fujimori: Electronic structures of nematic phases in iron-based and cuprates superconductors (Italy-Japan Seminar, 早稲田大学先進理工学研究科, 2019 年 3 月 4 日)

## 4.2 長谷川研究室

修士課程 1 年生として 4 月から高城卓也と渡邊和己が、10 月から Yuxiao GUO が新しくメンバーに変わった。3 月末には宮内恵太が修士課程を修了して就職した。

当研究室では、表面物性、特に「表面輸送」をキーワードにして実験的研究を行っている。おもに半導体や金属、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、多層膜 (超格子) 構造を利用し、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、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 (結晶) 絶縁体結晶の表面状態、超伝導グラフェン、ラッシュバ超伝導、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。とくに、分子線エピタキシー法によるナノマテリアルの作成と物性測定を超高真空中で「その場」で行うことが本研究室の実験手法の特徴であり、そのための新しい手法・装置の開発も並行して行っている。以下に、本年度の成果を述べる。

### 4.2.1 表面での電子・スピン輸送

#### In/SnTe/Bi(111) における界面超伝導

Cu をインターカレートしたトポロジカル絶縁体  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  や In をドープしたトポロジカル結晶絶縁体 SnTe などはトポロジカル超伝導体の候補物質として期待されている。当研究室では過去に、Bi(111) 基板上に成長した SnTe 薄膜が、5.8 K で超伝導転移と考えられる抵抗のドロップを観測した。この超伝導転移は電極接着に使われる In 島と SnTe 界面において発生していると考えられた。実際、SnTe 膜上に In 薄膜を成長すると超伝導によるゼロ抵抗が観測され、その転移温度はバルク In の転移温度よりわずかに高かった。今後は超伝導の起源の調査、およびトポロジカル超伝導の可能性について検証を行う。

#### Si(111) 表面上に成長した $\text{SnSe}_2$ の構造と電気伝導

$\text{SnSe}_2$  バルク結晶は半導体だが、グラフェン上に成長させた  $\text{SnSe}_2$  薄膜は超伝導を示し、そこではグラフェン基板との相互作用が超伝導発現に重要であると理論的に指摘されている。そこで、他の基板上でも調べるため、独自に Si(111) 上に  $\text{SnSe}_2$  薄膜をエピタキシャル成長させるレシピを開発し、層状成長することを反射高速電子回折法およびラマン分光法で確認した。しかし、PPMS 装置によって *ex situ* 伝導特性を測定した結果、*n* 型半導体の伝導特性を示し、2 K まで超伝導転移を示さなかった。今後、グラフェン基板との違いを明らかにしていく。

#### $\text{SrTiO}_3$ 上の単層 FeSe の成長と超伝導

$\text{SrTiO}_3(001)$ (STO) 結晶表面上に成長させた単層 FeSe は約 60 K の転移温度の超伝導を示し、バルク

結晶の FeSe の転移温度 (9 K) よりはるかに高い。しかし、これは走査トンネル分光法や光電子分光法で測定されたエネルギーギャップから決められた転移温度であり、in situ 伝導測定では確認されていない。また、ex situ 伝導測定では大きな幅をもつ異なる転移温度が報告されている。そこで、当研究室での in situ 伝導測定技術で、FeSe 薄膜の超伝導転移温度の膜厚依存性などを明らかにしたい。今年度には、ドーパされた導電性 STO 基板およびノンドープ絶縁性 STO 基板上での FeSe 膜の成長を反射高速電子回折のパターンおよび強度振動によって確認した。ドーパされた STO では基板自体の抵抗が非常に低いため、1 m Ω までの分解能で電気抵抗を測定できるように測定回路を改良した。また、絶縁性 STO 上では測定用プローブと試料との接触がショットキー接触になるため、安定した測定が困難なので、現在、改良を検討している。

### Si(111) 基板上の (Pb,Au) 表面合金層

Pb と Au の合金である PbAu<sub>2</sub> は、バルク結晶でトポロジカル超伝導の候補物質に挙げられているが、Au/Si(111) 表面上に Pb を蒸着することで作製される (Pb,Au) の 2 次元合金表面構造においてもトポロジカル状態が理論予測された。しかしこの系の実験的な作製報告はない。本研究では (Pb,Au)/Si(111) 表面が安定構造として  $2\sqrt{3} \times 2\sqrt{3}$  周期構造を取ることを電子回折と STM によって発見し、ARPES 観測によってこの表面が金属的な表面電子バンドを持つことを明らかにした。さらに伝導測定の結果、約 4 K まで超伝導を示さないが、表面電気伝導度の異方性が温度に依存して変化することが分かり、現在はその起源の解明に取り組んでいる。(ロシア科学アカデミーとの共同研究)

### Si(111)-SIC-Pb 相への Ag 層による影響

2 次元超伝導体である Si(111)-SIC(Striped 不整合)-Pb 表面において、基板と Pb 層の間に Ag 層が入ると Pb 層の超伝導が抑制されることを走査トンネル分光測定で示した先行研究を受け、本研究ではその構造と成長様式を詳細に調べた。アニール後の (Pb,Ag)/Si(111) 試料は Si(111)-SIC-Pb 相と非常に似た構造を持つことが分かった。さらに電子バンドも Ag のない SIC 相とほぼ同じであることが ARPES 測定の結果から示された。今後は低温での電気伝導測定によって超伝導発現の有無を検証し、構造と抑制効果との関連性を議論していきたい。(ロシア科学アカデミーとの共同研究)

### 磁性トポロジカル絶縁体の作製と電子構造・磁性

磁性トポロジカル絶縁体は時間反転対称性の破れによりディラック点でエネルギーギャップが開き、そこにフェルミ準位が位置するとカイラルエッジ状態

ができて量子異常ホール効果 (QAHE) が生じる。しかし、これまで QAHE は極低温でしか観測されていないため、高温での QAHE 実現に向けて、均一な強磁性が実現される磁性トポロジカル絶縁体 MnTe/(Bi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> に着目した。フェルミ準位がギャップ中に位置するように Bi と Sb の組成比 ( $x$  値) を調整した試料を MBE 法により作製し、その電子構造を角度分解光電子分光法 (ARPES) で確認した。さらに、同一の試料に対して SQUID による磁化測定を行ったところ、室温でも強磁性が保たれていることを確認し、高温での QAHE 観測に最適な試料の作製に成功した。今後は、電気伝導測定により QAHE 観測を目指す。(ロシア科学アカデミーとの共同研究)

### 非対称光照射による逆スピンホール効果

逆スピンホール効果 (ISHE) は、電子的なスピン注入法だけでなく、磁場中での光学的なスピン注入法によっても観測されることが示された。最近、我々は光学的 ISHE が無磁場でも起こることを発見した。それは、Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 試料の端付近にレーザー光を照射したときのみ発生する光電流の偏光状態依存性として確認された。有限要素法によるシミュレーションによって、この現象が試料端近傍での非対称な光照射によって生じる ISHE であることを明らかにした。

### SiC 上の Ca インターカレート 2 層グラフェンの構造と超伝導

SiC 結晶表面上の 2 層グラフェンに Ca 原子をインターカレートすると、オンセット T<sub>c</sub> = 4 K で超伝導転移することが知られているが、その原子構造の詳細は未だ明らかでないため、全反射高速陽電子回折法を用いて構造解析を行った。その結果、従来考えられていたグラフェン層間に Ca 原子が挿入されている構造ではなく、グラフェン層の下に Ca 原子が存在することが明らかとなった。さらに、この構造を元に DFT 計算を行った結果、基板に近いグラフェン層が Ca 原子により強く電子ドーピングを受けることが分かった。本結果から、SiC 上の単層グラフェンにおいても同様に Ca 原子をインターカレートし超伝導を発現する可能性が示唆され、Dirac 電子と Cooper ペアの共存する系の実現が期待される。(高エネルギー加速器研究機構との共同研究)

### 超伝導/トポロジカル絶縁体ヘテロ構造

Bi<sub>2</sub>Se<sub>x</sub>Te<sub>3-x</sub> はトポロジカル絶縁体であり、FeSe<sub>x</sub>Te<sub>1-x</sub> は鉄系超伝導体であるので、両者を積層させた超格子構造を作るとトポロジカル超伝導が実現される可能性がある。Bi<sub>2</sub>Se<sub>x</sub>Te<sub>3-x</sub> に Fe を蒸着した後アニールすると、FeSe<sub>x</sub>Te<sub>1-x</sub> が形成される。そのとき、3 つの異なる方位のドメインが形成されることを反射高速電

子回折で見出した。また、 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  上の  $\text{FeSe}$  は歪のため正方格子から長方格子に変わり、そのために超伝導が抑制されると予想されている。我々は、組成異なる3つの試料 ( $\text{FeSe}/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{FeSe}_{0.67}\text{Te}_{0.33}/\text{Bi}_2\text{Se}_2\text{Te}$ ,  $\text{FeTe}/\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) の伝導特性を PPMS で *ex situ* 測定したが、すべて 2 K まで超伝導を示さないことがわかった。イオン液体ゲート法を用いてキャリアをドーピングしても超伝導の兆候は見られなかった。この結果は、 $\text{FeSe}_{0.67}\text{Te}_{0.33}/\text{Bi}_2\text{Se}_2\text{Te}$  と  $\text{FeTe}/\text{Bi}_2\text{Te}_3$  において ARPES と STS で超伝導ギャップが開くという先行研究と矛盾する。また、この2つの試料の磁気抵抗測定では弱反局在現象が見られた。アニール時に Fe 原子が  $\text{BiSeTe}$  側に拡散して超伝導およびトポロジカル状態を壊している可能性があるため、今後、作成条件の最適化を進める。

#### 原子層青リンのエピタキシャル成長と電気伝導特性

青リンは、2次元層状物質でワイドギャップ半導体であるが、Li 等のアルカリ金属を2層青リン間にインターカレートさせることで約 20 K で2次元超伝導体に転移することが理論的に予測されている。本研究では MBE 法により  $\text{Au}(111)$  薄膜清浄表面上で高品質で *free-standing* な青リンを選択的に得られることが反射高速電子回折によって確認された。また、リン層間に Li を蒸着した構造において電気伝導度が下地の  $\text{Au}(111)$  薄膜よりも高くなることが *in-situ* マイクロ4端子測定により明らかとなり、リン層への電子ドーピングが確認された。今後は試料作製条件をより最適化して *in situ* 電気伝導測定を中心に行う。

#### 金属ジチオレン錯体ナノシート

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、各種有機分子膜のナノスケールでの電気伝導率の測定を試みている。とくに、亜鉛ジチオレン錯体 ( $\text{ZnDT}$ ) ナノシートに注力しており、化学専攻西原研から提供いただいた  $\text{ZnDT}$  ナノシートと、Zn を置換したナノシートの伝導測定を行った。 $\text{ZnDT}$  は、Zn を他の金属イオンに晒すことで、他のイオンに置換されうるといった特徴がある。Zn 置換の際に部分的な置換や再置換を行うことで単一のジチオレンシート内に異なる金属錯体を持つ特異な物質を作れるのではないかと考えている。錯体金属種を選ぶことで、2次元金属・半導体接合や PN 接合など、2次元デバイスへの応用も期待できる。 $\text{ZnDT}$  は絶縁体であるが、Cu、Ni、Pt 等の重金属と置換すると電気伝導性が生じることがわかった。一方で、同一ジチオレンシート上で接合を作るために2回の金属イオン置換を行うと電気伝導性が悪くなり、測定が困難になることがわかった。今後はジチオレンシートの作成・置換のプロセスを見直し、2次元接合への道筋を立てたいと考えている。(化学専攻との共同研究)

#### 4.2.2 表面・原子層ナノ構造

##### SiC 上グラフェンへの Li インターカレーションのダイナミクスの観察

Li イオンバッテリーの負極材料としてグラファイトが広く使われている一方、ミクロスコピックな Li 原子のインターカレーションダイナミクスは未だ明らかでない。そこで、グラファイトをより単純化した1~2層グラフェンに Li がインターカレートする過程を、低速電子顕微鏡を用いて *in-situ* 観察した。Li 原子をインターカレートするスピードを制御することにより、グラフェンにダメージをほとんど与えることなくインターカレートおよび脱離させることが明らかとなった。さらに、グラフェン層の積層構造に依存した Li のインターカレーションダイナミクスが観察され、積層構造の分布が Li インターカレーションにより変化することも明らかとなった。これらの結果は Li イオンバッテリーの高効率・長寿命化に重要であるだけでなく、グラフェンの積層構造をミクロに制御する新規手法に繋がる。(中国重慶大学との共同研究)

#### 4.2.3 新しい装置・手法の開発

##### 超高真空 SQUID の開発

超伝導に特異な物性は完全導電性(電気抵抗0)と完全反磁性の二つがあり、その二つの測定をもって正式に超伝導と認定される。長年、本研究室では物質表面の電気伝導を超高真空中で *in situ* 測定してきており、表面数層の超伝導と思われる電気抵抗の特異な減少を発見しているが、その磁化率は測定することができなかった。そこで、電気伝導測定と同時に磁化率を *in situ* 測定することで表面の超伝導転移の詳細を調べることが目指し、既存の極低温超高真空マイクロ4端子電気伝導測定 ( $\text{mK4PP}$ ) の改良を行っている。

測定に必要な磁気シールドの追加、超伝導量子干渉計 (SQUID) を用いた予備実験を完了した。予備実験では磁化率測定のダイナミックレンジが足りないこと、フラックスジャンプと呼ばれるピックアップコイル特有の測定磁場のずれがあり、これを防ぐ必要があることがわかった。そこでダイナミックレンジの拡張のためホール素子を追加、磁場のオフセット調節機構を作製し、それらと一体になったピックアップコイルの作成・組み込みを行った。今後はダイナミックレンジの確認、フラックスジャンプの起らない外部磁場範囲の確認などを行い、実際に冷却し、完全反磁性へ相転移する際の磁場の反転の確認を行う予定である。

##### スピン検出プローブの開発

スピンを利用する技術、スピントロニクスでは微細加工技術によって基板上にスピン流の生成回路と

測定回路を作りこむ手法が主流であるが、この手法では微細加工で作成できる試料しか測定できず、トポロジカル絶縁体など特異なスピン伝導特性を持つことが期待される試料を測定できない。このため、本研究室では、AFM や STM、多端子プローバーに搭載でき、任意の場所でスピン流の生成・測定ができるスピンプローブの開発を行ってきた。本年度は、このプローブをさらに発展させ、スピン圧を直接測定できるプローブの設計を行った。現状の手法では、空間分解能とスピン分解能がトレードオフとなっているため、新たな機構を考案し、シミュレーションを行った。また、このプローブを用いて、グラフェン内でのスピン・電子輸送特性の研究を行うべく、山梨大学と共同で装置の開発に着手した。今後は、実際にプローブを作製し、本研究室および山梨大学白木研究室にある独立駆動型 4 探針 STM においてプローブの実証を行う。(山梨大学との共同研究)

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「超高真空 SQUID による表面超構造超伝導のマイスナー効果の検出」(代表 長谷川修司)

・文部科学省 科研費 新学術領域研究「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」公募研究「単層 2 次元トポロジカル結晶絶縁体の開発と、超伝導体との接合による協奏現象の探求」(代表 秋山了太)

・日本学術振興会 科研費 挑戦的研究(萌芽)「水素修飾で実現する高転移温度を持つ原子層超伝導体」(代表 秋山了太)

・日本学術振興会 科研費 挑戦的研究(萌芽)「スピン輸送現象の実空間その場観察手法の開発」(代表 保原麗)

#### <受賞>

- [1] 遠山晴子: “Superconductivity of Pb ultrathin film on Ge(111) surface”, The Young Scientist Award at The 4th Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials, Vladivostok, Russia, 2018 年 9 月.
- [2] 一ノ倉 聖: “分子線エビタキシーとその場での電子輸送測定を用いた 2 次元超伝導の開拓”, 第 13 回日本物理学会若手奨励賞 (領域 9), 2019 年 3 月.

#### <報文>

(原著論文)

- [3] Y. Nakata, K. Sugawara, S. Ichinokura, Y. Okada, T. Hitosugi, T. Koretsune, S. Hasegawa, T. Sato, and T. Takahashi: *Observation of Anisotropic Band Splitting in Monolayer NbSe<sub>2</sub>: Implications for Superconductivity and Charge Density Wave*, npj 2D Materials and Applications **2**, 12 (6pp) (May, 2018).
- [4] T. Hirahara and S. Hasegawa: *Comment on “Quantum transport in the surface states of epitaxial Bi(111) thin films”*, Phys. Rev. B **97**, 207401 (3pp) (May, 2018).

- [5] R. Akiyama, K. Sumida, S. Ichinokura, A. Kimura, K. Kokh, O. Tereshchenko, and S. Hasegawa: *Shubnikov-de Haas oscillations of p and n-type topological insulator (Bi<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>*, J. Phys.: Cond. Matt. **30**, 265001 (8pp) (Jun, 2018).
  - [6] Y. Endo, S. Ichinokura, R. Akiyama, A. Takayama, K. Sugawara, T. Takahashi, K. Nomura, and S. Hasegawa: *Weak localization in bilayer graphene with Li-intercalation/desorption*, J. Phys.: Cond. Matt., **30**, 305701 (7pp) (Jul, 2018).
  - [7] Y. Shiomi, K. T. Yamamoto, R. Nakanishi, T. Nakamura, S. Ichinokura, R. Akiyama, S. Hasegawa, and E. Saitoh: *Efficient Edelstein effects in one-atom-layer Tl-Pb compound*, Appl. Phys. Lett. **113**, 052401 (4pp) (Aug, 2018).
  - [8] T. Nakamura, H. Kim, S. Ichinokura, A. Takayama, A.V. Zotov, A.A. Saranin, Y. Hasegawa, and S. Hasegawa: *Unconventional Superconductivity in the single-atom-layer alloy Si(111)-√3×√3-(Tl, Pb)*, Phys. Rev. B **98**, 134505 (6pp) (Oct, 2018) (Editors’ suggestion).
  - [9] H. Toyama, H. Huang, T. Nakamura, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, A. Takayama, A. V. Zotov, A. A. Saranin, and S. Hasegawa: *Thickness dependence of surface structure and superconductivity in Pb atomic layers*, J. Phys. Soc. Japan **87**, 113601 (5pp)(Oct, 2018).
  - [10] H. Toyama, H. Huang, T. Nakamura, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, A. Takayama, A. V. Zotov, A. A. Saranin, and S. Hasegawa: *Superconductivity of Pb Ultrathin Film on Ge(111) Surface*, Defect and Diffusion Forum **386**, 80-85 (Sep, 2018) (Proceedings of The Fourth Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials, 23-28, 2018, Vladivostok, Russia),
  - [11] T. Nakamura, A. Takayama, R. Hobara, D.V. Gruznev, A.V. Zotov, A.A. Saranin, S. Hasegawa: *Superconducting single-atomic-layer Tl-Pb compounds on Ge(111) and Si(111) surfaces*, Applied Surface Science **479**, 679-684 (Feb, 2019),
  - [12] Di Fan, Rei Hobara, Ryota Akiyama, and Shuji Hasegawa: *Inverse Spin Hall Effect Induced by Asymmetric Illumination of Light on Topological Insulator Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>*, arXiv:1809.08063 (Sep, 2018).
- (総説)
- [13] S. Hasegawa: *Charge and Spin Transport on Surfaces and Atomic Layers Measured by Multi-Probe Techniques*, J. Phys.: Cond. Matt. **31**, 223001 (12pp) (Mar, 2019) (Topical Review),
- (国内雑誌)
- [14] 長谷川修司: 表面電子状態 — タム・ショックレー状態からトポロジカル状態 —, 固体物理 **53**(11), 565-574 (Nov, 2018) .

(著書)

- [15] 長谷川修司: Part II, 第5章 多探針計測法, in 分子アーキテクトにクスー単分子技術が拓く新たな機能一, 日本化学会編、化学同人 (Dec, 2018) PP. 83-89.
- [16] S. Ichinokura and S. Hasegawa: *Chapter 6: Transport Measurement; Carrier Transport*, in Monatomic Two-Dimensional Layers, ed. I. Matsuda, (Elsevier, Jan, 2019) pp.159-197.

(その他)

- [17] 長谷川修司 (インタビュー記事): 「学びのトレンド&入試対策 BOOK 16 才の学び方改革」, ドリコムブック 2018、☑日本ドリコム編 (Oct, 2018) pp. 66-67.
- [18] 長谷川修司: 学会誌の *Duality* (巻頭言), 日本物理学会誌 **73**(9), 615 (Sep, 2018) .

(学位論文)

- [19] Hongrui Huang: *Two-dimensional superconductivity induced by proximity effect at Pb/Ge(111) system* (修士論文).
- [20] 遠山晴子: 半導体表面上の Pb 系 2 次元構造とその超伝導伝導特性 (修士論文).
- [21] 宮内恵太: 原子層青リンにおける超伝導の探索 (修士論文) .

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [22] S. Hasegawa: *Dissipationless currents at atomic layers*, 2018 International Conference on Nanoscience + Technology (ICN+T 2018), 2018 年 7 月 26 日, Brno (Czech).
- [23] S. Hasegawa: *Atomic-Layer Superconductors and Topological Superconductors*, The 3rd Asia-Pacific Symposium on Solid Surfaces (APSSS-3), 2018 年 8 月 21 日, Pohang (Korea).
- [24] S. Hasegawa: *Dissipationless currents at atomic layers*, The 3rd International Workshop on Charge transport with multi-tip STM Techniques, 2018 年 9 月 19 日, Julich, Germany.
- [25] S. Hasegawa: *Dissipationless currents at atomic layers*, 2018 Workshop of Max Planck-UBC-UTokyo Centre of Quantum Materials, 2018 年 12 月 11 日, 東京大学 (本郷) .

一般講演

- [26] R. Akiyama, R. Nakanishi, K. Watanabe, and S. Hasegawa: *2-dimensional superconductivity in SnTe on Bi/Si(111)*, New Trend of Topological Insulator 2018, 2018 年 7 月 18 日, Luxembourg.

- [27] H. Toyama, H. Huang, T. Nakamura, L.V. Bondarenko; A.Y. Tupchaya; D.V. Gruznev; A. Takayama; A.V. Zotov; A.A. Saranin; S. Hasegawa: *Superconductivity of Pb ultrathin film on Ge(111) surface* (Young Scientist Award), The 4th Asian School-Conference on Nanostructured Materials (ASCO-NANOMAT 20183), 2018 年 9 月 24 日, Vladivostok (Russia).
- [28] H. Huang, H. Toyama, T. Nakamura, L. V. Bondarenko, A.Y. Tupchaya, D.V. Gruznev, A. Takayama, A.V. Zotov, A.A. Saranin and S. Hasegawa: *Two-dimensional superconductivity on SIC phase of Pb/Ge(111) studied by in situ transport measurement*, The 3rd Asia-Pacific Symposium on Solid Surfaces (APSSS-3), 2018 年 8 月 21 日, Pohang (Korea).
- [29] H. Huang: *Superconductivity induced by proximity effect on the SIC phase of Pb/Ge(111)*, The University of Tokyo - Tsinghua University Joint Symposium on Physics and Materials, 2018 年 7 月 20 日, 東京大学 (本郷) .
- [30] D. Fan, R. Hobara, R. Akiyama, and S. Hasegawa: *Photoinduced Inverse spin Hall effect on topological insulator Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>*, The University of Tokyo - Tsinghua University Joint Symposium on Physics and Materials, 2018 年 7 月 20 日, 東京大学 (本郷) .
- [31] S. Hasegawa: *Dissipationless currents at atomic layers*, The University of Tokyo - Tsinghua University Joint Symposium on Physics and Materials, 2018 年 7 月 20 日, 東京大学 (本郷) .
- [32] K. Watanabe, R. Ishikawa, R. Akiyama, K. Akutsu, K. Iida, S. Kuroda, and S.Hasegawa: *Observation of the ferromagnetic proximity effect at an interface of Fe/SnTe heterostructure by polarized neutron reflectometry*, 2018 Workshop of Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials, 2018 年 12 月 10 日, 東京大学 (本郷) .
- [33] D. Fan, R. Hobara, R. Akiyama, and S. Hasegawa: *Inverse spin hall Effect induced by asymmetric illumination on topological insulator Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>*, 2018 Workshop of Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials, 2018 年 12 月 10 日, 東京大学 (本郷) .
- [34] R. Nakanishi, T. Takashiro, R. Hobara, R. Akiyama, S. Hasegawa, A. V. Matetskiy, A. V. Zotov, A. A. Saranin, T. Hirahara, T. Shirasawa, K. Miyamoto, T. Okuda, S. Kimura, S. V. Ereemeev, and E. V. Chulkov: *Dissipation-less currents at atomic/Molecular layers*, Symposium on Surface and Nano Sciences 2019, 2019 年 1 月 16 日, 栗石 (岩手) .
- [35] Y. Endo, Y. Fukaya, I. Mochizuki, A. Takayama, T. Hyodo and S. Hasegawa: *Structure analysis of Ca-intercalated bilayer graphene by total-reflection high-energy positron diffraction*, 1 and 2DM Conference and Exhibition, 東京ビックサイト, 2019 年 1 月 30 日.

- [36] T. Takashiro, R. Akiyama, I. A. Kibrev, A. V. Matetskiy, H. Toyama, A. V. Zotov, A. A. Saranin, and S. Hasegawa: *Fabrication and Evaluation of Magnetic Topological Insulator Heterostructure MnTe/(Bi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>*, Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems, Kashiwanoha Campus Station Satellite, 東京大学 (柏), 2019年2月19日
- (国内会議)
- 招待講演
- [37] 秋山了太: トポロジカル結晶絶縁体の電子物性評価とその応用, ISSP ワークショップ・スピン軌道強結合伝導系におけるサイエンスの新展開, 2018年11月12日, 東京大学物性研究所.
- 一般講演
- [38] 宮内恵太, 秋山了太, 中西亮介, 遠藤由大, 長谷川修司: 新奇層状物質青リンの Au(111) へのエピタキシャル成長とその電気伝導特性評価, 日本表面科学会第3回関東支部講演大会, 東京工業大学 (2018年4月7日)
- [39] 遠藤由大, 一ノ倉聖, 深谷有喜, 望月出海, 高山あかり, 秋山了太, 菅原克明, 高橋隆, 兵頭俊夫, Z. Wei, W. X. Tang, 長谷川修司: 2層グラフェンへの金属原子のインターカレーション, 第9回分子アーキテクトニクス研究会, 函館 (北海道), 2018年11月2日.
- [40] 遠藤由大, 深谷有喜, 望月出海, 高山あかり, 兵頭俊夫, 長谷川修司: 陽電子回折で明らかにする2次元超伝導体の構造, S A Tテクノロジー・ショーケース2019, つくば国際会議場 (茨城), 2019年1月29日
- [41] 高城拓也, 秋山了太, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, 遠山晴子, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司: *Fabrication and Evaluation of Magnetic Topological Insulator Heterostructure MnTe/(Bi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>*, 第10回低温センター研究交流会, 小柴ホール (東京大学), 2019年2月22日.
- [42] 宮内恵太, 秋山了太, 中西亮介, 遠藤由大, 長谷川修司: 新奇層状物質青リンの Au(111) へのエピタキシャル成長とその電気伝導特性評価, 日本表面科学会第3回関東支部講演大会, 東京工業大学 (大岡山キャンパス), 2018年4月7日.
- 日本物理学会 2018 秋季大会, 2018年9月9日-12日 (同志社大学 京田辺キャンパス)
- [43] 渡邊和己, 石川諒, 秋山了太, 阿久津和宏, 飯田一樹, 黒田真司, 長谷川修司: 偏極中性子反射率法を用いた Fe/SnTe ヘテロ構造界面における強磁性近接効果の観測, 2018年9月9日.
- [44] SP Liu, Y Takeuchi, JL Wang, R Akiyama, S Hasegawa: *Bose-metal behavior in epitaxial FeSe thin films grown on SrTiO<sub>3</sub>*, 2018年9月9日.
- [45] 遠山晴子, H. Huang, 中村友謙, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, 高山あかり, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司: Ge(111) 基板上 Pb の 2次元構造と超伝導特性, 2018年9月12日.
- [46] 大塚洋一, 石川真理代, 市原光太郎, 一宮彪彦, 井通暁, 海老崎功, 右近修治, 川村康文, 岸澤真一, 毛塚博史, 小牧研一郎, 近藤泰洋, 櫻井一充, 下田正, 真梶克彦, 末元徹, 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2018 報告: III 第2チャレンジ実験問題, 2018年9月11日.
- [47] 加藤岳生, 田中忠芳, 杉山忠男, 中屋敷勉, 松本益明, 真梶克彦, 江馬英信, 荒船次郎, 上杉智子, 大原仁, 興治文子, 金子朋史, 川村清, 東辻浩夫, 波田野彰, 吉田弘幸, 江尻有郷, 毛塚博史, 呉屋博, 近藤泰洋, 佐藤誠, 鈴木功, 並木雅俊, 長谷川修司, 光岡薫, 高羽悠樹, 福澤昂汰, 吉田智治, 高橋拓豊, 林優依, 榎優一, 大森亮, 森田悠介, 松元叡一, 佐藤遼太郎, 杉山清寛, 山中千博, 佐藤朗, 北原和夫: 第49回国際物理オリンピック報告, 2018年9月11日.
- [48] 並木雅俊, 佐藤誠, 中屋敷勉, 近藤一史, 長谷川修司, 毛塚博史, 田中忠芳, 鎌山茂徳, 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 IX. IPHO 光学実験, 2018年9月11日.
- 日本物理学会 第74回年次大会, 2019年3月14日-17日 (九州大学 伊都キャンパス)
- [49] 渡邊和己, 中西亮介, 秋山了太, 福居直哉, 豊田良順, 西原寛, 長谷川修司: In/SnTe/Bi(111) 構造における二次元超伝導の観測, 2019年3月14日.
- [50] 宮内恵太, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司: Au/CuSi/Si(111) テンプレート上における原子層青リンの結晶成長とその評価, 2019年3月14日.
- [51] 遠山晴子, 中村友謙, 田中宏明, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, 保原麗, 秋山了太, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司: Si(111) 上の (Pb,Au) 表面合金層の構造と伝導特性, 2019年3月14日.
- [52] 遠藤由大, 深谷有喜, 望月出海, 高山あかり, 兵頭俊夫, 長谷川修司: Ca インターカレート 2層グラフェン/SiC の構造: 全反射高速陽電子回折, 2019年3月15日.
- [53] H. Huang, F. Di, 秋山了太, 長谷川修司: *Growth and transport measurements of SnSe<sub>2</sub> thin films on Si(111) substrate*, 2019年3月14日.
- [54] 高城拓也, 秋山了太, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, 遠山晴子, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司: 磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造 MnTe/(Bi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> の作製とその評価, 2019年3月17日.
- [55] 並木雅俊, 佐藤誠, 中屋敷勉, 近藤一史, 長谷川修司, 毛塚博史, 田中忠芳, 鎌山茂徳, 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 X. 物理実験教育の要旨, 2019年3月15日
- [56] 加藤岳生, 田中忠芳, 杉山忠男, 中屋敷勉, 松本益明, 真梶克彦, 江馬英信, 荒船次郎, 上杉智子, 大原仁, 興治文子, 金子朋史, 川村清, 東辻浩夫, 波田野彰, 吉田弘幸, 江尻有郷, 毛塚博史, 呉屋博, 近藤泰洋, 佐藤誠, 鈴木功, 並木雅俊, 長谷川修司, 光岡薫, 高羽悠樹, 福澤昂汰, 吉田智治, 高橋拓豊, 林優依, 榎優一, 大森亮,

森田悠介, 松元叡一, 佐藤遼太郎, 杉山清寛, 山中千博, 佐藤朗, 北原和夫: 国際物理オリンピックに向けた研修・派遣活動の紹介, 2019年3月15日.

(セミナー)

- [57] 長谷川修司: 表面物理学とトポロジカル物質, 名古屋大学工学研究科応用物理学専攻応・応用物理学談話会, 2018年11月12日, 名古屋大学.

(講義等)

- [58] 長谷川修司: 表面物理学とトポロジカル物質への応用, 名古屋大学工学研究科応用物理学専攻応用物理学特論・工学部物理工学科応用物理学特別講義(集中講義), 2018年11月12-14日, 名古屋大学.

- [59] 長谷川修司: 初年次ゼミナール「世の中を変えた物理」(学部1年生), 2018年度夏学期(駒場).

- [60] 長谷川修司, 秋山了太, 渡邊和己(TA), 高城拓也(TA): 物理学実験 I (3年生) 電子回折, 2018年度冬学期(本郷).

(アウトリーチ)

- [61] 長谷川修司: ノーベル賞は遠くないーナノサイエンスを例にしてー, 平成30年度鳥取県高校生理数課題研究等発表会, 2019年2月17日, 米子コンベンションセンター(鳥取).

- [62] 長谷川修司: 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2019年3月24日, 大阪大学(豊中キャンパス): 2019年3月21日, 栃木県立大田原高校(栃木): 2019年3月9日, 洗足学園中学高等学校(神奈川): 2019年2月2日, 栃木県立宇都宮女子高等学校(栃木): 2018年6月10日, 茨城県立水戸第一高等学校(茨城).

- [63] 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」, 2018年8月2日, 理学部1号館B101号室(東京大学)

- [64] 模擬授業および研究室見学受入 福岡県立戸畑高等学校, 2018年12月19日: 群馬県立前橋高等学校, 2018年11月6日: 栃木県立宇都宮高等学校, 2018年11月27日: 茨城県立土浦第一高等学校, 2018年8月9日: 神奈川県立湘南高等学校, 2018年8月1日: 茨城県立竹園高等学校, 2017年8月1日.

## 4.3 福山研究室

我々ではできるだけ純粋かつ単純な2次元および1次元物質を対象として、これまで知られていない、かつ一般性のある基底状態や素励起、相転移現象を室温からマイクロケルビンにいたる広大な温度範囲で探索している。具体的には、量子効果が強いヘリウム(He)の量子液体・量子固体・量子液晶、炭素の2次元シートであるグラフェン、そしてその端に存在する1次元的な端状態が対象物質である。

### 4.3.1 2次元ヘリウムの量子相の研究

これまで主に、グラファイト表面に低温で物理吸着した単原子層 $^3\text{He}$ (フェルミ粒子)と $^4\text{He}$ (ボース粒子)を対象に、新たな量子相の探索を行ってきた。今年度は、単原子層 $^3\text{He}$ で最近我々が見出した2種類のギャップレス量子スピン液体(QSL)の正体について、理論家との共同研究の知見も合わせ、その本質の理解に迫る大きな進捗があった。また、2種類のうちの片方のギャップレスQSLを生む素地と考えられる量子液晶相のボース粒子系で、超流動性の観測に初めて成功した。これで、等方的な液相と並進対称性の破れを伴う固相(三角格子)の中間の幅広い密度範囲に、流動性をもつ新規な量子相(量子液晶相)が存在することがさらに有力になった。

#### 新しく見出した2種類の量子スピン液体相の物理

ギャップレスQSLは、我々が1997年に2層系 $^3\text{He}$ ( $^3\text{He}/^3\text{He}/\text{gr}$ )の2層目の単原子層 $^3\text{He}$ の核スピン系で報告した実験が最初であり、これに続いて、電子スピン系でも数多くの候補物質が報告されてきた。これらにほぼ共通する性質として、低温で温度に比例する磁気比熱( $C \propto T$ )と一定値に近づく帯磁率( $\chi \rightarrow \text{const.}$ )がある。しかし、これまで提唱された幾多の理論はそれらの性質を再現せず、実験と理論は長く乖離したままであった。最近、我々は、グラファイト表面を重水素化水素(HD) $_2$ 分子層でコートした上に $^3\text{He}$ を吸着させた新たな単原子層 $^3\text{He}$ ( $^3\text{He}/\text{HD}/\text{HD}/\text{gr}$ )の磁気比熱を測定し、2種類の特徴的なギャップレスQSL状態を見出した。

一つ目のQSL(タイプA)は、新たに発見された超低密度( $4.74 \text{ nm}^{-2}$ )の整合固相の磁性として見つかった。その構造決定は散乱実験を待つ必要があるが、下地HD相の約1/2のごく狭い密度範囲でのみ安定化するという事実から、整合相であることはほぼ間違いない。その密度から判断して、図4.3.1(a)のような安定吸着サイトの1/4が占有されたハニカム格子である可能性が高い。この場合、強磁性的な最近接2体交換相互作用と反強磁性的な6体リング交換相互作用が競合する新たなフラストレーション模型が有効であろう。実際に観測した低温比熱は $C \propto T^{2/3}$ で20 mK付近に緩やかなsingle peakをもつ。スピン軌道相互作用の強い一部の電子系物質を除き、この2/3乗というべき指数が広い温度範囲で実験観測されたのは初めてのことである。帯磁率の温度依存性も、当該密度の他グループによる過去測定を再解析して、 $\chi \propto T^{-1/3}$ の緩やかな発散性をもつやはり異常な振る舞いを見出した。このように、比熱と帯磁率の温度依存性はどちらもnontrivialな分数べき乗に従うが、 $\epsilon \propto k^3$ の分散関係をもつフェルミ統計に従う磁気素励起を仮定するとどちらもうまく説明できる。その分散関係を予言するU(1)ゲージ場模型やSU(2)マヨラナフェルミオン模型との関連が大いに注目される。

二つ目のQSL状態(タイプB)は、上記の整合相より高密度の20%を超える広い密度範囲で見つかった

た。その低温比熱は  $C \propto T$  で、帯磁率は絶対零度に向かって緩やかに一定値に近づく。これらは前述した2層系  $^3\text{He}$  のギャップレス QSL 相の性質と酷似するので、両者は同じ量子相と判断できる。これは大きな圧縮性をもつ単一相で、それよりさらに高密度の三角格子固体(強磁性相)とは明確に隔てられているので、空間対称性が部分的に破れた量子液晶相と考えられる。具体的には、我々が2016年に提唱した、絶対零度でも大きな量子ゆらぎのため対形成できない一定密度の自由転位(回位対)を内包する量子ヘキサティック相の可能性が高い(図4.3.1(b))。並進対称性は破れておらず、ボンド配向の準長距離秩序が存在する。すなわち、強い密度ゆらぎにさらされたランダムな三角格子の連結体のイメージである。

タイプBのQSLの性質は、大阪大学の川村光氏と上松和樹氏によるランダムシングレット模型に4体のリング交換を考慮した拡張模型でよく説明できる。この模型は、有限系の各ボンド(各交換相互作用の大きさ)に、ある範囲内でランダムな初期分布を与えて絶対零度の厳密対角化計算を行い、初期分布を様々に変えて統計平均を取る手法である(図4.3.1(c))。自由転位のトンネル運動は、個々の原子トンネル交換よりずっと遅いタイムスケールをもつと予想されるので、この手法は量子液晶相の磁性を記述する良い模型であると期待できる。そして、電子系で提案されているギャップレス QSL のかなりの例が、電荷揺らぎ(He系の場合は密度ゆらぎ)に起因している可能性も示している。

本研究は、大阪大学大学院理学研究科の川村研究室との共同研究である。

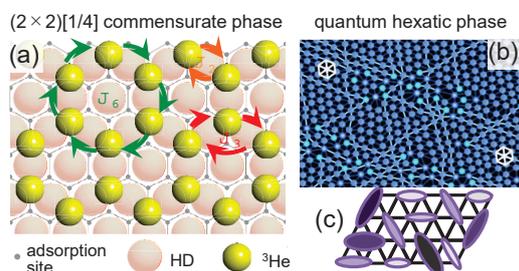


図4.3.1: (a) タイプAのギャップレス QSL 磁性を示す  $^3\text{He}/\text{HD}/\text{HD}/\text{gr}$  系の超低密度 ( $4.74 \text{ nm}^{-2}$ ) 整合固相の構造予想。(b) タイプBのギャップレス QSL 磁性を示す量子液晶相の構造予想(量子ヘキサティック相: 中村祥子氏による)。(c) ランダムシングレット模型の概念図(阪大川村・上松氏による)。

#### 超流動液晶と超固体の探索研究

グラファイト上の2層系 He の2層目では、密度の上昇と共に液相(L2)→低密度局在相(C2)→不整合固相(IC2)と相変化する事が知られている。そ

して、C2相の構造は、量子ヘキサティック相(量子液晶の初めての例)である可能性が最も高く、実際、上述したように、 $^3\text{He}$ のC2相ではそれを強く支持するタイプBのギャップレス QSL 磁性が見つまっている。一方、ボース粒子系の2層  $^4\text{He}$ ( $^4\text{He}/^4\text{He}/\text{gr}$ )のC2相密度付近では、過去の複数のねじれ振子実験で、いずれも密度に対する reentrant な超流動応答が報告されている( $T \leq 300 \text{ mK}$ )。したがって、ここでは空間対称性の破れとゲージ対称性の破れが共存する“超流動液晶”や“超固体”が実現している期待がある。しかし、これまでのねじれ振子実験では、用いた吸着基板の一部に遍在する不均一部分の割合が異なるため、試料の密度スケールの不定性が大きく、L2、C2、IC2のうち、どの相が超流動応答を示すのか詳細が明らかになっていなかった。

我々は、この問題を解決するため、低温で作成した2層目  $^4\text{He}$  試料に対し、ねじれ振子と比熱の同時測定を行うことができる装置を開発した。技術的に最も難しい点は、相決定が可能な精度で比熱測定ができる断熱性を有する支持機構を導入した上で、超流動成分(質量密度)を単相  $^4\text{He}$  の数%以内の精度で観測できるねじれ振子の高剛性を維持することである。我々は、アルミナ製の注意深く設計した断熱支持棒を使うことで、ほぼ要求性能を満たす同時測定試料セルを開発することに成功し、本格的な測定を始めた。

図4.3.2(a)(b)にL2相( $4.9 \text{ nm}^{-2}$ )とC2相( $8.8 \text{ nm}^{-2}$ )の熱容量測定の結果を示す。いずれも過去の比熱専用装置による測定結果(図中細実線)とよく一致しており、量子相を確実に同定できることが分かる。一方、同図(c)(d)は、それらの試料で観測されたねじれ振子の共鳴周波数のシフトである。いずれも  $0.4 \sim 0.5 \text{ K}$  以下で有限の周波数シフト、すなわち超流動応答が観測された。別途行った4層目流体相の超流動転移の測定データを Kosterlitz-Thouless(KT)理論で解析することで、ねじれ振子の周波数シフトと超流動密度との関係を求めることができる(感度較正)。その結果を使うと、絶対零度に外挿したときのL2相とC2相の超流動密度は、2層目  $^4\text{He}$  単原子層のそれぞれ  $0.4$  層と  $0.1$  層分に相当する。これは、原子スケールで平坦な単原子層液体の超流動KT転移を観測した初めての例である。さらに、量子液晶相でも初めて超流動性を観測した。そこでは液相に比べ超流動密度が約  $1/4$  まで減少することが分かった。これは定性的には理解できるが、よりミクロにはどのように新奇なトポロジカル欠陥が関与しているかなど、今後の量子液晶相に対する理論研究が待たれるところである。

今回製作した試料セルは、最低到達温度が  $60 \text{ mK}$ 、C2相での超流動密度の測定精度が約  $3\%$  という性能であった。今後は、性能をさらに上げた第二世代の試料セルを設計製作して、広い密度範囲でより精度の高い測定を行い、IC2相の超固体性の有無も含めて、この系の超流動性の全貌を明らかにしたい。また、量子液晶相の構造を直接観測するための実験(例えば、中性子散乱実験)の検討も始める。

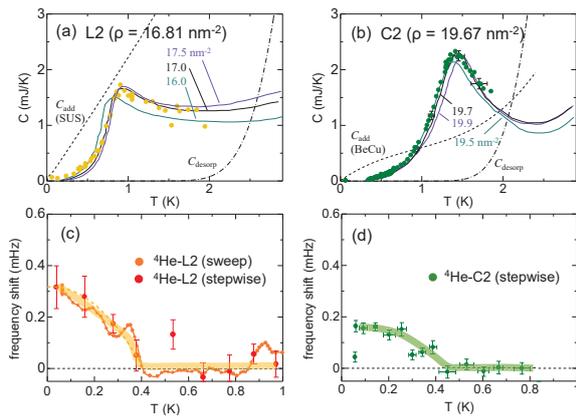


図 4.3.2: 2 層系  $^4\text{He}$  の 2 層目の液相 (L2) と量子液晶相 (C2) で測定した (a)(b) 熱容量と、(c)(d) ねじれ振子共鳴周波数シフトの温度依存性。(a)(b) 中の細実線は近傍面密度における先行実験の結果。(c)(d) は、原子スケールで平坦な単原子層液体の超流動 KT 転移と量子液晶の超流動転移の初めての観測例である。

### 4.3.2 グラフェンのエッジ状態の研究

グラフェンは炭素原子のハニカム格子からなる単原子層物質であり、その特異な 2 次元電子状態を利用した次世代のエレクトロニクス素子として、あるいは高い熱および電気伝導性や機械強度をもつ新素材として、基礎および応用の両面から世界中で活発な研究が展開されている。

グラフェンはジグザグ型とアームチェア型の 2 種類の端構造をもつ。副格子の対称性の破れから、ジグザグ端には“端状態”と呼ばれる特異な局在電子状態がフェルミエネルギー ( $E_F$ ) 近傍に形成されることを、我々は 2005 年に実験的に見出した。端状態のバンド幅は狭いので (フラットバンド)、わずかな摂動の下で、様々な不安定性が生じ得る。実際、ジグザグ端で挟まれたナノリボン (ジグザグ・グラフェン・ナノリボン; z-GNR) を作る事ができれば、同じ端内で強磁性的に、対向する端間で反強磁性的にスピン偏極すると理論予測されており、スピントロニクスの観点からも注目されている。先行実験は、端の原子レベルでの直線性、端終端の知見、データの再現性などに問題があり、まだ z-GNR のスピン偏極エッジ状態の決定的な確証は得られていない。

#### z-GNR におけるスピン偏極状態の観測

我々は、グラファイトを高温度で水素プラズマに曝すことで、その表面に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を多数作成する技術確立してきた。そして、昨年度、2 つのナノピットに挟まれた z-GNR に着目し、エッジ状態のスピン分裂を

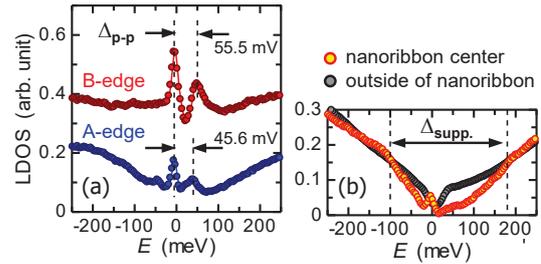


図 4.3.3: 幅 10 nm の z-GNR の (a) A 副格子端と B 副格子端のトンネルスペクトル。同じ z-GNR の (b) 中央 (赤丸) と外側 (黒丸) でのトンネルスペクトル。測定は  $T = 4.7$  K。

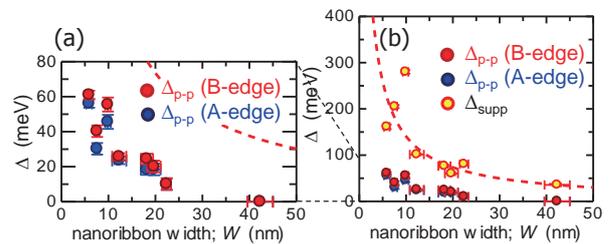


図 4.3.4: 様々な幅 ( $W$ ) をもつ z-GNR で観測した端状態のスピン分裂の大きさ ( $\Delta_{p-p}$ ) と、z-GNR 中央での  $dI/dV$  の落ち込みのエネルギー幅 ( $\Delta_{\text{sup}}$ )。A(B) 副格子端のデータを青 (赤) 丸で表す。(b) 中の赤点線は  $\Delta_{\text{sup}}$  の  $W$  依存性をフィッティングしたもの。

初めて観測することに成功した (図 4.3.3(a))。今年度は、多数の z-GNR についてより詳細な走査トンネル顕微/分光 (STM/S) 測定を行い、スピン分裂した 2 つのピーク間のエネルギー差 ( $\Delta_{p-p}$ ) がリボンの幅 ( $W$ ) にほぼ反比例することが分かった (図 4.3.4(a))。我々の試料は、バルクグラファイト表面を基板にした z-GNR と考えることができる。すなわち、z-GNR の片方のジグザグ端は下層グラフェンの炭素原子の直上に位置する A 副格子のみからなり、もう一方のジグザグ端はハニカムの中央に位置する B 副格子のみからなる。原子列を特定できる STM 画像 (ここには示していない) から、我々はその A(B) 副格子を同定できる。図 4.3.4(a) は、B 副格子端の方が A 副格子端より数 meV 系統的に  $\Delta_{p-p}$  が大きいことを示している。

一方、z-GNR の中央ではバルクグラファイト表面と比べて、 $E_F$  近傍で  $dI/dV$  が落ち込む様子が観測された (図 4.3.3(b))。このエネルギー幅 ( $\Delta_{\text{sup}}$ ) は  $\Delta_{p-p}$  より数倍大きく、z-GNR の幅にやはりほぼ反比例する (図 4.3.4(b))。これは z-GNR への量子閉じ込め効果、またはジグザグ端における副格子対称性の破れのいずれかに起因するものと考えられる。

### SiC(0001) 上にエピタキシャル成長させた単層/2層グラフェンへの水素プラズマエッチング

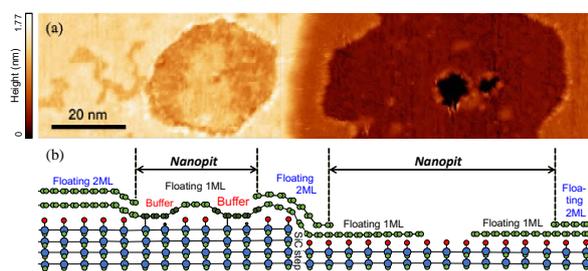


図 4.3.5: 水素プラズマ処理した SiC(0001) 上エピタキシャル・グラフェンの STM 像 (a) と、その断面の模式図 (b)。緑・青・赤丸はそれぞれ炭素・シリコン・水素原子を示す。ナノピット端での水素終端は図示していない。

前述の実験では、基板であるグラファイト表面と  $z$ -GNR の間の層間相互作用を無視することはできないので、基板を想定していない多くの理論計算と単純に比較するには注意を要する。そこで、実験的に異なる基板上的  $z$ -GNR のスピン分裂も測定してみる必要がある。それを念頭に、SiC(0001) 上にエピタキシャル成長させた単層あるいは 2 層グラフェンについても水素プラズマエッチングを試みた。この SiC(0001) 上グラフェンは、下層に基板の Si 原子と結合した炭素層 (バッファ層) をもち、その凹凸を反映して、STM では  $6 \times 6$  の長周期構造が観測される。また、基板から強く電子ドープされ、 $E_F$  周りの状態密度が非対称になることも知られている。

図 4.3.5 は、水素プラズマエッチングした SiC(0001) 上グラフェン試料表面の STM 像 (a) とその断面の模式図 (b) である。グラファイト表面同様、単原子層深さのナノピットが生成されている。ただし、反応性の違いや、既存の欠陥密度の高さを反映して、ピットサイズはやや大きく密度はより高い。加えて、ナノピットの形状は六角形から不定形まで分布が大きい。今後、直線性の高い端をもつ六角形ナノピットを作成できるパラメータ探しが必要となる。

図 4.3.5(a) の左側に見られるように、この試料にはナノピットの他に、表面が約  $0.12 \text{ nm}$  隆起した複雑な形状をもつテラスも形成されている。表面の原子列はテラスの境界をまたいで連続的につながっており、隆起したテラスでは、バッファ層由来の  $6 \times 6$  構造 (図 4.3.6(a)) が観測されない (図 4.3.6(c))。これらの事実は、最表面のグラフェンがバッファ層から浮いている、あるいはバッファ層と SiC 基板との結合が切れていることを示唆している。これはトンネル分光測定の結果からも支持される。すなわち、低いテラスは SiC(0001) 上グラフェンに特徴的な  $E_F$  ( $V_{\text{bias}} = 0$ ) に対して非対称な状態密度を示すのに対して (図 4.3.6(b))、隆起したテラスの状態密度はほぼ対称である (図 4.3.6(d))。最表面のグラフェンにとって、SiC

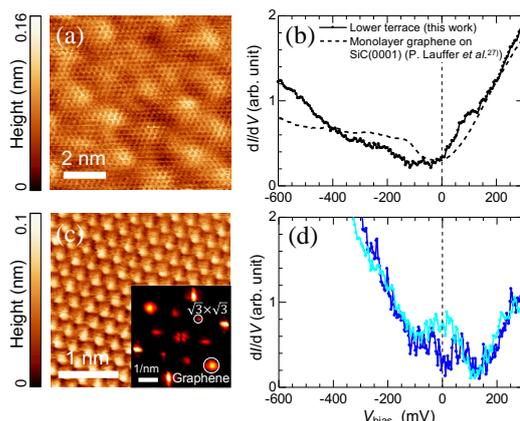


図 4.3.6: 水素プラズマ処理した SiC(0001) 上グラフェン上の低いテラスの STM 像には  $6 \times 6$  長周期構造が現れ (a)、先行研究と同様、 $E_F$  に対して非対称なトンネルスペクトルが観測される (b)。一方、隆起したテラスでは、グラファイト表面と同様の三角格子が STM 像に観測され (c: 挿入図はその FFT)、 $E_F$  に対して対称なスペクトルが得られる (d)。

基板との相互作用が弱まり電子ドープが減少し、電荷中性点 (ディラック点) が  $E_F$  に近づいたことを示唆している。

先行研究では、原子状水素が Si 原子と結合することでバッファ層とその上のグラフェンが基板から疑似的に“浮く”ことが知られている (Quasi-free standing graphene(QFSG))。水素プラズマエッチングでも同様に QFSG が得られたと考え、上記の測定事実とも整合する。ただし現状では、水素原子と結合していない Si 原子も存在しているようで、そうした欠陥に由来して、原子像にはわずかに  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  超周期構造が見られ (図 4.3.6(c) 挿入図)、トンネルスペクトルには低エネルギーに局在ピークが見られる (図 4.3.6(d))。今後、基板との相互作用が弱いより均質な QFSG の作成ができるようになれば、グラフェン研究に新たな展開をもたらす可能性もある。

本研究は、関西学院大学理工学部の日比野研究室との共同研究である。

### 4.3.3 極低温実験技術の開発

#### 小型サブミリケルビン連続冷凍装置

我々は、市販の希釈冷凍機や衛星に搭載できるほど小型で、 $0.8 \text{ mK}$  までの超低温度を連続発生できるサブミリケルビン連続冷凍装置の開発を進めている。磁気作業物質は増強核磁性体  $\text{PrNi}_5$  ( $0.2 \text{ mol}$ ) の核スピン系で、これを最大磁場  $1.2 \text{ T}$  の磁気シールド付小型超伝導マグネットに収めて核ステージとす

る。この2つの核ステージを2つの超伝導 Zn 熱スイッチを介して、試料と希釈冷凍機の間で直列接続するのが基本構成である。

今年度は、製作した磁気シールド付小型超伝導マグネットの性能テストを行った。マグネットは、外径 0.14 mm の NbTi 多芯超伝導線(フィラメント径 10  $\mu\text{m}$ 、54 本)で巻き、その寸法はボア径 22 mm、長さ 139 mm で、FeCoV 製の磁気シールドで囲まれている。 $T = 4.2$  K での実測で、設計通りのコイル定数 (0.23 T/A) をもち、最大磁場も 1.4 T を発生できることを確認した。軸方向の漏れ磁場もシミュレーションの結果とよく一致した。さらに、磁場掃引する際の線材の磁気ヒステリシス起源の発熱量を  $T = 4.2$  K の断熱真空中で実測した。1.4 T までの励磁・消磁 1 サイクルの間に、磁場掃引速度に依らず計 60 ~ 70 mJ 発熱することを確認した。この値は、別途行った線材の磁気ヒステリシス測定の結果から予想される 100 mJ と矛盾しない。以上、設計通りマグネットボビンと希釈冷凍機の分留器に熱アンカーすれば、クエンチや PrNi<sub>5</sub> ステージへの輻射熱が懸念されるようなマグネットの昇温は防げることが確認できた。

また、製作した超伝導 Zn 熱スイッチを希釈冷凍機に搭載して、スイッチ「開」時の熱絶縁性を  $70 \leq T < 900$  mK の温度範囲で実測した。結果は、超伝導転移温度 (= 852 mK) 以下では、Zn の超伝導状態における熱伝導率の文献値と良く一致し、転移温度以上では、別途実測した残留電気抵抗値 (= 114 n $\Omega$ ) から予測される値とほぼ一致した。今後は、磁場印加したスイッチ「閉」時の熱伝導度測定を行う予定である。

本研究は、本学低温センターの村川研究室と戸田技術専門職員との共同研究である。

#### <報文>

(原著論文)

- [1] André E. B. Amend, Tomohiro Matsui, Hideki Sato, and Hiroshi Fukuyama: STS Studies of Zigzag Graphene Edges Produced by Hydrogen-plasma Etching, *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*, **16**, 72-75 (2018).
- [2] Sachiko Nakamura, Daisuke Miyafuji, Ryo Toda, Tomohiro Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Characterization of Pyrolytic Graphite Sheet: A New Type of Adsorption Substrate for Studies of Superfluid Thin Films, *Journal of Low Temperature Physics*, **192**, 330-345 (2018).
- [3] Sachiko Nakamura, Takenori Fujii, Shoji Matsukawa, Masayuki Katagiri, and Hiroshi Fukuyama: Specific heat, thermal conductivity, and magnetic susceptibility of cyanate ester resins - An alternative to commonly used epoxy resins, *Cryogenics*, **95**, 76-81 (2018).
- [4] Jun Usami, Nobuyuki Kato, Tomohiro Matsui, and Hiroshi Fukuyama: The Role of Substrate Roughness in Superfluid Film Flow Velocity, *Journal of Low Temperature Physics*, published online on Dec. 2018 (DOI: 10.1007/s10909-018-02119-w).
- (国内雑誌)
- [5] 松井朋裕, 福山寛: グラフェンのスピン偏極ジグザグ端状態、平成 29 年度 低温センター年報 (東京大学低温センター) .
- (学位論文)
- [6] 宇佐美潤: 超流動 He フィルムフロー律速機構の研究と 2 次元新奇超流体の探索 (Study of the Rate-Limiting Mechanism of Film Flow in Superfluid Helium and Search for Novel Superfluids in Two Dimensions)(修士論文).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [7] Masahiro Kamada, Ryuji Nakamura, Katsuyoshi Ogawa, Tomohiro Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Quantum Phase Diagram of <sup>3</sup>He Monolayer on Hydrogen Plated Graphite, *International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018)*, (The University of Tokyo, Tokyo, Japan, July 25-31, 2018).
- [8] Jun Usami, Tomohiro Matsui, and Hiroshi Fukuyama: The Role of Substrate Roughness on the Superfluid Film Flow Rate of <sup>4</sup>He, *International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018)*, (The University of Tokyo, Tokyo, Japan, July 25-31, 2018).
- [9] Shohei Takimoto, Ryo Toda, Satoshi Murakawa, and Hiroshi Fukuyama: Development of a Compact and Low Heat-dissipation Shielded Superconducting Magnet Usable at Sub-mK Temperature, *International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018)*, (The University of Tokyo, Tokyo, Japan, July 25-31, 2018).
- [10] Tomohiro Matsui, André E. B. Amend, Hideki Sato and Hiroshi Fukuyama: STM/S Studies of the Spin Polarized Zigzag Graphene Edge States, *14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14) in conjunction with 26th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM26)*, (Sendai International Center, Sendai, Japan, October 21-25, 2018).
- [11] André E. B. Amend, Tomohiro Matsui, Ken-shiro Hara, Yi Lin Liu, Hiroki Hibino, and Hiroshi Fukuyama: H-plasma Etching of Graphene on SiC(0001), *14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14) in conjunction with 26th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM26)*, (Sendai International Center, Sendai, Japan, October 21-25, 2018).
- 招待講演

- [12] Tomohiro Matsui, André E. B. Amend, Hideki Sato and Hiroshi Fukuyama: STM/S Studies of the Spin Polarized Zigzag Graphene Edge States, Tsinghua University - the University of Tokyo Joint Symposium on Physics & Materials, (The University of Tokyo, Tokyo, Japan, July 20-21, 2018).
- [13] Masahiro Kamada, Ryuji Nakamura, Katsuyoshi Ogawa, Tomohiro Matsui, and Hiroshi Fukuyama: New Quantum Spin Liquids in  $^3\text{He}$  Monolayer on Hydrogen Plated Graphite, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018), (The University of Tokyo, Tokyo, Japan, July 25-31, 2018).
- [14] Hiroshi Fukuyama : Novel quantum phases of helium confined in two dimensions from quantum liquid-crystal to spin-liquid, 12th International Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals, (Wroclaw, Wojanów, Poland, Aug. 26-31, 2018).
- (国内会議)
- 一般講演
- [15] 戸田亮、瀧本翔平、植松祐真、村川智、福山寛：小型超低温連続冷凍システムの開発 II、2018 年度春季 (第 96 回) 低温工学・超電導学会 (東京、タワーホール船堀、2018 年 5 月 28-30 日)。
- [16] 寺岡総一郎、青井優樹、横田統徳、佐々木徹、宮武優、福山寛：走査型プローブ顕微鏡用ヘリウム循環冷却システムの熱解析 (III)、2018 年度春季 (第 96 回) 低温工学・超電導学会 (東京、タワーホール船堀、2018 年 5 月 28-30 日)。
- [17] 宇佐美潤、戸田亮、中村祥子、松井朋裕、福山寛：2 次元ヘリウム 4 における比熱と非古典的回転慣性の同時測定、日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学、2018 年 9 月 9-12 日)。
- [18] André E. B. Amend, Tomohiro Matsui, Ken-shiro Hara, Yi Lin Liu, Hiroki Hibino, and Hiroshi Fukuyama : H-plasma etching of graphene on SiC(0001)、日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学、2018 年 9 月 9-12 日)。
- [19] 福山寛：単原子層ヘリウム 3 の量子液晶相と量子スピン液体状態、物性研究所短期研究会「量子多体効果が生み出す液晶的電子状態」(東京大学、物性研究所、2018 年 12 月 27-28 日)。
- [20] 宇佐美潤、戸田亮、中村祥子、松井朋裕、福山寛：単原子層ヘリウム 4 の比熱と超流動性の同時測定装置の開発、第 10 回 低温センター研究交流会 (東京大学、2019 年 2 月 22 日)。
- [21] André E. B. Amend、松井朋裕、日比野浩樹、福山寛：STM/S Studies of H-plasma Etched Graphene on SiC(0001)、第 10 回 低温センター研究交流会 (東京大学、2019 年 2 月 22 日)。
- [22] 鈴木尚将、松井朋裕、村川智、福山寛：2 次元ヘリウム 3 の新奇量子スピン液体状態の解明に向けた低発熱 NMR セルの開発、第 10 回 低温センター研究交流会 (東京大学、2019 年 2 月 22 日)。

- [23] 瀧本翔平、戸田亮、村川智、福山寛：小型超伝導マグネットの開発、第 10 回 低温センター研究交流会 (東京大学、2019 年 2 月 22 日)。
- [24] 戸田亮、瀧本翔平、村川智、福山寛：小型連続核断熱消磁冷凍機実現に向けた小型熱スイッチの開発、総合技術研究会 2019 九州大学 (九州大学、2019 年 3 月 6-8 日)。
- [25] 宇佐美潤、戸田亮、中村祥子、松井朋裕、福山寛：2 次元ヘリウム 4 における比熱と非古典的回転慣性の同時測定 II、日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学、2019 年 3 月 14-17 日)。
- [26] 瀧本翔平、戸田亮、村川智、福山寛：小型連続核断熱消磁冷凍機用超伝導マグネットの開発、日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学、2019 年 3 月 14-17 日)。
- [27] 横井雅彦、河村智哉、藤原聖士、荒川智紀、福山寛、新見康洋、小林研介：表面弾性波照射による層状超伝導薄膜の伝導特性の変調、日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学、2019 年 3 月 14-17 日)。

## 招待講演

- [28] 福山寛：単原子層ヘリウム 3 で見つかった 2 種類の量子スピン液体状態、日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学、2019 年 3 月 14-17 日)。

## (セミナー)

- [29] 福山寛：2 次元ヘリウム 3 系で見つかった 2 種類の量子スピン液体磁性について、大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻理論物質学グループにてセミナー講演 (2018 年 5 月 15 日)。
- [30] 福山寛：静岡県立静岡東高校による東京大学低温センター見学会にて講義 (2018 年 8 月 7 日)。
- [31] 福山寛：STS Observations of the Spin-Polarized Edge State in Zigzag Graphene Nanoribbons, 台湾国立交通大学 (新竹、台湾) にて教室セミナー (2018 年 11 月 19 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。 $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  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形成される 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。我々のグ

ループでは、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を確立し、整数量子ホール効果などの現象の観測に成功している。

#### 半導体劈開表面に形成された2次元電子系を用いた新奇な磁性不純物効果の探索

我々の研究室では吸着原子が誘起する表面2次元電子系に対して、走査トンネル分光顕微鏡 (STM/S) による観測と電気伝導測定を同時に行える装置を用いて、微視的・巨視的な側面から量子ホール効果の研究を行ってきた。最近では、吸着原子に磁性体を用いて、スピンの絡む新奇な物理現象の探索を行っている。磁性不純物を吸着させる半導体表面に高電子移動度をもつ2次元電子系を作成しているため、STM/Sを用いた測定からスピンの情報を含んだトンネル電流を観測することが可能であると考えている。これまで Fe や Co などを用いた2次元電子系の作成に成功し、STM/Sによる磁性不純物の空間分布の観測に成功している。今後、局在スピン(磁性不純物)と伝導電子、局在スピン間の交換相互作用をトンネル分光法により実空間で精密に測定することにより、新奇な磁気物理現象の観測を目指す。

#### 4.4.2 金属超薄膜の超伝導

近年、我々のグループでは、GaAs 絶縁基板の劈開表面上に形成された金属超薄膜に対する研究を行っている。劈開表面の平坦さを反映して、Pb および In に対して単原子層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。

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ている。

#### 面内磁場印加可能な極低温走査トンネル顕微鏡の開発

半導体表面に形成された単原子層超伝導体は半導体基板と真空に挟まれているため、2次元面に対して垂直方向にポテンシャル勾配が生じ、空間反転対称性が破れている。さらに、Pb などの重い原子を用いた場合、強いスピン軌道相互作用により大きな Rashba 効果が生じ、スピン方向に依存してフェルミ面が分裂した系が実現すると考えられている。このような系において、強い面内磁場を印加した場合、有限の運動量をもったクーパー対が実現する可能性がある。我々は、この FFLO 状態に類する超伝導状態の実空間での直接観測を目指している。現在、ヘリウム3 冷凍機温度で動作する面内磁場印加可能な走査トンネル顕微鏡の開発を行っている。

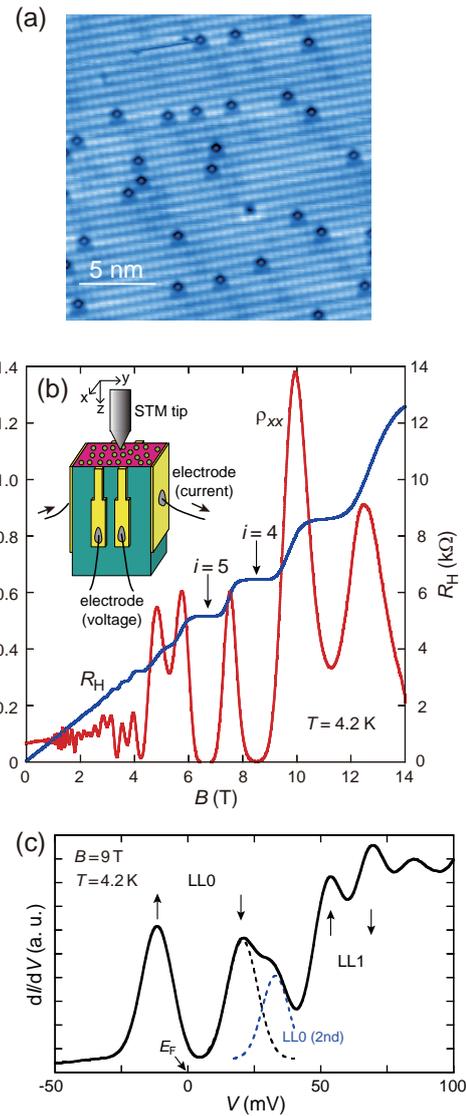


図 4.4.1: (a) InSb 劈開表面に鉄を 0.01 ML つけた場合の STM 像 ( $20 \times 20 \text{ nm}^2$ )。黒い輪郭を持った丸が Fe であり、明るい縞模様が Sb の格子である。(b) 4.2 K における縦抵抗率とホール抵抗の磁場依存性。明瞭な整数量子ホール効果が観測されている。(c) 走査トンネル分光の測定例。微分コンダクタンスから2次元電子系の状態密度を調べることができる。ここでは、スピン分裂したランダウ準位が観測されている。

#### 多重単原子層膜における超伝導状態に関する研究

空間反転対称性が欠如した超伝導体では有限の重心運動量をもつ Cooper 対の形成や空間変調する超伝導秩序変数の実現など興味深い物理現象が引き起

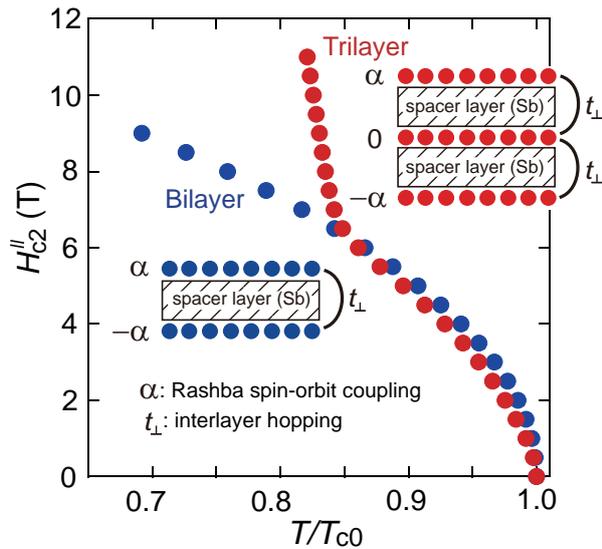


図 4.4.2: 2.0 nm の Sb をスペーサー層として、Pb 単原子膜を二層あるいは三層重ねた試料における臨界磁場の温度依存性。磁場は膜面に平行に印加しており、横軸はゼロ磁場における超伝導転移温度  $T_{c0}$  を用いて規格化している。三層系試料において、複素ストライプ相からヘリカル相へのクロスオーバーに起因すると考えられる急激な立ち上がりが、高磁場・低温領域で観測された。

こされることが知られている。近年、我々は GaAs 劈開表面上に Pb の単原子層超伝導体の作成に成功した。この系では単原子層超伝導体が GaAs 基板と真空に挟まれているため空間反転対称性が破れている。さらに、Pb 自身の強いスピン軌道相互作用により Rashba 型のスピン軌道相互作用が働くことが期待される。関原らはこの系に対して詳細な平行磁場下における電気抵抗測定の結果から、クーバー対が有限の重心運動量をもつ不均一な超伝導状態が実現している可能性を指摘した (T. Sekihara, R. Masutomi, T. Okamoto, Phys. Rev. Lett. (2013))。

今年度はこの Rashba スピン軌道相互作用が強い Pb の単原子層超伝導体とスペーサー層に Sb を用いて、層に依存した Rashba スピン軌道相互作用をもつ二層膜および三層膜を作成した (図 4.4.2 挿入図)。また、これらの系における電気抵抗測定により求めた平行上部臨界磁場の温度依存性を図 4.4.2 に示す。スペーサー層の厚みが 2.0 nm の二層系では平行上部臨界磁場は二次元の GL 理論から期待されるような温度に対して平方根の依存性をもって変化することがわかった (図 4.4.2 青丸)。一方、三層系の場合では高磁場・低温領域において平行上部臨界磁場の急激な立ち上がりが観測された (図 4.4.2 赤丸)。この振舞いを説明するために、層に依存した Rashba スピン軌道相互作用をもつ多層系の超伝導状態を BdG

方程式を数値的に解く手法により求めた (数値計算に関しては京大理の柳瀬氏にして頂いた)。この数値計算の結果から高磁場・低温領域での急激な立ち上がりは、超伝導秩序変数の振幅と位相の両方が変調する (磁場誘起による) 複素ストライプ相から独立した層の振舞いであるヘリカル相へのクロスオーバーに起因していることがわかった。したがって、本研究では多重単原子層膜において複素ストライプ状態およびヘリカル状態を実験的に初めて観測した結果であると考えられる。

さらに、Rashba スピン軌道相互作用と軌道対破壊効果の競合から生じる奇パリティ超伝導状態であるペア密度波相を探索するため、田代が中心となり、スペーサー層に高い絶縁性をもつ Se を用いた多層系の研究も行った。このセレンを用いた多層系ではスペーサー層の厚みを上述の Sb を用いた場合より薄くできるため、軌道対破壊効果の影響を制御して超伝導状態の研究を行うことが可能である。実際の測定においてはスペーサー層の厚みを 1/3 程度に減少させることには成功したが、ペア密度波相の観測には至らなかった。この系で実現が期待されているペア密度波状態はトポロジカルに非自明になる非常に興味深い超伝導状態である。したがって、今後、単原子層超伝導物質やスペーサー層の種類を変化させ系統的な研究を行う予定である。

## 2次元超伝導体における非相反伝導に関する研究

空間反転対称性と時間反転対称性が破れた系では電流-電圧特性が電流の向きに依存する非相反伝導が期待される。通常、この効果は比較的小さな補正項であるが、超伝導物質を用いた場合、非常に大きな非相反伝導が観測されることが知られている。さらに、この効果を利用した超伝導整流デバイスなどへの応用も期待されている。

本年度は、我々が近年研究を行ってきた空間反転対称性が破れた GaAs 劈開表面上の単原子層の鉛で非相反伝導が観測されるか検証を行った。第二高調波から得られた電気抵抗が磁場に対して反対称になることから、GaAs 劈開表面上の単原子層の鉛においても非相反伝導が観測されることが明らかになった。来年度はさらに系統的な測定を行い、非相反伝導が生じる機構を解明する予定である。

## 超伝導に対する磁性体の効果

Pb などの超薄膜において、Rashba 相互作用がもたらす新奇な 2次元超伝導相が実現されていることを検証するための有力な方法の一つとして、近接させた磁性体の影響を調べることが挙げられる。例えば、中央にスピンフィルターとなる強磁性体層を配置した障壁を介してトンネル結合させた Pb 単原子層の 2層構造試料を用いた実験により、スピン三重項成分からの寄与を選択的に取り出すことが期待できる。ただし、このような試料を作製するための前

提条件として、1層系の超伝導に対する磁性体の影響を十分に理解しておく必要がある。

これまで異なる種類の磁性体を不純物として加えたPb超薄膜に対して研究を行い、平行磁場の測定から、スピン状態を調べてきた。特に磁性不純物としてCeを用いた場合には、明瞭な磁場誘起超伝導が観測される(M. Niwata, R. Masutomi, T. Okamoto, Phys. Rev. Lett. (2017))。磁場によって超伝導が壊されることは1914年のKamerlingh Onnesの実験以降、広く知られているが、磁場によって超伝導が誘起される現象はこれまでに数例しか報告されていない。スピン三重項超伝導体と考えられているURhGeを除くと、いずれもJaccarino-Peter (JP) 機構によって説明されているが、我々のPb-Ce合金超薄膜に対しては、パウリ常磁性効果が非常に抑制されていることと、平均場がゼロであるはずのゼロ磁場で超伝導が最も不安定であることなどから、JP機構は適用できない。一方で、KharitonovとFeigelmanが提唱した磁場による磁気散乱の抑制効果のモデル計算を用いると、超伝導転移温度の磁場依存性を定量的に再現することができた。

磁気モーメントと伝導電子との相互作用は、4fより3d遷移元素の方が大きい。実際、Ceの場合とは対照的に、MnやCrをわずかに蒸着するだけでPb超薄膜の超伝導転移温度は大きく下がる。しかし、MnやCrをPb超薄膜に直接乗せた場合には、Pb-Ce合金超薄膜で見られたような平行磁場による超伝導転移温度の上昇は見られない。我々は、交換相互作用が強すぎるために近藤一重項が形成され、磁気モーメントが見かけ上消失したためだと考えた。 $T_K \gg T_{c0}$ において、近藤一重項の形成はクーパ対に参加する電子の数を減らし、実効的な斥力として働く。 $T_K$ が下がるほど、フェルミ面近くの電子の寄与が大きくなって、不純物量に対して超伝導転移温度が敏感に変化する。一方で、 $T_K \ll T_{c0}$ では、感度は交換相互作用の大きさの自乗に比例する。Ceの場合は、この領域にあると考えている。もし、このモデルが正しい場合には、交換結合定数がMnやCrよりも大きな、Fe、Co、Niを用いた場合、フェルミ面から離れた電子の寄与が主となり近藤一重項が形成されるため、超伝導の破壊効果がかえって弱くなるはずである。本年度、田代が中心となり、これらの蒸着物質に対する影響を調べたところ、Pb超薄膜の超伝導転移温度の変化率は、原子番号の増加とともに急速に小さくなり、モデルと矛盾しない結果となった。

#### 4.4.3 ビスマス超薄膜の電気伝導

伊藤が中心となり、GaAs劈開表面に形成されたビスマスの超薄膜に対する研究を行った。急冷蒸着法で作製したBi超薄膜は、Pb超薄膜と同様に、平行磁場に対して頑強な超伝導を示す。極低温から昇温させていくと、数10ケルビンで電気抵抗が不連続に数倍に増大するが、さらに室温近くまで昇温すると、抵抗は不可逆的に大きく減少する。金属的なアモルファス状態から、半金属的な状態に構造相転移した後、熱処理効果によって移動度が上昇した結果

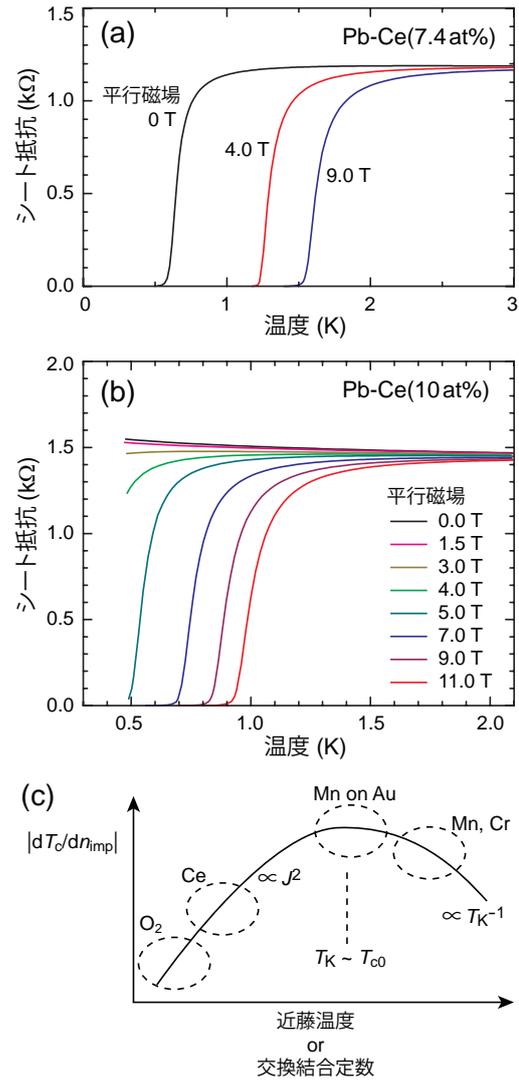


図 4.4.3: Pb-Ce 合金超薄膜で観測された磁場誘起超伝導。(a) 7.4%のCeを含む合金超薄膜のシート抵抗の温度依存性。平行磁場の印加とともに超伝導転移が高温側にシフトしている。(b) 10%のCeを含む合金超薄膜のシート抵抗の温度依存性。この試料ではゼロ磁場では超伝導は観測されず、平行磁場中でのみ超伝導が出現する。(c) 磁性原子濃度に対する超伝導転移温度の変化率が交換結合の大きさによって変化する様子を示した概念図。

として理解できる。その後の冷却では、電気抵抗は緩やかな減少を示すものの、超伝導は観測されなくなった。近年、トポロジカル物性の観点などから、SiやGe上に成長したBi超薄膜の研究が盛んに行われているが、GaAs(110)上においても結晶性の高い超薄膜が形成されたと考えている。

再冷却後の超薄膜に対して垂直方向に最大 9T 磁場を印加すると、2 倍程度の大きな正の磁気抵抗効果が観測された。平行磁場依存性が小さかったことと、磁性元素が含まれていないことから、電子の軌道運動に対する磁場の影響以外の原因は考えにくい。一方で、電子の軌道運動に対する磁場の影響が大きい場合に期待される Hall 抵抗は非常に小さく、9 T においても縦抵抗の 1 % 以下であった。ローレンツ力が電子と正孔で逆方向になるため、Hall 抵抗が打ち消しあっていることが考えられる。ただし、バルクのビスマスに対する解析でよく用いられる 2 キャリアモデルで今回の結果を説明するためには、電子と正孔が、キャリア密度だけでなく、移動度についてもほぼ等しい（数%以内の差）と仮定する必要がある。バルクの半金属ビスマスでは、電子と正孔の有効質量が異なるため、Hall 抵抗がキャンセルされることはない。我々の超薄膜において、グラフェンのディラックコーンのような、上下対称な分散関係が作られたことが可能性の一つとして考えられる。来年度、詳細な測定を行い、これを検証する。

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [1] R. Masutomi, S. Tashiro, T. Okamoto, Y. Yanase: Observation of crossover from a complex-stripe phase to a helical phase in multiple one-atomic-layer films, 23th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (口頭発表), July 22 to July 27, 2018, Toulouse, France.
- [2] R. Masutomi, S. Tashiro, T. Okamoto, Y. Yanase: Observation of crossover from a complex-stripe phase to a helical phase in multiple one-atomic-layer films, 31th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2012) (口頭発表), July 29 to August 3, 2018, Montpellier, France.

## 4.5 島野研究室

島野研究室では、レーザー光を用いて固体中の電子の集団に創発する量子現象の探求、新たな素励起(粒子)の探索、未知の量子相の探求に取り組んでいる。光を用いた固体中のマクロな量子状態の操作、光によるマクロ量子状態の創発を目標として、可視光の超短光パルスからテラヘルツ波と呼ばれる波長 0.3 mm 程度の電磁波パルス領域にわたる広いエネルギー範囲の先端光源開発、非線形レーザー分光法、超高速分光法などの観測技術の開発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 超伝導体

#### 銅酸化物高温超伝導体におけるテラヘルツ第 3 高調波発生

ヒッグスモードは超伝導体の秩序変数の振幅の振動に対応する集団励起であり、その観測は超伝導の秩序変数を高い時間分解能で光学的に検出する新しい手法として注目を集めている。特に銅酸化物高温超伝導体においては、電荷密度波などの超伝導と競合する秩序の解明や、それら多重秩序の光による制御が模索されており、ヒッグスモードの観測はその強力なプローブとなることが期待される。

昨年我々は、銅酸化物超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  (Bi2212) において、高強度のモノサイクルテラヘルツ波パルス照射による秩序変数の強制振動信号としてヒッグスモードを捉えることに世界で初めて成功した。今年度は、入射テラヘルツ周波数  $\omega$  と超伝導ギャップエネルギー  $2\Delta$  との関係性を詳しく調べることでその固有エネルギーを明らかにすることを目指した。このために高強度かつ狭帯域なテラヘルツ波パルス光源が必要となり、ドイツ・ドレスデンの Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf 研究所の加速器施設にある超放射テラヘルツ波光源 TELBE において、3 種類の銅酸化物超伝導体  $\text{Bi}2212$ 、 $\text{La}_{1.84}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$ 、 $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  に対してテラヘルツ第 3 高調波の観測実験を行った。いずれの試料においても超伝導状態で第 3 高調波の観測に成功した。第 3 高調波の強度は超伝導転移温度  $T_C$  以下で急増し、また入射テラヘルツ波の偏光に依存しないことから、この第 3 高調波はヒッグスモードに起因すると結論づけた。また、第 3 高調波の強度は低温に向かって単調に増加し、 $s$  波超伝導体のようなヒッグスモード共鳴は観測されなかった。この結果は、銅酸化物  $d$  波超伝導におけるヒッグスモードがオーバーダンプモードであることを示唆している。さらに、第 3 高調波の時間波形から、 $T_C$  以下で位相が急峻に反転する温度があることを見出した。これは、ヒッグスモードに加えて新たな集団励起モードが存在する可能性を示唆しており、その解明を進めている。

#### ヒッグスモードを用いた銅酸化物高温超伝導体における超伝導ゆらぎの観測

先に述べたヒッグスモード観測の応用として、銅酸化物高温超伝導体における超伝導ゆらぎを調べた。超伝導ゆらぎは転移温度以上でのクーパー対形成と関連しており、銅酸化物超伝導体においてそれがどの温度から発達しているかは超伝導発現機構にも関連して重要な問題である。このため、超伝導ゆらぎはテラヘルツ帯の光学伝導度やネルンスト効果など様々な実験手法を用いて調べられてきたが、超伝導ゆらぎのオンセット温度は手法ごとに異なり、統一的な理解は得られていない。一方、ヒッグスモードは超伝導の位相コヒーレンスの発達に起因するため、位相コヒーレンスのオンセット温度を直接決定する手法になると考えられる。

我々はテーブルトップのレーザーシステムで発生させた高強度テラヘルツ波パルスを Bi2212 薄膜試料に照射し、誘起されたヒッグスモードを近赤外光パルスの反射率変化を通して測定した。さらに、テラヘルツ周波数帯の光学伝導度を測定し、2 流体モデルにより超流動密度を求め、ヒッグスモードの信号の温度依存性と比較した。2 種の正孔ドーパ濃度の試料においてヒッグスモードの信号強度はテラヘルツ周波数帯の光学伝導度から求めた超流動密度と類似した温度依存性を示し、さらに両者のオンセット温度は一致することが分かった。さらに、近年ヒッグスモードを観測した 5 種の正孔ドーパ濃度の Bi2212 単結晶試料におけるヒッグスモードの温度依存性から、Bi2212 における超伝導ゆらぎのオンセット温度が全ての正孔ドーパ濃度の試料において  $T_C$  よりも 10–30 K 程度高いことを明らかにした。

今後はヒッグスモードをプローブとして、光による銅酸化物超伝導体の超伝導コヒーレンスの増強を調べていく予定である。

#### 光励起した際の銅酸化物超伝導体のジョセフソンプラズマ共鳴のダイナミクス

銅酸化物超伝導体は、超伝導を担う銅酸化物面と絶縁ブロック層とが  $c$  軸方向に積層した構造を有する。超伝導転移を示す銅酸化物面内のクーパー対がジョセフソン効果により層間をトンネリングできるようにする。この  $c$  軸方向のクーパー対の集団運動はジョセフソンプラズマ共鳴と呼ばれ、テラヘルツ帯の  $c$  軸反射率スペクトルに急峻なプラズマエッジとして現れる。ジョセフソンプラズマは  $c$  軸超伝導コヒーレンスの発達を表すことから、近年では光誘起超伝導状態を見るプローブとして用いられている。しかし、光誘起超伝導状態に関しては依然として研究例に乏しく、またそのメカニズムや超伝導と競合する秩序との関連についても未解明な部分が多い。そこで我々は、近赤外ポンプ-テラヘルツプローブ分光の系を構築し、典型的な銅酸化物超伝導体の一つである  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  を用いて、銅酸化物超伝導体における光励起非平衡状態をジョセフソンプラズマ共鳴の観測をプローブとして調べた。

$\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  の不足ドーパ ( $x = 0.125$ ) から最適ドーパ ( $x = 0.15$ ) のサンプルを用いて、超伝導状態において近赤外光を用いて励起した際の  $c$  軸方向のテラヘルツ応答を調べた。その結果、いずれのドーパ濃度においても、励起強度を強めることによってジョセフソンプラズマ周波数が低周波側へとシフトしていく様子が見られ、その状態が光励起後数 100 ps 経過した後も残存することがわかった。光励起後に定常的に現れるスペクトルの様子は、光励起により生じるサンプルの熱化の影響を考慮したシミュレーションにより再現した。さらに、従来用いられてきた近赤外ポンプとテラヘルツプローブのサンプルへの侵入長の違いを考慮する解析手法が、必ずしも正しいスペクトルを再現せず実験結果にアーティファクトを与える可能性を指摘した。今後は、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  の実験により得られた光励起状態に関する知見を踏

まえて、新たな銅酸化物超伝導体における光誘起超伝導状態や新奇な光誘起相の探索を目指す。

#### マルチバンド超伝導体における集団励起の非線形テラヘルツ光応答

近年の非線形テラヘルツ分光法の発展により、従来は困難であった超伝導体におけるヒッグスモードの観測が可能となり、大きな注目を集めている。それに伴い、超伝導体の非線形光応答に関する理論的研究も急速に進展し、BCS 理論で無視された対形成相互作用の遅延や不純物散乱の効果が重要な役割を果たすことが明らかになってきた。しかし、こうした理論的考察は単一のフェルミ面を持つ超伝導体に限られており、複数のフェルミ面を持つマルチバンド超伝導体における効果は調べられてこなかった。MgB<sub>2</sub> や鉄系超伝導体といったマルチバンド超伝導体では各フェルミ面に一つの秩序変数が割り当てられるため、ヒッグスモードが複数現れるだけでなく、レゲットモードと呼ばれる位相差の固有振動も現れることが予想されている。そこで、BCS 理論を越えた効果がマルチバンド超伝導体の集団励起及び個別励起（ボゴリューボフ準粒子）の非線形光応答に与える影響について、統一的に理解することが求められている。

そこで、我々は特に非磁性不純物散乱による効果に着目してマルチバンド超伝導体の光応答を調べた。具体的には、不純物散乱の効果を光学遷移の行列要素に繰り込む Mattis-Bardeen の方法を採用し、密度行列の運動方程式を解いて系の時間発展を求めた。まず線形応答では、低温において超伝導ギャップのところに吸収端が現れる。これは実際の試料においても妥当な応答であり、従来のマルチバンド超伝導体の理論では記述できないことから、我々のモデルの妥当性を示している。次に二次の応答を調べることで、超伝導秩序変数のうち虚部の運動は実部の運動よりも小さいことがわかった。これは光によって誘起されたレゲットモードの振幅がヒッグスモードの振幅よりも小さいことを意味する。その起源は、不純物散乱が実部の運動を増強するのに対して、虚部の運動には関与しないことにある。さらに三次の応答を調べることで、超伝導体による第三高調波発生はヒッグスモードに支配されることが分かった。個別励起の寄与はそれに比べて一桁ほど小さく、レゲットモードの寄与は散乱レートとフェルミエネルギーの比によって決まるが、通常は数桁小さい。以上により、超伝導体の非線形テラヘルツ光応答について、振幅と位相の寄与を考える統一的な基盤が得られたものと考えられる。

#### マルチバンド超伝導体 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 薄膜のヒッグスモード

鉄系超伝導体  $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$  は  $\Gamma$  点にホールバンド、M 点に電子バンドを持ち、それぞれのフェルミ面に異なる大きさの超伝導ギャップが開くマルチバンド超

伝導体である。そのクーパー対形成にはバンド間相互作用が重要な役割を果たしていると考えられており、ギャップの対称性などが盛んに議論されている。複数の秩序変数に対応して少なくとも2つの振幅モード(ヒッグスモード)が存在し、ヒッグスモードにもバンド間相互作用の影響が現れることが期待される。そこで我々は未だ観測例のない、鉄系マルチバンド超伝導体のヒッグスモードの研究を行なった。パルスレーザー堆積法により作成されたCaF<sub>2</sub>基板上のFeSe<sub>0.5</sub>Te<sub>0.5</sub>薄膜に対してTHz波を用いたポンプ-プローブ分光を行い、非平衡状態の光学伝導度を測定することでヒッグスモードの観測を試みた。ポンプ光として電場尖頭値4 kV/cm、中心周波数0.6 THzのマルチサイクルTHz波を照射すると、THz周波数領域の光学伝導度にポンプTHz波の自乗波形に追従した振動が観測された。この振動は超伝導転移温度以下でのみ現れ、ヒッグスモードと考えられる。特に $\Gamma$ 点の超伝導ギャップエネルギー( $2\Delta_{\Gamma} \approx 1$  meV)に相当する低周波数領域ではギャップエネルギーと超流動密度の振動が明瞭に観測された。一方でM点のギャップに相当する高周波領域(> 6 meV)でも振動が観測され、低周波と高周波で振動の位相が逆相となっていることが明らかになった。2バンド系のギンツブルグーランダウ(GL)モデルを用いて考察を行った結果、観測された振動は強いバンド間相互作用によって結合したヒッグスモードに由来すると解釈できることがわかった。

#### 鉄系超伝導体 FeSe 薄膜の中赤外光励起キャリアダイナミクス

FeSeは超伝導秩序の他に電子の軌道秩序を示し、他の鉄系超伝導体と異なり反強磁性秩序が現れないことが特徴で、超伝導と軌道秩序の相関を調べる上で重要な物質である。有効フェルミエネルギーが極端に小さいことが知られており、イオンゲートによる電子注入によって $T_c$ が大幅に増強するなど、フェルミ面のトポロジーと超伝導の相関が示唆されている。我々は光キャリア注入によってFeSeの相制御を実現することを目指し、FeSe薄膜の中赤外光ポンプ-THz光プローブ分光を行なった。本研究の初期段階として、 $\Gamma$ 点のホールバンドとM点の電子バンドに由来するキャリアの基本的な性質を広い温度領域で決定するためにTHz磁気光学測定を行った。最大で7 Tの磁場を印加しながらFeSe薄膜試料を透過したTHz波の偏光回転角・楕円率を測定し、求めた光学ホール(Hall)伝導度から電子・ホールそれぞれのキャリアの密度・有効質量・散乱時間を決定した。このようにキャリアの性質とTHz周波数領域での応答を理解した上で、 $\Gamma$ 点のバンド間遷移に対応すると考えられる光子エネルギー0.5 eVの中赤外励起によるダイナミクスを調べた。その結果 $T_c$ 以下で、2 meV以下に過渡光学伝導度虚部の増加が見られ、逆に2 meV以上では減少が観測された。これはマルチバンド超伝導体であるFeSeの小さい方の超伝導ギャップを与えるM点の超流動密度が増加した一方で、大きい方の超伝導ギャップを与える $\Gamma$ 点の超流動密度が減少したことに対応すると考えられる。中

赤外励起光の光子エネルギー依存性を調べると、バンド間遷移のエネルギーより小さい非共鳴励起でも同様の振る舞いが観測された。この結果は、観測された超伝導増強の兆候は光励起キャリア由来ではなく、フォノンなどの他の低エネルギーの励起によるものであることを示唆している。観測された信号が超伝導増強かどうか、その微視的機構の解明と合わせて今後系統的な測定を行っていく予定である。

#### 遷移金属ダイカルコゲナイド TaSe<sub>2</sub> の非平衡ダイナミクス

電荷密度波(CDW)相及び超伝導相を示す遷移金属ダイカルコゲナイド3R-TaSe<sub>2</sub>薄膜の電子相制御を目的として、ポンプ-プローブ分光を行った。ポンプ光として電場尖頭値34 kV/cm、中心光子エネルギー2.9 meVのモノサイクルTHz波を照射すると、光学伝導度実部において1.7 THz=7 meV以下のスペクトルウェイトが減少することを観測した。これは状態密度に7 meVのギャップが開いたことを示唆している。差分光学伝導度虚部の分散型の形状から、この光誘起相が平衡状態にはない新たなCDW相であることを示唆する結果を得た。このギャップ的構造は、CDW転移温度以下において発達していくことから、平衡状態のCDW相を始状態として光励起により生じる隠れたCDW相である可能性が高い。同様の光誘起相変化は光子エネルギー1.5 eVの近赤外光励起に対しても観測されたが、励起後初期の1 ps程度の時間ではTHz波励起の方がより明確なギャップ構造が誘起されることもわかった。さらに、THz波励起の場合は、新たなギャップ形成が、振動数2.5 THzの振動を伴って発達する様子が観測された。この2.5 THzの振動は、ラマン分光の先行研究において見られる平衡状態のCDWの振幅モードの振動数に一致していることから、光誘起相と平衡状態のCDW秩序との間には相関の結合があることを示していると考えられる。

#### 電流注入によるヒッグスモードの赤外活性化

超伝導秩序変数の振幅の振動モードであるヒッグスモードは、電気・磁気分極を伴わないので、電磁波と線形には結合せず、線形応答としては観測できない。しかし、最近、超伝導体に直流電流を印加すると、電流に平行な電場成分を持つ偏光の電磁波とヒッグスモードが線形に結合し、光学伝導度スペクトルの実部において、超伝導ギャップのエネルギー( $\omega = 2\Delta$ )に共鳴ピークが現れることが理論的に提案された。そこで我々は、図4.5.1(a)のようなセットアップで、s波超伝導体であるNbNの薄膜(26 nm厚、 $T_c = 14.5$  K)に、臨界電流密度( $\approx 3$  MA/cm<sup>2</sup>)に匹敵する直流電流を流しながら弱いTHz波を入射させ、透過したTHz波を時間分解測定することで、直流電流の注入による光学伝導度の変化を求めた。その結果、測定する偏光の方向が電流と平行な配置において、超伝導ギャップ付近に、図4.5.1(b)に示すよ

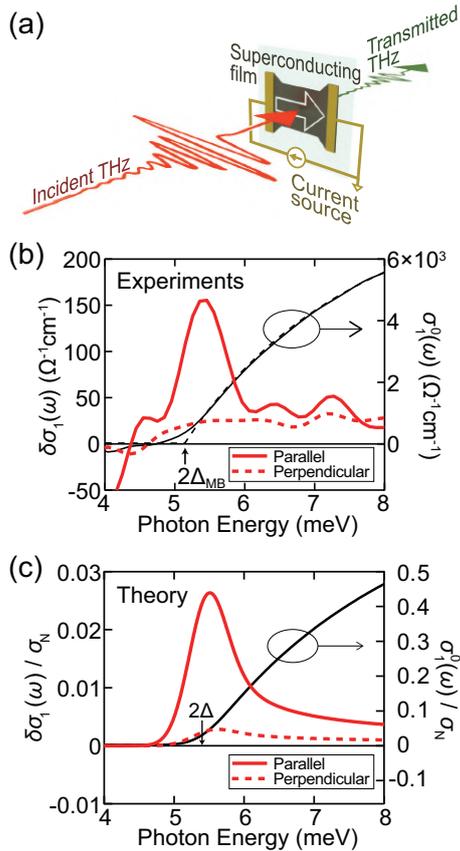


図 4.5.1: (a) 電流注入下における透過配置テラヘルツ時間領域分光のセットアップ (b)  $T = 5 \text{ K}$ ,  $I = 2.6 \text{ A}$  における直流電流と平行・垂直な偏光の光学伝導度変化 (c) ギャップ  $2\Delta = 5.4 \text{ meV}$ , 幅  $\Gamma = 0.6 \text{ meV}$  を用いて理論計算から期待される光学伝導度変化

うな電流密度の 2 乗に比例するピークが観測された。電流と偏光が直交する配置では、同じく図 4.5.1(b) に示したように、このピークは消失する。これらの特徴に加えて、ピーク強度も、先述の理論に則った計算結果 (図 4.5.1(c)) にオーダーで一致した。やや厚い試料との比較では、超伝導ギャップの拡大に連動して、このピークのエネルギーも高くなることを確認した。測定温度を上げていくと、超伝導ギャップの縮小とともにピークのエネルギーが低下し、ピークの幅は拡大していくが、光学伝導度の偏光依存性を注意深く調べると、超伝導転移温度の極近傍まで、このピークは観測された。

以上のように、電流注入によってヒッグスモードを赤外活性化し、観測する手法を確立した。この手法を用いれば、ヒッグス分光の対象を、d 波超伝導体、CDW 等競合する秩序との関連の研究にも広げることができると期待される。今後は、この手法をより広範な対象に適用する予定である。

## 4.5.2 半導体電子正孔系

### 直接遷移型半導体 GaAs における光誘起電子正孔 BCS 状態

半導体中の励起子は電子と正孔が束縛された準粒子であり、極低温・低密度においてボース・アインシュタイン凝縮する。一方、高密度になるとクーロン相互作用が遮蔽されて励起子は不安定化するが、十分低温では弱いながらも電子正孔対の束縛が回復し、凝縮して電子正孔 BCS 状態になると考えられている。これらの凝縮相は理論的には古くから予想されているものの、実験的には電子正孔系を十分に冷やすのが難しく、特に高密度側の凝縮相は長い間観測されていない。しかし、直接遷移型半導体における秩序変数が巨視的な電気分極であり、光と結合した量であることから、コヒーレントなレーザー光励起によって凝縮相を直接誘起することができると期待される。

そこで、我々は円偏光基底の近赤外ポンプ-近赤外プローブ分光法により、励起子を共鳴励起している間の過渡吸収スペクトルを測定した。この結果、励起子吸収線の分裂が観測された。比較的弱い励起強度において、これは励起子が光子の衣をまとったドレスト状態として理解される。しかし、励起強度が強くなると分裂したピークのうち低エネルギー側が消失し、また高エネルギー側のピークは連続吸収帯に重なって幅の広い構造となる。これは既に励起子が不安定化する密度領域に達しており、光誘起されたコヒーレンスを BCS 的な多体効果の観点から理解することが求められる。

そのために、微視的なモデルの一つである半導体ブロッホ方程式を用いたシミュレーションを行い、強い光電場の下にある電子正孔系の状態について考察した。まず、シミュレーションによって励起子吸収線の分裂の振る舞いを再現することに成功し、モデルの妥当性を確かめた。次に、シミュレーションからコヒーレントな電子正孔対の波動関数を抽出し、弱励起では励起子そのものだが、強励起では有限の波数でピークを持つクーパー対様の構造に変化することを示した。以上により、励起子吸収線を強く共鳴励起することによって、電子正孔 BCS 状態に類似したコヒーレントな状態を生成できることが確かめられた。以上の測定では光励起後に自発的な凝縮相が残存している徴候は見られなかったものの、将来的な凝縮相の実現やその理解に対しても示唆を与えるものであると考えられる。

### 励起子スピン緩和時間の評価とスピン分解された励起子間相互作用の定量評価

電子と正孔から構成される擬ボース粒子である励起子は、絶縁体、半導体のバンド間遷移近傍の光学応答を特徴づける素励起として古くから研究されてきた。なかでも励起子間相互作用は、励起子のボース・アインシュタイン凝縮の研究において、あるいは半導体の非線形光学応答の観点から理論・実験の両面

から多くの研究がなされてきた。しかしながら、励起子間の相互作用エネルギーについては、励起子密度の評価が励起光の光子数から見積もられてきたこともあり、定量的な評価には曖昧性があった。特に、バルク結晶においてはその定量的評価はあまりなされてこなかった。そこで我々は、高品質の直接遷移型半導体 GaAs バルク結晶を対象に、偏光選択的励起子共鳴励起によるポンプ-プローブ分光を行い、励起子間相互作用の定量評価を試みた。励起子共鳴励起により低温かつスピン偏極した高密度の軽い正孔 1s 励起子を生成し、プローブ光の吸収スペクトルにおける励起子吸収線の変化を観測することで励起子間相互作用を調べた。相互作用エネルギーの励起子密度依存性の測定にあたっては、テラヘルツ分光によって励起子内部遷移を捉えることにより、励起子密度を直接定量的に評価した。まず、励起後 10 ps において軽い正孔励起子同士から成る励起子分子、および重い正孔-軽い正孔混合励起子分子の誘導吸収が観測された。後者はバルクの閃亜鉛鉱型半導体では初の観測である。ポンプ-プローブ遅延時間を変化させ、これら 2 種類の誘導吸収強度の変化をもとに、電子のみ、正孔のみ、励起子内での電子正孔同時スピンフリップの緩和時間を定量的に評価することができた。続いて、励起子吸収線のピークシフトの励起子密度依存性を測定し、励起子間相互作用エネルギーを定量的に評価した。スピン緩和を考慮に入れることで、励起子間相互作用エネルギーをスピン分解して評価し、2 電子・2 正孔すべてのスピンの組み合わせにおける励起子間相互作用エネルギーおよび s 波散乱長の定量評価に成功した。特に、電子同士・正孔同士がともに逆向きのスピンである励起子間の散乱長が正となることが本研究によって初めて実験により示された。

#### <報文>

##### (原著論文)

- [1] Sachiko Nakamura, Yudai Iida, Yuta Murotani, Ryusuke Matsunaga, Hirota Terai, and Ryo Shimano: Infrared activation of Higgs mode by supercurrent injection in a superconductor NbN, arXiv:1809.10335
  - [2] Hao Chu, Min-Jae Kim, Kota Katsumi, Sergey Kovalev, Robert David Dawson, Lukas Schwarz, Naotaka Yoshikawa, Gideok Kim, Daniel Putzky, Zhi Zhong Li, Helene Raffy, Semyon Gernanskiy, Jan-Christoph Deinert, Nilesh Awari, Igor Ilyakov, Bertram Green, Min Chen, Mohammed Bawatna, Georg Christiani, Gennady Logvenov, Yann Gallais, Alexander V. Boris, Bernhard Keimer, Andreas Schnyder, Dirk Manske, Michael Gensch, Zhe Wang, Ryo Shimano, Stefan Kaiser: New collective mode in superconducting cuprates uncovered by Higgs spectroscopy, arXiv:1901.06675
  - [3] Yuta Murotani and Ryo Shimano: Nonlinear optical response of collective modes in multiband superconductors assisted by nonmagnetic impurities, arXiv:1902.01104
  - [4] Naotaka Yoshikawa, Masayuki Takayama, Naoki Shikama, Tomoya Ishikawa, Fuyuki Nabeshima, Atsutaka Maeda, and Ryo Shimano: Charge carrier dynamics of FeSe thin film investigated by terahertz magneto-optical spectroscopy, arXiv:1903.00897
- (学位論文)
- [5] 高山正行: “半導体 GaAs 中に共鳴励起された励起子系の励起子間相互作用と緩和ダイナミクスの研究” (博士論文)
  - [6] 富田圭祐: “Nonlinear terahertz spectroscopy of multiband superconductors” (博士論文)
  - [7] 丹羽宏彰: “銅酸化物高温超伝導体  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  の光励起非平衡ダイナミクス” (修士論文)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [8] Kota Katsumi, Naoto Tsuji, Yuki I. Hamada, Ryusuke Matsunaga, John Schneeloch, Ruidan D. Zhong, Genda D. Gu, Hideo Aoki, Yann Gallais, and Ryo Shimano: Observation of Higgs mode in the d-wave superconductor  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  by THz pump-optical probe spectroscopy, Low Energy Electrodynamics of Solids (LEES2018), Portonovo, Italy, June 24-29, 2018.
  - [9] S. Nakamura, Y. Iida, R. Matsunaga, H. Terai, and R. Shimano: Infrared-active Higgs mode in an s-wave superconductor NbN under DC current injection, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018), July 28, 2018.
  - [10] K. Katsumi, Z. Z. Li, H. Raffy, Y. Gallais and R. Shimano: Observation of superconducting fluctuation in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  thin films by the intense terahertz pulse-driven Higgs mode, 2018 Workshop Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials, Tokyo, Japan, December 11-12, 2018.
  - [11] H. Niwa, N. Yoshikawa, D. Song, H. Eisaki, R. Shimano: Photoexcited nonequilibrium state of  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  investigated by terahertz spectroscopy 2018 Workshop Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials, Tokyo, Japan, December 11-12, 2018.
  - [12] N. Yoshikawa, K. Isoyama, K. Tomita, N. Shikama, T. Ishikawa, F. Nabeshima, A. Maeda, R. Shimano: Ultrafast carrier dynamics of FeSe thin film investigated by time-resolved terahertz spectroscopy, 2018 Workshop Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials, Tokyo, Japan, December 11-12, 2018.
  - [13] Hiroaki Niwa, Naotaka Yoshikawa, Dongjoon Song, Hiroshi Eisaki, Ryo Shimano: Terahertz spectroscopy of the cuprate superconductor  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  in the photoexcited nonequilibrium state, APS March meeting 2019, Boston, USA, March 4-8, 2019.

- [14] Masayuki Takayama, Changsu Kim, Hidefumi Akiyama, Loren Pfeiffer, Kenneth West, Ryo Shimano: Quantitative Evaluation of Exciton-Exciton Interaction Energy in Bulk GaAs, APS March meeting 2019, Boston, USA, March 4-8, 2019.

## 招待講演

- [15] Ryo Shimano: Exciton Mott transition: towards the understanding of phase diagram of e-h system, The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018), Nara Kasugano International Forum, Nara City, July 9, 2018.
- [16] Ryo Shimano: Higgs mode in conventional and unconventional superconductors, The International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018) Ito International Research Center (IIRC), The University of Tokyo, July 28, 2018.
- [17] Ryo Shimano: Photo-induced nonequilibrium dynamics in superconductors, ENS-UT Workshop on Physics, Ecole Normale Supérieure, Paris, France, Sept. 27, 2018.
- [18] Ryo Shimano: Light-induced Nonequilibrium Dynamics in Superconductors, Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials Workshop 2018, Koshiba Hall, The University of Tokyo, Dec. 10, 2018.

## (国内会議)

## 一般講演

- 日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018 年 9 月 9-12 日、同志社大学)

- [19] 室谷悠太, 金昌秀, 秋山英文, 島野亮: バルク GaAs における励起子の近赤外光ドレスト状態の観測
- [20] 高山正行, 室谷悠太, 金昌秀, 秋山英文, 島野亮: バルク GaAs における重い正孔-軽い正孔混合励起子分子の誘導吸収の観測
- [21] 丹羽宏彰, 吉川尚孝, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮:  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  の光励起非平衡状態における c 軸テラヘルツ応答のドーブ濃度依存性
- [22] 吉川尚孝, 丹羽宏彰, Dongjoon Song, 永崎洋, 玉作賢治, 田中義人, 大沢仁志, 久保田雄也, 山本航平, 山神光平, 平田靖透, 和達大樹, 島野亮: 時間分解 X 線回折による銅酸化物超伝導体  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  の光励起結晶構造ダイナミクス
- [23] 中村祥子, 飯田雄大, 室谷悠太, 松永隆佑, 寺井弘高, 島野亮: 直流電流注入下での s 波超伝導体 NbN の赤外活性ヒッグスモード

- 第 10 回東京大学低温センター研究交流会 (2019 年 2 月 22 日、東京大学)

- [24] 富田圭祐, 磯山和基, 吉川尚孝, 色摩直樹, 石川智也, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮: 鉄系超伝導体  $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$  におけるヒッグスモード

- [25] 吉川尚孝, 高山正行, 色摩直樹, 石川智也, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮: 鉄セレン薄膜のテラヘルツ磁気光学分光
- [26] 磯山和基, 吉川尚孝, 富田圭祐, 色摩直樹, 石川智也, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮:  $\text{FeSe}$  薄膜の中赤外光ポンプ-テラヘルツ光プローブ分光
- [27] 勝見恒太, Z. Z. Li, H. Raffy, Y. Gallais, 島野亮: 高強度テラヘルツ波パルス誘起ヒッグスモードを用いた  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$
- [28] 丹羽宏彰, 吉川尚孝, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮: 銅酸化物超伝導体  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  の光誘起非平衡状態
- [29] 中村祥子, 富田圭祐, 勝見恒太, 寺井弘高, 島野亮: 電流注入下の s 波超伝導体 NbN におけるテラヘルツ第 2 高調波発生
- [30] 室谷悠太, 金昌秀, 秋山英文, 島野亮: バルク GaAs における励起子の高密度光子ドレスト状態
- [31] 高山正行, 金昌秀, 秋山英文, 島野亮: バルク GaAs における励起子間相互作用エネルギーと励起子 s 波散乱長
- [32] 菅沼大貴, 吉川尚孝, 松岡秀樹, 田中勇貴, 中野匡規, 岩佐義宏, 島野亮: 電荷密度波物質  $\text{TaSe}_2$  の超高速光励起ダイナミクス

- 日本物理学会第 74 回年次大会 (2019 年 3 月 14-17 日 九州大学)

- [33] 富田圭祐, 磯山和基, 吉川尚孝, 色摩直樹, 石川智也, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮: マルチバンド超伝導体  $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$  薄膜におけるヒッグスモード
- [34] 中村祥子, 富田圭祐, 勝見恒太, 寺井弘高, 島野亮: 電流注入下の s 波超伝導体 NbN におけるテラヘルツ第 2 高調波発生
- [35] 勝見恒太, Z. Z. Li, H. Raffy, Y. Gallais, 島野亮: テラヘルツ波誘起ヒッグスモードを用いた  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  薄膜における超伝導ゆらぎの観測
- [36] 室谷悠太, 島野亮: 2 バンド超伝導体における集団励起と非線形光学応答: 非磁性不純物散乱の効果
- [37] 菅沼大貴, 吉川尚孝, 松岡秀樹, 田中勇貴, 中野匡規, 岩佐義宏, 島野亮: テラヘルツポンプ-プローブ分光法による電荷密度波物質  $\text{TaSe}_2$  の非平衡ダイナミクス
- [38] 磯山和基, 吉川尚孝, 富田圭祐, 色摩直樹, 石川智也, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮: 中赤外光ポンプ-THz 波プローブ分光法で見る  $\text{FeSe}$  薄膜の非平衡キャリアダイナミクス

## 招待講演

- [39] 島野亮: 銅酸化物高温超伝導体の動的応答、京都大学基礎物理学研究所研究会 「電子相関が生み出す新規な秩序と超伝導現象: トポロジー、液晶状態、動的現象」、京都大学 湯川記念館パナソニック国際交流ホール、2018 年 5 月 7 日
- [40] 島野亮: 超伝導体のヒッグスモード-光による秩序変数操作に向けて、日本物理学会 2018 年秋季大会領域 4、領域 5 合同シンポジウム「光と固体中の電子・スピンの織り成す新奇量子現象」、同志社大学、2018 年 9 月 9 日

- [41] 島野亮：非従来型超伝導体のヒッグスモード、KEK 連携コロキウム・研究会エディション、KEK 物質構造科学研究所、2019年1月16日  
(セミナー等)
- [42] Ryo Shimano: Higgs mode in conventional and unconventional superconductors, Colloquium at The Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Dresden, Germany, June 11, 2018.
- [43] Ryo Shimano: Higgs mode in conventional and unconventional superconductors, The Hamburg Photon Science Colloquium at Max Planck Institute for the Structure and Dynamics of Matter, Center for Free-Electron Laser Science (CFEL), DESY, Hamburg, Germany, Feb. 9, 2019.
- [44] 島野亮：Ultrafast photo-control of quantum phases in condensed matter systems, 大阪大学理学研究科物性物理学セミナー、大阪大学 2018年11月28日
- [45] 島野亮：Terahertz spectroscopy of elementary excitations in solids, 大阪大学物理学専攻国際物理学コース集中講義 2018年11月28-30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30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、特にキタエフスピン液体関連物質とエキシトニック磁性、3次元ディラック電子の創成に注力した。

### 4.6.1 スピン軌道相互作用を利用した擬スピ量子相

#### 新しい量子スピン液体と新しいキタエフ系物質

量子スピン物理におけるマイルストーンは、絶対零度まで磁性スピンが量子的に揺らいだ状態、スピン液体の実現である。2008年にキタエフによってハニカム(蜂の巣)格子上で厳密解のモデルが提唱され実現が模索されてきた。量子スピン液体は古典秩序変数によらないトポロジカルな量で特徴づけられるが、このモデル上ではマヨラナ準粒子を検出することでスピン液体の実在性を証明することができる。しかし、異方的イジング相互作用であるキタエフ型相互作用が卓越している、「真のキタエフ液体物質」の物質開発は成功例がないのが現状の課題である。

我々は、ハニカム構造をもつイリジウム酸化物  $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  においてこのモデルに類似した液体の発現を報告してきた(2018年2月理学部プレスリリース)。イリジウム  $d^5$  酸化物はキタエフ型相互作用の実現に最適とされてきた為である。ただし、やはり他の相

相互作用が大きいことと不純物誘起励起の為、量子液体のモデルは特定出来ていない。従って、二つの方向性で研究を推進している。一つは、 $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  の素励起(準粒子)研究によりマヨラナ物理の可能性を示すこと、他方ではより純良な物質に対して物理圧力を用いた物性制御によりキタエフ液体を実現させることである。

前者では、平成30年度内に  $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  単結晶作成の再現性を概ね担保することが出来たため、純良化を引き続き進めている。今後、純良結晶が得られれば少量の非磁性不純物を人為的に導入することにより孤立マヨラナ粒子由来の励起を NMR 測定により距離依存で可視化出来るため、理論と実験の比較を決定的に行うことを目指している。

後者では、迅速な高圧磁気相図作成の為に新たな超高压下磁化測定技術を開発した。これは、市販の SQUID 測定装置内に小型の非磁性高圧装置を取り付けて高圧印加部分の試料磁化を測定するものである。これまでも同種の装置は数多くあったが、磁化率の小さい量子スピン系の常磁性磁化率を 5GPa 程度まで測定するには装置のバックグラウンド磁化が大きすぎて使用が困難であった。我々は 3D-CAD と磁界シミュレーションを組み合わせることで従来  $1/10 \sim 1/100$  にバックグラウンド信号の最小化を行い、さらに最小自乗法によらない磁化推定法の開発により目標を達成した。最初の物性研究の試みとして、キタエフ候補物質、 $5d^5$  の  $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$  と  $4f^1$  の  $\text{Na}_2\text{PrO}_3$  に対して 3 GPa 前後まで磁化測定を行い磁気相図を明らかにした。 $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$  では常圧の coplanar 反強磁性相と高圧の二量体化非磁性相との競合がはっきりと示され、 $\text{Na}_2\text{PrO}_3$  では反強磁性ガラス相の抑制傾向がはっきりと見て取れた。今後は、この新装置を用いてより広い視野で種々の擬スピン  $1/2$  ハニカム物質の量子スピン物性を明らかにしていく。

#### $4d^4$ 系の電子相競合

$4d^4$  系では  $J=0$  の基底状態と励起  $J=1$  間の相互作用による「エキシトニック磁性」の競合が予想されている。ただし、 $d^5$  系と同様、二量体化非磁性相との競合も存在する。平成30年度は、ハニカム構造ルテニウム酸化物  $\text{Li}_{2+x}\text{RuO}_3$  及び  $\text{Ag}_3\text{LiRu}_2\text{O}_6$  に着目し、これらの競合を明らかにした。Li 過剰 ( $x > 0$ ) の  $\text{Li}_{2+x}\text{RuO}_3$  では、二量体化を絶対零度まで抑制することに成功し、4 K 程度でガラス化が観測された。磁性スピンが最低温度まで生き残っていることを意味するが、エキシトニック磁性との関連については今後さらなる研究を必要とする。一方、 $\text{Ag}_3\text{LiRu}_2\text{O}_6$  では、4.5 GPa までの超高压 NMR 実験により、1 GPa 超で非磁性二量体化が観測された。同種の二量体化は常圧下の母物質  $\text{Li}_2\text{RuO}_3$  や、高圧下の  $d^5$  イリジウム酸化物・ルテニウム塩化物キタエフ候補物質で多数観測されているため  $d^{4,5}$  系での物質開発に一定の指針を与えたといえる。

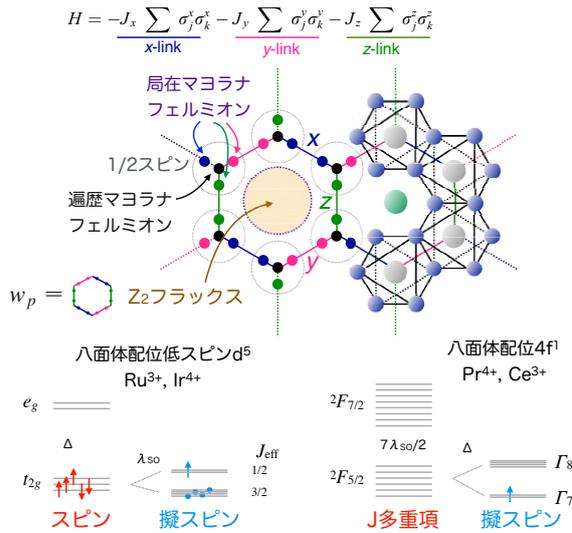


図 4.6.1: ハニカム格子・ハイパーハニカム格子系における量子スピン液体 (左) Kitaev Honeycomb 模型ハミルトニアンのスピンとマヨラナフェルミオンの関係。(右) 異方的相互作用を持つ擬スピン 1/2 での八面体配位結晶場分裂  $\Delta$  とスピナー軌道相互作用  $\lambda_{SO}$  の関係。(左) 現在まで Mott 転移、主要なキタエフ候補物質の研究対象とされてきた代表的な  $4d^5$ ,  $5d^5$  電子。(右) 最近キタエフ型相互作用の実現が提唱された  $4f^1$  電子。

### 4.6.2 3次元ディラック電子

#### アンチペロブスカイト型酸化物

Sr $_3$ PbO を舞台として、3次元ディラック電子の示す新奇な物性を探索している。キャリア濃度（とフェルミエネルギー）の異なる多数の試料について  $^{207}\text{Pb}$ -NMR 測定と磁化測定を行った。このディラック電子系では、バンド間相互作用を反映した巨大反磁性と通常の常磁性のどちらかが発現するかがフェルミエネルギーの僅かな違いにより分けられる。実際に、低キャリア濃度試料のナイトシフトと磁化率には、温度依存する巨大反磁性が現れ、高濃度試料では通常の磁性の振る舞いであった。キャリア濃度、状態密度、ナイトシフト（磁化率）の関係はバンド計算とタイトバインディング計算からの計算によく一致しており、3次元ディラック電子の巨大反磁性を詳らかに検証することに成功した。

<受賞>

- [1] Kentaro Kitagawa, Naoyuki Katayama, Kenya Ohgushi, Makoto Yoshida, and Masashi Takigawa, 第 24 回 (2019 年) 論文賞、日本物理学会、2019 年 3 月 16 日。

<報文>

(原著論文)

- [2] M. Etter, M. Isobe, H. Sakurai, A. Yaresko, R. E. Dinnebier, H. Takagi: Charge disproportionation of mixed-valent Cr triggered by Bi lone-pair effect in the A-site-ordered perovskite BiCu $_3$ Cr $_4$ O $_{12}$ , Physical Review B **97**, 195111 (2018).
- [3] D. Werdehausen, T. Takayama, M. Höppner, G. Albrecht, A. W. Rost, Y. Lu, D. Manske, H. Takagi, and S. Kaiser: Coherent Order Parameter Oscillations in the Ground State of the Excitonic Insulator Ta $_2$ NiSe $_5$ , Science Advance **4**, eaap86, 1-7 (2018).
- [4] S. Mor, M. Herzog, J. Noack, N. Katayama, M. Nohara, H. Takagi, A. Trunschke, T. Mizokawa, C. Monney, and J. Stähler: Inhibition of the photoinduced structural phase transition in the excitonic insulator Ta $_2$ NiSe $_5$  Physical Review B **97**, 115154 (2018).
- [5] A. C. Hannon, A. S. Gibbs, and H. Takagi: Neutron Scattering Length Determination by means of Total Scattering, Journal of Applied Crystallography **51**, 854-866 (2018).
- [6] C. Matt, D. Sutter, A. Cook, Y. Sassa, M. Månsson, O. Tjernberg, L. Das, M. Horio, D. Destraz, C. Fatuzzo, K. Hauser, M. Shi, M. Kobayashi, V. Strocov, T. Schmitt, P. Dudin, M. Hoesch, S. Pyon, T. Takayama, H. Takagi, O. Lipscombe, S. Hayden, T. Kurosawa, N. Momono, M. Oda, T. Neupert, and J. Chang: Direct Observation of Orbital Hybridisation in a Cuprate Superconductor, Nature Communications **9**, 972 (2018).
- [7] S. Agrestini, C.-Y. Kuo, K. Chen, Y. Utsumi, D. Mikhailova, A. Rogalev, F. Wilhelm, T. Förster, A. Matsumoto, T. Takayama, H. Takagi, M. W. Haverkort, Z. Hu, and L. H. Tjeng: Probing the  $J_{\text{eff}} = 0$  ground state and the Van Vleck paramagnetism of the Ir $^{5+}$  ions in the layered Sr $_2$ Co $_{0.5}$ Ir $_{0.5}$ O $_4$ , Physical Review B **97**, 214436 (2018).
- [8] D. Werdehausen, T. Takayama, G. Albrecht, Y. Lu, H. Takagi, and S. Kaiser: Photo-excited Dynamics in the Excitonic Insulator Ta $_2$ NiSe $_5$ , J. Phys.: Condens. Matter **30**, 305602 (2018).
- [9] T. I. Larkin, R. D. Dawson, M. Höppner, T. Takayama, M. Isobe, Y.-L. Mathis, H. Takagi, B. Keimer, and A. V. Boris: Infrared phonon spectra of quasi-one-dimensional Ta $_2$ NiSe $_5$  and Ta $_2$ NiS $_5$ , Physical Review B **98**, 125113 (2018).
- [10] Y. Katsura, H. Takagi, and K. Kimura: Roles of carrier doping, band gap, and electron relaxation time in the Boltzmann transport calculations of a semiconductor's thermoelectric properties, Materials Transactions **59**, 1013 - 1021 (2018).
- [11] T. Eknapakul, I. Fongkaew, S. Siriroj, W. Jindata, S. Chaiyachad, S.-K. Mo, S. Thakur, L. Petaccia, H. Takagi, S. Limpijumnon, and W. Meevasana:

- Direct observation of strain-induced orbital valence band splitting in HfSe<sub>2</sub> by sodium intercalation, *Physical Review B* **97**, 201104(R) (2018).
- [12] S. Mukherjee, B. Pal, I. Sarkar, A. van Roekeghem, W. Drube, H. Takagi, J. Matsuno, S. Biermann, and D. D. Sarma: Nature of the charge carriers in LaAlO<sub>3</sub>-SrTiO<sub>3</sub> oxide heterostructures probed using hard X-ray photoelectron spectroscopy, *Europhysics Letters* **123**, 47003 (2018).
- [13] S. Suetsugu, K. Hayama, A. W. Rost, J. Nuss, C. Mühle, J. Kim, K. Kitagawa, and H. Takagi: Magnetotransport in Sr<sub>3</sub>PbO anti-perovskite with three-dimensional Dirac electrons, *Physical Review B* **98**, 115203 (2018).
- [14] M. Horio, K. Hauser, Y. Sassa, Z. Mingazheva, D. Sutter, A. Cook, E. Nocerino, O. K. Forslund, M. Månsson, O. Tjernberg, M. Kobayashi, V. Strocov, S. Pyon, T. Takayama, H. Takagi, O. J. Lipscombe, S. M. Hayden, T. Neupert, C. E. Matt, and J. Chang: Three-Dimensional Fermi Surface of Overdoped La-based Cuprates, *Physical Review Letters* **121**, 077044 (2018).
- [15] D. Macdougall, A.S. Gibbs, T. Ying, S. Weßel, H. C. Walker, D. Voneshen, F. Mila, H. Takagi, and R. Coldea: Spin dynamics of coupled spin ladders near quantum criticality in Ba<sub>2</sub>CuTeO<sub>6</sub>, *Physical Review B* **98**, 174410 (2018).
- [16] K. Okazaki, Y. Ogawa, T. Suzuki, T. Yamamoto, T. Someya, S. Michimae, M. Watanabe, Y. Lu, M. Nohara, H. Takagi, N. Katayama, H. Sawa, M. Fujisawa, T. Kanai, N. Ishii, J. Itatani, T. Mizokawa, S. Shin: Photo-induced semimetallic states realised in electron-hole coupled insulators, *Nature Communications* **9**, 4322 (2018).
- [17] B. Michon, C. Girod, S. Badoux, J. Kačmarčík, Q. Ma, M. Dragomir, H. A. Dabgovska, B. D. Gaulin, J.-S. Zhou, S. Pyon, T. Takayama, H. Takagi, S. Verret, N. Doiron-Leyraud, C. Marcenat, L. Taillefer, T. Klein: Thermodynamic signatures of quantum criticality in cuprates, *Nature* **567**, 218-222(2019).
- [18] T. Takayama, A. Krajewska, A. S. Gibbs, A. N. Yaresko, H. Ishii, H. Yamaoka, K. Ishii, N. Hiraoka, N. P. Funnell, C. L. Bull, and H. Takagi: Pressure-induced collapse of the spin-orbital Mott state in the hyperhoneycomb iridate  $\beta$  - Li<sub>2</sub>IrO<sub>3</sub>, *Physical Review B* **99**, 125127 (2019).
- [19] H. Takagi, T. Takayama, G. Jackeli, G. Khaliullin and S. N. Nagler: Concept and realization of Kitaev Quantum Spin Liquids, *Nature Reviews Physics* **1**, 264-280 (2019).
- [20] M. P. Jimenez-Segura, T. Takayama, D. Bérardan, Andreas Hoser, M. Reehuis, H. Takagi and N. Dragoe: Long-range magnetic ordering in rocksalt-type high-entropy oxides, *Applied Physics Letters* **114**, 122401 (2019).
- [21] H. Suzuki, H. Gretarsson, H. Ishikawa, K. Ueda, Z. Yang, H. Liu, H. Kim, D. Kukusta, A. Yaresko, M. Minola, J. A. Sears, S. Francoual, H.-C. Wille, J. Nuss, H. Takagi, B. J. Kim, G. Khaliullin, H. Yavaş, B. Keimer: Spin waves and spin-state transitions in a ruthenate high-temperature antiferromagnet, *Nature Materials* (2019). <https://doi.org/10.1038/s41563-019-0327-2>.
- (修士論文)
- [22] 山村凌平:  $d^4$  ルテニウム酸化物における新奇電子相の探索
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [23] S. Suetsugu, K. Kitagawa, K. Hayama, A. W. Rost, J. Nuss, C. Mühle, H. Takagi: Three-dimensional Dirac electrons in antiperovskite Sr<sub>3</sub>PbO, Erice Workshop 2018 "Majorana Fermions and Topological Materials Science, (ETTORE MAJORANA FOUNDATION AND CENTRE FOR SCIENTIFIC CULTURE, Sicily, Italy, Jul. 23, 2018).
- [24] S. Suetsugu, K. Kitagawa, K. Hayama, A. W. Rost, J. Nuss, C. Mühle, H. Takagi: Three-dimensional Dirac electrons in antiperovskite Sr<sub>3</sub>PbO, (2018 Workshop of Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials, Hongo campus, University of Tokyo, Tokyo, Japan, Dec. 10-11, 2018).
- [25] M. Negishi, N. Hiraoka, D. Nishio-Hamane, H. Ohsumi, H. Takagi: Phase control of Dirac node electrons in perovskite-type (Sr, Ca)IrO<sub>3</sub> thin films, (2018 Workshop of Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials, Hongo campus, University of Tokyo, Tokyo, Japan, Dec. 10-11, 2018).
- [26] S. Suetsugu, K. Kitagawa, K. Hayama, A. W. Rost, J. Nuss, C. Mühle, H. Takagi: Three-dimensional Dirac electrons in antiperovskite Sr<sub>3</sub>PbO, (The 19th Japan-Korea-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (JKT19), Waseda University, Tokyo, Japan, Jan. 12, 2019).
- [27] M. Negishi, N. Hiraoka, D. Nishio-Hamane, H. Ohsumi, H. Takagi: Phase control of Dirac node electrons in perovskite-type (Sr, Ca)IrO<sub>3</sub> thin films, (The 19th Japan-Korea-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (JKT19), Waseda University, Tokyo, Japan, Jan. 12, 2019).
- 招待講演
- [28] H. Takagi: Interplay of spin-orbit coupling and electron correlations in 4d and 5d transition metal oxides, (5th International Workshop on Complex Oxides, Capri, Italy, May 22, 2018).

- [29] H. Takagi: Spin-orbital entangled quantum liquid in  $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ , (Trends in Quantum Magnetism, WE Heraeus Seminar, Bad Honnef, Germany, Jun. 5, 2018).
- [30] H. Takagi: When spins and charges feel frustrated..., (Symposium "Innovation and Creativity in Science", Zürich, Switzerland, Jun. 8, 2018).
- [31] H. Takagi: Liquid and solid states of spin orbital entangled matter in 4d and 5d transition metal oxides, Telluride workshop on Enhanced Functionalities in 4 and 5d Containing Material from Large Spin-Orbit Coupling, Telluride, USA, Jun. 28, 2018).
- [32] H. Takagi: Spin-orbital quantum liquid on honeycomb lattice, (TEM2018, Oxford, UK, Jul. 24, 2018).
- [33] H. Takagi: Quantum Spin Liquid, (Advanced School and Workshop on Correlations in Electron Systems: from Quantum Criticality to Topology, ICTP, Trieste, Italy, Aug. 18, 2018).
- [34] H. Takagi: Excitonic transition (and  $q = 0$  CDW) in  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$ , (Warsaw, Poland, Sep. 18, 2018).
- [35] H. Takagi: Exploring novel quantum phases in 5d transition metal oxides, (CIFAR, Toronto, Canada, Nov. 19, 2018).
- [36] H. Takagi: Exotic Phase of spin-orbital entangled matter, (MPI-UBC-UTokyo workshop, Dec. 10, 2018).
- [37] H. Takagi: Excitonic Transition in the layered chalcogenide  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$ , (JKT 2019, Jan. 12, 2019).
- [38] K. Kitagawa: Quantum Spin Liquid in 5d - Electron Honeycomb Compound  $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ , (2019 Joint MMM-Intermag Conference, Washington DC, USA, Jan. 15, 2019).
- [39] H. Takagi: A spin-orbital-entangled quantum liquid on a honeycomb lattice, (APS March Meeting 2019, Boston, USA, Mar. 07, 2019).
- (国内会議)
- 一般講演
- [40] 星竜二, 元山史都, 桑田凌, 曾我部尚希, 磯前貴央, 酒井明人, 中辻知, 橘高俊一郎, 上床美也, 北川健太郎, 松林和幸:  $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$  における高圧下交流比熱測定, 日本物理学会第 74 回年次大会 (2019 年), 14aS-PS-76, 九州大学伊都キャンパス (福岡), 2019 年 3 月 15 日.
- [41] 露木裕太, 北川健太郎, Kelton Whiteaker, Marian Blankenhorn, 高木英典: キタエフ系ハニカム化合物の超高压磁化測定, 日本物理学会第 74 回年次大会 (2019 年), 15aS-PS-52, 九州大学伊都キャンパス (福岡), 2019 年 3 月 15 日.
- [42] 根岸真通, 北川健太郎, 高木英典: 層状ハニカム型イリジウム酸化物のエピタキシャル薄膜合成, 日本物理学会第 74 回年次大会 (2019 年), 15aS-PS-53, 九州大学伊都キャンパス (福岡), 2019 年 3 月 15 日.
- [43] 有馬寛人, 内藤康氏, 工藤一輝, 片山尚幸, 澤博, 野原実, 魯楊帆, 北川健太郎, 高木英典, 上床美也, 松林和幸: 高圧下における  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$  の輸送特性, 日本物理学会第 74 回年次大会 (2019 年), 15aS-PS-58, 九州大学伊都キャンパス (福岡), 2019 年 3 月 15 日.
- [44] 末次祥大, 北川健太郎, 苺宿俊風, 葉山慶平, A. W. Rost, J. Nuss, C. Muhle, 小形正男, 高木英典: アンチペロブスカイト  $\text{Sr}_3\text{PbO}$  における 3 次元ディラック電子の巨大軌道反磁性, 日本物理学会第 74 回年次大会 (2019 年), 17aS-PS-19, 九州大学伊都キャンパス (福岡), 2019 年 3 月 17 日.
- [45] 根岸真通, 平岡奈緒香, 浜根大輔, 大隅寛幸, 高木英典: ペロブスカイト型イリジウム酸化物薄膜におけるディラックノード電子の相制御, 第 10 回低温センター研究交流会, 東京大学本郷キャンパス (東京), 2019 年 2 月 22 日.
- [46] 根岸真通, 平岡奈緒香, 高木英典: ステップ基板を用いたペロブスカイト型  $\text{Sr}(\text{Ir}_{1-x}\text{Sn}_x)\text{O}_3$  薄膜の配向制御と電気輸送特性, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 9pB202-10, 同志社大学 京田辺キャンパス (京都), 2018 年 9 月 9 日.
- [47] 山村凌平, 平岡奈緒香, 北川健太郎, 高木英典: ハニカム格子系  $\text{Li}_2\text{RuO}_3$  薄膜の成長条件と輸送特性, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 10aPS-15, 同志社大学 京田辺キャンパス (京都), 2018 年 9 月 10 日.
- [48] 有馬寛人, 片山尚幸, 野原実, 魯楊帆, 北川健太郎, 高木英典, 上床美也, 松林和幸:  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$  の相図における静水圧と異方的圧力効果の比較, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 10aPS-60, 同志社大学 京田辺キャンパス (京都), 2018 年 9 月 10 日.
- [49] 元山史都, 曾我部尚希, 酒井明人, 中辻知, 北川健太郎, 上床美也, 松林和幸:  $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$  の高圧下で顕在化する非フェルミ液体的挙動と超伝導の相関, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 11pPSB-3, 同志社大学 京田辺キャンパス (京都), 2018 年 9 月 11 日.
- [50] 本田脩峰, 松村武, 谷田博司, 世良正文, 林佑弥, 落合明, 北川健太郎: 圧力下電気抵抗測定による  $\text{CeS}$  の量子臨界現象の研究, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 11pPSB-78, 同志社大学 京田辺キャンパス (京都), 2018 年 9 月 11 日.
- [51] 桑田凌, 岩谷誠, 北川健太郎, 上床美也, 松林和幸:  $\text{YbCo}_2\text{Ge}_4$  の圧力-温度-磁場相図, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 11pPSB-87, 同志社大学 京田辺キャンパス (京都), 2018 年 9 月 11 日.
- [52] 久我健太郎, 濱本論, 中谷泰博, 大浦正樹, 北川健太郎, 木須孝幸: 量子臨界物質  $\text{YbCo}_2\text{Ge}_4$  の軟 X 線光電子分光, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 11pPSB-88, 同志社大学 京田辺キャンパス (京都), 2018 年 9 月 11 日.
- [53] 末次祥大, 北川健太郎, 苺宿俊風, 葉山慶平, A. W. Rost, J. Nuss, C. Muhle, 小形正男, 高木英典: アンチペロブスカイト  $\text{Sr}_3\text{PbO}$  における 3 次元ディラック電子の巨大軌道反磁性, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 12aK106-7, 同志社大学 京田辺キャンパス (京都), 2018 年 9 月 12 日.

## 4.7 林研究室

電子の自転に相当する角運動量「スピン」が生み出す物性は多様であり、それを探求する研究は「スピントロニクス」という分野を確立しました。さらに最近では、電子のスピンと運動量を結合する「スピン軌道相互作用」が誘起する物性研究が活発化しています。林研究室では、原子層レベルで制御した薄膜ヘテロ構造を舞台に、スピンと光が絡む物理に関する研究を行っています。トポロジカル絶縁体やワイル半金属など、スピン軌道相互作用が大きい特異な物質系において、スピン、フォトン、マグノン、フォノンの相互作用から新たな物性を開拓し、将来的に量子情報技術に展開できる物理の研究を推進しています。

### 4.7.1 スピン流生成とその物性

スピン流とは、スピンの向きによって電子の移動する方向が異なる電子の流れを指します。たとえば、上向きのスピンを持った電子が右に、下向きの電子が左に動いたとき、右から左にスピン流が生じたということになります。生成されたスピン流は、例えば強磁性体の磁化の向きを制御することに利用でき、情報記憶技術に応用できるとして期待されています。スピン流を生成するには、様々な手法が利用されています。とりわけ、電流をスピン流に変換するスピンホール効果は、隣接する強磁性体の磁化を操作できるだけのスピン流を生成できるため、注目されています。また、最近では熱や光、機械振動などからスピン流を取り出す実験や理論の報告が行われており、その物理解明に関する研究が盛んに行われています。

#### Pt/Co における異常スピンホール磁気抵抗

スピン軌道相互作用が大きい非磁性金属に電流を流すと、スピンホール効果によって電流と直交する方向にスピン流が発生します。また、非磁性金属と強磁性体からなる2層膜に電流を流すと、スピンホール効果に由来する磁気抵抗が発現することが最近の研究で最近明らかになっています。この磁気抵抗はスピンホール磁気抵抗と呼ばれ、非磁性金属のスピンホール効果の大きさに依存することが理論的に予測され、実験でも確認されています。林研究室では、スピンホール磁気抵抗効果を利用して、これまで5d遷移金属のスピンホール効果の大きさを調べてきました。5d電子数が違う非磁性金属(Hf, Ta, W, Re)で比較検討等した結果、Wが最も大きなスピンホール伝導度を持つことがこれまでの研究で分っていました。 (「スピンホール伝導度」は電流と直交する方向に流れるスピン流の伝導度で、スピンホール効果の大きさを表す指標としてよく用いられています。) 同様の実験を5dバンドが半数以上占有されているPtやIrで行った結果、強磁性金属Coを組み合わせた2層膜で異常に大きなスピンホール磁気抵抗が観

測されました。この異常なスピンホール磁気抵抗はCoやPtの膜厚とともに増加し、また強磁性体にCoを用いた2層膜で顕著な効果が発現することがわかりました。この原因はまだ特定できていませんが、得られた実験結果から、Coの結晶性に起因した磁気抵抗がCo層膜厚に比例して増加しているか、またはCoの中でスピン流が増幅され、大きな磁気抵抗を生じている可能性が考えられます(参考文献[4])。

#### 磁気光学効果を用いたスピン軌道トルク測定

スピンホール効果やエデルシュタイン効果によって生成されたスピン流やスピン蓄積はこれまで、電気伝導測定を利用した間接的な手法で評価されてきました。スピン流やスピン蓄積を直接観測できれば、材料開発や物理解明が大きく進展することが予想されます。2018年度は、光を用いてスピン流やスピン蓄積の直接観察を可能にする測定系を構築しました。測定分解能の向上により、 $10^{-8}$  rad程度の光の偏光面の変化を観測することが可能となりました。この測定系を用いて、W/CoFeBやPt/CoFeBなどのスピン軌道トルクが正確に評価できることを示し、また低電流でも観測にかかるジュール加熱による影響を分離できることを実証しました(参考文献[7])。

#### d-p 混成軌道によるスピン流生成

スピンホール効果は物質に不純物をドーピングし、電子の散乱頻度を大きくすることでより大きなスピンホール効果が発現することが知られています。このような機構で発現するスピンホール効果は外因性スピンホールと呼ばれています。一方、物質のバンド構造(ペリー位相)に起因した内因性スピンホール効果については、これまで主に単体の元素についてその大きさが評価されてきました。今回、スピン軌道相互作用が比較的小さいCoとGaの合金を作製してスピンホール効果を調べたところ、スピン軌道相互作用が大きい5d遷移金属並みのスピンホール角(0.05程度)を有していることがわかりました。第一原理計算を用いて解析した結果、Co-Ga合金におけるスピンホール効果はペリー位相に起因する内因性スピンホール効果で説明でき、またCoのd軌道とGaのp軌道の軌道混成効果により、大きなスピンホール角が得られることがわかりました。今後、より大きなスピンホール角を有する物質を設計するにあたり、重要な指針を与える結果があると考えます。(参考文献[11])。

### 4.7.2 界面スピン軌道相互作用とカイラル磁性

スピン軌道相互作用が大きい物質を組み合わせた薄膜ヘテロ構造では、これまでになかった新たな現象が最近次々と見つかっており、注目されています。た

例えば、異種金属間や金属・酸化物の界面では、その電子状態に起因したスピン軌道相互作用が発現し、垂直磁気異方性や、カイラルスピン構造を誘起するジャロシンスキー・守谷型の交換相互作用が発現することが最近わかってきました。このような界面で発現するスピン軌道相互作用に由来する効果は、バルクのそれよりも大きい場合があり、その機構解明が重要な研究課題となっています。

#### カイラル磁気構造が誘起する電気伝導

林研究室では構造反転対称性が破れた人工物質を原子層レベルで制御し、界面の電子状態やスピン軌道相互作用を自在に操作することで、電子のスピンが誘起する新たな物理現象を探求しています。2018年度は界面ジャロシンスキー・守谷相互作用によって発現するカイラル磁区構造が伝導に与える影響を調べました。試料には比較的大きな界面ジャロシンスキー・守谷相互作用を有する W/CoFeB の 2 層構造をベースに用い、ジャロシンスキー・守谷相互作用の強度を変えるために、W と CoFeB の間に Ta を挿入した構造を作製しました。ジャロシンスキー・守谷相互作用の大きさは電気伝導測定や電流駆動磁区構造観察を用いて評価し、W/CoFeB の 2 層膜で  $\sim 0.2 \text{ erg/cm}^2$  程度あったジャロシンスキー・守谷相互作用が、 $\sim 0.8 \text{ nm}$  厚の Ta 層を挿入することでほぼゼロになることがわかりました。これらの膜を用いて擬 1 次元状の細線を作製し、細線中に磁壁が存在することによる抵抗を評価しました。その結果、Ta 膜厚が大きく、ジャロシンスキー・守谷相互作用がほぼゼロの膜構造では、CoFeB 層の異常ホール効果に起因する磁壁抵抗が支配的であることが明らかになりました。一方、Ta 層が薄くジャロシンスキー・守谷相互作用が  $\sim 0.2 \text{ erg/cm}^2$  程度の値をもつ細線では、異常ホール効果起因の磁壁抵抗以外にカイラル磁気構造が誘起する磁壁抵抗の存在を示唆する結果が得られました。当初目的としていた磁壁抵抗測定による磁壁内部の磁化方向の評価は、異常ホール起因の磁壁抵抗とカイラル磁気構造起因の磁壁抵抗の存在により困難となりましたが、一方でカイラル磁気構造の伝導特性の起源解明に寄与する結果が得られました (参考文献 [5])。

#### 4.7.3 光-スピン変換

光はスピン角運動量と軌道角運動量をもっています。右回りと左回りの円偏光がそれぞれ正と負のスピン角運動量を有しています。光の軌道角運動量は「光渦」という特異な光の偏光状態のみでゼロでない値を持ちます。光を物質に照射すると、光が持つ角運動量を物質に転写することができます。例えば右回りの円偏光を GaAs 等の半導体に照射すると、角運動量の保存則から特定の方向を向いたスピンを持つ電子を価電子帯から伝導帯に励起できます。スピン角運動量を持つ円偏光を物質に照射すると他にも様々な効果が発現することが知られています。特に

物質に特異な電子状態が存在する場合、興味深い効果が誘起されます。例えばスピン軌道相互作用が大きい物質を含む界面・表面などに円偏光を斜めから照射すると、光の入射方向と直交する方向に電流が流れることが知られています。これはフォトガルバニック効果と呼ばれ、一見太陽電池のように見えますが、pn 接合などがなくても電流が流れるなど、その性質は大きく異なります。最近ではトポロジカル絶縁体や 2 次元層状物質などでもフォトガルバニック効果が観測されており、物質の特異な電子状態を検出する手法としても有効です。

#### 半金属/金属ヘテロ界面における光-スピン変換現象

半金属/金属ヘテロ界面に電子のスピンと運動量が結合したスピン・運動量結合バンド (一般的に Rashba 型のバンドと呼ばれている) の存在を確認するため、試料に円偏光を照射し起電力を測定しました。その結果、Cu/Bi の 2 層構造で円偏光の旋回性に依存する大きな起電力が観測されました。一方、Cu や Bi の単層膜では同様の起電力はほとんど観測されませんでした。これらの結果から、円偏光の旋回性に依存する起電力は Cu/Bi 界面で誘起され、その起源として界面に Rashba 型のバンドが存在していることが考えられます。ただ、今回用いた光のエネルギーは Bi のバンドギャップより 1 桁以上大きく、これまでバンドギャップ程度の光を励起に用いて円偏光の旋回性に依存する起電力が観測されてきた半導体やトポロジカル絶縁体におけるフォトガルバニック効果とはこの点で大きく異なっています。Bi のような半金属における光誘起現象は未解明な物理が多く、今後の展開が期待されます (参考文献 [9])。

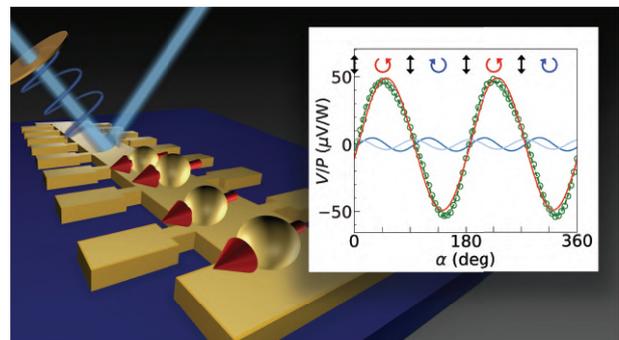


図 4.7.1: フォトガルバニック効果を描いた図。円偏光照射によってスピン分極した電流が誘起される様子を模式的に表した。挿入図はフォトガルバニック効果による起電流の測定結果 [9]。

#### <受賞>

- [1] 廣瀬葉菜、講演奨励賞、応用物理学会、2019年3月9日。

- [2] 廣瀬葉菜、英語講演奨励賞、応用物理学会、2019年3月10日。

<報文>

(原著論文)

- [3] C. Abert, H. Sepehri-Amin, F. Bruckner, C. Vogler, M. Hayashi, D. Suess, Back-Hopping in Spin-Transfer-Torque Devices: Possible Origin and Countermeasures. *Phys. Rev. Appl.* 9, 054010 (2018).
- [4] M. Kawaguchi, D. Towa, Y.-C. Lau, S. Takahashi, M. Hayashi, Anomalous spin Hall magnetoresistance in Pt/Co bilayers. *Appl. Phys. Lett.* 112, 202405 (2018)
- [5] Y. Ishikuro, M. Kawaguchi, Y. C. Lau, Y. Nakatani, and M. Hayashi, Domain-Wall Resistance in Cofeb-Based Heterostructures with Interface Dzyaloshinskii-Moriya Interaction. *Appl. Phys. Express* 11, 073001 (2018).
- [6] R. Iguchi, A. Yagmur, Y. C. Lau, S. Daimon, E. Saitoh, M. Hayashi, and K. Uchida, Thermographic Measurements of Spin-Current-Induced Temperature Modulation in Metallic Bilayers. *Phys. Rev. B* 98 014402 (2018).
- [7] Y. Marui, M. Kawaguchi, and M. Hayashi, Optical Detection of Spin-Orbit Torque and Current-Induced Heating. *Appl. Phys. Express* 11, 5 093001 (2018).
- [8] S. Sumi, H. Awano, and M. Hayashi, Interference Induced Enhancement of Magneto-Optical Effect in Pt/TbCo Hetero-Structured Films. *Crystal* 8, 377 (2018).
- [9] H. Hirose, N. Ito, M. Kawaguchi, Y. C. Lau, and M. Hayashi, Circular photogalvanic effect in Cu/Bi bilayers. *Appl. Phys. Lett.* 113, 222404 (2018).
- [10] S. Isogami, J. Uzuhashi, T. Ohkubo and M. Hayashi, Crystalline-structure-dependent magnetoresistance in ferromagnetic metal/conducting amorphous oxide heterostructures. *Phys. Rev. Mater.* 3, 024408 (2019).
- [11] Y.-C. Lau, H. Lee G. Qu, K. Nakamura and M. Hayashi, Spin Hall effect from hybridized 3d-4p orbitals. *Phys. Rev. B* 99, 064410 (2019).

(学位論文)

- [12] 石黒雄人, 磁性ヘテロ構造におけるカイラル磁性とスピントルク (Chiral magnetism and spin orbit torques in magnetic heterostructures), 修士論文.
- [13] 丸井幸博, スピントルクの光学測定 (Optical detection of spin orbit torque), 修士論文.

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [14] M. Hayashi, Charge and heat-spin conversions in spin orbit systems, The 5th International Conference of Asian Union of Magnetism Societies (IcAUMS), 6/6/2018, Jeju, Korea.
- [15] M. Hayashi, Spin conversion effects in spin orbit heterostructures, SPIE Spintronics XI, 8/22/2018, San Diego, USA.
- [16] M. Hayashi, Spin conversion effects in spin orbit materials, Kavli Institute for Theoretical Sciences: Collective Spin Dynamics in Nanostructures, 10/10/2018, Beijing, China.
- [17] M. Hayashi, Spin current generation in spin orbit materials, One-Day Symposium on Spintronic Properties of Graphene and Related 2D Materials, 11/22/2018, Kashiwa, Japan.
- [18] M. Hayashi, Spin-light Interaction in Spin orbit Materials, Workshop of the Max Planck - UBC - University of Tokyo in Stuttgart, 12/9/18, Tokyo, Japan.

(国内会議)

一般講演

- [19] 丸井幸博, 河口真志, 林将光, スピントルク測定における磁気光学効果と熱光学効果の分離, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月 11 日, 同志社大学, 京田辺.
- [20] 廣瀬葉菜, 伊藤尚人, 河口真志, 林将光, 遷移金属/Bi 界面におけるフォトガルバニック効果, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月 11 日, 同志社大学, 京田辺.
- [21] 川田 拓弥, 河口 真志, 小野 新平, 林 将光, イオン液体を用いたエレクトレット材料の表面弾性波の分散関係測定, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 2018 年 9 月 18 日, 名古屋国際会議場, 名古屋.
- [22] Y. Ishikuro, M. Kawaguchi, Y.-C. Lau, M. Hayashi, Dzyaloshinskii-Moriya interaction and spin orbit torque in Pt/Co/Ir multilayers, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 2018 年 9 月 20 日, 名古屋国際会議場, 名古屋.
- [23] H. Hirose, N. Ito, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Material dependence of interfacial spin-momentum locked bands in metallic heterostructures, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 2018 年 9 月 21 日, 名古屋国際会議場, 名古屋.
- [24] Z. Chi, Y.-C. Lau, M. Hayashi, Giant spin-orbit torque and magnetothermal effects in sputtered BiSb/CoFeB bilayers, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 2019 年 3 月 11 日, 東京工業大学, 大岡山.
- [25] 石黒雄人, 河口真志, Y.-C. Lau, 林将光, 超薄膜ヘテロ構造界面のジャロシンスキー・守谷相互作用とスピントルク, 第 74 回日本物理学会年次大会, 2019 年 3 月 15 日, 九州大学, 福岡.
- [26] 丸井幸博, 河口真志, 林将光, 垂直磁化膜スピントルクの光計測, 第 74 回日本物理学会年次大会, 2019 年 3 月 16 日, 九州大学, 福岡.

- [27] 廣瀬葉菜, 河口真志, 林将光, 金属/半金属ヘテロ構造における界面とバルクのスピン軌道相互作用の分離, 第74回日本物理学会年次大会, 2019年3月16日, 九州大学, 福岡.
- [28] 川田拓弥, 河口真志, 林将光, 強磁性/非磁性二層膜における表面弾性波誘起起電力の観測, 第74回日本物理学会年次大会, 2019年3月16日, 九州大学, 福岡.

## 招待講演

- [29] 林 将光, スピン軌道材料における電流誘起トルク, 第42回日本磁気学会学術講演会, 2018年9月12日, 日本大学, 東京.
- [30] 林 将光, スピン軌道ヘテロ構造の電子物性, 東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究会, 2018年11月1日, 茂庭荘, 仙台.
- [31] 河口真志, 廣瀬葉菜, 丸井幸博, 林 将光, スピン軌道ヘテロ構造におけるスピン変換現象, 第220回研究会/第36回光機能磁性デバイス・材料専門研究会, 2018年11月22日, 中央大学, 東京.
- [32] 林 将光, スピン軌道相互作用が誘起するスピン物性, 応用物理学会: 強的秩序とその操作に関わる研究グループ 第8回研究会, 2019年1月4日, 東京大学, 東京.
- [33] H. Hirose, N. Ito, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Optically induced spin transport in semi-metal heterostructures, 第66回応用物理学会春季学術講演会, 2019年3月12日, 東京工業大学, 大岡山.

## 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、研究テーマは多岐にわたっている。しかしこ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り、ビッグバン宇宙国際研究センター、カブリ数物連携宇宙研究機構を始め、国内外の他研究機関と積極的に共同研究を行っている。

現在我々のグループ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、第一世代天体形成、高エネルギー天文現象の4つである。これらについて簡単に説明を加える。

宇宙論的観測データから、宇宙の全エネルギー密度の7割がダークエネルギー、1/4がダークマター、残りの約5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、21世紀科学全体に対して根源的な謎を突きつけている。

最近の深宇宙探査から、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の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それらの観測が飛躍的に進むものと期待されている。

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、2009年3月に打ち上げられたケプラー衛星を経て、太陽系外惑星はすでに4000個以上が発見されている。そのなかの地球型惑星に生命の兆候をいかにして見出すか。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。

さらに、重力波直接観測に代表される最近の発展を念頭に置き、重力波・ニュートリノ・電磁波の観測による全粒子時間軸天文学、ブラックホールや中性子星の誕生や合体、宇宙初期の超新星爆発といった爆発的突発現象の系統的研究にも取り組んでいる。

#### 5.1.1 観測的宇宙論

##### 最も遠方の単独の星の観測

ハッブル宇宙望遠鏡を用いた銀河団のモニター観測により、重力レンズ現象で大きく増光された遠方銀河内の単独の星を発見した。[6, 4, 5] 最初の発見例イカロスでは、最大2000倍の増光によって $z=1.5$ の青色超巨星が観測された。この発見は単独の星の最遠方記録を大幅に更新したのみならず、遠方銀河やダークマターの研究の新しいアプローチを提供するものとしても注目されている。

##### 遠方銀河、クエーサーの観測

ハッブル宇宙望遠鏡を用いた銀河団の観測により、大きくアーク状に歪んだ $z\sim 6$ の銀河を発見した。[29] またすばる望遠鏡HSCサーベイデータを用いた探索により多数の $z\sim 6$ のクエーサーを発見し、その統計解析の結果クエーサーの宇宙再イオン化への寄与は小さいことが判明した。[21, 46, 50]

##### ブラックホール連星合体重力波分布の重力レンズ効果の影響

ブラックホール連星合体からの重力波は次世代重力波干渉計によって非常に遠方( $z>20$ )まで観測でき、その赤方偏移分布からブラックホール連星の起源に迫れると期待されている。しかし重力レンズによって大幅に減光された近傍の重力波が見かけ上高赤方偏移のイベントとして観測されるため、その赤方偏移分布の正しい解釈には重力レンズ効果を考慮することが極めて重要であることがわかった。[23]

##### 重力レンズ効果と重力波波源の共相関関数による距離-赤方偏移関係

重力波の波源天体であるコンパクト天体は、密度の濃い場所で形成される傾向にあるため、波源天体の空間分布と密度分布は相関することが期待される。一方で重力波観測のみでは、波源天体の赤方偏移を得ることができないため、赤方偏移の情報を持った他の観測量との相関解析を行うことで、距離-赤方偏移関係の情報を引き出すことが可能になる。そこで、そのような観測量として弱重力レンズ効果を適用して、将来観測の条件の下でハッブル定数といった宇宙論パラメータをどれだけ制限できるかを明らかにした。[33]

##### 重力レンズの統計的研究

HSCサーベイなどで見つかった強い重力レンズ系について詳しい解析を行った。[40, 44] 弱い重力

レンズのための新しい銀河形状測定方法を考案した。[28] また強い重力レンズによるこれまでのレンズ銀河の質量分布測定結果を宇宙論的流体シミュレーションの銀河の質量分布と比較し概ねよく一致していることがわかった。[47]

### 応答関数に基づいた重力レンズ統計量の共分散行列の決定

宇宙論的揺らぎの統計量から情報を引き出す際、観測量同士の共分散行列を精度良く記述することが必要である。近年の研究で、この共分散行列の多くの部分が観測領域を超える大スケールの揺らぎに対する応答で書けることが分かってきた。この考えを2次元点球面に射影された弱重力レンズ効果の統計量に応用し、共分散行列を決定する方法を構築した。複数のシミュレーションから大スケールの揺らぎに対する観測量の微分量(応答関数)を測定し、共分散行列を正しく推定できることを実証した。[39]

### 速度空間におけるハローのスプラッシュバック半径の宇宙論的活用

暗黒物質ハローは宇宙大規模構造と銀河形成とを結びつける重要なビルディングブロックであるが、近年の研究ではその外側の境界を物理的に理解するためにハローに取り込まれた物質の第一近点付近の構造がよく調べられてきた(スプラッシュバック半径)。しかし、観測の都合上密度構造のみが注目されてきた。そこで、我々は観測量からアクセス可能な複数の速度統計量を新しく導入し、それらに見られるスプラッシュバックの兆候を大規模数値シミュレーションを用いて初めて調査した。その結果、速度統計に見られる効果は密度統計よりも顕著になり、ハローの形状に応じて非球対称に表れることを示した。[22]

### 格子点上の宇宙大規模構造の摂動計算

宇宙大規模構造の時間進化を記述する際に、密度場、速度場の摂動展開に基づく計算は第一原理的にアプローチ可能なほぼ唯一の解析的手法である。通常の計算では確率過程としての宇宙論的揺らぎに対しアンサンブル平均の操作を解析的に行うことで、様々な統計量の期待値を直接求める。一方で、この方法では大規模構造中の個々の構造の理解や、観測領域の有限性などの様々な効果を取り入れた計算が難しい。そこで、アンサンブル平均を取る代わりに格子点上に確率的に発生させた模擬的な分布を基に摂動計算を実行する手法を開発した。[43]

### 宇宙の大規模構造とガンマ線源の空間相関

すばる HSC サーベイ初年度データから得られた重力レンズマップ(密度場)と Fermi 衛星から得られ

たガンマ線マップの空間相関関数を計算した。このような相互相関関数から、対消滅あるいは崩壊するダークマターモデルに制限を与え、またガンマ線源の分布に関する直接的な情報を引き出すことができる。観測データ解析の結果、30-60分角スケールで有意な相関を検出した。とくに重力レンズのソース銀河を遠方( $z > 1$ )に限った場合は強い相関がみられ、これはガンマ線源が銀河群あるいは銀河団にホストされていることを示唆する。[19]。

### バイスペクトル中のバリオン音響振動の特徴

初期宇宙のバリオン・光子混合流体が晴れ上がりまでの間に音波として進行した距離の情報は、現在の宇宙大規模構造にも僅かながら痕跡を残し、宇宙の膨張史を知る上で重要な観測量として大きな役割を果たしてきた。通常、この効果は密度揺らぎの2点相関関数を通して測定される。これを補完するため、我々はフーリエ空間における3点相関量であるバイスペクトルを数値シミュレーションから測定し、3つの波数を作る3角形の形状に応じてバリオン音響振動の兆候がどのように見えるか調査した。[45]

### ハローバイアスを特徴付ける物理量の機械学習的探査

暗黒物質ハローの空間相関は背景にある全物質のそれと比べてバイアスされていることが知られている。このバイアスを決める物理量として、第一に考えられるのはハローの質量であり、理論的にもバイアスの質量依存性はよく調べられている。一方で、ハローの形成史や形状といった様々な要素もバイアスを変えることが調べられてきたが、各々の要素に対するバイアスの依存性は断片的にしか理解されていない。そこで、我々はガウス過程を用いてハローの各種物理量が成す多次元入力空間で定義されたバイアスをノンパラメトリックに回帰し、バイアスの複雑な依存性を明らかにした。特に、質量と形成時刻の2つを組み合わせると、バイアスの依存性の大部分を説明できることを示した。[34]

### 活動銀河核のクラスタリング

活動銀河核 (AGN) のクラスタリングは、銀河中心に存在する超大質量ブラックホール (SMBH) の形成過程や AGN 発現過程の観測的制限の一つであると考えられている。我々は、SMBH へのガス供給過程として様々な過程を考慮した準解析的銀河形成モデルを構築し、AGN のクラスタリングを観測と比較することで、SMBH の成長において重要な過程は何かを調べた。その結果、モデルから予言される自己相関関数は、赤方偏移 0 から 3 に渡り、観測される X-ray AGN の自己相関をよく再現することが分かった。さらにモデルを解析した結果、質量差のある銀河の合体 (minor merger) が SMBH への支配的なガス供給過程であることがわかった。[38, 98, 156, 158, 164, 169]

### 内的要因と環境要因による銀河団銀河の進化

銀河団においては、銀河団中心に近いほど星形成活動の不活発な銀河の割合 (quenched fraction) が大きく、銀河団外縁部では星形成活動の活発な銀河の割合が大きいたことが観測から分かっている。しかし、既存の銀河形成モデルでは、その動径分布を説明することが困難であることが知られている。我々はダークハロー質量と銀河の星質量及び星形成率の三者を関係づけるモデルを構築した。我々は、銀河の星形成史を特徴付ける時期として、ダークハローの形成時期とダークハローがより大きなハローに取り込まれる時期の両方を用いることにより、観測される銀河団銀河の quenched fraction を説明できることを見出した。この結果は、銀河団銀河の星形成停止機構として内部的な過程と環境要因の過程の両方が重要であることを示唆している。[99, 108, 129, 133, 145]

### 銀河-銀河重力レンズ効果のダークハロー方向依存性

銀河-銀河重力レンズ効果の測定において、ダークハローの形状は平均して球対称であるという仮定がよく用いられるが、数値シミュレーションによると個々のハローは三軸不等な形状を持つことが示されている。我々は数値シミュレーションを用いて、視線方向に沿ったハローを選択的に選んだ場合、測定される銀河-銀河重力レンズ効果の信号がどのような影響を受けるか研究を行った。小スケールでは理論予測と一致する一方で、大スケールではハローの方向と物質分布の相関によって 2 倍程度大きな信号が観測されることが明らかになった。[2]

### 宇宙論パラメータ推定における摂動論的手法

銀河パワースペクトルから宇宙論パラメータを推定する際には、計算コストが小さい解析的な手法である摂動論がよく用いられる。しかし、摂動論においては密度ゆらぎの展開の詳細によって、収束性や適用できるスケールが異なっており、統一的な比較はなされていなかった。そこで我々はこれまで提唱されてきた様々な摂動論的手法を用いて、数値シミュレーションで生成した銀河パワースペクトルから宇宙論パラメータを推定し、実際にシミュレーションの初期条件を生成する際に用いられた宇宙論パラメータを正しく復元できるか研究を行った。一部の手法は小スケールでの振る舞いを記述するためパラメータを導入するが、このパラメータは宇宙論パラメータの推定精度を著しく損なうことを示した。[56]

### 宇宙初期における輝線銀河の大域的分布と物理的特徴

現在稼働中の ALMA 干渉計や次世代望遠鏡である JWST 望遠鏡などの観測を組み合わせることで、複数の波長帯での放射を包括的に捉えて銀河の性質を理解することが可能となっている。我々は、宇宙

論流体シミュレーションを用いて宇宙初期数億年の頃の銀河の典型的な性質を調べた。これらの銀河は高い電離パラメータをもち、酸素二階電離輝線などの高階電離輝線で明るく光ることがわかった。こういった傾向は現在の ALMA 望遠鏡での観測でも見られている。また、近赤外と可視の異なる二つの輝線を組み合わせることで銀河の平均的な金属量を推定することができることを見出した。[26]

### ALMA 干渉計による遠方輝線銀河探索

ALMA 干渉計の登場により、遠方 (100 億光年以上) の銀河のミリ波・サブミリ波の連続光や輝線を高分解能かつ高感度で観測できるようになった。特に炭素イオンや酸素イオン由来の赤外線輝線の観測から、遠方銀河の星形成領域は近傍よりも電離ガス量に対する原子ガス量が少ないことが示唆された [13]。さらに、赤外線輝線で明るい遠方銀河の存在密度を推定することを目的の一つとした、ALMA による分光サーベイ観測も行われている [37, 16]。そのようなサーベイ観測データから、SN 比が  $6\sigma$  を超える輝線候補を 2 個抽出したが、追観測の結果ノイズによる誤検出であった。得られたデータから輝線を検出するための手法の信憑性を評価するため、ヨーロッパ南天天文台の研究者らと共同で、複数の輝線検出法を構築し、ALMA によるサーベイデータを用いて輝線の検出率の調査を進めている。[91, 148, 210]

### 磁場による渦状腕分裂の促進とクランプ形成への影響

天の川銀河のような近傍の円盤銀河の多くには渦状腕が観測される。一方で高赤方偏移宇宙の円盤銀河には渦状腕ではなくクランプと呼ばれる大質量の星団が見られる。こうしたクランプ構造の形成メカニズムとして、力学的不安定性による渦状腕の分裂を考える。これまでの研究により、線形摂動理論を用いた解析計算によって不安定条件を解析的に求め、それをガスと星からなる 2 成分の系に適用できるように拡張することに成功した。さらにこの理論を発展させ、磁場による効果について研究した。軸対称方向の磁場はコリオリ力を部分的に打ち消すことによって、渦状腕を不安定化する効果があるが、結果として形成するクランプの質量には有意な影響を与えないことが分かった。[54]

### 暗黒物質欠乏銀河の力学質量決定の検証

近年、NGC 1052-DF2 という銀河について暗黒物質がほとんど存在しないと報告され、話題となった。しかし、この報告を行った先行研究は、わずか 10 個程度の球状星団の分布を、ベキ乗則と仮定することで計算を容易にする方法を用いて質量決定を行っていた。我々は手法によって銀河質量が過小評価された可能性を指摘した。ベキ乗則に縛られない質量決定法により、セルシック則を用いた球状星団分布を仮

定すると、有意に大きな銀河質量が得られた。我々の計算が正しいならば、NGC 1052-DF2 は、天の川銀河周囲の矮小銀河と同様、暗黒物質がその質量の大部分を占める系と考えられる。[25]

### 5.1.2 系外惑星

#### 原始惑星円盤における巨大惑星の進化

惑星は恒星形成時にその周囲に作られる原始惑星円盤とよばれるガス円盤中で形成する。円盤中の惑星成長・移動は惑星系の形成にとって本質的に重要である。そこで様々な惑星質量、円盤パラメータで数値流体シミュレーションを行い、惑星の動径移動速度を調べた。その結果、惑星がガス円盤から受け取る重力トルクは、ギャップ内の低下したガス面密度に比例していることが示された。この結果から、惑星移動速度の経験式を導出し、惑星形成プロセスを調べた。[17, 24, 92, 86, 149, 138, 128]

また、巨大惑星が作るギャップの外縁部ではダストが集積することが知られている。このような場所では、ダストがガスに与える影響を考慮する必要がある。我々はガス-ダスト2流体数値流体シミュレーションを行い、ダスト反作用が惑星ギャップに与える影響について調べた。その結果、ダスト反作用はガスギャップ外縁部の構造を変えることで従来考えられてきたよりも大幅に広がったダストリング構造を作ることが分かった。[42, 165]

#### 星震学を応用した太陽系外惑星系の特徴づけ

太陽系外惑星を保有する恒星に対し、星震学の枠組みから自転状態を推定した。まず星震学の手法の信頼性をシミュレーションを通して検証した後、実際にケプラー宇宙望遠鏡で観測された33の惑星系の自転方向と自転周期を測定した。その結果、ケプラー408を公転する惑星は有意に傾いた軌道を持ち、それは同様の惑星の中で現状唯一の地球サイズの惑星であることを発見した。また、複数の系において星震学から推定した主星の自転周期は惑星の公転周期とよく一致しており、主星の自転と惑星の公転が共鳴の状態にあることを示唆する。[14, 55, 57, 70]

#### 重力多体シミュレーションを用いた惑星系形成・進化計算

近年の観測的発展により、多様な太陽系外惑星の軌道・質量分布や惑星形成の現場である原始惑星円盤の詳細構造が明らかになってきた。系外惑星の多様性や様々な円盤構造の形成過程についての研究が現在盛んにおこなわれている。我々は、多重リング構造を持つHL Tauに付随する円盤のリングの位置に惑星が存在すると仮定し、その惑星分布を初期条件とした重力多体シミュレーションを行うことで

HL Tau 円盤で最終的にどのような惑星が形成可能であるかを調べた。その結果、円盤寿命や円盤の乱流粘性強度によってホットジュピターや土星や木星といった太陽系の巨大惑星に似た軌道・質量をもつ惑星も形成可能であることが分かった。また、先行研究とは異なり我々が得た長期間の惑星移動を経験した惑星形成は10億年といった長期の時間スケールで安定であることも分かった [77, 143]。

#### 雲の影響を考慮した系外惑星の光度曲線解析

惑星表面で反射し観測者に届く光が自転公転に伴って時間変動することを用いて、表面情報を再構築する方法論が研究されてきたが、気候力学に基づいた雲の影響は取り入れられてこなかった。我々は3次元大気循環モデルを用いて自転傾斜角が異なる地球の雲構造を表現し、さらにその地球を遠方に置いた仮定で観測シミュレーションを行った。この時間変動データを解析した結果、砂漠のような“雲の少ない大陸”が見える場合は、雲の自由な動きによる擾乱にもかかわらず自転軸傾斜角の推定が可能であると示唆された。[144, 166, 174, 184]

### 5.1.3 星・ブラックホール形成

#### 原始惑星系円盤光蒸発の金属量依存性

原始惑星系円盤が生まれてから消失するまでの時間である「寿命」は太陽近傍では3-6百万年であるのに対して、低金属量環境下 ( $[O/H] \sim -0.7\text{dex}$ ) では1百万年以下と短いことが近年観測的に明らかとなった。これは光蒸発が起因と提案されてきた。本研究では、円盤寿命の金属量依存性を明らかにすることを目的に、光蒸発の輻射流体シミュレーションを遂行する。結果として、遠紫外線駆動の光蒸発が寿命の金属量依存性に説明を与え得ることを示した。また、極低金属量環境では、寿命が太陽金属量円盤よりも長くなることが示唆された。

#### 星形成領域円盤の Disk Alignment

近年の観測では、散開星団の中の星の向きが揃っていることが示唆されている。そこで、我々は星形成の段階でもこれが成り立っているのかを調べた。解析では、ALMA や HST で観測されている原始惑星円盤の向きを抜き出し、それらが領域内で揃っているのかどうかを検証した。結果として、Orion Nebular Cluster および Lupus clouds 内で Alignment をしているという示唆がえられた。また、Lupus 内での円盤の向きを Planck 衛星から得られた磁場の向きとの相関を計算したが、発見できなかった。よって磁場を除くと、観測された Alignment を説明する有力な機構は分子雲の大局的な回転であると考えられる。

### 大質量星近傍分子雲コアの光蒸発

大質量星形成領域では、大質量星からの紫外線により近傍分子雲が破壊・消散される。この現象は、巨大分子雲中の星形成効率に大きく影響する。また、これは近傍星形成領域のみならず、原始銀河などにおいても起こることが期待される。一般的環境下における分子雲に対する大質量星フィードバックの影響を明らかにするため、分子雲コア光蒸発の多次元輻射流体シミュレーションを遂行した。結果、分子雲コア寿命が低金属量ほど短くなることを示し、低金属量環境下では星形成効率が大質量星の効果により大きく阻害され得ることを明らかにした。

### 視線速度変動を用いた長周期連星ブラックホール探査

LIGOによる連星ブラックホールの合体に伴う重力波の検出以降、その起源・形成メカニズムが大いに議論されている。一般に合体までには長時間の軌道進化を要するため、合体イベントの前駆体となる長周期連星ブラックホールの存在が予想される。しかし、直接観測が困難である。そこで長周期連星ブラックホールが、周囲にある観測可能な天体の運動に与える影響を用いた探査法を提案した。連星ブラックホール-恒星の同一面上円軌道階層三体系を考え、天体力学の摂動論を用いて、解析的な視線速度近似公式を導出した。また、それを連星系 2M05215658+4359220 の視線速度データに適用することで、仮に内側に連星ブラックホールが存在したとしても、その公転周期は $\sim 12.5$ 日未満に制限できることを示した。[75, 141]

### 機械学習を用いた初代星の性質の推定

初代星の性質を詳細に理解するために、様々な理論的な手法を用いることで間接的な観測による制限から得られる情報を最大化した。[12, 15, 48, 32] これまで第二世代星は一つの超新星によってもたらされた金属を含むガス雲から形成されると考えられていたが、複数の超新星がもたらした金属を含むガス雲から形成されることを示した。[12, 32] 現在、このシナリオを詳細に理解するために機械学習を用いて観測された金属欠乏星の化学組成を分類することでこれらの星の形成史を調べている。

### 初代銀河スペクトルにおける前主系列星の影響

初代銀河は星による重元素合成がされていないためにダストが存在しない。このような銀河では、通常ダストに覆われている前主系列星がスペクトルに影響を与える可能性がある。前主系列星の進化計算を行い、前主系列星を含む銀河スペクトルの計算した。非常に若い初代銀河では、冷たく明るい前主系列星の寄与により赤くなることが示唆される結果を得た。近傍銀河では古いと考えられる赤い銀河が最遠方では非常に若い銀河である可能性を示した。

### 天体数値流体計算アルゴリズム (不連続ガラーキン法) の開発

降着円盤の磁気流体力学や銀河形成の力学など、多くの天体物理現象は偏微分方程式で扱うことができる。正確なシミュレーションには、メッシュの大きさについて誤差が二次以上の精度で収束する方法 (高次精度数値計算スキーム) が重要である。本研究では、高次精度の方法である不連続ガラーキン (DG) 法について、その誤差収束と、発散を抑える機構である limiter について調査を行い、実際に実装を行った。その結果、DG 法は連続的な波形の問題 (移流方程式など) を精度よく解けるのみならず、結果が一次に落ちるような衝撃波問題についても良いパフォーマンスを出すことが分かった。

## 5.1.4 高エネルギー天文現象

### 中性子星形成の起源

パルサーやマグネターなどの若い中性子星の多様性と超新星爆発や高速電波バーストなどの突発天体現象の間の関係を系統的に理解することを目指して以下の研究に取り組んだ。[31] では生まれたてのパルサーへの質量降着とその後の進化を記述する一次元自己相似解を新たに構成した。[51] では生まれたての中性子星からの放射の影響下にある超新星残骸におけるダストの形成と、結果生じる吸収、再放射を計算するモデルを構成した。これらの結果に基づいて、生後 10-100 年の中性子星の物理パラメータを探るための多波長観測の観測戦略を構成した。

### 連星中性子星合体からのマルチメッセンジャー放射

GW170814 の観測を受けて今後の連星中性子星合体のマルチメッセンジャー観測に提言を与えることを目指して以下の研究に取り組んだ。[10] ではハイパーカミオカンデ等の MeV ニュートリノの同時観測によって与えられるニュートリノ質量への制限を議論した。[35] では GW170914 で同時に観測された低光度のガンマ線バーストの起源として、相対論的ジェットから放出された後に散乱される光子を新たに提案した。

### ブラックホールによる白色矮星の潮汐破壊現象

ブラックホール近傍を白色矮星が通過すると、ブラックホールの潮汐力が星の自己重力を上回って白色矮星が潮汐破壊される。我々は白色矮星やブラックホールの質量、軌道要素の多様性に由来するこの現象の多様性について、流体数値シミュレーションを用いて調べた。その結果、BH 質量が 100 太陽質量程度以下の場合には、白色矮星の先進する部分が後続する部分と自己衝突する特異なパターンが存在す

ることが分かった。また、ヘリウムを主として構成される白色矮星の潮汐破壊現象は Calcium-rich gap transients と呼ばれる突発天体の起源になりうるという提案がなされていたが、本研究により原子核反応後の核組成が Calcium-rich gap transients のそれとは矛盾し、起源にはなりえないことが示された。

### ボルツマン輻射流体計算による回転超新星爆発

超新星爆発は大質量星の最期の姿であり、中心に形成される原子中性子星からのニュートリノ放射によって物質が加熱され、爆発すると考えられている。この仮説ではニュートリノが重要な役割を果たすが、これまで近似的な輸送法しか用いられてこなかったため、それを近似なしに解くボルツマン輻射流体計算を行っている。特に自転が爆発に与える影響を調べるために、理論的にほぼ最高速度で自転する星の超新星爆発シミュレーションを行ったが、爆発が起こらなかった。加えて、ニュートリノの運動量分布を調べ、それが流体速度及びニュートリノ反応率との複雑な組み合わせによって決まることを見出した。[52, 71, 96, 135, 163, 168]

#### <受賞>

- [1] 大栗真宗: “重力レンズ天文学への基礎的貢献”, 第 23 回日本天文学会林忠四郎賞, 日本天文学会, 2019 年 3 月 16 日

#### <報文>

##### (原著論文)

- [2] Ken Osato, Nishimichi Takahiro, Masamune Oguri, Masahiro Takada, and Teppei Okumura: MNRAS **477** (2018) 2141
- [3] Kojiro Kawana, Ataru Tanikawa, and Naoki Yoshida: MNRAS **477** (2018) 3449
- [4] Steven A. Rodney et al. (incl. Masamune Oguri): Nature Astronomy **2** (2018) 324
- [5] Patrick L. Kelly et al. (incl. Masamune Oguri): Nature Astronomy **2** (2018) 334
- [6] Jose M. Diego et al. (incl. Masamune Oguri): ApJ **857** (2018) 25
- [7] Riouhei Nakatani et al.: ApJ, **857** (2018) 57
- [8] Masataka Aizawa, Kento Masuda, Hajime Kawahara, and Yasushi Suto: AJ **155** (2018) 206
- [9] Taizo Okabe, Takahiro Nishimichi, Masamune Oguri, Sébastien Peirani, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, and Yasushi Suto: MNRAS **478** (2018) 1141–1160
- [10] Koutarou Kyutoku, Kazumi Kashiyama: PRD **97** (2018) 103001
- [11] Kazumi Kashiyama, Kenta Hotokezaka, Kohta Murase: MNRAS **478** (2018) 2281
- [12] Tilman Hartwig, Naoki Yoshida et al.: MNRAS **478** (2018) 1795
- [13] Takuya Hashimoto et al. (incl. Natsuki H. Hayatsu, Naoki Yoshida): Nature **557** (2018) 392
- [14] Shoya Kamiaka, Othman Benomar and Yasushi Suto: MNRAS **479** (2018) 391
- [15] Tilman Hartwig, Bhaskar Agarwal, and John A. Regan: MNRAS **479** (2018) L23
- [16] H. Umehata et al. (incl. Natsuki H. Hayatsu): PASJ **70** (2018) 65
- [17] Kazuhiro D. Kanagawa, Hidekazu Tanaka, and Ewa Szuszkiewicz: ApJ **861** (2018) 2
- [18] Tilman Hartwig, Volker Bromm, and Abraham Loeb: MNRAS **479** (2018) 2202
- [19] Masato Shirasaki, Oscar Macias, Shun Horiuchi, Naoki Yoshida: PRD **97** (2018) 123015
- [20] Seiji Fujimoto et al. (incl. Shigeki Inoue, Taira Oogi): ApJ **861** (2018) 7
- [21] Yoshiki Matsuoka et al. (incl. Masamune Oguri): ApJS **237** (2018) 5
- [22] Teppei Okumura, Takahiro Nishimichi, Keiichi Umetsu and Ken Osato: PRD **98** (2018) 023523
- [23] Masamune Oguri: MNRAS **480** (2018) 3842
- [24] Shigeru Ida, Hidekazu Tanaka, Anders Johansen, Kazuhiro D. Kanagawa, and Takayuki Tanigawa: ApJ **864** (2018) 77
- [25] Kohei Hayashi and Shigeki Inoue: MNRAS **481** (2018) L59
- [26] Kana Moriwaki et al.: MNRAS **481** (2018) L84
- [27] Riouhei Nakatani et al.: ApJ **865** 75 (2018)
- [28] Xiangchong Li, Nobuhiko Katayama, Masamune Oguri, and Surhud More: MNRAS **481** (2018) 4445
- [29] Brett Salmon et al. (incl. Masamune Oguri): ApJ **866** (2018) 48
- [30] Shutaro Ueda et al. (incl. Masamune Oguri, Yasushi Suto): ApJ **866** (2018) 48
- [31] Toshikazu Shigeyama, Kazumi Kashiyama: PASJ **70**, (2018) 107
- [32] Tilman Hartwig, Miho N. Ishigaki, Ralf S. Klessen, Naoki Yoshida: MNRAS **482** (2019) 1204
- [33] Ken Osato: PRD **98** (2019) 083524
- [34] Jiaxin Han et al. (incl. Takahiro Nishimichi): MNRAS **482** (2019) 1900
- [35] Shota Kisaka, Kunihito Ioka, Kazumi Kashiyama, Takashi Nakamura: ApJ **867** (2018) 39
- [36] MAGIC Collaboration et al.: MNRAS **481** (2018) 2479
- [37] Hatsukade Bunyo et al. (incl. Natsuki H. Hayatsu): PASJ **70** (2018) 105
- [38] Hikari Shirakata et al. (incl. Taira Oogi): MNRAS, **482** (2019) 4846

- [39] Ryuichi Takahashi, Takahiro Nishimichi, Masahiro Takada, Masato Shirasaki and Kosei Shiroyama, *MNRAS* **482** (2019) 4253
- [40] Kenneth C. Wong, et al. (incl. Masamune Oguri): *ApJ* **867** (2018) 107
- [41] Daisuke Toyouchi et al. (incl. Riouhei Nakatani), *MNRAS*, **483**, 2031 (2019)
- [42] Kazuhiro D. Kanagawa, Takayuki Muto, Satoshi Okuzumi, Takayuki Tanigawa, Tetsuo Taki, and Yuhito Shibaike: *ApJ* **868**, 1 (2018)
- [43] Atsushi Taruya, Takahiro Nishimichi and Donghui Jeong: *PRD* **98** (2018) 103532
- [44] Anowar J. Shajib et al. (incl. Masamune Oguri): *MNRAS* **483** (2019) 5649
- [45] Hillary L. Child et al. (incl. Takahiro Nishimichi): *PRD* **98** (2018) 123521
- [46] Yoshiki Matsuoka et al. (incl. Masamune Oguri): *ApJ* **869** (2018) 150
- [47] Sebastien Peirani et al. (incl. Masamune Oguri): *MNRAS* **483** (2019) 4615
- [48] Marco Surace et al. (incl. Tilman Hartwig): *ApJ* **869** (2018) L39
- [49] Tilman Hartwig, Naoki Yoshida: *ApJ* **870** L3(2018)
- [50] Yoshiki Matsuoka et al. (incl. Masamune Oguri): *ApJ* **872** (2019) L2
- [51] Conor. M. B. Omand, Kashiyama Kashiyama, Koha Murase: *MNRAS* **484** (2018) 5468
- [52] Akira Harada et al.: *ApJ* **872** 181 (2019)
- [53] Yasushi Suto: “How to Search for Possible Biosignatures on Earth-Like Planets: Beyond a Pale Blue Dot”, a refereed contribution in *Astrobiology - from the Origins of Life to the Search for Extraterrestrial Intelligence* (Springer Nature, 2019), A.Yamagishi, T.Kakegawa, and T.Usui (eds.) pp.441 – 450.
- [54] Shigeki Inoue and Naoki Yoshida: *MNRAS* **485** (2019) 3024
- [55] Shoya Kamiaka, Othman Benomar, Yasushi Suto, Fei Dai, Kento Masuda and Joshua N. Winn: *AJ* **157** (2019) 137
- [56] Ken Osato, Takahiro Nishimichi, Francis Bernardeau, & Atsushi Taruya: *PRD* **99** (2019) 063530
- [57] Yasushi Suto, Shoya Kamiaka and Othman Benomar: *AJ*, in press
- (国内雑誌)
- [58] 須藤 靖: “この空のかなた 138億年の旅”、高知新聞 朝刊連載 2018年4月14日, 5月12日, 6月9日, 7月14日, 8月11日, 9月8日, 10月13日, 11月10日, 12月8日, 2018年1月12日, 2月9日, 3月9日
- [59] 吉田直紀: 遠くの宇宙の問題数理科学 2018年4月号
- [60] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その四十二: クレーマー・クレーマー”、東京大学出版会 *UP* **548**(2018)6月号, pp.27–33.
- [61] 吉田直紀、高橋一郎、川島英之、田中昌宏、建部修見: すばる HSC サーベイによるビッグデータ宇宙論人工知能学会誌 33 巻 4 号 (2018 年 7 月)
- [62] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その四十三: アインシュタインは本当に「人生最大の失敗」と言ったのか”、東京大学出版会 *UP* **551**(2018)9月号, pp.30–37.
- [63] 西道 啓博: “データ科学と天文学 大規模構造クラスターリング統計量の予言-機械学習的アプローチ”, *天文月報* **111** (2018) 10月号, pp.702-712
- [64] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その四十四: レンズ越しの世界”、東京大学出版会 *UP* **554**(2018)12月号, pp.18–25.
- [65] 大栗真宗: “HSC で探す強い重力レンズ”, *日本天文学会誌 天文月報* **112** (2019) pp.167-173
- [66] 岡部信広, 大栗真宗, 他: “HSC で探る銀河団”, *日本天文学会誌 天文月報* **112** (2019) pp.174-185
- [67] 大栗真宗: “暗黒物質地図の作成”, *パリティ* **34** (2019) 2月号, pp.14-17
- [68] 須藤 靖: “「宇宙」の外に「宇宙」はあるか”、講談社 本 2019年2月号, pp.46–47.
- [69] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その四十五: 土佐から臨む宇宙の果て”、東京大学出版会 *UP* **557**(2019)3月号, pp.6–13.
- (学位論文)
- [70] Shoya Kamiaka: “Stellar Inclinations from Asteroseismology and their Implications for Spin-Orbit Angles in Exoplanetary Systems” (博士論文)
- [71] Akira Harada: “Numerical Investigations on Explosion Mechanisms of Core-collapse Supernovae” (博士論文)
- [72] Ken Osato: “Cosmology and Cluster Astrophysics with Weak Gravitational Lensing and the Sunyaev-Zel’dovich Effect” (博士論文)
- [73] Riouhei Nakatani: “Photoevaporation of Protoplanetary Disks and Molecular Cloud Cores in Star-Forming Regions” (博士論文)
- [74] 上野智久: “天体物理学のための数値流体計算アルゴリズム” (修士論文)
- [75] Toshinori Hayashi: “Radial velocity modulation of an outer star orbiting an unseen inner binary: analytic perturbation formulae in a three-body problem to search for wide-separation black-hole binaries” (修士論文)
- [76] 森脇可奈: “宇宙初期における輝線銀河の大域的分布と物理的特徴” (修士論文)
- [77] Shijie Wang: “Diversities out of the observed proto-planetary disks: migration due to planet-disk interaction and architecture of multi-planetary systems” (修士論文)

(著書)

- [78] 須藤 靖: “情けは地球のためならず”, 毎日新聞出版社 (2018 年 6 月刊行, 243 ページ)
- [79] 須藤 靖: “この空のかなた”, 亜紀書房 (2018 年 7 月刊行, 182 ページ)
- [80] 吉田直紀: 地球一やさしい宇宙の話 -巨大ブラックホールの謎に挑む- (小学館) 2018 年 12 月
- [81] 須藤 靖: “不自然な宇宙”, 講談社ブルーバックス (2019 年 1 月刊行, 240 ページ)
- [82] 谷口義明・山岡均・河野孝太郎・須藤 靖: “宇宙の誕生と進化”, 放送大学印刷教材 (2019 年 3 月刊行)

&lt;学術講演&gt;

(国際会議)

一般講演

- [83] Ken Osato, Takahiro Nishimichi, Masamune Oguri, Masahiro Takada, & Teppei Okumura: “Strong orientation dependence of surface mass density profiles of dark haloes at large scales”; Statistical challenges for large-scale structure in the era of LSST (Oxford, 2018/04/20)
- [84] Conor Omand: Dust Formation and Emission from Pulsar-Driven Supernovae Jets and Shock Breakouts in Cosmic Transients, Kyoto, Japan (2018)
- [85] Takahiro Nishimichi: “Dark Quest I. Emulators for the clustering of halos/galaxies”; The Nonlinear Universe 2018 (Smartno, Slovenia, 7/18, 2018)
- [86] Kazuhiro D. Kanagawa, Hidekazu Tanaka, Ewa Szuszkiewicz: “Radial migration of a giant planet in a protoplanetary disk”; Exoplanet II (July 2018, Cambridge, United Kingdom)
- [87] Ken Osato, Takahiro Nishimichi, Francis Bernardeau, & Atsushi Taruya: “Blind test of perturbation theories with N-body simulations”; Summer School on Large-Scale Structure (Berlin, 2018/07/23-27)
- [88] Masataka Aizawa, Kento Masuda, Hajime Kawahara, Yasushi Suto: “Search for exoplanetary rings via transit method”, RESCEU Summer School (Hakodate, Japan, July 2018)
- [89] Conor Omand: “Dust Formation and Emission from Pulsar-Driven Supernovae”; RESCEU Summer School, Hakodate, Japan (2018)
- [90] Riouhei Nakatani: “Radiation Hydrodynamics Simulations of Photoevaporation of Protoplanetary Disks: Metallicity Dependence of UV and X-ray Photoevaporation”; RESCEU Summer School (Yunokawa Kahantei, Hakodate, Hokkaido, Japan, Jul. 27-30, 2018)
- [91] Natsuki H. Hayatsu: “The Star-Formation History of the Early Universe as Revealed by Blind Searches for Far-infrared Emission Lines”; XXXth International Astronomical Union General Assembly (Vienna, Aug. 20-31, 2018)
- [92] Kazuhiro D. Kanagawa, Hidekazu Tanaka, Ewa Szuszkiewicz: “Radial migration of a giant planet in a protoplanetary disk”; Japanese-German meeting on Exoplanets and Planet Formation 2018 (September 2018, Edesheim, Germany)
- [93] Masamune Oguri: “Cluster mass distributions”; Chile-Japan Academic Forum 2018: Astronomy and Astronomical Instrumentation (Nikko, Tochigi, September 26-27, 2018)
- [94] Ken Osato, Samuel Flnder, Daisuke Nagai, Masato Shirasaki, & Naoki Yoshida: “Investigating Cluster Astrophysics and Cosmology with Cross-Correlation of Thermal SZ Effect and Weak Lensing”; ICM Physics and Modeling (Munich, 2018/10/08)
- [95] Ken Osato, Daisuke Nagai, & Masato Shirasaki: “Modeling ICM profile with Illustris simulations”; IllustrisTNG Science Meeting (Munich, 2018/10/15)
- [96] Akira Harada: “The Neutrino Distributions in the Rotating Core-Collapse Supernova”; Deciphering multi-dimensional nature of core-collapse Supernovae via Gravitational-Wave and neutrino signatures (Toyama, Japan, 10/8-10, 2018)
- [97] Kana Moriwaki: “The distribution and physical properties of high-redshift [OIII] emitters in a cosmological hydrodynamics simulation”; IAU341 PanModel2018 Challenges in Panchromatic Galaxy Modelling with Next Generation Facilities (Osaka, November 12-16, 2018)
- [98] Taira Oogi: “Clustering of optical and X-ray AGNs in a semi-analytic model”; Formation and evolution of SMBHs revealed by ‘Wide field’, ‘Multi-wavelength’, and ‘Transient’ surveys with HSC, (Sendai, Japan, November 2, 2018)
- [99] Taira Oogi: “Modeling galaxy quenching and spatial distributions of star-forming and quenched galaxies”; The 8th KIAS Workshop on Cosmology and Structure Formation, (Seoul, Korea, November 8, 2018)
- [100] Tilman Hartwig: “Carbon-enhanced metal-poor stars as a consequence of inhomogeneous metal mixing”, Stellar Archaeology as a Time Machine to the Early Universe, Japan (December 2018)
- [101] Conor Omand: Dust Formation and Emission from Pulsar-Aided Supernova Remnants 10th DTA Symposium, Mitaka, Japan (2019)
- [102] Naoki Yoshida: “Big Data Cosmology with Subaru HSC”, 4th CREST International Symposium on Big Data Application (Tokyo, January 15, 2019)
- [103] Masamune Oguri: “Shapes and alignments of clusters”; 2019 BUFFALO Collaboration Meeting (Las Vegas, USA, February 5-8, 2019)
- [104] Kana Moriwaki: “The distribution and physical properties of high-redshift [OIII] emitters in a cos-

- mological hydrodynamics simulation”; New Frontiers of Submillimeter Astronomy (Nagano, February 17-19, 2019)
- [105] Naoki Yoshida: “Statistical Computational Cosmology with Big Astronomical Data”, 1st RCCS Symposium (Kobe, February 19, 2019)
- [106] Takahiro Nishimichi: “Statistical Computational Cosmology with Subaru HSC”; CREST/PRESTO Big Data Areas Joint PI Meeting with NSF/DATAIA Researchers (Kyoto, Japan, 3/12, 2019)
- [107] Kazumi Kashiyama: “The birth and growth of supermassive black holes in the early universe”; Space Gravitational Wave Detection (Tokyo, Japan, 3/27-29, 2019)
- [108] Taira Oogi: “Modelling galaxy quenching and spatial distributions of star-forming and quenched galaxies”; Panchromatic Panoramic Studies of Galaxy Clusters: from HSC to PFS and ULTIMATE, (Taipei, Taiwan, March 11, 2019)
- [109] Ken Osato, Hironao Miyatake, Daisuke Nagai, Masato Shirasaki, & Naoki Yoshida: “Cosmology and Cluster Astrophysics with WL and tSZ”; Panchromatic Panoramic Studies of Galaxy Clusters: from HSC to PFS and ULTIMATE (Taipei, 2019/03/12)
- [110] Tilman Hartwig: “Observing the First Stars”, Extremely Big Eyes on the Early Universe, Japan (March 2019)
- [111] Tilman Hartwig: “Carbon-enhanced metal-poor stars as a consequence of inhomogeneous metal mixing”, Into the Starlight, USA (March 2019)
- 招待講演
- [112] Naoki Yoshida: “Formation of the First Galaxies and Blackholes”, European Week of Astronomy and Astrophysics 2018, (Liverpool, UK, April 5, 2018)
- [113] Kojiro Kawana: “A Variety of Tidal Disruptions Events of a WD by a BH”; Jet and Shock Breakouts in Cosmic Transients (Kyoto, Japan, May 14-18, 2018)
- [114] Masamune Oguri: “Gravitational lensing with Subaru Hyper Suprime-Cam survey”; Studying the Universe with GALaxy suRveys – Revealing the Unlimited in ShangHai (Shanghai, China, June 11-15, 2018)
- [115] Naoki Yoshida: “Formation of the First Galaxies and Blackholes”, Rise and Shine 2018, (Strasbourg, France, June 19, 2018)
- [116] Masataka Aizawa: “Detection of exoplanetary rings”, Asia Oceania Geosciences Society (Honolulu, USA, June 2018)
- [117] Tilman Hartwig: “A novel formation scenario for carbon-enhanced metal-poor stars”, Taiwanese Theoretical Astrophysics Workshop, Taiwan (September 2018)
- [118] Masamune Oguri: “Cluster mass distributions”; The Universe as a telescope: probing the cosmos at all scales with strong lensing (Milan, Italy, September 3-7, 2018)
- [119] Naoki Yoshida: “Formation of the First Galaxies and Blackholes”, IGM 2018, (Kashiwa, Chiba, September 20, 2018)
- [120] Kazumi Kashiyama: “Ultra-Long Gamma-Ray Bursts and Tidal Disruption Events from Intermediate-Mass Black Holes in Collapsing Star Clusters”; Taiwanese Theoretical Astrophysics Workshop (Taipei, 9/25-27, 2018)
- [121] Takahiro Nishimichi: “Dark Quest I.: A New Simulation Suite for Halo Clustering at 100+1  $\Lambda$ CDM Models”; The 4th CosKASI-ICG-NAOC-YITP Joint Workshop on Frontiers of Cosmology (Beijing, China, 11/1, 2018)
- [122] Yasushi Suto “GCM simulation of a second earth: cloud pattern and the obliquity determination from future direct imaging”, the 8th KIAS workshop on cosmology and structure formation, November 6, 2018, Seoul, Korea
- [123] Naoki Yoshida: “Conference Summary: Formation of the First Stars and Galaxies”, Stellar Archeology as a Time Machine to the First Stars, (Kashiwa, Chiba, December 7, 2018)
- [124] Kojiro Kawana: “A Variety of Tidal Disruptions Events of a White Dwarf by a Black Hole”; 10th DTA symposium “Stellar deaths and their diversity” (Tokyo, Japan, January 21-23, 2019)
- [125] Naoki Yoshida: “Cosmology with Big Astronomical Data”, 4th International Symposium on Big-Data Analytics in Science and Engineering (Aizu, Fukushima, February 4, 2019)
- [126] Kazumi Kashiyama: “Detectability of Small-Scale Dark Matter Clumps with Pulsar Timing Arrays”; JSPS-FAPESP workshop on Dark Energy, Dark Matter, and Galaxies (Sao Paulo, Brazil, 2/18-20, 2019)
- [127] Masamune Oguri: “An optically selected HSC cluster catalog”; Panchromatic Panoramic Studies of Galaxy Clusters: from HSC to PFS and ULTIMATE (Taipei, Taiwan, R.O.C., March 11-13, 2019)
- (国内会議)
- 一般講演
- [128] 金川和弘、田中秀和、Ewa Szuszkiewicz: “原始惑星系系円盤におけるギャップを持つ惑星の動径移動速度について”; 日本地球惑星科学連合大会 (2018年5月, 幕張メッセ, 千葉)
- [129] 大木平: “An empirical model for the spatial distribution of cluster galaxies”; 銀河進化研究会 (愛媛大学, 6/6, 2018)

- [130] 井上 茂樹: “Spiral-arm instability: destabilization by magnetic fields”; 第5回 銀河進化研究会 (愛媛大学, 6/6-8, 2018)
- [131] 川名 好史朗: “高速で自転する白色矮星と Tomo-e Gozen”; 木曾シュミットシンポジウム 2018 (長野県, 7/10-11, 2018)
- [132] 森脇可奈: “宇宙論シミュレーションによるサブミリ輝線観測の検討”; 輝線 intensity mapping 研究会 2018 (国立天文台, 7/20, 2018)
- [133] 大木 平: “ダークハロー形成史に基づく銀河の星形成率のモデル化”; ダークハロー研究会 (国立天文台, 8/27, 2018)
- [134] 大里 健, 西道 啓博, 大栗 真宗, 高田 昌広, 奥村 哲平: “Strong orientation dependence of surface mass density profiles of dark haloes at large scales”; 第9回 DTA シンポジウム ダークマターハロー研究会 (国立天文台, 2018/08/27)
- [135] 原田了: “The Rotating Core-Collapse Supernova Dynamics and Neutrino Distributions by Full Boltzmann Neutrino Transport”; 高エネルギー宇宙物理学研究会 2018 (東京大学, 9/5-7, 2018)
- [136] 仲谷峻平: “原始惑星系円盤光蒸発の輻射流体シミュレーション: 紫外・X線光蒸発の金属量依存性”; 新学術「星惑星形成」第一回研究会 (名古屋大学, 9/13-14, 2018)
- [137] 浜端 亮成: “Red fraction in the CAMIRA cluster”; The 2nd HSC-X Cluster Workshop (奈良女子大学, 9/18, 2018)
- [138] 金川和弘, 田中秀和, Ewa Szuszkiewicz: “円盤ギャップを持つ惑星の動径移動速度について”; 日本天文学会秋季年会 (2018年9月, 兵庫県立大学工学部キャンパス, 兵庫)
- [139] 逢澤正嵩, 須藤靖: “星形成領域における Spin alignment”; 天文学会 2018 年春季年会 (兵庫県立大学, 9/19-9/21, 2018)
- [140] 浜端 亮成: “平均位相空間分布を用いた銀河団の動力学質量の測定”; 日本天文学会 2018 年秋季年会 (兵庫県立大学, 9/19, 2018)
- [141] 林利憲, Shijie Wang, 須藤靖: “視線速度法を用いた連星ブラックホールの探査—天体力学的摂動論の応用”; 日本天文学会 2018 年秋季年会 (兵庫県立大学, 9/19-21 2018)
- [142] 樫山和己: “Ultra-long GRBs and TDEs from Newborn IMBHs in Collapsing Star Cluster”; 日本天文学会 (兵庫県立大学, 9/19-21, 2018)
- [143] Shijie Wang, Toshinori Hayashi, Kazuhiro D. Kanagawa, Yasushi Suto: “Diversity of Planetary Architecture Out of the Observed Protoplanetary Disks”; 日本天文学会秋季年会 (兵庫県立大学工学部キャンパス, 兵庫, 2018年9月)
- [144] 中川 雄太, 小玉貴則, 石渡正樹, 河原創, 須藤靖: “大気大循環モデルを用いた系外惑星の光度曲線解析による自転傾斜角推定”; 日本天文学会 2018 年秋季年会 (ポスター発表, 兵庫県立大学, 9/19-21, 2018)
- [145] 大木 平: “経験的銀河モデルで探る銀河団銀河の星形成停止過程”; 日本天文学会 2018 年秋季年会 (兵庫県立大学, 9/21, 2018)
- [146] 井上 茂樹: “軸対称磁場による銀河渦状腕の不安定化とクランプ形成”; 日本天文学会 2018 年秋季年会 (兵庫県立大学, 9/19-21, 2018)
- [147] 井上 茂樹: “M51 の渦状腕に対する力学不安定解析”; 日本天文学会 2018 年秋季年会 (兵庫県立大学, 9/19-21, 2018)
- [148] 早津夏己: “遠赤外線輝線を狙ったブラインド探査で探る遠方形形成史”; 日本天文学会 2018 年秋季年会 (兵庫県立大学, 9/19-21, 2018)
- [149] 金川和弘, 田中秀和, Ewa Szuszkiewicz: “原始惑星系円盤におけるギャップをもつ巨大惑星の動径軌道進化”; 日本惑星科学会秋季講演会 (2018年10月, 旭川市市立科学館サイバル, 北海道)
- [150] 吉田 直紀: “広域銀河サーベイと大規模数値シミュレーション”; 第二回 ポスト「京」時代の天体形成シミュレーション研究会 (神戸大学, 10/12, 2018)
- [151] 浜端 亮成: “銀河団の動力学質量の測定”; 観測的宇宙論ワークショップ (山口大学, 11/12, 2018)
- [152] 森脇可奈: “宇宙論シミュレーションによる遠方 [OIII] 銀河の観測予測”; 初代星・初代銀河研究会 (茨城大学, 11/19-21, 2018)
- [153] 大栗真宗: “Effect of Gravitational Lensing on the Distribution of Gravitational Waves from Distant Binary Black Hole Mergers”; The Second annual symposium of the innovative area “Gravitational Wave Physics and Astronomy: Genesis” (京都大学, 11/26-28, 2018)
- [154] 樫山和己: “Electromagnetic counterparts of massive black hole formation”; 新学術領域 (重力波物理学・天文学: 創世記) シンポジウム (基礎物理学研究所, 11/26-28, 2018)
- [155] 仲谷峻平: “近傍大質量星からの紫外線照射による分子雲コアの光蒸発: コア寿命の金属量依存性”; 第31回 理論懇シンポジウム「宇宙物理の標準理論: 未来へ向けての再考」(京都大学基礎物理学研究所パナソニックホール, 12/19-21, 2018)
- [156] 大木 平: “準解析的モデルによる AGN 自己相関”; 第31回理論懇シンポジウム (京都大学, 12/19, 2018)
- [157] 大里 健: “Cosmology and Cluster Astrophysics with Weak Lensing and the thermal Sunyaev-Zel'dovich Effect”; 第31回 理論懇シンポジウム (基礎物理学研究所, 京都大学, 2018/12/20)
- [158] 大木 平: “銀河と活動銀河核の準解析的モデルとすばる HSC サーベイ”; 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 (筑波大学東京キャンパス, 1/10, 2019)
- [159] 西道 啓博: “宇宙大規模構造エミュレータとニュートリノの影響”; 2018 年度 CfCA ユーザーズミーティング (国立天文台三鷹, 1/16, 2019)
- [160] 大栗真宗: “Updates on HSC weak lensing”; 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-」2019 シンポジウム (京都大学, 3/3-4, 2019)

- [161] 吉田 直紀: “広域撮像宇宙サーベイによるビッグデータ宇宙論”; 日本物理学会年次大会シンポジウム「機械学習と物理」(九州大学, 3/16, 2019)
- [162] 西道 啓博, 樽家 篤史, Anaëlle Halle, Stephane Colombi: “宇宙論的応答関数に対するシェルクロッシングの影響”; 日本天文学会 2019 年春季年会 (法政大学小金井キャンパス, 3/14, 2019)
- [163] 原田了: “ボルツマン輻射輸送による超新星シミュレーションの核物質状態方程式依存性”; 日本天文学会 2019 年春季年会 (法政大学, 3/14-17, 2019)
- [164] 大木 平: “準解析的モデルによる AGN 自己相関の研究”; 日本天文学会 2019 年春季年会 (法政大学, 3/16, 2019)
- [165] 金川和弘, 武藤恭之, 奥住聡, 谷川享行, 瀧哲朗, 芝池論人: “ダストからガスへの摩擦反作用が巨大惑星が作るダストリング構造に与える影響”; 日本天文学会春季年会 (2019 年 3 月, 法政大学小金井キャンパス, 東京)
- [166] 中川 雄太, 須藤靖 他: “大気大循環モデルを用いた系外惑星の光度曲線解析による自転軸傾斜角推定 II”; 日本天文学会 2019 年春季年会 (法政大学, 3/14-17, 2019)
- [167] 井上 茂樹: “宇宙論的シミュレーションにおける銀河形態の ISM モデルに対する依存性”; 日本天文学会 2019 年春季年会 (法政大学, 3/14-17, 2019)
- [168] 原田了: “Core-collapse Supernova Simulations with the Boltzmann-neutrino-transport”; RIKEN-RESCEU Joint Seminar (東京大学, 3/19-20, 2019)
- [169] 大木 平: “準解析的モデルによる AGN 自己相関の研究”; SWANS/SNAWS ワークショップ (鹿児島大学, 3/26, 2019)
- 招待講演
- [170] 吉田 直紀: “宇宙 xAI”; CREST ビッグデータ応用若手合宿 (湘南国際村センター, 6/12, 2018)
- [171] 大栗真宗: “ダークマターの観測的制限”; 素粒子物理学の進展 2018 (京都大学, 8/6-10, 2018)
- [172] 大栗真宗: “ダークマターハローの形状”; 第 9 回 DTA シンポジウム ダークマターハロー研究会 (国立天文台, 8/27-28, 2018)
- [173] 須藤靖: “Law の番人: 法律と法則の違い”; 知財高裁研究会、東京高等裁判所 (2018 年 9 月 25 日)
- [174] 中川 雄太: “大気大循環モデルを用いた系外惑星の光度曲線解析による自転軸傾斜角推定”; 日本気象学会 2018 年秋季大会 (仙台, 10/29-11/1, 2018)
- [175] 樫山和己: “Multi-messenger astronomy with DECIGO?”; 第 17 回 DECIGO ワークショップ (名古屋大学, 11/1-2, 2018)
- [176] 西道 啓博: “銀河・銀河レンズ効果と銀河クラスターリングのためのエミュレータ”; 第 7 回観測的宇宙論ワークショップ (山口大学吉田キャンパス, 11/12, 2018)
- [177] 吉田 直紀: “初代星形成シミュレーション”; 初代星・初代銀河研究会 (茨城大学, 11/19, 2018)
- [178] 井上 茂樹: “星形成銀河における円盤不安定性と星形成クランプの形成プロセス”; 初代星・初代銀河研究会 2018 (茨城大学, 11/19-21, 2018)
- [179] 仲谷峻平: “原始惑星系円盤の光蒸発”; ALMA ワークショップ: 円盤から太陽系へ (WTC Conference Center Tokyo, 11/21-22, 2018)
- [180] 須藤靖: “科学と工学教育”; 中国・四国工学教育協会大学教育部会研究会、高知工科大学 (2018 年 12 月 13 日)
- [181] 樫山和己: “Missing links of high energy astrophysics”; 理論懇シンポジウム 2018 (基礎物理学研究所, 12/19-21, 2018)
- [182] 西道 啓博: “宇宙大規模構造理論予言の現状と展望”; 第 3 1 回理論懇シンポジウム「宇宙物理の標準理論: 未来に向けての再考」(京都大学基礎物理学研究所パナソニックホール, 12/20, 2018)
- [183] 須藤靖: “第二の地球の色とバイオシグニチャー”; アストロバイオロジーセンターサテライト研究シンポジウム「深海底から宇宙へ、過去から未来へ、分子から社会へ」、王子 北とびあ (2019 年 1 月 5 日)
- [184] 中川 雄太: “DCPAM の結果を使った模擬観測”; 地球流体データ解析・数値計算ワークショップ (神戸大学, 3/27-29, 2019)
- (セミナー)
- [185] 大栗真宗: “Gravitational lensing as big data science”; ABBL-iTHEMS セミナー (理化学研究所, 4/6, 2018)
- [186] 逢澤正嵩: “トランジット法を用いた系外惑星リング探査” (神戸大, 2018 年 4 月 26 日)
- [187] Tilman Hartwig: “Stellar Archaeology as a Time Machine to the First Stars”, National Taiwan University (April 2018)
- [188] Ken Osato: “Strong orientation dependence of surface mass density profiles of dark haloes at large scales”; ASIAA Special Seminar (Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica, Taipei, Taiwan, 2018/05/14)
- [189] 樫山和己: “The repeating fast radio bursts and the young neutron star model”; 国立天文台理論部セミナー (国立天文台, 5/22, 2018)
- [190] Ken Osato: “Strong orientation dependence of surface mass density profiles of dark haloes at large scales”; Cosmology Group Seminar (Center for Computational Astrophysics, New York, United States of America, 2018/05/31)
- [191] Yasushi Suto: “Reliability of the asteroseismic measurement of the stellar obliquity”, Department of Astrophysical Sciences, Princeton University, June 11, 2018
- [192] Yasushi Suto: “Beyond a pale blue dot: lands, oceans, clouds, vegetation, and spin-obliquity from photometric variation of a directly-imaged earth-like planet”, Cornell University, June 14, 2018

- [193] Naoki Yoshida: “Direct Integration of the Collisionless Boltzmann Equation”, University of Strasbourg (Strasbourg, France, June 20, 2018)
- [194] Riouhei Nakatani: “Radiation Hydrodynamics Simulations of Photoevaporation of Protoplanetary Disks: Metallicity Dependence”; Yamamoto-lab. Seminar (The University of Tokyo, Tokyo, Japan, Jun. 7, 2018)
- [195] Riouhei Nakatani: “Radiation Hydrodynamics Simulations of Photoevaporation of Protoplanetary Disks: Metallicity Dependence of UV and X-Ray Photoevaporation”; DTA Colloquium (NAOJ, Tokyo, Japan, Jul. 10, 2018)
- [196] Ken Osato: “Investigating Cluster Astrophysics and Cosmology with Cross-Correlation of Thermal Sunyaev-Zel’ dovich Effect and Weak Lensing”; Seminar in LERMA/ENS (École Normale Supérieure, Paris, France, 2018/07/10)
- [197] Takahiro Nishimichi: “Analytical and numerical approaches for the cosmological large scale structures: Response function and emulators”, INFN Parma, 2018/7/11
- [198] Takahiro Nishimichi: “Analytical and numerical approaches for the cosmological large scale structures: Response function and emulators”, INFN Padova, 2018/7/12
- [199] Tilman Hartwig: “Stellar Archaeology as a Time Machine to the First Stars”, Georgia Tech (July 2018)
- [200] Tilman Hartwig: “Stellar Archaeology as a Time Machine to the First Stars”, University of Tokyo (July 2018)
- [201] 須藤靖: “この空のかなた”、高知みらい科学館 サイエンストーク、高知オーテピア (2018年8月16日)
- [202] Tilman Hartwig: “Scientific Research and Funding Sources in the 21st Century”, University of Liberia (August 2018)
- [203] Tilman Hartwig: “Stellar Archaeology as a Time Machine to the First Stars”, University of Notre Dame (August 2018)
- [204] Yasushi Suto: “Unveiling a pale blue dot: lands, oceans, clouds, vegetation, and spin-obliquity from photometric variation of a directly-imaged earth-like planet”, Institut d’astrophysique de Paris, September 7, 2018
- [205] Naoki Yoshida: “Dark matter and early structure formation”, Cosmology Seminar (Ibaraki University, Mito, September 11, 2018)
- [206] Yasushi Suto: “Unveiling a pale blue dot: lands, oceans, clouds, vegetation, and spin-obliquity from photometric variation of a directly-imaged earth-like planet”, Theminar at Observatoire de la Cote d’Azur, September 12, 2018
- [207] 須藤靖: “系外惑星とバイオシグニチャー”、青山学院大学物理学科コロキウム (2018年10月11日)
- [208] 須藤靖: “宇宙のギモン、なんでも答えます”、毎日新聞サイエンスカフェ、毎日メディアカフェ、パレスサイドビル (2018年10月26日)
- [209] 川名 好史朗: “ブラックホールによる白色矮星の潮汐破壊現象”; 宇宙物理学教室 談話会 (京都大学, 11/1, 2018)
- [210] Natsuki H. Hayatsu: “The Star-Formation History of the Early Universe as Revealed by Blind Searches for Far-infrared Emission Lines”; (名古屋大学  $\Omega$  研, Nov. 7, 2018)
- [211] 須藤靖: “向陽の空ノムコウ”、土佐高校東京大学研修班講義、東大ビッグバンセンター (2018年11月20日)
- [212] 井上 茂樹: “渦状腕の重力不安定解析”: セミナー (九州大学, 12/9, 2018)
- [213] 須藤靖: “宇宙と我々の起源”、いこいの集い講演会、高知県の町 (2018年12月15日)
- [214] 井上 茂樹: “Spiral-arm instability: formation of giant clumps via fragmentation of spiral arms in disc galaxies”: OUTAP コロキウム (大阪大学, 1/9, 2019)
- [215] 櫻山和己: “The HeSO survey with Tomoe Gozen”; 基礎物理研究所セミナー (基礎物理学研究所, 1/10, 2019)
- [216] 川名 好史朗: “Tidal disruption events of stars by massive black holes”; 理論宇宙物理学研究室 セミナー (早稲田大学, 1/18, 2019)
- [217] Riouhei Nakatani: “Radiation Hydrodynamics Simulations of Photoevaporation of Protoplanetary Disks: Metallicity Dependence of UV+X-Ray Photoevaporation and Disk Lifetimes”; Tentaikaku Seminar (Kyoto University, Kyoto, Japan, Feb. 21, 2019)
- [218] Tilman Hartwig: “Observing the First Stars”, Stanford University (February 2019)
- [219] Riouhei Nakatani: “Radiation Hydrodynamics Simulations of Photoevaporation of Protoplanetary Disks: Metallicity Dependence of UV+X-Ray Photoevaporation and Disk Lifetimes”; Seminar (Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Tübingen, Germany, Mar. 6, 2019)
- [220] Riouhei Nakatani: “Radiation Hydrodynamics Simulations of Photoevaporation of Protoplanetary Disks: Metallicity Dependence of UV+X-Ray Photoevaporation and Implications to Disk Lifetimes”; MPIA’s Planet and Star Formation Coffee (MPIA Heidelberg, Heidelberg, Germany, Mar. 13, 2019)
- [221] Tilman Hartwig: “Observing the First Stars in the Epoch of Multi-Messenger Astronomy”, Brazilian Center for Research in Physics (March 2019)
- [222] Tilman Hartwig: “Observing the First Stars”, University of Concepcion (March 2019)

## 5.2 村尾研究室

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。量子力学の許す範囲で状態を自由に操作して変換することによって、古典力学に基づいた状態の変換として表される古典情報処理より優位な情報処理を実現しようとするのが量子情報処理であり、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近年注目を集めている。量子情報処理の例としては、量子計算、量子暗号、量子テレポーテーション等が提案されている。

本研究室では、計算アルゴリズムや情報処理を効率よく実行するための装置としてだけでなく、量子力学的に許されるすべての操作を自由に行うことができる装置として量子計算機をとらえ、量子計算機を用いることで現れる量子力学的効果に関する理論的研究を行っている。我々の研究は、情報と情報処理という操作論的な観点から量子力学への基盤的理解を深める、という基礎科学的なアプローチと、エンタングルメントなどの量子力学特有の性質を情報処理、情報通信、精密測定、精密操作などに役立てる、という応用科学的なアプローチの相乗効果によって発展させている。

今年度は、村尾美緒教授、添田彬仁助教、日本学術振興会外国人研究員(11月まで)および特任研究員(3月から)の Marco Túlio Coelho Quintino 博士、特任研究員の仲山将順博士、博士課程大学院生の坂井亮介氏、山崎隼汰氏、董青秀雄氏および修士課程大学院生の横島亘氏、USTEP 大学院生(スウェーデン王立工科大学からの交換留学生)の Oscar Bulancea Lindvall 氏、研究生の尹天驕(TianJiao Yin)氏のメンバーで、高階量子演算、ハイブリッド量子系の量子情報処理、分散量子情報処理とエンタングルメント、および量子力学基礎論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 分散量子情報処理

#### 量子情報の分散符号化・復号に必要な量子通信コスト

昨年までに得られた量子情報の分散符号化・復号に必要な量子通信コストの解析結果に加えて、量子エラー訂正符号などのすでに知られている符号化・復号に対して得られた結果を適用し量子通信コストを具体的に評価した。[担当：山崎、村尾]

#### 量子状態集約の量子通信コスト

分散量子情報処理において中心的役割を果たすタスクである量子状態集約(quantum state merging)を one-shot で行うために必要な量子通信コストを評価し、分散量子情報処理で重要となる数十から数百量子ビット程度までの小・中規模領域において、大規模通信を目的として行われてきた先行研究よりも

効率的に量子状態集約を行う手順を構成した。[担当：山崎、村尾]

#### 量子状態集約による分散符号化した量子情報の解析

量子状態集約に必要な量子通信量は、通信方向が一方方向に限られている場合には、分散符号化した量子情報の部分的量子情報(partial quantum information)を表していると解釈することができる。漸近的な設定では、双方向通信が許されていても通信コストは一方方向通信と同じになることが知られていたため、分散符号化した量子情報は、より一般的な状況下においても部分的量子情報によって特徴づけられると考えられてきた。しかし、漸近的な設定では大規模な量子情報処理を行う必要があるため、本研究ではより実際的な設定として、比較的小規模な量子情報処理を扱うことができる one-shot の設定を考察した。そして、one-shot 設定において双方向通信が許されている際には、一方方向通信のみの場合と通信コストが異なる場合があることを証明した。この結果は、双方向通信が許されている場合には、分散符号化した量子情報を特徴づける概念として、部分的量子情報と解釈できない新たな量子情報の概念が存在することを示しており、この概念を spread quantum information と名付けた。[担当：山崎、村尾]

#### 量子メモリ制限下における多体エンタングル状態集合の分散生成

昨年度に引き続き、各ノードでの量子メモリのサイズが制限されている状況下において、真に多体のエンタングルメントを資源として用いることで分散生成できる多体エンタングル状態の多様性が広がるかを解析した。昨年度は資源となるエンタングルメントを全て量子メモリ内に予め共有しておく場合における多体エンタングルメントの有用性を示したが、今年度は量子通信を用いてエンタングルメントを動的に生成する際にも多体エンタングルメントが有用であることを示した。本研究は、オーストリア Innsbruck 大の Barbara Kraus 准教授、Wolfgang Dür 教授、Alexander Pirker 氏との共同研究である。[担当：山崎、村尾]

#### 量子サイド情報がある際の量子状態交換の量子通信コスト

二者間に共有された量子状態の一部をコピーレンスを保ったまま交換するタスクに必要な量子通信コストを評価し、交換しない部分を量子サイド情報(quantum side information)として用いることで量子通信コストを節約できる交換手順の解析を行い、具体例も示した。本研究は、韓国慶熙大の Yonghae Lee 氏、Soojoon Lee 教授、米国 Massachusetts 工科大の高木隆司氏、英国 Nottingham 大の Gerardo Adesso 教授との共同研究である。[担当：山崎]

### 5.2.2 高階量子演算

情報処理タスクを導入した操作論的枠組みを利用し量子力学の基礎的理解を深めるといふ、物理学および情報学それぞれの分野の基礎論の観点ならびに、量子情報処理の実用化という応用からも、「なぜ、どのように量子情報処理は古典情報処理より優位性を持ちうるのか」を解明することが重要である。そこで新しい側面から量子情報処理の特性を解明するために、ブラックボックスとして与えられた量子操作を入力として、量子操作を出力とする関数である超写像を実装する高階量子演算 (higher-order quantum operations) に注目し、その実装可能性や近似的実装に必要なリソース、および、高階量子演算における並列性・因果性に関する解析を進めた。

#### 操作順序を前提としない高階演算のカテゴリライズ

複数の量子操作を一つの量子操作に移す高階量子演算を量子回路上で実装する場合、入力量子操作の順序が暗黙のうちに仮定される。この量子回路を量子コムという。これに対して、入力量子操作の順序を仮定しない高階量子演算を量子プロセスという。量子プロセスのクラスの1つに、入力量子操作としてどんなユニタリ変換を入れても、出力量子操作としてユニタリ変換を返すという純粋量子プロセスがある。よく研究されている純粋量子プロセスの一つとして、量子スイッチがある。量子スイッチとは、入力量子操作としてユニタリ変換  $U_A, U_B$  を入れると、出力量子操作として、制御系の状態が0の時は標的系の状態を  $U_A, U_B$  の順で変換し、1の時は  $U_B, U_A$  の順で変換するような量子操作を返す高階量子演算である。量子スイッチは量子コムではない、つまり、 $U_A, U_B$  を一回使うだけでは量子回路上で実装できないことが証明されている。一方、量子スイッチはその構造の明確さにより、 $U_A, U_B$  を二回使えば量子回路上で実装できることが知られている。しかし、一般の純粋量子プロセスについてはその構造が明らかにされていないため、同様のことが成り立つのかどうかは分かっていない。本研究では、純粋量子プロセスは入力量子操作の作用する空間の次元に制約を課すことを示した。また、入出力の操作が作用する空間の組み合わせが特定の次元の場合には、量子コムまたは量子スイッチに限られることを証明した。[担当：横島、Quintino、添田、村尾]

#### ユニタリ量子操作をその逆操作に変換するための万能量子プロトコル

未知の  $d$  次元ユニタリ量子操作を施すことが保証されているブラックボックスがあるとす。このブラックボックスを有限回だけ用いて、ブラックボックスが本来実装するはずのユニタリ操作ではなく、その逆変換を実装するように量子回路を設計する問題について考えた。このような、入力について事前知識をほとんど用いずに実装可能なプロトコルを「万能

プロトコル」と呼ぶ。ユニタリ操作がブラックボックスとしてでなく、実装するユニタリ操作について事前情報が与えられており、各量子状態への作用を古典計算機によって計算可能であれば、そのようなユニタリ操作に対しては逆操作を実装することは可能である。しかし、ブラックボックスとして与えられた場合、このような手法は使用できない。逆操作化には、確率1で成功する「決定的実装」と、より要件を緩くして、零でない確率で成功すればよしとする「確率的実装」が考えられる。

本研究において、逆転化させる万能プロトコルは、たとえ確率的な実装であってもかならず  $d-1$  回入力ユニタリ操作が必要なことを証明した。入力ユニタリ操作が  $d-1$  回以上利用可能だとして、並列的な実装に限定する場合は、利用回数  $k$  について多項式的にしか失敗確率は減少しないが、順次的な利用を供する場合、失敗確率は指数関数的に減少する。また、入力状態が遅延的に与えられるプロトコルも考察し、ユニタリ操作の量子的学習の問題と、ユニタリ操作の転置化の万能プロトコルの間に一対一の関係が存在することも明らかにした。

[担当：Quintino、董、添田、村尾]

#### 高階量子演算の制御化とユニタリゲートの汎用制御化への応用

制御化論理ゲートは古典計算機において、IF文などの条件節を表現する基本的な演算ゲートの一つである。一般に量子においてその対応物は制御化ユニタリゲートと呼ばれる演算ゲートであり、制御量子ビットの状態に応じて、ユニタリゲートを作用させる場合と作用させない場合の2つの場合のコヒーレントな重ね合わせを実行する量子演算ゲートである。より一般的な量子計算においては、ユニタリゲートより広いクラスの決定論的な演算の実装も可能であり、それらは特に量子チャネル (quantum channel) と呼ばれる量子操作である。さらに、量子チャネルを別の量子チャネルへと変換する高階量子演算と呼ばれる演算 (超写像) も存在する。我々はこれらの各演算に対し、コヒーレンスを最大限に保ちつつ制御化された演算を定義した。さらに任意のユニタリゲートを無効化する高階量子演算を制御化することによる分割可能なユニタリゲートの新たな制御化の手段を提案した。[担当：仲山、董、村尾]

### 5.2.3 量子力学基礎論

#### 一般的なユニタリ操作の逆操作化における因果順序不確定な量子プロセス

空間的に離れた複数の量子系があり、各量子系に対し独立に量子操作を施す際に、ニュートン力学のような絶対時間を前提するならば、これらの量子操作の間に時間的順序が存在するであろうが、相対論まで議論を拡張すればこの時間的順序が必ずしも論

理的に導けるわけではない。本研究において、ユニタリ操作の万能逆操作化について、因果性が不確定な実装法も解析した。このような、一般化された実装法でも利用回数が  $d-1$  未満では、逆転化は不可能であることが判明した。また、我々は半正定値計画法を用いて、因果性不確定な実装では、確定した因果順序を持つ実装法より高い成功確率が実現可能なことを発見した。[担当：Quintino、董、添田、村尾]

### 量子測定の非共立性の構造をデバイス非依存に検証する方法

古典物理理論と異なり、量子物理ではある種の測定の組み合わせは同時に実行できないという意味で、「非共立的」であることが知られている。非共立性の帰結は複数知られているが、特に量子論の文脈依存性やベル非局所性につながる。逆に、この性質を用いて、与えられた量子測定の組み合わせが、非共立性を持つか検証することが可能となる。本研究では、ベル非局所性の実験的検証において、用いられた量子測定がある種の共立性を満たすとき、ベル不等式の破れが制限されることを示した。また、このことは量子論に限定されず、情報の伝達速度が有限の任意の（確率的）理論において成立する。続いて、2量子ビットからなる具体的な量子状態を考え、それに局所的な量子測定を行う状況を想定することで、この状況下で実現される相関は上述の制限を超えることが判明したため、これらの量子測定においては、対応する共立性が成立しない（つまり、ある種の非共立性が成立する）ことが、実験装置の詳細に依らず証明できる。特に、量子相関は、真に3体の非共立性が、このような「デバイス非依存」の方法で立証可能なことが分かった。最後に、これらの結果を、Einstein-Podolsky-Rosen 操作性の場合へ応用した。本研究はオーストリアの量子光学量子情報研究所所属の Costantino Budroni 博士、スペインのセビリア大学の Adán Cabello 教授および同国光科学研究所の Daniel Cavalcanti 博士との共同研究である。[担当：Quintino]

### 因果順序不確定性の半デバイス非依存検証法

互いに独立な量子操作が与えられており、これらを量子論の基本的法則に反しない範囲で変換する際に、興味深い性質が顕在し、このような高階操作は入力量子操作に因果順序が不確定な作用を施すことがあり得る。近年、このような高階操作の因果順序不確定性を調査するために必要な理論が開発された。この理論（プロセス行列）によると、原理的には、関与する操作が特徴づけられていないような状況下でも、デバイス非依存な方法で因果順序不確定性を保証するような統計の存在を予言する。しかし、これまで議論されてきたプロセス行列の物理的実装法は、因果順序不確定性を検証するためには関与する操作の特徴づけが完全であることを前提としていた。本研究では、半デバイス非依存な検証法を考え、すべ

での量子操作が特徴づけられていなくても適用可能な理論を対象とした。まず、このような中間的領域においてプロセス行列の非因果的性質を検証するための枠組みを導入した。続いて、量子スイッチと呼ばれる良く知られた高階操作の分析にこの枠組みを適用し、完全にデバイス非依存な状況下では因果的な統計しか得られないものの、半デバイス非依存な方法では非因果的性質を示すことが分かった。これより、量子スイッチは、これまで知られていたより強い非因果的相関を生成することが判明した。本研究は、オーストリアの量子光学量子情報研究所所属の Jessica Bavaresco 博士および Časlav Brukner 教授、およびドイツの理論物理学研究所所属の Mateus Araújo 博士との共同研究である。[担当：Quintino]

### 入力の複製が与えられた場合に実装可能な量子写像

量子力学において、実装可能な量子状態間の変換は完全正值写像によって記述される。量子状態は半正定値の演算子である密度演算子を用いて表されるため、量子状態間の変換は半正定値の演算子を半正定値の演算子に移さなければならず、写像の正值性が必要となる。また完全正值性は正值性を強めた条件であり、より大きな量子系の状態の一部に対して変換を行ったとしても、全体として正值性が保証されることを要求する。量子力学ではエンタングル状態が存在するために、完全正值性は正值性より真に強い条件となっている。

本研究では、写像の入力となる量子状態の複製が有限個与えられた場合に実装可能な写像について解析した。量子状態の複製の個数に応じて、量子力学における写像の実装可能性の判定が、ある行列の正定値性に帰着できることを示した。またこの行列の性質から、近似的な正值写像の実装可能性を解析し、達成可能な近似精度の漸近的に最適な値を明らかにし、転置写像がこの近似精度を漸的に満たすことを示した。これによって、量子状態の複製を増やしたときに、実装可能な写像の集合がどのように変化するか明らかにした。[担当：董、Quintino、添田、村尾]

### 5.2.4 ハイブリッド量子系の量子情報処理

特徴が異なる複数の量子系をハイブリッド化することによって、目的に対するそれぞれの系の長所と短所が補完されることが期待される。本研究では、量子情報処理の観点からハイブリッド量子系について考察する。

#### ハミルトニアン動力学系における 2 量子ビットゲートのロバスト制御性の解析

量子ゲートは物理系において量子系のハミルトニアン動力学に従って実装されるが、ハミルトニアン

の一部が不定であってもその不定なパラメータに対してロバストな制御が原理的に可能となりうるかを理論的に明らかにした。ハミルトニアン力学による与えられた量子ゲートの実現可能性については、量子制御理論によって数学的に明らかにされているが、この理論では与えられたハミルトニアンが全て既知であることが仮定されている。一方で、1量子ビットの特殊な系ではハミルトニアンの不定パラメータがコンパクトである場合には、不定パラメータに依存しないロバストな制御が原理的に可能であることが先行研究によって明らかにされている。本研究では2量子ビット以上の量子系に対しても任意の量子ゲートがロバストに実装できる新しい系を数学的に明らかにした。また数値解析法を改善することにより、与えられた許容エラーをより小さく設定した場合に対しても、ロバスト制御を実装する具体的な手法を得た。一方、数学的にロバスト制御可能か現在明らかではない系も存在する。このような系に対しても数値解析を行い、数学的にロバスト制御性が保証されている系と同様な結果となった。以上の結果から予想されるロバスト制御が可能となる条件を提案し、その正当性を研究している。本研究は英国 Aberystwyth 大学の Daniel Burgarth 准教授との共同研究である。[担当：坂井、添田、村尾]

### 高次のエネルギー遷移の詳細つり合いを利用した熱平衡化アルゴリズム

熱平衡化、特に冷却は量子情報処理の準備、あるいは量子計算そのものとして有用な量子プロセスである。現実の系において熱平衡化は熱浴と対象系の相互作用によって引き起こされる。このダイナミクスでは、対象系が二次のエネルギー遷移を起こすと熱浴は初期状態にリセットされるという Born-Markov 近似が成立しており、このダイナミクスが詳細つり合いという条件を満たしていることが熱平衡化を保証している。ただ、現実にはスピングラス系やドメインウォールのある系など、対象系がエネルギーが局所的に最小な状態にトラップされて冷却に非常に時間がかかる場合があることが知られている。我々は自然の熱平衡化を参考にして二次の遷移だけでなく任意の  $n$  次の遷移まで詳細つり合いが成立するようなアルゴリズムを考案した。このアルゴリズムを簡単な3量子スピン系において数値計算し、熱平衡化の指標であるエルゴード性が改善していること、高次の詳細つり合いの系の冷却速度が増加していることを確認した。[担当：仲山、Lindvall、村尾]

#### <報文>

(原著論文)

- [1] Yonghae Lee, Ryuji Takagi, Hayata Yamasaki, Gerardo Adesso, and Soojoon Lee, “State exchange with quantum side information”, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 010502 (2018).
- [2] Hayata Yamasaki, and Mio Murao, “Quantum State Merging for Arbitrarily Small-Dimensional

Systems”, *IEEE Trans. on Information Theory*, in print (doi: 10.1109/TIT.2018.2889829), (2018)

- [3] Hayata Yamasaki, and Mio Murao, “Distributed Encoding and Decoding of Quantum Information over Networks”, *Advanced Quantum Technologies* **2**, 1800066 (2018)
- [4] Hayata Yamasaki, Alexander Pirker, Mio Murao, Wolfgang Dür, and Barbara Kraus, “Multipartite entanglement outperforming bipartite entanglement under limited quantum system sizes”, *Phys. Rev. A* **98**, 052313 (2018), selected to be an Editors’ Suggestion

(学位論文)

- [5] 坂井亮介、「量子情報処理のための量子ダイナミクスのロバスト制御」、博士論文
- [6] 山崎峰汰、「Entanglement theory in distributed quantum information processing」、博士論文

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [7] Qingxiuxiong Dong, Marco Túlio Quintino, Atsushi Shimbo, Akihito Soeda, and Mio Murao, “Inverting unknown quantum operations”, *International Conference on challenges in Quantum Information Science 2018 (CQIS2018)*, Tokyo, Japan, April 2018 (poster)
- [8] Qingxiuxiong Dong, Marco Túlio Quintino, Akihito Soeda, and Mio Murao, “The Cost of Implementing Non-Completely Positive Linear Maps: How to Construct ‘Forbidden’ Quantum Operations and Supermaps”, *International Conference on challenges in Quantum Information Science 2018 (CQIS2018)*, Tokyo, Japan, April 2018 (poster)
- [9] Ryosuke Sakai, Akihito Soeda, Mio Murao, and Daniel Burgarth, “Robust control of two-qubit gates in Hamiltonian systems”, *International Conference on challenges in Quantum Information Science 2018 (CQIS2018)*, Tokyo, Japan, April 2018 (poster)
- [10] Akihito Soeda and Mio Murao, “Universal complex conjugation of quantum states and unitaries: Implementation algorithm and implications”, *International Conference on Challenges in Quantum Information Science (CQIS 2018)*, Tokyo, Japan, April 2018 (poster)
- [11] Hayata Yamasaki and Mio Murao, “Entanglement cost of distributing and retrieving quantum information over networks”, *International Conference on challenges in Quantum Information Science (CQIS2018)*, Tokyo, Japan, April 2018 (poster)

- [12] Hayata Yamasaki and Mio Murao, “Entanglement cost of distributed quantum encoding/decoding”, *The 4th Seefeld Workshop on Quantum Information*, Seefeld, Austria, July 2018 (poster)
- [13] Jisho Miyazaki, Akihito Soeda, and Mio Murao, “Universal complex conjugation of unitaries”, *The 13th Conference on the Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography (TQC2018)* and *The 1st International Workshop on Quantum Software and Quantum Machine Learning (QSMML2018)*, Sydney, Australia, July 2018 (poster)
- [14] Hayata Yamasaki and Mio Murao, “One-shot exact quantum state merging and splitting”, *The 13th Conference on the Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography (TQC2018)*, Sydney, Australia, July 2018 (poster)
- [15] Atsushi Shimbo, Akihito Soeda and Mio Murao, “Equivalence determination of unitary operations: “Quantum learning” of quantum objects”, *Workshop on Quantum Software and Quantum Learning (QSQL 2018)*, Sydney, Australia, July 2018 (poster)
- [16] Marco Túlio Quintino, Qingxiuxiong Dong, Akihito Soeda, and Mio Murao, “Reversing unknown quantum transformations: A universal protocol for inverting general unitary operations”, *Modern Topics in Quantum Information*, Natal, Brazil, July 2018
- [17] Qingxiuxiong Dong, Marco Túlio Quintino, Akihito Soeda, and Mio Murao, “Implementing positive maps with multiple copies of an input state”, *The 18th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2018)*, Nagoya, Japan, September 2018
- [18] Marco Túlio Quintino, Qingxiuxiong Dong, Akihito Soeda, and Mio Murao, “Reversing unknown quantum transformations: A universal protocol for inverting general unitary operations”, *The 18th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2018)*, Nagoya, Japan, September 2018
- [19] Ryosuke Sakai, Akihito Soeda, Mio Murao, and Daniel Burgarth, “Robust control of two-qubit gates in Hamiltonian systems”, *The 18th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2018)*, Nagoya, Japan, September 2018 (poster)
- [20] Akihito Soeda Shimbo Atsushi, Akihito Soeda, and Mio Murao, “Equivalence determination of unitary operations”, *The 18th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2018)*, Nagoya, Japan, September 2018 (poster)
- [21] Hayata Yamasaki and Mio Murao, “Quantum state merging for arbitrarily-small-dimensional systems”, *The 18th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2018)*, Nagoya, Japan, September 2018 (poster)
- [22] Jessica Bavaresco, Mateus Araújo, Časlav Brukner, and Marco Túlio Quintino, “Semi-device-independent certification of indefinite causal order”, *Quantum Maiwar*, Brisbane, Australia, November 2018
- [23] Hayata Yamasaki and Mio Murao, “One-shot quantum state merging for arbitrarily-small-dimensional systems under one-way and two-way communication”, *The 22nd Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2019)*, Boulder, United States of America, January 2019 (poster)
- 招待講演
- [24] Mio Murao, “Using quantum computers for analyzing quantum physics”, *International Conference on Challenges in Quantum Information Science (CQIS 2018)*, Tokyo, Japan, April 2018
- [25] Mio Murao, “Using quantum computers for manipulating and analyzing quantum systems”, *The Bristol Quantum Information Technologies Workshop (BQIT2018)*, Bristol, UK, April 2018
- [26] Mio Murao, “Higher order quantum operations of unitaries”, *Hong Kong - Shen Zhen Workshop on Quantum Information Science*, Shen Zhen, China, May 2018
- [27] Mio Murao, “Higher order quantum operations of unitaries”, *4th Seefeld workshop on Quantum Information (2018)*, Seefeld, Austria, July 2018
- [28] Marco Túlio Quintino, Qingxiuxiong Dong, Akihito Soeda, and Mio Murao, “Reversing unknown quantum transformations: A universal protocol for inverting general unitary operations”, *Post-AQIS2018 Workshop*, Nagoya, Japan, September 2018
- [29] Hayata Yamasaki and Mio Murao, “Partial quantum information and two-way classical communication,” *Post-AQIS18 Workshop*, Nagoya, Japan, September 2018
- [30] Akihito Soeda, “Higher-order quantum operations on unitary operations with multiple calls”, *2018 International Workshop on Quantum Information, Quantum Computing and Quantum Control*, Shanghai, China, November 2018
- [31] Mio Murao, “Causal structure of blackboxes in higher order quantum operations”, *Quantum Maiwar 2018*, Brisbane, Australia July 2018
- (国内会議)
- 一般講演
- [32] 添田彬仁、宮崎慈生、村尾美緒、「Universal complex conjugation of unitaries」、新学術領域「ハイブリッド量子科学」第7回領域会議、愛知県名古屋市、2018年8月（ポスター）
- [33] 山崎 隼汰、「量子符号化・復号の非局所性の定量化」、量子情報・物性の新潮流、千葉県柏市、2018年8月

- [34] 添田彬仁、Marco Tulio Quintino、董青秀雄、新保淳、添田彬仁、村尾美緒、「未知ユニタリゲートの逆変換化を実装するユニバーサル量子アルゴリズム」、新学術領域「ハイブリッド量子科学」第8回領域会議、沖縄県恩納村、2019年1月
- [35] 添田彬仁、キンチーノ・マルコ=トゥリオ、董青秀雄、新保淳、添田彬仁、村尾美緒、「ユニタリ操作を複数回利用し、その逆操作を実装する」、日本物理学会第74回年次大会、福岡県福岡市、2019年3月

招待講演

- [36] 村尾美緒、坂井亮介、添田彬仁、Daniel Burgarth、「量子動力学プロセッサとロバスト動力学制御」、新学術領域「ハイブリッド量子科学」第7回領域会議、愛知県名古屋、2018年8月
- [37] 添田彬仁、「高階量子情報処理の最近の展開」、第37回量子情報技術委員会、埼玉県さいたま市、2017年11月
- [38] 村尾美緒、「量子アルゴリズム・ソフトウェアの基礎と最近動向—物理学者の視点から」、量子ICTフォーラム2018、東京都千代田区、2018年10月
- [39] 山崎隼汰、「Entanglement theory in distributed quantum information processing」、第26回関東量子情報 Student Chapter、東京、2019年3月
- (セミナー)
- [40] Hayata Yamasaki, “Quantum-side-information preprocessing and backward classical communication in one-shot quantum state merging”, University of Technology Sydney, Sydney, Australia, December 2018
- [41] Hayata Yamasaki, “Multipartite entanglement outperforms bipartite entanglement under limited quantum system sizes”, University of Vienna, Vienna, Austria, June 2018
- [42] Mio Murao, “Higher order quantum operations of blackbox unitaries and causal structure of the blackboxes”, University of Vienna, Vienna, Austria, February 2019
- [43] Mio Murao, “Higher order quantum operations of blackbox unitaries and causal structure of the blackboxes”, Sorbonne University, Paris, France, March 2019

## 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。私たちは、スピノル BEC におけるトポロジカル励起や粗視化ダイナミクス、人工的な散逸による非ユニタリ・ダイナミクス、原子間相互作用の強さを制御するもとの Efimov 状態や不純物問題、人工ゲージ場中での量子ホール効果や渦格子、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、測定結果からのハミルトニアン推定などの研究を行っている。

### 5.3.1 冷却原子気体

#### 測定反作用下の量子多体ダイナミクス

近年、量子気体系において量子多体ダイナミクスを1原子レベルでマイクロに観測/制御する事が実現した。量子系のマイクロな情報が得られる場合、その代償としてハイゼンベルグの不確定性関係に起因する測定の反作用がダイナミクスに本質的な影響を及ぼす。このような観測下の開放量子多体系についてその非平衡ダイナミクスと熱化過程に関して研究を行った。特に、相関の伝搬速度の限界を与える Lieb-Robinson 限界を超えた伝搬が測定の反作用で誘起されること (図 5.3.1) [11]、及び非可積分な開放多体系が熱化することとその温度を効率よく求める理論手法を見出した [20]。

#### 平衡・非平衡下の量子不純物問題に対する変分的アプローチ

環境と系との間の相関が強い開放量子系では、Born-Markov 近似に基づいた記述は破綻する。そのような系の最も原型的な例として近藤問題に代表される量子不純物系に着目し、環境との量子もつれを解く新しい正準変換に基づいた高効率な理論手法を開発した [15, 16]。これにより、最先端の計算手法 (MPS) よりも 2-3 桁少ないリソースで MPS と同程度の精度が平衡状態で達成された。さらに、MPS では計算が困難であった長時間領域の量子多体ダイナミクスにも成功し、これを冷却原子で実験的に検証する具体的な方法も提案した [12]。

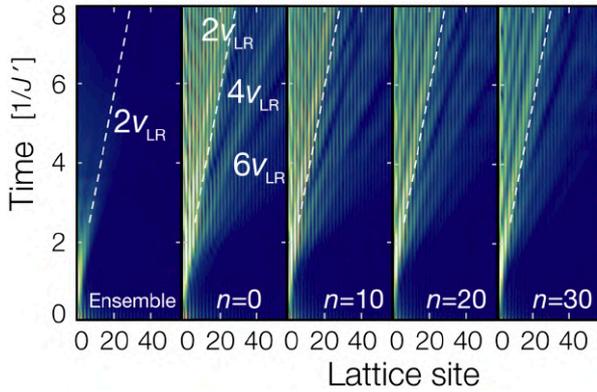


図 5.3.1: 量子測定反作用により誘起される、多粒子系の速く相関伝搬モード。測定結果でアンサンブル平均した散逸的なダイナミクス（左）では、従来の速度限界である Lieb-Robinson 限界よりも速く相関の伝搬は生じない。測定結果で条件づけられた観測下の多粒子ダイナミクスではこの速度限界を超えた伝搬が生じ得る。[11]

#### 重い不純物によって誘起される多体共鳴

冷却原子気体においてフェッシュバハ共鳴を用いて相互作用を制御可能となったことで、散乱共鳴近傍における少数粒子系・多粒子系が示す普遍的な性質に対して関心が集まっている。近年では、ボース気体中の不純物が成すボース・ポーラロンが実験的に実現したことを受け、強相関領域におけるボース・ポーラロンの普遍性、特に普遍的な 3 粒子状態であるエフィモフ状態と多体状態であるボース・ポーラロンの関係に関して興味を持たれている。本研究 [23, 24] では、ボース粒子と重い不純物との相互作用が散乱共鳴近傍にあり束縛状態を持つとき、 $N$  個のボース粒子と 1 つの不純物が成す極めて浅い束縛状態が存在することを明らかにした。また、これらの束縛状態が 3 体斥力の起源に依らず存在し、その束縛エネルギーも散乱共鳴近傍で散乱長のみで決まる普遍的な値に漸近することを示し、その関数形を解析的に導出した。これらの結果は、3 体斥力の存在下において、安定な多体状態が存在しうること示している。

#### 二成分 BEC の渦格子の集団励起

人工磁場中の BEC においては、多数の渦が発生し、格子を形成する。そのような渦格子は、一成分系においては三角格子を組むが、二成分系では成分間・成分内相互作用の比に応じて 5 種類の格子構造を示す。興味深いことに、平均場理論の範囲では、二成分に印加する磁場が互いに平行であっても反平行であっても、基底状態の渦格子構造は変わらない。で

は、集団励起などの他の性質に平行・反平行磁場系の違いが現れるだろうか。我々は Bogoliubov 理論と有効場の理論を用いて、平行・反平行磁場中の二成分 BEC における渦格子の集団励起を調べた。その結果、いずれの場合においても、低エネルギーで一次と二次の分散関係を持つ二つの励起モードが現れることを見出した。さらに、成分間相互作用が引力のときに現れる「重なった三角格子相」において、平行・反平行系の励起の低エネルギー分散関係が適切にリスケールすることで一致するという非自明な関係を示した。また、高エネルギー領域で、二つの励起バンドが点上、線上で接するポイント・ノード、ライン・ノードが現れることを見出し、そのうちのいくつかについて半並進対称性からその起源を説明した。[27]

### 5.3.2 量子論・統計力学と情報理論の融合

#### 非エルミート・トポロジカル相の分類

近年の膨大な数の研究により、ユニタリな閉じた系のトポロジカル物性に関しては基礎的な理解が確立されつつある。これに対し本研究では、非エルミートなハミルトニアンによって記述される開放系におけるトポロジカル相の新しい分類を行うことで、開放系のトポロジカル物性に統一的な理解を与えた [19]。数学的な分類表の構築にくわえて、非エルミート系で標準的なモデルである「羽田野-Nelson 模型」の局在・非局在転移がトポロジカル相転移として解釈できることを指摘し、対応するトポロジカル数やダイナミクスを明らかにした [19]。また、非エルミート性によりスペクトラムが複素になること自然な帰結として、時間反転対称性と粒子正孔対称性が同一視されることを見出した [28]。

#### 非エルミート・トポロジカル相におけるバルク・エッジ対応

トポロジカル相の顕著な特徴のひとつは、バルクの非自明なトポロジーにともなう安定なエッジ状態が現れることである（バルク・エッジ対応）。近年の研究により、非エルミート性はバルク・エッジ対応の本質を変更しうることが明らかになってきた。本研究では、流入・散逸をともなう 1 次元トポロジカル超伝導体において、非エルミート性を受けた Majorana エッジ状態にともなう非局所的な輸送現象を明らかにした [18]。また、非エルミートな Chern 絶縁体において、エルミート系には対応物をもたない、特異なヘリカルエッジ状態が現れることを見出した [21]。さらに、非エルミートな 2 次元トポロジカル絶縁体においても、そのバルク・エッジ対応を確立した [29]。

### 量子ダイナミクスにおけるエンタングルメント・スペクトルのトポロジカルな交差

我々は1次元全ての Altland-Zirnbauer クラスに対して、クエンチ・ダイナミクスにおける安定な1+1次元トポロジカル構造を解明し、それをエンタングルメント・スペクトルを用いて検出することを提案した。具体的には、あるトポロジカル相からスタートし、異なるトポロジカル数を持つハミルトニアンで時間発展させると、一粒子エンタングルメント・スペクトルが必ず交差することを示した。この交差は乱れに対して安定であり、交差の数は $Z$ または $Z_2$ トポロジカル数を忠実に反映する。また、横磁場イジングモデルのクエンチ・ダイナミクスにおける多体エンタングルメント・スペクトルの一時的縮退の起源を明らかにした。以上の発見は、最先端の量子多体トモグラフィ技術を用いた冷却原子やイオントラップ系で検証できることが期待される。[26]

#### <受賞>

- [1] 川畑幸平: ポスターセッション最優秀賞・分科会優秀発表賞、第63回物性若手夏の学校、2018.7.27.
- [2] 川畑幸平: 2018年度秋季大会学生優秀発表賞(領域4)、日本物理学会、2018.10.18.
- [3] 川畑幸平: ポスター賞(銀賞)、第4回「トポ物質科学」領域研究会、名古屋大学、2019.1.23.
- [4] 藤本和也: ポスタープレビュー賞、第4回「トポ物質科学」領域研究会、名古屋大学、2019.1.23.
- [5] 蘆田祐人: 第9回育志賞、日本学術振興会、2019.3.8.
- [6] 蘆田祐人: 第13回若手奨励賞(領域1)、日本物理学会、2019.3.15.
- [7] 濱崎立資: 第74回年次大会学生優秀発表賞(領域11)、日本物理学会、2019.3.15.
- [8] 蘆田祐人: 平成30年度東京大学総長賞・理学系研究科研究奨励賞(博士課程)、2019.3.25.
- [9] 東川翔: 平成30年度理学系研究科研究奨励賞(博士課程)、東京大学、2019.3.25.
- [10] 川畑幸平: 平成30年度東京大学総長賞・理学系研究科研究奨励賞(修士課程)、2019.3.25.

#### <報文>

(原著論文)

- [11] Y. Ashida and M. Ueda: Full-Counting Many-Particle Dynamics: Nonlocal and Chiral Propagation of Correlations, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 185301 (2018).
- [12] M. Kanasz-Nagy, Y. Ashida, T. Shi, C. P. Moca, T. N. Ikeda, S. Foelling, J. I. Cirac, G. Zarand, and E. Demler: Exploring the Kondo model in and out of equilibrium with alkaline-earth atoms, *Phys. Rev. B* **97**, 155156 (2018).
- [13] N. T. Phuc and M. Ueda: Many-body spin Hall effect with space-inversion symmetry, *Phys. Rev. A* **97**, 061608(R) (2018).

- [14] E. Yukawa and M. Ueda: Nonholonomy of order parameters and  $su(3)$  vortices in spin-1 Bose-Einstein condensates, *Phys. Rev. A* **98**, 013607 (2018).
- [15] Y. Ashida, T. Shi, M. C. Banuls, J. I. Cirac, and E. Demler: Solving Quantum Impurity Problems in and out of Equilibrium with the Variational Approach, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 026805 (2018).
- [16] Y. Ashida, T. Shi, M. C. Banuls, J. I. Cirac, and E. Demler: Variational principle for quantum impurity systems in and out of equilibrium: Application to Kondo problems, *Phys. Rev. B* **98**, 024103 (2018).
- [17] N. Tsuji, T. Shitara, and M. Ueda: Bound on the exponential growth rate of out-of-time-ordered correlators, *Phys. Rev. E* **98**, 012216 (2018).
- [18] K. Kawabata, Y. Ashida, H. Katsura, and M. Ueda: Parity-time-symmetric topological superconductor, *Phys. Rev. B* **98**, 085116 (2018). Selected as Editors' Suggestion.
- [19] Z. Gong, Y. Ashida, K. Kawabata, K. Takasan, S. Higashikawa, and M. Ueda: Topological Phases of Non-Hermitian Systems, *Phys. Rev. X* **8**, 031079 (2018). See also Viewpoint: Physics **11**, 96.
- [20] Y. Ashida, K. Saito, and M. Ueda: Thermalization and Heating Dynamics in Open Generic Many-Body Systems, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 170402 (2018).
- [21] K. Kawabata, K. Shiozaki, and M. Ueda: Anomalous helical edge states in a non-Hermitian Chern insulator, *Phys. Rev. B* **98**, 165148 (2018).
- [22] M. Nakagawa, N. Kawakami, and M. Ueda: Non-Hermitian Kondo Effect in Ultracold Alkaline-Earth Atoms, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 203001 (2018).
- [23] Z.-Y. Shi, S. M. Yoshida, M. M. Parish, and J. Levinsen: Impurity-Induced Multibody Resonances in a Bose Gas, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 243401 (2018).
- [24] S. M. Yoshida, Z.-Y. Shi, J. Levinsen, and M. M. Parish: Few-body states of bosons interacting with a heavy quantum impurity, *Phys. Rev. A* **98**, 062705 (2018).
- [25] S. Uchino, M. Ueda, and J.-P. Brantut: Universal noise in continuous transport measurements of interacting fermions, *Phys. Rev. A* **98**, 063619 (2018).
- [26] Z. Gong and M. Ueda: Topological Entanglement-Spectrum Crossing in Quench Dynamics, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 250601 (2018).
- [27] T. Yoshino, S. Furukawa, S. Higashikawa, and M. Ueda: Collective modes of vortex lattices in two-component Bose-Einstein condensates under synthetic gauge fields, *New J. Phys.* **21**, 015001 (2019).

- [28] K. Kawabata, S. Higashikawa, Z. Gong, Y. Ashida, and M. Ueda: Topological unification of time-reversal and particle-hole symmetries in non-Hermitian physics, *Nat. Commun.* **10**, 297 (2019). Selected as Editors' Highlights.
- [29] T. Liu, Y.-R. Zhang, Q. Ai, Z. Gong, K. Kawabata, M. Ueda, and F. Nori: Second-Order Topological Phases in Non-Hermitian Systems, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 076801 (2019).
- (解説)
- [30] T. Mori, T. N. Ikeda, E. Kaminishi, and M. Ueda: Thermalization and prethermalization in isolated quantum systems: a theoretical overview, *J. Phys. B* **51**, 112001 (2018).
- (学位論文)
- [31] Yuto Ashida: Quantum Many-Body Physics in Open Systems: Measurement and Strong Correlations (博士論文) .
- [32] Sho Higashikawa: Floquet engineering of topological phenomena and nonlinear systems (博士論文) .
- [33] Kohei Kawabata: Topological classification of non-Hermitian insulators and superconductors (修士論文).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [34] Z. Gong: Topological quench dynamics and non-Hermitian phases – lessons from Floquet topological systems, International Molecule Program on Floquet Theory: Fundamentals and Applications (symposium), Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP), Kyoto University, Kyoto, 2018.4.16-18.
- [35] M. Ueda: Discrete Time-Crystalline Order in Cavity and Circuit-QED Systems, International Molecule Program on Floquet Theory: Fundamentals and Applications (symposium).
- [36] S. Furukawa and M. Ueda: Quantum Hall states with symmetry-enriched edge modes in multicomponent Bose gases, International Conference on Multi-Condensate Superconductivity and Superfluidity in Solids and Ultra-cold Gases (Multi-Super2018), International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italy, 2018.5.14-18.
- [37] M. Ueda: Atypicality of most few-body observables, KITP QTHERMO-C18 Conference, University of California, Santa Barbara, U.S.A, 2018.6.25-29.
- [38] M. Ueda: Non-equilibrium topo systems, Erice Workshop 2018, Ettore Majorana Foundation and Centre for Scientific Culture, Erice, Italy, 2018.7.21-27.
- [39] M. Ueda: Linear response and sum rules of ultracold atomic gases, Linear Response and Non-Equilibrium Dynamics of Quantum Many-Body Systems, Schloss Burgbrohl, Burgbrohl, Germany, 2018.8.13-16.
- [40] R. Hamazaki: Operator Noncommutativity and Irreversibility in Quantum Chaos, the 3rd Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases, Institute for Advanced Study, Tsinghua Univ., Beijing, China, 2018.8.25-26.
- [41] K. Kawabata: Topological Classification of Non-Hermitian Insulators and Superconductors, the 3rd Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases.
- [42] M. Ueda: Quantum many-body dynamics under continuous observation, US-Japan QELS-13, the 13th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy, APA Hotel Kanazawa-ekimae, Kanazawa, Japan, 2018.9.25-28.
- [43] M. Ueda: Discrete time crystalline order in cavity and circuit-QED systems, The 8th CEMS Research Camp, Hotel Mahoroba Miura, Miura, Japan, 2018.10.5-6.
- [44] M. Ueda: Dynamics of continuously monitored quantum many-body systems, Research Frontiers in Ultracold Quantum Gases, Physikzentrum Bad Honnef (PBH), Bad Honnef, Germany, 2018.12.17-21.
- [45] M. Ueda: Nonequilibrium many-body quantum dynamics under continuous observation, Physics across Boundaries, Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel, 2019.1.20-24.
- [46] M. Ueda: Nonequilibrium thermodynamics and many-body dynamics in open quantum systems, APS March Meeting, Boston Convention and Exhibition Center (BCEC), 2019.3.4-8.
- [47] M. Ueda: Nonequilibrium many-body quantum dynamics under continuous observation, II Workshop on Quantum Information and Thermodynamics, International Institute of Physics, Natal, Brazil, 2019.3.11-22.
- 一般講演
- [48] S. Higashikawa, M. Nakagawa and M. Ueda: Floquet chiral magnetic effect, International Molecule Program on Floquet Theory: Fundamentals and Applications, YITP, Kyoto, 2018.4.9-20.
- [49] Y. Ashida: Solving quantum spin-impurity problems in and out of equilibrium with variational approach, Tokyo-Melbourne mini-workshop on ultracold atom theory, RIKEN, Wako, 2018.4.25.
- [50] S. Higashikawa, M. Nakagawa and M. Ueda: Floquet chiral magnetic effect, Tokyo-Melbourne mini-workshop on ultra-cold atom theory.

- [51] T. Yoshino, S. Furukawa, S. Higashikawa and M. Ueda: Collective Modes of Vortex Lattices in Two-Component Bose-Einstein Condensates, 49th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics (DAMOP), Ft. Lauderdale, Florida, USA, 2018.5. 28-6.1.
- [52] K. Kawabata: Topological Unification of Time-Reversal and Particle-Hole Symmetries in Non-Hermitian Physics, Non-Hermitian Physics - PH-HQP XVIII, Bangalore, India, 2018.6.4.
- [53] S. Furukawa and M. Ueda: Quantum Hall states with symmetry-enriched edge modes in multi-component Bose gases, International Workshop on Symmetry and Topology in Condensed-Matter Physics, Univ. of Tokyo, Tokyo, 2018.6.19-21.
- [54] K. Kawabata: Topological Unification of Time-Reversal and Particle-Hole Symmetries in Non-Hermitian Physics, International Workshop on Symmetry and Topology in Condensed-Matter Physics.
- [55] T. Yoshino, S. Furukawa, S. Higashikawa and M. Ueda: Collective modes of vortex lattices in two-Component Bose-Einstein condensates in synthetic gauge fields, International Symposium on Quantum Fluids and Solids, Univ. of Tokyo, Tokyo, 2018.6.25-31.
- [56] S. Furukawa and M. Ueda: Quantum Hall states with symmetry-enriched edge modes in multicomponent Bose gases, the 3rd Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases, Institute for Advanced Study, Tsinghua Univ., 2018.8.25-26.
- [57] T. Yoshino, S. Furukawa, S. Higashikawa and M. Ueda: Collective modes of vortex lattices in two-component Bose-Einstein condensates, US-Japan QELS-13, the 13th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy, Kanazawa, 2018.9.25-28.
- [58] Z. Liu, H. T. Yao-Hung, M. Yamada, R. Salakhutdinov: Semi-Supervised Pairing via Basis-Sharing Wasserstein Matching Auto-Encoder, NeurIPS 2018 Workshop on Bayesian Deep Learning, Palais des Congrès de Montréal, Montréal, Canada, 2018.12.7.
- [59] Z. Liu, J. Chen, P. P. Liang, M. Ueda: Relational Attention Networks via Fully-Connected Conditional Random Fields, NeurIPS 2018 Workshop on Bayesian Deep Learning.
- [60] P. P. Liang, Z. Liu, A. Zadeh, L.-P. Morency: Modeling Spatiotemporal Multimodal Language with Recurrent Multistage Fusion, NeurIPS 2018 Workshop on Modeling and Decision-making in the Spatiotemporal Domain, Palais des Congrès de Montréal, Montréal, Canada, 2018.12.7.
- [61] K. Kawabata: Topological classification of non-Hermitian insulators and superconductors, International workshop BEC2018X, Tokyo, Japan, 2018.12.11.
- [62] S. Furukawa and T. Momoi: Dzyaloshinskii-Moriya interactions in volborthite: magnetic orders and thermal Hall effect, Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems (TPFC 2019), Institute for Solid State Physics, Univ. of Tokyo, Kashiwa, 2019.2.18-20.
- [63] K. Fujimoto, R. Hamazaki, and M. Ueda: Non-thermal fixed points in a one-dimensional antiferromagnetic spinor Bose gas, APS March Meeting 2019, Boston, USA, 2019.3.4-8.
- (国内会議)
- 招待講演
- [64] 久良尚任, 上田正仁: 機械学習と物理、大阪大学豊中キャンパス、2018.6.1.
- [65] 蘆田祐人: Open quantum physics: recent topics in non-Hermitian systems and beyond、熱場の量子論とその応用、理研、2018.8.30.
- [66] 濱崎立資: 孤立量子系における非平衡ダイナミクスと熱平衡化、同上.
- [67] Zongping Gong: Nonequilibrium topological phases in driven and dissipative systems、非平衡系・非エルミート系の新奇量子現象、京都大学基礎物理学研究所、2018.11.30-12.1.
- [68] 川畑幸平: 非エルミートなトポロジカル絶縁体・超伝導体の分類理論、同上.
- [69] 古川俊輔, 上田正仁: 多成分ボース気体の量子ホール物理: 対称性による保護と富化、第4回「トポ物質科学」領域研究会、名古屋大学、2019.1.22-24.
- [70] 蘆田祐人: 開いた系の量子多体物理: 測定と強相関効果、第7回統計物理懇談会、学習院大学、2019.3.6.
- [71] 蘆田祐人: 冷却原子気体における超解像測定法とそれを用いた開放量子多体系の理論的研究(若手奨励賞受賞講演)、日本物理学会第74回年次大会、九州大学、2019.3.15.
- [72] 上田正仁: 「量子シミュレーション」とは何か?(シンポジウム講演 量子シミュレーションの最前線: 極低温粒子系から探る宇宙・ハドロン・物性物理)、日本物理学会第74回年次大会、九州大学、2019.3.14.
- [73] 川畑幸平: 非エルミート物理における対称性とトポロジー(シンポジウム講演 非エルミート量子力学の新展開)、日本物理学会第74回年次大会、九州大学、2019.3.14.
- 一般講演
- [74] 蘆田祐人: Solving quantum impurity problems in and out of equilibrium with variational approach、量子情報・物性の新潮流、東京大学物性研究所、2018.8.2.
- [75] 川畑幸平、東川翔、Zongping Gong、蘆田祐人、上田正仁: 非エルミートなトポロジカル相の分類理論: 時間反転対称性と粒子正孔対称性の統一、同上.
- [76] 濱崎立資: 非可換性の増大はカオス的不可逆性とのように関係するか?、同上.

- [77] 蘆田祐人、齊藤圭司、上田正仁: 連続観測下の開放量下体系における熱化、日本物理学 2018 年秋季大会、同志社大学京田辺キャンパス、2018.9.9-12.
- [78] 川畑幸平、東川翔、Zongping Gong、蘆田祐人、上田正仁: 非エルミートなトポロジカル相の分類理論: 時間反転対称性と粒子正孔対称性の統一、同上.
- [79] 久良尚任、上田正仁: 連続関数における量子度量衡の標本限界、同上.
- [80] 濱崎立資、川畑幸平、上田正仁: 非エルミート多体局在、同上.
- [81] 濱崎立資、藤本和也、上田正仁: カオス的不可逆性の指標としての非可換性の増大、同上.
- [82] 藤本和也、濱崎立資、上田正仁: 反強磁性スピノール Bose 気体における 1 次元系の粗視化ダイナミクス、同上.
- [83] 古川俊輔、上田正仁:  $n$  成分ボース気体の分数量子ホール状態: 対称性により富化された端モード、同上.
- [84] 濱崎立資: 非エルミート多体局在、非平衡系・非エルミート系の新奇量子現象、京都大学基礎物理学研究所、2018.11.30-12.1.
- [85] 藤本和也、濱崎立資、上田正仁、1 次元スピノール Bose 気体における非熱的固定点、非平衡系の物理学一階層性と普遍性一、京都大学基礎物理学研究所、2018.12.26-28
- [86] 川畑幸平、塩崎謙、上田正仁、佐藤昌利: 非エルミートなトポロジカル絶縁体・超伝導体の分類理論、第 4 回「トポ物質科学」領域研究会、名古屋大学、2019.1.22-24.
- [87] 藤本和也、濱崎立資、上田正仁: Universal thermalization dynamics and a non-thermal fixed point in a one-dimensional antiferromagnetic spinor Bose gas、同上.
- [88] 古川俊輔、桃井勉: ボルボサイトにおける Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用の効果: 磁気秩序と熱ホール効果、同上.
- [89] 松本徳文、川畑幸平、蘆田祐人、古川俊輔、上田正仁: 非エルミートなトーリック・コード模型における励起ギャップを閉じない連続相転移、同上.
- [90] 吉野匠、古川俊輔、上田正仁: 人工ゲージ場中の二成分 Bose-Einstein 凝縮体における渦格子の集団励起、同上.
- [91] 川畑幸平、塩崎謙、上田正仁、佐藤昌利: 非エルミートなトポロジカル絶縁体・超伝導体の分類理論、日本物理学会第 74 回年次大会、九州大学伊都キャンパス、2019.3.14-17.
- [92] 濱崎立資、Marin Bukov, Snir Gazit, Ehud Altman: マクスウェルの悪魔に駆動された量子多体系の非平衡定常状態、同上.
- [93] 松本徳文、川畑幸平、蘆田祐人、古川俊輔、上田正仁: 非エルミートなトーリック・コード模型における励起ギャップを閉じない連続相転移、同上.
- [94] 吉野匠、古川俊輔、上田正仁: 人工ゲージ場中における二成分 Bose-Einstein 凝縮体における渦格子の量子ゆらぎ、同上.  
(セミナー)
- [95] Z. Gong: Discrete Time-Crystalline Order in Cavity and Circuit QED Systems, 矢上統計物理学セミナー (齊藤研究室)、慶應大学、2018.5.28.
- [96] 川畑幸平: Topological Unification of Time-Reversal and Particle-Hole Symmetries in Non-Hermitian Physics、統計力学セミナー、東京大学、2018.6.25.
- [97] 濱崎立資: 孤立量子系の統計力学に関する近年の話題、物性論セミナー (佐藤研究室)、茨城大学、2018.7.4.
- [98] Z. Gong: Topological Phases of Non-Hermitian Systems、物性論セミナー (初貝研究室)、筑波大学、2018.7.11.1.
- [99] 東川翔: 古典非線形方程式の Floquet-Magnus 展開と磁性体のダイナミクスへの応用、羽田野研究室セミナー、東京大学、2018.7.18.
- [100] S. Higashikawa, M. Nakagawa and M. Ueda: Floquet chiral magnetic effect, Nonequilibrium Quantum Matter group seminar, Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, 2018.8.28.
- [101] Z. Gong: Order and topology out of equilibrium, Theory Seminar, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, 2018.9.12.
- [102] 蘆田祐人: Quantum many-body physics in open systems: measurement and strong correlations、物性論セミナー (初貝研究室)、筑波大学、2018.9.26.
- [103] 藤本和也: 冷却原子気体における普遍的な緩和ダイナミクス、アインシュタインセミナー 2018、大津、KKR ホテルびわこ、2018.9.27.
- [104] 川畑幸平: Topological classification of non-Hermitian insulators and superconductors、ハドロン物理セミナー、東京大学、2018.10.26.
- [105] Z. Gong: Topological Phases of Non-Hermitian Systems、羽田野研究室セミナー、東京大学、2018.12.21.
- [106] 蘆田祐人: Open quantum physics: recent topics in non-Hermitian physics and beyond、日本大学素粒子論セミナー、日本大学、2019.1.23.
- [107] 川畑幸平: 非エルミートなトポロジカル絶縁体・超伝導体の分類理論、物性論セミナー (佐藤研究室)、茨城大学、2019.1.30.
- [108] Kazuya Fujimoto: Soliton-induced non-thermal fixed points in a one-dimensional antiferromagnetic spin-1 Bose gas, Hadron Physics seminar (Fukushima Lab)、東京大学、2019.2.8.
- [109] Kazuya Fujimoto: Non-thermal fixed points and magnetic solitons in a one-dimensional spinor Bose gas, AMO seminar, Georgia Tech, Atlanta, USA, 2019.2.14.
- [110] Kazuya Fujimoto: Non-thermal fixed points in a one-dimensional antiferromagnetic Bose gas, Atomic Physics Seminar, Yale University, New Haven, USA, 2019.2.27.
- [111] 川畑幸平: Topological classification of non-Hermitian insulators and superconductors、AIMR math group seminar、東北大学、2019.3.8.

[112] 濱崎立資: Non-Hermitian Many-Body Localization, YITP セミナー、京都大学、2019.3.8.

(その他)

[113] 川畑幸平、東川翔、Zongping Gong、蘆田祐人、上田正仁: 非平衡開放系におけるトポロジカル相: 非エルミート性とトポロジー、第 63 回物性若手夏の学校、西浦温泉ホテル龍城、2018.7.25.

[114] 川畑幸平、東川翔、Zongping Gong、蘆田祐人、上田正仁: 非エルミートなトポロジカル相の分類理論: 時間反転対称性と粒子正孔対称性の統一、第 63 回物性若手夏の学校、西浦温泉ホテル龍城、2018.7.26.

## 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 の本格稼働を控え、重力波データ解析の研究と人材育成にも取り組んでいます。2018 年 4 月に東京工業大学に転出した須山輝明助教の後任として、2018 年 9 月に鎌田耕平助教が着任し、素粒子的宇宙論の研究と教育にあたっています。

### 5.4.1 初期宇宙論

#### Higgs- $R^2$ インフレーション

時空のスカラー曲率  $R$  の自乗項ならびにスカラー曲率との結合項を持つヒッグス場の双方がインフレーションに寄与する理論を考察した。このモデルは大きな non-minimal coupling 項による質量補正を受けた有効的な  $R^2$  インフレーションとみなせ、インフレーション中に生成される初期曲率摂動とテンソル摂動は観測的に支持されるスカラーゆらぎのスペクトル指数とテンソルスカラー比を与えることを示した [2, 19, 25]。さらに、理論のカットオフスケールはこのモデルにおいてプランクスケールになり、non-minimal coupling 項だけのモデル (ヒッグスインフレーション) の場合に存在したインフレーション直後の爆発的なゲージ場生成は、このモデルにおいては宇宙の再加熱を完了させるほどの効果を持たないことがわかった [12, 36, 37, 42, 77]。

#### インフレーション中の相転移の初期ゆらぎへの影響

インフレーション中の重い粒子の崩壊は、特に重い場の質量がハッブルパラメータ程度の「準単一場」模型の場合、初期ゆらぎのバースペクトラムに特徴的なシグナルを生じることが知られている。我々は

ハイブリッドインフレーションの waterfall 転移を引き起こす場がこの機構を引き起こす場合を考察し、バースペクトルに特徴的な振動が現れることを発見し、これがインフレーション中の相転移の証拠となりうることを示した [6, 26, 30]。また、単一場インフレーション中に滑らかな相転移を起こす spectator 場の高次摂動による補正からの初期ゆらぎへの影響を調べ、それが負の質量を持っている場合は曲率ゆらぎへの主要な補正は相転移時に地平線スケールを超えて凍結しているモードから来るのに対し、テンソルゆらぎは空間微分項によって自然に抑制されることを示した。1 ループレベルでの主要な寄与は曲率ゆらぎへ崩壊する spectator 場の二体散乱から生じ、この崩壊過程はインフレーション中のハッブルスケール程度の質量にのみ高い感度を持つことがわかった [3]。

#### 非等方インフレーション

一般化 G インフレーションにおいて、アインシュタインテンソルとスカラー場が運動項の関数を通じて結合するとき、よく知られている等方解に加え、非等方な膨張が実現可能であることを指摘した [5]。次に、一様非等方宇宙の一つである Bianchi I 型宇宙の摂動の安定性を調べた [23, 28, 34, 39, 66, 73]。その結果、著しい非等方性を持つ場合は偶パリティの摂動の 1 モードが不安定になり、スカラー場が補助場として働く場合にはその不安定性を取り除けることが明らかになった。

#### 非一様な場からの宇宙創生

インフレーション機構は現在の宇宙の平坦性を説明する標準的な宇宙論モデルであるが、そのインフレーションがどのような初期条件で始まったのかは現在でも議論が続いており、インフレーションの初期条件問題として知られている。初期条件に対して微調整をすることなく、非一様な状況でもインフレーションが始まることを示せれば、インフレーション機構をさらに信憑性の高いものにできる。非一様性の極みとも言える状況として、ブラックホールの存在する初期条件に着目し、そのブラックホールの蒸発過程の最終状態で、新たにインフレーションが始まり得ることを示した [7, 18]。現在は、ブラックホール以外の非一様な場の分布から、量子的効果によりインフレーションが始まるシナリオを理論的に検証することを目指している。

#### アクシオン宇宙紐の長期ダイナミクス

アクシオンは暗黒物質の最有力候補の一つであり、アクシオン宇宙紐はその主要な生成源の一つである。アクシオン宇宙紐からのアクシオン暗黒物質生成量を正確に予言するためには、宇宙紐ネットワークのダイナミクスを正確に理解する必要がある。我々は

規模数値シミュレーションによりアクシオン宇宙紐ネットワークの発展を過去の研究の8倍程度まで追い、その長期的な振る舞いを検証した。そこで我々は、ホライズンあたりのアクシオン宇宙紐の本数が時間の対数関数で増加することを発見した。これは、これまで広く信じられてきたスケールリング則にアクシオン宇宙紐は従わないということを意味する。この結果は、宇宙紐からのアクシオン暗黒物質生成量が10倍程度増え得ることを示唆し、アクシオン暗黒物質直接検出実験がターゲットとすべきアクシオン質量に重要な予言を与えた [8]。

### Twin Higgs 模型における電弱相転移

ヒッグス粒子の質量と未発見の標準模型を超えた物理のエネルギースケール間の階層性問題を解決する模型の1つに Twin Higgs 模型と呼ばれるものがある。我々は、この模型における宇宙の熱史を調べ、特に宇宙論的相転移がどのように進行するかを調べた。結果、この模型に付随する電弱相転移、および大域的対称性を破る相転移は多くのパラメータにおいて強い一次相転移にはなり得ず、強い一次相転移であってもその時に生成される重力波は DECIGO 等の将来実験で検出できるほどの強さにならないことがわかった。逆に将来実験で宇宙論的相転移に由来する背景重力波を観測された場合、この模型は大きな変更を加えない限り棄却されることになる [9]。

### インフラトン場の振動を伴わないインフレーション理論に於ける重力的再加熱過程

$k$  インフレーションやクインテセンシャルインフレーションなど、インフレーション後にインフラトン場の振動を伴わない理論に於ける再加熱過程を議論した。このようなインフレーション理論に於いて、再加熱過程は重力的粒子生成によって実現する。そこで、我々はこの重力的再加熱過程を定量的に評価した [10, 38, 52, 54]。これまで、重力的粒子生成は Born 近似や WKB 近似による摂動論的計算によって評価されることが殆どであったが、我々はこれを解析的、及び数値的に計算することで、非摂動論的な効果も取り込んで評価した。その結果、重力的粒子生成はこれまで言われていたような、インフレーション中のハッブルスケールや生成する粒子の質量ではなく、インフレーションが終了するのに要する時間スケールによって決まることがわかり、またフィッティングによって重力的に生成する粒子のエネルギー密度を見積もる簡潔な近似式を得た。

### 重力的再加熱過程に於ける暗黒物質

我々は PGDM と呼ばれる標準模型の素粒子と重力的しか相互作用しないような暗黒物質を考え、これが重力的再加熱過程によって現在観測されている暗黒物質の存在量を説明し得るほど生成するか調べ

た [15, 45, 57]。その結果、宇宙マイクロ波背景放射の観測による原始重力波による制限を避けつつ、十分な量の PGDM を生成できるパラメータ領域が存在することを示した。

### コンパクト物質周りでのヒッグス不安定性に関する研究

ヒッグス場の有効ポテンシャルに含まれる結合定数の量子補正を考慮した上で、ヒッグス場の値をプランクスケール付近まで外挿すると、負のエネルギー領域 (真空の不安定状態) が現れることが素粒子実験から示唆されている。このヒッグス不安定性が事実であったと仮定した場合に、Gregory らはブラックホールまわりでその不安定性がより顕著になることを示した。ブラックホールが宇宙空間における「不純物」として存在するため、そのまわりで真空泡が核生成しやすくなることが原因となっている。ブラックホールに限らず、gravastar などの奇矯なコンパクト物質でも、このような触媒効果が起きることを理論的に示した。また、パラメーターによっては、事象の地平面を持たない物質の方がブラックホールよりも強い触媒効果をもたらすことも明らかとなった [14]。

### マイクロブラックホールダークマター

プランクスケール以上のエネルギーを持つ高エネルギー粒子が衝突するとマイクロブラックホールが形成されると予測される。一部の高次元理論などのように本来のプランクスケールが低エネルギー物理を表すニュートンの重力定数から示唆される値よりも小さい場合、このようなブラックホールは観測的な意味を持ち得る。ここでは、こうした理論においてインフレーション後の再加熱時期に生成したマイクロブラックホールがホーキング放射によって完全に蒸発することなく、本来のプランクスケール程度の残存物となった場合、それがコールドダークマターを説明し得ることを示した。このようなダークマターは極初期宇宙に脱結合するため、小さな特異速度しか持たず、生成するハローの質量の下限が非常に小さくなるという観測的特徴を持つ [16, 50]。

### ヒッグス場による宇宙再加熱

$k$  インフレーションや  $G$  インフレーションのように、インフレーション後の宇宙が自由スカラー場の運動エネルギーで満たされるような理論においては、ヒッグス場が時空のスカラー曲率と正の結合をしている場合、インフレーション後にスカラー曲率が負になることからスピノーダル不安定性が起こり、ヒッグス場のポテンシャルエネルギーが解放されることによる宇宙再加熱が実現することを示した [17, 49]。

## カイラル量子異常を用いた宇宙磁場生成と物質反物質非対称性

我々は、ヘリカルな磁場が宇宙初期に存在した場合、標準模型のカイラル量子異常を通じて特に電弱相転移時に大きな物質反物質非対称を生成し、現在の宇宙の非対称を説明しうることを示した [72, 74]。さらに、そのような磁場の生成方法として、初期宇宙プラズマに含まれるフェルミオンのカイラリティの非対称を起源とするカイラルプラズマ不安定が近年注目されているが、そのようなフェルミオンの非対称が大統一理論に由来した模型において実現しうることを示した [31, 69, 70, 71, 75]。

### 5.4.2 天体素粒子物理

#### 中性子星磁気圏でのアクシオン間接検出

アクシオンは暗黒物質の最有力候補の一つである。アクシオンは一般に磁場中で光子と混合し、その性質を利用した様々な直接検出実験が計画・進行中である。我々は宇宙においても同様のことが起こりうることを考え、宇宙で最も強い磁場を持つ中性子星に着目してアクシオンの間接検出が可能であることを示した。特に我々は、中性子星周辺のプラズマ中で光子がアクシオン程度の質量を持ち、そのためアクシオン・光子変換が共鳴的に起こり得ることを示した。この効果により、シグナルが増幅される。Square Kilometer Array など近い将来の電波サーベイにより、質量によっては地上実験を何桁も凌駕する制限が得られることを示した [4]。

### 5.4.3 観測的宇宙論

#### ミニハローを用いた初期非ガウス性の制限

我々は、構造形成においてできるミニハローと呼ばれる小さなハローからの赤方偏移 21cm 線をもちいた初期非ガウス性の制限可能性を調べた。初期非ガウス性はインフレーション期に複数の自由度の存在を示す重要な観測量である。初期非ガウス性があると、暗黒物質ハローなどバイアスされた構造のパワースペクトルが大きなスケールで増幅される。赤方偏移 21cm 線の観測は宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) に匹敵する大スケールの中性水素を 3 次元的に観測でき、そのためミニハローのパワースペクトルを通じて初期非ガウス性を CMB よりも改善できる可能性がある。我々はフィッシャー行列解析を用いて、将来の赤方偏移 21cm 線観測による初期非ガウス性への制限を評価し、CMB を凌駕する制限が得られることを示した [13]。

### 5.4.4 重力波

#### リングダウン重力波観測からの量子重力理論の検証

ブラックホールの地平面付近には、量子重力理論に起因するプランクサイズの微視的構造があることが示唆されており、この微視的構造の存在は、ブラックホールの熱力学量の一つである Bekenstein-Hawking entropy から示唆されている。近年、ブラックホール連星からの重力波が検出され、ブラックホールの固有振動数の測定も現実味を帯びてきている。ブラックホールの固有振動数はその事象の地平面の時空構造に強く依存しており、地平面付近の物理の検証に最適な物理量として知られている。ブラックホールの表面で起きる重力的青方偏移の影響によって、ブラックホールの固有振動数が、プランクスケールでの重力理論から大きな影響を受ける可能性を理論的に調べた。具体的には、重力波の分散関係に、プランクスケールで抑えられた小さな修正項を加え、ブラックホールのリングダウン重力波の波形を数値計算した。その結果、リングダウン重力波は古典的な一般相対論の予言と変わらないが、その後続く重力波形においては「うなり」のような波形が連続的に現れることが明らかとなった [11]。もし、うなりのような重力波形が観測されれば、それはブラックホール表面の微視的な構造に起因するシグナルである可能性があり、量子重力理論に対する観測的検証を示唆する意味で重要な成果である。

#### iKAGRA データを用いた独立成分解析の有効性の検証

独立成分解析 (ICA) とは、固有の統計分布を持ち、互いに独立な信号が混合して観測された際に、観測データを元の信号へと分離する手法である。この手法を重力波検出器 KAGRA の strain チャンネルと環境チャンネルに対して適用することで、strain から環境雑音を分離し、雑音レベルを低下させることができると考えられる。我々は実際の iKAGRA データを用いた重力波信号検出のシミュレーションを行い、特に連続波テンプレートを strain に挿入した際、ICA を適用することで strain の信号対雑音比を上昇させることに成功した [40, 41, 58]。

#### <受賞>

- [1] 大下翔誉、理学系研究科奨励賞、東京大学大学院理学系研究科、2019 年 3 月 25 日。

#### <報文>

##### (原著論文)

- [2] M. He, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “Inflation in the mixed Higgs- $R^2$  model,” JCAP **1805** (2018) 064
- [3] Y.-P. Wu and J. Yokoyama, “Loop corrections to primordial fluctuations from inflationary phase transitions” JCAP **1805** (2018) 009

- [4] F. P. Huang, K. Kadota, T. Sekiguchi and H. Tashiro, “Radio telescope search for the resonant conversion of cold dark matter axions from the magnetized astrophysical sources,” *Phys. Rev. D* **97**, no. 12, 123001 (2018).
- [5] H. W. H. Tahara, S. Nishi, T. Kobayashi and J. Yokoyama, “Self-anisotropizing inflationary universe in Horndeski theory and beyond,” *JCAP* **1807** (2018) 058
- [6] Y. Wang, Y.-P. Wu, J. Yokoyama and S. Zhou, “Hybrid Quasi-Single Field Inflation ” *JCAP* **1807** (2018) 068
- [7] Naritaka Oshita and Jun’ichi Yokoyama, “Creation of an inflationary universe out of a black hole ” , *Phys. Lett. B* **785** (2018) 197-200.
- [8] M. Kawasaki, T. Sekiguchi, M. Yamaguchi, J. Yokoyama, “Long-term dynamics of cosmological axion strings ” *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2018**, no. 9, 091E01 (2018).
- [9] K. Fujikura, K. Kamada, Y. Nakai, M. Yamaguchi, “Phase Transitions in Twin Higgs Models,” *JHEP* **1812** (2018) 018
- [10] S. Hashiba and J. Yokoyama, “Gravitational reheating through conformally coupled superheavy scalar particles,” *JCAP* **1901** (2019) 028.
- [11] N. Oshita and Niayesh Afshordi, “Probing microstructure of black hole spacetimes with gravitational wave echoes” *Physical Review D* **99**, 044002 (2018).
- [12] M. He, R. Jinno, K. Kamada, S. C. Park, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “On the violent preheating in the mixed Higgs- $R^2$  inflationary model,” *Phys. Lett. B* **791**, 36 (2019)
- [13] T. Sekiguchi, T. Takahashi, H. Tashiro and S. Yokoyama, “Probing primordial non-Gaussianity with 21 cm fluctuations from minihalos,” *JCAP* **1902** (2019) 033
- [14] N. Oshita, Masaki Yamada, and Masahide Yamaguchi, “Compact objects as the catalysts for vacuum decays” *Phys. Lett. B* **791** (2019) 149-155.
- [15] S. Hashiba and J. Yokoyama, “Gravitational particle creation for dark matter and reheating,” *Phys. Rev. D* **99** (2019) no.4, 043008.
- [16] T. Nakama and J. Yokoyama, “Micro black holes formed in the early Universe and their cosmological implications,” *Physical Reivew Rapid Communications* **D99** (2019)061303
- [17] T. Nakama and J. Yokoyama, “Reheating through the Higgs amplified by spinodal instabilities and gravitational creation of gravitons,” *PTEP* **2019**(2019)033
- (会議抄録)
- [18] Naritaka Oshita and Jun’ichi Yokoyama, “Creation of an inflationary universe out of black hole space-time,” *Int. J. Mod. Phys. A* **33** (2018) no.31, 1844005.
- (学位論文)
- [19] Minxi He: “Inflation in the Mixed Higgs- $R^2$  Inflation” (修士論文)
- [20] 羽柴聡一郎、「インフレーション後の宇宙再加熱過程に於ける超重粒子の重力的生成とその帰結」(修士論文)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [21] T. Sekiguchi, ”Long-term dynamics of axion strings,” RESCEU summer school, Hokkaido, 2018/07/28
- [22] Y.-P. Wu, “Search for heavy physics in the cosmological collider,” RESCEU Summer School 2018, Hokkaido, Japan, 2018/07/29
- [23] H. W. H. Tahara, “Self-anisotropizing universe in Horndeski theory,” RESCEU Summer School 2018, Hokkaido, Japan, 2018/07/30
- [24] J. Yokoyama, “Gravitational wave data analysis with the independent component analysis,” KAGRA data analysis workshop, University of Toyama (Toyama) 2018/8/23
- [25] M. He, ”Inflation in the Mixed Higgs- $R^2$  Model,” COSMO-18, Institute for Basic Science, Daejeon, South Korea, 2018/08/30
- [26] Y.-P. Wu, “Search for hybrid inflation with the cosmological collider,” COSMO-18, Institute for Basic Science, Daejeon, South Korea, 2018/08/30
- [27] Naritaka Oshita, “Inflationary universes born out of the highly inhomogeneous initial condition ” , COSMO-18, Institute for Basic Science, Daejeon, South Korea, 2018/08/30
- [28] H. W. H. Tahara, “Self-anisotropizing universe in Horndeski theory,” COSMO-18, Daejeon, Korea, 2018/08/30
- [29] T. Sekiguchi ”Simulation of axion electrodynamics and its cosmological applications,” Invisible 2018, Karlsruhe Institute of Technology, Germany, 2018/09/03
- [30] Y.-P. Wu, “Signature of heavy physics in the primordial non-Gaussianity,” GRAVITY @ PRAGUE 2018, Charles University, Prague, Czech Republic, 2018/09/13
- [31] K. Kamada, “Primordial Hypermagnetic Fields with Helicity and Baryon Asymmetry of the Universe,” Workshop ‘Quantum Anomalies and Chiral Magnetic Phenomena,’ Nordita, Stockholm, Sweden, 2018/09/28
- [32] T. Sekiguchi ”Long-term dynamics in axion string networks,” 10th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, Tsukuba University, Ibaraki, Japan, 2018/10/15

- [33] T. Sekiguchi "Long-term dynamics of axion strings," The 28th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG28), Rikkyo University, Tokyo, Japan, 2018/11/05
- [34] H. W. H. Tahara, "Self-anisotropizing universe in Horndeski theory," The 28th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG28), Rikkyo University, Tokyo, 2018/11/07
- [35] Y.-P. Wu, "Higgs as heavy-lifted physics during inflation," The 28th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG28), Rikkyo University, Tokyo, 2018/11/08
- [36] M. He, "Reheating in the Mixed Higgs- $R^2$  Model," The 28th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan-JGRG28, Rikkyo University, Tokyo, Japan, 2018/11/08
- [37] M. He, "Reheating in the Mixed Higgs- $R^2$  Model," CosPA2018, Yangzhou, China, 2018/11/20
- [38] S. Hashiba, "Non-perturbative method for calculating gravitational particle creation," CosPA2018, Yangzhou, China, 2018/11/20
- [39] H. W. H. Tahara, "Self-anisotropizing universe in Horndeski theory," CosPA2018, Yangzhou, China, 2018/11/20
- [40] J. Kume, T. Sekiguchi, S. Morisaki, Yosuke Itoh and J. Yokoyama, "Independent component analysis with iKAGRA data: continuous wave signals" (poster), The 21st KAGRA face-to-face meeting, NAOJ, Japan, 2018/12/5-6
- [41] T. Sekiguchi, J. Kume, S. Morisaki, Yosuke Itoh and J. Yokoyama, "Independent component analysis with iKAGRA data: burst signals" (poster), The 21st KAGRA face-to-face meeting, NAOJ, Japan, 2018/12/5-6
- [42] K. Kamada, "On the preheating in a scale invariant UV extension of Higgs inflation," Workshop 'Scale invariance in particle physics and cosmology,' CERN, Geneva, Switzerland, 2019/01/29
- [43] T. Sekiguchi, "Probing dark energy with 21cm line observations," JSPS-FAPESP workshop on dark energy, dark matter and galaxies, Sao Paulo University, Sao Paulo, Brazil, 2019/02/19
- [44] N. Oshita, "Rotating quantum black holes and ringdown gravitational waves", Accelerating Universe in the Dark, Kyoto University, Kyoto, Japan, 2019/3/5.
- [45] S. Hashiba, "Gravitational particle creation for dark matter and reheating," Accelerating Universe in the Dark, Kyoto University, Kyoto, Japan, 2019/03/05
- 招待講演
- [46] J. Yokoyama, "Reheating and spontaneous cogenesis after G-inflation," Joint Canada Asia Pacific Conference on General Relativity and Relativistic Astrophysics, Alberta University (Canada) 2018/6/29
- [47] J. Yokoyama, "Approaches to inflationary cosmology," Summer School of Democritos Institute (Greece) 2018/7/6
- [48] J. Yokoyama, "Self-anisotropizing inflationary universe in Horndeski theory and beyond," 7th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP2018) Greek Orthodox Academy (Crete, Greece)
- [49] J. Yokoyama, "Cosmology of the Higgs field," 5th Korea-Japan workshop on dark energy, KASI (Korea) 2018/8/7
- [50] J. Yokoyama, "Micro black hole remnant and Planckian interacting dark matter," CosPA2018, Yangzhou University (China) 2018/11/22
- [51] Y.-P. Wu, "Inflationary particle production and non-Gaussianity," 5th International Workshop on "Dark Matter, Dark Energy and Matter-Antimatter Asymmetry," Hsinchu and Kaohsiung, Taiwan, 2018/12/30
- (国内会議)
- 一般講演
- [52] 羽柴聡一郎、横山順一、「非摂動的手法に基づく重力的粒子生成の計算」、日本物理学会 2018 年秋季大会、信州大学、2018/9/14
- [53] 大下 翔誉、「非一様時空からの宇宙創生とインフレーション宇宙の初期条件問題」、日本物理学会 2018 年秋季大会、信州大学、2018/9/14
- [54] 羽柴聡一郎、「重力再加熱」、新学術「加速宇宙」A01 班「インフレーション」小研究会、東京大学、2018/12/6
- [55] 横山順一 「インフレーションからキネーション時の重力的ダークマター生成」新学術「加速宇宙」A01 班「インフレーション」小研究会、東京大学、2018/12/6
- [56] 関口豊和、「Late-time axion magnetogenesis,」日本物理学会第 74 回年次大会、九州大学、2019/3/14
- [57] 羽柴聡一郎、横山順一、「重力的粒子生成による再加熱と暗黒物質の生成」、日本物理学会第 74 回年次大会、九州大学、2019/3/14
- [58] 桑潤哉、関口豊和、森崎宗一郎、伊藤洋介、横山順一、KAGRA collaboration、「iKAGRA データを用いた独立成分解析の有効性の検証」、日本物理学会第 74 回年次大会、九州大学、2018/03/17
- 招待講演
- [59] 関口豊和、「Searching redshifted 21cm line signal for primordial fluctuations,」 group A01 workshop of Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas "Accelerating Universe", Kavli IPMU, 東京大学、2018/12/05
- (セミナー)
- [60] J. Yokoyama, "Inflationary cosmology," Max Planck Institute für Astrophysik 2018/2/7

- [61] Naritaka Oshita, “Birth of an inflationary universe out of an evaporating black hole”, Astrophysical Big Bang Laboratory seminar, 理化学研究所, 2018/4/20.
- [62] T. Sekiguchi, “Simulation of axion electrodynamics and its cosmological applications,” University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2018/04/23
- [63] Naritaka Oshita, “Shedding light on the initial condition problem for cosmological inflation”, Seminar in Theoretical Particle Physics Group, 北海道大学, 2018/4/27.
- [64] Y.-P. Wu, “Higgs as heavy physics during inflation,” Joint Seminar, RESCEU, the University of Tokyo, 2018/07/09
- [65] T. Sekiguchi, “Searching cosmic structure for nature of dark matter,” Joint Seminar at University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2018/07/09
- [66] H. Tahara, “Self-anisotropizing universe in Horndeski theory,” Waseda University, 2018/07/20
- [67] T. Sekiguchi, “Simulation of axion electrodynamics and its cosmological applications,” University of Helsinki, Helsinki, Finland, 2018/08/29
- [68] T. Sekiguchi, “Simulation of axion electrodynamics and its cosmological applications,” SISSA, Trieste, Italy, 2018/09/11
- [69] K. Kamada, “ Chiral anomaly and its implications on primordial magnetic fields and baryogenesis,” DAMTP, Cambridge University, Cambridge, United Kingdom, 2018/10/2
- [70] K. Kamada, “ Primordial magnetic fields and their implications on particle physics and cosmology,” Universitas Studii Paduani, Padua, Italy, 2018/10/10
- [71] K. Kamada, “ Chiral plasma instability in the early Universe and its implications on baryogenesis,” EPFL, Lausanne, Switzerland, 2018/10/12
- [72] K. Kamada, “Baryogenesis from helical hypermagnetic fields and Standard Model electroweak crossover,” Universität Bern, Bern, Switzerland, 2018/10/15
- [73] H. W. H. Tahara, “Self-anisotropizing universe in Horndeski theory,” ITP-CAS, Beijing, China, 2018/11/15
- [74] K. Kamada, “ Primordial magnetic fields and their implications on particle physics,” University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2018/12/10
- [75] K. Kamada, “ Primordial magnetic fields and their roles in particle physics and cosmology,” KEK Theory Group, Ibaraki, Japan, 2019/2/14
- [76] Y.-P. Wu, “Higgs signatures in primordial non-Gaussianities,” IPMU, the University of Tokyo, 2019/03/13
- [77] K. Kamada, “ Higgs- $R^2$  model as a UV-extension of Higgs inflation and violent preheating,” IBS-CTPU, Daejeon, Korea, 2019/3/20
- ＜アウトリーチ＞
- (アウトリーチ)
- [78] Y.-P. Wu, H. Tahara, “What is inflation in Cosmology?” JSPS Science Dialogue Program, Kawagoe Girl’ s Senior High School, Saitama, Japan, 2018/09/20

## 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 装置を対象とした共同研究を進めており、海外との共同研究も実施している。

#### 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、27 kA である。ST は高い規格化圧力を安定に維持できる方式として魅力的である一方、プラズマ電流の立ち上げ維持は解決すべき課題である。TST-2 では、主として低域混成波 (Lower-Hybrid Wave, LHW) を用いた電流立ち上げ維持研究を行っている。2018 年度は、外側、上側に設置された 2 つのアンテナを用いた比較実験、パワー変調実験を行うとともに、波動物理を理解するために、高周波磁気プローブ、平衡計測用磁気プローブ、干渉計コードを新設増設した。また、プラズマ領域を大きくするために上側アンテナの改造を行った。これまでの所、波動コードの予測と矛盾しない結果が得られている。

#### 6.1.2 高周波実験

##### 静電結合型進行波アンテナ実験

TST-2 では静電結合型進行波 (Capacitively Coupled Compline, CCC) アンテナを用いて低域混成波を励起している。CCC アンテナでは同軸ポートよりパワーを入力し、L-C 回路アレイの共振によってプラズマ表面に特定の波数の静電波を励起することができる。励起される波の磁力線方向の屈折率  $n_{\parallel}$  は外側入射アンテナで 6.1、上側入射アンテナで 4.7 (中心値) である。トロイダル磁場反転時の上側入射は、磁場正転時の下側入射と同様の伝搬特性を示すことから、TST-2 では外側・上側・下側 (模擬) それぞれの入射位置による電流駆動特性の比較を行うことができる。

上側リミター位置  $Z = 350$  mm において、放電の最適化を行い、外側入射で 21.5 kA、上側入射で 26 kA、下側模擬入射で 26.7 kA の電流値を達成した。外側入射に対する上側入射と下側入射の優位性について議論するために、光線追跡コード (GENRAY) およびフォッカープランクコード (CQL3D) によって得られる波の伝搬および速度分布関数の定常解の比較を行った。定性的な違いとして、上側入射はミッドプレーン近くでポロイダルモード数の急上昇に伴う  $n_{\parallel} = 35$  程度までの波数上昇が確認され、これが電流に寄与する高速電子の数を増やしていると考えられる。一方で下側入射では逆に  $n_{\parallel} = 2-3$  程度までの波数減少が確認され、この部分がより多くプラズマ電流に寄与できる比較的高エネルギーの高速電子生成に役立っていると解釈できた。上側入射時の波数上昇効果については冷たいプラズマかつ静電波近似の枠組みで考察し、磁場勾配による波数上昇効果と、低域混成波のレゾナンスコーン角と磁場のピッチ角のつりあいによる波のポロイダル面上における停滞現象の相乗効果で波数が大幅に上昇することが新たに見出された。この現象には強いピッチ角依存性が予想され、これは数値計算により 16 kA 以上で顕在化されることが調べられ、実験的にもプラズマ電流が 16 kA を超える放電で波数の急激な上昇によるものと思われる 200-300 eV の軟 X 線放射光強度の増大を確認した。

##### 硬 X 線計測

硬 X 線計測の精度向上のため、これまで使用していた NaI 結晶より高密度で、蛍光減衰時間の短いシンチレータである LYSO 結晶を用いた硬 X 線計測器を新たに開発し測定を行った。これによって従来の NaI シンチレータによる X 線検出器に比べて 4 倍程度高速な時間分解能で測定が可能となった他、300 keV を超える X 線に対して約 20 % 程度検出効率が向上した。この LYSO シンチレータを用いて、入射パワーの変調実験における硬 X 線計測を行った結果、硬 X 線計数率の時間変化から、閉じ込め時間の短い高エネルギー電子の存在が示唆された。現在、同様の LYSO シンチレータを用いた垂直方向の計測視線を増設しており、水平・垂直の複数視線による硬 X 線計測を予定している。

##### 干渉計による電子密度計測

上側アンテナ近傍の密度測定のために、赤道面から高さ約 0.3 m の位置に水平な視線を持つマイクロ波干渉計 (周波数 50 GHz) を新設した。入射パワーの変調に対してマイクロ波干渉計で測定した線積分密度、可視カメラ画像で測定した発光強度の応答を比較したところ、以下のことがわかった。入射パワーをオンにした直後に、アンテナ近傍 ( $Z = \pm 0.3$  m) の線積分密度が大きく (約 40 %) 減少した。一方、赤道面 ( $Z = 0$  m) の密度変動は非常に小さい。また、パワーオン時に発光強度が増すこと、アンテナ

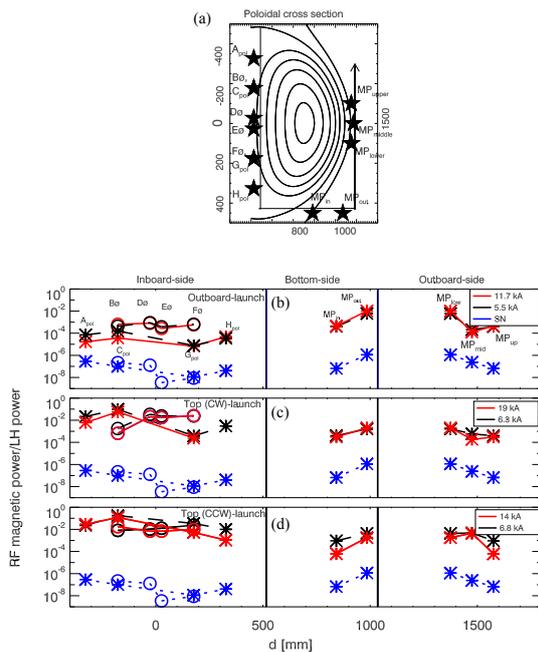


図 6.1.1: (a) ポロイダル断面における磁気プローブの配置図。(b) 外側 (c) 上側 (d) 下側模擬入射時に磁気プローブで計測されたの波動強度分布。

に近い上側と、対称な位置にある下側で応答に差が見られ、下側での発光強度の増加の方が大きいことがわかった。アンテナ近傍の密度を低下させる機構として高周波電場によるポンデロモーティブ力が候補となるが、より定量的な計測と評価が求められる。

#### プローブによる波動伝搬計測

高周波磁気プローブを用いて周辺プラズマ領域における LH 波動伝搬と偏光を計測した (図 6.1.1)。観測結果では LHW の外側入射、上側入射、下側模擬入射の 3 つの入射方法による違いが明らかになった。外側入射では外側アンテナから励起された波は外側、下側でポロイダル偏光の波 (LHW) が強く、CS 近傍ではトロイダル偏光 (FW) にモード変換されることが示唆された。上側入射では上側アンテナから励起された波は CS 上側で LHW が他のプローブに比べ 100 倍ほどパワーが強く、CS 下側では FW 成分が支配的になった。下側模擬入射においては LHW 成分と FW 成分が混合した波が CS 近傍で強くなるという結果が得られた。また、プラズマ電流が高い程、波の吸収に伴い、全体的にプローブが受けるパワーが小さくなる傾向が確認された。

### 6.1.3 OH 実験

#### マイクロ波イメージング反射計による MHD 揺動計測

TST-2 において、内部再結合現象 (IRE) の前兆現象として約 10 kHz の MHD 揺動が発生することが先行研究で報告されている。この約 10 kHz の揺動の性質や IRE の物理を明らかにすることを目指し、電子密度揺動を 3 次元計測するマイクロ波イメージング反射計 (Microwave Imaging Reflectometry, MIR) を TST-2 に設置しプラズマ計測を開始した。その結果 MIR をはじめ、干渉計、磁気プローブ、軟 X 線、 $H\alpha$  の信号から約 10 kHz の揺動が観測された。磁場揺動の振幅はプラズマ電流のスパイクのピーク時刻に最大値を取る一方、MIR で計測した密度揺動の振幅はその 100–400  $\mu$ s 前に最大値を取った。また、密度揺動と磁場揺動のポロイダル方向の伝搬方向を比較したところ、方向はおよそ一致し、約 10 kHz の揺動は電子反磁性流の方向に伝搬することがわかった。

#### 交流オーミックコイル運転

交流オーミックコイル運転とは、オーミックコイルに 1 kHz 前後の交流電場を印可することで、プラズマ中に交流周回電圧を発生させ、これによる予備電離、加熱、電流駆動を行う手法である。小型コイルを新設し実験を行った所、従来のオーミックコイルを用いた場合と比較して、生成されるプラズマのサイズ・形状は大きく異なる一方で、予備電離のための最小電圧は変わらないことが示唆された。さらに、本手法は電子サイクロトロン波による予備電離の代替手段として、LHW 実験に使用できることが実証された。また、交流オーミックコイル運転を含む誘導による予備電離過程を理論的に理解するために、1 次元流体モデルを作成し、予備電離が進行するための条件を求めることに成功した。

### 6.1.4 計測器開発

#### トムソン散乱計測

TST-2 のトムソン散乱計測において迷光は低密度プラズマの精度良い計測の大きな障害となっている。この迷光はレーザーの光軸から必要以上に広がった光が真空容器内壁で反射することが原因であり、これを防ぐには入射管にビーム径を絞るアパーチャーを入れるのが一般的であるが、その最適な形状と配置は明らかになっていなかった。そこで定量的にアパーチャーのパターンを評価するシステムを構築し、最適な形状と配置を明らかにすることで迷光を低減することを試みた。試験の結果、入射管に絞り径が直径 15 mm のアパーチャーを 4 枚入れることが最適であり、これを TST-2 に実装したところ迷光の信号量は総和で約 4 % へと減少した。

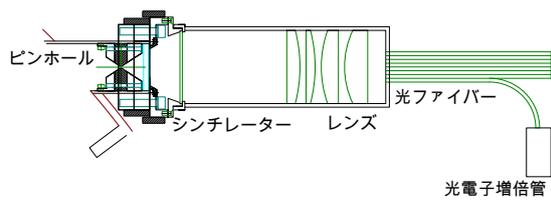


図 6.1.2: 硬 X 線イメージング計測器の外観図。シンチレーターの発光をレンズで光ファイバーアレイに結像する。

### 平衡計算用磁気計測の改善

プラズマの反磁性計測の改善を試みた。ベースラインである真空磁場を求める方法として、リファレンスループの代わりにログスキューコイルにより計測した TF コイル電流値を用いた。回路方程式を用いて渦電流を評価し、オフショットを用いてログスキューコイルの計測値を校正した結果、プラズマが消えた後も信号が残ってしまうことがなくなり、よりもっともらしい計測結果を得られた。

グラッドシャフラーノフ方程式中にある自由関数の形の改善を試みた。プラズマ外部に設置した磁気計測から LH 波により立ち上げたプラズマを再構成した結果、計測結果と整合性の高い結果が得られ、楕円度の高いプラズマが得られた。電流密度分布が誤差を含んだ評価の中でホローな形であることを求められた。このことは、数値計算から得られる結果と矛盾しない。ただし、プラズマ内部での誤差が大きく、ショット間で電流密度分布を比較するには、精度の向上が必要である。

### 硬 X 線イメージング計測

LHW 駆動のプラズマ中の高速電子について調べるために、高速電子から放射される硬 X 線の計測器開発を行った。信号の立ち上がり立ち下りの時間が短い LYSO をシンチレーターとして採用し、プラズマからの X 線の信号が実際に計測できることを確認した。続いてその空間分布を測定する硬 X 線カメラを設計している (図 6.1.2)。シンチレーターとプラズマの間にピンホールを置くことで、シンチレーターの発光箇所を硬 X 線の入射方向に対応させることができる。遮蔽能力が高く真空容器内で使うことができるタングステン合金をピンホールに採用した。シンチレーション光は光電子増倍管で増幅するが、トロイダル磁場の影響を受けないように、シンチレーション光はレンズで集光したのち光ファイバーで伝送して測定する。複数の光ファイバーを束にしたものを用い、それぞれの信号を見ることでシンチレーターの発光箇所および硬 X 線の入射方向を調べることができる。

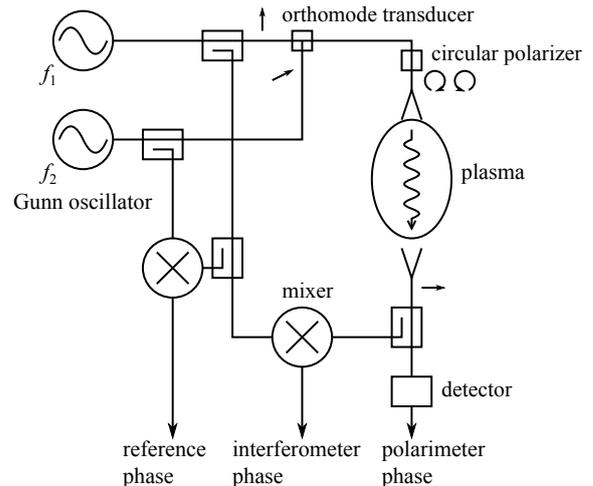


図 6.1.3: 開発中の偏光計の概念図。縦方向と横方向の変更を OMT (Ortho-Mode Transducer) により重ね合わせて、ポーラライザーにより右回りと左回りの円偏光に変換することで、2つの光の差周波数で直線偏光が回転する入射光を生成する。透過光の位相も計測することで、偏光計信号に加えて、干渉計信号も同時に得ることができる。

### 偏光計

低域混成波により非誘導的に駆動されるプラズマの内部電流分布を外部磁気計測のみから正確に推定することは困難である。そこで、内部磁場を直接計測することができる偏光計の開発を開始した。偏光計はプラズマ中を伝播する光の偏光が回転する (ファラデー回転) ことを利用するもので、磁場の光路に沿った積分値を計測できる。局所磁場を計測することはできないが、計測値を平衡計算の拘束条件として加えることで、内部磁場・電流分布の再構成精度を上げることができることが知られている。

今年度は計測器の設計を完了し、部品の調達・組み立てを行った。図 6.1.3 に装置の概念図を示す。計測に必要なポロイダル磁場はトロイダル磁場に比べて 1 桁以上小さいため、コットン・ムートン効果による楕円度の変化が問題になる可能性があった。僅かに周波数の異なる右回りと左回り円偏光を重ね合わせることで、そのビート周波数で直線偏光を回転させることができる。このような光を入射光として、トカマクの大半径方向、またはトロイダル方向の直線偏光を計測することで、コットン・ムートン効果の影響を受けずにファラデー回転を計測できることがわかったので、そのような計測方式を採用した。初期計測では直線偏光のパワーを (ホモダイン) 検出することで、位相信号を得ることに成功したが、ノイズが大きくファラデー回転角を計測することはできなかった。これからアンプの増設、ヘテロダイン構成の適用により精度を改善し、ファラデー回転の検出を目指していく予定である。

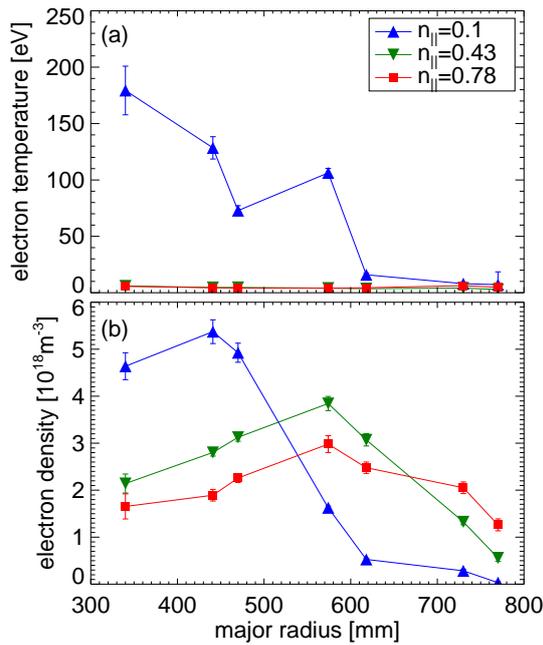


図 6.1.4: QUEST において計測された (a) 電子温度分布と (b) 電子密度分布。

### 6.1.5 共同研究

#### QUEST におけるトムソン散乱計測

九州大学応用力学研究所との共同研究で 28 GHz-ECH 実験においてトムソン散乱計測を行なった。28 GHz の RF ビームの磁場平行方向の屈折率  $n_{||}$  を変化させた時のプラズマの変化を計測する目的で行い、実験結果としては  $n_{||} = 0.78$  では高速電子にパワーが吸収され、 $n_{||} = 0.1$  ではバルク電子加熱が起きるといった結果が観測された (図 6.1.4)。

#### PPPL との共同研究

PPPL との共同研究として、軟 X 線検出器を用いたイメージング計測の設計を行っている。今年度は、これまでに構築した軟 X 線発光量の計算コードを用いて、DIII-D 装置の H モードプラズマおよび JT-60SA 装置の中性粒子ビーム加熱プラズマに対する計測を想定した発光量の計算を行った (図 6.1.5 (a, b))。この計算を元に、DIII-D 装置に導入する予定のピンホールの設計をした他、本イメージング計測システムを JT-60SA 装置に導入することの有効性を検討した。また、当研究室の TST-2 装置においても、本検出器を用いた計測を予定しており、導入に向けた設計を行った。装置の水平面上からポロイダル方向、トロイダル方向のイメージングを行う予定で、2019

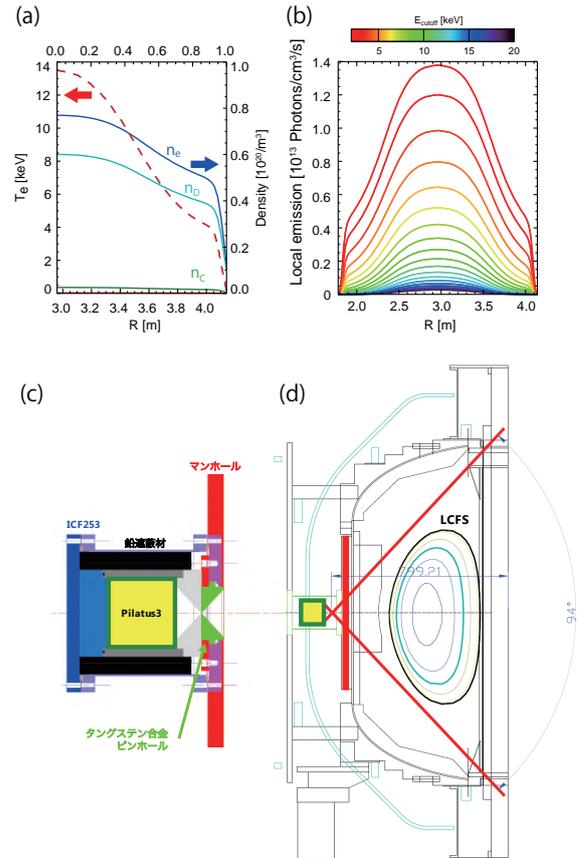


図 6.1.5: (a) 本計算で仮定した JT-60SA プラズマの電子温度、電子密度、不純物密度分布。(b) 計算されたプラズマからの軟 X 線発光量。線の色は計数する軟 X 線のエネルギー閾値 (2 keV (赤) から 20 keV (紫)) を表す。(c) TST-2 装置に導入予定の軟 X 線計測器と周辺構造物の設計。(d) TST-2 装置でのポロイダル方向のイメージング計測における計測視野

年 7 月頃のインストールを計画している (図 6.1.5 (c, d))。

#### <報文>

(原著論文)

- [1] B. Roidl, Y. Todo, Y. Takase, N. Tsujii, A. Ejiri, Y. Yoshida, S. Yajima, T. Shinya: "A simulation environment to simulate lower-hybrid-wave-driven plasmas efficiently," *Computer Physics Communications* **230**, 38 (2018).
- [2] T. Ii Tsujimura, Y. Mizuno, T. Tokuzawa, Y. Ito, S. Kubo, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, A. Ejiri, the LHD Experiment Group: "Real-time control of electron cyclotron wave polarization in the LHD," *Fusion Engineering and Design* **131**, 130 (2018).

- [3] H. Yamazaki, H. Furui, K. Yamasaki, T. Ushiki, A. Ejiri, M. Inomoto, Y. Takase, Y. Ono, N. Tsujii, UTST group and TST-2 group: “Measurement of the Local Current Density Inside a Current Sheet Using a Rogowski Coil Array on UTST Merging Plasmas,” *Plasma Fusion Res.* **13**, 1202093 (2018).
- [4] S. Yajima, Y. Takase, A. Ejiri, N. Tsujii, H. Yamazaki, C.P. Moeller, T. Shinya, Y. Takei, Y. Tajiri, Y. Yoshida, A. Sato, A. Kitayama and N. Matsumoto: “Current Drive Experiment Using Top/Outboard Side Lower Hybrid Wave Injection on TST-2 Spherical Tokamak,” *Plasma Fusion Res.* **13**, 3402114 (2018).
- [5] T. Tokuzawa, H. Tsuchiya, T. Tsujimura, M. Emoto, H. Nakanishi, S. Inagaki, K. Ida, H. Yamada, A. Ejiri, K.Y. Watanabe, K. Oguri, T. Akiyama, K. Tanaka, I. Yamada, and LHD Experiment Group: “Microwave frequency comb Doppler reflectometer applying fast digital data acquisition system in LHD,” *Rev. Sci. Instrum.* **89**, 10H118 (2018).
- [6] L.F. Delgado-Aparicio, J. Wallace, H. Yamazaki, P. VanMeter, L. Reusch, M. Nornberg, A. Almagari, J. Maddox, B. Luethi, M. Rissi, T. Donath, D. Den Hartog, J. Sarff, P. Weix, J. Goetz, N. Pablant, K. Hill, B. Stratton, P. Efthimion, Y. Takase, A. Ejiri, and M. Ono: “Simulation, design, and first test of a multi-energy soft x-ray (SXR) pinhole camera in the Madison Symmetric Torus (MST),” *Rev. Sci. Instrum.* **89**, 10G116 (2018).
- [7] H. Yamazaki, L.F. Delgado-Aparicio, R. Groebner, B. Grierson, K. Hill, N. Pablant, B. Stratton, P. Efthimion, A. Ejiri, Y. Takase, and M. Ono: “A computational tool for simulation and design of tangential multi-energy soft x-ray pin-hole cameras for tokamak plasmas *Rev. Sci. Instrum.* **89**, 10G120 (2018).
- [8] Y. Yoshimura, A. Ejiri, R. Seki, R. Sakamoto, K. Nagaoka, T. Shimosuma, H. Igami, H. Takahashi, T.I. Tsujimura, F. Warmer, K. Ynagihara, Y. Goto, K. Ida, M. Yoshinuma, T. Kobayashi, S. Kubo, M. Osakabe, T. Morisaki and the LHD Experiment Group: “Effect of Electron Cyclotron Current Drive on the Ion Temperature in the Plasma Core Region of the Large Helical Device,” *Plasma Fusion Res.* **13**, 1402124 (2018).

<学位論文>

- [9] 矢嶋 悟: 「Plasma Current Start-up by the Lower Hybrid Wave Using Capacitively-Coupled Comblines Antennas on the TST-2 Spherical Tokamak」 (博士論文).
- [10] 岩崎光太郎: 「Improvement of current profile estimation in plasma equilibrium reconstruction based on magnetic diagnostics」 (修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [11] S. Yajima, Y. Takase, A. Ejiri, N. Tsujii, S. Shiraiwa, H. Yamazaki, Y. Ko, C.P. Moeller, Y. Yoshida, K. Iwasaki, S. Sakamoto, Y. Iida and Y. Kawamata: “Numerical modeling of capacitively coupled combline antennas as lower hybrid wave launcher on TST-2,” 2018 US-EU-Japan RF Heating Technology Workshop/US-Japan Workshop on RF Heating Physics, Gotemba Kogen, Shizuoka, Japan, Sep. 4–7, 2018.
- [12] N. Tsujii and the TST-2 team: “Numerical modeling of lower-hybrid start-up experiments on TST-2,” 2018 US-EU-Japan RF Heating Technology Workshop/US-Japan Workshop on RF Heating Physics, Gotemba Kogen, Shizuoka, Japan, Sep. 4–7, 2018.
- [13] A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, S. Yajima, Y. Yoshida, H. Yamazaki, Y. Tajiri, T. Shinya, A. Kitayama, N. Matsumoto, A. Sato, Y. Takei, Y. Iida, K. Iwasaki, Y. Kawamata, S. Sakamoto, B. Roidl, C.P. Moeller, H. Kasahara, T. Mutoh, K. Saito, T. Seki and O. Mitarai: “Plasma Current Generation and Ramp-up by the Lower Hybrid Wave Using Outboard-Launch and Top-Launch Antennas on the TST-2 Spherical tokamak,” EX/P3-23, 27th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2018), Ahmedabad, India, Oct. 22–27, 2018.
- [14] Y. Takase, A. Ejiri, Y. Tajiri, Y. Takei, N. Tsujii, S. Yajima, H. Yamazaki, C.P. Moeller, T. Shinya: “Development of capacitively-coupled combline antennas for current drive in tokamaks,” FIP/P7-4, 27th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2018), Ahmedabad, India, Oct. 22–27, 2018.
- [15] N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, O. Watanabe, S. Yajima, Y. Yoshida, H. Yamazaki, Y. Iida, K. Iwasaki, Y. Kawamata and S. Sakamoto: “Development of a microwave polarimeter for the measurement of the lower-hybrid driven current profile on the TST-2 spherical tokamak,” The 60th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Oregon Convention Center in Portland, Oregon, USA, Nov. 5–9, 2018.
- [16] H. Yamazaki, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, O. Watanabe, S. Yajima, Y. Yoshida, Y. Aoi, Y. Iida, K. Iwasaki, Y. Kawamata, S. Sakamoto, Y.-T. Ko, K. Matsuzaki, T. Oishi, J. Rice and Y. Peng: “Hard X-ray Profile Measurements for TST-2 Lower Hybrid Current Driven Plasmas,” The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Ceratopia Toki, Gifu, Japan, Nov. 19–22, 2018.
- [17] Y. Ko, Y. Takase, A. Ejiri, N. Tsujii, O. Watanabe, S. Yajima, Y. Yoshida, H. Yamazaki, Y. Iida, K. Iwasaki, Y. Kawamata, S. Skamoto, Y. Aoi,

- T. Oishi, K. Matsuzaki, J. Rice: “Measurement of the lower hybrid wave using RF magnetic probes on the TST-2 spherical tokamak,” The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Ceratopia Toki, Gifu, Japan, Nov. 19–22, 2018.
- [18] Y. Takase, A. Ejiri, N. Tsujii, S. Yajima, H. Yamazaki, TST-2 Group, C.P. Moeller: “LH Antenna Development and Plasma Start-up Experiment on TST-2,” 7th RIAM Workshop, Kyushu University, Jan. 31–Feb. 1, 2019.
- [19] Y. Ko, TST-2 Group: “Wave polarization and distribution measurement in TST-2 LH-driven plasmas,” 7th RIAM Workshop, Kyushu University, Jan. 31–Feb. 1, 2019.
- [20] Y. Takase, A. Ejiri, N. Tsujii, S. Yajima, H. Yamazaki, TST-2 Group, C.P. Moeller: “Lower Hybrid Antenna Development and Plasma Start-up Experiment on the TST-2 Spherical Tokamak,” KSTAR Conference 2019, COEX, Seoul, Korea, Feb. 20–22, 2019.
- (国内会議)
- 一般講演
- [21] 江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、矢嶋悟、吉田裕亮、山崎響、御手洗修: 「誘導電場によるトカマクプラズマの予備電離の理論研究」、第12回核融合エネルギー連合講演会、ピアザ淡海(滋賀県立県民交流センター)、2018年6月28–29日。
- [22] 江尻晶: 「トカマクにおける誘導電場による予備電離の理論」、「先進トカマク概念の深化」研究会、核融合科学研究所、土岐、2018年9月18–19日。
- [23] 山崎響: 「マルチエネルギー軟X線イメージング計測の設計のためのX線発光量の計算」、「先進トカマク概念の深化」研究会、核融合科学研究所、土岐、2018年9月18–19日。
- [24] 矢嶋悟: 「TST-2球状トカマク型装置における低域混成波を用いた電流立ち上げ実験」、「先進トカマク概念の深化」研究会、核融合科学研究所、土岐、2018年9月18–19日。
- [25] 辻井直人、高瀬雄一、江尻晶、渡邊理、矢嶋悟、吉田裕亮、山崎響、飯田勇介、岩崎光太郎、川又裕也、坂本将、青井優樹、高竜太、松崎亨平: 「TST-2の非誘導立ち上げプラズマにおける偏光計の開発」、第35回プラズマ・核融合学会年会、大阪大学吹田キャンパス、2018年12月3–6日。
- [26] 岩崎光太郎、高瀬雄一、江尻晶、辻井直人、渡邊理、矢嶋悟、吉田裕亮、山崎響、飯田勇介、川又裕也、坂本将、青井優樹、高竜太、松崎亨平、大石輝希: 「TST-2球状トカマクにおけるフィラメント電流モデルを用いた周辺磁場評価」、第35回プラズマ・核融合学会年会、大阪大学吹田キャンパス、2018年12月3–6日。
- [27] 長山好夫、花島朋弥、飯田勇介、江尻晶、高瀬雄一、土屋隼人、大砂真樹、中西秀哉、山口聡一郎: 「球状トカマクTST-2でのマイクロ波イメージング反射計計測開発」、第35回プラズマ・核融合学会年会、大阪大学吹田キャンパス、2018年12月3–6日。
- [28] 飯田勇介、長山好夫、高瀬雄一、江尻晶、辻井直人、土屋隼人、大砂真樹、山口聡一郎、渡邊理、矢嶋悟、吉田裕亮、山崎響、岩崎光太郎、川又裕也、坂本将、青井優樹、高竜太、松崎亨平、大石輝希: 「TST-2球状トカマクにおけるマイクロ波イメージング反射計を用いた電子密度揺動計測」、第35回プラズマ・核融合学会年会、大阪大学吹田キャンパス、2018年12月3–6日。
- [29] 高瀬雄一、江尻晶、辻井直人、矢嶋悟、山崎響、TST-2グループ、C.P. Moeller: 「LHW用アンテナの開発」、第8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、2019年3月5日。
- [30] 高竜太、辻井直人、矢嶋悟、高瀬雄一、江尻晶、TST-2グループ: 「LHWを用いた電流駆動実験における波動計測」、第8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、土岐、2019年3月5日。
- [31] 江尻晶、平田真史、市村真、ジャンソウォン、池添竜也、神尾修治、吉川正志: 「高速発光揺動測定による波動計測」、第8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、土岐、2019年3月5日。
- [32] 江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、渡邊理、矢嶋悟、吉田裕亮、山崎響、彭翊、飯田勇介、岩崎光太郎、川又裕也、坂本将、青井優樹、高竜太、松崎亨平、RICE James, MOELLER C.P.、笠原寛史、斎藤健二、関哲夫、吉村泰夫、御手洗修: 「TST-2球状トカマクにおけるプラズマ生成・電流駆動の研究」、日本物理学会第74回年次大会、九州大学伊都キャンパス、2019年3月14–17日。
- 招待講演
- [33] 江尻晶: 「TST-2における打ち切り平衡」、研究会「平衡再構成のための計測技術と解析手法」、核融合科学研究所、土岐、2018年07月18–19日。
- [34] A. Ejiri: “Interferometer,” 9th Japan-Korea Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State Fusion Plasmas, Toki-Nagoya, Japan, Aug. 7–10, 2018
- [35] 江尻晶: 「原型炉に必要な計測」、研究会「平衡再構成のための計測技術と解析手法(第二回)」、核融合科学研究所、2019年2月19–20日。
- [36] 高瀬雄一、小野靖、田中仁、村上定義、花田和明、永田正義、藤田隆明、飯尾俊二、藤堂泰、竹入康彦、笠原寛史、鎌田裕: 企画講演: 全日本的連携による球状トカマク研究の現状、日本物理学会第74回年次大会、九州大学伊都キャンパス、2019年3月14日-17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事例として、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が持つ一般的性質として学問体系が再編成されつつある。そのような観点からは、流体力学、液晶やコロイドなどのソフトマター、化学反応系、生命システムまで含めて、パターン形成や非線形振動、カオスや乱流といった自己組織現象の動力学は共通した特徴を持っており、系の詳細によらず統一的に記述し扱うことが可能である。以上に加えて最近では、微小な系におけるゆらぎの法則や、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、異方性を利用して自己推進する粒子など、エネルギーを消費して自発的運動を示す物体、いわゆるアクティブマターが非平衡特有の物理現象として大いに注目を集めており、当研究室では実験・理論の両面からアクティブマター特有の物理法則の探索とより広範な非平衡系の枠組みとの融合に取り組んでいる。

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、助教の平岩徹也が在籍している。また、Hugues Chatéが客員教授として、Benoît Mahaultがポスドク研究員として一時在籍した。

### 6.2.1 非平衡系の動力学・統計力学

#### 吸収状態転移におけるスケーリング則の検証手法の考案

近年、液晶の電気対流や、流体における層流から乱れた流れ乱流への遷移など、吸収状態（一度入ると二度と出られない状態）への転移が示す普遍的なスケーリング則が実験で観測されてきている [8, 11]。一方で、液晶電気対流実験より以前に行われた様々

な実験では、理論で示されたスケーリング則と完全に整合する結果の報告はなかった。我々は、両者のケースの違いが、実験で得られる時空間データから系の相関長・相関時間を見積もる手法の違いにあることを指摘し、従来よりも小さいバイアスで見積もる手法を提案した [3]。

#### 液晶電気対流等の大自由度系における非平衡ダイナミクス

大自由度系において現れる様々なダイナミクスについて実験・数値的な側面からの研究を行った。電極の間のコレステリック液晶に電場をかけた際に生じる大きなスケールのパターンの動きについて、その性質を蛍光観察で調べるための実験条件の検討を行うとともに、今までに得られた結果を学会報告した [35, 22]。加えて、曲率を持った初期条件から成長する界面の性質について、液晶電気対流中での界面成長過程と数値モデルの結果を解析するとともに、理論的な高さゆらぎの表式を検討し、適切な時刻のリスケールのもとで両者が一致することを見出した [19, 13]。また、吸収状態転移において現れる界面ゆらぎについて数値的に調べ、吸収状態転移の普遍ゆらぎと界面成長過程において現れる普遍ゆらぎをつなぐ普遍的なクロスオーバーを見出した [42, 13]。

### 6.2.2 アクティブマターの動力学

#### 交流電場下での自己駆動するコロイド粒子の研究

速度や運動の仕方を操作できる人工的な自己駆動粒子系の実験的研究がなされている。その中でも十分大きな直流電場下で誘電体コロイドが運動することが知られている。その交流電場下での1粒子の運動は自律的な3次元力学系で記述できる。実験での振幅では、外場の周波数でのリミットサイクルとなっており、周期的に非対称な変位をもって往復運動する。高周波数でもリミットサイクルではあるが、定常状態では駆動に関わる成分が十分時間がたった後でゼロになり駆動しないことが数値的にわかった。ある周波数・電圧範囲では、近くに来た粒子が運動の方向を同期させるなどクラスタを作ることがわかった。 [36]。

#### 自己駆動コロイド粒子（ヤヌス粒子）の集団運動

シリカなどのコロイド粒子の半球を金属で蒸着した非対称粒子（ヤヌス粒子）は、水中で交流電場をかけると電場に垂直な2次元面内を自己駆動することが知られている。我々は交流電場の周波数を調整することでヤヌス粒子の向きが揃う大域的秩序相を実現し、大きな密度ゆらぎを観測した [15]。また、大域的秩序相の中で粒子速度に対する相互相関関数を計算することで、粒子のもつ極性と速度との間での相互作用を示唆する結果を得られた [20]。

### 集団運動における排除体積効果の役割

動き回る粒子が多数集まってできる動的な構造を集団運動とよぶ。集団運動の例は生物系である鳥の群れやバクテリアコロニーから非生物系である加振ロッドなど多岐にわたり、いくつか似たパターンが生じていることから系の詳細によらない共通のメカニズムが働いていると考えられている。動き回る粒子の性質や粒子間の相互作用と、それらが多数集まってできる大局的な構造の関係を調べるために、生体内タンパク質である「キネシン・微小管」を用いて平面上を運動するフィラメントが作る集団運動を観察した。局所相互作用を制御できるように設計し大局的なパターンを比較したところ、低密度条件下では配向秩序が生じ、高密度条件下ではクラスター化した。これらのパターンを説明するために低密度において相互作用を観察したところ、排除体積効果が重要であることが分かった。[1, 12, 14, 16, 21, 37, 39]

### 6.2.3 非平衡系としての生命現象

#### 接着領域限定下における神経幹細胞の集団運動

紡錘状の細胞であるマウス神経幹細胞は、2次元集団培養下において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。この集団運動を記述すると期待される力学モデルでは細胞集団の示す向きと細胞の出す異方的な力とのカップリングが、細胞集団スケールでの運動を決定することがしばしば導かれ、また実験的に実証されつつあるが、細胞間に働く力の性質とその作用はまだ詳らかでない。今年度は神経幹細胞の集団運動における鏡像異方性を調べるため、微細加工技術を用いて特定の形状をした領域内のみ神経幹細胞を接着させる実験を行い、特に領域の境界において鏡像反対称な細胞集団運動が見られることを確認した。さらに、生物個体スケールでの左右非対称性の発生への関与が示唆されている細胞間接着分子の発現を確認した。

#### 細胞と組織の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。特に、アクティブマターの理論を基に、互いにコミュニケーションする真核細胞の集団の遊走の理論モデルを提案・解析した [4, 32, 38, 41]。細胞達がシート状に敷き詰まりつながってできている上皮と呼ばれる組織の変形、移動のメカニズムを数値的に調べた [6, 10, 24, 18]。分子モーターに由来する細胞骨格のダイナミクスを計算するための力学的モデルに基づき、流動的細胞骨格のダイナミクスを数値的に調べた [9, 17]。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もちいて構築した [2]。

<受賞>

- [1] 谷田桜子, 日本生物物理学会学生発表賞, 日本生物物理学会, 2018年9月16日.

<報文>

(原著論文)

- [2] T. Hiraiwa and R. R. Netz: Systematic bottom-up theory for the viscoelastic response of worm-like-chain networks, *Europhysics Letters* **123**, 58002 (2018).
- [3] K. Tamai and M. Sano: How to experimentally probe universal features of absorbing phase transitions using steady state, *J. Stat. Mech.* **2018**, 123207 (2018).
- [4] T. Hiraiwa: Two types of exclusion interactions for self-propelled objects and collective motion induced by their combination, *Physical Review E* **99**, 012614 (2019).
- [5] T. Yamamoto, and M. Sano: Hydrodynamic rotlet dipole driven by spinning chiral liquid crystal droplets, *Physical Review E*, **99**, 022704 (2019).

(総説・解説)

- [6] T. Hiraiwa, F.-L. Weng, T. Shibata and E. Kuramaga: Mathematical Modeling of Tissue Folding and Asymmetric Tissue Flow during Epithelial Morphogenesis, *Symmetry* **11**, 113 (2019).

(国内雑誌)

- [7] 川口 喬吾, 影山 龍一郎, 佐野 雅己: 細胞の集団運動とトポロジカル欠陥, *生物物理* **58**, 134 (2018).
- [8] 佐野 雅己, 玉井 敬一: 層流・乱流転移 - 非平衡相転移としての乱流, *日本物理学会誌* **73**, 463 (2018).
- [9] 平岩徹也: アクトミオシン細胞骨格のダイナミクスと力学の数値シミュレーション, *分子シミュレーション研究会会誌「アンサンプル」* **20**, 167 (2018).
- [10] 永井健, 平岩徹也, 太田隆夫: アクティブソフトマターの動的秩序, *固体物理* **630**, 423 (2018).
- [11] 玉井 敬一, 佐野 雅己: 有向パーコレーションと乱流遷移, *応用数理 (印刷中)*.

(学位論文)

- [12] Sakurako Tanida: Microtubules driven by dense kinesin motility assay: from individual motion to large-scale collective emergent structures. 博士論文, 2018年12月提出.
- [13] Yosuke T. Fukai: Experimental and numerical investigation of universal fluctuations in out-of-equilibrium interface growth, 博士論文, 2019年3月.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [14] S. Tanida, K. Furuta, K. Nishikawa, T. Hiraiwa, H. Kojima, K. Oiwa and M. Sano; The effect of volume exclusion on collective motion of microtubules gliding on kinesin-coated surface, 11th European Conference on Mathematical and Theoretical Biology, July. 23-27, 2018, Lisbon, Portugal.
- [15] J. Iwasawa, D. Nishiguchi and M. Sano: Collective properties of artificial self-propelling particles fueled by an AC electric field, Physical Approaches to Understanding Microbial Life, Aug. 28- Sep. 6, Gif-sur-Yvette, France.
- [16] S. Tanida, K. Furuta, K. Nishikawa, T. Hiraiwa, H. Kojima, K. Oiwa and M. Sano; Self-organizations of microtubule filaments gliding on kinesin motors, LMU-UT Joint Workshop on Statistical and Biological Physics, Oct. 29-30, 2018, Tokyo, Japan.
- [17] T. Hiraiwa: Theory on dynamics and stress generation in an actomyosin cytoskeleton, LMU-UT Joint Workshop on Statistical and Biological Physics, Oct. 29-30, 2018, Tokyo, Japan.
- [18] T. Hiraiwa: Collective cell movement driven by cell-cell junction shrinkage combined with chirality, Mechanobiology Institute 10th Anniversary Conference, Nov. 7-10, 2018, Singapore, Singapore.
- [19] Y. T. Fukai and K. A. Takeuchi: Universal Kardar-Parisi-Zhang fluctuations with finite-curvature initial conditions, International Conference on APEF2018 (Advances in Physics of Emergent Orders in Fluctuations), Nov. 12-15, 2018, Tokyo, Japan.
- [20] J. Iwasawa, D. Nishiguchi and M. Sano: Interplay of polarity and motion in swarming Janus particles, International Conference on APEF2018 (Advances in Physics of Emergent Orders in Fluctuations), Nov. 12-15, 2018, Tokyo, Japan.
- [21] S. Tanida, K. Furuta, K. Nishikawa, T. Hiraiwa, H. Kojima, K. Oiwa and M. Sano; Rotation phenomena in collective motion of microtubules gliding on glass surface, International Conference on APEF2018 (Advances in Physics of Emergent Orders in Fluctuations), Nov. 12-15, 2018, Tokyo, Japan.
- [22] Y. T. Fukai and M. Sano: Large-scale coherent flow in electroconvection of cholesteric liquid crystal, American Physical Society March Meeting 2019, Mar. 4-Mar. 8, 2019, Boston, USA.
- 招待講演
- [23] M. Sano: A physical mechanism controlling collective dynamics of neural stem cells: Topological defects in nematically ordered state, Universal Biology Institute-Mechanobiology Institute Joint Symposium, April 14, 2018, Singapore, Singapore.
- [24] T. Hiraiwa: Collective cell movement driven by left-right asymmetric shrinkage of cell-cell junctions, Universal Biology Institute-Mechanobiology Institute Joint Symposium, April 14, 2018, Singapore, Singapore.
- [25] M. Sano: Extracting Dynamics from Data in Active Matter: Force and Tissue Dynamics, ENS-UT Joint Workshop, Sept. 28, 2018, Paris, France.
- [26] M. Sano: Extracting Dynamics from Data in Active Matter: Force and Tissue Dynamics of Neural Stem Cells, Self-Organization in Active Matter: from Colloids to Cells, Oct. 5, 2018, Erice, Italy.
- [27] M. Sano: Nonequilibrium Phase Transition in Shear Flow, 10th Dynamics Days Asia Pacific, Nov. 4, 2018, Xiamen, China.
- [28] M. Sano: Extracting Dynamics from Data in Collective Cell Migration: Force and Tissue Dynamics, Mechanobiology after 10 years: The Promise of Mechanomedicine, Nov. 10, 2018, Singapore, Singapore.
- [29] M. Sano: Nonequilibrium Phase Transition in Shear Flow, International Conference on APEF2018 (Advances in Physics of Emergent Orders in Fluctuations), Nov. 15, 2018, Tokyo, Japan.
- [30] M. Sano: Toward Constitutive Equation of Dry Active Nematics: From Data to Equation, Advances in Physics on Emergent Order of Active Matter, 20 Nov. 2018, Kanazawa, Japan.
- [31] M. Sano: Orientational Order and Topological Defects in Biological Active Matter, Soft Matter Physics: from the perspective of the essential heterogeneity, Dec. 10, 2018, Fukuoka, Japan.
- [32] T. Hiraiwa: Numerical modeling and simulations for active behaviors of cells, VISTEC ESE Seminar 2019 Special Lectures, Jan. 21, 2019, Rayong, Thailand.
- [33] M. Sano: Extracting Dynamics from Data in Active Matter: Force and Tissue Dynamics, Gordon Research Conference on Complex Active and Adaptive Material Systems, Jan. 29, 2019, Ventura, USA.
- [34] M. Sano: Tissue Dynamics as Active Matter: The Role of Topological Defects in Nematic Order, Kyoto Winter School 2019, “Quantifying Dynamics of Life”, Mar. 18, 2019, Kyoto, Japan.
- (国内会議)
- 一般講演
- [35] 深井洋佑, 佐野雅己: コレステリック液晶の電気対流で起こる大スケール流れ, 第17回 関東ソフトマター研究会, 2018年8月7日, 千葉, 東京大学物性研究所.
- [36] 加藤愛理, 佐野雅己: 周期外場で駆動されるクインケ粒子の非対称な周期運動とカオス, 日本物理学会 2018年秋季大会, 2018年9月9-12日, 京都, 同志社大学.
- [37] 谷田 桜子, 古田 健也, 西川 香里, 平岩 徹也, 小嶋 寛明, 大岩和弘, 佐野 雅己: 滑走するフィラメントの集団運動で生じる回転現象, 日本物理学会 2018年秋季大会, 2018年9月9-12日, 京都, 同志社大学.

- [38] 平岩徹也; 互いに孤立した遊走細胞の集団の挙動, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月 9-12 日, 京都, 同志社大学.
- [39] S. Tanida, K. Furuta, K. Nishikawa, T. Hiraiwa, H. Kojima, K. Oiwa and M. Sano; The role of steric interaction in collective motion of microtubules driven by kinesins, 第 56 回日本生物物理学会年会, 2018 年 9 月 15-17 日, 岡山, 岡山大学.
- [40] 上道雅仁, 川口喬吾, 佐野雅己: Traction Force and Dynamics in Orientation Order of Spindle-shaped Cells, 第 56 回日本生物物理学会年会, 2018 年 9 月 15-17 日, 岡山, 岡山大学.
- [41] 平岩徹也: Theory on collective behavior of migrating eukaryotic cells, 第 56 回日本生物物理学会年会, 2018 年 9 月 15-17 日, 岡山, 岡山大学.
- [42] 深井洋佑, 玉井敬一, 山口裕樹, 平岩徹也: 吸収状態相転移における普遍的界面ゆらぎ, 日本物理学会 74 回年次大会, 2019 年 3 月 14-17 日, 福岡, 九州大学.

## 招待講演

- [43] 佐野雅己: 層流・乱流遷移—非平衡相転移としての乱流遷移—, RIMS 共同研究 (公開型)「乱流と遷移: 構造, 多重スケール, モデル」, 2018 年 7 月 19 日, 京都, 京都大学数理解析研究所.
- [44] 山本尚貴: カイラルな液晶液滴の自発らせん運動, 「細胞を創る」研究会 11.0, 2018 年 10 月 19 日, 宮城, 東北大学.
- [45] 佐野雅己: アクティブマターの構成方程式を目指して: データから力学へ, 第 8 回ソフトマター研究会, 2018 年 12 月 8 日, 東京, 首都大学東京.

## (セミナー)

- [46] D. Nishiguchi, J. Iwasawa, H.-R. Jiang, and M. Sano: Flagellar dynamics of flexible chains of active Janus colloids fueled by an AC electric field, Institute of Physics, アムステルダム大学, オランダ, 2018 年 6 月 28 日.
- [47] 平岩徹也: 細胞骨格ネットワークにおけるモーター誘起の応力と動力学の理論, 横浜市立大学, 神奈川, 2018 年 7 月 20 日.
- [48] T. Hiraiwa: Numerical modeling and simulations for motility of cell populations, シンガポール国立大学メカノバイオロジー研究所, シンガポール, 2018 年 8 月 10 日.
- [49] 佐野雅己: Topological Defects Control Collective Dynamics in Active Matter, 北大電子研中垣研セミナー, 札幌, 2018 年 8 月 20 日.
- [50] 平岩徹也: 真核細胞の遊走についての理論モデリングと数値シミュレーション, 第 10 回 SaMPL(サンプル)セミナー, 広島大学, 広島, 2019 年 1 月 5 日.
- [51] 佐野雅己: 非平衡過程としての生命現象: 分子と細胞の集団運動からマクロな形態形成へ, 基礎生物学研究所セミナー, 岡崎, 2019 年 2 月 12 日.

## &lt;その他&gt;

## (講義)

- [52] 佐野雅己: 「自己組織化とは何か: ゆらぎと秩序の法則」, EMP 講義, 2018 年 6 月 16 日, 東京大学.
- [53] 佐野雅己: 総合討論 2 「構造知のはざまに潜む生命統合化システム」, 東大 EMP10 周年記念シンポジウム「知の統合化の先へ」, 2018 年 9 月 12 日, 東京大学.
- [54] 佐野雅己: 「自己組織化とは何か: ゆらぎと秩序の法則」, EMP 講義, 2018 年 11 月 24 日, 東京大学.
- [55] 佐野雅己: 電磁気学 A, 2018 年度冬学期, 駒場, 東京大学.
- [56] 佐野雅己: EMP 総合討論「生命とは何か」, 2019 年 3 月 2 日, 伊藤国際センター, 東京大学.
- [57] 佐野雅己: 最終講義「晴れときどきカオス: ~非平衡系の法則を求めて~」, 2019 年 3 月 12 日, 小柴ホール, 東京大学.

## (アウトリーチ活動)

- [58] 深井洋佑: 物理学者、バクテリアコロニーに挑む! 東京大学学園祭講演企画「10分で伝えます! 東大研究最前線」, 2018 年 5 月 19-20 日.
- [59] 深井洋佑: 乱流転移: 物理学 130 年の謎東京大学学園祭講演企画「10分で伝えます! 東大研究最前線」, 2018 年 11 月 23-25 日.

## 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、このような独自の視点を軸に、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) による観測】

ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) 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ている。

#### 【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の他、 $CH$ ,  $H_2D^+$ ,  $HD_2^+$  などの基本的分子のスペクトル線がある。それらの観測により、星・惑星系形成における物質進化の根幹を捉えることができる。世界的には 2009 年に打ち上げられた Herschel 衛星によりテラヘルツ帯観測が進められた。本研究室では、それとは相補的に、開発してきたテラヘルツ帯受信機を、チリに設置されている国立天文台 ASTE 10 m 望遠鏡に搭載して試験観測を行ってきたが、望遠鏡の鏡面精度が十分でないことがわかり、現在では検出器の基礎研究に専念している。それと同時に、分子スペクトル線の静止周波数を測定するための分光装置への応用を目指している。なお、この研究は 2019 年度から大阪府立大学の前澤准教授に引き継ぐこととした。

### 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。

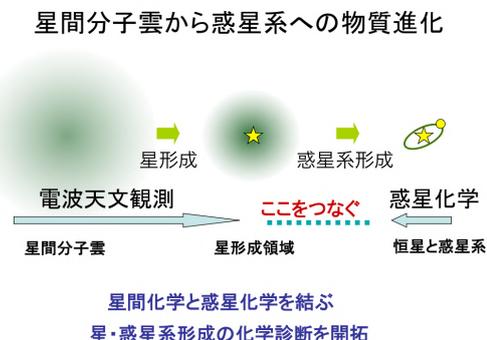


図 6.3.1: A schematic illustration of our goal

#### ALMA を用いた観測研究

##### 【低質量原始星 IRAS 18148-0440 アウトフロー】

IRAS 18148-0440 は、原始星コア L483 に含まれる Class 0 低質量原始星である。この原始星から南東-北西方向に向かって双極に噴き出すアウトフローの構造が、ALMA を用いた CCH と CS の分子輝線の観測によって捉えられた。アウトフローの速度構造は、放物面モデルでよく再現されることがわかった。さらに、アウトフローのキャビティーの壁における回転運動が示唆された。アウトフローガスのもつ比角運動量の大きさは、原始星を取り巻いて回転・落下するエンベロープガスのもつ比角運動量と同等か、2 倍程度と見積もられた。

##### 【Elias 29】

Elias 29 は、へびつかい座にある Class I 低質量原始星天体である。ALMA データの解析の結果、原始星を取り巻く 100 au スケールのガスに、SO 分子と  $SO_2$  分子が豊富に含まれることがわかった。一方 CS 分子輝線は、原始星を取り巻くガス成分では弱く、原始星から南に 500 au 離れた位置で強く検出された。SO 分子輝線の速度構造の解析によって、原始星まわりのガスの回転構造が捉えられた。

##### 【孤立した星形成領域：B335】

B335 は、孤立した星形成領域 Bok globule にある低質量 Class 0 天体として知られている。この天体は、原始星近傍で飽和有機分子に富むホットコリノの化学的性質を有することが知られている。この飽和有機分子の輝線を、ALMA を用いて高空間分解能 (0.1") で観測することで、原始星近傍の非常に小さい回転構造 (3 au 程度) を検出することに成功した。この回転構造は、重力に従って回転しながら落下するガスの運動モデルで説明できることがわかった。さらに飽和有機分子の存在領域は分子の種類によって異なることがわかり、原始星近傍の回転落下運動に伴う化学変化が捉えられた。

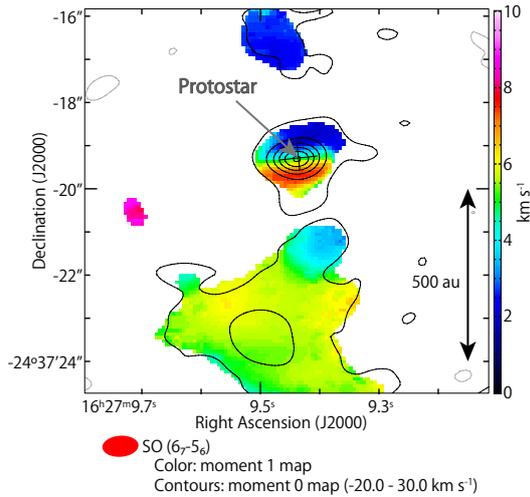


図 6.3.2: The integrated intensity map (contour) and the velocity map (color) of the SO line. The molecular gas is blue-shifted and red-shifted on the northern and southern side of the protostar, respectively.

#### 【星形成初期過程における原始星と円盤の共進化】

IRAS 15398–3359 は、おおかみ座にある Class 0 低質量原始星である。ALMA データの解析から、原始星質量が太陽質量の  $0.007^{+0.004}_{-0.003}$  倍と非常に小さいにもかかわらず、すでに回転する円盤構造が形成されていることがわかった。一方、光度と線幅を指標に 3 つの天体について ALMA のアーカイブデータを解析した。光度が太陽の 0.1 倍以下と非常に小さい L328-IRS の原始星質量は、太陽質量の 0.2 倍と大きいことがわかった。光度が小さいという特徴に加え、線幅が  $1 \text{ km s}^{-1}$  以下と狭い IRAM 04191-IRS と Chamaeleon-MMS1 の原始星質量は太陽質量の 0.1 倍以下である可能性を示した。これまでに報告されている天体 16 個と上記の天体の原始星と円盤の質量を比較すると、原始星が進化するにつれて円盤も共に進化している可能性が観測的に示唆される。

#### 【低質量原始星 IRAS 15398–3359 周りの化学組成の分布】

IRAS 15398–3359 は、おおかみ座にある Class 0 原始星で、数 1000 au のスケールで不飽和炭素鎖分子に恵まれる WCCC 天体として知られる。ALMA を用いて  $0.2'' - 0.5''$  (40 au–80 au) の分解能で観測した結果、SO, CCH, CS, *c*-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>OH, H<sub>2</sub>CO, DCN など、多数の分子輝線が見られた。これらの全分子輝線と連続波の原始星周りの強度分布図に対して主成分分析を行った。この手法は分子雲や系外銀河において分布の相関を扱う際に用いられるが、原始星周りにおいても有効であるかどうかを検証した。観測した分子輝線は原始星周りに広がる分布と原始星に集中する分布に分類され、この結果は実際の強度分布図と一致する。このように、主成分分析は原始

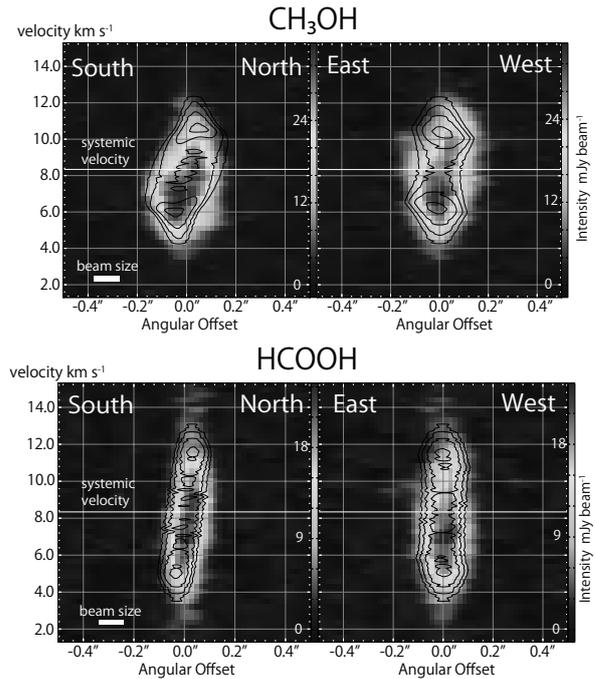


図 6.3.3: Position-velocity diagrams of CH<sub>3</sub>OH and HCOOH emission. The kinematic structure traced by each molecule is explained by the infalling-rotating envelope model (black contours).

星周りの分子を分布ごとに分類する方法として有効であることがわかった。

【原始星 L1527 における重水素濃縮度のマッピング】  
低質量星形成領域 L1527 における H<sub>2</sub>CO 分子と CCH 分子の重水素濃縮度（ノーマル種に対する重水素化物の存在量比）を ALMA による観測から調べたところ、原始星から 1000 au 程度離れたエンベロープの外側で非常に高い一方 ( $\text{D}_2\text{CO}/\text{H}_2\text{CO} = 0.81$ ,  $\text{CCD}/\text{CCH} > 0.32$ )、原始星近傍では低くなっていた ( $\text{D}_2\text{CO}/\text{H}_2\text{CO} < 0.04$ ,  $\text{CCD}/\text{CCH} < 0.016$ )。エンベロープ外側では重水素濃縮度が進む条件が満たされていると考えられる。一方、重水素濃縮度が進行する以前の段階から星間塵上で作られた分子が気相中に昇華するため、原始星近傍では重水素濃縮度が低くなると考えられる。

#### 【原始星 L1527 のアウトフロー】

おうし座分子雲にある Class 0/I 原始星 L1527 のアウトフローを観測した。観測装置は ALMA を用い、分子輝線は CS, H<sub>2</sub>CO, *c*-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>, SO を用いた。その結果、CS 分子輝線がアウトフローのキャビティの壁をよくトレースしていることがわかった。また、アウトフローがエンベロープガスの角運動量を抜く機構の一つとして考えられている。そのため CS 分子輝線を用いてアウトフローの回転を見ることで比角運動量を評価した。その結果、アウトフローの回転を見ることはできなかったが、アウトフローの比角運動量がエンベロープのものと同程度以下であると見積もることができた。

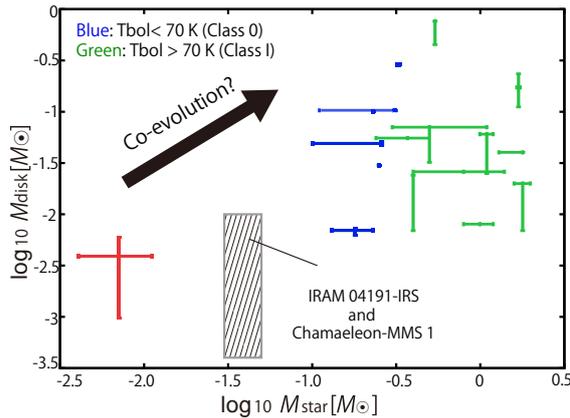


図 6.3.4: Comparison between the protostellar masses and the disk masses. They are for the sample of protostars in previous studies. The red marks with error bars represent IRAS 15398–3359. IRAM 04191-IRS and Chamaeleon-MMS1 are in the range of the oblique lines. The blue and green marks show the protostars of  $T_{bol} < 70$  K (Class 0) and  $T_{bol} > 70$  K (Class I), respectively. The error bars show the ranges of the mass.

#### 単一口径望遠鏡を用いた観測研究

【ペルセウス座分子雲における D 化物分子サーベイ】  
IRAM 30 m 電波望遠鏡を用いて、HNC 分子の重水素濃縮度 (DNC/HNC) を、ペルセウス座分子雲の Class 0/I 段階の低質量原始星 34 天体で統計的観測し比較した。その結果、原始星誕生後の重水素濃縮度は「星なしコア」時代の長短よりも、むしろ、原始星誕生後の進化段階を反映すると考えられている星の bolometric temperature に対し強い負の相関をもつことがわかった。また、原始星誕生後の HNC の重水素濃縮度の変化の速度を、イオン分子 ( $N_2H^+$ ) の重水素濃縮度と比較すると、中性分子の HNC の方がゆっくり減少していることがわかった。これは、中性分子とイオン分子と反応性の違いとして理解できる。

#### 【OH 18 cm 線の強度異常における遠赤外線の影響の解析】

OH 分子の 18 cm 線は、4 本の超微細構造遷移線 (1612, 1665, 1667, 1720 MHz) に分かれている。おうし座の HCL2 領域の直線構造において、OH 18 cm 線を観測したところ、1720 MHz 線が宇宙背景放射に対する吸収線として検出された。この現象は通常の統計平衡励起計算では再現できない。そこで、その起源を調べるために、星間塵の遠赤外線放射の影響を考慮した統計平衡励起計算を行った。その結果、星間塵の温度が 80 K のとき、温度が低く ( $< 30$  K)、柱密度が高い ( $> 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ) 場合に吸収線を再現することができた。即ち、1720 MHz 線の吸収線は、温かいガスに囲まれた、比較的密度が高く冷たい領域をトレースすることがわかった。

#### 【Pipe nebula における OH 18 cm 線の観測】

へびつかい座の分子雲 Pipe nebula は、南北方向に特徴的な直線構造を示している。この起源として、近傍の恒星  $\theta$ -Ophiuchi からの紫外線放射の影響や、東西方向に伸びる別のフィラメントとの衝突などが考えられている。これらを検証するため、Pipe nebula において OH 18 cm 線の観測を行い、ガスの運動温度を調べた。その結果、 $\theta$ -Ophiuchi からの距離と運動温度の間に相関は見られなかった。一方、2つのフィラメントの境界領域では、1665 MHz 線と 1667 MHz 線の吸収線が検出された。この吸収線は、運動温度がおよそ 70 K 以上であることを示しており、2つのフィラメントの衝突を反映していると考えられる。

### 6.3.2 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は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。本年度は、作成した 0.9 THz 帯の HEB ミクサを理研の実験室分子分光装置に装着し、スペクトルの測定に成功した。また、実験室分子分光装置の改良を進めた。

#### 【HEB ミクサを用いた実験室分子分光】

製作した HEB ミクサ素子を用いて 0.9 THz 帯の ALMA 型カートリッジ受信機を構成し、理化学研究所の実験室分子分光システムに搭載した。それを用いて、HDO 分子の  $1_{11} - 0_{00}$  輝線 (893.639 GHz) と  $2_{02} - 1_{01}$  輝線 (919.311 GHz)、および、 $D_2O$  分子の  $2_{12} - 1_{01}$  輝線 (897.947 GHz) の測定に成功した。このことから、HEB ミクサが分光測定に十分用いることができることがわかった。測定されたスペクトルの形は、通常の放射スペクトルと周波数がずれた吸収スペクトルを合わせた形状を示していた。その効果は HDO 分子の  $1_{11} - 0_{00}$  輝線で顕著であった。その理由はまだ解明できていないが、装置上の原因も含めて検討中である。

#### 【分子分光装置】

ALMA などの観測で検出される未同定線を特定するために、理化学研究所坂井星・惑星形成研究室で分子分光装置 SUMIRE (Spectrometer Using superconductor Mixer Receiver) の開発を進めている。今年度は 4 台のデジタル分光計を使い、受信機的全 IF 帯

域 (USB と LSB の合計 8 GHz) を同時測定できるように拡張した。また、ルビジウム原子時計を周波数基準として導入し、周波数の絶対精度を向上させた。CH<sub>3</sub>OH の測定では、データベースのモデルスペクトルを再現するとともに (図 6.3.5)、データベースに記載されていない高励起の輝線を検出することに成功した。

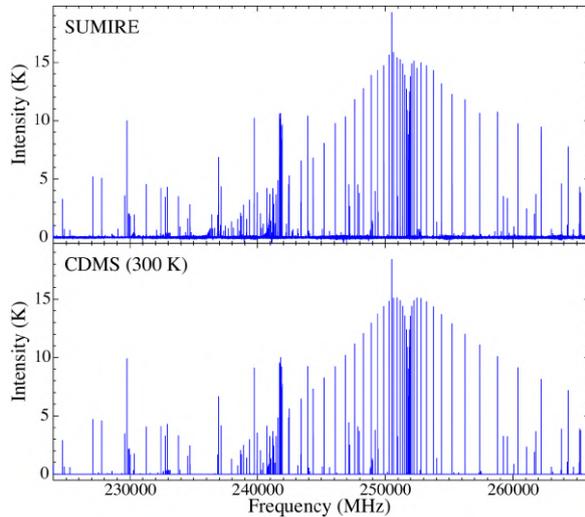


図 6.3.5: (Top) Spectrum of CH<sub>3</sub>OH measured with SUMIRE. (Bottom) Model spectrum based on CDMS at temperature of 300 K.

#### <受賞>

- [1] 大屋瑤子、「数 10 au スケールで見た若い低質量原始星天体の物理的・化学的構造」、第 35 回 (2018 年度) 井上研究奨励賞

#### <報文>

##### (原著論文)

- [2] Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., López-Sepulcre, A., Ceccarelli, C., Lefloch, B., & Yamamoto, S., “Sub-arcsecond Kinematic Structure of the Outflow in the Vicinity of the Protostar in L483”, *ApJ*, 863, 72 (14pp) (2018)
- [3] Ebisawa, Y., Sakai, N., Menten, K. M., & Yamamoto, S., “The Effect of Far-infrared Radiation on the Hyperfine Anomaly of the OH 18 cm Transition”, *ApJ*, 871, 89 (29pp) (2019)
- [4] Yoshida, K., Sakai, N., Nishimura, Y., Tokudome, T., Watanabe, Y., Sakai, T., Takano, S., & Yamamoto, S., “An unbiased spectral line survey observation toward the low-mass star-forming region L1527”, *Pub. Astron. Soc. Japan*, Advance online publication on 10 January 2019
- [5] Imai, M., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Higuchi, A., Zhang, Y., Oya, Y., Watanabe, Y., Sakai, T.,

Ceccarelli, C., Lefloch, B., & Yamamoto, S., “Deuterium Fractionation Survey Toward Protostellar Sources in the Perseus Molecular Cloud: HNC Case”, *ApJ*, 869, 51 (25pp) (2018)

- [6] Imai, M., Oya, Y., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., & Yamamoto, S., “Unveiling a Few Astronomical Unit Scale Rotation Structure around the Protostar in B335”, *Astrophysical Journal Letters*, 873, L21 (7pp) (2019)
- [7] Okoda, Y., Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Jørgensen, J. K., van Dishoeck, E., & Yamamoto, S., “The Co-evolution of Disks and Stars in Embedded Stages: The Case of the Very-low-mass Protostar IRAS 15398–3359”, *ApJL*, 864, L25 (7pp) (2018)

##### (学位論文)

- [8] 海老澤勇治, “Exploring Molecular-Cloud Formation Using the Intensity Anomalies of the OH 18 cm Transition” (博士論文)
- [9] 吉田健人, “Evolution of Molecular Isotopic Ratios in the Low Mass Protostar L1527” (博士論文)
- [10] 大小田結貴, 「星形成初期過程における原始星と円盤の共進化」 (修士論文)

##### <学術講演>

##### (国際会議)

一般講演 (指定なきものは Oral)

- [11] Oya, Y., “Three Cases of Chemical Differentiation in Disk-Forming Regions of Low-Mass Protostellar Sources”, *The Early Phase of Star Formation 2018*, Germany, May 13–18, 2018
- [12] Oya, Y., “Unified Picture of Chemical Differentiation in Disk-Forming Regions of Low-Mass Protostellar Sources”, *Astrochemistry Workshop, Japan*, June 25–26, 2018
- [13] Imai, M., Sakai, N., Oya, Y., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., Sakai, T., Hirota, T., & Yamamoto, S., “Chemical Characteristics of Prototypical Isolated Protostar in B335”, *NOEMA/30m Workshop, NAOJ, Mitaka*, July 24–25, 2018
- [14] Okoda, Y., Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Jørgensen, J. K., van Dishoeck, E., & Yamamoto, S., “High resolution observations of forming disks; Very-Low-Mass Protostellar case”, *JCMT team meeting, Tokyo, Japan*, August 1–2, 2018
- [15] Ebisawa, Y., Sakai, N., Menten, K. M., & Yamamoto, S., “Exploring molecular-cloud formation in the Pipe Nebula with the OH 18 cm transition”, *Interstellar Filament Paradigm on their formation, evolution, and role in star formation*, Nagoya University, November. 5–9, 2018 (poster)

- [IAU Symposium 345: Origins: From the Protosun to the First Steps of Life, Vienna, Austria, August 20–23, 2018]
- [16] Oya, Y., “Unified Picture of Chemical Differentiation in Disk-Forming Regions of Low-Mass Protostellar Sources”,
- [17] Yoshida, K., Sakai, N., & Yamamoto, S. “Anomalous distributions of deuterated formaldehyde in the low-mass protostar L1527” (poster)
- [Workshop on Interstellar Matter 2016, Sapporo, Japan, 2018 年 11 月 14 日–16 日]
- [18] Oya, Y., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Ceccarelli, C., Lefloch, B., and Yamamoto, S., “Elias 29: a Class I Low-Mass Protostellar Source Rich in S-bearing Species”
- [19] Imai, M., Sakai, N., Oya, Y., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., & Yamamoto, S., “Innermost Envelope Structure of B335 Traced by Complex Organic Molecules”,
- [20] Ebisawa, Y., Sakai, N., Menten, K. M., & Yamamoto, S., “Exploring molecular-cloud formation in the Pipe Nebula with the OH 18 cm transition” (poster)
- [21] Yoshida, K., Sakai, N., & Yamamoto, S. “Mapping observations of deuterated species toward the low-mass protostar L1527 with ALMA” (poster)
- [22] Okoda, Y., Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Jørgensen, J. K., van Dishoeck, E., & Yamamoto, S., “The Co-evolution of Disks and Stars in Embedded Stages” (Poster)
- [23] Fujita, T., Oya, Y., Yamamoto, S., Sakai, N., “Molecular Distributions in the Outflow of L1527” (poster)
- (国内会議)  
一般講演
- [24] 大屋瑠子、「低質量原始星の原始惑星系円盤形成に伴う化学組成の変化」、生命関連分子地球外運搬説ワークショップ、国立天文台、2018 年 10 月 22 日–23 日
- [25] 大小田結貴、大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「The Co-evolution of Disks and Stars in Embedded Stages」、ALMA ワークショップ:円盤から太陽系へ、WTC Conference Center Tokyo, 2018 年 11 月 21 日–11 月 22 日
- [天文学会 2018 年秋季年会、兵庫県立大学、2018 年 9 月 19 日–21 日]
- [26] 大屋瑠子、山本智、坂井南美、Ana López-Sepulcre、「Class I 低質量原始星天体 Elias 29 における円盤/エンベロープ構造の解析」、P103a
- [27] 海老澤勇治、坂井南美、Karl Menten、山本智、「Pipe nebula における分子雲形成の研究 II」、P125a
- [28] 吉田健人、坂井南美、山本智、「星形成領域 L1527 における炭素鎖分子 CCH の重水素化物の ALMA 観測」、P114a
- [29] 今井宗明、坂井南美、Ana López-Sepulcre、大屋瑠子、渡邊祥正、山本智、「B335 における原始星近傍エンベロープガスの回転構造」、P108a
- [30] 大小田結貴、大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「初期進化段階にある円盤構造を付随した超低質量原始星の探査」、P107a
- [天文学会 2019 年春季年会、法政大学、2019 年 3 月 14 日–17 日]
- [31] 大屋瑠子、山本智、坂井南美、Ana López-Sepulcre、「Class I 低質量原始星天体 Elias 29 における 100 au スケールでの化学組成」、P130a
- [32] 今井宗明、坂井南美、Ana López-Sepulcre、大屋瑠子、渡邊祥正、山本智、「B335 の原始星近傍ガスの物理・化学構造」、P132c (ポスター)
- [33] 大小田結貴、大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「低質量原始星 IRAS 15398–3359 のアウトフローの化学組成」、P131a
- [34] 藤田孝典、大屋瑠子、山本智、坂井南美、「Class 0/I 低質量原始星コア L1527 のアウトフローの分子分布と速度構造」、P107b (ポスター、口頭)
- その他
- [35] 大小田結貴、「BBC 100 Women, 2018」に選出

## 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 次元的制御と呼び、三つとも制御することを 3 次元的制御と呼ぶ。

以下に、研究内容の経緯とともに、今年度の研究成果の概要を述べる。特に「6.4.1 レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展—従来の経緯」は、昨年度と重複する部分があるが、研究の進展を概観するために必要な内容であるので、ご理解いただきたい。

### 6.4.1 レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展

#### 従来の経緯

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と、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次元的および3次元的な分子の配向が可能であることの原理実証実験に成功した。これらの実験は、分子の回転周期に比べてレーザー光のパルス幅が十分長い、いわゆる断熱領域で行われたものである。この場合、分子の配向度は、レーザー強度に追従して高くなり、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、分子の配向に寄与す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。

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を立ち上げた。その後、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」研究の確立を進めている。

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))。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 (D. Takei *et al.*, Phys. Rev. A **94**, 013401 (2016))。この成果は、高い配向度、レーザー電場の存在しない条件下での配向制御、及び、非対称コマ分子の向きの完全な制御である3次元配向制御の3条件を満たし、静電場とレーザー電場を併用する手法の「完成形」の実現を意味している。

その後、上述した非共鳴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技術の開発を進めている。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。注意深く予備実験を進めた結果、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原因の一つ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も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。この困難を克服するために、干渉計型の光学遅延路を設置し、基本波パルスに約1.8 nsの遅延を導入することにより2波長間の立ち上がりのタイミングを合わせた。

### 平成30年度の進展

非共鳴2波長レーザー電場のみを用いる全光学的な分子配向制御法で配向度を上げる実験について、前年度までは2波長間の相対位相の観測結果をPID制御でフィードバック制御することを目指したが、ナノ秒Nd:YAGレーザーの繰り返しが10 Hzと低いため、フィードバック制御が上手く機能しないことが明らかとなった。そのため、データの取得と解析に独自の工夫を行った。まず、2波長間の相対位相を制御するための溶融石英板をゆっくりと回転させながら、配向度の測定的基础となるイオンイメージを長時間観測する。観測したイオンイメージから配向度を求め、配向度を横軸とし、その配向度の出現頻度(その配向度が実現する時間の割合)をヒストグラムで表示するとガウス関数で精度よく近似できる正規分布を取ることが明らかになった。このことは、上記の測定方法が統計的に妥当であり、配向度の絶対値の大きい時が2波長間の相対位相が0又は $\pi$ であることを意味している。解析の結果、配向度 $|\langle \cos \theta \rangle| \sim 0.3$ を達成することに成功した。この配向度は、プローブ光による試料分子の多価イオン生成過程における配向依存性の効果を避けるため、プローブ光の偏光を検出器面に垂直にして観測した配向度として世界で最も高い値である。

一般に、配向のダイナミクスが純粋に断熱的であれば、試料分子がイオン化しない限り、基本波と第2高調波の強度が高いほど高い配向度が得られる(最終的には飽和する)。今回、基本波パルスの強度の関数として配向度を測定すると、ある強度で最大値をとり、さらに強度を上げると配向度が下がる現象を確認した。これは、パルス幅10 ns程度の2波長パルスを用いても配向のダイナミクスは非断熱的であることを示す直接的な証拠である。

### 6.4.2 全光学的配向制御法で配向度を向上させるための考察

上述した通り、パルス幅10 ns程度のNd:YAGレーザーパルスを用いても配向のダイナミクスが非断熱的であることが明らかになった。したがって、単に基本波と第2高調波の強度を上げるだけでは高い配

向度を達成することはできない。このような状況でも配向度を上げることができる手法について考察した。

(1) 直線偏光した基本波パルスと楕円偏光した第2高調波パルスの組み合わせ

昨年度までに、直線偏光した基本波パルスと楕円偏光した第2高調波パルスの組み合わせが配向度の向上に有効であることを数値計算で明らかにした。基本波と第2高調波の偏光が共に直線偏光のときは、形成される非対称な相互作用ポテンシャルは極角 $\theta$ のみに依存する1次元的な形状となるのに対し、第2高調波パルスを楕円偏光とすることにより、極角 $\theta$ に加え、方位角 $\phi$ にも依存する3次元的な形状となり、非対称ポテンシャル間の障壁が方位角 $\phi$ に沿って低い領域が生成され、配向状態へのトンネル遷移の確率が上昇することがポイントである。今年度、超分極率を始めとする分子パラメータの異なる分子について達成される配向度を比較することにより、このアプローチは、FCN分子の様な超分極率の異方性が大きな分子よりもOCS分子の様な超分極率の異方性が平均的な分子に対してより有効であることが明らかになった。また、楕円偏光した第2高調波パルスを用いていることから自然な形で3次元配向制御に拡張できる。実際に $C_6H_5I$ 分子のパラメータを用いて数値計算し、配向度の向上の観点からもこのアプローチが有効であることを確認した。

(2) 互いに直交した直線偏光の基本波パルスと第2高調波パルスの組み合わせ

互いに直交した直線偏光の基本波パルスと第2高調波パルスを組み合わせた場合にも、形成される非対称な相互作用ポテンシャルは、第2高調波パルスに楕円偏光を用いる(1)のアプローチと同様に、極角 $\theta$ に加え、方位角 $\phi$ にも依存する3次元的な形状となり、非対称ポテンシャル間の障壁が方位角 $\phi$ に沿って低い領域が生成され、配向状態へのトンネル遷移の確率が上昇する。この場合、第2高調波パルスの強度を基本波パルスの強度よりも高くすることにより、第2高調波の偏光方向に配向が実現する。詳細な数値計算により、同じパルス幅をもつ互いに平行な直線偏光の基本波パルスと第2高調波パルスの組み合わせと比較して、配向のダイナミクスがより断熱的になることがこのアプローチの優位性を裏付けていることを確認した。互いに直交した直線偏光が張る面内に分子面をもつ分子を配向させることができるので、3次元的な配向制御にも拡張できると期待される。本研究は、酒井広文研究室の出身で現在韓国基礎科学研究院のDr. Je Hoi Mun、及び、スペイングラナダ大学のDr. Rosario González-Férezとの共同研究として行われ、現在論文を投稿中である。

### 6.4.3 マクロな3回対称性をもつ分子アンサンブルの生成

気体分子に対する既存の配列・配向制御技術と概念的に異なる全く新しい分子アンサンブルの生成法を考案した。互いに逆回りに円偏光した基本波パルスと第2高調波パルスを重ね合わせると、3回対称な電場トラジェクトリーが形成される。このような特異な

電場トラジェクトリーと  $BX_3$  ( $X=F, Cl, Br, I$ ) の様な点群  $D_{3h}$  に属する分子の超分極率相互作用によって、試料分子の三つの腕を 3 回対称な電場の向きに揃え、マクロな 3 回対称性をもつ分子アンサンブルを生成できる。実験的に実現可能な回転温度とレーザー強度を仮定して、有意なオーダーパラメータを達成できることを数値計算で確認した (H. Nakabayashi, W. Komatsubara, and H. Sakai, to appear in Phys. Rev. A)。円偏光面内に 3 回対称性をもつ分子アンサンブルが生成されている様子をクーロン爆裂イメージングで観測するためには、円偏光面と垂直な検出器面をもつ既存の速度マップ型イオン画像化装置を用いることはできず、専用の装置開発が必要である。高強度フェムト秒プローブパルスによるクーロン爆裂で生成されたフラグメントイオンをまずイオン光学の原理で引き出してから、2 次元イオン検出器面に射影すればよい。今年度中に必要な装置の設計も行った。次年度に装置の立ち上げを行うとともに、マクロな 3 回対称性をもつ分子アンサンブルが生成されていることの原理実証実験を行う予定である。

#### 6.4.4 フェムト秒 EUV 自由電子レーザーパルスと近赤外パルスによる原子・分子の角度分解光電子分光

近年、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、SACLA のフェムト秒 X 線自由電子レーザーパルスを用い、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結合角など分子の構造を決定するものである (M. Kazama *et al.*, Phys. Rev. A **87**, 063417 (2013))。この目的のためには、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。

これまでに、ナノ秒 Nd:YAG レーザーの基本波パルスで配列した  $I_2$  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  $\sim 140$  eV をもつ  $I 2p$  光電子の回折像を観測した。この「超高速光電子回折法」の原理実証実験 (K. Nakajima *et al.*, Sci. Rep. **5**, 14065 (2015)) を踏まえ、 $I_2$  分子の配列度を  $\langle \cos^2 \theta \rangle = 0.734$  まで高めることにより明瞭な光電子回折像を得ることに成功した。理論計算と比較した結果、 $I_2$  分子配列用のナノ秒 Nd:YAG レーザー電場中 ( $6 \times 10^{11}$  W/cm<sup>2</sup>) で、 $I_2$  分子の核間距離は、平衡核間距離 (2.666 Å) よりもアンサンブル平均で

0.18–0.30 Å 伸長していることを初めて明らかにした (S. Minemoto *et al.*, Sci. Rep. **6**, 38654 (2016))。

光子エネルギーが数 keV の X 線領域では光電子生成の断面積が極めて小さく、精度よく光電子回折像を得るためには長時間の測定が不可欠である。一方、SACLA では、2016 年度から数 10 から 150 eV 程度の光子エネルギーをもつ自由電子レーザーパルスの提供を始めた。この極端紫外 (EUV) 領域ではイオン化断面積が X 線領域に比べて 100–1000 倍ほど大きく、短時間で精度よく光電子回折像を測定できる。この EUV-FEL パルスを使い、これまでに、超短パルス Ti:sapphire レーザーパルスとの同期実験を行った。例えば、EUV-FEL と Ti:sapphire パルスが時間的に重なったときに、それぞれのパルスの光子が同時に関与するイオン化過程 (超閾イオン化過程) に相当するピークの観測に成功した。EUV-FEL と Ti:sapphire パルスとの時間ジッターを考慮したモデル計算から、 $\sim 1$  ps のジッターをもつことが分かった (S. Minemoto *et al.*, J. Phys. B **51**, 075601 (2018))。現在の技術では、数百フェムト秒から 1 ピコ秒程度のジッターは避けられない。このような状況において、2 光子超閾イオン化信号がパルス間の時間的不確定性を評価するよい指標となることを明らかにした。

また、SACLA の EUV-FEL パルスを集光すると、そのピーク強度は  $\sim 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> に達し、容易に多光子過程が起こる。その高強度性に着目し、光子エネルギー 40.8 eV ( $He^+ 1s \rightarrow 2p$  遷移に相当) を用いて He 原子から生成される光電子を測定したところ、2 光子を同時に吸収し  $He^{2+}$  を生成するチャンネル (2PDI) と 1 光子吸収で  $He^+$  を生成した後、 $He^+$  の  $2p$  状態を経て  $He^{2+}$  を生成するチャンネル (S3PDI) があることを見出した。特に、S3PDI チャンネルの光電子生成には 3 光子が必要であるにもかかわらず、S3PDI の信号強度は FEL 強度の 2 乗に比例した依存性を示す。これは  $He^+$  の  $1s$  状態と  $2p$  状態がラビ共鳴を起しており、この励起に必要な光子が強度依存性に反映されていないためであると考えられる。

2017 年度後半からは、「超高速光電子回折法」の実現に向けて、分子試料の時間分解光電子スペクトルの測定に注力している。例えば、超短パルス Ti:sapphire レーザーパルスにより二酸化炭素  $CO_2$  分子を非断熱的に配列させ、光子エネルギー 55.4 eV の FEL パルスによって生成される光電子の角度分解スペクトルを測定した。ここで、光電子測定と同時にフラグメントイオンも観測することによりショットごとの配列状態を評価し、光電子スペクトルと配列状態の対応付けをしながら、光電子スペクトルの並べ替えを行った。その結果、分子軸の向きと FEL パルスの偏光方向を固定した光電子角度分布 (Molecular-Frame Photoelectron Angular Distribution: MF-PAD) を得ることに成功した。光吸収後の電子ダイナミクスを考慮した理論シミュレーションと比較したところ、実験で得た MF-PAD と理論的な MF-PAD はよい一致を示しており、本手法の妥当性を確認できた。

超高速光電子回折法には分子の向きを固定する配列技術、光電子角度分布を高精度に測定する光電子分光器、自由電子レーザーパルスと超短パルスレー

ザー光の遅延時間を精密に制御、測定する技術の3つの基礎技術が必要である。今年度までに SACLA で行った実験によって、これらの基礎技術に十分習熟し、超高速光電子回折技術の確立は目前に迫っている。

本研究は、高エネルギー加速器研究機構の柳下明名誉教授と島田紘行特任助教を始めとし、水野智也氏(東京大学物性研究所)、間嶋拓也准教授、水谷汐里氏、磯部真志氏(京都大学)との共同研究である。

### 6.4.5 その他

本年度は、博士1名(Dr. Md. Maruf Hossain)と修士2名(小松和真君、三宅聡一朗君)を輩出した。また、今年度は、平成31年1月16日-2月14日の4週間にわたり、STEPS (Students and Researchers Exchange Program in Science) 生として、Mr. Danilo Shchepanovich (Lomonosov Moscow State University, Russia) を受け入れた。研究項目 6.4.3 は、公益財団法人松尾学術振興財団から第31回松尾学術研究助成金の支援を受けて進めている。ここに記して謝意を表す。

#### <受賞>

- [1] 小松和真、日本物理学会学生優秀発表賞(2018年秋季大会)(発表題目: EUV-FEL を用いた He イオンの多光子共鳴イオン化過程の観測、共同研究者: 峰本紳一郎、島田紘行、小松原航、間嶋拓也、水野智也、三宅聡一朗、酒井広文、柳下明)。

#### <報文>

(原著論文)

- [2] Hiroto Nakabayashi, Wataru Komatsubara, and Hirofumi Sakai, "Recipe for preparing a molecular ensemble with macroscopic threefold symmetry," to appear in *Phys. Rev. A*.
- [3] Hiroyuki Shimada, Kazma Komatsu, Wataru Komatsubara, Tomoya Mizuno, Soichiro Miyake, Shinichirou Minemoto, Hirofumi Sakai, Takuya Majima, Shigeki Owada, Tadashi Togashi, Makina Yabashi, and Akira Yagishita, "Two- and three-photon double ionization of helium by soft x-ray free-electron laser pulses," *J. Phys. B* **52**, 065602 (2019) (8 pages).
- [4] Shinichirou Minemoto, Hiroyuki Shimada, Kazma Komatsu, Wataru Komatsubara, Takuya Majima, Soichiro Miyake, Tomoya Mizuno, Shigeki Owada, Hirofumi Sakai, Tadashi Togashi, Makina Yabashi, Piero Decleva, Mauro Stener, Shota Tsuru, and Akira Yagishita, "Time-resolved photoelectron angular distributions from nonadiabatically aligned CO<sub>2</sub> molecules with SX-FEL at SACLA," *J. Phys. Commun.* **2**, 115015 (2018) (8 pages).
- [5] Hiroyuki Shimada, Shinichirou Minemoto, Kazma Komatsu, Wataru Komatsubara, Shintaro

Yoshida, Takuya Majima, Tomoya Mizuno, Hirofumi Sakai, Shigeki Owada, Tadashi Togashi, Makina Yabashi, and Akira Yagishita, "Photoelectron spectroscopy of Rydberg excited states in singly charged molecular ions CS<sub>2</sub><sup>+</sup> by NIR laser pulses," *J. Phys. B* **51**, 225601 (2018) (8 pages).

- [6] Wataru Komatsubara, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Electron-wave-packet dynamics extracted from the ellipticity dependence of high-order harmonic generation in benzene molecules," *Phys. Rev. A* **98**, 023416 (2018) (8 pages).
- [7] Je Hoi Mun and Hirofumi Sakai, "Improving molecular orientation by optimizing relative delay and intensities of two-color laser pulses," *Phys. Rev. A* **98**, 013404 (2018) (8 pages).
- [8] Shinichirou Minemoto, Hiroyuki Shimada, Kazma Komatsu, Wataru Komatsubara, Takuya Majima, Tomoya Mizuno, Shigeki Owada, Hirofumi Sakai, Tadashi Togashi, Shintaro Yoshida, Makina Yabashi, and Akira Yagishita, "Ar 3p photoelectron sideband spectra in two-color XUV+NIR laser fields," *J. Phys. B* **51**, 075601 (2018) (8 pages).

(学位論文)

- [9] Md. Maruf Hossain, "Experimental and theoretical studies toward stronger molecular orientation with an all-optical technique," Doctoral thesis, March 2019.
- [10] Kazma Komatsu, "Atomic and molecular spectroscopy by using coherent XUV light sources," Master's thesis, March 2019.
- [11] 三宅聡一朗、「OCS 分子の多チャンネル解離性イオン化における光電子角度分布のチャンネル依存性」、修士論文、2019年3月。

#### <学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [12] Shinichirou Minemoto, Hiroyuki Shimada, Kazma Komatsu, Wataru Komatsubara, Takuya Majima, Tomoya Mizuno, Shigeki Owada, Hirofumi Sakai, Tadashi Togashi, Shintaro Yoshida, Makina Yabashi, and Akira Yagishita, "Two-color above threshold ionization of atoms by using femtosecond XUV free electron laser and NIR laser pulses," XXI International Conference on Ultrafast Phenomena (UP2018), Hamburg, Germany, July 17, 2018.
- [13] Wataru Komatsubara, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Ellipticity dependence of high-order harmonic generation from benzene molecules with and without a YAG laser field," XXI International Conference on Ultrafast Phenomena (UP2018), Hamburg, Germany, July 17, 2018.

- [14] Kazma Komatsu, Shinichirou Minemoto, Hiroyuki Shimada, Wataru Komatsubara, Takuya Majima, Soichiro Miyake, Tomoya Mizuno, Hirofumi Sakai, and Akira Yagishita, "Direct and indirect double photoionization of He with intense femtosecond EUV-FEL pulses," 34th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Kyoto, Japan, June 6-8, 2018.
- [15] Hiroyuki Shimada, Shinichirou Minemoto, Kazma Komatsu, Soichiro Miyake, Wataru Komatsubara, Takuya Majima, Tomoya Mizuno, Hirofumi Sakai, and Akira Yagishita, "Photoelectron angular distributions from aligned molecular ions in Rydberg excited states," 34th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Kyoto, Japan, June 6-8, 2018.
- [16] Shinichirou Minemoto, Hiroyuki Shimada, Kazma Komatsu, Wataru Komatsubara, Takuya Majima, Soichiro Miyake, Tomoya Mizuno, Hirofumi Sakai, and Akira Yagishita, "Time-resolved photoelectron imaging of nonadiabatically aligned CO<sub>2</sub> molecules," 34th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Kyoto, Japan, June 6-8, 2018.
- [17] Wataru Komatsubara, "Ellipticity dependence of high-order harmonic intensities generated from benzene molecules with and without a YAG laser field," International Symposium on Advanced Photonics (iSAP Hamamatsu 2018), Shizuoka, Japan, April 18, 2018.
- [18] Kazma Komatsu, "Absorption spectroscopy of aligned molecules with high-order harmonic pulses," International Symposium on Advanced Photonics (iSAP Hamamatsu 2018), Shizuoka, Japan, April 18, 2018.
- [19] Kazma Komatsu, Shinichirou Minemoto, Hiroyuki Shimada, Wataru Komatsubara, Takuya Majima, Soichiro Miyake, Tomoya Mizuno, Hirofumi Sakai, and Akira Yagishita, "Direct and indirect double photoionization of He with intense femtosecond EUV-FEL pulses," 34th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Kyoto, Japan, June 6-8, 2018.
- [20] Md. Maruf Hossain, Xiang Zhang, Ryohei Yamada, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Nonadiabaticity in the orientation dynamics of OCS molecules with 10-ns two-color laser pulses," レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会、東海大学高輪キャンパス (東京都港区)、2019 年 1 月 14 日 (月・祝).
- [21] 仲林宏斗、小松原航、酒井広文、「3 回対称性をもつ気体結晶の生成法」、レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会、東海大学高輪キャンパス (東京都港区)、2019 年 1 月 14 日 (月・祝).
- [22] 三宅聡一郎、峰本紳一郎、酒井広文、「1300 nm 光による OCS 分子からの光電子の角度分布の解離性イオン化チャンネル依存性」、レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会、東海大学高輪キャンパス (東京都港区)、2019 年 1 月 14 日 (月・祝).
- [23] Hossain Md Maruf, Xiang Zhang, Ryohei Yamada, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Increasing the degrees of orientation of state-selected OCS molecules with relative-delay-adjusted non-resonant two-color laser fields," 2018 年第 79 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)、2018 年 9 月 21 日 (金).
- [24] Hossain Md Maruf and Hirofumi Sakai, "Orientation of linear asymmetric molecules with combined linearly and elliptically polarized two-color laser fields," 2018 年第 79 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)、2018 年 9 月 21 日 (金).
- [25] 峰本紳一郎、島田紘行、小松和真、小松原航、間嶋拓也、水野智也、三宅聡一郎、酒井広文、水流翔太、柳下明、「非断熱的に配列した CO<sub>2</sub> 分子の時間分解光電子分光」、日本物理学会 2018 年秋季大会、同志社大学京田辺キャンパス (京都府京田辺市)、2018 年 9 月 11 日 (火).
- [26] 島田紘行、峰本紳一郎、小松和真、小松原航、酒井広文、吉田慎太郎、間嶋拓也、水野智也、柳下明、「VUV-FEL によって生成された分子イオンのリユードベリ状態の光電子分光」、日本物理学会 2018 年秋季大会、同志社大学京田辺キャンパス (京都府京田辺市)、2018 年 9 月 11 日 (火).
- [27] 小松和真、峰本紳一郎、島田紘行、小松原航、間嶋拓也、水野智也、三宅聡一郎、酒井広文、柳下明、「EUV-FEL を用いた He イオンの多光子共鳴イオン化過程の観測」、日本物理学会 2018 年秋季大会、同志社大学京田辺キャンパス (京都府京田辺市)、2018 年 9 月 11 日 (火).

(国内会議)

一般講演

- [19] ホサイン モハンマド マルフ、酒井広文、「直線偏光及び楕円偏光した 2 波長レーザー電場を用いた気体分子の全光学的 3 次元配向制御」、2019 年第 66 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)、2019 年 3 月 10 日 (日).
- [20] Md. Maruf Hossain, Xiang Zhang, Ryohei Yamada, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Nonadiabaticity in the orientation dynamics of OCS molecules with 10-ns two-color laser pulses," レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会、東海大学高輪キャンパス (東京都港区)、2019 年 1 月 14 日 (月・祝).
- [21] 仲林宏斗、小松原航、酒井広文、「3 回対称性をもつ気体結晶の生成法」、レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会、東海大学高輪キャンパス (東京都港区)、2019 年 1 月 14 日 (月・祝).
- [22] 三宅聡一郎、峰本紳一郎、酒井広文、「1300 nm 光による OCS 分子からの光電子の角度分布の解離性イオン化チャンネル依存性」、レーザー学会学術講演会第

## 6.5 五神-湯本-井手口研究室

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とした研究を進めている。具体的には、冷却原子系、半導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実験を進め、これまで到達できなかった低温域まで励起子気体の温度を下げることに成功した。この領域で、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ポンププローブ角度分解レーザー光電子分光法の開発を進め

ている。また、微細加工技術を駆使して物質系を制御し、新たな光をコントロールする手法を開拓している。具体的には人工構造を用いた光・テラヘルツ電磁波制御や縦電場生成、3D プリント技術を用いて作製した THz メタマテリアルなどに着目した研究を進めている。さらに生命現象などの複雑な科学へアプローチするために必要となる、高速かつ高感度の光計測技術の開拓を進め、コヒーレントラマン散乱によるラベルフリー顕微鏡の開発を行っている。本研究室では、物理学教室における活動と共に、理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構及び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して活動を進め、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や、フェルミオン冷却原子系における量子縮退領域での熱力学関数の精密測定を進めている。さらに、物性研究所極限コヒーレント光科学研究センターも加えて発足した光量子科学連携研究機構を基盤とし、文部科学省革新的イノベーション創出プログラム (COISTREAM) 「コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点」、NEDO プロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」などの産学連携による研究開発活動も推進している。特に、近年産業技術として非常に注目されているレーザー加工のメカニズム解明と新規応用技術の開発に取り組んでいる。本年度に進めた研究を以下に紹介する。

### 6.5.1 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 凝縮転移の系統的観測

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、我々はスピリン禁制励起子である亜酸化銅 ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) 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、水素原子様の Lyman 遷移を励起子について観測することで、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生成する時に、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) を用いた結果、励起子間の 2 体衝突による励起子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 ( $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) 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、 $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  程度の転移密度を実現し、BEC 転移の観測を試みた。歪誘起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発光スペクトルから確認し、この温度で BEC 転移に必要である  $10^9$  個程度のパラ励起子を蓄積した。その結果、BEC 転移条件を満たすときに励起子ガスの高温成分が閾値的に増大することを見出した。数値計算との比較の結果、上記のような非弾性散乱が強く起こる系においては、BEC 転移が生じたと仮定すると、基底状態を多数の粒子が占有して局所的に密度が上昇し、励起子を爆発的にトラップ中央からはじき出す (緩和爆発) ことが分かっている。

この実験においては、全励起子に対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。その結果 100 mK を下回る世界最低温度の励起子系を実現したこと、および歪誘起トラップを生成する応力が大きいほど低密度極限における励起子温度が低下することを見出した。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いる。またこの極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見られ、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。

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た。現在励起子温度を 100 mK 台に保ちつつ誘導吸収イメージを取得することに成功している。本手法を用いて BEC 転移特有の変化を空間分布によって検出する実験を進めている。この検出の前提として、励起子の空間分布が励起子の温度、ポテンシャル形状、粒子数から決定される熱分布と一致するか否かを調べることは大変重要な課題である。そこで本年度は、時間分解発光測定によって極低温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た (図 6.5.1) 結果の解析を進めていく中で、寿命や拡散係数、移動度といった空間ダイナミクスを決定する重要なパラメータの抽出を行った。その結果、励起子の空間分布が熱分布で定義される分布に到達するためにはフォノンとの相互作用の少ない極低温の環境を実現することが極めて重要であることを明らかにした。 (図 6.5.2) また解析の結果、亜酸化銅中の励起子は不純物などの散乱を受けずに巨視的な空間スケールを自由に動ける、自由粒子として取り扱えるという特徴を抽出することができた。[12]

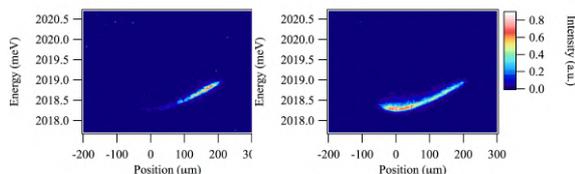


図 6.5.1: トラップへ蓄積中の励起子発光イメージ:30 ns(左図) -90 ns(右図)

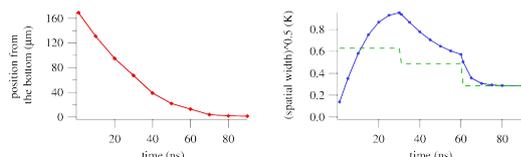


図 6.5.2: 拡散方程式に基づくトラップへ蓄積中のサブケルビン励起子の空間分布の変化

### 冷却原子量子シミュレーション実験

新学術領域研究「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」が今年度新規に採択され、ハドロン物理学、原子核物理学、原子物理学、分子科学分野の研究者の力を結集して、異なった階層間に現われる多彩な新奇クラスター現象を通して、スケールが何桁も異なる物質層を支配する量子多体系の法則を見出す研究活動が開始された。我々は研究計画として本研究領域に参画しており、「冷却原子を用いた量子シミュレーション実験により、「冷却フェルミ原子気体の高い操作性を駆使し、量子クラスター形成としてのフェルミ粒子対形成や、自由度の中和過程としてのフェルミ対のボソン化、および、そうした現象に起因する量子多体効果の全容を解明すること」を目指している。

今年度は重イオン衝突実験に見られる流体力学的振る舞いと、その量子多体系中で生じる量子クラスター生成のダイナミクスを冷却原子系でシミュレートするために、「ユニタリー領域における体積粘性の測定」と「フェッシュバッハ分子の吸収分光」2つの実験を進展させた。

我々は希薄で極低温な  ${}^6\text{Li}$  原子気体を用いてスピン  $1/2$  フェルミ粒子系を実現している。スピン間の散乱レートをフェッシュバッハ共鳴により増大させ、粒子の平均自由行程が原子気体のサイズよりも十分小さくなる条件下では、そのフェルミ粒子系は流体的な振る舞いを示す。我々は粒子の流れ方はその粒子系の量子状態が反映されることを期待し、流体力学のパラメータである粘性率の相互作用、温度依存性の研究に取り組んでいる。これまでの先行研究で、散乱長が発散しているユニタリー極限におけるせん断粘性率の測定は行われているが、一方で体積粘性

率の測定は全く行われていない。我々は東京工業大学の西田祐介准教授との共同研究により、冷却原子の長所を生かした全く新しい方法で体積粘性率の測定を行った。通常体積粘性率は粒子系の体積を変化させ、それに伴うエネルギー上昇を測定する。しかし西田氏の理論研究によって、フェッシュバッハ共鳴を用いて散乱長を時間変化させることにより、フェルミ粒子はあたかも粒子系が体積変化を受けているように感じ、体積粘性率由来のエネルギー上昇が生じることを明らかにした。粒子は流れていないのに流体の物理を研究できる点は極めてユニークである。また散乱長の変化は等方的なため、粒子系はせん断粘性率には応答せず、体積粘性率由来のみのエネルギー上昇を測定できる点も優れている。我々はこの理論提案に基づき実験を行い、散乱長の変調周波数、振幅、変調回数依存のエネルギー上昇が理論予測と一致することを確認し、この理論提案の妥当性を確認した。さらに測定されたエネルギー上昇から体積粘性率を評価し、定温における体積粘性率が高温の予想値から大きくずれることを確認した。この実験結果は、当初期待していた通り量子多体効果が流体の物理に大きく影響を与えることを示唆している。今後のさらなる定量的な実験により、ユニタリー領域における体積粘性の普遍的な状態方程式を示すことができ、クオーク・ハドロン研究との対応が進められる。本研究は津森貴大の修士論文にまとめられた。[17]

また、近年ハドロン物理では弱く束縛されている多様なハドロン分子状態、またはハドロンクラスター状態が次々と発見されている。もっとも単純なハドロン分子状態として、陽子と中性子が束縛した重陽子が挙げられる。重陽子の束縛状態は冷却原子で実現されるフェッシュバッハ分子と良く似ており、散乱長と有効長で記述される束縛状態である。しかし重陽子が形成されるダイナミクスは全く理解されていない。そこで我々は冷却原子量子シミュレータを用いてフェッシュバッハ分子が形成されるダイナミクスを観測し、核子系やハドロン系に知見を与える。そのために、 ${}^6\text{Li}$  原子系の中から弱く束縛したフェッシュバッハ分子のみを、高い時空間分解能で観測するシステムが必要になる。我々は光会合の実験を応用し、フェッシュバッハ分子から電子励起状態の 2 原子分子状態への励起遷移をイメージングに用いることができなにか考えた。そこでフェッシュバッハ分子の吸収分光を行い、原子とは全く異なるフェッシュバッハ分子の励起スペクトルを世界で始めて観測した。この実験結果より、フェッシュバッハ分子のみを撮影できる遷移周波数を決定することができた。この光学遷移を用いることにより、衝突によるフェッシュバッハ分子の乖離と再結合や、アップスピンとダウンスピンを衝突させた際の束縛状態形成等、様々なダイナミクスの研究を開拓できる。さらにこの分光方法はエフィモフ 3 量体に対しても有効であると期待しており、電子励起状態の 3 原子分子の励起スペクトルが観測されれば、分子物理学への応用にもつながると期待している。

## 6.5.2 非自明な光学現象の探索とその応用

### 新規レーザー破壊閾値決定法の開発

我々は、誘電体に対するレーザー破壊現象の微視的メカニズムの解明に向けた研究を進めている。この研究を進める上で、旧来の方法では、レーザー加工における物質の破壊閾値の決定精度が十分ではないという大きな問題があった。この原因として、旧来の手法では、フルエンスを変えながら多数の加工痕を生成しなおかつそのモルフォロジー観察を行う必要があるという煩雑性に加えて、ビームプロファイルがガウシアンと仮定する必要があるために、実際のプロファイルとの差分が破壊閾値の算出に少なからず影響してしまうという問題が不可避であったということが挙げられる。

今年度我々は、この問題点を解決する新たなレーザー破壊閾値決定法の開発を行った。本手法では、集光点におけるレーザー光のビームプロファイルを直接観測し、顕微鏡で観察したレーザー加工痕の高さプロファイルと重ね合わせることによって、破壊閾値を求めるといったものである。本手法を実現するために必須となる、集光点における強度分布(ビームプロファイル)の取得には、市販のビームプロファイラーのピクセルサイズ(通常は約  $20 \mu\text{m}$ )では分解能が不十分である。そのため、まず、集光点における数ミクロンのスポットサイズのビーム径を測定可能なビームプロファイラーの開発を行った。我々は、小型PCキット RaspberryPi 用に安価に市販されている CMOS カメラのピクセルサイズが  $1.12 \mu\text{m}$  四方と、市販のビームプロファイラーのピクセルサイズと比べて非常に小さいことに着目し、この CMOS カメラのレンズとカラーフィルターを剥離してビームプロファイラーとして使用することによって、市販のビームプロファイラーを用いた場合に比べて非常に分解能の高い強度分布が取得可能であることを見出した。

続いて、サファイア単結晶を加工対象として、上記手法で測定した集光点ビームプロファイルを用いたレーザーによってシングルパルス加工を行い、その加工痕の精密な高さプロファイル、レーザー顕微鏡を用いて取得した。さらに、集光点のレーザー強度分布と加工痕高さプロファイルを高精度で重ね合わせる手法を開発した(図 6.5.3)。

上記の重ね合わせ結果から、それぞれの場所における局所フルエンスと加工深さを 1 対 1 で対応づけることが可能となる。これによって求まるヒストグラムを、図 6.5.4 に示す。このヒストグラムを見ると、赤矢印で示した  $4.5 \text{ J/cm}^2$  以上のフルエンスで深さが急激に減少していることから、この値がレーザー破壊閾値であることが一目瞭然となる。

この手法は、これまでの破壊閾値の決定法と比べて、非常に多くの利点を有している。旧来は、レーザー破壊閾値を求めるためにはレーザーの強度を変えていくつもの加工痕を作製・観察する必要があったのに対し、本手法では原理的には 1 つのレーザー加工痕だけで破壊閾値を求めることが可能となるため、非常に簡便である。さらに、本手法では図 6.5.4

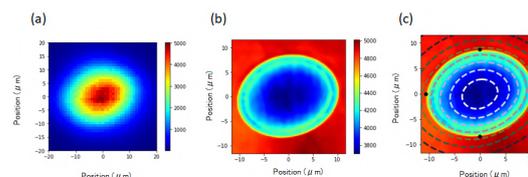


図 6.5.3: (a) 集光点におけるレーザー強度分布の取得結果 (b) レーザー顕微鏡によって取得したサファイアに対するシングルパルス加工痕の高さプロファイル (c) レーザー強度分布と高さプロファイルの重ね合わせ結果 点線がレーザー強度分布、カラーマップが高さプロファイルを表す

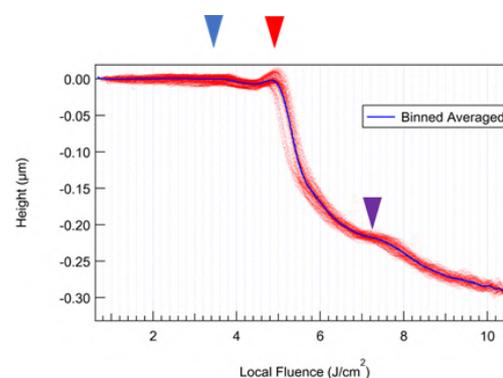


図 6.5.4: 集光点におけるレーザー強度分布とレーザー加工痕の高さプロファイルの重ね合わせ結果から求めた局所フルエンスと加工深さの対応関係

に示されているように非常に多くのデータ点のヒストグラムが取得できるため、高い精度で閾値を決定することが可能である。さらに、破壊閾値以外の局所フルエンスと加工深さの対応関係も全て知ることができるため、例えば図 6.5.4 に青および紫の矢印で示したような、旧来のレーザー加工閾値とは異なる閾値の存在や、加工プロファイルそのものの形状に関する議論が可能になるという利点も有する。

このように、本手法は、レーザー破壊閾値の決定手法を根本的に変えるポテンシャルを有する重要な新手法であると言える。知的財産としてのプライオリティーを確保するため、本年は特許申請を行った[20]。

### フェムト秒レーザー加工によるテラヘルツ波反射防止モスアイ構造の作製

近年のテラヘルツ (THz) 技術の進歩に伴って、THz 非線形光学や宇宙からの微弱 THz 信号観測など、THz 波の高強度化や検出の高感度化が重要となる研究が多

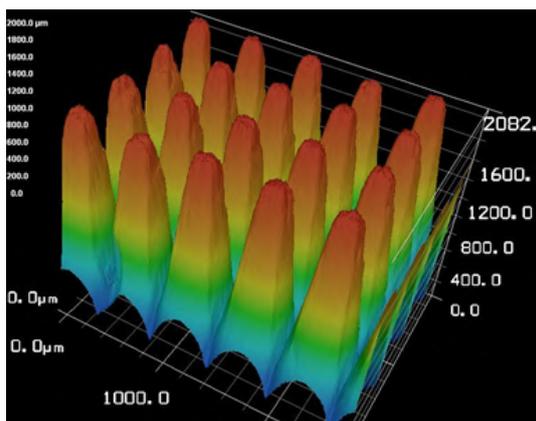


図 6.5.5: 作製したサファイアモスアイ構造のレーザー顕微鏡像

く進められている。これらを実現するためには THz 波のエネルギー損失の低減が重要であり、その損失要因の一つである材料界面でのフレネル反射の抑制が必要とされる。ここで、波長以下の大きさの微細突起構造が周期的に配列したモスアイ構造は、反射の原因となる屈折率の物質界面の不連続変化を解消し、広帯域な反射防止膜として機能することが知られている。このようなモスアイ構造は可視光およびマイクロ波領域では広く使われている一方で、その中間の、特徴的なサイズが数 10 ~ 数 100  $\mu\text{m}$  のオーダーとなる THz 領域においては、旧来の加工法では作製が困難であった。本研究では、フェムト秒レーザー微細加工技術を用いて、代表的な THz 光学材料に THz 反射防止モスアイ構造を作製し、透過特性の評価を進めている。今年度は、加工に用いるフェムト秒光源の高パワー化 (15 W) と、ガルバノミラーの導入によるビーム走査機構の導入により、モスアイ加工の高さ増大と加工速度の向上を試みた。この結果、高さ 2mm を超えるモスアイ構造を、 $\Phi 35 \text{ mm}$  の大きさでサファイア基板に対して作製することに成功した (図 6.5.5)。この加工に要した時間は 10.5 時間であり、昨年度の 10 倍以上の高速化が実現されている。また、この構造の透過率特性を測定したところ、シミュレーション結果と良く一致し、無反射構造として機能していることが確認できた [53]。

### 6.5.3 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計測

繰り返し周波数 5 kHz、パルス幅 30 fs 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 30 eV から 130 eV までの高次高調波を発生することができる。この高調波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。この測定結果から位相を抽出する際に、高調波の波面情報を取り込んだ改良されたモデル計算を行うなど、解析の精密化を進めた。現在屈折率実部の分散関係の決定精度は  $4 \times 10^{-4}$  以下に到達している。

近年 XUV 領域では波長 13.5 nm (92 eV) における光学素子の評価が応用の上で極めて重要になっている。本年度はこの応用上最も重要な波長に最適化した高調波の発生とそれを用いた干渉測定を行い、13.5 nm における屈折率測定に必要なデータ収集を行った。媒質はアルゴンガスとし、基本波 1300 nm の強度を最適化することでピーク波長を 13.5 nm 近傍に持つ高調波を発生させ、テストサンプルのシリコンの屈折率測定を行った。その結果得られた屈折率は文献値の波長分散をよく再現するが、わずかに差異があることが分かっている。現在、13.5 nm 近傍で測定を行う上で屈折率測定の精度を制限している要素の原因出しを行いさらなる高精度な測定を目指している。

#### 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、特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に挑むことを計画している。そのため我々は光励起中の電子状態を観測するのに適した、高収率である TOF 形式の角度分解光電子分光装置を採用し、エネルギー分解能 2.4 meV、角度分解能  $0.33^\circ$  という高分解能を達成した。これは類似の装置と比べ世界最良レベルの分解能である。次に、モード同期 Ti:S レーザー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。本年度は他研究室との共同研究を進め、従来の半球型では困難であった高エネルギーに位置する非占有バンド構造の測定に取り組んだ。

#### 高速フーリエ変換分光法の開発

分子振動吸収により得られる各分子に固有の指紋スペクトルは、分子種の同定に利用することができる。分子振動スペクトルを様々なアプリケーションに活用するにあたり、より多くの分子種を定量性良く同定するには、広いスペクトルを高い分解能で取得する必要がある。フーリエ変換分光法は、広帯域スペクトルを高分解能で取得することができる手法として過去 50 年間にわたり広く利用されてきた。しかしながら、この手法は秒単位の計測時間を要するため、静的な試料を計測するか、秒-分単位のゆっくりとした変化を計測する場面への利用に限ら

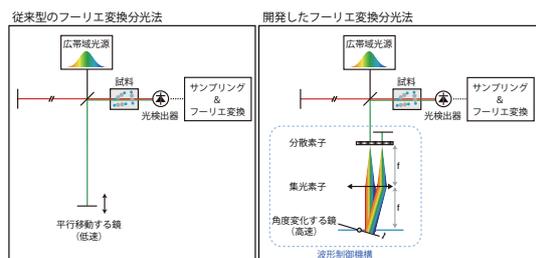


図 6.5.6: 従来型のフーリエ変換分光法（左）と開発したフーリエ変換分光法（右）

れ、動的で複雑な非線形現象を計測する目的には利用することが出来なかった。近年、光周波数コムを2台用いたデュアルコム分光法の研究開発が進み、マイクロ秒-ミリ秒の計測時間でのフーリエ変換分光計測が実証されてきた。デュアルコム分光法では、2つの独立した光周波数コムの光パルス列の相対位相遅延と相対群遅延を独立に制御し最適値に設定することにより、サンプリング定理に従うナイキスト限界の広帯域、高分解能、高速計測を実現することができる。デュアルコム分光法は高い分光性能を持つ手法であるが、位相ロックされた光周波数コムを2台用いるという複雑な装置を要するという難点を持つ。また、原理上、光源を内蔵する分光計となるため、太陽光などの自然光を受動的に分光することができない。これらの欠点を補うべく、我々は、マイケルソン干渉計を用いた従来型のフーリエ変換分光法を高速化する手法の提案と実証を行った。従来法で計測速度を律速していた電動ステージによる光路長の遅延線を、反射鏡面が高速に角度変化するポリゴンスキャナを用いた動的波形制御法に置き換えることにより高速計測を実現した(図 6.5.6)[1]。波形制御技術を用いることで、干渉する2つの光波の位相遅延と群遅延を独立に制御することができ、デュアルコム分光法と同じくナイキスト限界の高速計測が可能となった。この手法の原理検証実験を行い、通信波長帯のインコヒーレント光源を用いて1.8 THzのスペクトル帯域を、気体分子の吸収線を分解して観測するのに十分な11.5 GHzの高分解能で、毎秒24,000回計測することに成功した。本手法を用いることで、これまで観測が困難であった燃焼などの複雑な化学反応を伴う現象の解析が可能になると想定している。

#### 6.5.4 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oton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の整備を行っている。これまで主に真空紫外からの軟X線領域の高次高調波発生を目的として共振器内の高強度のフェムト秒レーザー光を蓄積できるフotonリングを開発して3 MHz級の高繰り返しで高次高調波を発生することが可能であることを実証した。さらに、レーザー媒質である薄ディスクの熱歪みによる変形を改善するために共振器内にデフォーカブルミラーを挿入し、装置の長時間の安静性および操作性の改善を進め、フotonリングにおいてモードロック動作時に共振器内のレーザー集光点にガスジェットを導入することで高次高調波を発生の確認も成功している。平成30年度は、新たに用意した969 nmに同調したLD光源で励起することで薄ディスクに発生する熱歪みを抑える手法を試験した。このLDはVBG(空間型ブラッグ回折格子)で精密に同波長にロックしておりLDの出力変更時も殆ど波長のズレはない。Yb:YAGの969 nm帯吸収波長はゼロフォノン線と呼ばれており、これを用いることでより効率的にレーザー発振を行うことが可能となり、また薄ディスク表面の温度上昇を抑制出来る。温度測定の結果から従来の波長940 nmで励起した時と比較して、同じ励起密度に対して約50%の温度上昇になっている。この結果、薄ディスクの熱歪みが抑えられ、より高安定で高出力モードロック動作を行うことが可能になることが分かった。

#### 6.5.5 フoton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oton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oton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ることを目指している。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。この活動は、東京大学が、未来社会協創推進本部を設置し推進しているSDGs活動に沿うものである。

これら活動を進めるため、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oton技術によるイノベーション拠点」が、平成25年度に採択された。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、半導体プロセス技術、健康医療技術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いく。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。

このような社会との連携活動を進める上で、学内他部局の光科学研究組織間での連携を強化する不可欠であり、本機構が中心となって、工学系研究科附属光量子科学研究センター、物性研附属極限コヒーレント光科学研究センターと共に、平成28年12月1日に光量子科学連携研究機構 (UTripl) を発足させた。また、平成28年度に、「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」がNEDOプロジェクトとして採択され、平成29年10月には、NEDOプロジェクト参画者を中心とした「高効率レーザープロセッシング推進コンソーシアム」(TACMI) が発足した。それに加え、平成30年度には、Q-LEAP 「先端レーザーイノベーション拠点」、SIP「光・量子を活用したSociety5.0実現化技術」に応募した2件の提案が採択され、他の先行プロジェクトとの連携を強化し、SDGsで目指している持続可能な社会構築に向けて貢献する。

<報文>

(原著論文)

- [1] Kazuki Hashimoto and Takuro Ideguchi: Phase-controlled Fourier-transform spectroscopy, *Nature Communications* 9, 4448 (2018).
  - [2] A. A. Ushakov, P. A. Chizhov, V. A. Andreeva, N. A. Panov, D. E. Shipilo, M. Matoba, N. Nemoto, N. Kanda, K. Konishi, V. V. Bukin, M. Kuwata-Gonokami, O. G. Kosareva, S. V. Garnov, and A. B. Savel' ev: Ring and unimodal angular-frequency distribution of THz emission from two-color femtosecond plasma spark, *Optics Express* 26 (14), 18202-18213 (2018).
  - [3] Kazuki Hashimoto, Junko Omachi, and Takuro Ideguchi: Ultra-broadband rapid-scan Fourier-transform CARS spectroscopy with sub-10 fs optical pulses, *Optics Express* 26 (11), 14307-14314 (2018).
  - [4] Zhigang Zhao, Akira Ozawa, Makoto Kuwata-Gonokami, and Yohei Kobayashi: Efficient high harmonics generation by enhancement cavity driven with a post-compressed FCPA laser at 10 MHz, *High Power Laser Science and Engineering* 6, e19, (2018).
  - [5] Petr A. Obraztsov, Dmitry Lyashenko, Pavel A. Chizhov, Kuniaki Konishi, Natsuki Nemoto, Makoto Kuwata-Gonokami, Eric Welch, Alexander N. Obraztsov and Alex Zakhidov: Ultrafast zero-bias photocurrent and terahertz emission in hybrid perovskites, *Communication physics* 1, 14 (2018)
  - [6] Davide Bossini, Kuniaki Konishi, Shingo Toyoda, Taka-hisa Arima, Junji Yumoto and Makoto Kuwata-Gonokami: Femtosecond activation of magnetoelectricity, *Nature Physics* 14, p370-374 (2018).
  - [7] Takuro Ideguchi, Tasuku Nakamura, Shigekazu Takizawa, Miu Tamamitsu, Sangwook Lee, Kotaro Hiramatsu, Venkata Ramaiah-Badarla, Jee-woong Park, Yusuke Kasai, Takeshi Hayakawa, Shinya Sakuma, Fumihito Arai, and Keisuke Goda : Microfluidic single-particle chemical analyzer with dual-comb coherent Raman spectroscopy, *Optics Letters* 43 (16), pp. 4057-4060 (2018) .
  - [8] Takuya Ikemachi, Yasushi Shinohara, Takeshi Sato, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami, and Kenichi L. Ishikawa: Time-dependent Hartree-Fock study of electron-hole interaction effects on high-order harmonic generation from periodic crystals, *Phys. Rev. A* 98, 0234150 (2018).
  - [9] Yiping Chen, Munekazu Horikoshi, Kosuke Yoshioka, and Makoto Kuwata-Gonokami: Dynamical Critical Behavior of an Attractive Bose-Einstein Condensate Phase Transition *Phys. Rev. Lett.* 122, 040406 (2019).
  - [10] Kotaro Hiramatsu, Takuro Ideguchi, Yusuke Yonamine, SangWook Lee, Yizhi Luo, Kazuki Hashimoto, Takuro Ito, Misa Hase, Jee-Woong Park, Yusuke Kasai, Shinya Sakuma, Takeshi Hayakawa, Fumihito Arai, Yu Hoshino and Keisuke Goda: High-throughput label-free molecular fingerprinting flow cytometry, *Science Advances* 5 (1) eaau0241 (2019).
  - [11] Munekazu Horikoshi and Makoto Kuwata-Gonokami: Cold atom quantum simulator for dilute neutron matter, *International Journal of Modern Physics E*, 28, (1) 1930001 (2019).
  - [12] Yusuke Morita, Hirosuke Suzuki, Kosuke Yoshioka, and Makoto Kuwata-Gonokami: Observation of ultra-high mobility excitons in a strain field by space- and time-resolved spectroscopy at sub-Kelvin temperatures, arXiv:1904.00418 (2019).
- (国内雑誌)
- [13] 井手口拓郎: 未来の科学を創る新規分光計測, 学部生に伝える研究最前線・理学部ニュース (東京大学) (2019/01)
  - [14] 長島優、橋本和樹、大間知潤子、井手口拓郎: 創薬における超高速ラマン分光法の活用, *光アライアンス* Vol.29, No.6 (2018)
- (博士論文)
- [15] 櫻井治之: Investigation of the optical breakdown characteristics of dielectric materials induced by ultrashort laser pulses (2019年3月, 東京大学大学院理学系研究科)
- (修士論文)
- [16] 戸田圭一郎: 赤外フォトサーマル位相差顕微鏡 (2019年3月, 東京大学大学院理学系研究科)
  - [17] 津森貴大: ユニタリ領域における冷却 Fermi 気体の体積粘性測定 (2019年3月, 東京大学大学院理学系研究科)
- <特許>

- [18] 井手口拓郎, 戸田圭一郎, 玉光未侑, 橋本和樹, 堀崎遼一: 画像生成装置および画像生成方法, 特願 2018-133711 (2018/7/13)
- [19] 井手口拓郎, 橋本和樹: 高速スキャンフーリエ変換分光装置及び分光方法, 特願 2018-129410 (2018/7/6)
- [20] 櫻井治之, 田丸博晴, 小西邦昭, 湯本潤司: レーザ加工におけるレーザ光強度への依存性の判定方法及びレーザ加工装置, 特願 2018-244267 (2018/12/27)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [21] Junko Omachi, Kazuki Hashimoto, and Takuro Ideguchi: High-speed Ultra-broadband Fourier-transform CARS Spanning over 3,000  $\text{cm}^{-1}$ , CLEO: Science and Innovations 2018, STu4P.6 (2018/05)
- [22] Munekazu Horikoshi: Dilute pure neutron matter investigated by cold atom experiments, ECT Workshop "Exploring Nuclear Physics With Ultracold Atoms", Trento Italy (2018/06/18-22)
- [23] Junji Yumoto: High Aspect Ratio Laser Cutting of CFRP using Nanosecond UV Laser Pulses, Nanocarbon Photonics and Optoelectronics 2019, Savonlinna (Finland) (2018/08/7-10)
- [24] Junji Yumoto: Coherent Photon Technology - Light-Matter Interaction -, The Fourth STEPS Symposium on Photon Science, Tokyo (2019/03/20-21)
- [25] Kuniaki Konishi: Circularly-polarized radiation and wavelength conversion using nanostructures, the 4th nano-optics and photonics young researchers meeting, Kyoto Institute of Technology (2019/03/26)

一般講演・セミナー・ポスター発表・査読あり

- [26] Mizuho Matoba, Natsuki Nemoto, Natsuki Kanda, Kuniaki Konishi, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami: Generation of Intense Terahertz Pulses with Longitudinal Electric fields, CLEO/QELS 2018, JW2A.80, San Jose, USA, (2018/05/16)
- [27] Haruyuki Sakurai, Natsuki Nemoto, Kuniaki Konishi, Yuki, Sakurai, Nobu Katayama, Tomotake Matsumura, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami: Ultrashort Pulsed-Laser Fabrication of Silicon Moth-Eye Structures for Terahertz Anti-Reflection, CLEO/QELS2018, JW2A.77, San Jose, USA (2018/05/16)
- [28] P. A. Chizhov, A. A. Ushakov, V. A. Andreeva, N. A. Panov, D. E. Shipilo, M. Matoba, N. Nemoto, N. Kanda, K. Konishi, V. V. Bukin, M. Kuwata-Gonokami, J. Yumoto, O.G. Kosareva, S.V. Garnov, A. B. Saveliev: Two-Color Plasma Terahertz Far-Field Angular Distribution Conversion By Focal Length Variation, 2018 International Conference Laser Optics (ICLO), pp. 238-238, St. Petersburg, Russia, (2018/06/4-8)

- [29] T. Ideguchi: Molecular spectroscopy with advanced lasers, Evonik seminar (2018/12)
- [30] T. Ideguchi: Dual-comb spectroscopy and advanced techniques toward chemical and biological applications, Ghent University seminar, Belgium (2018/12)

(国内会議, 研究会, セミナー)

招待講演

- [31] 井手口拓郎: 高速スキャン広帯域コヒーレントラマン分光, 分光学会シンポジウム「先端的振動分光法の新しい技術と応用」, 慶應大学 (2018/05)
- [32] 堀越宗一: 中性子星核物質の状態方程式 (低密度領域) の冷却原子実験 (Dilute neutron matter investigated by ultracold atom experiments), Gravitational wave physics and astronomy: Genesis - Area Workshop 2018 (Group B), 東京工業大学 (2018/6/07)
- [33] 井手口拓郎: 最先端のレーザーおよび分光技術, テクノロジーイノベーション本部講演会, パナソニック株式会社 (2018/06)
- [34] 井手口拓郎: 先端光技術で創る科学, 東京大学理学部オープンキャンパス教員による小柴ホール講演会, 小柴ホール (2018/08/02)
- [35] 井手口拓郎: 光周波数コムを用いた分子分光, 東京工業大学化学科セミナー ~ 物理化学研究の新潮流, 東京工業大学 (2018/09)
- [36] 井手口拓郎: 光技術が創る科学と研究者として生きることの魅力, 順天高等学校 Global Week 講演, 順天高等学校 (2018.10.31)
- [37] 湯本潤司: 若者にチャンスを与えるベンチャービジネスプラットフォーム, 学振 光電相互変換第 125 委員会設立 60 周年記念講演会, 明治大学 (2018/11/16)
- [38] 小西邦昭: 3D プリンター・レーザー加工を用いて作製した 3 次元テラヘルツ光学素子, シンポジウム テラヘルツ科学の最前線 V, 千葉大学西千葉キャンパス (2018/12/7)
- [39] 小西邦昭: 3D プリンター・レーザー加工による 3 次元人口構造テラヘルツ光学素子の開発, テラヘルツ科学の最前線 V, 千葉大学 (2018/12)
- [40] 小西邦昭: 3 次元造形技術のテラヘルツ光学素子作製への展開, レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会シンポジウム「人工構造による光機能制御の新展開」, 東海大学高輪キャンパス, (2019/01/13)
- [41] 井手口拓郎: 先端光技術による高機能分光計測, 堀場製作所 (2019/03)

一般講演

- [42] 津森貴大, 堀越宗一, 藤井啓資, 西田祐介, 五神真: コニタリ領域における冷却 Fermi 気体の体積粘性測定, 日本物理学会 2018 年次大会, 同志社大学 (2018/09)
- [43] 北中 宏明, 湯本 潤司: ウッズアノマリーとは異なる新しいアノマリー, 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 (2019/03/09)

- [44] 森山 匡洋、水谷 彬、谷 峻太郎、中村 亮介、小菅 淳、伊藤 功、趙 智剛、平 敬、小林 洋平、田丸 博晴、三尾 典克、五神 真、湯本 潤司: レーザー加工した CFRP のラマン分光による化学分析, 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 (2019/03/09)
- [45] 戸田 圭一郎、玉光 未侑、堀崎 遼一、井手口 拓郎: 中赤外フォトサーマル位相差顕微鏡, 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 (2019/03/09)
- [46] 橋本 和樹、井手口 拓郎: ナイキスト限界の高速広帯域フーリエ分光法, 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 (2019/03/11)
- [47] 石田明、周健治、山田恭平、橋立佳央理、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、田島陽平、蔡恩美、吉岡孝高、大島永康、オロークブライアン、満汐孝治、伊藤賢志、熊谷和博、鈴木良一、藤野茂、兵頭俊夫、望月出海、和田健、甲斐健師: ポース・アインシュタイン凝縮を目指した高密度ポジトロニウム生成材料の開発, 日本物理学会第 74 回年次大会, 九州大学 (2019/3/14)
- [48] 上岡修星、成田佳奈香、稲田聡明、難波俊雄、浅井祥仁、吉岡孝高、五神真、松尾晶、金道浩一、野尻浩之: OVAL 実験: パルス磁石と高フィネス共振器を用いた真空複屈折の探索, 日本物理学会第 74 回年次大会, 九州大学 (2019/3/14)
- [49] 周健治、山田恭平、橋立佳央理、石田明、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、田島陽平、蔡恩美、吉岡孝高、大島永康、オロークブライアン、満汐孝治、伊藤賢志、熊谷和博、鈴木良一、藤野茂、兵頭俊夫、望月出海、和田健: ポース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却 I, 日本物理学会第 74 回年次大会, 九州大学 (2019/3/15)
- [50] 橋立佳央理、周健治、山田恭平、石田明、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、田島陽平、蔡恩美、吉岡孝高、大島永康、オロークブライアン、満汐孝治、伊藤賢志、熊谷和博、鈴木良一、藤野茂、兵頭俊夫、望月出海、和田健 F: ポース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却 II, 日本物理学会第 74 回年次大会, 九州大学 (2019/3/15)
- [51] 山田恭平、周健治、橋立佳央理、石田明、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、田島陽平、蔡恩美、吉岡孝高、大島永康、オロークブライアン、満汐孝治、伊藤賢志、熊谷和博、鈴木良一、藤野茂、兵頭俊夫、望月出海 E、和田健: ポース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却 III, 日本物理学会第 74 回年次大会, 九州大学 (2019/3/15)
- [52] 田島陽平、山田恭平、周健治、橋立佳央理、石田明、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、蔡恩美、吉岡孝高: ポジトロニウムのレーザー冷却のためのサブマイクロ秒広帯域光源の開発, 日本物理学会第 74 回年次大会, 九州大学 (2019/3/16)
- [53] 高久諒太、松村知岳、櫻井治之、小西邦昭、今田大皓、桜井雄基、片山伸彦、満田和久、山崎典子、小松国幹、石野宏和、湯本潤司、五神真: 超短パルスレーザーを用いた LiteBIRD 波長板用広帯域モスアイ反射防止構造の小径試料作製と光学的評価, 日本物理学会第 74 回年次大会, 九州大学 (2019/3/17)

## 6.6 安東研究室

本研究室では重力と相対論・量子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。それに加え、将来計画である宇宙空間重力波アンテナ B-DECIGO の実現へ向けた検討や基礎開発も行われている。実験室内の基礎研究としては、独自の方式のねじれ型重力波検出器 TOBA の開発、さらには重力波研究で用いられる精密計測技術を用いた基礎物理研究として、オプトメカニクスを用いた巨視的な量子現象の測定実験、片道光速の異方性検証実験などを進めている。

### 6.6.1 大型重力波望遠鏡 KAGRA

アメリカの Advanced LIGO とイタリアの Advanced Virgo による連星ブラックホール合体や連星中性子星合体からの重力波の初観測により、物理学と天文学は全く新しい時代に突入した。今後はこうしたレーザー干渉計型重力波望遠鏡のさらなる高感度化や、より多くの重力波望遠鏡による同時観測による、さらなる検出数の増加とより精密な到来方向決定、連星パラメータ決定が期待されている。

こうしたさらなる重力波物理学・天文学の発展を目指し、日本では大型低温重力波望遠鏡 KAGRA (かぐら) の建設が進められている。KAGRA が稼働すれば、アメリカ、イタリア、日本の三極での三角測量により到来方向決定精度が各段に上がる。また、一般相対性理論が予言するテンソルモードとは異なる偏極モードが初めて分離できるようになり、一般相対性理論に代わる重力理論の検証が可能となることが期待できる。

KAGRA は、約 10 Hz 付近で問題となる地面振動や重力勾配雑音の影響を低減するために静寂な地下環境に建設されている、世界初の km 級の本格的な重力波望遠鏡である。また、約 100 Hz より低周波側で問題となる熱雑音の低減を図るため、km 級の重力波望遠鏡としては初めて、鏡を 20 K の極低温に冷やす。こうした地下建設と低温化は将来の重力波望遠鏡の高感度化には必須と考えられており、ヨーロッパの 10 km レーザー干渉計計画 Einstein Telescope も地下建設と低温化を基本としている。KAGRA はサイエンス面に限らず、技術面でもフロンティアを走っていると言える。

#### これまでと現状

KAGRA 計画は 2010 年にスタートし、トンネルや真空システムなどの基本的な施設は 2015 年に完成した。その後低温に冷やすサファイア鏡などのインストールを進め、2018年3月には4つのサファイア

鏡のうちの最初の1つが18 Kに到達した。2018年4月末より、低温マイケルソン干渉計の試験運転を行い、低温での干渉計動作確認や鏡の懸架系と制御系の一連の性能評価を行った。その後も引き続き鏡の懸架系や出射光学系などのインストール、入射光学系のアップグレードを進め、2019年3月時点で初期観測運転に必要なコンポーネントのインストールが完了した。現在は干渉計の調整などを進めており、2019年末にはAdvanced LIGOやAdvanced Virgoと共同観測を開始する予定となっている。

当研究室ではKAGRAの根幹部分となる主干渉計の光学系や制御系の設計開発を行っている。本年度は特に、主干渉計の初期アラインメントを完了させ、2本ある3 kmの腕共振器のうち一方の共振器の制御を初実証した。腕共振器の制御には倍波光(波長532 nm)を用いた補助制御を行うが、その制御系が片腕の制御に必要な要求値を満たすことを確認できた。また、干渉計から出射される各種干渉縞信号を取得するための光学系を設計し、インストールと制御システムへの接続を行った。さらに、当研究室ではKAGRAの観測計画の立案とアップグレードのための感度設計と技術的実現可能性の検討も進めている。

#### 観測運転へ向けた干渉計動作

当研究室ではKAGRAの主干渉計部分を担当している。今年度は主に片腕の光共振器の動作の準備と実証を行なった。KAGRAでは、主干渉計を動作状態・観測状態にする(動作点に引き込む)ためにグリーンロックという手法を用いる。グリーンロックとは、主干渉計に用いる波長1064 nmのメインレーザーの倍波であるグリーンレーザーを用いて、決定論的に腕共振器の動作点引き込みを行う手法である。今年度はグリーンロックによる制御系の雑音シミュレーションを行い、主干渉計の動作に十分な性能が出るように制御系の詳細設計を行なった。またその詳細設計にしたがって、必要となる回路系の設計と製作を行なった。その上で、KAGRAの片腕共振器の動作試験を行なった。その結果、グリーンロックの性能が要求値を満たすことを実証するとともに、図??が示すように、グリーンロックによる腕共振器の動作点引き込みの手順を確立した。さらに、腕共振器を用いて、腕共振器の長さ、フィネス(平均折り返し回数に対応)、光学損失、鏡の曲率といった腕共振器自体の特性を測定し、これらの特性が、観測運転にむけて問題ない性能を満たしていることを示した。

#### 6.6.2 周波数依存スクイーズ光の開発

重力波望遠鏡の将来的な感度は量子雑音という雑音によって制限される。量子雑音を低減する有効な方法として干渉計にスクイーズ光を入射するというものがあるが、通常のスクイーズ光での感度の向上は高周波帯域に限られている。広帯域で量子雑音を低減するためには、高周波で位相方向に、低周波で振幅方向にスクイーズされた周波数依存したスクイーズ

光が必要となる。我々は、国立天文台の重力波望遠鏡TAMAの300 mの光共振器を用いて70 Hz程度での周波数依存スクイーズ光の実現を目指している。

今年度は、TAMAにおいてスクイーズ光の開発を進め、TAMAにおけるスクイーズ光の観測に初めて成功した。観測されたスクイーズ光は200 kHzでスクイーズレベルが3 dB程度であった。

今後は、スクイーズ角の安定化をして、ロスを低減していくことにより、10 Hz以上で9 dBのスクイーズ光を目指す。それと並行して、300 m共振器のデジタルシステムによるロックおよび自動アラインメントを進め、スクイーズ光を入射することによって70 Hz程度での周波数依存スクイーズ光を実現する。

#### 重力波偏極モードを用いた重力理論検証

一般相対性理論において重力波は偏極モードとして二つのテンソルモードを持つ。しかし、一般の計量重力理論においては六つの偏極モードが許される。重力理論によって許される重力波の偏極モードは異なるため、重力波の偏極モードの分離によって重力理論を検証することができる。原理的には偏極モードの分離には偏極モードの数と同じ数の重力波検出器が必要であるため、重力波検出器ネットワークの拡大によってより多くの偏極モードを含む重力理論の検証が期待される。

今年度はコンパクト連星合体からの重力波の偏極モードの分離可能性やパラメータ間の相関等を、各モードに対する幾何学的な因子を考慮した偏極モデルを用いて系統的に調査した。偏極モードの分離には検出器の台数が、考慮する偏極モードの数以上存在すること、十分な信号雑音比と信号の持続時間が得られていることの二つの条件が必要であることを示した。また、次世代重力波望遠鏡の偏極分離能力を系統的に調べ、将来のコンパクト連星合体からの重力波の長期的な観測によってパルサーの観測からつけられているスカラーモードへの制限と同等の直接検証が可能になることを示した。

#### 6.6.3 宇宙空間レーザー干渉計

宇宙空間レーザー干渉計DECIGOは基線長1000 kmのファブリペロー型レーザー干渉計を宇宙空間に建設するという野心的な計画である。これは、主に10 Hz以上で感度のある地上レーザー干渉計と、0.1 Hz以下で感度のあるLISAのような大型宇宙レーザー干渉計の中間にある周波数帯をターゲットとする検出器である。DECIGOは巨大ブラックホールの合体や、初期宇宙からの重力波などの観測を目指している。

#### 地上試験用プラットフォーム

DECIGOの大きな特徴の一つが、KAGRAなどの地上重力波望遠鏡と同様に、重力波と相互作用する

腕に Fabry-Pérot 共振器を組み込んでいることである。これにより、最高感度を向上させている。一方で、DECIGO のような宇宙重力波望遠鏡では、衛星の振動に起因する雑音を低減するために、テストマス(鏡)と衛星の間の相対位置・姿勢を制御するドラッグ・フリー制御が必要となる。DECIGO は、Fabry-Pérot 共振器とドラッグ・フリー制御を両立させる必要のある唯一の重力波望遠鏡である。従って、DECIGO の実現のためには、これらの技術の両立性を実証することが必要である。

本研究室では、この実証のための地上試験用プラットフォームの開発を進めている。このプラットフォームは、大きく分けて、レーザー干渉計と懸架系という2つの構成要素からなる。このプラットフォームの懸架系は、衛星を模す光学定盤懸架系とテストマス懸架系の2種類からなる。これらの懸架系は、ねじれ振り子などを用いて柔らかく懸架されており、宇宙空間での剛体の自由運動を模倣することができる。2018年度は主にこれらの懸架系の設計、および構築を進めた。さらに、構築された懸架系を用いて、変位や姿勢の制御試験も行った。今後は、懸架系に加えて、Fabry-Pérot 共振器を含む光学系の構築を進め、ドラッグ・フリー制御を含んだレーザー干渉計の実証を進める。

#### 6.6.4 ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA

Torsion-Bar Antenna (TOBA) とはねじれ振り子の水平回転を利用した新しい重力波検出器である。直交する2本の棒状マスが水平懸架され、重力波の潮汐力によってこれらが差動回転するのを干渉計センサによって読み取る。ねじれ振り子は低い共振周波数を持つため、地上でも低周波数帯(0.1 Hz 前後)の重力波に感度を持つのが特徴である。これにより他の地上レーザー干渉計型重力波検出器では観測が難しい中間質量ブラックホール連星合体の観測が可能になり、銀河中心の超巨大ブラックホールの形成過程に知見を与えることなどが期待できる。重力波観測以外にも地球活動による重力場変動を計測することで将来の地上重力波望遠鏡の低周波感度向上に貢献したり、地震の早期アラートに応用するなどの研究も進められている。

現在は長さ 35 cm の棒状マスを用いた小型プロトタイプ(Phase-III TOBA)の開発が進められており、将来的な大型化(10 m)に備えた雑音低減実証や、地球重力場変動の観測、地震速報の実現などを目指している。設計感度は、0.1 Hz で  $10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}}$  となっている。この感度を実現すべく次から述べるような要素開発が進行中である。

##### 感度向上

TOBA の主要な雑音の一つが地面振動雑音である。地面振動雑音は、地面の回転振動がねじれ振り子を揺らす回転地面振動と、地面の並進振動が振り子の何らかの非対称性を介してねじれ方向の信号にカッ

プルするカップリング雑音に大別される。先行研究によって、特にカップリング雑音が支配的であることが明らかになっており、Phase-III TOBA の目標感度実現のためにはこれを低減する必要がある。

カップリング雑音は、系の非対称性に起因するカップリング係数と並進地面振動の積で与えられる。前年度まではカップリング係数を下げる手法の原理実証を行ってきたが、本年度は並進地面振動を低減する防振系の開発を行った。

地面振動の防振には一般に受動防振が用いられているが、TOBA の観測帯域である 0.1 Hz 付近を受動防振するのは一般には容易ではない。そこで我々はフィードバック制御を用いた能動防振系を開発し、並進地面振動の能動防振を試みた。本年度は、アクチュエーターをよりレンジの大きなものを用いることで観測帯域の拡大を目指した。その結果、制御帯域の下限を 0.2 Hz まで拡大することに成功した。

現在の性能は、主にフレームの機械共振と傾斜カップリングによって制限されている。今後は、フレームの補強を行うことで共振周波数を高くし、制御帯域の上限を拡大していく。さらにテーブルの傾き変動を読み取るセンサーを設置して傾斜方向の制御も行うことで、傾斜カップリングの問題を解決していく予定である。

##### 低温系の開発

目標感度達成において最も障害となる雑音の一つが懸架ワイヤの熱的な揺らぎ(サスペンション熱雑音)である。熱揺動の大きさはワイヤの温度とエネルギー散逸量の積の平方根に比例するため、雑音低減のためには(1)低温化、(2)低散逸ワイヤの開発が必要である。Phase-III TOBA では懸架ワイヤの温度を 4 K まで冷却し、エネルギー散逸を  $Q = 10^8$  ( $Q$  値は散逸の逆数を表す無次元量)まで下げることが要求される。

本年度は冷却方法や構成要素などをまとめて低温系の設計を完了し、さらにそれをもとに調達・組み立てを行ったねじれ振り子の統合冷却試験を行い冷却試験を行った。その結果、8.5 K までの冷却に成功した。大型のねじれ振り子を極低温まで冷却した例としては世界で初めてである。ただし温度が 4 K まで到達していないことや冷却時間が想定より長かったなどの問題が発生したため、現在はその改善へ向けて外部からの熱輻射流入の低減やヒートリンクの熱接触の改善などを進めている。

##### Fiber Q measurement

Q factors of up to of  $1.3 * 10^5$  was measured on a variety of sapphire fibres for a torsion pendulum setup. These are currently the highest measured Q factors for sapphire fibres (not bulk measurements) at room temperature to the best of my knowledge, and surface loss was identified as the most likely limiting factor, in line with previous literature on

the subject. Clamp loss and thermoelastic loss were also studied and found to be unlikely the limiting factors in the measured values. Also to be noted is that these values are an order of magnitude higher than metal fibres. [23, 66, 44, 41]

A new experimental setup is also being designed, revolving around cryogenic cooling. This is expected to provide higher Q, and is also conducted because TOBA is planned to run at cryogenic temperatures. Other avenues of increasing Q are also being investigated, with surface loss mitigation a priority. [49]

### 改良型 WFS

phase-III TOBA が高周波帯で原理的な雑音である散射雑音で制限されるように、試験マスの差動回転を読み取るセンサとしては  $5 \times 10^{-16}$  rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$  の感度が要求されている。これを満たすものとしてマイケルソン干渉計の他に 2 つの改良型 Wave Front Sensor(WFS) が考案されており、一本のレーザーで角度が読み取れることから、試験マスの並進運動からのカップリングを低減することが容易であると見られている。

レーザーの基本モードである TEM<sub>00</sub> モードを鏡に入射すると、鏡が傾いた時 TEM<sub>10</sub> モードの光が反射時に生成される。この TEM<sub>10</sub> モード光と TEM<sub>00</sub> モード光を同時に光共振器内に共振させるように工夫することで角度センサとしての感度向上が期待できる。このような改良型 WFS として、我々は試験マスに取り付けられた鏡の他に二枚の曲率付き鏡を用いて折り返しのある光共振器を構成する方式と、3 枚の鏡を用いた結合光共振器を用いた方式の 2 つの方式を提案している。一つ目の改良型 WFS では、TEM<sub>00</sub> が共振している状態から一つの鏡を角度方向に加振し、ある共振器長の時に TEM<sub>10</sub> 光が増幅されることを実験により示すことができた [65]。また、二つ目の改良型 WFS [47] のセットアップ作成と原理実証実験を進めた。

### 6.6.5 相対論・量子光学精密実験

#### オプトメカニクス研究

安東研究室では、重力波検出器の感度向上に向けた雑音低減、および巨視的量子力学の検証を目的として、レーザー光の量子輻射圧揺らぎを観測することを目指している。我々は、mg スケールの棒状の鏡をねじれ振り子として利用し、両端で光共振器を構築してそれぞれの共振器長変動の差をとり、回転モードを測定するというセットアップを新たに考案した。このねじれ振り子光共振器という新手法を用いて、輻射圧揺らぎの観測を試みた。

今年度は、共振器内パワーの増大や雑音低減に取り組んだ。共振器内パワーは 10 W 程度まで増大させることに成功し、防振装置を改良することで地面振動雑音を大幅に低減した。結果として、量子輻射圧揺らぎ

と測定された雑音スペクトルの信号雑音比  $0.14 \pm 0.03$  を達成した (図 6.6.1)。この値は 100 Hz 付近での測定、mg-g スケールの振動子での測定という両側面において世界最高の結果である。さらに雑音源の特定を進め、それらの結果を学会での発表 [39, 71, 57] や博士論文 [10] としてまとめた。

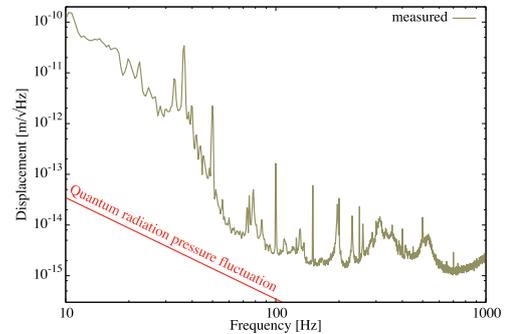


図 6.6.1: 測定された変位雑音と量子輻射圧揺らぎ

#### 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、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る。そこで、この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方法を考案した。光学浮上鏡を実現できれば、熱雑音以外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る。

現在は、ねじれ振り子と Fabry-Perot 共振器を組み合わせた従来のセットアップを用いて、光学浮上の安定性検証を目指した研究を進めている。従来の構成を改良し、上下 2 つの光共振器からの透過光を分離可能にした。その上で、ねじれ振り子の位置制御と Fabry-Perot 共振器を共振状態に制御することに成功し、実際に光輻射圧による復元力の測定を行った。結果として、Fabry-Perot 共振器の光強度を 2 倍以上に向上させると、有意な大きさで復元力を観測できることを確認した。今後は、ねじれ振り子の改良と Fabry-Perot 共振器を成す鏡の特性改善を行ったうえで、サンドウィッチ構成の安定性検証を行う予定である。

#### 光速の等方性検証

Lorentz 不変性は宇宙の基本的な対称性として現代物理学の様々な理論で採用されている。しかし、量子重力理論の研究や宇宙マイクロ波背景放射の観測から、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や特殊な座標系の存在が示唆されている。したがって、Lorentz 不変性をより高い精度で検証することが重要である。

我々は、Lorentz 不変性を検証するために片道光速の等方性検証を行っている。片道光速に異方性があると光速の行きと帰りに差が生じる。光路の一部に媒質を入れて屈折率を変えた非対称光リング共振器を用いると、共振器内を両周りに回る光の共振周波数の差として片道光速の等方性を検証することができる。この共振周波数の差をダブルパスという光学系構成により測定し、光学系全体を回転させて変調をかけることで信号の取得を行う。

我々はこれまでに1年間に渡る異方性探索を行い、片道光速の異方性で世界最高精度となる  $10^{-15}$  レベルの上限値をつけた。しかし、回転に伴う振動が感度を制限する要因となっていたため、今年度までに回転機構と光学系の改良を行った。

回転軸の変動に伴い光学系に導入されるひずみの影響を低減するための高剛性大型回転台の導入や電源供給部の改良等を進めた。一方で、回転台による振動雑音を衛星内または衛星自身を回転させることで回避するための超小型衛星を用いた等方性検証ミッション提案を行った。

### 光共振器を用いたアクシオン探索

アクシオンは量子色力学の強い CP 問題を解決するために導入された擬スカラー粒子であるが、近年ではひも理論など高次元理論からもアクシオンに似た様々な粒子が予言されている。また、アクシオンは典型的には eV 以下の小さな質量を持ち、物質とわずかに相互作用をする点から、暗黒物質の候補としても注目を集めている。この物質とのわずかな相互作用を利用したアクシオン探索が現在世界中で行われている。

我々はこれまで実験が行われてきた領域よりも低質量のアクシオンに着目し、光共振器を用いてアクシオン暗黒物質を探索する手法の検討を進めた。アクシオンと光子の相互作用があると、左円偏光と右円偏光に速度差が生じるため、その速度差を光共振器の共振周波数差として測定するのである。この手法を用いると、従来必要であった強磁場が必要なくなるため、コスト面や振動面で有利になると考えられる。

我々は2つの手法を提案した。1つ目の手法は、ボウタイ型の光リング共振器を用いる手法である。同じ光リング共振器に右円偏光で光を共振させた場合と左円偏光で光を共振させた場合の共振周波数差をダブルパス構成でヌル測定する構成である。この構成を用いると、100 W のレーザー光と周回長 10 m、フィネス  $10^6$  の光リング共振器でこれまでの上限値を大幅に更新できることがわかった [9, 53]。特に、 $10^{-15}$  eV 以下のアクシオンに対し、 $g_{a\gamma} < 3 \times 10^{-16}$  GeV $^{-1}$  という、先行研究の上限値を数桁更新する感度を実現することができる。

2つ目の手法は、線形の Fabry-Pérot 共振器を用いる手法である。入射する直線偏光とは直交する偏

光の光量を測定する光学系を組むことでアクシオン探索をすることができる。我々は、例えばレーザー干渉計型重力波望遠鏡 Advanced LIGO に用いられている Fabry-Pérot 共振器も利用することで、 $10^{-13}$  eV 程度のアクシオンに対し、 $g_{a\gamma} < 8 \times 10^{-13}$  GeV $^{-1}$  という感度を実現することができることを示した (arXiv:1903.02017)。この感度は重力波検出器としての感度を損なうことなく実現することができ、重力波探索とアクシオン探索を同時に行える画期的な手法である。

### <報文>

(原著論文)

- [1] KAGRA collaboration, KAGRA: 2.5 Generation Interferometric Gravitational Wave Detector, *Nature Astronomy* **3**, 35 (2019).
- [2] Nobuyuki Matsumoto, Seth B. Cataño-Lopez, Masakazu Sugawara, Seiya Suzuki, Naofumi Abe, Kentaro Komori, Yuta Michimura, Yoichi Aso, Keiichi Edamatsu, Demonstration of Displacement Sensing of a mg-Scale Pendulum for mm- and mg-Scale Gravity Measurements, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 071101 (2019).
- [3] KAGRA Collaboration, Vibration isolation system with a compact damping system for power recycling mirrors of KAGRA, Accepted in *Classical and Quantum Gravity* (2019).
- [4] T. Shimoda, Naoki Aritomi, Ayaka Shoda, Yuta Michimura and Masaki Ando, Seismic cross-coupling noise in torsion pendulums, *Phys. Rev. D* **97**, 104003 (2018).
- [5] KAGRA Collaboration, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Prospects for Observing and Localizing Gravitational-Wave Transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA, *Living Reviews in Relativity* **21**, 3 (2018).
- [6] Kentaro Komori, Yutaro Enomoto, Hiroki Takeda, Yuta Michimura, Kentaro Somiya, Masaki Ando, Stefan W. Ballmer, Direct approach for the fluctuation-dissipation theorem under nonequilibrium steady-state conditions, *Phys. Rev. D* **97**, 102001 (2018).
- [7] Yuta Michimura, Kentaro Komori, Atsushi Nishizawa, Hiroki Takeda, Koji Nagano, Yutaro Enomoto, Kazuhiro Hayama, Kentaro Somiya, Masaki Ando, Particle swarm optimization of the sensitivity of a cryogenic gravitational wave detector, *Phys. Rev. D* **97**, 122003 (2018).
- [8] Hiroki Takeda, Atsushi Nishizawa, Yuta Michimura, Koji Nagano, Kentaro Komori, Masaki Ando, Kazuhiro Hayama, Polarization test of gravitational waves from compact binary coalescences, *Phys. Rev. D* **98**, 022008 (2018).
- [9] Ippei Obata, Tomohiro Fujita, Yuta Michimura, Optical Ring Cavity Search for Axion Dark Matter, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 161301 (2018).

(学位論文)

- [10] 小森健太郎: Optomechanical Torsion Pendulum for Measurement of Quantum Radiation Pressure Fluctuation, 博士論文 (2019 年 3 月).
- [11] 川崎拓也: 巨視的量子系の実現に向けた鏡の光学浮上方法の研究, 修士論文 (2019 年 3 月).
- [12] 高野哲: ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA のための能動防振系の開発, 修士論文 (2019 年 3 月).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [13] Takuya Kawasaki: Optical Levitation to Realise a Macroscopic Quantum System, The 1st QFilter Workshop (Mar 2019, Paris, France).
- [14] Yuta Michimura: Brief Overview of QFilter Project, The 1st QFilter Workshop (Mar 2019, Paris, France).
- [15] Yuta Michimura: Optical Levitation of a Mirror for Realizing Macroscopic Entanglement, The 1st QFilter Workshop (Mar 2019, Paris, France).
- [16] Satoru Takano, *et al.*: Newtonian Noise Measurement by Torsion Bar Antenna, The 1st Kagra-Virgo-3G Detectors Workshop (Feb. 2019, Perugia, Italy).
- [17] Yuta Michimura, *et al.*: Summary of Past Discussions on KAGRA Upgrade, 21st KAGRA Face-to-Face Meeting (Dec 2018, Tokyo, Japan).
- [18] Yuta Michimura, *et al.*: Final Draft of bKAGRA Phase 1 Paper, 21st KAGRA Face-to-Face Meeting (Dec 2018, Tokyo, Japan).
- [19] Tomofumi Shimoda, *et al.*: R&D of Newtonian noise measurement, KAGRA satellite meeting (Dec. 2018, Mitaka).
- [20] Hiroki Takeda, *et al.*: Probing nontensorial polarization of inspiral gravitational waves with the third-generation detectors, JGRG28 (Nov. 2018, Rikkyo University).
- [21] Y. Enomoto for MIF subgroup: MIF status, 17th KAGRA face-to-face meeting (Aug. 2018, University of Toyama).
- [22] Yuta Michimura, *et al.*: bKAGRA Phase 1 Paper Status, 20th KAGRA Face-to-Face Meeting (Aug 2018, Toyama, Japan).
- [23] Ching Pin, Ooi: Mechanical loss of crystal fibres for torsion pendulum experiments, RESCEU Summer School (July 28,, Hakodate).
- [24] Hiroki Takeda, *et al.*: Polarization test of gravitational waves from compact binary coalescences, The 15th MG Meeting (Jul. 2018, University of Rome La Sapienza).
- [25] Koji Nagano, *et al.*: Constructing Test Bench for Integration Tests of Components Developed for DECIGO and B-DECIGO, The 15th MG Meeting, Rome, Italy, July, 2018.
- [26] Yuta Michimura, *et al.*: Prospects for improving the sensitivity of KAGRA gravitational wave detector, The 15th MG Meeting Meeting (Jul 2018, Rome, Italy).
- [27] Koji Nagano on behalf of the KAGRA Collaboration: Environmental monitors and injection test in bKAGRA phase1, The 4th KAGRA International Workshop (Seoul, Korea, June, 2018).
- [28] Yuta Michimura: Optimization of the KAGRA sensitivity, The 4th KAGRA International Workshop (Jun 2018, Seoul, South Korea).
- [29] Hiroki Takeda, *et al.*: Parameter estimation with inspiral waveforms of compact binary coalescences including nontensorial gravitational waves polarizations, 19th KAGRA Face-to-Face meeting (May. 2018, Osaka City University).
- [30] Satoru Takano, *et al.*: TOBA: Torsion Bar Antenna, The Current Status and Future Plans, 19th KAGRA Face-to-Face Meeting (May 2018, Osaka).
- [31] Koji Nagano on behalf of KAGRA Detchar subgroup: Results of the PEM injection during bKAGRA phase 1, 19th KAGRA Face-to-Face meeting (Osaka, Japan, May, 2018).
- [32] Masaki Ando: KAGRA Roadmap and Configuration, 19th KAGRA Face-to-Face Collaboration Meeting (May 20th, 2018, Osaka, Japan).

招待講演

- [33] Yuta Michimura on behalf of the KAGRA Collaboration: Status of KAGRA: Recent progress towards O3 and future plans, Conference on Multimessenger Astronomy in the Era of LIGO-India (Jan 2019, Khandala, India).
- [34] Masaki Ando: Recent results of gravitational wave, Higgs Couplings 2018 (Nov. 28, 2018, KFC Hall and Rooms, Ryogoku, Tokyo).
- [35] Masaki Ando: DECIGO : Gravitational-Wave Observation from Space, The 15th MG Meeting (July 1-7, 2018, University of Rome, Italy).
- [36] Masaki Ando, *et al.*: TOBA: Torsion-Bar Gravitational-Wave Antenna, The 15th MG Meeting (July 1-7, 2018, University of Rome, Italy).
- [37] Tomofumi Shimoda, *et al.*: Status of Torsion-bar Antenna Development, GWADW 2018 (May 2018, Alaska).
- [38] Y. Enomoto and K. Izumi for the KAGRA Collaboration: KAGRA: Status and Near Term Plans, GWADW 2018 (May 2018, Alyeska Resort, USA).
- [39] K. Komori, *et al.*: Towards observation of quantum radiation pressure fluctuation acting on a torsion pendulum, GWADW 2018 (May 2018, Alaska).

- [40] Yuta Michimura: Sensitivity Optimization of Cryogenic Gravitational Wave Detectors, GWADW 2018 (May 2018, Alaska, USA).
- ポスター発表
- [41] Ching Pin, Ooi, *et al.*: Mechanical Loss of Crystal Fibres for Torsional Pendulum Experiments, KAGRA Aug 2018 Face-to-Face meeting (2018年8月26日, University of Toyama).
- [42] Takuya Kawasaki, *et al.*: Optical Levitation of a Mirror, The 19th KAGRA Face-to-Face meeting (Osaka, Japan, May, 2018).
- [43] Koji Nagano on behalf of KAGRA Detchar subgroup, Environmental monitors in bKAGRA phase1, The 19th KAGRA Face-to-Face meeting (Osaka, Japan, May, 2018).
- [44] Ching Pin, Ooi, *et al.*: Mechanical Loss of Crystal Fibres for Torsional Pendulum Experiments, The 19th KAGRA Face-to-Face meeting (Osaka, Japan, May, 2018).
- (国内会議)
- 一般講演
- [45] 武田 紘樹, 他: 超小型衛星を用いた光速等方性検証ミッションの提案, 超小型衛星利用シンポジウム (2019年3月18日, 東京大学).
- [46] 高野哲, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (13): 能動防振系の開発, 日本物理学会 第74回年次大会 (2019年3月, 九州大学, 福岡).
- [47] 宮崎祐樹, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (14), 日本物理学会 第74回年次大会 (同上).
- [48] 下田智文, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (15): 低温ねじれ振り子の開発, 日本物理学会 第74回年次大会 (同上).
- [49] Ching Pin, Ooi, 他: Development of Phase-III TOBA (Torsion Bar Antenna) for Gravitational Wave Observation (16): Reducing Suspension Losses via Crystal Fibres, 日本物理学会 第74回年次大会 (同上).
- [50] 安東正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (100): B-DECIGO の概要, 日本物理学会 第74回年次大会 (同上).
- [51] 長野晃士, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (105): 干渉計統合試験用プラットフォーム, 日本物理学会 第74回年次大会 (同上).
- [52] 榎本雄太郎, 他: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の主干渉計制御, 日本物理学会 第74回年次大会 (同上).
- [53] 道村唯太, 他: 光共振器を用いたアクシオン暗黒物質の探索, 日本物理学会 第74回年次大会 (同上).
- [54] 川崎拓也, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (9) 日本物理学会 第74回年次大会 (同上).
- [55] 喜多直紀, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (10) 日本物理学会 第74回年次大会 (同上).
- [56] 武田紘樹, 他: 第三世代重力波望遠鏡によるコンパクト連星合体からの重力波偏極モード検証, 日本物理学会 第74回年次大会 (同上).
- [57] 小森健太郎, 他: ねじれ振り子を用いた量子輻射圧揺らぎ観測, 日本物理学会 第74回年次大会 (同上).
- [58] 有富尚紀, 他: 重力波望遠鏡の感度向上のための周波数依存スクイーズ光の開発, 日本物理学会 第74回年次大会 (同上).
- [59] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 2018年度第2回 CRC 将来計画タウンミーティング (2018年11月18日, 東京大学柏キャンパス, 千葉).
- [60] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO の概要 2018年 DECIGO ワークショップ (2018年11月1日, 名古屋大学 東山キャンパス, 愛知).
- [61] 長野晃士, 下田智文, 道村唯太, 安東正樹: 干渉計統合試験用プラットフォームの開発, 2018年 DECIGO ワークショップ (2018年11月1日, 名古屋大学 東山キャンパス, 愛知).
- [62] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 2018年度第1回 CRC 将来計画タウンミーティング (2018年10月20日, 東京大学柏キャンパス, 千葉).
- [63] 武田紘樹, 他: コンパクト連星合体からの重力波偏極モード検証, 日本物理学会 2018年秋季大会 (2018年9月, 信州大学).
- [64] 高野哲, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (11): 防振系開発, 日本物理学会 2018年秋季大会 (同上).
- [65] 下田智文, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (12): 光学系開発, 日本物理学会 2018年秋季大会 (同上).
- [66] Ching Pin, Ooi, 他: Mechanical loss of crystal fibres for torsion pendulum experiments, 日本物理学会 2018年秋季大会 (同上).
- [67] 長野晃士, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (99): 統合試験用プラットフォームの開発, 日本物理学会 2018年秋季大会 (同上).
- [68] 榎本雄太郎, 他: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の干渉計の動作点への引き込み法の開発, 日本物理学会 2018年秋季大会 (同上).
- [69] 喜多直紀, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (7), 日本物理学会 2018年秋季大会 (同上).
- [70] 川崎拓也, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (8), 日本物理学会 2018年秋季大会 (同上).
- [71] 小森健太郎, 他: 量子輻射圧揺らぎ観測に向けたねじれ振り子光共振器の変位雑音評価, 日本物理学会 2018年秋季大会 (同上).
- 招待講演
- [72] 道村唯太: レーザー干渉計による精密距離計測, 第三回若手による重力・宇宙論研究会 (2019年2月, 京都大学).

- [73] 道村唯太: 重力波観測の現状と展望, 第三回若手による重力・宇宙論研究会 (2019年2月, 京都大学).
- [74] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 日本学会議 天文学・宇宙物理分科会 マスタープラン 2020 第2回シンポジウム (2019年1月18日, 国立天文台, 三鷹).
- [75] 安東正樹: 量子光学における熱雑音と重力波検出の展望, 日本レーザー学会学術講演会 第39回年次大会 (2019年1月12日, 東海大学 高輪キャンパス, 東京).
- [76] 安東正樹, 綿田辰吾, 亀伸樹, 道村唯太: 高感度重力勾配センサによる地震早期アラート手法の確立, 光・量子飛躍フラッグシッププログラム 量子計測・センシング キックオフ会議 (2018年12月17日, 東工大 蔵前会館, 東京).
- [77] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 第1回大型計画に関する公開シンポジウム (2018年9月13日, 東京大学, 東京).
- [78] 安東正樹: 重力波観測分野の将来計画, 2030年代の光学赤外線天文学を考える (2018年9月11日, 国立天文台, 東京).
- (セミナー・アウトリーチ講演)
- [79] 安東正樹: 重力波で探る宇宙, 日本物理学会 市民科学講演会 (2019年3月16日, 九州大学, 福岡).
- [80] 安東正樹: 重力波で探る宇宙, NHK 文化センター講演会 (2019年2月23日, 町田, 神奈川).
- [81] 安東正樹: 重力波とブラックホール, 川口市立科学館 プラネタリウム (2019年2月17日, 川口市立科学館, 埼玉).
- [82] 安東正樹: 時空のさざ波 ~ 重力波で探る宇宙, 第26回 自然科学研究機構シンポジウム (2018年12月8日, 東京国際交流館, 東京).
- [83] 安東正樹: 「重力波」観測の衝撃, NHK 文化センター 横浜ランドマーク教室 (2018年11月11日, 文化センター横浜, 神奈川).
- [84] 安東正樹: アインシュタインの最後の宿題 重力波で探る宇宙: 山形県高等学校教育研究会 (2018年10月24日, 河北町総合交流センター, 山形).
- [85] 安東正樹: 重力波で探る宇宙, 第7回 福島医師会 市民文化講演会 (2018年10月6日, 福島市保健福祉センター, 福島).
- [86] 道村唯太: 重力波で宇宙と社会に耳をすます, 教養総合リレー講座「理系的地球の歩き方」(2018年10月, 麻布高等学校).
- [87] 道村唯太: 重力波を用いた新しい宇宙観測, グローバルウィーク (2018年10月, 順天高等学校).

## 6.7 馬場 研究室

### 6.7.1 はじめに

宇宙は一見冷たく静かな世界に見えるが、実際は高エネルギー現象に満ち満ちた世界であり、これら

の理解なくして宇宙の理解には至らない。本研究室では、宇宙や大気圏内の高エネルギー現象を研究対象としている。手法としては、高エネルギー現象が発する X 線やガンマ線を人工衛星や地上の検出器で観測することで、実験的に解明しようとしている。また、XRISM 衛星など、将来の高エネルギー天文衛星実現に向けて開発を続けている。

### 6.7.2 超新星残骸に関する研究室での進展

超新星残骸は星が核融合で生成した元素や衝撃波で加速した粒子を宇宙空間にばらまく、宇宙の多様性の源である。衝撃波速度は秒速数千  $\text{km s}^{-1}$  にもなり、加熱された爆発噴出物や星間物質は数千万度の高温プラズマとなり X 線で輝く。我々は超新星残骸の X 線観測により、以下のような成果をあげた。

#### 超新星残骸膨張の非等方性の測定

超新星爆発が等方的か否かは、爆発そのものの機構の理解に大きな影響を与える。また、元素放出量やその元素組成も重要である。しかし、その定量的な理解は観測からは進んでいない。

春日・馬場らは、Johannes Kepler が爆発の瞬間をとらえた「Kepler の超新星残骸」からの鉄輝線のドップラー偏移マップを作成し、特に超新星残骸中心部では赤方偏移成分のみが輝いていることを発見した(図 6.7.1 参照)。これは、Kepler 超新星残骸内の爆発噴出物鉄成分が非等方的に膨張していることを示した初の観測的証拠である [13]。一方同タイプと思われている「Tycho の超新星残骸」では非等方の兆候が見られず、同じ超新星残骸のタイプでも多様性がある可能性がある。今後我々は、同様の解析を複数の天体に系統的に適用し、超新星爆発の等方性の多様性について知見を得る予定である。

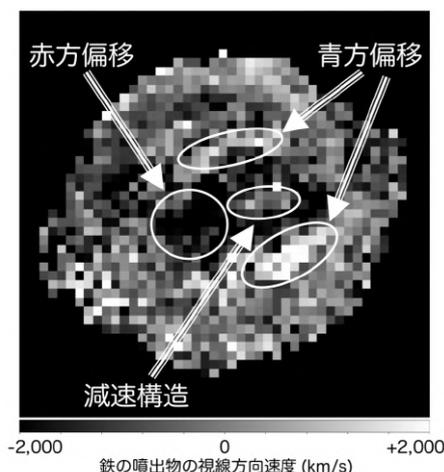


図 6.7.1: ケプラー超新星残骸の鉄輝線ドップラー偏移マップ。赤方偏移成分や青方偏移成分が非等方に分布していることが分かる。

### 超新星残骸からの宇宙線逃亡タイムスケールの測定

$10^{15.5}$  eV よりエネルギーの低い宇宙線は、主に超新星残骸衝撃波面で加速されていると広く信じられている。実際観測的にも、衝撃波面から TeV 帯域の加速粒子からの X 線・ガンマ線放射が見つかってきており (c.f., Bamba et al. 2003, Aharonian et al. 2004)、増幅された磁場中での効率よい加速が標準的な理解となってきた。一方、加速された粒子が宇宙線になるには、増幅された磁場から粒子が「逃亡」する必要がある。このタイムスケールの測定が、宇宙線起源を知る上での最後の 1 ピースとなっている。

鈴木・馬場らは宇宙線逃亡の兆候が GeV ガンマ線で見える超新星残骸の多くが分子雲と相互作用し、また、電子が急激な冷却を受けた「再結合プラズマ」を持つことに着目した。これは、衝撃波が分子雲と衝突することで、(1) 増幅された磁場が減衰し、より高エネルギーな粒子から順に逃亡し宇宙線となる、(2) 高温プラズマが急冷却され再結合優勢状態になる、という二つの事象が同時に起こっていると考えるところで説明できる。そこで我々は再結合プラズマの緩和時間、つまり分子雲との衝突からの時間を測定することで、加速粒子が逃亡し宇宙線となるタイムスケールを見積もる研究を続けている。我々は再結合プラズマをもつ複数の超新星残骸について、プラズマ緩和時間を測定した。我々は再結合プラズマ緩和時間と加速粒子からの GeV ガンマ線放射のべきを比較し、両者が正の相関を持つことを発見した [11]。これは、両者が同時に起こっているという我々のシナリオを支持する観測結果である。我々は現在、定量的に粒子の逃亡時間を見積もるべく、より詳細な GeV ガンマ線放射のモデリングを続けている。また、再結合プラズマの成因に関しても、1 次元数値流体に基づく時間依存の非電離平衡プラズマのスペクトルモデルの共同研究も行っている。

### 6.7.3 コンパクト天体に関する進展

物理学におけるコンパクト天体を研究する意義は、地上では到底実現できないような極限的な物理条件が巨視的なスケールで存在する様子を観測できることである。ブラックホールや中性子星が作り出す環境は、強重力場や強磁場、強い放射によって支配される高エネルギー現象にあふれている。馬場研究室は、主に人工衛星による X 線観測を手段として、大小さまざまなブラックホールや降着型の中性子星パルサー、通常の中性子星よりもさらに強い究極の磁場を持つ「マグネター」における物理現象の統一的理解を目指している。深い理解のために、理論と観測を定量的に繋ぐアプローチを重視しており、モンテカルロシミュレーションに基づいた X 線放射計算コードの開発も進めている。

### 高 X 線光度の降着駆動パルサーからの赤方偏移した鉄吸収線の発見

降着駆動パルサーは、 $10^{12}$  G よりも強い表面磁場をもつ中性子星が作る降着系であり、極めて強い磁場の下で物質が如何に振る舞うかを調べることができるユニークな物理実験室である。小高と理化学研究所の共同研究者らは「古典的な」X 線パルサーの中で最も光度が高い SMC X-1 に着目した。この天体の X 線光度は  $5 \times 10^{38}$  erg s $^{-1}$  で、エディントン光度を上回っており、最近注目されている ULX パルサーとの関連性が期待できる。我々は SMC X-1 の「すざく」衛星の観測データを解析し、全 10 回の観測のうち 1 つから 6.61 keV の吸収線を発見した [9, 56]。この吸収線は 6.70 keV にある鉄のヘリウム様イオンの共鳴線が約 4000 km s $^{-1}$  赤方偏移したものであると解釈するのが自然である。この吸収線が観測される時期は、SMC X-1 の超軌道周期変動の立ち上がりと同期しており、広がった降着円盤の表面付近にある低密度かつ高電離度の降着円盤コロナの存在を検出したものと考えられる。この発見は、高い降着率の中性子星への降着流のダイナミクスを理解する上で重要なものである。

### マグネターの広帯域 X 線観測

前述の強磁場を持つ降着型中性子星に比べても、はるかに強い磁場を持っていると考えられている中性子星がマグネターである。この種族は、 $10^{14} - 10^{15}$  G の極めて強い表面磁場を持つと見積もられている。マグネターの天体物理的な理解は、前述の降着駆動パルサーや回転駆動パルサーに比べて大幅に遅れており、支配的な放射エネルギー帯である X 線の放射機構についてもほとんどわかっていない。放射機構に観測的にアプローチするためには広帯域 X 線スペクトルを得ることが不可欠である。そこで、丹波、馬場、小高らはマグネター SGR 1900+14 の NuSTAR と XMM-Newton 同時観測を実施し、時間的特性と広帯域 X 線スペクトルをかつてない精度で測定した [31]。また自転位相分解スペクトルの解析によって、放射スペクトルの傾きと強度の相関を初めて得た。これは超強磁場の下で量子電磁力学的効果によって光子分裂が起こることで硬 X 線放射となるという理論モデルと定性的に一致しており、放射機構の解明に向けた重要な貢献となる。

### ブラックホール降着流の X 線放射モデルの構築

ブラックホール連星は、恒星質量ブラックホールと普通の恒星の連星系である。恒星から供給される物質がブラックホールに降着して、その重力エネルギーの解放によって数千万度まで加熱されることで莫大な X 線を放射する。この X 線のライトカーブやスペクトル、偏光の情報からブラックホール周辺の降着流の構造や運動を推定することができる。ブラックホール降着流の構造は降着率によって大きく変化し、

観測的には高い降着率の high-soft 状態と低い降着率の low-hard 状態に大きく二分される。Low-hard 状態のスペクトルの成因はよくわかっていなかったが、日本の「すざく」衛星などの活躍によって、高温コロナにおける逆コンプトン散乱による硬 X 線の生成という描像が確立してきた。しかし、その解析に用いる放射モデルは球形もしくは無限に広がった平板のような単純で非現実的な幾何構造を仮定することが多く、より現実的な幾何構造や重力場の影響を取り込んでデータ解析を行うことが急務となっている。小高・會澤らは国立天文台の共同研究者と協力し、モンテカルロシミュレーションを用いたブラックホール降着流の放射モデルを開発しており、今年度は標準降着円盤からより厚い降着流へと変化するような low-hard 状態ではより現実的なモデルを実装することに成功し [42]、現在、これに一般相対論的效果の導入を行っている [46]。

#### 6.7.4 観測装置開発

##### XRISM 衛星の開発

XRISM 衛星は、超高エネルギー分解能を誇るカロリメータと X 線 CCD を搭載し、2021 年度打ち上げを目指している。当研究室では galactic diffuse 天体のサイエンス創出と解析ソフトウェア開発を担当している。衛星は preliminary design review を通過し、現在 critical design review に向けた準備を進めている。

##### 半導体 X 線撮像偏光計の開発

宇宙高エネルギー現象の観測手段として、技術的フロンティアに位置付けられるのが、X 線より高いエネルギー域での偏光測定であり、現時点では天体物理の議論に耐えられるような十分な精度の観測例は皆無といえる。しかし、偏光観測がもたらす情報は強力である。等方的な熱的放射に偏光は生じず、偏光は天体の放射機構を区別し、系のジオメトリに大きな制限を与える。シンクロトロン・サイクロトロン放射のように磁場が放射に関わる場合は、磁場のコンフィギュレーションを直接的に反映する。また降着天体では特殊および一般相対論的な効果により物質の高速運動や時空構造に制限を得ることができる。

馬場研究室では、特に 10–50 keV 程度の硬 X 線と呼ばれる波長域における撮像偏光測定を開拓することを目指して、装置開発を行っている。今年度は小高、馬場、春日、會澤らが国立天文台、名古屋大学、Kavli IPMU、理化学研究所の共同研究者とともに微小ピクセル CMOS センサの性能評価とそれと組み合わせる符号化開口イメージングシステムの開発を開始した。研究初年度において、常温で鉄 55 の 5.9 keV の輝線に対して 200 eV (FWHM) の優れた分解能を達成し、レーザー微細加工による符号化開口を製作し優れた撮像能力を確かめた。偏光検出能

力についても概念実証実験を行い、必要な検出器パラメータについて有益な知見が得られた [22]。さらに、将来の硬 X 線撮像観測に向けて、鈴木、丹波を中心に厚い空乏層を持つ SOI ウェハ CMOS センサの評価も行っており、様々なシリコン CMOS センサの詳しい検出器応答の評価とモデル化を行っている。

#### 6.7.5 雷雲からのガンマ線に関する研究

雷放電や雷雲における強電場領域では電子が加速・増幅され、その制動放射が地上観測、あるいは宇宙や大気圏内での飛翔体観測にて検出されている (c.f. McCarthy et al. 1985)。これらの現象は濃密な大気中における自然界の電場加速機構として学術的に重要であり、高エネルギー大気物理学という新しい分野に発展しつつある。馬場研究室では和田と松元が、京都大学、名古屋大学、日本原子力研究開発機構、理化学研究所ほかと共に、日本海沿岸部で冬季雷からの高エネルギー現象を地上検出器で観測している。2018–2019 冬季シーズンには新潟県柏崎市、石川県金沢市、小松市、野々市市、白山市、輪島市、珠洲市、内灘町ほかで合計 23 台の検出器を運用し、9 イベントを検出した。

和田らは 2017 年 2 月に石川県珠洲市で観測された雷雲に関係したガンマ線イベントを解析し、雷雲内の強電場で加速された電子が制動放射を出すロングバーストと呼ばれる現象が、1 分間ほど観測された後に、雷放電によってロングバーストが突如として終了したことを確認した [19]。このイベントは東京学芸大学が運用する大気電場計、および近畿大学、神戸市立工業高等専門学校が運用する長波帯での雷観測機器との同時観測が実現した。その結果、ロングバーストの源となる強電場領域が水平方向に進展した雲内放電によって破壊され、ロングバーストが途絶したと解釈できた。これまでロングバーストの途絶はいくつか観測例があったが、雷放電の詳細な同時観測が実現したのは初めてであり、途絶現象と雷放電の関係を明らかにすることに成功した。

松元は 2015 年から 2018 年までに観測したデータを総解析し、検出した 30 例のロングバーストについて系統解析を行った [23]。得られたロングバーストのエネルギースペクトルを、Geant4 を用いてモンテカルロシミュレーションで作成した検出器の応答関数を用いて評価した、指数関数のカットオフをもつ冪関数で説明できた。そのカットオフのエネルギーはイベントの明るさや継続時間によらず、4–5 MeV に集中する。さらに制動放射による光子のエネルギースペクトルを数値計算し、観測結果と比較することで、電子を加速した電場の強度や、加速電子のエネルギースペクトルのパラメータに制限を与えた。今後は大気伝搬の過程を取り込むことにより、電場加速メカニズムにより詳細に踏み込む予定である。

<報文>

(原著論文)

[1] H.E.S.S. Collaboration, A. Bamba, et al., “A

- search for new supernova remnant shells in the Galactic plane with H.E.S.S.”, *A&A*, 612, 8 (2018)
- [2] Hitomi Collaboration, A. Bamba, H. Odaka, et al., “Hitomi X-ray Observation of the Pulsar Wind Nebula G21.5 – 0.9” . *PASJ*, 70, 38 (2018)
- [3] K. Nakazawa, H. Odaka, et al., “Hard x-ray imager onboard Hitomi (ASTRO-H)” , *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 4, 021410 (2018)
- [4] H. Tajima, H. Odaka, et al., “Design and performance of Soft Gamma-ray Detector onboard the Hitomi (ASTRO-H) satellite” , *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 4, 021411 (2018)
- [5] R. Tomaru, C. Done, H. Odaka, S. Watanabe, T. Takahashi, “Monte Carlo simulations of the detailed iron absorption line profiles from thermal winds in X-ray binaries” , *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 476, 1776 (2018)
- [6] H. Odaka, M. Asai, K. Hagino, T. Koi, G. Madejski, T. Mizuno, M. Ohno, S. Saito, T. Sato, D. Wright, et al. ”Modeling of proton-induced radioactivation background in hard X-ray telescopes: Geant4-based simulation and its demonstration by Hitomi’s measurement in a low Earth orbit”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 891, 92 (2018)
- [7] Mizumoto, M., Done, C., Hagino, K., Ebisawa, K., Tsujimoto, M., Odaka, H., “X-ray short-time lags in the Fe-K energy band produced by scattering clouds in active galactic nuclei” , *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 478, 971 (2018)
- [8] M. Hikitani, M. Ohno, Y. Fukazawa, T. Kawaguchi, H. Odaka, H., “Compton Shoulder Diagnostics in Active Galactic Nuclei for Probing the Metallicity of the Obscuring Compton-thick Tori” , *The Astrophysical Journal*, 867, 80 (2018)
- [9] M. Kubota, H. Odaka, T. Tamagawa, T., Nakano, “Discovery of Redshifted He-like Iron Absorption Line from Luminous Accreting Neutron Star SMC X-1” , *The Astrophysical Journal Letters*, 868 L26 (2018)
- [10] M. Mizumoto, K. Ebisawa, M. Tsujimoto, C. Done, K. Hagino, H. Odaka, “X-ray reverberation lags of the Fe-K line due to AGN disc winds” , *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 482, 5316 (2019)
- [11] H. Suzuki, A. Bamba, K. Nakazawa, Y. Furuta, M. Sawada, R. Yamazaki, K. Koyama, “Discovery of recombining plasma from the faintest GeV supernova remnant HB 21 and a possible scenario for cosmic rays escaping from supernova remnant shocks” , *PASJ*, 70, 75 (2018)
- [12] M. Kuriki, H. Sano, N. Kuno, M. Seta, Y. Yamane, S. Yoshiike, K. Okawa, D. Tsutsumi, Y. Hattori, M. Khono, S. Fujita, A. Nishimura, A. Ohama, M. Matsuo, Y. Tsuda, K. Torii, T. Minamidani, T. Umemoto, G. Rowell, A. Bamba, K. Tachihara, Y. Fukui, “DISCOVERY OF MOLECULAR AND ATOMIC CLOUDS ASSOCIATED WITH THE GAMMA-RAY SUPERNOVA REMNANT KESTEVEN 79” , *ApJ*, 864, 161 (2018)
- [13] T. Kasuga, T. Sato, K. Mori, H. Yamaguchi, A. Bamba, “Asymmetric Expansion of the Fe ejecta in Kepler’ s Supernova Remnant” , *PASJ* (2018)
- [14] Hitomi Collaboration, A. Bamba, H. Odaka, et al., “Detection of polarized gamma-ray emission from the Crab nebula with Hitomi Soft Gamma-ray Detector” , *PASJ*, 70, 113 (2018)
- [15] T. Tanaka, H. Yamaguchi, D.R. Wik, H. Uchida, Y. Uchiyama, F.A. Aharonian, A. Bamba, F. Castro, A.R. Foster, R. Petre, J. Rho, R.K. Smith, B.J. Williams, “NuSTAR Observations of the Supernova Remnant W49B: II. Nonthermal Aspect” , *ApJL*, 866, L26 (2018)
- [16] H. Yamaguchi, T. Tanaka, D.R. Wik, J. Rho, A.R. Foster, A. Bamba, R. Petre, B.J. Williams, H. Uchida, R.K. Smith, D. Castro, “NUSTAR OBSERVATIONS OF THE SUPERNOVA REMNANT W49B: I. THERMAL ASPECT” , *ApJL*, 868, :35 (2018)
- [17] A. Simionescu, S. Nakashima, H. Yamaguchi, K. Matsushita, F. Mernier, N. Werner, T. Tamura, K. Nomoto, J. de Plaa, A. Bamba, E. Bulbul, Y. Ezoe, A. C. Fabian, Y. Fukazawa, L. Gu, Y. Ichinohe, M. N. Ishigaki, J. S. Kaastra, C. Kilbourne, T. Kitayama, S.-C. Leung, M. Leutenegger, M. Loewenstein, Y. Maeda, E. D. Miller, R. F. Mushotzky, H. Noda, C. Pinto, F. S. Porter, S. Safi-Harb, K. Sato, T. Takahashi, S. Ueda, S. Zha, “Constraints on the Chemical Enrichment History of the Perseus Cluster of Galaxies from High-Resolution X-ray Spectroscopy” , *MNRAS*, 483, 1701-1721 (2019)
- [18] M. Sawada, K. Tachibana, H. Uchida, Y. Ito, H. Matsumura, A. Bamba, T. G. Tsuru, T. Tanaka, “Still stratified ejecta in the late Sedov phase: A deep Suzaku observation of the Galactic Ia supernova remnant G306.3-0.9” , *PASJ*, in press (arxiv:1903.02554)
- [19] Y. Wada, G. S. Bowers, T. Enoto, M. Kamogawa, Y. Nakamura, T. Morimoto, D. M. Smith, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, A. Matsuki, M. Kubo, T. Tamagawa, K. Makishima, H. Tsuchiya, ”Termination of Electron Acceleration in Thundercloud by Intracloud/Intercloud Discharge”, *Geophysical Research Letters*, 45, 5700-5707 (2018)
- (会議抄録)
- [20] T. Enoto, Y. Wada, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, K. Okuda, K. Makishima, M. Sato, Y. Sato, T. Nakano, D. Umemoto, H. Tsuchiya,

- M. Kamogawa, G. Bowers, D. Smith, T. Morimoto, Y. Nakamura, D. Wang, "Multi-point measurement campaigns of gamma rays from thunderclouds and lightning in Japan", Proceedings of XVI International Conference on Atmospheric Electricity (2018)
- [21] Y. Wada, T. Enoto, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, T. Matsumoto, D. Umemoto, K. Makishima, H. Tsuchiya, and the GROWTH collaboration, "Mapping Observation Project of High-Energy Phenomena during Winter Thunderstorms in Japan", Proceedings of International Symposium TEPA 2018 Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration, A. Alikhanyan National Laboratory, 85-92 (2019)
- (学位論文)
- [22] 春日知明, 「宇宙 X 線偏光観測を目指した符号化開口イメージング手法の設計と評価 (Design and Evaluation of Coded Aperture Imaging for Cosmic X-ray Polarimetry)」, 修士学位論文
- [23] 松元崇弘, 「雷雲ガンマ線スペクトルの測定と将来の光中性子計測への拡張 (Measurement of gamma-ray spectra from thunderclouds and development of photoneutron detectors)」, 修士学位論文
- (国際会議)
- 一般講演
- [24] Y. Wada, G. Bowers, T. Enoto, M. Kamogawa, Y. Nakamura, T. Morimoto, D. Smith, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, T. Tamagawa, K. Makishima, H. Tsuchiya, "A gamma-ray glow terminated by leader development of an inter-cloud discharge in Japanese winter thunderstorm", "EGU General Assembly", Vienna, Austria, 7-12 April 2018 (口頭)
- [25] T. Enoto, Y. Wada, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, K. Okuda, K. Makishima, M. Sato, Y. Sato, T. Nakano, D. Umemoto, H. Tsuchiya, M. Kamogawa, G. Bowers, D. Smith, T. Morimoto, Y. Nakamura, "Multipoint Measurement Campaigns of Gamma rays from Thundercloud and Lightning in Japan", "16th International Conference on Atmospheric Electricity", Nara, Japan, 17-22 June 2018 (口頭)
- [26] H. Suzuki, A. Bamba, H. Odaka, H. Yamaguchi, R. Yamazaki, "A Study on Homogeneous Recombining Plasma of G359.1-0.5: the GeV/VHE gamma-ray SNR Interacting with Molecular Clouds", "SNR workshop 2018", Nagoya University, Japan, 9-10 October 2018 (talk)
- [27] T. Kasuga, T. Sato, K. Mori, H. Yamaguchi, & A. Bamba, "Asymmetric Expansion of the Fe Ejecta in Kepler's SNR", "SNR workshop 2018", Nagoya University, Japan, 2018.10.09—2018.10.10 (talk)
- [28] H. Suzuki, A. Bamba, K. Nakazawa, Y. Furuta, M. Sawada, R. Yamazaki, K. Koyama, H. Yamaguchi, H. Odaka, "A study on escaping of cosmic rays from supernova remnant shocks through observations on thermal X-ray plasma", "Particle Acceleration and Transport: from the Sun to Extragalactic Sources", University of Calabria, Italy, 12-16 November 2018 (talk)
- [29] H. Suzuki, K. Nakazawa, K. Hagino, H. Odaka, A. Bamba, G. Sato, M. Kokubun, T. Enoto, Y. Fukazawa, K. Hayashi, J. Kataoka, J. Katsuta, S. B. Kobayashi, P. Laurent, F. Lebrun, O. Limousin, D. Maier, K. Makishima, T. Mimura, K. Miyake, T. Mizuno, K. Mori, H. Murakami, T. Nakamori, T. Nakano, H. Noda, M. Ohno, M. Ohta, S. Saito, R. Sato, H. Tajima, H. Takahashi, T. Takahashi, S. Takeda, T. Tanaka, Y. Terada, H. Uchiyama, Y. Uchiyama, S. Watanabe, K. Yamaoka, Y. Yatsu, T. Yuasa, and the HXI team, "In-orbit Neutron Background of the Hard X-ray Imager onboard Hitomi", "New eyes on X-ray astrophysical objects with Japanese and Chinese observatories", ISAS JAXA, Japan, 19-21 November 2018 (poster)
- [30] T. Kasuga, Y. Aizawa, H. Odaka, & A. Bamba, "Development of a Compact X-ray Imaging System with Coded Aperture", "New eyes on X-ray astrophysical objects with Japanese and Chinese observatories", ISAS/JAXA, Japan, 2018.11.19—2018.11.21 (poster)
- [31] T. Tamba, A. Bamba, H. Odaka, T. Enoto, "X-ray Analysis of magnetar SGR 1900+14 with NuSTAR and XMM-Newton", "New eyes on X-ray astrophysical objects with Japanese and Chinese observatories", ISAS JAXA, Japan, 19-21 November 2018 (poster)
- [32] Y. Wada, G. S. Bowers, T. Enoto, M. Kamogawa, Y. Nakamura, T. Morimoto, D. M. Smith, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, A. Matsuki, M. Kubo, T. Tamagawa, K. Makishima, H. Tsuchiya, "Lightning-Triggered Termination of a Gamma-ray Glow in a Japanese Winter Thunderstorm", "AGU Fall Meeting", Washington D.C., USA, 10-14 December 2018 (poster)
- [33] P. Laurent, M. Lindsey-Clark, D. Pailot, I. Cojocari, E. Bréelle, D. Sarria, Y. Wada, "XGRE: a TGF/GRB detector on the TARANIS spacecraft", "12th INTEGRAL Conference", Geneva, Switzerland, 11-15 February 2019 (poster)
- 招待講演
- [34] T. Enoto, Y. Wada, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, K. Okuda, K. Makishima, M. Sato, Y. Sato, T. Nakano, D. Umemoto, H. Tsuchiya, "Photonuclear reactions triggered by lightning discharges in a Japanese winter thunderstorm", "EGU General Assembly", Vienna, Austria, 7-12 April 2018
- [35] Y. Wada, T. Yuasa, K. Nakazawa, K. Makishima, T. Hayashi, M. Ishida, "X-ray estimates of white

- dwarf masses in magnetic cataclysmic variables”, “15th Marcel Grossmann Meeting”, Rome, Italy, 1-7 July 2018
- [36] H. Tsuchiya, T. Enoto, Y. Wada, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, T. Matsumoto, D. Umemoto, K. Makishima, “Recent status of the GROWTH experiment”, Tsuruga, Japan, 4-6 September, 2018
- [37] Y. Wada, T. Enoto, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, T. Matsumoto, D. Umemoto, K. Makishima, H. Tsuchiya, and the GROWTH collaboration, “Recent Updates from Mapping Observation of High-energy phenomena In Japanese Winter Thunderstorms”, “Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration (TEPA) 2018”, Aragatsotn District, Armenia, 17-20 September 2018
- [38] A. Bamba, “X-ray studies of SNRs and relevant sources in Large Magellanic Clouds”, “SNR workshop 2018”, Nagoya University, Japan, 2018, Oct.9-10
- [39] A. Bamba, “Constraining the energetic particle content of Supernova Remnants through X-ray observations”, “Particle Acceleration and Transport: from the Sun to Extragalactic Sources”, Università della Calabria, Rende, Italy, 2018, Nov.12-16
- [40] H. Odaka, “Monte Carlo Simulations using Geant4 for Hitomi and Suzaku”, “New eyes on X-ray astrophysical objects with Japanese and Chinese observatories”, ISAS/JAXA, Sagamihara, Japan, November 19-21
- (国内会議)
- 一般講演
- [41] 榎戸輝揚, 和田有希, 古田禄大, 中澤知洋, 湯浅孝行, 奥田和史, 牧島一夫, 佐藤光輝, 佐藤陽祐, 中野俊男, 榎本大悟, 土屋 晴文, “Ground-based high-energy radiation measurement of photonuclear reaction triggered by lightning discharge”, “日本地球惑星科学連合 2018 年大会”, 幕張, 日本, 2018 年 5 月 20 日-5 月 24 日 (口頭)
- [42] 會澤優輝, 小高裕和, 馬場彩, “一般相対論的效果を含んだ X 線放射輸送コードの開発”, “2018 年度第 48 回 天文・天体物理若手夏の学校”, ロワジュールホテル豊橋, 日本, 7/22-7/25 (口頭)
- [43] 丹波翼, 馬場彩, 小高裕和, 榎戸輝揚, “NuSTAR を用いたマグネター SGR 1900+14 の硬 X 線探査”, 第 48 回天文・天体物理若手夏の学校, ロワジュールホテル豊橋, 日本, 7/22-7/25 (口頭)
- [44] H. Suzuki, A. Bamba, K. Nakazawa, Y. Furuta, M. Sawada, R. Yamazaki, K. Koyama, H. Yamaguchi, H. Odaka, “A thermal X-ray study on escaping of cosmic rays from supernova remnant shocks”, “High Energy Astrophysics 2018”, The University of Tokyo, Japan, 5-7 September 2018 (poster)
- [45] T. Kasuga, T. Sato, K. Mori, H. Yamaguchi, & A. Bamba, “Asymmetric Expansion of the Fe Ejecta in Kepler’s Supernova Remnant”, “High Energy Astrophysics 2018”, The University of Tokyo, Japan, 2018.09.05-2018.09.07 (poster)
- [46] Y. Aizawa, H. Odaka, A. Bamba, “Spectral modeling of Black Hole Binary Cyg X-1 considering the geometry of Accretion Flow”, “High Energy Astrophysics 2018”, The University of Tokyo, Japan, 5-7 September 2018 (poster)
- [47] T. Tamba, A. Bamba, H. Odaka, T. Enoto, “X-ray Analysis of magnetar SGR 1900+14 with NuSTAR”, “High Energy Astrophysics 2018”, The University of Tokyo, Japan, 5-7 September 2018 (poster)
- [48] 小高裕和, Makoto Asai, 萩野 浩一, Tatsumi Koi, Greg Madejski, 水野 恒史, 大野 雅功, 齊藤 新也, Dennis Wright, 中澤 知洋, “衛星軌道上放射化バックグラウンドシミュレータの開発と「ひとみ」衛星搭載硬 X 線撮像検出器のデータの再現性”, “日本物理学会”, 信州大学, 日本, 9/14-9/17 (口頭)
- [49] 春日知明, 小高裕和, 鈴木寛大, 馬場彩, 織田忠, 都築豊, 高橋忠幸, 石川真之介, 成影典之, 「CMOS イメージャを用いた X 線偏光撮像システムの開発 I」, 「日本物理学会 2018 年秋季大会」宇宙線・宇宙物理領域 X 線γ線 8, 信州大学, 2018.09.14-2018.09.17 (口頭)
- [50] 松元崇弘, 和田有希, 古田禄大, 中澤知洋, 榎戸輝揚, 湯浅孝行, 土屋晴文, 牧島一夫, 小高裕和, 馬場彩, 米徳大輔, 澤野達哉, “2015 年 - 2017 年冬季の金沢地域における雷雲ガンマ線データの解析”, “日本物理学会 2018 年秋季大会”, 信州大学, 日本, 9/14-9/17 (口頭)
- [51] 小高裕和, 會澤優輝, 馬場彩, 川島朋尚, 萩野浩一, 渡辺伸, 高橋忠幸, “X 線放射輸送コード MONACO の開発の現状とその降着天体への応用”, “日本天文学会”, 兵庫県立大学, 日本, 9 月 19-21 日 (口頭)
- [52] 鈴木寛大, 馬場彩, 小高裕和, 山口弘悦, 「Chandra と XMM-Newton を用いた超新星残骸 G359.1-0.5 の X 線空間分解解析」, 日本天文学会 秋季年会, 兵庫県立大学, 日本, 2018 年 9 月 19-21 日 (口頭)
- [53] 會澤優輝, 小高裕和, 馬場彩, 「ジオメトリを考慮したブラックホール連星 Cyg X-1 の硬 X 線スペクトル解析」, 「日本天文学会 2018 年秋季年会」, 兵庫県立大学, 日本, 9/19-9/21 (口頭)
- [54] 丹波翼, 馬場彩, 小高裕和, 榎戸輝揚, “NuSTAR を用いたマグネター SGR 1900+14 の硬 X 線観測”, 日本天文学会 2018 年秋季年会, 兵庫県立大学, 日本, 9/19-9/21 (口頭)
- [55] 丹波翼, 馬場彩, 小高裕和, 榎戸輝揚, “広帯域 X 線観測を用いたマグネター SGR 1900+14 の多重極磁場の探査”, ～中性子星の観測と理論～ 研究活性化ワークショップ 2019, 京都大学, 日本, 2/18-2/20 (口頭)
- [56] 小高裕和, 窪田恵, 玉川徹, 中野俊男, “明るい降着型パルサー SMC X-1 からの高電離鉄吸収線の発見とその解釈”, “日本物理学会”, “日本物理学会 第 74 回年次大会”, 九州大学伊都キャンパス, 日本, 3 月 14 日-3 月 17 日 (口頭)
- [57] 和田有希, 榎戸輝揚, 松元崇弘, 中澤知洋, 古田禄大, 湯浅孝行, 鴨川仁, G. S. Bowers, 中村佳敬, 森本健

- 志, 玉川徹, 牧島一夫, 土屋晴文, ”雷活動に由来するガンマ線の観測プロジェクト: 多地点観測の進展と大気電場・電波との協同観測”, “日本物理学会 第74回年次大会”, 九州大学伊都キャンパス, 日本, 3月14日-3月17日 (口頭)
- [58] 春日知明, 小高裕和, 會澤優輝, 丹波翼, 鈴木寛大, 馬場彩, 織田忠, 都築豊, 高橋忠幸, 石川真之介, 成影典之, 「CMOS イメージャを用いた X 線偏光撮像システムの開発 II」, 「日本物理学会第74回年次大会」宇宙線・宇宙物理領域 X 線  $\gamma$  線 11, 九州大学, 2019.03.14-2019.03.17 (口頭)
- [59] 松元崇弘, 和田有希, 古田禄大, 中澤知洋, 榎戸輝揚, 湯浅孝行, 土屋晴文, 牧島一夫, 小高裕和, 馬場彩, 米徳大輔, 澤野達哉, ”雷活動に由来するガンマ線の観測プロジェクト: ロングバーストのフラックス校正とスペクトル系統解析”, ”日本物理学会 2019 年年時大会”, 九州大学, 日本, 3/14-3/17 (口頭)
- [60] 馬場彩, 山崎了, 大平豊, 山口弘悦, 田中孝明, 「NuSTAR による超新星残骸 CTB37B 衝撃波面からの非熱的硬 X 線の発見」, 日本天文学会 春季年会, 法政大学, 日本, 2019 年 3 月 14-17 日 (口頭)
- [61] 鈴木寛大, 馬場彩, 小高裕和, 山崎了, 山口弘悦, 大平豊, 「GeV ガンマ線・熱的 X 線観測による超新星残骸からの宇宙線逃亡の研究」, 日本天文学会 春季年会, 法政大学, 日本, 2019 年 3 月 14-17 日 (口頭)
- [62] 會澤優輝, 小高裕和, 馬場彩, 川島朋尚, 「X 線放射輸送コード MONACO への一般相対論的効果の導入」, 「日本天文学会 2019 年春季年会」, 法政大学, 日本, 3/14-3/17 (口頭)
- [63] 丹波翼, 馬場彩, 小高裕和, 榎戸輝揚, “NuSTAR と XMM-Newton を用いたマグネター SGR 1900+14 の X 線観測”, 日本天文学会 2019 年春季年会, 法政大学, 日本, 3/14-3/17 (口頭)
- [64] 和田有希, 榎戸輝揚, 中澤知洋, 古田禄大, 湯浅孝行, 中村佳敬, 森本健志, 松元崇弘, 牧島一夫, 土屋晴文, ”冬季の雷放電と同期したガンマ線フラッシュの定量評価”, ”日本原子力学会 2019 年春の年会”, 茨城大学水戸キャンパス, 日本, 2019 年 3 月 20 日-3 月 22 日 (口頭)
- (セミナー)
- [65] 馬場彩, 「マルチメッセンジャー天文学」総研大集中講義 (大学院), 2018 年 9 月 10 日-13 日
- [66] 馬場彩, 「平衡から外れた宇宙の観測 - 高エネルギー宇宙物理学」金沢大学集中講義 (大学院), 2018 年 12 月 3 日-5 日
- (解説記事)
- [67] 和田有希, ”雷が雲の中に隠れた天然の加速器を破壊した!? - 放射線・大気電場・電波観測で挑む高エネルギー大気物理学”, *academist Journal* (2018)
- [68] 和田有希, 榎戸輝揚, “雷による光核反応の発見”, *Isotope News*, 758, 28-31 (2018)
- [69] 和田有希, 中澤知洋, ”カミナリ雲の中に隠れた天然の加速器の破壊”, ”東京大学 理学部ニュース”, 50, 6 (2018)

## 6.8 日下 研究室

宇宙は、高温高密度の原始宇宙から始まり、膨張・冷却を経て現在に至るとされる。日下研究室では、宇宙背景放射 (CMB) の観測を通じて、この高温高密度の原始宇宙がどうやって作り出されたのかを調べ、宇宙の進化が何によって支配されているのか、宇宙物理の、そして素粒子物理の根本にも関わりうる謎を解き明かすことを目指している。

インフレーション仮説によれば、宇宙創成  $10^{-32}$  秒の間に時空の加速度的膨張が起き、高温高密度の原始宇宙が作られた。この仮説の決定的証拠となるのが重力場の量子ゆらぎに起因する「原始重力波」である。この重力波が、「B モード」と呼ばれる負のパリティを持つパターンを、宇宙背景放射のおよそ 2 度の角度スケールに刻印する。我々が探索するこのパターンが検出されれば、インフレーション宇宙論を証明するだけでなく、重力の量子化の確認という、現代物理学における一大ブレイクスルーとなる。

一方、宇宙背景放射の精密測定を通して未知の粒子の探索と宇宙進化メカニズムの解明も目指している。地球に届く過程で、宇宙背景放射は「暗黒物質」による重力レンズ効果の影響を受ける。この効果を測定することで、宇宙進化を探り、それに影響を及ぼす「宇宙背景ニュートリノ」の質量を測定することが出来る。また、CMB が銀河団を通過する際には、そこに分布する高エネルギー電子との相互作用により周波数スペクトルにゆがみが生じる。これは Sunyaev-Zel'dovich (SZ) 効果と呼ばれ、この効果を CMB 観測を通して測定することで、銀河団の分布図を作り、宇宙進化、そしてそれを司る暗黒エネルギーや宇宙背景ニュートリノを探ることが出来る。重力レンズ効果や SZ 効果は、インフレーションとは異なり、より小さな  $1 \sim 3$  分角の角度スケールに現れる。

我々は、チリ・アタカマ高地で観測を継続してきた POLARBEAR 実験、その後継である Simons Array 実験を通して研究を進めてきた。これに加えて、Simons Array と Atacama Cosmology Telescope (ACT) のグループを統合して発足した Simons Observatory 実験においても、2020 年の観測開始へ向けた設計・開発を進めている。

### 6.8.1 POLARBEAR 実験と Simons Array 実験

POLARBEAR 実験は、インフレーション測定と重力レンズ効果の両方を同時に測定する事を目指してデザインされており、2012 年から観測を続けてきた。データ解析における進展としては、POLARBEAR の CMB 偏光データと Herschel 衛星により検出された銀河の分布との相関を取る解析による重力レンズ効果の測定に成功した [1]。また、観測データの中に雲の中の氷の結晶との散乱により生じる偏光が含まれているという測定の結果も発表し、将来の地上 CMB 偏光実験において対策すべき課題としてその重要性を示した [2]。また、すばる望遠鏡から得られた重力

レンズ効果と POLARBEAR から得た重力レンズ効果の統合解析にも注力している。

Simons Array 実験は POLARBEAR 実験の後継であり、POLARBEAR のおよそ 6 倍に当たる一台あたりおよそ 7,000 チャンネルの検出器を擁する望遠鏡を、最終的に合計 3 台同時運用することを目指す。2018 年度には、それまで KEK の共同研究グループを中心に進められていた、実験室における 1 台目の統合試験を終え、日本からチリ・アタカマ高地へ受信機システムを輸送し、望遠鏡へのインストールを行った。その後、観測サイト現地において、観測システムの立ち上げを行い、ファーストライトを達成、試験観測を開始した。2019 年度初頭に定常観測への移行を目指し、準備を進めている。また、従来実験を一桁上回るデータ量を扱うため、HPC (High-Performance Computation) 環境で効率の良いソフトウェアを開発している。



図 6.8.1: チリアタカマ高地に建設中の Simons Array 望遠鏡群 (手前)。

### 6.8.2 Simons Observatory 実験

Simons Observatory は、2016 年に発足した史上最大規模の地上 CMB 実験・国際共同研究グループであり、当研究室もその推進に中心的な役割を果たす。Simons Observatory 実験においては、インフレーション測定における感度向上に特化した口径 42 cm 程度の小口径望遠鏡群と、重力レンズ効果や SZ 効果の測定を主眼に置いた口径 6 m の大口径望遠鏡との両方を建設し、これまでの測定を遙かに上回る精度で CMB を測定し、宇宙の始まりから進化までの姿を解き明かす。2018 年度中は、望遠鏡の設計が固まり作成が始まると同時に、科学成果に関する予測を進めた [3]。望遠鏡作成においては、本研究室では、特に小口径望遠鏡群に注力して開発を行ってきた。Kavli IPMU の共同研究グループとともに、光学設計および光学筒の設計を進め、直径 460 mm の単結晶シリコンレンズを有する屈折光学系を採用し、光学筒自身からの熱放射を抑えるため 1 K まで冷却するという基本設計を固めた。焦点面は、希釈冷凍機により 100 mK 以下まで冷却される。昨年度は、設計した光学系を実現する光学鏡筒部分の設計・作製を完了した。設計に於いては、レンズ同様 1 K まで冷却することとした。更に、鏡筒内にはリング状の

バッフルを設置した上で、内部を 1 K の黒体で覆うことによって系統誤差や検出器への余分な熱流入を抑制する事とした。製作面では、1 K においても光学系を理想的な位置に保持するため、アルミニウムの一体構造を採用し、加工を完了した。2019 年度中には鏡筒の開発を完了し、望遠鏡本体との組立試験へ移行する予定である。また、本研究室が中心となって開発を進める、超伝導ベアリングを用いた冷却型連続回転式半波長板システムを採用し、昨年度は一台目用のベアリングの作成・評価を完了した。現在、半波長板システムの統合作業を進める。

### 6.8.3 次世代 CMB 実験用 装置開発

超伝導体を用いた検出器として、超伝導力学的インダクタンス検出器および超伝導転移端センサが挙げられるが、いずれも従来の半導体検出器などでは達成不可能だった高感度・多チャンネル化が達成できる。CMB 観測実験、暗黒物質探索実験を始め、素粒子・宇宙分野の実験でも採用例が増加している。2018 年度は、生産設備として MEMS 作製用の設備を有するファウンドリ・サービスで超伝導力学的インダクタンス検出器を作製した。特に、超伝導検出器としては世界最大級の直径 8 インチのシリコン基板を用いたプロセスで素子を作製し、2019 年には測定・評価を行う予定である。本研究室では、これら超伝導検出器およびその読み出し回路の開発を進め、そしてその評価のため読み出し用高周波回路と希釈冷凍機の導入を進める。

また、冷却型連続回転式半波長板システムの開発において世界の先端を走っており、Kavli IPMU との共同研究により開発した世界最大の内径 55 cm の超伝導ベアリングは、上記の通り Simons Observatory に採用された。連続回転式半波長板を用いた CMB 測定の実証については、我々が開発した初めての冷却型連続回転式半波長板システムが、Simons Array 実験の二台目の受信機に統合され、2019 年度中の観測開始を目指す。さらに、Simons Observatory 実験の先に計画される究極の CMB 実験 “CMB-S4” に向けた概念設計を進めた。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] M. Aguilar Faundez, *et al.*, “Cross-correlation of POLARBEAR CMB Polarization Lensing with High- $z$  Sub-mm Herschel-ATLAS galaxies,” arXiv:1903.07046(2019).
- [2] S. Takakura, *et al.*, “Measurements of Tropospheric Ice Clouds with a Ground-based CMB Polarization Experiment, POLARBEAR,” *Astrophys. J.*, **870**:102 (2019).
- [3] Simons Observatory Collaboration, “The Simons Observatory: Science goals and forecasts,” *JCAP* **1902** (2019) 056.

(会議抄録)

- [4] T. Elleflot, *et al.*, “Detector and Readout Assembly and Characterization for the Simons Array,” *J. Low. Temp. Phys.* 193 (5-6), 1094-1102 (2018)
- [5] B. Westbrook, *et al.*, “The polarbear-2 and simons array focal plane fabrication status,” *J. Low. Temp. Phys.* 1-13 (2018)
- [6] P. A. Gallardo, *et al.*, “Systematic uncertainties in the Simons Observatory: optical effects and sensitivity considerations,” *Proc. SPIE, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation*, 107083Y (2018)
- [7] N. Galitzki, *et al.*, “The Simons Observatory: instrument overview,” *Proc. SPIE, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation*, 1070804 (2018)
- [8] M. Salatino, *et al.*, “Studies of systematic uncertainties for Simons Observatory: polarization modulator related effects,” *Proc. SPIE, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation*, 107083Y (2018)
- [9] J. R. Stevens, *et al.*, “Designs for next generation CMB survey strategies from Chile,” *Proc. SPIE, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation*, 1070841 (2018)
- [10] F. T. Matsuda, S. Takakura, *et al.*, “Cross-polarization systematics due to Mizuguchi-Dragone condition breaking by a continuously rotating half-wave plate at prime focus in the Huan Tran telescope,” *Proc. SPIE, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation*, 1070849 (2018)
- [11] K. T. Crowley, *et al.*, “Studies of systematic uncertainties for Simons Observatory: detector array effects,” *Proc. SPIE, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation*, 107083Z (2018)
- [12] S. A. Bryan, *et al.*, “Development of calibration strategies for the Simons Observatory,” *Proc. SPIE, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation*, 1070840 (2018)
- [13] Y. Sakurai, *et al.*, “Design and development of a polarization modulator unit based on a continuously rotating half-wave plate for LiteBIRD,” *Proc. SPIE, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation*, 107080E (2018)
- [14] C. A. Hill, *et al.*, “BoloCalc: a sensitivity calculator for the design of Simons Observatory,” *Proc. SPIE, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation*, 1070842 (2018)
- [15] C. A. Hill, A. Kusaka, P. Barton *et al.*, “A Large-Diameter Cryogenic Rotation Stage for Half-Wave Plate Polarization Modulation on the POLARBEAR-2 Experiment,” *J. Low. Temp. Phys.* (2018). <https://doi.org/10.1007/s10909-018-1980-6>
- [16] T. Hasebe, *et al.*, “Concept Study of Optical Configurations for High-Frequency Telescope for LiteBIRD,” *J. Low. Temp. Phys.* (2018). <https://doi.org/10.1007/s10909-018-1915-2>
- [17] A. Suzuki, *et al.*, “The LiteBIRD Satellite Mission: Sub-Kelvin Instrument,” *J. Low. Temp. Phys.* (2018). <https://doi.org/10.1007/s10909-018-1947-7>

#### <学術講演>

(国内会議)

- [18] 木内 健司, “次世代宇宙マイクロ波背景放射観測実験 Simons Observatory 用小口径望遠鏡の研究・開発状況,” 日本物理学会 第73回秋季大会, 2018年9月, 信州大学.
- [19] 木内 健司, “CMB 観測実験 Simons Observatory の開発状況,” 日本天文学会 2019年春季年会, 2019年3月, 法政大学.

招待講演

- [20] 日下 暁人, “Cosmic Microwave Background - Past and Future,” ISAS Space Science Colloquium, 2018年12月, JAXA 相模原キャンパス.
- [21] 日下 暁人, “ニュートリノ質量と測定・TeV を超える物理の探索を実現する次世代 CMB 観測,” 日本物理学会 2019年年度総会 共催シンポジウム「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」2019年3月, 九州大学 伊都キャンパス.

## 6.9 竹内研究室

巨視的な物質や現象は、熱平衡状態やその近傍にあるものに関しては、伝統的な熱力学や統計力学によって基礎原理が明らかになっている。一方で、自然界には、本質的に非平衡な自然現象が数多く存在する。日常的な現象をとってみても、気象を司る気流や海流のダイナミクス、空や大地を彩る様々な自己組織構造の形成、生物の存在や、それを支える種々の生命活動など、非平衡状態の理解が本質的に求められる現象が散見される。このような非平衡状態を記述する物理学法則の確立は、現代科学に課された重要な未解決問題の一つである。近年は、非平衡系でも成り立つ「ゆらぎの定理」の発見と応用、自己組織構造と機能の関わりなど、多種多様な発展が興っているが、非平衡系を支配する一般的な物理法則や原理の探求は十分でなく、実験に根差して、多彩な非平衡現象を統合的に理解していく試みの重要性が高まっている。

竹内研究室では、大自由度の非平衡現象に潜む物理法則の理解を目指し、液晶や粉体などのソフトマター、流体や生物等に関わる様々な実験課題を推進している。個別の現象の理解はもとより、現象に依らない共通の物理法則を抽出すること、そのような俯瞰的な視点から物事を捉えることを目指し、研究室単位では比較的多彩な問題を扱っている。現在は、

中心テーマとして「液晶乱流を使った普遍的な非平衡スケーリング則の探求」「細菌集団の物理を探る微小流体実験」に加え、「非平衡系の理解に資する新しい実験課題」の開拓にも積極的に取り組んでいる。

### 6.9.1 液晶乱流を使った普遍的な非平衡スケーリング則の探求

ある種のネマチック液晶に交流電圧を印加すると電気対流現象が発生し、電圧振幅の大きい場合は、動的散乱状態 (dynamic scattering mode, DSM) と呼ばれる乱流状態が実現する。DSM には DSM1 と DSM2 の二種類があり、後者は液晶配向のトポロジカル欠陥が高密度に存在するという特徴がある。竹内研究室では、これら液晶乱流を活用して、非平衡の普遍的なスケーリング則を探求する様々な実験課題を展開している。

#### 非平衡界面ゆらぎの定常状態普遍法則の検証

ゆらぎを伴うクラスター成長は、しばしば普遍的なスケーリング則が界面ゆらぎに現れる。その最も重要な普遍クラスとして、Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 普遍クラスが知られているが、1次元モデルでは可積分モデルの厳密解が存在し、厳密に解ける非平衡多体問題として注目されている (竹内によるレビュー [3])。液晶乱流実験は KPZ 界面ゆらぎの統計データが高精度で得られ、厳密解の様々な結果を検証し、また新たな実験事実を提示することができる [3, 5, 6, 8, 17, 22, 23, 26, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 38]。

1次元 KPZ クラスの厳密解の顕著な結果の1つが、分布をはじめとする界面ゆらぎの統計法則が、界面形状または初期条件によりいくつかの普遍サブクラスに分類されるということである。確立された普遍サブクラスのうち、円形サブクラスと平面サブクラスはこれまでの竹内らの実験で実証されていたが、定常サブクラスの直接検証は困難であった。我々は、レーザーホログラム技術により、定常状態と類似の性質をもつ初期 DSM2 界面の人工的生成を実現することで、定常 KPZ サブクラスの初めての実験検証に成功した (図 6.9.1)。結果、Baik-Rains 分布をはじめとする統計法則の実験的ロバストさを実証した [8, 17, 30]。

#### Ising 動的スケーリング則の実測、浸透現象との関係

ツイスト配向条件下の液晶系は、捻れの向きに関して反転対称性が (近似的に) あるため、Ising モデルの強磁性相と類似の状態が実験的に実現できる。そこで、電圧印加により DSM2 乱流を生成したうえで、印加電圧を遮断することで、捻れの異なるドメインの秩序化過程を計測した (図 6.9.2)。これは、Hohenberg と Halperin の分類でいう「モデル A」の動的スケーリング理論が想定する状況に対応する。本理論は、動

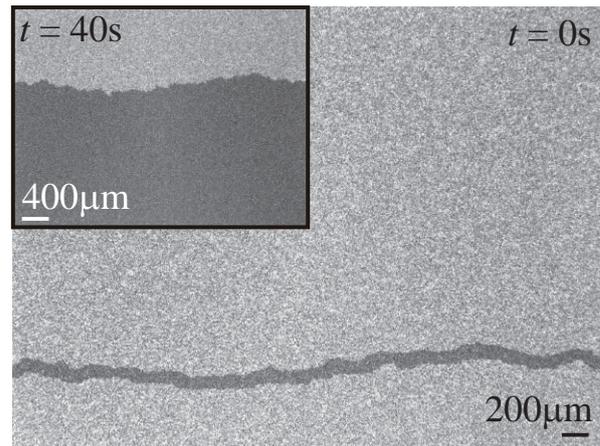


図 6.9.1: レーザーホログラム技術により生成した直後の液晶乱流 DSM2 界面。界面形状が 1次元 Brown 運動の軌跡を描くようデザインされている。挿図は、生成後 40s 経過した後の界面。定常 KPZ サブクラスの普遍法則が検証された [8, 17, 30]。

的指数  $z = 2$  については様々な実験的裏付けがある一方で、相関関数の関数形などは競合理論が十分検証されていない状況にあった。我々の実験は、これら競合理論を節にかける十分な精度を有し、特に時間相関関数については、Ising モデル数値計算と異なる結果が現れるなど非自明な成果を得た。また、近年、秩序化過程と浸透現象の非自明な関係が数值的に報告され、動的スケーリング理論の拡張が提案されているが、我々の実験は、浸透現象の関係を示す統計量の観測に成功し、特に、新たな動的指数  $z_p$  の計測に成功した。これにより、動的スケーリング理論の拡張の必要性が実験からも明らかになったと言える [7, 10, 12, 15, 25, 40]。

### 6.9.2 細菌集団の物理を探る微小流体実験

近年、微小流体デバイスは、細菌や培養細胞などを制御した環境下で定量的に計測するための、標準的な実験技術となっている。標準的な微小流体デバイスは、カバーガラスに PDMS を接着し流路を構成するものであるが、細菌が高密度で存在する場合は培地の枯渇により、広い観察領域で均一な培養環境が実現できない問題があった。そこで我々は、多孔性メンブレンを用いた灌流型の微小流体デバイスに注目し、メンブレンを工夫して、柱などの障害物なしに一辺  $100\mu\text{m}$  程度の広い二次元空間を実現できる新たな微小流体デバイス「広域マイクロ灌流系」を開発した [2, 9, 27, 31, 39]。本系で高密度大腸菌を培養することで、菌集団の増殖や運動状態の様相、菌集団が生み出すパターン形成などを物理学の観点から理解すべく様々な取り組みを行っている [2, 9, 11, 16, 24, 27, 31, 39]。

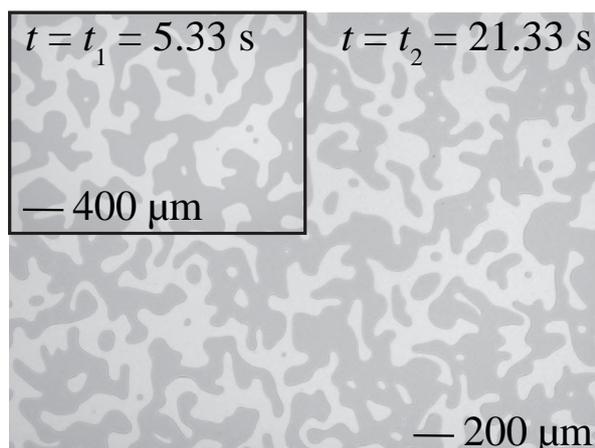


図 6.9.2: ツイスト配向条件下の液晶のドメイン秩序過程 [7, 10, 12, 15, 25, 40]。ドメインサイズは  $l(t) \sim t^{1/2} = t^{1/2}$  に比例して増大し、 $l(t)$  を尺度としてスケール不変性が成立する。メインの写真と挿入写真の時刻は  $t_2 = 4t_1$  の関係にあり、 $l(t_2) = 2l(t_1)$  である。そのため、縮尺を 2 倍変えると、同じようなドメイン構造が確認できる。

#### 中立的な菌集団の競合過程計測

生態系は、多数の個体の相互作用によってマクロなパターンが生み出される点で、生物物理学と統計物理学の魅力的な問題である。我々は、従来の灌流系や、我々が広域化したマイクロ灌流系を用いて、蛍光標識のみが異なる二種の大腸菌株を培養し、中立的な生態系のモデル実験系を構築した。運動性がない菌株どうしの場合、フラクタルな棲み分けパターンが現れることを見出し (図 6.9.3)、その定量的評価を行った [16]。現在はその動的過程の計測に向け、実験手法を改良するとともに、異なる菌集団の競合過程についても予備実験を進めている。

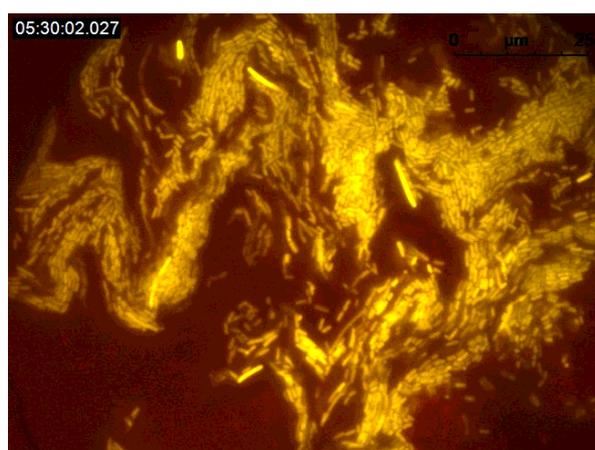


図 6.9.3: 広域マイクロ灌流系における二種類の大腸菌株 (MG1655 株に蛍光タンパク質 EYFP または tdTomato を発現させたもの) の競合過程。フラクタルパターンが出現する。

#### 菌集団競合モデルにおけるレーン形成と voter 統計則

非運動性の中立的菌集団が微小流路内で競合する場合の統計的特徴を予測するため、我々はそのような状況を模した格子モデルを提案し、シミュレーションと理論計算でその統計法則を調査した。結果、菌の増殖のみを考慮したモデルでは、菌集団は自発的にレーン構造を形成し (図 6.9.4)、3 次元チャンネルの 2 次元断面内では、2 次元 voter モデルの普遍的なスケール法則が出現することが判明した。菌の変異や異種間攻撃を考慮した拡張モデルでは、変異や攻撃の頻度に応じて、二集団が混在する混合相や、自発的対称性の破れにより一方の集団が多数派となる一種寡占相が現れる。その間の相転移は非平衡臨界現象を示し、voter 普遍クラスや Ising 普遍クラスの可能性を検証した。以上の数値計算結果は、チャンネルに沿った異方的な平均場近似を適用することで、理論的にも示すことができた [1, 2, 5, 9, 13, 18, 28]。

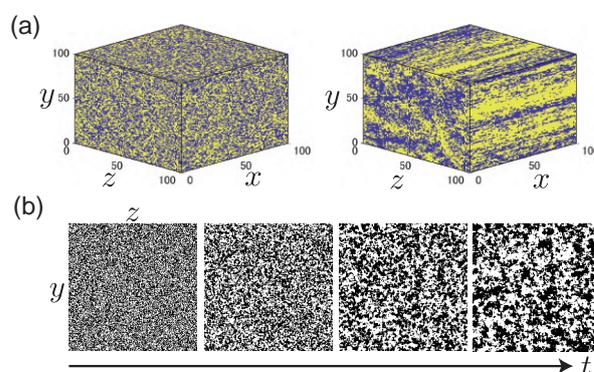


図 6.9.4: チャンネル内の菌集団競合モデルにおけるレーン形成と再編ダイナミクス [1, 2, 5, 9, 13, 18, 28]。(a) 初期に混合していても (左)、時間が経つとレーン構造が現れる (右)。(b) チャンネル断面の時間発展。voter モデルの特徴的な再編過程により、レーンが大きくなっていく。

### 6.9.3 その他の非平衡実験・関連研究

#### 大自由度カオス系の不安定性計測手法の開発

カオスの顕著な特徴の 1 つは初期条件に対する鋭敏な依存性であり、摂動振幅の指数関数的な増大率を表す Lyapunov 指数は、不安定性だけでなく、アトラクター次元や力学系のエントロピーなど、カオスの特徴づける諸量との関係が知られている。実験的には、時系列データの再帰を用いて Lyapunov 指数を測る手法が標準的だが、自由度が増えるとき再帰頻度が指数的に減少するため、大自由度系に使うことは不可能である。そこで我々は、相互作用が単純な系では、局所的な時間発展法則の推定から系全体の発展法則を再構成することに注目し、大域結合系を例に、時系列データから Lyapunov 指数のスペクトルを推定する手法を開発した。本手法の有効性

は、大域結合の写像系や振動子系で数値的に実証し、Lyapunov 指数の推定精度を高める工夫も提案している [4, 14, 19].

#### 周期的せん断下の高密度粒子系の可逆不可逆転移

懸濁液に周期的なせん断をかけると、ひずみの振幅がある閾値を上回ったところで粒子の運動が可逆的なものから不可逆的なものに相転移することが知られており、可逆不可逆転移と呼ばれている。可逆不可逆転移は、従来は粒子数密度の比較的低い領域で調べられていたが、最近ではジャミング点近傍の高密度な粒子系でも同様の相転移が報告され、かつ降伏現象との関係が示唆されていることから、非平衡相転移、レオロジー、ガラス系の物理学が関わりあう興味深い問題として注目されている [21]。我々は、光弾性材料を使った円板形粒子で 2 次元の高密度粒子系を構成することで、周期的せん断化において粒子変位と粒子間相互作用の両方を同時計測できる実験系を製作した。我々の実験系においても、ひずみの振幅をパラメータに可逆不可逆転移が観測され、現在、可逆運動相と不可逆運動相における粒子ネットワークの構造解析等を進めている [20]。

#### <受賞>

- [1] T. Shimaya, Presentation Award for Young Scientists, organizing committee of the international conference on Advances in Physics of Emergent Orders in Fluctuations, Nov. 15, 2018.
- [2] 嶋屋拓朗, 平成 30 年度物理学コース優秀修士論文賞, 東京工業大学理学院物理学系物理学コース, 2019 年 3 月 26 日.

#### <報文>

##### (原著論文)

- [3] K. A. Takeuchi, An appetizer to modern developments on the Kardar-Parisi-Zhang universality class. *Physica A* **504**, 77-105 (2018).
- [4] T. P. Shimizu and K. A. Takeuchi, Measuring Lyapunov exponents of large chaotic systems with global coupling by time series analysis. *Chaos* **28**, 121103 (2018). (fast track article)
- [5] T. Shimaya and K. A. Takeuchi, Lane formation and critical coarsening in a model of bacterial competition. *Phys. Rev. E* (in press).

##### (国内雑誌)

- [6] 竹内一将, 結晶成長と平衡ファセット揺らぎの不思議な関係. *日本結晶成長学会誌* **45**, 45-2-05 (2018).

##### (学位論文)

- [7] R. A. L. Almeida, Universal fluctuations in macroscopic nonequilibrium systems: Experimental investigations on phase-ordering kinetics and interface growth. PhD thesis (Tokyo Tech), 2019.

- [8] 岩塚崇泰, 液晶乱流界面成長における KPZ 定常サブクラスの実験的検証. 修士論文 (東京工業大学), 2019.

- [9] T. Shimaya, Development of experimental systems and numerical study for long-term observation of dense bacterial populations. Master thesis (Tokyo Tech), 2019.

#### <学術講演>

##### (国際会議)

##### 一般講演

- [10] R. A. L. Almeida and K. A. Takeuchi, Universal relaxation in phase-ordering kinetics of liquid crystals quenched from an electrohydrodynamic turbulent state. Advanced Workshop on Nonequilibrium Systems in Physics, Geosciences, and Life Sciences, talk, Trieste (Italy), May 24, 2018.
- [11] T. Shimaya, Y. Furuta, R. Okura, Y. Wakamoto and K. A. Takeuchi, Development of an "extensive micro perfusion system" for observation of glassy behavior in dense bacterial population. Physics of jammed matter, poster, Kyoto (Japan), Oct. 26, 2018.
- [12] R. A. L. Almeida and K. A. Takeuchi, Coarsening & percolation in twisted nematic liquid crystals. LMU-UT Joint Workshop on Statistical and Biological Physics, requested talk, Tokyo (Japan), Oct. 30, 2018.
- [13] K. A. Takeuchi, Turbulent liquid crystal and competing bacteria: possible universal relaxation at criticality. LMU-UT Joint Workshop on Statistical and Biological Physics, requested talk, Tokyo (Japan), Oct. 30, 2018.
- [14] T. P. Shimizu and K. A. Takeuchi, Measuring Lyapunov spectrum of large chaotic systems with global coupling by time series analysis. The 10th Dynamics Days Asia Pacific, poster, Xiamen (China), Nov. 2, 2018.
- [15] R. A. L. Almeida and K. A. Takeuchi, Coarsening, ageing and percolation in twisted nematic liquid crystals. Advances in Physics of Emergent Orders in Fluctuations, poster, Tokyo (Japan), Nov. 14-15, 2018.
- [16] K. Inoue, T. Shimaya, R. Okura, Y. Wakamoto and K. A. Takeuchi, Observation of competition of two *Escherichia coli* strains in a perfusion system. Advances in Physics of Emergent Orders in Fluctuations, poster, Tokyo (Japan), Nov. 14-15, 2018.
- [17] T. Iwatsuka and K. A. Takeuchi, Generation of turbulence with arbitrary shape and application to surface growth experiment. Advances in Physics of Emergent Orders in Fluctuations, poster, Tokyo (Japan), Nov. 14-15, 2018.

- [18] T. Shimaya and K. A. Takeuchi, Critical coarsening in a model of bacterial competition inside a channel. *Advances in Physics of Emergent Orders in Fluctuations*, talk, Tokyo (Japan), Nov. 15, 2018.
- [19] T. P. Shimizu and K. A. Takeuchi, Measuring Lyapunov spectrum of large chaotic systems with global coupling by time series analysis. *Advances in Physics of Emergent Orders in Fluctuations*, poster, Tokyo (Japan), Nov. 14-15, 2018.
- [20] R. Tosaka and K. A. Takeuchi, Reversible-to-irreversible transition in dense granular materials. *Advances in Physics of Emergent Orders in Fluctuations*, poster, Tokyo (Japan), Nov. 14-15, 2018.
- 招待講演
- [21] K. A. Takeuchi, Current status of absorbing-state transitions and connections to reversible-irreversible transitions. *Rheology of disordered particles - suspensions, glassy and granular materials*, invited talk, Kyoto (Japan), June 28, 2018.
- [22] K. A. Takeuchi, Liquid crystal turbulence as a probe to study non-equilibrium scaling laws and back. 27th International Liquid Crystal Conference (ILCC2018), invited talk, Kyoto (Japan), July 26, 2018.
- [23] Y. T. Fukai and K. A. Takeuchi, Universal scaling laws of growth processes and their implications for chaos instability. The 10th Dynamics Days Asia Pacific, invited talk, Xiamen (China), Nov. 2, 2018.
- (国内会議)
- 一般講演
- [24] 古田祐二郎, 嶋屋拓朗, 大倉玲子, 若本祐一, 竹内一将, 高密度バクテリア集団における動的不均一性の解析とその展望. 東京大学物性研究所短期研究会 ガラス転移と関連分野の最先端研究, ポスター, 東京大学物性研究所, 2018年5月11日.
- [25] R. A. L. Almeida and K. A. Takeuchi, Universal phase-ordering kinetics in liquid crystals quenched from an electrohydrodynamic turbulent state. 日本物理学会 2018 秋季大会, 講演, 同志社大学, 2018年9月10日.
- [26] 竹内一将, 液晶トポロジカル欠陥乱流の構造決定と負粘性材料科学の開拓. CREST / さきがけ「トポロジー」領域 平成 30 年度合同キックオフ会議, 依頼講演, KKR ホテル金沢, 2018年12月7日.
- [27] 嶋屋拓朗, 古田祐二郎, 大倉玲子, 若本祐一, 竹内一将, 均一な二次元空間中における細菌集団の長時間観測に向けた広域マイクロ灌流系の開発と展望. 定量生物学の会 第九回年会, ポスター, 大阪大学, 2019年1月13-14日.
- [28] 嶋屋拓朗, 竹内一将, 競合するバクテリア集団モデルのレーン形成と再編ダイナミクス. 定量生物学の会 第九回年会, ポスター, 大阪大学, 2019年1月13-14日.
- [29] 竹内一将, 液晶のトポロジカル欠陥乱流: 非平衡統計力学として, 材料科学として. 日本物理学会 2019 年次大会, 依頼講演, 九州大学, 2019年3月14日.
- [30] 岩塚崇泰, 竹内一将, 液晶乱流界面成長における Kardar-Parisi-Zhang 定常サブクラスの実験的検証. 日本物理学会 2019 年次大会, 講演, 九州大学, 2019年3月14日.
- [31] 嶋屋拓朗, 古田祐二郎, 大倉玲子, 若本祐一, 竹内一将, 均一な二次元空間中における細菌集団の長時間制御観察に向けた広域マイクロ灌流系の開発. 日本物理学会 2019 年次大会, ポスター, 九州大学, 2019年3月17日.
- 招待講演
- [32] K. A. Takeuchi, The KPZ universality class: a glimpse of different physical problems from interface experiments. 日本物理学会 2018 秋季大会, 招待講演, 同志社大学, 2018年9月11日.
- [33] 竹内一将, 液晶のトポロジカル欠陥乱流: 非平衡の普遍的スケーリング則探求の舞台. 新学術領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」第10回トポロジー連携研究会「非平衡系・非エルミート系の新奇量子現象」, 招待講演, 京都大学 基礎物理学研究所, 2018年11月30日.
- (セミナー・集中講義)
- [34] 竹内一将, 非平衡界面ゆらぎの普遍法則 - ありふれた現象から物理と数学の諸分野をめぐる -. 東京大学物理学専攻 コロキウム, 東京大学, 2018年5月11日.
- [35] 竹内一将, 非平衡ゆらぎの Kardar-Parisi-Zhang 普遍クラス - 現代的進展への入門 -. 京都大学 物理学・宇宙物理学専攻 集中講義, 京都大学, 2018年6月13-15日.
- [36] 竹内一将, トポロジカル乱流の相転移と階層構造. 京都大学 物理学・宇宙物理学専攻 談話会, 京都大学, 2018年6月14日.
- [37] 竹内一将, 非平衡相転移入門 - 理論と実験 -. 大阪市立大学 数物系専攻 集中講義, 大阪市立大学, 2018年10月3-5日.
- [38] 竹内一将, 非平衡ゆらぎの KPZ 普遍法則 - これは何か、何が驚きか、どこに行くのか -. 大阪市立大学 数物系専攻 談話会, 大阪市立大学, 2018年10月5日.
- [39] 竹内一将, 高密度菌集団観察のための広域マイクロ灌流系. UBI meeting, 東京大学, 2019年2月22日.
- [40] R. A. L. Almeida and K. A. Takeuchi, Experimental evidence for universal behaviours in nonequilibrium systems: From coarsening & percolation in liquid crystals to the interface growth in polycrystalline films. Institut Lumière Matière - Université Claude Bernard Lyon 1, seminar, Lyon (France), Mar. 19, 2019.

## 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、ショウジョウバエ幼虫の神経系をモデルとし、これらの問題に迫っている。

以前の研究において、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た。現在、研究をさらに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、光遺伝学（オプトジェネティクス）とよばれる光による神経活動操作などを用いて、特定の神経細胞の活動を可視化・操作することにより神経回路の作動原理を探っている。また、2013年以降、米国 Janelia 研究所との共同研究において、コネクトミクス解析（電子顕微鏡画像3次元再構築）を用い、ショウジョウバエ幼虫の運動回路の構造を系統的に決定するプロジェクトを推進している。一方、実験で得られた神経活動や回路構造に関する知見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目標である。

#### 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。しかし、脳神経系がどのようにして様々な神経活動パターンを生成するのかは明らかになっていない。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、機能的な神経回路が構築される仕組みや回路の動的特性の解明を目指している。

中枢神経系尾側末端の局所回路の活動ダイナミクスの解析（劉英涛、能瀬聡直、高坂洋史）

ショウジョウバエ幼虫の典型的な運動であるぜん動運動は、筋収縮が尾端体節から頭端体節へと伝播することで実現する。この観察事実から、尾側体節の収縮を担う中枢神経系の尾側神経分節には、ぜん動運動の生成に関与する局所神経回路が含まれていると考えられる。しかし、尾側神経分節の構造と機能に関する研究はほとんど進んでいない。そこで本研究では、尾側末端の神経回路の解剖学的、および機能的解析を進めることで、ぜん動運動の生起に関与する回路機構の解明を目指す。今年度は、尾端体節において特異的に神経活動を阻害し、運動に与える影響を調べたところ、幼虫の運動速度が低下することを見出した。この観察は、この回路領域に運動生起に関わる神経細胞が含まれることを示唆している。そこで、尾側体節で特異的かつスパースな遺伝子発現を誘導可能なショウジョウバエ系統（Gal4系統）を画像データベースから探索し、数十系統を同定した。これらの系統に緑色のカルシウムイオンブロータンパク質を発現し、同時に全神経細胞に赤色のカルシウムイオンブロータンパク質を発現し、レーザー顕微鏡で2色蛍光可視化を経時的に行うことにより、運動出力の生成に応じた尾側体節の神経細胞の活動パターンを解析した。その結果、前進、および後進のぜん動運動の生成と相関して活動する神経細胞を複数同定できた。この結果は、尾側体節には運動パターンの制御に特殊化した局所神経回路が存在することを示唆する。今後この神経細胞群を詳細に解析することによって、運動制御を担うネットワーク構造の一端を明らかにできると考えている。

シナプス集団の大規模活動イメージングとその統計解析（福益一司、能瀬聡直、高坂洋史）

神経回路は数多くの神経細胞やシナプスから構成され、それらが協調して集団的活動を示すことにより、個体の行動が生成させる。近年のイメージング技術の進歩により多数の神経細胞の活動を同時に計測することが可能となった。しかしながら複雑な集団現象を解析する手法が未発達であるため、運動制御を担う神経回路の詳細なダイナミクスは解明されていない。特に、異なる複数の行動パターンが単一の神経回路によって生成されるメカニズムについては理解が進んでいない。本研究では、複数の運動パターンがどのように中枢神経系内で生成されるのかを明らかにするために、シナプス集団の大規模活動イメージングを行ない、その蛍光変動画像からシナプスレベルでの活動パターン解析を進めた。幼虫がとる前、後方向の二種類のぜん動運動において中枢神経系内でのダイナミクスを比較することで、回路

構造の解明を目指した。多数のシナプスの同時計測のためには当研究室で開発した膜局在型カルシウムプローブを全ニューロンに発現させ、中枢神経系におけるシナプスの蛍光強度変化を観測した。得られた動画データにおいて活動を定量化するためには、各シナプスの画面上での領域を定める必要があるが、細胞体とは異なりシナプスは神経系内に密に格納されているため、形態の観察のみによる分離は困難である。そこで我々は映像内のピクセル間における蛍光強度変化の時間相関に基づき、統計力学的な最適化手法である simulated annealing 法を用いてピクセルをクラスタリングした。これによりシナプスの特徴的な形態と活動を抽出することに成功した。得られた時空間的な神経系の活動データを用いて、前、後方向ぜん動運動それぞれにおけるシナプス活動の時間的順序を解析した。解析の結果、単一の神経節内においてシナプスの活動順序は明確な時間構造を示すことが分かった。各神経節内では、大部分のシナプスはほぼ同時に活動し、他の部分ではその同時活動に続いて徐々に活動が伝播していく様子が観察された。さらに、この傾向は前後両方のぜん動運動において見られたが、その同時活動するシナプス群が双方の間で部分的に一致しないことが分かった。このことから運動制御回路は、各行動に対する共有部分と特化した部分に分解可能であることが示唆された。さらに詳細に回路構造を解析するため、情報理論における transfer entropy に基づき、シナプス間の情報の流れと因果関係をグラフ表現によって可視化した。また、得られたグラフ構造を前、後双方向における共通成分と固有成分に分解し、異なる行動間のダイナミクスの関係を明らかにした。以上の結果から、複数の行動パターンの生成に関して、神経回路内にモジュール構造が存在し、それらの組み合わせの違いによって異なる運動パターンが生成される、という回路描像が示唆された。

### 7.1.2 運動出力ダイナミクスの定量的解析

神経回路の最終的な出力は、筋収縮による動物の体の局所的変形である。多数の筋収縮が協調的に生じることにより、動物の行動が生成される。中枢神経系に凝縮している神経回路に比べて、筋細胞は体全体に配置しているため、運動出力のダイナミクスを、体全体で筋細胞レベルで解析するのは容易ではなかった。そこで、動物運動の筋細胞レベルでの解析を目指して、新しい運動解析の方法を開発している。また、運動出力を生み出す原理を構成的に解明するために、ソフトロボットを開発し、回路による時空間的信号とロボットの体構造変形との関係を解析することで、幼虫運動制御機構の研究を行なっている。

### 筋収縮ダイナミクスの定量手法の解析と種間比較 (張旭、能瀬聡直、高坂洋史)

動物の運動は、身体を構成する可動要素(関節や体節)の協調的なダイナミクスによって実現する。運動パターンの定量的解析において、重心や体軸などの巨視的なパラメータは身体の輪郭から推定できるため研究によく用いられる一方、運動を実際に担っている関節や体節の動きについては、身体の輪郭などの単純な画像データからは解析できない。動物の運動を可動要素から定量的に理解するために、本研究ではショウジョウバエの遺伝学を用いて、身体の特定の部位に蛍光タンパク質を発現させることにより、各体節の動きを定量化する方法を開発した。本年度は、時系列画像データから、各体節の収縮ダイナミクスを効率よく定量化するアルゴリズムを開発した。また、杏林大学の栗崎健博士との共同研究で、広く用いられているモデル動物であるキイロショウジョウバエの近縁種であるオナジショウジョウバエにおいて、蛍光タグによる運動定量化の開発を行ない、この種においても運動の定量化に成功した。今後、この手法を駆使することにより、神経回路の最終出力である運動出力の詳細な定量化を行ない、種分化に伴って運動制御戦略がどのように変化したのかを明らかにする。

### 運動出力生成の構成的解析 (孫喜洋、能瀬聡直、高坂洋史)

動物は神経回路によって筋収縮を制御し、運動を生成する。この運動出力は、筋収縮のみで生み出されるのではなく、実際には身体の弾性、柔らかさなどが重要な要素となる。神経科学においては、神経細胞や筋細胞の時間的活動パターンの解明が詳しくなされてきているが、それらの活動が最終的にどのような身体表面の位置変位という物理量になって現れるのかに関しては、最も重要な過程であるにも関わらず不明な点が多い。なぜなら、神経活動や筋収縮については、生理学的操作によって摂動実験が可能であるのに対し、動物身体の物理特性を実験者が操作することは容易ではないからである。本研究では、神経活動パターンと動物の動きとの関係を明らかにするために、ショウジョウバエ幼虫の身体構造をモデルとしたソフトロボットの開発を行なった。弾性素材を用い、体節をモデル化し、バルブ開閉による気圧制御によって動くソフトロボットを作成した。バルブの制御は Arduino で行なうことで、様々な運動出力パターンの生成が可能になった。一方、この運動出力パターンの生成のために、神経細胞の数理モデルである Wilson Cowan モデルをもとにしてモデル神経回路を構成した。今後は、モデル神経回路とソフトロボットを用いて、運動出力の定量的解析を行うことで、進化の産物であるショウジョウバエ幼虫の効率的な運動パターンを可能にしている物理機構を明らかにすることを目指す。

### 7.1.3 運動神経回路を構成する神経細胞の同定と機能解析

中枢神経回路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。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は、個々の構成要素の機能や特性を理解する必要がある。そこで我々は遺伝学的手法、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と機能解析を進めている。

後退・前進ぜん動運動トリガーニューロンの探索（宮本道人、森瀬周（4年生特別実験）、平本篤紀、曾祥孫澤、高木優、能瀬聡直）

本研究では、ショウジョウバエ幼虫の中枢神経系のニューロンに対し局所神経活動亢進を行う手法を確立し、後退・前進ぜん動運動を引き起こすニューロンを系統的に探ってきた。これまでの研究では、光遺伝学を用いた非侵襲行動実験、局所活動操作、神経活動測定等の手法を用いて、その活動亢進により後退もしくは前進運動の頻度が上がるような細胞群の候補を複数発見した。その後、候補細胞群のなかからまさに後退・前進ぜん動運動の誘発に関わるニューロンを絞り込むことを目指して研究を進めた。このためモザイク解析、Tsh-Gal80 や Cha-Gal80 を用いた発現領域限定などを用いた研究を行った。その結果、7つの細胞群において、候補細胞を数個に絞り込んだ。特にこのうち2つについては候補を1細胞レベルに絞り込み、後進運動の誘導への関与を確認した。さらに、逆にこれらの候補細胞の活動を抑制すると、後退運動の頻度が減少することを見出した。この際、幼虫が忌避する青色光からの逃避行動として誘導される後退を実験に用いた。現在、これらの候補細胞の入出力関係や、運動ニューロンの活動との同期関係を調べており、今後それらをふまえて後退ぜん動運動生成の新たな回路メカニズムを明らかにしたいと考えている。

逃避行動中の筋弛緩を制御する神経回路の同定（平本篤紀、能瀬聡直）

動物の定型的な運動はリズムカルな筋収縮と筋弛緩パターンの繰り返しによって達成される。筋収縮のパターンは中枢パターン生成器（Central Pattern Generator）によって生成されることがわかっている。しかし、筋弛緩がどのようにして制御されているのかについては明らかにされてこなかった。本研究では、ショウジョウバエ幼虫の後退ぜん動運動をモデルとして、運動中の筋弛緩を制御する神経回路の解明を試みた。これまでの研究で、後退ぜん動運動中に特異的に活動するニューロン、Canon を同定した。Canon は腹部神経節の各体節に左右対称に存

在する上行性のニューロンである。その神経伝達特性を調べたところ、アセチルコリン作動性であること、つまり興奮性のニューロンであることがわかった。また、コネクトミクス解析を用いて上流と下流の細胞を同定した。結果として、上流に後退ぜん動運動を惹起するコマンドニューロンが、下流に抑制性の前運動ニューロンがあることがわかった。光感受性陽イオンチャネルを用いて Canon ニューロンの活動亢進を行うと、筋弛緩が引き起こされることがわかった。また、内向き整流性カリウムチャネルを発現させると、後退ぜん動運動時にのみ筋弛緩ができなくなることがわかった。これらの結果により、Canon ニューロンとその下流によって構築される神経回路は後退ぜん動運動中に筋弛緩を制御することがわかった。本研究は、英国セントアンドリュース大学の Stefan Pulver 博士、Julius Jonaitis 氏、米国ハーワードヒューズ医学研究所ジャーネリアリサーチキャンパスの Albert Cardona 博士、Richard Fetter 博士らとの共同研究である。

前進ぜん動運動をトリガーするニューロンの探索（稲葉農介、曾祥孫澤、能瀬聡直）

本研究では幼虫の前進運動に関係があるとされているオクトパミンを神経伝達物質として持つニューロンを標識する Gal4 系統を用いて、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ている。これまでに、光遺伝学を用い、オクトパミン陽性ニューロン群の中に前進運動のトリガーニューロンが存在していることを見出した。また、オプトジェネティクスとモザイク解析とを組み合わせた実験により、Suboesophageal ganglion (SEZ) と呼ばれる領域に存在するオクトパミン陽性ニューロンの関与が示唆された。今後は、モザイク解析をさらに進めることでトリガーニューロンを一細胞レベルで特定し、また、トリガーニューロンについてより詳細な解析を進めることで、その作用機構を明らかにしていく予定である。

### 7.1.4 機能的神経回路の発達機構

自律的に自身を形作り機能を獲得することができるという自己組織能は脳の大きな特徴のひとつである。脳神経系を構成する多数のニューロンはどのようにしてお互いに配線し、機能的な回路を作り上げるのか。この問いに答えるために、長年私たちは個々のニューロンの配線が形成される過程を生体内で可視化し、さらにこの過程を制御する機能分子を同定してきた。現在、これまでの単一ニューロンレベル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るのかを調べている。

### コマンドニューロンの体節特異的な軸索・樹状突起誘導メカニズム (高木優、能瀬聡直)

動物に外部環境からの接触刺激が与えられるとき、その刺激が与えられる体の部位によって異なる行動が惹起される。例えば、ショウジョウバエ幼虫は頭部に接触刺激を受けると後退ぜん動運動によって逃避し、尾部に刺激を受けると前進ぜん動運動によって逃避する。我々はこれまで、接触刺激を担う感覚神経細胞群の下流に位置する2次感覚ニューロンである Wave neuron を同定していた。Wave は腹部の各神経節に存在する相同なニューロンであるが、神経節ごとに異なる機能をもつ。すなわち、頭部の神経節の Wave を活動亢進すると後退ぜん動運動が惹起されるのに対し、尾部の Wave を活動亢進すると前進ぜん動運動が惹起される。さらにこのような機能の体節差に相関して、Wave の形態にも体節差がある。すなわち、頭部の Wave は樹状突起と軸索を胸部神経節にまで投射させているのに対し、尾部の Wave は樹状突起を主に尾端に、軸索を近隣の腹部神経節にそれぞれ投射させていた。このことから、Wave は相同なコマンドニューロンであるにも関わらず、体節によって異なる結合様式を有することで、部位依存的な行動選択を媒介していることが示唆された。この仮説を確かめるため、今回、体節特異的な軸索・樹状突起誘導のメカニズムについて探索し、その行動選択に対する寄与について調べることにした。軸索・樹状突起は、標的細胞が分泌する蛋白質(誘導因子)をニューロンが受容体を介して認識することで正しく誘導され、最終的にはシナプスが形成される。我々は Wave ニューロンの軸索誘導因子として DWnt4 という蛋白質を同定した。DWnt4 は腹部神経節の尾端に局在することが知られており、Wave の尾部方向への軸索投射を誘導する因子として有力な候補といえる。さらに、Wave の体節特異的な軸索投射を誘導する過程において、DWnt4 の受容体候補として知られる DFrizzled2 および DFrizzled4 が作用していることを見出した。興味深いことに、DFrizzled2 をノックダウンした場合は Wave 軸索の尾部方向への投射が延長されるのに対し、DFrizzled4 をノックダウンした場合はその投射が短縮されることがわかった。つまり、DWnt4 という共通の誘導因子を、Wave に発現する2つの受容体が忌避・誘引の対象としてそれぞれ認識し、Wave 軸索の投射パターンを決定していることが示唆された。また DFrizzled4 ノックダウンの条件で単一細胞オプトジェネティクスによって Wave の機能変化を評価したところ、尾部体節の Wave が前進運動のパターンを惹起しづらくなっていることを見出した。以上の結果から、DFrizzled4 は尾部の体節特異的に Wave の軸索伸長に作用することで、前進運動を惹起する回路の構築に貢献している可能性が示唆された。今後は DFrizzled2 および DFrizzled4 を Wave 特異的にノックダウンしたときの行動解析を詳細に行うことで、コマンドニューロンの形態多様化が行動制御に与える影響を評価する予定である。

### 感覚フィードバックによる発生期運動回路の編成とその分子・回路基盤の探索 (曾祥孫澤、能瀬聡直)

動物はまだ子宮や卵の中にいる発生期から自発的な運動を開始する。このような未熟な運動の意義として、出力した運動の結果を自身にフィードバックすることで、適切な機能回路を構築しているのではないかと考えられているが、その仕組みは明らかになっていない。そこで、本研究ではショウジョウバエ幼虫の運動回路形成をモデルとして、体性感覚フィードバックの役割と作用機構を明らかにすることを目的とする。特に、通常体性感覚の入力を受け、運動の生成に関わるような二次ニューロンに着目し、その生理学的性質や回路における機能が体性感覚を欠く変異体においてどのように変化するかをパッチクランプ法や色素カップリングを用いて調べた。その結果、変異体において、1) 二次ニューロンの活動電位が生じない。2) 二次ニューロンの膜静電位が野生型より過分極されている。3) 電気シナプスを介して二次ニューロンと繋がっているカップリング細胞の数が有意に減っている、ことを見いだした。また、二次ニューロンの電気シナプスの構成分子を遺伝的に阻害したところ、体性感覚を欠いた変異体と同様に膜静電位が過分極されている表現型を見いだした。これらの結果から、体性感覚が二次ニューロンの興奮性を調節し、電気結合を介して他の細胞に働きかけることで、運動回路を編成していることが示唆された。今後さらに、1) 二次ニューロンと電気シナプスで繋がっているカップリング細胞を同定する、2) 二次ニューロン及びカップリング細胞の興奮性を制御するイオンチャンネルを同定し、それに対する体性感覚の影響を明らかにする、等の研究を進めることで、体性感覚がどのような分子・回路メカニズムを介して運動回路の発達を制御するのかを解明したいと考えている。本研究は理化学研究所・脳科学総合研究センターの風間北斗博士、稲田健吾博士との共同研究である。

### 神経回路形成に伴う神経細胞内カルシウム濃度変動の生体内計測と機能解析 (戸松一貴、能瀬聡直、高坂洋史)

本研究では、ショウジョウバエ胚の運動回路を対象とし、回路発達期における神経活動の経時的解析から、神経回路発達過程の解明に取り組んだ。ショウジョウバエ幼虫は定型行動として、「筋収縮が尾部体節から頭部体節に向かって左右対称に協調して伝播するぜん動運動」を行う。この運動を完成された運動として、ショウジョウバエ胚は運動を発達させる。ショウジョウバエ胚において運動発達の初期段階では、「体の中心軸に対して左右非対称かつ非協調的な筋収縮運動」を行う。しかし運動が未熟な時期から完成された時期へとシフトする際に中枢神経系がどのような活動を示すのかは明らかではない。そこで、運動のシフト期間である産卵後16時間胚において、腹部神経節(VNC)の神経活動をカルシウムイメージング法を用いて撮影した。この結果、

VNC の少数の細胞群が頻繁に神経活動を行っていることが分かった。観察した 104 個程度の神経細胞の中で、数十程度の特定の神経細胞のみが活動していたことは、これらの細胞の活動が神経回路発達に関与していることを示唆する。その可能性を追求するために、高頻度に活動していた細胞群を遺伝学的に標識する GAL4 系統を同定した (R81F01-GAL4)。この GAL4 系統を用いて上記細胞の機能欠失を引き起こさせた 1 令幼虫において屈曲運動の頻度が減少するという表現型を得た。次にカルシウムシグナルを担うチャンネルタンパク質を同定するために全神経細胞において様々なカルシウムチャンネルの発現を RNA 干渉 (RNAi) によって抑制する探索スクリーニングを行い、cacophony 遺伝子 (*cac*) がコードする電位依存性カルシウムチャンネルの運動回路形成への関与を見出した。同様の機能阻害を R81F01-GAL4 がターゲットする神経細胞群のみで行ったときにも同様の結果が得られた。以上のように、本研究では、神経回路発達の特定の時期に顕著な活性化を示す神経細胞群を見出し、運動発達時におけるカルシウムシグナルの機能を示唆する結果を得た。

#### <受賞>

- [1] 高木優、2018 年度 JNS-SfN Exchange Travel Award、日本神経科学学会、2018.6.1
- [2] 高木優、第 3 回時実利彦記念神経科学優秀博士研究賞、日本神経科学学会、2018.7.26

#### <報文>

##### (原著論文)

- [3] J. Park, S. Kondo, H. Tanimoto, H. Kohsaka, A. Nose. Data-driven analysis of motor activity implicates 5-HT2A neurons in backward locomotion of larval *Drosophila*. *Sci Rep.* 2018 Jul 9;8(1):10307 (2018)

##### (総説)

- [4] 高木優、能瀬聡直、ショウジョウバエ幼虫の行動制御回路、*Clinical Neuroscience* **36**:903-906 (2018)
- [5] 高坂洋史、ショウジョウバエ幼虫を動かす神経回路機構、*比較生理生化学* **35**(2):93-99 (2018)
- [6] S. Takagi and A. Nose. Circuit architecture for somatotopic action selection in Invertebrates, *Neurosci. Res.* **140**:37-42 (2019)

##### (学位論文)

- [7] 高木優: Function and formation of neuronal circuits that regulate divergent action selection (博士論文)
- [8] 戸松一貴: 神経回路形成に伴う神経細胞内  $Ca^{2+}$  濃度変動の生体内計測と機能解析 (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

- [9] A. Nose, X. Zeng, K. Inada and H. Kazama, Regulation of embryonic motor circuit formation by somatosensory feedback, The Joint Research Area Meeting Scientific Research on Innovative Areas. “Artificial Intelligence and Brain Science” and “Adaptive Circuit Shift”, 2018.5.9-11, Okinawa Institute of Science and Technology
  - [10] H. Kohsaka, M.F. Zwart, A. Fushiki, R.D. Fetter, J.W. Truman, A. Cardona, and A. Nose, A modular structure in premotor circuits for bidirectional axial locomotion, *Behavioral Neurogenetics of Drosophila larva*, 2018.10.7-10, the University of Edinburgh, UK
  - [11] X. Zeng, K. Inada, H. Kazama and A. Nose, Proprioceptive experience regulates formation of functional locomotor circuits via transient gap junctions, *Behavioral Neurogenetics of Drosophila Larva*, 2018.10.7-10, the University of Edinburgh, UK
  - [12] S. Takagi and A. Nose, Formation of the neuronal connectivity that regulates divergent action selections in *Drosophila* larvae, SfN – Society for Neuroscience 48th Annual Meeting, 2018.11.3-7, San Diego, USA
  - [13] Y. Liu, A. Nose and H. Kohsaka, Neural activities related to axial locomotion in the terminal segments of *Drosophila* larval CNS, 2019 ASIA-PACIFIC DROSOPHILA NEUROBIOLOGY CONFERENCE, 2019.1.16-20, Institute of Molecular Biology, Academia Sinica, Taiwan
  - [14] X. Zeng, T. Kawasaki, K. Inada, H. Kazama and A. Nose, Proprioceptive Experience and Electrical Transmission Regulate Formation of Functional Locomotor Circuits, 2019 ASIA-PACIFIC DROSOPHILA NEUROBIOLOGY CONFERENCE, 2019.1.16-20, Institute of Molecular Biology, Academia Sinica, Taiwan
- 招待講演
- [15] S. Takagi and A. Nose, Optogenetic and connectome analyses of the neural circuits regulating escape behaviors in *Drosophila* larvae, 第 10 回光操作研究会・第 2 回脳情報動態 合同国際シンポジウム, 2018.7.6, 東京大学鉄門記念講堂
  - [16] H. Kohsaka, Motor circuits in *Drosophila* larvae, Developmental Neurobiology Course 2018, 2018.8.11, Okinawa Institute of Science and Technology
  - [17] X. Zeng, T. Kawasaki, K. Inada, H. Kazama and A. Nose, Embryonic development of the motor circuits in *Drosophila*: emergence of coordinated neural activities and the role of sensory feedback, *Behavioral Neurogenetics of Drosophila Larva*, 2018.10.7-10, the University of Edinburgh, UK

- [18] S. Takagi and A. Nose, Neural circuits regulating divergent escape responses in *Drosophila* larvae: implication for evo-devo of adaptive behaviors, The 41<sup>st</sup> Annual Meeting of the Molecular Biology Society of Japan, 2018.11.30, PACIFICO YOKOHAMA
- [19] A. Nose, Regulation of motor circuit development by proprioceptive feedback, 2019 ASIA-PACIFIC DRORSOPHILA NEUROBIOLOGY CONFERENCE, 2019.1.18, Institute of Molecular Biology, Academia Sinica, Taiwan
- (国内会議)  
一般講演
- [20] H. Kohsaka, R.K. Chhetri, W.C. Lemon, P.J. Keller and A. Nose, Analysis of spontaneous neural activity patterns in the fly embryos, The Joint Research Area Meeting Scientific Research on Innovative Areas. “Artificial Intelligence and Brain Science” and “Adaptive Circuit Shift”, 2018.5.9-11, Okinawa
- [21] S. Takagi and A. Nose, Formation of the neuronal connectivity that regulates divergent action selections in *Drosophila* larvae, 第41回日本神経科学大会, 2018.7.26-29, 神戸コンベンションセンター
- [22] A. Hiramoto, J. Jonaitis, S. Niki, R. Fetter, A. Cardona, S. Pulver and A. Nose, Identification of a neuronal circuit that can elicit backward locomotion in *Drosophila* larvae, 第41回日本神経科学大会, 2018.7.26-29, 神戸コンベンションセンター
- [23] X. Zeng, K. Inada, H. Kazama and A. Nose, Sensory feedback regulates the development of locomotor circuits in *Drosophila* embryos, 第41回日本神経科学大会, 2018.7.26-29, 神戸コンベンションセンター
- [24] Y. Liu, A. Nose and H. Kohsaka, Analysis of neural network by machine learning aided Gal4 line screening and neural activity visualization in the terminal segments of *Drosophila* larval CNS, 第41回日本分子生物学会年会, 2018.11.28-30, PACIFICO YOKOHAMA
- [25] 戸松一貴、能瀬聡直、高坂洋史、運動神経回路発達における神経活動遷移の  $Ca^{2+}$  イメージングによる解析、第40回分子生物学会、2018.11.28-11.30、パシフィコ横浜
- [26] K. Fukumasu, A. Nose and H. Kohsaka, Analysis of populational synapse activity in *Drosophila* nervous system revealed dynamic modules underlying multiple behaviors, SNSS2019, 2019.3.11-13, コーポイン京都
- (講義等)
- [27] 高坂洋史、細胞神経生理学特論、東京薬科大学大学院講義、2018.7.3、東京薬科大学
- [28] H. Kohsaka and D.V. Vactor, Lab course: Ca imaging of fly larvae, Collaborative Experimental Design and Analysis 2018, 2018.8.17, Okinawa Institute of Science and Technology

## 7.2 樋口研究室

### 7.2.1 はじめに

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。個体や細胞の機能は、もとをた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、この溝を埋めるために、まず分子の機能を詳しく理解するために、1分子の力や変位の計測を行い、得られた結果から分子機能をできるだけ仮説を少なくして理解する研究を行った。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細胞の輸送機能や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

### 7.2.2 キネシンの広い負荷領域における振るまい

細胞内の輸送タンパク質であるキネシンは、8nmのステップ幅で微小管上を一方方向に運動する。細胞内では複数のキネシン分子や、ダイニンと呼ばれる微小管上をキネシンとは反対方向に運動する分子と集団となって機能を果たしていると考えられている。集団で物質輸送を行うとき、集団内の分子間で引っ張り合いが生じ、キネシンには前向きや後ろ向きの負荷がかかる。このときかかる負荷の大きさは数10pNに達すると考えられるが、それほど大きな力をかけたときにキネシンがどのような運動するのか、これまでに明らかになっていない。そこで我々は、広い負荷の領域でキネシンがどのように運動するのかを明らかにするために光ピンセットの技術を用いてナノ計測を行った。近赤外レーザーを集光することによって、キネシンが結合した直径200nmのポリスチレン粒子を捕捉して-20pN -45pNの負荷をかけたときの粒子の変位・速度を計測した。粒子へ照射した赤レーザーの暗視野像を四分割ダイオードに投影することで、1nm, 100 $\mu$ sの時空間分解能でキネシンのステップ運動を計測することが可能となった。研究の結果、キネシンの運動速度は力に対して指数関数的に変化することが明らかとなった。-20 -5pNの負荷をかけたとき、キネシンは無負荷のときよりも早く運動し、負荷が大きくなるにつれて速度が減少する。7pNで運動速度が0となり、それよりも大きな負荷では反対方向に運動し始めた。さらに、非常に高い分解能を持つ装置を作製したことで、これまで観察されていなかった1ms以下の高速ステップが見つかった。本研究では、こうした実験結果と矛盾しないキネシンの運動モデルを提案する。本研究で得られた結果は、キネシンが力を受けて物質輸送を行う際の運動を理解するのに非常に有用である。また、提案するモデルはキネシンだけではなくダイニンやミオシンなど輸送を担うナノマシンに共通であ

るかもしれないので、複数の運動タンパク質によって行われ物質輸送を理解するための重要な知見となる。

### 7.2.3 ミオシン頭部の運動の超解像イメージング

これまでの研究から、我々は骨格筋ミオシンの力発生において、分子間の力発生が同調する協同性があることを提唱してきた。しかし、各分子の動態を同時に観測する実験系により、この協同性のメカニズムを直接検証する必要性があった。そこで、骨格筋ミオシン分子が集合したミオシンフィラメント上において、アクチンと相互作用時の各ミオシン分子の動態を直接捉えるために超解像イメージング法を用いた1分子計測法を行ってきた。金ナノ粒子を標識したミオシン2-3分子の散乱像を高速カメラで撮影すると、各分子は回折限界内に位置するためその散乱像は重なって分離することができない。そこで、同研究科物理学専攻 上田正仁研究室で開発された Multi-Emitters Localization 法を用いた。その結果、各分子ごとの変位に分離することに成功し、アクチンと相互作用時の各分子の動態を  $100\mu\text{s}$  の時間分解能で計測することに成功した。各分子はアクチンとの相互作用時において明らかに大きく変位しており、また興味深いことに分子間の動きが時折同調している様子も観察された。しかし金ナノ粒子同士が近づいた場合、その散乱像が互いに干渉し合う可能性があるため、レーザー照明方法や解析方法の工夫が必要である可能性がわかってきた。

### 7.2.4 心筋ミオシンにみられる逆方向運動

心筋ミオシンの力学的性質が心臓の機能にどのように結びついているのかを調べるために、心筋ミオシン多分子の力学特性を光ピンセットを用いて計測した。その結果、心筋ミオシンはアクチンフィラメントをステップ状に変位させていることが判明した。ステップの特徴として、前向きステップと逆向きのステップの数の比として定義される stepping ratio を解析したところ、stepping ratio は ATP 濃度が減少するに従い上昇している傾向が見られた。骨格筋ミオシンと比較すると、心筋ミオシンの stepping ratio は低負荷では骨格筋より低く、高負荷では高い特徴があった。この結果は、心筋ミオシンは骨格筋ミオシンに比べて低負荷で逆向きのステップを生じやすい一方、大きな力を発生できることが判明した。この力学特性の分子メカニズムを知るために、シミュレーションを行った結果、心筋ミオシンが ADP 結合状態でリバースストロークを頻繁に起こすことが多分子の力学特性にキーポイントであることが示唆された。シミュレーションで示唆されたリバースストロークを心筋ミオシンが本当に起こすのか調べるために、心筋ミオシンの1分子実験を行った。1分子実験の結果、アクチンは3つの位置を行ったり来たりする現象が観測された。この結果は、心筋ミオシンは3つの安定状態を持ち、その安定状態間を双

方向に遷移できることが意味する。即ち、心筋ミオシンのリバースストロークを直接観測したことに成功した。リバースストロークの生理学的意味を調べるために、等尺性収縮を起こしている、心筋のサルコメア内のミオシンの動態をシミュレーションしたところ、1秒間当たりの ATP 消費量がリバースストロークできないミオシンに比べ、2倍低いことが判明した。この結果は心筋ミオシンは“エコなモーター”であり、心臓内のエネルギーが枯渇しないための仕組みが力の発生源である、ミオシンにも備わっていることを意味している。

### 7.2.5 鞭毛屈曲運動の分子メカニズム

真核生物の精子は、細長い鞭毛を持ち屈曲運動によって遊泳を行う。鞭毛の周期的な屈曲運動は、軸糸を構成する9本のダブルレット微小管上に並んだダイニン集団が、隣接するダブルレット微小管との間に起こす滑りを原動力とし、その滑りが9本の微小管間で協調した時空間制御を受けることによって引き起こされると考えられる。凍結した精子鞭毛を用いた研究で、通常は鞭毛内で活性化状態にあるダイニンが局所的に不活性化状態に切り替えられることで鞭毛の屈曲が形成される可能性が示唆された。しかし、滑りの活性化状態と不活性化状態が実際に遊泳している鞭毛内でどのような分布変化を示すかは明らかにされていない。そこで、ナノメートルスケールでダイニンによる滑り運動を解析し、ダイニンの活性変化のメカニズムを明らかにすることを目指した。そのために、短い1本のダブルレット微小管をガラスに固定し、ダブルレット微小管上のダイニンと、ビーズを結合させた重合微小管を相互作用させ、光ピンセットを用いて力測定を行うことを計画した。方法として、まず、ダブルレット微小管を得るために、ウニ精子鞭毛からその基本構造である軸糸を精製した。軸糸をタンパク質分解酵素で処理後に ATP を与えることで、ダブルレット微小管を滑り出させた。これまでに、力測定の最初の段階として、ビーズを結合させた重合微小管を光ピンセットで捕捉し、束状のダブルレット微小管上の軸糸ダイニンに相互作用させた。ビーズ位置をナノメートル・ピコニュートン精度で検出することにより、重合微小管の動きやダイニンによる力を測定した。その結果、ダブルレット微小管の束と重合微小管を直交させた場合、振動的な運動(振幅  $10\text{-}15\text{ nm}$ 、力の大きさ  $10\text{-}15\text{ pN}$ 、振動数約  $80\text{ Hz}$ )が観察された。このことは、鞭毛に近い高次の構造中でもダイニン分子が振動する特性を保存していることを示唆する。また、ダブルレット微小管の束に対して、重合微小管を並行に添わせて多数のダイニン分子が重合微小管に相互作用しうる条件では、平均約  $8\text{ pN}$  の力が測定された。このことは、ほとんどのダイニン分子の力の発生は同時に起こらない可能性や、ほとんどのダイニン分子は inactive な状態である可能性などを示唆する。今後は、短い1本のダブルレット微小管上のダイニンに微小管を相互作用させ、力を測定することによりダイニン分子集団の協調的な振る舞いを調べる予定である。

### 7.2.6 細胞集団にみられる運動様式

紡錘状細胞の集団運動は、マウスの嗅球発生過程や上皮間葉転換後の癌細胞浸潤に現れる。しかしこうした細胞の集団運動は多数の運動様式や細胞接着が絡み合って生じる現象であるため、その理解は定性的なものにとどまっており、その定量的な理解のためにまず粗視化されたモデルを構築することが重要である。こうした背景から、紡錘状の細胞であるマウス神経幹細胞が2次元集団培養下で示す、ネマチックに向きを揃えた集団運動の研究を行っている。紡錘状細胞のように細長く、自発的に運動する物体の集団運動を想定する力学モデルにおいては、しばしばその2回転対称性を用いた空間の粗視化が行われる。この対称性からは、こうした物体の集団ではその向きの空間的な歪みにカップルした力発生が行われることが導かれるが、昨年度までの研究で牽引力顕微鏡を用い、神経幹細胞系で同様の力の実測に成功している。今年度はこれに加え、微細加工技術を用いて特定の形状をした領域内のみ神経幹細胞を接着させる実験を行い、特に領域の境界において鏡像反対称な細胞集団運動が見られることを確認した。さらに、生物個体スケールでの左右非対称性の発生への関与が示唆されている細胞間接着分子の発現も確認されたことから、当該分子の集団運動に対する影響を調べるために、神経幹細胞におけるその機能または発現を阻害する実験を計画し、現在進行中である。

#### <報文>

##### (原著論文)

- [1] Seohyun Lee, Hyuno Kim, Masatoshi Ishikawa, and Hideo Higuchi. 3D Nanoscale Tracking Data Analysis for Intracellular Organelle Movement using Machine Learning Approach. International conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (IEEE -ICAIIIC) (2019.2)
- [2] K. Sasaki, M. Kaya, and H. Higuchi. A unified walking model for dimeric motor proteins Biophys. J.115, 1-12 (2018.11)
- [3] Yoshimi Kinoshita<sup>1</sup>, Taketoshi Kambara<sup>1</sup>, 2, Kaori Nishikawa<sup>1</sup>, Motoshi Kaya<sup>1</sup> and Hideo Higuchi<sup>1\*</sup>. Step Sizes and Rate Constants of Single-headed Cytoplasmic Dynein Measured with Optical Tweezers. Sci. Rep. 16333 (2018.11)
- [4] Seohyun Lee, Hyuno Kim, Hideo Higuchi. Numerical method for vesicle movement analysis in a complex cytoskeleton network. Opt. Express 26, 16236-16239 (2018)

##### (著書, 総説, 解説)

- [5] H. Higuchi and C. Shingyoji. Measuring the Motile Properties of Single Dynein Molecules. Chapter 5 In Handbook of dynein 2nd. Hirose and Amos eds. Pan Stanford Publishing (2019) In press
- [6] 樋口秀男 数理科学 「ファイマンラチェット-生体分子の運動の理解にむけて-」 633, 34-39 (2018.9)

#### <学術講演>

##### (国際会議)

##### 招待講演

- [7] S. Shintani, T. Washio, Y. Hwang, M. Kaya and H. Higuchi. Molecular mechanism of self-oscillatory contraction of cardiac muscle. Symposium on International Nanomedicine. Ube Yamaguchi (2018.12.6-9)
- [8] Hideo Higuchi, Yuichi Kondo and Kazuo Sasaki. Unified walking model for processive motor proteins and its experimental evidences Joint symposium between UBI and MBI in NUS National university of Singapore. Singapore (2018.4.14-15)
- [9] Yongtae Hwang. Collective behaviors of cardiac myosin molecules for effective cardiac function. LMU-UT Joint Workshop on Statistical and Biological Physics (October 29-30, 2018)

##### 一般講演

- [10] Yongtae Hwang, Takumi Washio, Toshiaki Hisada, Hideo Higuchi and Motoshi Kaya, Reverse stroke of cardiac myosin revealed by single molecule microscopy is essential for heart function. Biophysical Society 63rd Annual Meeting, Baltimore MD, USA (2019.3.4)

##### (国内会議)

##### 一般講演

- [11] Abdellatef Shima A. , 多田隈 尚史, 近藤 雄一, 厳 康敏, 樋口 秀男, 広瀬 恵子, ダイニン・微小管・DNA 折り紙複合体の運動および構造の解析, 第 56 回生物物理学会年会, 岡山 (2018.9.16)
- [12] 近藤 雄一, 佐々木 一夫, 樋口 秀男, 広い負荷領域の測定から明らかになったキネシン 1 分子のステップ運動, 第 56 回生物物理学会年会, 岡山 (2018.9.15)
- [13] 黄 勇太, 樋口 秀男, 茅 元司, 心機能に適した心筋ミオシンの集団的性質, 第 56 回生物物理学会年会, 岡山 (2018.9.15)
- [14] Lee Seohyun, 樋口 秀男 Three-dimensional vesicle motion in complex cytoskeletal network revealed by numerical analysis method, 第 56 回生物物理学会年会, 岡山 (2018.9.15)
- [15] 木下 慶美, 神原 丈敏, 西川 香里, 茅 元司, 樋口 秀男, Step sizes and rate constants of single-headed cytoplasmic dynein, 第 56 回生物物理学会年会, 岡山 (2018.9.16)
- [16] 茅 元司, 蘆田 祐人, 上田 正仁, 樋口 秀男, 回折限界内に位置するミオシン複数分子の動態計測, 第 56 回生物物理学会年会, 岡山 (2018.9.16)
- [17] 藤原 貴史, 真行寺 千佳子, 樋口 秀男, Behavior of polymerized microtubules interacted with dyneins still attached on a doublet microtubule detected by laser tweezers, 第 56 回生物物理学会年会, 岡山 (2018.9.16)

- [18] 上道 雅仁, 川口 喬吾, 佐野 雅己, Traction Force and Dynamics in Orientation Order of Spindle-shaped Cells, 第 56 回生物物理学学会年会, 岡山 (2018.9.16)
- [19] 黄 勇太, 樋口 秀男, 茅 元司, 光ピンセット技術を用いた心筋ミオシン集団の力学的性質, ナノ学会第 16 回大会, 東京大学 (2018.5.10)
- [20] 近藤 雄一, 佐々木 一夫, 樋口 秀男, 広い負荷領域におけるキネシン 1 分子のステップ運動, ナノ学会第 16 回大会, 東京大学 (2018.5.10)

#### <受賞>

- [21] 近藤雄一 「広い負荷領域におけるキネシン 1 分子のステップ運動」ナノ学会 Young best presentation award (2018.5.12)
- [22] Hwang Yongtae Collective behaviors of cardiac myosins for effective cardiac function. 生物物理学会 発表奨励賞 (2018.9.15)

#### <社会活動>

- [23] 樋口秀男 東京大学 「生命現象の普遍性」理学部公開講演会 (東大) 2018.3.28
- [24] 樋口秀男 講義「がんを知り, がんを治す」沼津西高校生約 45 名 (東大) 2018.10.15
- [25] 茅 元司 2019 年第 3 回 KISTEC 理科実験室「きん肉が動く仕組みをさぐる!」小学生 3 年生 ~ 中学 2 年生 37 名 (かながわサイエンスパーク, 溝の口) 2019.2.23

## 7.3 岡田研究室

生命の基本単位は細胞である。細胞は、タンパク質や脂質、核酸など様々な生体分子が密に集まった構造物である。細胞を構成する個々の生体分子については、その構造が Å 解像度で原子模型が作成できる程度に解明され、動態も分子動力学計算などにより物理化学的な理解が進んでいる。しかし、それらが集合することで、細胞という生命現象が如何にして生じるかは全く判っていない。私たちは、細胞の中で生体分子やその集合体がどのような構造をとり、どのような動態を示し、それによってどのような機能が発現されるかを、生きた細胞の中で生体分子を直接見て・測って・操作することを通じて理解したいと考えている。そのために、当研究室では、主に生きた細胞の中を可視光を用いて観察・計測・操作するための技術開発と、これを用いた細胞生物学・生物物理学研究を並行して進めている。

### 7.3.1 ライブセルイメージングのための技術開発

生きた細胞の中での生体分子やその集合体の構造・動態・機能を観察する手法として、光学顕微鏡、特に蛍光顕微鏡法が広く用いられている。しかし、光

は波であるため、光を用いた計測の分解能は回折によって制限される。可視光の波長は 500 nm 程度であるため、光学顕微鏡の分解能の限界は 200 nm 程度である。細胞の中では、タンパク質分子や脂質、核酸など複数種類の分子が集合して形成される大きさ 100 nm 程度の超分子複合体が単位として機能することが少なくないが、その構造や動態を観察するには、光学顕微鏡の分解能の回折限界は大きすぎる。これを克服する手法として超解像蛍光顕微鏡法の開発が進められ、2014 年にはノーベル化学賞が授与された。しかし、生きた細胞内での動態観察に必要な画像取得速度(フレームレート)と空間分解能はトレードオフの関係にある。また、細胞は 3 次元的な構造であるため、焦点面内のみの 2 次元的な観察では不十分であり、3 次元的な計測が望ましいが、光学顕微鏡の光軸方向の分解能は、通常の光学系では、光軸と垂直な焦点面内の分解能より低い。さらに、空間分解能を高くするためには、蛍光分子からの光子数に由来するショットノイズを抑えることが必要であるが、既存の蛍光分子は耐光性が低いため、強い励起光下では短時間で分解してしまい (photobleaching)、生きた細胞での経時的超解像観察の妨げとなっていた。

細胞・組織の 3 次元観察のための光学顕微鏡として、ライトシート顕微鏡が注目されている。従来の蛍光顕微鏡では、励起光の照明光学系と観察用の光学系が同一の光軸上に配置されているために、光軸方向の分解能が焦点面内の分解能より低い。また、励起光は焦点面のみに限局するのではなく、試料全体を照らすため、観察している焦点面以外に存在する蛍光分子で photobleaching が生じてしまう。ライトシート顕微鏡では、照明系と観察系の光路を直交させ、試料を横から照らすことでこの問題を解決する。すなわち、薄いシート状に絞った励起光で観察系の焦点面のみを照明する。これにより、光軸方向の分解能を改善するとともに、観察面以外での photobleaching を防ぐことが出来る。

私たちは、台湾の中国科学院の Bi-Chang Chen らとの共同研究で、ライトシート顕微鏡を用いた超解像顕微鏡観察に成功した (図 7.3.1)[8]。これにより、1mm 角程度の試料を 50nm の分解能で観察することが原理的には可能となった。しかし、蛍光分子局在化法に基づく超解像顕微鏡法であるため、視野内の蛍光分子の座標を個別に計測する (single-emitter fitting) が必要であり、大きな試料を高分解能で観察するには数日単位の時間を要する計算となる。この問題を解決するためには、蛍光分子局在化法を改良して、視野内で蛍光分子の像が互いに重なっている状態でも、各蛍光分子の位置をすべて推定することが出来るアルゴリズム (多重局在化法 multi-emitter fitting) が必要となる。しかし、これまで提案されているベイズ推定など様々な多重局在化法アルゴリズムは、いずれも計算量が膨大で、現実的な計算時間では大きな試料に適用することが出来ない。そこで、私たちは、簡便な計算で高速に、しかも既存の多重局在化法より高精度なアルゴリズム WTM(wedged-template matching) 法を開発した [1]。

これらと平行して、photobleaching が起こりにくい蛍光色素の開発も進めている。Photobleaching が主に蛍光分子の励起三重項状態 (T1) と酸素の反応

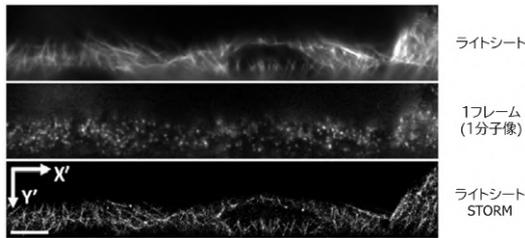


図 7.3.1: ライトシート超解像顕微鏡像。上から順に、通常のライトシート顕微鏡像、1分子像、1分子像から再構成した超解像画像。

によって起こることから、HOMO のエネルギー準位が低い蛍光分子では photobleaching が起こりにくいと期待される。広く用いられている蛍光分子であるフルオロセインやローダミンの環内酸素を電子求引性の高い原子 (団) に置換することで HOMO のエネルギー準位を引き下げることが出来ると考えられる。そこで私たちは、名古屋大学の山口先生、多喜先生との共同研究により、フルオロセインやローダミンの環内酸素をフォスフィンオキシドに置換した新規蛍光色素の超解像顕微鏡への応用を進めている。ローダミンの環内酸素をフォスフィンオキシドに置換した phospho-rhodamine は、既存の蛍光色素に比べて 5 倍以上 photobleaching しにくく、長時間の 1 分子イメージングが可能であることが実証された (図 7.3.2)[3]。

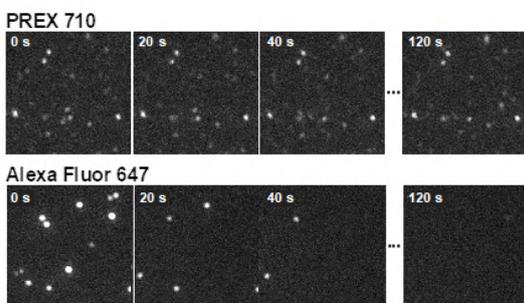


図 7.3.2: 1 分子イメージングにおける photobleaching の比較。既存の蛍光色素 Alexa Fluor 647 が数十秒以内に褪色してしまうのに対して、新規蛍光色素 PREX 710 は 120 秒以上褪色しない。

### 7.3.2 神経細胞軸索輸送の解析

神経細胞は、他の細胞からの信号の入力を受ける多数の枝分かれした樹状突起と、次の細胞に信号を出力する一本の長い軸索という 2 種類の突起を持つ。神経細胞自体の大きさは 0.1 mm 程度、樹状突起の長

さは 1~10 mm 程度であるのに対して、軸索は 0.1~1 m にも達する。軸索に必要なタンパク質などは、細胞体で合成され、モータータンパク質キネシンなどによって軸索内を輸送されてくる。この輸送系を軸索輸送と呼ぶ。軸索輸送は、神経細胞の生存や機能に必須であり、その異常は様々な神経変性疾患を引き起こす。このような医学的側面からの研究に加えて、細胞内で分子機械が力学的仕事をする系であることから、生物物理学の格好の対象として研究が進められてきた。

私たちはこれまで、一つの神経細胞内にも異なるキネシンが 20 種類以上存在していて、異なる運動特性を持っていることを明らかにしてきた。丁度、我々の社会で輸送を担う自動車が軽自動車からトラックまで様々な種類があるのと全く同様である。さらに、その一つである KIF1A というキネシンについて、ブラウン運動を整流することで一方向性に運動する Brownian ratchet 機構で運動することを示してきた。しかし、こうしてキネシン分子の運動機構が明らかになっても、神経細胞の中での機能の理解には至っていない。

たとえば、神経細胞の突起のうち、軸索は 1 本だけである。キネシンが運動するときの道路に相当する細胞内構造は微小管というタンパク質重合体であるが、細胞内には微小管が大量に存在し、その多くは樹状突起へと伸びている。軸索へと伸びる微小管は、全体の 3% 程度であると見積もられる。では、軸索へ軸索のタンパク質を輸送するキネシンは、どうやって軸索へ伸びる微小管を正しく見つけることができるのだろうか？

また、軸索輸送では直径 100 nm 程度の小胞が速度 1000 nm/s 以上の速度で輸送されている。タンパク質の大きさは 10 nm 程度であるが、これを人間の身長程度 (~1 m) に拡大して考えると、小胞の大きさは 10 m、輸送速度は 100 m/s=360 km/hr 以上という計算になる。一方、細胞内は、タンパク質分子が満員電車並みに密集した混雑状態であるため、満員電車の中を気球を背負って新幹線のように走り抜けるという状況になり、極めて非直感的な状況であることが判る。にもかかわらず、キネシンは、混雑環境である軸索内を動く方が、非混雑環境の *in vitro* より速く動く。このことは、キネシンが最初に発見された 30 年以上前から指摘されていたパラドックスであるが、未だに解決されていない。

私たちは、超解像顕微鏡や一分子イメージングなどの最先端イメージング技術を用いて、これらの問題にアプローチしてきた。

#### キネシンによる微小管の共同的構造変化

神経細胞の発生過程でのキネシンの輸送を解析すると、軸索にキネシンが輸送を行うのではなく、キネシンによる輸送が軸索を決定していることが示唆される。発生初期の神経細胞では、球状の細胞から多数の突起が伸び、そのうちの 1 本が軸索に分化して長く伸びる。この過程で、軸索分化前の段階では、キネシンによる輸送が多数ある突起のどれか一つに

集中して、その突起が伸長する。そして、1時間程度の周期で別の突起へと確率的にスイッチしていく。こうしてある突起の長さが閾値(約 100  $\mu\text{m}$ )を超えると、キネシンによる輸送はその突起に固定されて、急速な突起伸長が起こって軸索へと分化する。突起の長さを切断あるいは物理的な伸展によって変化させた実験から、突起の長さが閾値を超えることが軸索分化を決定すると考えられ、キネシンによる輸送が確率的にスイッチしながら突起を一本ずつ伸長させる機構の生物学的な意義が示唆される。

この機構を解明するため、私たちは、突起のない非神経細胞に蛍光標識したキネシンを少量(細胞内での濃度が 1 nM 程度)導入し、その動態を一分子レベルで観察した。その結果、細胞内にある数千~数万本の微小管のうち、数本の微小管のみが選択的に利用されることに気がついた。さらに、長時間観察すると、1時間程度の周期でキネシンは別の微小管へとスイッチしていく。このことは、キネシンによる輸送が特定の微小管に集中すること、それが1時間程度の周期で確率的にスイッチしうること、さらにこの現象が神経細胞に特異的ではないこと、を意味している。

そこで、この現象の分子機構を解析するために、蛍光一分子イメージング、第2高調波偏光イメージングなどの光学顕微鏡技術とX線線維回折、クライオ電子顕微鏡を組み合わせることで、キネシンの結合による微小管の構造変化を溶液中で計測する手法を開発した[6]。その結果、キネシンの結合により微小管を構成するチューブリン分子が約  $1^\circ$  回転し、この回転によってチューブリン分子の間隔が約 1 Å 伸びることが示された(図 7.3.3)。この構造変化は、キネシンが結合したチューブリン分子だけではなく、微小管毎に全てのチューブリン分子が協同的に構造変化していた。チューブリン分子は微小管の表面に2次元的な格子状に並んでいるため、キネシン分子が結合したチューブリン分子の構造変化が、周囲のチューブリン分子にも影響を与えるためだと考えられる。

こうして構造変化した微小管にはキネシンが結合しやすくなることから、キネシンが特定の微小管に集中すること、確率的にスイッチすることが以下のように説明できる。微小管が多数存在する状況で少数のキネシンを加えると、最初にキネシンが結合した微小管に他のキネシンが結合しやすくなり、その微小管にキネシンが集中して他の微小管にはキネシンが結合しない状況が生じる。一方、キネシンの結合で構造変化した微小管からキネシンが外れると、微小管の構造は数分程度の時定数で元の構造に戻る。従って、キネシンの濃度が低く、微小管上をキネシンが数分間走らない状況が確率的に出現すると、微小管の構造が元に戻って、系がリセットされる。このモデルの妥当性は、数値シミュレーション実験によって検証し、神経細胞での突起間のスイッチングまで説明できることを確認することが出来た。

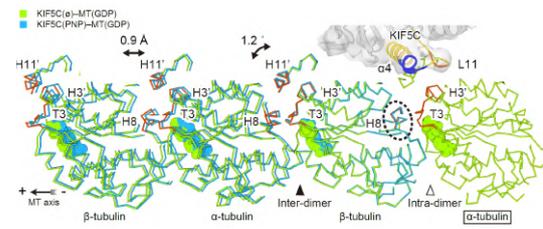


図 7.3.3: キネシンの結合により引き起こされる微小管の共同的構造変化

### 揺らぎの定理による小胞輸送に働く力の非侵襲計測

混雑環境にある細胞質内で運動する小胞には、*in vitro* 実験のような非混雑環境に比べて桁違いに大きな粘性抵抗が働くことが予想される。一方、*in vitro* のモーター分子の計測では、負荷が増えると速度は減少することが確認されている。では、なぜ細胞内では粘性抵抗による負荷が高いにもかかわらず速度が速いのか。この間に答えるには、細胞内で輸送されている小胞に働いている粘性抵抗を実際に計測する必要がある。しかし、細胞内での力学計測は難しい。そこで私たちは、非平衡統計物理学の揺らぎの定理に注目した。平衡系でのブラウン運動で揺らぎ(拡散)と粘性が比例する(アインシュタイン-ストークス関係式)のと同様に、非平衡系においても小胞運動の揺らぎとエネルギー散逸(粘性抵抗  $F$ ) が比例する

$$F = k_B T_{eff} \frac{\log [P(\Delta x)/P(-\Delta x)]}{\Delta x}$$

この関係式により、小胞の動きを高い時間空間分解能で計測することで、その小胞に働く粘性抵抗を求めることが出来る。測定の結果、確かに細胞内で運動する小胞に働く粘性抵抗は、*in vitro* 非混雑環境の1000倍以上の2~4 pNで、混雑環境の影響を強く受けていることが確認された[5, 7]。さらに、小胞に働く粘性抵抗による負荷と小胞の運動速度の関係から、細胞内での分子モーターの負荷-速度関係を解析すると、*in vitro* の負荷-速度関係と同じ関数形で負荷依存性も *in vitro* と細胞内で共通であるが、速度だけが *in vitro* に比べて細胞内で4倍程度になっていることが示唆された。

以上の結果から、細胞内を輸送される小胞が、混雑環境の影響により強い粘性抵抗を受けていること、それにもかかわらず、分子モーターが *in vitro* の4倍もの速度を出していることが示された。では、なぜ細胞内では *in vitro* より運動速度が高いのだろうか。これについて、揺らぎの定理からは、平衡系での熱力学温度に相当する「有効温度」が細胞内で4000Kにも達するという結果が得られており、細胞内混雑環境の非平衡揺らぎが分子モーターの運動速度に影響を与えている可能性を考えており、今後の実験により、この仮説を検証していきたい。

<報文>

(原著論文)

- [1] Takeshima T et al., A multi-emitter fitting algorithm for potential live cell super-resolution imaging over a wide range of molecular densities. *J Microsc.* 271: 266-281. (2018)
- [2] Komatsu N et al., A platform of BRET-FRET hybrid biosensors for optogenetics, chemical screening, and in vivo imaging. *Sci Rep* 8: 8984. (2018)
- [3] Gzrybowski M et al., A highly photostable near-infrared labeling agent based on a phosphorodamine for long-term and deep imaging. *Angew. Chem.* 57:10137-10141 (2018)
- [4] Okamoto K et al., Single cell analysis reveals a biophysical aspect of collective cell-state transition in embryonic stem cell differentiation. *Sci Rep.* 8:11965. (2018)
- [5] Hayashi K et al., Application of the fluctuation theorem for non-invasive force measurement in living neuronal axons. *Mol Biol Cell*, 29:3017-3025. (2018)
- [6] Shima T et al., Kinesin-binding-triggered conformation switching of microtubules contributes to polarized transport. *J Cell Biol.* 217:4164-4183. (2018)
- [7] Hasegawa S et al., Investigation of multiple-dynein transport of melanosomes by non-invasive force measurement using fluctuation unit  $\chi$ . *Sci Rep.* in press (2019).
- [8] Lu CH et al., Towards rapid, large-scale, and three-dimensional super-resolution imaging via light-sheet localization microscopy. *Commun Biol.* in press (2019).

(著書)

- [9] 岡田康志、超解像・一分子イメージングによる分子動態の計測、森泰生、尾藤晴彦編、脳神経化学、第30章、319 - 329、化学同人、2018

&lt;学術講演&gt;

(国際会議)

- [10] Alexandr Y et al., A Method for Automatic Tracking of Cell Nuclei in 2D Epifluorescence Microscopy Image Sequences. Eighth International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA). 2018

招待講演

- [11] Yasushi Okada, Mechanisms of axonal transport investigated by high-speed and high-resolution imaging. 15th Annual German-Japanese Colloquium, Harnack-Haus, Berlin, Germany, 2019年2月8日

- [12] Yasushi Okada, Regulatory mechanisms of axonal transport investigated by single-molecule and super-resolution live imaging. The 66th NIBB Conference/ABiS international symposium. Okazaki Conference Center, 岡崎、2019年2月17日

(国内会議)

招待講演

- [13] 岡田康志「生きた細胞の中で分子を見る」第10回シグナルネットワーク研究会、神戸大・神緑会館、2018年6月29日
- [14] 岡田康志「超解像蛍光ライブイメージングの応用と課題」オリンパスイノベーションフォーラム2018、神戸ポートピアホテル、2018年7月26日
- [15] Yasushi Okada, “Biophysical and quantitative analyses of axonal transport using advanced bioimaging techniques”, 第41回日本神経科学大会シンポジウム、神戸国際展示場、2018年7月27日
- [16] 岡田康志「四次元イメージング」、第29回細胞生物学ワークショップ、情報通信研究機構未来ICT研究所、2018年8月10日
- [17] Yasushi Okada, “Conformational switching of microtubules as the basis for the polarized intracellular transport”, 日本生物物理学会第56回年会シンポジウム「細胞の形態形成を制御する自己組織化メカニズム」、岡山大学、2018年9月16日
- [18] 岡田康志「超解像蛍光顕微鏡の課題とその克服のための技術開発」第8回JASRIワークショップ、JASRI、2018年9月18日
- [19] 岡田康志「キネシンの結合による微小管の動的構造変化」、大阪大学蛋白質研究所セミナー「構造生物学と計算科学の融合による動的構造生物学の新しい展開」、大阪大学蛋白質研究所、2018年9月27日
- [20] 岡田康志「高速超解像・一分子イメージングによる生細胞内動態計測」、第2回定量研シンポジウム「生命を支える生体超分子の可視化と動態」、東大弥生講堂一条ホール、2018年10月29日
- [21] 岡田康志「共焦点顕微鏡の光学系を応用した超解像顕微鏡の原理と細胞生物学への応用」、東京大学 Zeiss コラボレーションセンター開所記念セミナー、東京大学薬学部、2018年11月15日
- [22] 岡田康志「超解像イメージングによる一細胞エピゲノム解析」、第6回RAPシンポジウム、理研鈴木ホール、2018年11月19日
- [23] 岡田康志「超解像顕微鏡でみえないものをみる」Zeiss Science Abend 2018、横浜ロイヤルパークホテル、2018年11月28日
- [24] 岡田康志「Toward single cell epigenome analysis by live cell super-resolution imaging.」、第41回日本分子生物学会ワークショップ、パシフィコ横浜、2018年11月29日

(セミナー)

- [25] 岡田康志「超解像ライブセルイメージングによる一細胞エピゲノム解析」国立がん研究センターCRESTセミナー、国立がん研究センター、2019年1月11日

## 7.4 古澤研究室

生物システムは、様々な環境変化や内部状態の揺らぎの下で機能し続けられる頑強性（ロバストネス）を持つ一方で、環境変化などに対して柔軟に内部状態を変化させる可塑性を持つ。このロバストネスと可塑性が両立できるという性質は、生物システムと人工システムの本質的な違いであるが、どのようにして複雑な化学反応のネットワークがその両立を可能とするか、そのメカニズムの理解は進んでいない。一方で、大規模な生物実験データが取得できるようになり、そうしたデータに基づいてシステムの状態遷移やそのロバストネスを議論できるようになりつつある。我々の研究室では、分子から生態系といった様々な階層における生物システムの振る舞いに関して、その状態のロバストネスと可塑性がどのような性質を持つか、理論研究と実験研究の双方からの理解を目指している。

### 7.4.1 マクロレベルの細胞状態論の構築

適応や進化の過程における細胞の状態遷移は、任意の方向に生じ得るのではなく、その変化には制約と方向性が存在する。こうした細胞状態遷移の制約がどのように出現するかを理解し、それを記述する適切な理論体系、特にマクロ状態論による細胞状態遷移論の構築を目指している。これまでに、定常的に増殖する細胞系では、環境変動を与えたときにすべての構成要素の（対数）変化比が一定となり、かつその傾きが増殖速度変化に比例することを理論的に予測し、細胞シミュレーションと微生物の進化実験によってその予測が成り立つことを示してきた。

この理論的予測は、環境変動が十分に小さいと仮定し、線形応答のみを考慮する解析であったが、実験データを見ると、環境変化により増殖速度が大きく変化ような摂動に対しても成り立つことが見出されている。そこで、この線形応答で記述できる振る舞いがどのような範囲で成り立つかを解析するために、細胞モデルの進化シミュレーションを行った。細胞内のダイナミクスを離散的な化学反応ダイナミクスで表すモデルと、連続量の力学系として表すモデルの双方で、進化過程を経ることにより状態変化が低次元の空間に拘束されることを見出した。これは適応度に関わる表現型は摂動に対して頑健であるため、状態空間の多次元から吸引されること、一方で進化するには変化しやすさが必要となるためその低次元方向でのみ吸引が弱い（固有値が0に近い）という理論を定式化して説明された。この理論により実験とシミュレーションで見出された線形適応関係が説明された。

### 7.4.2 自動培養システムを用いた進化実験

独自に開発したラボオートメーションを用いた進化実験システムを用い、複数環境・複数系列での大腸菌進化実験を行った。これまでに、細胞壁合成や

タンパク質合成などの阻害剤や、酸・アルカリ・重金属など95種類のストレス環境を付与した環境下での植え継ぎ培養による進化実験を完了した。その結果、87種類の環境において耐性能の有意な上昇が見られた。それら進化実験によって得られたストレス耐性株について、マイクロアレイを用いたトランスクリプトーム解析と、超並列シーケンサを用いたゲノム変異解析を行った。さらに、一つのストレス環境への耐性獲得が、他のストレス環境への耐性をどのように変化させるかを、約2000通りの環境ペアについて定量した。

こうして得られた定量データから、表現型と遺伝子型がどのような変化を示すかを解析した。結果として、様々な異なる選択圧によって得られた耐性株が、同じ表現型・遺伝子型を示す例が多く見出された。この結果は、大腸菌がとり得る状態が比較的少数の安定状態に限定されることを示唆している。また、あるストレスAを添加した環境での進化実験で得られたストレスAに対する耐性株と比較して、異なるストレスBの下で得られた耐性株の方が、ストレスAに対する高い耐性を持つ例が多く見出された。この現象が生じるメカニズムは明らかではないが、この結果は適応度地形が複雑な構造を持つことを示唆している。

### 7.4.3 フェイズフィールドモデルによるアメーバ細胞のマクロピノサイトーシス動態の解析

細胞は時にトポロジーが変化するほどの大変形を示す。その一例がマクロピノサイトーシスという、アクチン依存的なエンドサイトーシスの一種である。この現象では、細胞膜が盛り上がりカップ状の構造を形成、細胞膜が3次元的に陥入し、細胞外溶液を非特異的に取り込むというダイナミックな変形を示す。マクロファージや細胞性粘菌、樹状細胞などでは、自発的・継続的に起こり続け、細胞外溶液からの栄養の取り込みに用いられている。他にも免疫細胞の外部環境のセンシングや細胞膜のターンオーバー制御などに用いられ、生物にとって重要なプロセスである。近年、細胞性粘菌のマクロピノサイトーシスの背後にアクチン重合に関連する分子の局在現象が存在することが示唆されている。分子の局在は反応拡散方程式で理解できるが、マクロピノサイトーシスの場合はさらに膜の変形が密接に関わってくる。すなわちマクロピノサイトーシスを理解するためには、単なる反応拡散現象以上の、膜の変形と膜上の反応拡散方程式が織りなす新奇の自己組織化現象を理解する必要があり、非線形物理学としても新しい枠組みを開発する必要がある。

本研究ではフェイズフィールド法を応用し、細胞膜の変形と細胞膜上の化学物質の反応拡散を同時に扱う手法を開発した。開発した手法と細胞膜上の生化学反応の反応拡散方程式を組み合わせることによりマクロピノサイトーシス様の動態をシミュレートすることに成功した。興味深いことに、自発曲率を

持つ分子の集合などを仮定することなしに、反応拡散による自己組織化とアクチン重合による膜変形のみからこのような大変形が起こる。この現象は「膜の変形と膜上の分子の反応拡散が織りなす新しい自己組織化現象」の良い例となっている。

#### 7.4.4 代謝物漏出による細胞成長率の促進

微生物の作る生態系は非常に高い多様性を示し、時には1つのニッチ（供給される栄養素など）しかない場合でも多種の微生物種が共存できる。近年様々な観察・実験から、代謝物の漏洩を介した栄養共生（cross-feeding: 細胞がある代謝物を漏らすと同時に、他の細胞から漏らされた別の代謝物を利用する現象）が複雑な生態系の形成に重要なのではと、盛んに議論されてきた。しかしそもそもなぜ細胞が代謝物を外に分泌するかはよくわかっていない。不必要な老廃物を排出するのなら道理だが、時には細胞は成長に必須であるはずの代謝物さえも分泌する。

本研究では、細胞内部の触媒反応と必須成分の漏出を考慮した数理モデルを用い、必須代謝物の漏出が成長を促進しうることを発見し、漏出と成長率変化を関係付ける方程式を導出した。この漏出による成長率促進は他の細胞が存在しない孤立環境でも実現し、また驚くことに栄養供給が少ない状況でも起こる。さらに興味深いことに複数種の細胞が存在する場合、各々の細胞が競い合うように代謝成分を漏出し合い、単一栄養下でも多種共生が実現されるということを数値計算により示した。この研究により、細胞はそもそもなぜ必須代謝物を漏らすのかに答えることができ、また漏出が“得”になるための条件なども議論することができる。

#### 7.4.5 微生物生態系の進化シミュレーションを用いた多種共存条件の探索

大腸菌の長期進化実験の解析から、単一の遺伝子型・表現型を持つ細胞集団を起源としつつも、異なる表現型を持つ微生物からなる生態系が出現し、それが安定に維持され得ることが見出されている。一方で、このような微生物生態系がどのような相互作用の結果として出現するかは明らかになっていない。そこで代謝ネットワークを持つ細胞が相互作用する生態系モデルを用い、その進化シミュレーションを行うことにより、多種共存の条件を探索した。結果として、細胞からの代謝物質の漏洩や細胞の飢餓死滅などを通じて環境に栄養源が供給され、それぞれの栄養摂取に適応した微生物種が出現することが確認された。また、細胞の死滅率といったパラメータに応じ、複数種が共存する生態系が相転移的に出現することが見出され、特に環境中のアミノ酸を介した相互作用についてはその共存条件を明らかにした。これらの結果から、実験的に観察されている多種共存や飢餓環境における細胞数維持に関し、飢餓死滅などによる栄養供給の重要性が示唆された。

#### 7.4.6 ヒト ES 細胞における遺伝子発現制御ネットワークの推定

胚性幹細胞 (ES 細胞) は、自己増殖能と様々な細胞への分化能の双方を持つ細胞であり、再生医療などへの応用が期待されている。一方で、その分化ダイナミクスを規定する遺伝子発現制御ネットワークにはまだ不明な点が多く残されている。本研究は、様々な制御遺伝子を強制的に発現させ、その遺伝子発現プロファイルの変化を系統的に定量したデータを用い、遺伝子間の制御関係を大規模に推定する数理モデルを構築した。結果として、ES 細胞から神経系への分化に関わる遺伝子の制御関係が推定され、そこでハブの役割を担う遺伝子の存在が示唆された。また、神経分化の経路が複数存在することが示唆された。

#### 7.4.7 機械学習によるマウス糞便画像からの腸内細菌叢の推定

腸内細菌叢の複雑な生態系は、免疫系や代謝系など宿主の様々な状態に影響を与えることが明らかとなっており、その状態を解析することは健康維持や医療へ向けて重要な意味を持つ。腸内細菌叢の状態は、メタゲノム解析などの手法によって解析することが可能であるが、実験操作は複雑かつ高いコストであり、簡便な解析手法が望まれている。そこで本研究では、マウス糞便から得られた細菌集団のグラム染色像から、Convolution Neural Network を用いて腸内細菌叢の状態を推定する手法を開発した。具体的には、薬物の投与などにより腸内細菌叢の状態に摂動を与え、その糞便画像から腸内細菌叢がどのように応答したかを推定した。また、同じサンプルから得られたメタゲノム解析の結果が、糞便の画像から定量的に予測可能であることを示した。これらの結果は、腸内細菌叢の複雑な生態系を解析する新たな手法を提供し、かつ医学的な応用が期待できる。

#### 7.4.8 深層学習を用いた、細胞形状を記述する特徴量の抽出

生体内において、時に細胞はダイナミックに変形する。糸状仮足、葉状仮足などの突起構造や食・飲作用といった膜陥入構造が細胞の局所に出現する。これらの変形は組織形成や免疫、ガン浸潤などと密接に関連しており、生体機能を理解するために非常に重要な問題であると言える。細胞変形の背後にある分子実態は解明されつつあるが、それらの分子がどう協同的に働き細胞運動を引き起こしているかというダイナミクスの解明には至っていない。また一見ランダムに出現する特徴的な局所構造になんらかの規則性が存在するかどうかなども未解明である。これまで変形の規則性を解明しようと様々な試みがなされたが、細胞の形状や変形を定量的に記述できないという困難により限定的な解析に止まっていた。

本研究では、細胞変形を定量化できる特徴量が存在するか、その特徴量をどのように抽出するのか、特徴量空間で見たときに1細胞の変形と形状の法則を見出すことが可能なのか、などに注目し、オートエンコーダを用いた特徴量抽出を行った。Keratocyte、HL60 や細胞性粘菌の二次元画像データを入力とし、変分オートエンコーダを用いた次元圧縮を行ったところ各細胞の変形が低次元の特徴量空間で記述できることを確認している。すなわち一見複雑な細胞変形は少数の特徴量だけで表現できることを意味し、細胞変形法則の解明につながる可能性もある。この解析を3次元データにも拡張する予定である。

#### 7.4.9 遺伝子発現量のゆらぎと環境応答量の量的関係の解析

遺伝子の発現量は、外部環境に対応して変化する性質（環境応答性）を有しており、生物の生存・適応において重要な役割を担っている。従って、遺伝子の発現量がどのような法則に従って変化するかを明らかにすることは、こうした生命現象の予測や設計に役立つと期待されている。近年の研究から、遺伝子の発現量は、環境変化に応じて変化するだけでなく、例えば一定の環境であっても生体内分子の少数性や分子運動の不規則性等に起因するノイズによって、ゆらぐことが分かってきた。興味深いことに、遺伝子発現のゆらぎと環境応答量（環境変化に応じた変化量）は無関係ではなく正の相関関係を持つことが示唆されている。しかしながら、先行研究の解析手法では、様々な遺伝子型の発現量データが用いられていたため、環境応答量が正しく算出されなかった。さらに、先行研究は独立の実験条件でえられた発現量データに対する生物情報学的解析のみに基づいており、正の相関を裏付ける適切な検証実験が実施されなかった。本研究では、まず第一の問題を解決するために、データベースから遺伝子型が揃った大腸菌の発現量データのみを用いて適切な解析を行った。その結果、遺伝子発現のゆらぎと環境応答量にやはり正の相関があることが分かった。この解析結果を実証するため、現在は第二の問題解決に取り組んでいる。具体的には、個々の遺伝子の発現量が蛍光タンパク質で標識された大腸菌ライブラリーを用いて、ゆらぎと環境応答量を一細胞レベルで高速に計測できる実験系を開発している。現在までに、大腸菌ライブラリーの改変と顕微鏡下多点計測のためのデバイス開発を完了した。これらの研究資料を用いることで、ゆらぎと環境応答量のより尤もらしい関係が得られ、これまでの仮説が実証されると期待される。

<報文>

(原著論文)

- [1] K. Kaneko and C. Furusawa: Macroscopic Theory for Evolving Biological Systems Akin to Thermodynamics, *Annu. Rev. Biophys.* **47**, 273-290 (2018).
  - [2] C. Furusawa and K. Kaneko: Formation of Dominant Mode by Evolution in Biological System, *Phys. Rev. E* **97**(4), 042410 (2018).
  - [3] K. Tokuyama, Y. Toya, T. Horinouchi, C. Furusawa, F. Matsuda, H. Shimizu: Application of adaptive laboratory evolution to overcome a flux limitation in an *Escherichia coli* production strain, *Biotechnol. Bioeng.* **115**(6), 1542-1551 (2018).
  - [4] T. Hirasawa, M. Saito, K. Yoshikawa, C. Furusawa, H. Shimizu: Integrated Analysis of the Transcriptome and Metabolome of *Corynebacterium glutamicum* during Penicillin-Induced Glutamic Acid Production, *Biotechnol. Jour.* **13**(5), e1700612 (2018).
  - [5] A. Germond, T. Ichimura, T. Horinouchi, H. Fujita, C. Furusawa, T. M. Watanabe: Raman spectral signature reflects transcriptomic features of antibiotic resistance in *Escherichia coli*, *Comm. Biology* **1**, 85 (2018).
  - [6] K. Okamoto, A. Germond, H. Fujita, C. Furusawa, Y. Okada, T. M. Watanabe: Single cell analysis reveals a biophysical aspect of collective cell-state transition in embryonic stem cell differentiation, *Sci. Rep.* **8**(1), 11965 (2018).
  - [7] T. Horinouchi, T. Maeda, C. Furusawa: Understanding and engineering alcohol-tolerant bacteria using OMICS technology”, *World Jour. Microb. Biotech.* **34**(11), 157 (2018).
  - [8] T. Komori, A. Shibai, H. Saito, Y. Akeno, A. Germond, T. Horinouchi, C. Furusawa, S. Tsuru: Enhancement of K-strategy evolution in histidine utilization using a container with compartments, *Genes Cells* **23**(10), 893-903 (2018).
  - [9] A. Shibai, S. Tsuru, T. Yomo: Development of an Automated UV Irradiation Device for Microbial Cell Culture, *SLAS Technol.*, September 10, 1-7 (2018).
  - [10] T. Maeda, T. Horinouchi, N. Sakata, A. Sakai, C. Furusawa: High-throughput identification of the sensitivities of an *Escherichia coli*  $\Delta$ recA mutant strain to various chemical compounds, *Jour. Antibiot.*, in press
- (国内雑誌)
- [11] 金子邦彦, 古澤力: 「適応と進化におけるマクロ現象論-表現型変化の低次元拘束と揺らぎ-応答関係」, *日本物理学会誌* **74**(3), 137-145 (2019).
- (著書)
- [12] 古澤力: 「進化実験の定量生物学」, 『定量生物学』(小林徹也 編, 化学同人) (2018)
- (学位論文)
- [13] 中村一瑛: 「ゲノムスケール代謝モデルを用いた微生物生態系の進化シミュレーション」(修士論文)

- [14] 井坂諭紀雄: 「ヒト胚性幹細胞の遺伝子制御ネットワーク推定と細胞分化のモデル構築」(修士論文)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [15] Nen Saito: Phase field model for macropinocytosis of amoeboid cells, Joint Symposium between UBI & MBI, Singapore, 2018 年 4 月
- [16] Nen Saito: Phase-field modeling for 3D morphodynamics of macropinocytosis, Macropinocytosis in physiology, disease and therapy, England, 2018 年 5 月
- [17] Tomoya Maeda, Takaaki Horinouchi, Hazuki Kotani, Natsue Sakata, Kumi Tanabe, Chikara Furusawa: High-throughput experimental evolution of *Escherichia coli* under various stress environments using an automated culture system, 46th Naito Conference, Sapporo, 2018 年 10 月
- [18] Atsushi Shibai, Namie Izutsu, Chikara Furusawa: Accumulation of gene inactivating mutations in bacterial genome, 46th Naito Conference, Sapporo, 2018 年 10 月
- [19] Saburo Tsuru: A persisting constraint on the rate of protein sequence evolution, 46th Naito Conference, Sapporo, 2018 年 10 月
- 招待講演
- [20] Chikara Furusawa: High-throughput Laboratory Evolution of *E. coli* to Unveil Phenotypic Plasticity and Constraint, 1st Asia Evo., China, 2018 年 4 月
- [21] Chikara Furusawa: High-throughput laboratory evolution of *E. coli*: toward understanding of phenotypic plasticity and constraint, EuroEvoDevo2018, Ireland, 2018 年 6 月
- [22] Chikara Furusawa: High-throughput Laboratory Evolution of *E. coli* to Unveil Phenotypic Plasticity and Constraint, 46th Naito Conference, Sapporo, 2018 年 10 月
- [23] Nen Saito: 「Self organization via membrane deformation and reaction diffusion: 3D modeling for macropinocytosis of ameoboid cell」, LMU-UT Joint Workshop ,Tokyo, 2018 年 10 月
- (国内会議)
- 一般講演
- [24] 芝井厚, 堀之内貴明, 古澤力, 津留三良: 高変異率条件における細菌の長期実験進化, 日本進化学会第 20 回大会, 東京, 2018 年 8 月
- [25] Chikara Furusawa, Takaaki Horinouchi, Tomoya Maeda: High-throughput Laboratory Evolution of *E. coli* to Unveil Phenotypic Plasticity and Constraint, 第 56 回日本生物物理学会年会, 岡山, 2019 年 9 月
- [26] A. Germond, V. Kumar, T. Horinouchi, C. Furusawa, H. Fujita, Yuichi Taniguchi, T. Yanagida, T. Ichimura, T. M. Watanabe: Predicting gene expression of living cells from a label-free spectral imaging technique, 第 56 回日本生物物理学会年会, 岡山, 2019 年 9 月
- [27] Atsushi Shibai, Minako Itzutsu, Chikara Furusawa: An optimal mutation rate model as a trade-off between mutation generation and growth inhibition, 第 56 回日本生物物理学会年会, 岡山, 2019 年 9 月
- [28] Yukitaka Isaka, Nen Saito, Chikara Furusawa, Yuhki Nakatake, Shigeru B.H. Ko, Norio Goda, Shunichi Wakabayashi, Hidenori Akutsu, Ryo Matoba, Minoru S.H. Ko: Inferring gene regulatory network and differentiation dynamics of human embryonic stem cell, 第 7 回生命医薬情報学連合大会, 鶴岡, 2018 年 9 月
- [29] 芝井厚, 井筒弥那子, 古澤力: 形質探索と増殖阻害のトレードオフとしての最適変異率モデル, 生命科学系フロンティアミーティング 2018, 静岡, 2018 年 10 月
- [30] 堀之内貴明, 前田智也, 小谷葉月, 酒井亜希, 古澤力: 大規模実験室進化を用いた転写因子の破壊による大腸菌の薬剤耐性化の制御, 日本生物工学会第 70 回大会, 大阪, 2018 年 9 月
- [31] 前田智也, 堀之内貴明, 阪田奈津枝, 川田正子, 小谷葉月, 酒井亜希, 田邊久美, 古澤力: 全自動培養システムを用いた多種ストレス環境下における大腸菌の大規模実験室進化, 生命科学系フロンティアミーティング 2018, 静岡, 2018 年 10 月
- [32] 堀之内貴明, 前田智也, 古澤力: 大腸菌一遺伝子破壊株ライブラリの実験室進化による薬剤耐性化の解析, 生命科学系フロンティアミーティング 2018, 静岡, 2018 年 10 月
- [33] 井坂諭紀雄, 齊藤稔, 古澤力, 中武悠樹, 洪繁, 合田徳夫, 若林俊一, 阿久津英憲, 的場亮, 洪実: 「ヒト ES 細胞の遺伝子制御ネットワーク推定と発現変化モデルの構築」, 生命科学系フロンティアミーティング 2018, 静岡, 2018 年 10 月
- [34] 芝井厚, 井筒弥那子, 古澤力: 細菌の抗生物質耐性進化における最適変異率モデルと実験検証, 第 41 回日本分子生物学会年会, 横浜, 2018 年 11 月
- [35] 前田智也, 岩澤諄一郎, 堀之内貴明, 阪田奈津枝, 川田正子, 小谷葉月, 酒井亜希, 田邊久美, 古澤力: 全自動培養システムを用いた多種ストレス環境下における大腸菌の大規模実験室進化, 2018 年度「先進ゲノム支援」拡大会議, 博多, 2018 年 12 月
- [36] 堤真人, 古澤力, 澤井哲, 齊藤稔: 「一細胞変形のダイナミクスの解析」, 定量生物学の会第九回年会, 大阪, 2019 年 1 月
- [37] 岩澤諄一郎, 前田智也, 堀之内貴明, 古澤力: Supervised PCA Reveals the Latent Space for *E. coli* Adaptive Laboratory Evolution, 定量生物学の会第九回年会, 大阪, 2019 年 1 月
- [38] 井坂諭紀雄, 齊藤稔, 古澤力, 中武悠樹, 洪繁, 合田徳夫, 若林俊一, 阿久津英憲, 的場亮, 洪実: 「ヒト ES 細

- 胞の遺伝子制御ネットワーク推定と発現変化モデルの構築」, 定量生物学の会第九回年会, 大阪, 2019年1月
- [39] 金井雄樹, 津留三良, 古澤力: 「トランスポゾーム発現大腸菌によるゲノム縮小の進化実験」, 定量生物学の会第九回年会, 大阪, 2019年1月
- [40] 長野章宏, 青木工太, 西野美都子, 福島愛子, 岩崎憲治, 古澤力, 越後富夫, 西野邦彦, 八木康史: 「電子顕微鏡画像における薬剤耐性菌株の識別と形態的特徴の比較」, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 京都, 2019年1月
- [41] 芝井厚, 井筒弥那子, 古澤力: 細菌の薬剤耐性進化における変異率と進化速度の関係, 第13回日本ゲノム微生物学会年会, 東京, 2019年3月
- [42] 前田智也, 岩澤諄一郎, 堀之内貴明, 阪田奈津枝, 川田正子, 小谷葉月, 酒井亜希, 田邊久美, 古澤力: 全自動培養システムを用いた多種ストレス環境下における大腸菌の大規模実験室進化, 第13回日本ゲノム微生物学会年会, 東京, 2019年3月
- [43] 清家泰介, 仁木宏典, 古澤力: 酵母のフェロモンが多様化する仕組みを実験的に探る, 第13回日本ゲノム微生物学会年会, 東京, 2019年3月
- 招待講演
- [44] 古澤力: 「表現型進化はどのように拘束されているか: 進化実験を用いた定量解析」, 進化学会第20回大会, 東京, 2018年8月
- [45] 古澤力: 「生物システムの記述と制御に向けて: 大腸菌進化実験と理論解析」, 第15回生物数学の理論とその応用-次世代の数理科学への展開-, 京都, 2018年8月
- [46] 齊藤稔: 「アメーバ細胞が示すマクロピノサイトーシス動態の3D数理モデリング」, 第15回生物数学の理論とその応用-次世代の数理科学への展開-, 京都, 2018年8月
- [47] 齊藤稔: 「フェーズフィールド法によるマクロピノサイトーシス動態の3Dシミュレーション」, 第56回日本生物物理学会年会 シンポジウム”いきた形の新規生成に挑む, 理論モルフォダイナミクス”, 岡山, 2018年9月
- [48] 古澤力: 「生物の状態変化をどのように記述すべきか: 実験室進化と理論解析」, 第6回MACSコロキウム, 京都, 2018年11月
- [49] 古澤力: 「細胞状態の記述・予測・制御へ向けて: 構成的実験と理論解析」, JST-CRDS 多次元生命システム研究開発戦略 科学技術未来ワークショップ, 東京, 2018年11月
- (セミナー)
- [50] 古澤力: 「生物の可塑性の理解へ向けて: 進化実験と理論解析」, 東京大学大学院理学系研究科生物科学専攻 Faculty Talk, 2018年4月
- [51] 齊藤稔: 「3D phase field simulation for macropinocytosis of amoeboid cells」, 物性研理論セミナー, 東京, 2018年5月
- [52] 井坂論紀雄, 齊藤稔, 古澤力, 中武悠樹, 洪繁, 合田徳夫, 若林俊一, 阿久津英憲, 的場亮, 洪実: 「ヒトES細胞の遺伝子制御ネットワークと分化ダイナミクス」, 科学技術振興機構 数理デザイン道場, 静岡, 2018年6月
- [53] 古澤力: 「微生物薬剤耐性をもたらす表現型と遺伝子型」, Spiber 株式会社セミナー, 2018年7月
- [54] 古澤力: 「多様な選択圧下での大腸菌進化実験による播らぎ-応答関係の定量解析」, 新学術領域:進化制約方向性領域会議, 神戸, 2018年7月
- [55] Chikara Furusawa: Decoding gut microbiota by imaging analysis of fecal samples, RIKEN DECODE seminar, 大阪, 2018年11月
- [56] 古澤力: 「Python/Jupyterを用いた進化シミュレーション」, 新学術領域:進化制約方向性理論情報交換会, 岡崎, 2018年12月
- [57] Chikara Furusawa: Decoding gut microbiota by imaging analysis of fecal samples, RIKEN iSYM seminar, 大阪, 2019年2月
- [58] 津留三良: 「分子進化速度の発現量依存性」, 新学術領域:進化制約方向性理論情報交換会, 岡崎, 2018年12月
- (アウトリーチ)
- [59] 齊藤稔: 日本物理学会誌 新著紹介 (定量生物学 - 小林 徹也 編, 株式会社 化学同人)
- [60] 岩澤諄一郎: 「大腸菌はサイコロを振るか」, 東京大学五月祭「10分で伝えます! 東大研究最前線」, 東京, 2018年5月
- [61] 岩澤諄一郎: 「指紋とトポロジー」, 東京大学駒場祭「10分で伝えます! 東大研究最前線」, 東京, 2018年11月

## 8 技術部門

(佐伯、八幡、南野、下澤、大塚\*)

\* 技術補佐員

技術部門では、実験装置試作室、安全衛生、IT 関連、学生実験、研究支援などの業務を行っている。技術部門の担当教員(岡田教授、浅井教授、藤堂教授、岡本准教授)と月に1度の物理技術室ミーティングを行った。

### 8.1 実験装置試作室 (下澤、大塚)

#### 8.1.1 利用状況

2018年4月から2019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。

- 設計、部品入手および外注対応等のサポート
- 内製 267 件 (部品点数 1526 個)
- 外部の協力工場への発注 61 件
- 作業依頼の内訳  
物理:56.1%、素粒子物理国際センター:14.9%、  
化学:16.0%、地殻化学実験施設:9.7%、スペクトル化学研究センター:1.1%、  
生物科学:0.7%、地球惑星科学:0.4%

主な依頼元 物理: 安東研、五神研、長谷川研、佐野研、日下研、島野研、素粒子: 浅井研、地殻化学実験施設: 小松研、化学: 山内研、長谷川研

### 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や、事故、ヒヤリハットの対応を行った。

また、寒剤管理業務の一環として、Raspberry Pi を利用した簡便な信号モニターを開発した。これは、回収ヘリウムガスの純度を Web からモニターし、異常時には e-mail で発報するものである。なお、これは入力アンプを 2 系統持つモニターなので他への転用も容易である [11]。

#### 8.2.2 IT 関連 (南野)

物理学専攻のシステム、サーバーの開発、管理を行った。

- 教員の出張登録システムの開発
- 予算マネジメントシステムの概念設計
- 論文審査システム、TA 管理システムの改修
- ウェブ、メール、データベースサーバーの管理
- 教員登録、教室予約、大学院入試システムの管理

理学系研究科の情報システムチームで以下の業務を行った。

- ネットワークインフラ業務として、Virtual LAN の管理や理学系研究科アカウントの管理
- 学習コンテンツ配信のための、ラーニングサイトの管理やビデオ撮影

#### 8.2.3 学生実験

学部 3 年次向けの物理学実験 I、II のグループ編成、スケジューリング、解説書の編集と発注(佐伯)のほか、以下を行った。

- 物理学実験 I (S セメスタ)  
「エレクトロニクス I」の技術指導(八幡)  
「真空技術」の技術指導(佐伯)  
「エレクトロニクス I」のメカニカルリレーによる論理回路実習装置の開発と導入 [6] (八幡)
- 物理学実験 II (A セメスタ)  
「生物物理学」の指導 [9] (佐伯)  
「相転移」の指導(八幡)  
「自動測定制御」の自動回転ステージを開発(八幡)

- 夏休みの自由実験(八幡、佐伯)

オペアンプを使ったアナログ回路の自由実験を夏休みに3日間、学部生2人の参加を得て実施した。内容は種々のオペアンプの基本性能を測定、比較するとともに、応用として Si フォトダイオードとトランスインピーダンスアンプとパネルメータによる照度計の設計、作成をとりあげた [5, 10]。

- 教材開発(八幡)

将来の学生実験の候補として、光の二重性を教える実験教材を開発した。これは、光の干渉実験装置を 16 ケの MPPC によるアレイと LabVIEW FPGA(MyRIO) などを用いて、単光子モードで同時計数するものである [4, 13]。

- 要素技術開発（佐伯、八幡）

学生実験などでの将来的な利用を考えるため、USB 接続型の測定器を利用したアナログ回路教材の開発を行った。USB 接続型の測定器とスタンドアロン型の測定器の性能を、オペアンプをモデル実験として比較した [5, 10]。

### 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) を引き続き実施した。今年度の参加者は、5 名で、内 2 名は海外からの研究者であった。

また、FPGA は修得が難しいことが知られており、これを解消するための研究を物理教育や認知発達の側面から進めている [2, 7, 12]。講習会のカリキュラムには、これらを反映させ、アクティブラーニング化した。これにより、定着が良くなり、研究での利用が進んでいる。

### 8.2.5 各種委員会

- 機器・分析技術研究会 地域代表者 (東京大学) (八幡)
- 自然科学研究機構分子科学研究所装置開発室運営委員 (八幡)
- 東京大学総合技術本部・本部員 (兼 企画調整室・室員)(佐伯)
- 第 3 回東京大学技術発表会実行委員会 (八幡、佐伯)
- 全学高圧ガスワーキンググループ (八幡)
- 寒剤管理連絡担当者 (八幡)
- 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)
- 理学系技術部運営委員会 (南野)
- 第 30 回理学系技術部シンポジウム実行委員会 (南野、下澤)

#### <受賞>

Kazushi Yawata: Best Presentation Award, International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System 2018 (ICMEMIS2018), (Kiryu Japan, November 4-6, 2018 ).

#### <報文>

- [1] 技術部報告集 2018 (東京大学大学院理学系研究科・理学部技術部、2019 年 2 月).

#### <学術講演>

(国際会議)

基調講演

- [2] K. Yawata: ICT material design methodology for science education, ICMEMIS2018, Nov 4-6, 2018 (Kiryu, Japan).

(国内会議)

- [3] 八幡和志: 常伝導マグネットの磁場反転回路開発、平成 30 年度 秋田大学 機器・分析技術研究会 (秋田大学、2018 年 8 月).
- [4] 八幡和志, 池田航, 西ノ宮ゆめ, 小高裕和, 馬場彩: FPGA と MPPC を用いた光の二重性の実験教材開発、日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学 (田辺)、2018 年 9 月).
- [5] 佐伯喜美子、八幡和志: 学生実験用アナログ回路教材の開発 (IV)、日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学、2018 年 9 月).
- [6] 八幡和志, 川合暁, 影山豪大, 森田悠介, 井手口拓郎: 認知発達に配慮したデジタル回路教材開発と実践、日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学 (田辺)、2018 年 9 月).
- [7] 田中忠芳, 渡會兼也, 沖野信一, 八幡和志, 松浦執, 谷口和成, 山田吉英, 館宜伸, 藤井清美, 久恒彩子, 郭清蓮, 佐藤恵一, 鍵山茂徳, 大島和成, 並木雅俊, 江尻有郷: 数理的物理的概念形成支援のためのコンテンツおよびプログラムの開発、日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学 (田辺)、2018 年 9 月).
- [8] 八幡和志: 実験環境におけるノイズ対策、第 20 回分子科学研究所技術研究会 (岡崎コンファレンスセンター、2019 年 2 月).
- [9] 佐伯喜美子、八幡和志: フォトダイオードによる蛍光測定を試み、第 41 回生理学技術研究会 (岡崎コンファレンスセンター、2019 年 2 月).
- [10] 佐伯喜美子、八幡和志: USB 接続型測定器を使ったアナログ回路教材の開発、総合技術研究会 2019 九州大学 (九州大学、2019 年 3 月).
- [11] 八幡和志: ラズベリーパイによるヘリウム回収ガス純度のオンライン管理、総合技術研究会 2019 九州大学 (九州大学、2019 年 3 月).
- [12] 田中忠芳, 谷口和成, 山田吉英, 松浦執, 土佐幸子, 藤井清美, 久恒彩子, 郭清蓮, 館宜伸, 八幡和志, 渡會兼也, 沖野信一, 東拓郎, 佐藤恵一, 鍵山茂徳, 大島和成, 並木雅俊, 江尻有郷: STEM 教育コンテンツと言語活動を統合した理工系基礎力育成プログラムの開発、日本物理学会 2019 年年次大会 (九州大学、2019 年 3 月).
- [13] 八幡和志: FPGA と MPPC を用いた光の二重性の実験教材開発 (II)、日本物理学会 2019 年年次大会 (九州大学、2019 年 3 月).



## II

# Summary of group activities in 2018

## 1 Theoretical Nuclear Physics (Fukushima) Group

**Subjects:** QCD phase diagram, Lattice simulation, Neutron star, Chiral anomaly

**Member:** Kenji Fukushima and Arata Yamamoto

In Theoretical Hadron Physics group, 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. Extreme matter in electromagnetic fields and rotation
2. Non-Abelian vortex in lattice gauge theory
3. Machine learning for the neutron star equation of state
4. Axial ward identity and the schwinger mechanism

## 2 High Energy Physics Theory Group

**Research Subjects:** Particle Physics and Cosmology

**Member:** Takeo Moroi, Koichi Hamaguchi, Yutaka Matsuo

We are working on various topics in particle physics and cosmology, such as physics beyond the Standard Model, dark matter, baryogenesis, inflation, phenomenology of supersymmetric models, grand unified theories, string theory, supersymmetric field theories, conformal field theories, holography, entanglement entropy, and so on. Specific subjects studied in 2018 are summarized below:

1. Phenomenology
  - 1.1. Swampland and Higgs [1].
  - 1.2. Supersymmetric models [2, 3].
  - 1.3. The supersymmetric flaxion model [4].
  - 1.4. Dark matter [5, 6, 7, 8].
  - 1.5. Axion and the 21 cm observation [9].
  - 1.6. Gravitational waves [10].
  - 1.7. Models with flavor symmetry [11, 12, 13].
  - 1.8. Weak-gravity conjecture and particle physics [14].
  - 1.9. Moduli problem [15].
  - 1.10. Inflation [16, 17].
  - 1.11. Neutron star cooling and axion [18].
  - 1.12. Long-lived particle searches [19, 20].
2. Superstring Theory and Formal Aspects of Quantum Field Theories
  - 2.1. Field theory on lattice [21].
  - 2.2. Algebraic structure of string theories [22, 23, 24, 25].
  - 2.3. Entanglement entropy and holography [26, 27].
  - 2.4. Defect CFT [28, 29].

**References:**

- [1] K. Hamaguchi, M. Ibe and T. Moroi, JHEP **1812** (2018) 023 [arXiv:1810.02095 [hep-th]].
- [2] E. Bagnaschi *et al.*, Eur. Phys. J. C **79**, no. 2, 149 (2019) [arXiv:1810.10905 [hep-ph]].
- [3] J. Kawamura, T. Kobayashi and N. Nagata, JHEP **1810**, 120 (2018) [arXiv:1808.07985 [hep-ph]].
- [4] Y. Ema, D. Hagihara, K. Hamaguchi, T. Moroi and K. Nakayama, JHEP **1804**, 094 (2018) [arXiv:1802.07739 [hep-ph]].
- [5] Y. Ema, K. Nakayama and Y. Tang, JHEP **1809**, 135 (2018) [arXiv:1804.07471 [hep-ph]].
- [6] A. Kamada, K. Kaneta, K. Yanagi and H. B. Yu, JHEP **1806**, 117 (2018) [arXiv:1805.00651 [hep-ph]].
- [7] J. Ellis, N. Nagata and K. A. Olive, Eur. Phys. J. C **78**, no. 7, 569 (2018) [arXiv:1805.09795 [hep-ph]].
- [8] J. Hisano, R. Nagai and N. Nagata, JHEP **1812**, 059 (2018) [arXiv:1808.06301 [hep-ph]].
- [9] T. Moroi, K. Nakayama and Y. Tang, Phys. Lett. B **783**, 301 (2018) [arXiv:1804.10378 [hep-ph]].
- [10] K. Nakayama and Y. Tang, Phys. Lett. B **788**, 341 (2019) [arXiv:1810.04975 [hep-ph]].
- [11] S. Chigusa and K. Nakayama, Phys. Lett. B **788**, 249 (2019) [arXiv:1808.09601 [hep-ph]].
- [12] S. Chigusa, S. Kasuya and K. Nakayama, Phys. Lett. B **788**, 494 (2019) [arXiv:1810.05791 [hep-ph]].
- [13] K. Asai, K. Hamaguchi, N. Nagata, S. Y. Tseng and K. Tsumura, Phys. Rev. D **99**, no. 5, 055029 (2019) [arXiv:1811.07571 [hep-ph]].
- [14] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B **790**, 218 (2019) [arXiv:1811.01755 [hep-ph]].
- [15] D. Hagihara, K. Hamaguchi and K. Nakayama, JCAP **1903**, 024 (2019) [arXiv:1811.05002 [hep-ph]].
- [16] Y. Tang and Y. L. Wu, Phys. Lett. B **784**, 163 (2018) [arXiv:1805.08507 [gr-qc]].
- [17] J. Ellis, M. A. G. Garcia, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, JCAP **1904**, 009 (2019) [arXiv:1812.08184 [hep-ph]].
- [18] K. Hamaguchi, N. Nagata, K. Yanagi and J. Zheng, Phys. Rev. D **98**, no. 10, 103015 (2018) [arXiv:1806.07151 [hep-ph]].
- [19] H. Ito, O. Jinnouchi, T. Moroi, N. Nagata and H. Otono, JHEP **1806**, 112 (2018) [arXiv:1803.00234 [hep-ph]].
- [20] I. Lara, D. E. López-Fogliani, C. Muñoz, N. Nagata, H. Otono and R. Ruiz De Austri, Phys. Rev. D **98**, no. 7, 075004 (2018) [arXiv:1804.00067 [hep-ph]].
- [21] T. Ago, Prog. Theor. Exp. Phys. **2018**, 113B01 (2018) [arXiv:1808.02701[hep-lat]].
- [22] K. Harada and Y. Matsuo, JHEP **1902**, 050 (2019) [arXiv:1810.08512 [hep-th]].
- [23] R.-D. Zhu, JHEP **1808**, 050 (2018) [arXiv:1712.10255[hep-th]]
- [24] O. Foda and R.-D. Zhu, JPhysA **51**, 46 (2018) 465401 [arXiv:1805.12073[hep-th]]
- [25] T. Nishinaka, S. Sasa and R.-D. Zhu, JHEP **1903**, 091 (2019) [arXiv:1811.11772[hep-th]]
- [26] T. Nishioka, “Entanglement entropy: holography and renormalization group,” Rev. Mod. Phys. **90**, no. 3, 035007 (2018) [arXiv:1801.10352 [hep-th]].
- [27] N. Kobayashi, T. Nishioka, Y. Sato and K. Watanabe, “Towards a  $C$ -theorem in defect CFT,” JHEP **1901**, 039 (2019) [arXiv:1810.06995 [hep-th]].
- [28] N. Kobayashi and T. Nishioka, “Spinning conformal defects,” JHEP **1809**, 134 (2018) [arXiv:1805.05967 [hep-th]].
- [29] A. Karch and Y. Sato, “Conformal Manifolds with Boundaries or Defects,” JHEP **1807** (2018) 156 [arXiv:1805.10427 [hep-th]].

**3 Sakurai Group**

**Research Subjects:** Structure and dynamics of exotic nuclei and exotic atoms

**Member:** Hiroyoshi Sakurai and Megumi Niikura

Our group investigates structure and dynamics of exotic nuclei and exotic atoms. Our experimental programs utilize world-wide accelerator facilities at RIBF at RIKEN, RCNP at Osaka University, GANIL in France and NSCL at Michigan State University in US. Some of our research subjects are followings.

#### **In-beam gamma-ray spectroscopy of $^{78}\text{Ni}$**

In-beam spectroscopy of a doubly-magic nucleus,  $^{78}\text{Ni}$ , was performed at RIBF as a series of campaign experiment of the SEASTAR experiments in 2015. We clearly establish its doubly magic nature by observing a high excitation energy of the first excited state, which is also predicted by *ab-initio* calculations. However, our results also provide the first indication of the breakdown of the neutron magic number 50 and proton magic number 28 beyond this stronghold, caused by a competing deformed structure. State-of-the-art phenomenological shell-model calculations reproduce the shape coexistence, predicting further a rapid transition from spherical to deformed ground states with  $^{78}\text{Ni}$  as turning point.

#### **Collapse of the $N = 28$ shell closure: single-particle structure of $^{44}\text{S}$**

Recently the neutron shell gap at  $N = 28$  has been found to be reduced especially on  $^{44}\text{S}$  and  $^{43}\text{S}$  and the shape coexistence/mixing has been discussed both theoretically and experimentally. Unless a lot of efforts about the macroscopic nuclear system, however, the microscopic information about the neutron configuration of these nuclei has been unknown, which keeps the mechanism of the disappearance of the  $N = 28$  magic number and the emergence of the deformed states in this region unclear. In order to shed light on understanding of the neutron single-particle configuration, we have performed a in-beam  $\gamma$ -ray spectroscopy of  $^{44}\text{S}$  by one-neutron knockout reaction at NSCL, Michigan State University. The full level scheme of  $^{43}\text{S}$  was constructed for the first time. By the analysis of parallel momentum distributions, the assignment of the spin-parity of each final state was performed. The concentration of the strength of neutron knockout from  $L = 1$  orbit was observed around 1.2 MeV, which is the direct observation of the quenching of the  $N = 28$  shell gap.

#### **Missing mass spectroscopy of light nuclei beyond proton-drip line**

Recent experimental researches have suggested the existence of extremely neutron-rich systems such as tetra-neutron ( $n^4$ ) and  $^7\text{H}$  resonances. These experimental results raised a question as to whether their mirror proton-rich partners exist or not, and if so, to what extent the symmetry is preserved under the strong Coulomb field. The experiment are performed at GANIL in July 2018 to search for resonances of  $^5\text{Be}$ ,  $^6\text{B}$  and  $^7\text{C}$ , which are the mirror partners of heavy hydrogen nuclei ( $^5\text{--}^7\text{H}$ ) and not observed so far. The resonance states are populated via the two-neutron transfer ( $p, t$ ) reaction with radioactive beams and the missing mass method was adopted by using MUST2 telescopes to reconstruct the resonance energy and the differential cross sections.

#### **Spectroscopy of pionic atoms using a proton beam**

Chiral symmetry restoration at finite density is one of the most important topics in the hadron physics. Spectroscopy of deeply-bound pionic atoms enable us to investigate the symmetry restoration. We performed a new experiment of pionic atoms using a proton beam at RCNP, Osaka University in order to improve the experimental resolution. The  $1p$  state of the pionic atom of  $^{123}\text{Sn}$  is identified with more than  $2\sigma$  significance and there seems to be a non-negligible  $1s$  state contribution in the spectrum. Although the statistical sensitivity is not good, the present study established the methods of the high precision spectroscopy of deeply-bound pionic atoms and shed light on the future precise measurements.

#### **Muonic X-ray measurement on palladium isotopes**

A muonic X-ray measurement is a common method to determine nuclear charge parameters. To interpret the observed muonic X rays to the nuclear charge parameters, one should solve a Dirac equation assuming a certain charge distribution. This procedure causes a model dependence on the determination of the charge parameters. A precise measurement of higher muonic X-ray series helps to reduce the model dependence. We measured the muonic X rays of isotopically enriched palladium targets ( $^{104,105,106,108,110}\text{Pd}$ ) at MuSIC facility at RCNP, Osaka University. Transition energies and relative intensities of the muonic X rays up to the M series were measured and the nuclear charge parameters of the palladium isotopes were determined.

## 4 Wimmer Group

**Research Subjects:** Spectroscopy of exotic nuclei using direct reactions

**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.

### Spectroscopy of the $T_z = -1$ nucleus $^{70}\text{Kr}$

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  $^{70}\text{Kr}$  was studied by nucleon removal reactions and Coulomb excitation. Previously no excited state was known in this nucleus, our analysis reveals five new states, and comparison with theoretical calculations suggests that effects from the Coulomb interaction as well as isospin breaking components in the nuclear interaction play a major role in this  $N < Z$  nucleus. A followup study of  $^{62}\text{Ge}, \text{Ga}$ , and  $\text{Zn}$  nuclei has been approved by the RIBF program advisory committee.

### Rapid shape changes at $N = 60$

The shape transition at  $N = 60$  in the  $\text{Sr}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Mo}$  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 measured 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 at TRIUMF. The next step is to investigate pair-transfer reactions using a radioactive tritium target. These kind of reaction will open new opportunities to investigate the nature of  $0^+$  states in particular and provide key information on the nature of this most rapid shape transition in the nuclear chart.

### Single-particle structure of neutron-rich $\text{Ca}$ isotopes

Within the SEASTAR collaboration we have performed an experiment to study the first spectroscopy of very exotic neutron-rich nuclei. The experiment was performed using the large acceptance SAMURAI spectrometer that allowed for the simultaneous measurement of many reaction channels. In particular, we are investigating the single-particle structure of  $^{56}\text{Ca}$  through proton and neutron knockout, and the systematics of the production cross sections along the  $\text{Ca}$  isotopes. In order to probe the particle states,  $(d,p)$  one-neutron transfer reactions with energy degraded beams at the OEDO beam line are planned. These two experiments track the evolution of the single-particle states between  $N = 32$  and  $36$ .

### Towards transfer reactions at RIBF

With the newly constructed OEDO facility at RIBF the beam energy of exotic nuclei can be effectively reduced to energies that are suitable for transfer reactions. In collaboration with RIKEN we are constructing a detector array specifically for the study of transfer reactions. The setup, called TINA, has been designed and its first implementation has been commissioned at Kyushu University Tandem accelerator and at the OEDO beam-line. Upgrades and extensions are now being designed.

### Development of a new target for two-neutron transfer reactions

Two-nucleon transfer reactions are a well-suited tool to investigate specific nuclear structure properties, like shape coexistence and pairing correlations. Two-neutron transfer reactions with OEDO at RIBF require a new kind of target. A self-supporting large area tritium target based on a tritium loaded titanium foil is currently developed at the University of Tokyo. First prototypes, containing deuterons instead of tritium, were tested at Kyushu University using a  $^{12}\text{C}$  beam. The targets have been characterized and the deuterium content has been quantified. Further tests were performed and soon the tritium target will be fabricated.

**First spectroscopy of the the  $r$ -process nucleus  $^{135}\text{Sn}$** 

We plan to study the isotopes  $^{135}\text{Sn}$  by the  $^{134}\text{Sn}(d, p)$  one-neutron transfer reaction at HIE-ISOLDE (CERN). We aim for the identification excited states in this nucleus for the first time. Excitation energies, spin-parity assignments and spectroscopic factors extracted from the data will allow for a stringent test of predictions by state-of-the-art shell model calculations and constrain nuclear synthesis in the  $r$ -process.

**High-resolution  $\gamma$ -ray spectroscopy at the RIBF**

We will construct a high-resolution, Ge based  $\gamma$ -ray spectrometer composed of several detectors from the MINIBALL collaboration as well as  $\gamma$ -ray tracking detectors from the US and Europe. The efficiency and resolution in-beam will be 9 % and 0.2-2 %. This setup will pave the way to detailed nuclear structure and reaction studies currently not feasible at the RIBF. The project has been approved by the RIBF program advisory committee, the MINIBALL steering committee, and the RIKEN Nishina Center. The experiments will be performed in 2020.

## 5 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  $\tau$  lepton systems (Belle and Belle II);
- (2) Study of neutrino oscillations and search for proton decay (Super-Kamiokande, T2K, and Hyper-Kamiokande);
- (3) Dark energy survey at the Subaru telescope (Hyper Suprime-Cam);
- (4) R&D for an experiment to search for axion and light dark matter;
- (5) R&D of new generation photodetectors.

**Members:** Hiroaki Aihara, Masashi Yokoyama, and Yoshiuki Onuki

**1. Search for new physics at KEK (super-)B-factory: Belle and Belle II experiments** One of the major research activities in our group has been a study of CP-violation and searches for physics beyond the Standard Model in the  $B$  meson and the  $\tau$  lepton systems using the KEK  $B$ -factory (KEKB). This year, we reported the first observation of the rare tau decay  $\tau^\pm \rightarrow \pi^\pm e^+ e^- \nu_\tau$  with branching fraction of  $(2.33 \pm 0.19 \pm 0, 30) \times 10^{-5}$ , and the most stringent limit on the branching fraction of  $\tau^\pm \rightarrow \pi^\pm \mu^+ \mu^- \nu_\tau$  to be  $0.55 \times 10^{-5}$  at 90% CL.

The quest for new physics will continue with the SuperKEKB accelerator, that will have 40 times higher luminosity than KEKB, and the Belle II detector upgraded with cutting-edge technologies. Since 2011, our group has been responsible for the construction of the outermost layer of the Silicon Vertex Detector (SVD) to precisely measure the decay points of  $B$  mesons, one of the key elements for the success of Belle II. This year, we completed the construction of SVD, which has been installed in the Belle II detector. The physics data taking with the full Belle II detector has been started from March 2019.

**2. Study of neutrino oscillations and search for proton decay: Super-Kamiokande, T2K, and Hyper-Kamiokande experiments** The discovery of neutrino oscillation by Super-Kamiokande (SK) opened a new window to physics beyond the Standard Model of elementary particles. We have been studying neutrino oscillations with the T2K long baseline neutrino experiment, in which intense neutrino and anti-neutrino beams produced with the J-PARC accelerator complex are detected with the SK detector, 295 km away. This year, with doubled data for the anti-neutrino mode beam compared to the previous year, we reported stronger hint of the  $CP$  violation in the lepton sector, which is one of major milestones in particle physics.

We lead the program to improve the sensitivity of T2K by reducing the systematics uncertainties related to the neutrino interaction. We built new neutrino detectors named WAGASCI at J-PARC and measured cross sections of neutrino interactions with water, which is the target material in the SK detector. Our group has been playing central roles in the T2K near neutrino detector upgrade project.

In order to significantly extend the reach in the neutrino physics and the proton decay search beyond T2K and SK, the next-generation water Cherenkov detector, Hyper-Kamiokande (Hyper-K) is proposed. Our group is leading this project as well.

**3. Study of Dark Energy with Subaru telescope: Hyper Suprime-Cam** As an observational cosmology project, we have been involved in the research with 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 published the constraints on the mass fraction of primordial black holes to dark matter in the Milky Way and the Andromeda galaxy, using data taken with HSC.

**4. R&D for an experiment to search for axion and light dark matter** We continue an R&D to investigate the feasibility of an experiment to search for axion and light dark matter using silicon pixel detector with Silicon On Insulator technology.

## 6 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.
- (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.

## 7 Miyashita Group

**Research Subjects:** Statistical Mechanics, Phase Transitions, Quantum Spin systems, Quantum Dynamics, Non-equilibrium Phenomena

**Member:** Seiji Miyashita, Takashi Mori, Taichi Hinokihara and Eriko Kaminishi

### Quantum response and Quantum dynamics

Quantum dynamics under time dependence field is one of the most important subjects in our group. In the 2017 fiscal year, we studied the following topics.

Optical Bistability is a phenomenon of discontinuous change of output as a function of strength of input. In order to study this phenomenon. We study a system of microcavity including atoms (or spins) with discrete energy levels contacting a thermal bath. We study this system by an eigenvalue problem of time evolution operator for the master equation. We found peculiar properties due to bistability at the low photon density where the quantum hybridization of cavity-photon mode and spins is strong.[9].

We are also studying the acceleration of adiabatic motion. We study the idea to the classical systems and found the method of counter-adiabatic term works in the adiabatic motion in classical systems.[11]. The method was extended to an method to create the cat-state in Bose-Einstein condensate. [12].

We study relations between the classical soliton solution and its counter part in quantum mechanics in the exact solvable (integrable) model of one-dimensional Bose gas model with interaction[30].

We also study quantum response in a system with strong spin-orbit interaction. Motivated by the measurement of Terahertz spectroscopy on  $\alpha - \text{RuCl}_3$ ,  $d^5$ , we studied electronic magnetoelectric effects in  $d^5$  Mott insulator with the octahedral crystal field. [13].

Characterization of the effective spin ( $S = 1/2$ ) induced by impurities in the so-called gapped spin chains by making use of the matrix product state (MPS). We first studied AKLT model as a prototype and found a characteristic response to the external field, and then we studied the bond-alternating Heisenberg antiferromagnetic chain with MPS. [22, 33].

### Phase transitions and Dynamics of order parameters

Phase transitions and critical phenomena are also important subjects of our group.

As an important consequence of the change of local lattice structure, we have studied the elastic interaction which causes an effective long-range interaction. We found a specific phase diagram with a horn structure, and studied the phase diagram in detail by making use of extended cluster mean-field method, and explore possible phases with multiple phases[10, 49, 51]. We also studied the effect of elastic interaction on the dynamics of HS-LS conversion in a spin-crossover material which shows the elastic step and thermal step separately[31].

We are studying the thermal effects on the coercive force of permanent magnets, e.g.  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , joining to the Elements Strategy Initiative Center for Magnetic Materials (ESICMM) under the outsourcing project of MEXT. To study the process of decay from metastable state, we developed new numerical methods using atomistic model, e.g., method of free-energy landscape employing the Wang-Landau Monte Carlo method, and also an efficient method to study the dipole-dipole interaction. By these method, we studied temperature dependence of the coercive force systematically [6, 8, 50]. . We also studied the ferromagnetic resonance (FMR) in the phase of tilted magnetization.

### Prethermalization in isolated quantum and classical systems

It is one of the fundamental problems in statistical physics to understand the relaxation dynamics in isolated many-body systems. It has been well known that some isolated quantum system display prethermalization, i.e., the relaxation towards a quasi-stationary metastable state before reaching true thermal equilibrium. We studied prethermalization for quantum spin systems with long-range interactions. It was shown that prethermalization generally occurs due to the presence of long-range interactions. In addition, we studied classical isolated spin systems under periodic driving fields, and made clear that prethermalization occurs in the classical system. This prethermalization is the classical counterpart of the Floquet prethermalization observed in isolated quantum systems.

## 8 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 with frustration and/or spin-orbit interactions. The followings are the current topics in our group.

- High- $T_c$  superconductivity  
Flux states as a symmetry-breaking state in high- $T_c$  superconductivity.
- Dirac electron systems in solids  
Quantum electrodynamics (QED) in solids: Dielectricity and diamagnetism.[1]  
Critical phenomena in Weyl semimetals due to impurities and scaling law in nuclear spin relaxation rate.  
Magnetoresistance of a three-dimensional Dirac electron system.[2]
- Thermal transport phenomena  
Range of validity of Sommerfeld-Bethe relation and phonon drag contribution.[3]  
Theory of phonon drag in Seebeck effects based on the linear response theory.[4]
- Theories on topological materials  
 $Z_2$  index and Dirac nodal line material.[5]  
Contribution of the Berry curvature on magnetic susceptibility in a honeycomb lattice model.
- Organic conductors  
Low temperature thermal conductivity in a quantum spin liquid of  $\kappa$ -H<sub>3</sub>(Cat-EDT-TTF)<sub>2</sub>.
- Borophane-related materials.[6]
- Spin systems and spin-orbit interaction  
Anomalous temperature behavior of chiral spin helix in CrNb<sub>3</sub>S<sub>6</sub>.[7]  
Magnetization process and a formation of spin-liquid states in an interacting magnetic monopole system.  
Dzyaloshinskii-Moriya interactions in 5d electron systems.[8]  
New magnetic phases in the chiral magnet CsCuCl<sub>3</sub> under high pressures.[9]

- [1] H. Maebashi, T. Hirose, M. Ogata, and H. Fukuyama: to appear in *J. Phys. Chem. Solids* (2018), doi:10.1016/j.jpcs.2017.12.034. “Nuclear Magnetic Relaxation and Knight Shift Due to Orbital Interaction in Dirac Electron Systems”
- [2] V. Könye and M. Ogata: *Phys. Rev. B* **98**, 195420 (2018). “Magnetoresistance of a three-dimensional Dirac gas”
- [3] M. Ogata and H. Fukuyama, submitted to *J. Phys. Soc. Jpn.* “Range of Validity of Sommerfeld-Bethe Relation Associated with Seebeck Coefficient and Phonon Drag Contribution”
- [4] H. Matsuura, H. Maebashi, M. Ogata, and H. Fukuyama: to appear in *J. Phys. Soc. Jpn.* “Effect of Phonon Drag on Seebeck Coefficient Based on Linear Response Theory: Application to FeSb<sub>2</sub>”
- [5] I. Tateishi, H. Matsuura: *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 073702 (2018). “Face Centered Cubic SnSe as a  $Z_2$  Trivial Dirac Nodal Line Material”
- [6] I. Tateishi, N. T. Cuong, C. A. S. Moura, M. Cameau, R. Ishibiki, A. Fujino, S. Okada, A. Yamamoto, M. Araki, S. Ito, S. Yamamoto, M. Niibe, T. Tokushima, D. E. Weibel, T. Kondo, M. Ogata, and I. Matsuda: *Phys. Rev. Materials* **3**, 024004 (2019). “Semi-metallicity of free-standing hydrogenated monolayer boron from MgB<sub>2</sub>”
- [7] Y. Togawa, J. Kishine, P. A. Nosov, T. Koyama, G. W. Paterson, S. McVitie, Y. Kousaka, J. Akimitsu, M. Ogata, and A. S. Ovchinnikov: *Phys. Rev. Lett.* **122**, 017204 (2019). “Anomalous Temperature Behavior of the Chiral Spin Helix in CrNb<sub>3</sub>S<sub>6</sub> Thin Lamellae”
- [8] M. Hosoi, T. Mizoguchi, T. Hinokihara, H. Matsuura, and M. Ogata: arXiv:1804.04874. “Dzyaloshinskii-Moriya Interaction between Multipolar Moments in 5d<sup>1</sup> Systems”
- [9] M. Hosoi, H. Matsuura, M. Ogata: *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 075001 (2018). “New Magnetic Phases in the Chiral Magnet CsCuCl<sub>3</sub> under High Pressures”

## 9 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 fundamental problems in condensed matter physics, primarily 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 the study of electronic, structural and dynamical properties of materials.

In FY2018, we developed a "data assimilation" method to find crystal structure efficiently by using incomplete powder diffraction data. We also developed a multi-scale modeling method based on the electronic entropy-driven mechanism to simulate photo-induced non-thermal processes by ultra-short-pulse laser. As for the fundamentals of the first-principles electronic state calculation, we investigated relativistic effects on the electronic structure of heavy atoms by incorporating the Breit correction. We also applied DFT to clarify the structure and properties of a permanent magnet, a ferromagnetic material, a molecular crystal, and so on.

Our research subjects in FY2018 are as follows:

- Data assimilation for crystal structure prediction
- Multi-scale simulation of non-thermal ablation of metals
- A stochastic sampling method for rare events
- Neural-network Kohn-Sham exchange-correlation potential
- Formulation of relativistic DFT and its application
- Generalized gradient approximation for nuclear matter
- Anharmonic lattice dynamics and thermal properties of materials
- Negative thermal expansion of  $\text{ScF}_3$
- Substitution effects in  $\text{Nd}_2(\text{Fe},\text{X})_{14}\text{B}$
- Electronic structure of  $\text{Sr}_3\text{OsO}_6$  with the highest Curie temperature
- Spin-fluctuation effect in superconductivity of Fe at high pressure
- Electronic structure of ferromagnetic  $\text{CeRh}_3\text{B}_2$
- Electronic structure of a Pt-dithiolene nanosheet

## 10 Todo Group

**Research Subjects:** Development of simulation algorithms for strongly-correlated systems; Application of machine learning technique to materials science; Fundamental theory of quantum computer; Novel state and critical phenomena in strongly correlated systems; Cooperative phenomena in non-equilibrium and non-steady states; Development of open-source software for next-generation parallel simulations

**Member:** Syngé Todo, Tsuyoshi Okubo, and Hidemaro Suwa

We are exploring novel methods in computational physics based on stochastic method such as the Monte Carlo simulation, path-integral representation of quantum fluctuations, information compression by using the singular value decomposition and the tensor network, statistical machine learning, etc. By making full use of these powerful numerical methods, we aim to elucidate various exotic phases, phase transitions, and dynamics specific to quantum many-body systems, from strongly correlated systems such as the spin systems and the Bose-Hubbard model to real materials. We are also researching parallelization methods for leading-edge supercomputers, and developing and releasing open-source software for next-generation physics simulations.

**Development of simulation algorithms for strongly-correlated systems:** Design of local transition matrix in Markov chain Monte Carlo; Measurement of Rényi entanglement entropy by using quantum Monte Carlo method; Path-integral Monte Carlo in continuous space; Non-local update for quantum dimer models; Tensor network renormalization for non-uniform systems.

**Application of machine learning technique to materials science:** Machine learning for molecular dynamics with strongly correlated electrons; Crystal structure prediction by combined optimization of experimental data and first-principles calculation; Exploration of higher Young modulus materials by machine learning approach

**Fundamental theory of quantum computer:** Quantum-classical hybrid algorithm for calculation of excited energy

**Novel state and critical phenomena in strongly correlated systems:** Ground state of Kitaev materials; Order in magnetic field in frustrated magnets; Effective dimension of the random-field Ising model with correlated randomness,

**Cooperative phenomena in non-equilibrium and non-steady states:** Dynamical cooperative phenomena in in cavity system; Nonergodicity of classical harmonic oscillator system.

- [1] N. Tsujimoto, D. Adachi, R. Akashi, S. Todo, S. Tsuneyuki, *Phys. Rev. Materials* **2**, 053801 (7pp) (2018).
- [2] L. Hao, et al, *Nat. Phys.* **14**, 806–810 (2018).
- [3] H. Yamaguchi, et al, *Phys. Rev. B* **98**, 094402 (6pp) (2018).
- [4] T. Shirai, T. Mori, S. Miyashita, *Eur. Phys. J. Special Topics* **227**, 323–333 (2018).
- [5] T. Shirai, S. Todo, H. de Raedt, S. Miyashita, *Phys. Rev. A* **98**, 043802 (13pp) (2018).
- [6] Y. Motoyama, S. Todo, *Phys. Rev. B* **98**, 195127 (6pp) (2018).
- [7] F. Ishikawa, S. Todo, *Phys. Rev. E* **98**, 062140 (8pp) (2018).
- [8] S. Todo, H. Matsuo, H. Shitara, *Comp. Phys. Comm.* **239**, 84–93 (2019).
- [9] H. Watanabe, S. Morita, S. Todo, N. Kawashima, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 024004 (8pp) (2019).
- [10] R. Okuma, et al, *Nat. Comm.* **10**, 1229 (7pp) (2019).
- [11] H. Suwa, et al, *Phys. Rev. B* **99**, 161107 (5pp) (2019).
- [12] D. Adachi, N. Tsujimoto, R. Akashi, S. Todo, S. Tsuneyuki, to appear in *Comp. Phys. Comm.* (2019).

## 11 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 interesting phases. We study theoretically such 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) low-dimensional correlated systems, (iii) magnetism in Bose and Fermi Hubbard models, and (iv) application of machine learning. In addition, we are also interested in the mathematical aspects of the above mentioned fields. Our research projects conducted in FY 2018 are the following:

- Strongly correlated systems
  - Subgap optical conductivity in honeycomb Kitaev materials [1]
  - Nambu-Goldstone fermions in interacting Majorana-fermion chains [2]
  - Topological order in interacting Kitaev/Majorana chains [3]
- Topological phases of matter
  - Machine learning phases of disordered topological superconductors [4]
  - Thermal Hall effect in chiral superconductors with gap nodes [5]
  - $\mathbf{Z}_2$  topological invariant for magnon spin Hall systems [6]
  - Zero and shift modes in a non-Hermitian Kitaev chain with parity-time symmetry [7]
- Mathematical and statistical physics
  - Rigorous results for the ground states of the spin-2 Bose-Hubbard model [8]
  - Algebraic transformations of generalized Ising models and Boltzmann machines [9]
  - Effective dimension, level statistics, and integrability of Sachdev-Ye-Kitaev-like models [10]

[1] Adrien Bolens, Hosho Katsura, Masao Ogata, and Seiji Miyashita, *Phys. Rev. B* **97**, 161108(R) (2018).

[2] Noriaki Sannomiya and Hosho Katsura, *Phys. Rev. D* **99**, 045002 (2019).

[3] Jurriaan Wouters, Hosho Katsura, and Dirk Schuricht, *Phys. Rev. B* **98**, 155119 (2018).

[4] Nobuyuki Yoshioka, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura, *Phys. Rev. B* **97**, 205110 (2018).

[5] Nobuyuki Yoshioka, Yoshiki Imai, and Manfred Sigrist, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 124602 (2018).

[6] Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura, *Phys. Rev. B* **99**, 041110(R) (2019).

[7] Kohei Kawabata, Yuto Ashida, Hosho Katsura, and Masahito Ueda, *Phys. Rev. B* **98**, 085116 (2018).

[8] Hong Yang and Hosho Katsura, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 053401 (2019).

[9] Nobuyuki Yoshioka, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura, *Phys. Rev. E* **99**, 032113 (2019).

[10] Eiki Iyoda, Hosho Katsura, and Takahiro Sagawa, *Phys. Rev. D* **98**, 086020 (2018).

## 12 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, giant magnetoresistance, and magnetic anisotropies in transition-metal oxides, ferromagnetic compounds [2], and their thin films and interfaces.

[1] M. Horio, Y. Krockenberger, K. Yamamoto, Y. Yokoyama, K. Takubo, Y. Hirata, S. Sakamoto, K. Koshiishi, A. Yasui, E. Ikenaga, S. Shin, H. Yamamoto, H. Wadati, and A. Fujimori: Electronic structure of Ce-doped and -undoped  $\text{Nd}_2\text{CuO}_4$  superconducting thin films studied by hard x-ray photoemission and soft x-ray absorption spectroscopy, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 257001 (2018).

[2] M. Suzuki, B. Gao, K. Koshiishi, S. Nakata, K. Hagiwara, C. Lin, Y. X. Wan, H. Kumigashira, K. Ono, Sungmo Kang, Seungjin Kang, J. Yu, M. Kobayashi, S.-W. Cheong, and A. Fujimori: *Phys. Rev. B* **99**, 161401(R) (2019).

## 13 Hasegawa Group

**Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics**

**Members: Shuji HASEGAWA and Ryota AKIYAMA**

Surfaces/interfaces of materials and atomic-layer 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 including superconductivity, (2) atomic/electronic structures, (3) phase transitions, (4) spin states and spintronics, and (5) 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 atomic-layer materials such as graphene and transition metal dichalcogenides. We use various kinds of ultrahigh-vacuum experimental techniques, such as electron diffraction, scanning electron microscopy(SEM), scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy(PES), *in-situ* four-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-four-point probes, and surface magneto-optical effects apparatuses. Main results in this year are as follows.

### (1) Surface electronic/spin transports:

- Interface superconductivity at topological crystalline insulator/trivial semimetal junction
- Anomalous Hall effect at interface between topological insulator and ferromagnetic insulator
- 2D superconductivity at monolayer alloy metallic surface superstructures and by proximity effect
- Spin injection by circularly polarized light irradiation on topological insulators
- Superconducting Graphene with intercalation
- CDW and transport at transition metal dichalcogenides

### (2) Surface phases and atomic-layer materials:

- Epitaxial growth of blue Phosphor atomic layers
- Structure dynamics of Ca-intercalated bilayer graphene observed by low-energy-electron microscopy

### (3) New methods:

- Fabrication of UHV-SQUID system to detect Meissner effect of atomic-layer superconductors
- Fabrication of a pure-spin-current injection/detection probe

- [1] Y. Nakata, K. Sugawara, S. Ichinokura, Y. Okada, T. Hitosugi, T. Koretsune, S. Hasegawa, T. Sato, and T. Takahashi: *Observation of Anisotropic Band Splitting in Monolayer  $\text{NbSe}_2$ : Implications for Superconductivity and Charge Density Wave*, *npj 2D Materials and Applications* **2**, 12 (6pp) (May, 2018).
- [2] T. Hirahara and S. Hasegawa: *Comment on "Quantum transport in the surface states of epitaxial  $\text{Bi}(111)$  thin films"*, *Phys. Rev. B* **97**, 207401 (3pp) (May, 2018).
- [3] R. Akiyama, K. Sumida, S. Ichinokura, A. Kimura, K. Kokh, O. Tereshchenko, and S. Hasegawa: *Shubnikov-de Haas oscillations of p and n-type topological insulator  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$* , *J. Phys.: Cond. Matt.* **30**, 265001 (8pp) (Jun, 2018).
- [4] Y. Endo, S. Ichinokura, R. Akiyama, A. Takayama, K. Sugawara, T. Takahashi, K. Nomura, and S. Hasegawa: *Weak localization in bilayer graphene with Li-intercalation/desorption*, *J. Phys.: Cond. Matt.* **30**, 305701 (7pp) (Jul, 2018).

- [5] Y. Shiomi, K. T. Yamamoto, R. Nakanishi, T. Nakamura, S. Ichinokura, R. Akiyama, S. Hasegawa, and E. Saitoh: *Efficient Edelstein effects in one-atom-layer Tl-Pb compound*, Appl. Phys. Lett. **113**, 052401 (4pp) (Aug, 2018).
- [6] T. Nakamura, H. Kim, S. Ichinokura, A. Takayama, A.V. Zotov, A.A. Saranin, Y. Hasegawa, and S. Hasegawa: *Unconventional Superconductivity in the single-atom-layer alloy Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl, Pb)*, Phys. Rev. B **98**, 134505 (6pp) (Oct, 2018) (Editors · suggestion).
- [7] H. Toyama, H. Huang, T. Nakamura, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, A. Takayama, A. V. Zotov, A. A. Saranin, and S. Hasegawa: *Thickness dependence of surface structure and superconductivity in Pb atomic layers*, J. Phys. Soc. Japan **87**, 113601 (5pp)(Oct, 2018).
- [8] H. Toyama, H. Huang, T. Nakamura, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, A. Takayama, A. V. Zotov, A. A. Saranin, and S. Hasegawa: *Superconductivity of Pb Ultrathin Film on Ge(111) Surface*, Defect and Diffusion Forum **386**, 80-85 (Sep, 2018).
- [9] T. Nakamura, A. Takayama, R. Hobar, D.V. Gruznev, A.V. Zotov, A.A. Saranin, S. Hasegawa: *Superconducting single-atomic-layer Tl-Pb compounds on Ge(111) and Si(111) surfaces*, Applied Surface Science **479**, 679-684 (Feb, 2019).
- [10] S. Hasegawa: *Charge and Spin Transport on Surfaces and Atomic Layers Measured by Multi-Probe Techniques*, J. Phys.: Cond. Matt. **31**, 223001 (12pp) (Mar, 2019) (Topical Review).
- [11] S. Ichinokura and S. Hasegawa: *Chapter 6: Transport Measurement; Carrier Transport*, in Monatomic Two-Dimensional Layers, ed. I. Matsuda, (Elsevier, Jan, 2019) pp.159-197.

## 14 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 frustrations in two dimensional (2D) helium three ( $^3\text{He}$ ), four ( $^4\text{He}$ ) 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  $\mu\text{K}$ , 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 $^3\text{He}$ :

Quantum spin liquid (QSL) is a state where the spins at each lattice site are not frozen even at  $T = 0$ . Two dimensional  $^3\text{He}$  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)  $^3\text{He}$  atom forms triangular lattice with strong geometrical frustrations. (3) The interaction ( $J_p$ ) between  $^3\text{He}$  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 recently focusing on a monatomic layer of  $^3\text{He}$  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  $0.16 < T < 90$  mK, and in wide areal density range of  $0.1 \leq \rho \leq 13.63$   $\text{nm}^{-2}$ . Since the areal density of 2D HD is smaller than that of  $^3\text{He}$  and  $^4\text{He}$ , one can obtain larger  $|J_p|$  for 2D  $^3\text{He}$  on bilayer HD than on  $^3\text{He}$  and  $^4\text{He}$ . 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  $^3\text{He}$ . A higher  $\rho$  of  $\rho > 5.05$   $\text{nm}^{-2}$ , a C2-like phase with  $\sim 17$  % compressibility was observed. This C2-like 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. We have recently succeeded to observe finite frequency shift in torsional

oscillator measurements which suggests a possible superfluidity of this quantum liquid crystal. On the other hand, at  $\rho = 4.74 \text{ nm}^{-2}$ , a novel QSL with exotic elementary excitations is observed, which is named as C3 phase. At the C3 phase, the  $C$  and  $\chi$  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 nanoribbon (z-GNR). At the edge of zigzag structure, electrons are strongly localized along the edge to form a zigzag edge state (zz-ES). It is expected that the spin degeneracy would be lifted and ferromagnetically spin polarized edge state appears under an electron-electron interaction for z-GNR through anti-ferromagnetic coupling between edges.

To obtain such zigzag edges and z-GNR, we tried hydrogen-plasma etching of graphite surfaces. By exposing graphite to hydrogen-plasma under high temperatures, hexagonal nanopits with monatomic depth are 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, and partial pressure of hydrogen. Moreover, and most importantly, the edges of the nanopit are aligned to the zigzag direction in atomic scale. Therefore, one can obtain z-GNR in between two hexagonal nanopits. By observing  $dI/dV$  spectra across such z-GNRs, we have succeeded to observe the spin polarized zz-ES as double peak structure in the local density of states. The double peak consists of sharp and dull peaks, and the peak separation becomes smaller for wider z-GNR.

# 15 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.

To explore exotic physical phenomena related to spin at a semiconductor surface, magnetic-atom induced two dimensional electron systems are investigated by using low-temperature scanning tunneling microscopy and spectroscopy combined with transport measurements.

### 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  $H_{\parallel} = 14 \text{ T}$ , 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.

To observe exotic superconducting states in multilayer systems, we fabricated bilayer and trilayer films on the cleaved surface of an insulating GaAs substrate, which comprise one-atomic-layer Pb films with

a strong Rashba spin-orbit interaction caused by the breaking of the space inversion symmetry. A steep upturn was observed in the measurement of the temperature dependence of the parallel upper critical magnetic field. From the numerical calculations performed using the Bogoliubov-de Gennes equations, we found that this upturn corresponds to the crossover from the complex stripe phase to the helical phase in the multiple one-atomic-layer films.

In addition to the study in the multilayer systems, we have also studied nonreciprocal charge transport in one-atomic-layer Pb superconductors. The antisymmetrized second harmonic magnetoresistance is observed below the superconducting transition temperature, which suggests that the nonreciprocal effect occurs in one-atomic-layer Pb films grown on the cleaved surface of GaAs.

## 16 Shimano Group

**Research Subjects:** Optical and Terahertz Spectroscopy of Condensed Matter

**Member:** Ryo Shimano and Naotaka Yoshikawa

We study light-matter interactions and many body quantum correlations in solids, aiming at the light-control of many-body quantum phases. In order to investigate the role of electron and/or spin correlations in the excited states as well as in the ground states, we focus on the low energy electromagnetic responses, in particular in the terahertz (THz) (1THz $\sim$ 4meV) frequency range where various quasi-particle excitations and various collective excitations exist. The research summary in this year is as follows.

- 1. Photoexcited dynamics of superconductivity in  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$**  We investigated the photoexcited dynamics of archetypical single-layer cuprate superconductor,  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ , by using optical pump-THz probe spectroscopy. At below the critical temperature  $T_c$ , the photoexcitation results in continuous redshift of the Josephson plasma resonance, which indicates the suppression of superconductivity. The spectral behavior in the quasi-equilibrium state after the photoexcitation was well described by the pump-induced heating effect. We also revealed that the analysis method which has been conventionally used in optical pump and terahertz probe experiments can cause a serious artifact when there is a substantial penetration depth mismatch between the THz pump and optical probe in superconducting phase.
- 2. Observation of Higgs mode in multiband superconductors:** We have investigated the Higgs mode in multiband superconductors both experimentally and theoretically. Recently, it has been theoretically demonstrated that the nonlinear terahertz response of the Higgs mode is significantly enhanced by nonmagnetic impurity scattering. However, its effect on the Leggett mode, a collective mode of the relative phase difference of order parameters in a multiband system, has been not elucidated. To clarify contributions from these collective modes, we theoretically examined nonlinear terahertz response of dirty superconductors by a density matrix method, and found that nonlinear response of the Leggett mode is not enhanced by the nonmagnetic impurity scattering. Consequently, we elucidated that the nonlinear optical responses in the gap frequency region are dominated by the Higgs mode. Experimentally, we investigated the collective mode of multiband superconductor,  $\text{MgB}_2$  and  $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ . In  $\text{MgB}_2$  a clear resonance was observed in the temperature dependence of THz third harmonic generation, which is most likely attributed to the Higgs mode. In  $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ , we succeeded in observing the forced oscillation of Higgs mode by THz pump-THz probe spectroscopy. Anti-phase oscillation of the two Higgs modes associated with the two bands were observed, suggesting a strong interband coupling character of  $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$  superconductor.
- 3. Infrared activation of Higgs mode in superconducting NbN by supercurrent injection:** Higgs mode in superconductors is distinct from charge or spin fluctuation and thus is typically not linearly coupled to the electromagnetic field. However we experimentally demonstrated that, in the presence of dc supercurrent, the Higgs mode becomes infrared active and is directly observed in the linear optical conductivity measurement. We observed a sharp resonance peak at the superconducting gap energy in the optical conductivity spectrum of thin NbN films under the supercurrent injection over a wide temperature range below the critical temperature.

**References**

- [1] S. Nakamura et al.,: Infrared activation of Higgs mode by supercurrent injection in a superconductor NbN, arXiv:1809.10335
- [2] Hao Chu et al.: New collective mode in superconducting cuprates uncovered by Higgs spectroscopy, arXiv:1901.06675
- [3] Y. Murotani et al.,: Nonlinear optical response of collective modes in multiband superconductors assisted by nonmagnetic impurities, arXiv:1902.01104
- [4] N. Yoshikawa et al.,: Charge carrier dynamics of FeSe thin film investigated by terahertz magneto-optical spectroscopy, arXiv:1903.00897

**17 Takagi-Kitagawa Group****Research Subjects:** Physics of Correlated Electron Systems**Member:** Hidenori Takagi, Kentaro Kitagawa, Naoka Hiraoka

We are exploring new compounds with transition metal elements in which novel, exotic and/or functional electronic phases are realized. Our main targets in FY2018 included, 5d complex Ir oxides with interplay of electron correlations and strong spin orbit coupling, spin liquids, anti-perovskites with Dirac electrons, and excitonic ground states.

**Realization of new spin liquid and Kitaev physics:**

Realization of spin liquid, where quantum spins fluctuates at absolute zero, should be a milestone in the field of quantum spin physics. After a theoretical achievement of the exactly solvable spin liquid state on a honeycomb lattice, by Alexei Kitaev, a materialization of this Kitaev Honeycomb Model (KHM) has been intensively pursued. One dimensional spin liquid has been commonly accepted, while in two or three dimensions, typical known frustrated quantum spin liquid materials, like triangular compounds, is not based on an exactly solvable lattice model. We have been focussed on a two-dimensional honeycomb iridate,  $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ , and discovered that  $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  is indeed spin liquid, as the first material of such a liquid, down to 50 mK by specific heat, magnetic susceptibility, and nuclear magnetic resonance experiments. This key result was published this year.

The key ingredient to realize KHM is bond-dependent anisotropic Ising-like interactions, and it was suggested that material engineering for spin-orbit coupled  $J_{\text{eff}} = 1/2$  quantum pseudo spins of Ir on (hyper-)honeycomb lattice would be a main route. Two kinds of Majorana fermions represent KHM and they are particles on the exactly solved ground state. Since our discovery is an only spin liquid on Kitaev system, and no report was given to proof two Majorana particles. We will pursue identification of elementary excitations in  $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  this year. We preliminarily succeeded in fabricating a single crystal of this compound, which should open a way to investigate a pristine thermally/artificially activated Majorana excitations or local excitations near an implanted defect, which can be evaluated rigorously for KHM. We expect that the latter effects can be caught by our NMR spectroscopy technique.

**Three-dimensional Dirac electron systems:**

We have demonstrated a realization of three-dimensional Dirac electrons in anti-perovskite oxide  $\text{Sr}_3\text{PbO}$ , which is evidenced by the quantum-limit characters in the magnetoresistance

under high magnetic fields. This year, we have carried out  $^{207}\text{Pb}$  NMR experiments on single-crystal samples with different carrier densities to establish Dirac-type dispersions. It was found that the temperature dependence of NMR relaxation rate certainly reflects three-dimensional Dirac-type density of states. Chiral anomaly is a phenomenon peculiar to this quantum-limit physics, and we have found a sign reversal of magnetoresistance with respect to direction of applied magnetic field. The anisotropic transport caused by magnetic field needs to be further considered in relation to the chiral anomaly and current jetting effect.

The semi-metallic  $\text{A}\text{IrO}_3$  ( $A=\text{Sr},\text{Ca}$ ) perovskites are predicted to have three dimensional Dirac-node electrons and heavier holes at the fermi level. We fabricated epitaxially grown  $\text{A}\text{Ir}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$  ( $A=\text{Sr},\text{Ca}$ ) on  $\text{SrTiO}_3(001)$  substrate to construct phase diagrams consisting of a magnetism phase, Dirac-node semimetal, and unknown physics in between. Substitution of Ir by Sn makes the system more insulating, and as a result, weak ferromagnetism appear. In these systems, namely, a competition between hopping and Coulomb repulsion can be well managed by a dilution of Ir ions or a distortion of Ir-O-Ir bond. Band structures at each phase and phase boundary are yet to be identified and will be investigated.

## 18 Hayashi Group

**Research Subjects: Quantum spintronics/optics**

**Member: Masamitsu Hayashi, Masashi Kawaguchi**

We are working on the physics of spin orbit materials. Our studies cover transport, magnetism, thermal and optical response of spin orbit heterostructures. Currently we put a particular focus on the strong correlations of spin, photon, magnon and phonons, which are mediated by the spin orbit interaction of the system, and look for the physics that can be applied to quantum information processing.

- Spin current generation
  - Anomalous spin Hall magnetoresistance in Pt/Co bilayers.[2]
  - Optical Detection of Spin-Orbit Torque and Current-Induced Heating[5]
  - Spin Hall effect from hybridized 3d-4p orbitals[?]
- Chiral magnetism
  - Domain-Wall Resistance in Cofeb-Based Heterostructures with Interface Dzyaloshinskii-Moriya Interaction[3]
- Light-spin interaction
  - Circular photogalvanic effect in Cu/Bi bilayers[7]

- [1] C. Abert, H. Sepelri-Amin, F. Bruckner, C. Vogler, M. Hayashi, D. Suess, Back-Hopping in Spin-Transfer-Torque Devices: Possible Origin and Countermeasures. *Phys. Rev. Appl.* 9, 054010 (2018).
- [2] M. Kawaguchi, D. Towa, Y.-C. Lau, S. Takahashi, M. Hayashi, Anomalous spin Hall magnetoresistance in Pt/Co bilayers. *Appl. Phys. Lett.* 112, 202405 (2018)
- [3] Y. Ishikuro, M. Kawaguchi, Y. C. Lau, Y. Nakatani, and M. Hayashi, Domain-Wall Resistance in Cofeb-Based Heterostructures with Interface Dzyaloshinskii-Moriya Interaction. *Appl. Phys. Express* 11, 073001 (2018).
- [4] R. Iguchi, A. Yagmur, Y. C. Lau, S. Daimon, E. Saitoh, M. Hayashi, and K. Uchida, Thermographic Measurements of Spin-Current-Induced Temperature Modulation in Metallic Bilayers. *Phys. Rev. B* 98 014402 (2018).
- [5] Y. Marui, M. Kawaguchi, and M. Hayashi, Optical Detection of Spin-Orbit Torque and Current-Induced Heating. *Appl. Phys. Express* 11, 5 093001 (2018).

- [6] S. Sumi, H. Awano, and M. Hayashi, Interference Induced Enhancement of Magneto-Optical Effect in Pt/TbCo Hetero-Structured Films. *Crystal* 8, 377 (2018).
- [7] H. Hirose, N. Ito, M. Kawaguchi, Y. C. Lau, and M. Hayashi, Circular photogalvanic effect in Cu/Bi bilayers. *Appl. Phys. Lett.* 113, 222404 (2018).
- [8] S. Isogami, J. Uzuhashi, T. Ohkubo and M. Hayashi, Crystalline-structure-dependent magnetoresistance in ferromagnetic metal/conducting amorphous oxide heterostructures. *Phys. Rev. Mater.* 3, 024408 (2019).
- [9] Y.-C. Lau, H. Lee G. Qu, K. Nakamura and M. Hayashi, Spin Hall effect from hybridized 3d-4p orbitals. *Phys. Rev. B* 99, 064410 (2019).

## 19 Theoretical Astrophysics Group

**Research Subjects:** Observational Cosmology, Extrasolar Planets, Star Formation, and high-energy astrophysics

**Member:** Yasushi Suto, Naoki Yoshida, Kazumi Kashiyama, & 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 planets, star formation and high-energy astrophysics.

“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 Planck, Hubble Space Telescope, ALMA, and wide-field galaxy surveys such as Subaru Hyper-Suprime-Cam survey are 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 generation stars were born, which illuminated 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 simulations of structure formation in the early universe on supercomputers. Direct and indirect observational signatures are explored considering future radio and infrared telescopes.

Can we discover a second earth somewhere in the universe? This puzzling question used to be 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 2017. Though most of the confirmed planets turned out to be gas giants, the number of rocky planet candidates was steadily increasing, which therefore should give the affirmative answer to the above question. Our approaches towards that exciting new field of exoplanet researches include the spin-orbit misalignment statistics of the Rossiter-MacLaughlin effect, simulations of planet-planet scattering, simulations of 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;

2018

- Stellar Inclinations from Asteroseismology and their Implications for Spin-Orbit Angles in Exoplanetary Systems
- Numerical Investigations on Explosion Mechanisms of Core-collapse Supernovae
- Cosmology and Cluster Astrophysics with Weak Gravitational Lensing and the Sunyaev-Zel'dovich Effect
- Photoevaporation of Protoplanetary Disks and Molecular Cloud Cores in Star-Forming Regions
- Numerical Algorithms for Astrophysical Fluid Dynamics
- Radial velocity modulation of an outer star orbiting an unseen inner binary: analytic perturbation formulae in a three-body problem to search for wide-separation black-hole binaries
- The distribution and physical properties of emission line galaxies in the early universe
- Diversities out of the observed proto-planetary disks: migration due to planet-disk interaction and architecture of multi-planetary systems

2017

- Formation of supermassive stars and black holes via direct gravitational collapse of primordial gas clouds
- Formation and growth of massive black holes in the early universe
- Measuring Dynamical Masses of Galaxy Clusters with Stacked Phase Space
- GCM simulation of Earth-like planets for photometric lightcurve analysis
- Tidal disruption events of white dwarfs caused by black holes
- Radio, Submillimetre, and Infrared Signals from Embryonic Supernova Remnants

2016

- Evolution and Statistics of Non-sphericity of Galaxy Clusters from Cosmological Simulations
- Exploring the Architecture of Transiting Exoplanetary Systems with High-Precision Photometry
- Searching for Exoplanetary Rings via Transit Photometry: Methodology and its Application to the Kepler Data
- Superluminous supernova search with the Hyper Supreme-Cam Subaru Strategic Program
- Pulsar-driven supernova and its possible association with fast radio bursts
- Formation of massive black hole binaries in high-z universe

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

## 20 Murao Group

**Research Subjects:** Quantum Information Theory

**Member:** Mio Murao and Akihito Soeda

Quantum mechanics allows a new type of information represented by quantum states which may be in a superposition of 0 and 1 state. Quantum information processing seeks to perform tasks which are impossible or not effective with the use of conventional classical information, by manipulating quantum states to the limits of quantum theory. Examples are quantum computation, quantum cryptography, and quantum communication.

This year, our group consisted of two faculty members, Mio Murao (Professor), Akihito Soeda (Assistant Professor), 2 postdoctoral researchers—Marco Túlio Coelho Quintino (JSPS foreign postdoctoral fellow until November and specially appointed researcher since March) and Shojun Nakayama (specially appointed researcher) —, and 5 graduate students—Ryosuke Sakai (D3), Hayata Yamasaki (D3), Qingxiuxiong Dong (D1), Oscar Bulancea Lindvall (USTEP graduate student from KTH Royal Institute of Technology), and Tian-Jiao Yin (research student). Our projects engaged in the academic year of 2018 were the following:

- Distributed quantum information processing
  - Necessary amount of quantum communication for distributed encoding and decoding of quantum information by H. Yamasaki and M. Murao
  - Quantum communication cost for quantum state merging by H. Yamasaki and M. Murao
  - Distributedly encoded quantum information through quantum state merging by H. Yamasaki and M. Murao
  - Distributed generation of multipartite entangled state under restricted quantum memories by H. Yamasaki and M. Murao with B. Kraus, W. Dür, and A. Pirker at the University of Innsbruck
  - Quantum communication cost for quantum state exchange with quantum side information by H. Yamasaki with Yonghe Lee and Soojoon Lee at Kyung Hee University, R. Takagi at Massachusetts Institute of Technology, and G. Adesso at Nottingham University.
- Higher-order quantum operations
  - Characterization of higher-order operations with indefinite causal order by W. Yokojima, M.T. Coelho Quintino, A. Soeda, and M. Murao
  - Universal quantum algorithm to invert a blackboxed unitary operation by M.T. Coelho Quintino, Q. Dong, A. Soeda, and M. Murao
  - Controllization of higher-order operations and application to universal controllization of unitary gates by S. Nakayama, Q. Dong, and M. Murao
- Foundations on quantum mechanics

- Quantum process with indefinite causal order and universal inversion of unitary gates by M.T. Coelho Quintino, Q. Dong, A. Soeda, and M. Muraio
- Device-independent tests of structures of measurement incompatibility by M.T. Coelho Quintino with C. Budroni at Institute for Quantum Optics and Quantum Information, A. Cabello at Universidad de Sevilla, and D. Cavalcanti at The Institute of Photonic Sciences (ICFO)
- Semi-device-independent certification of indefinite causal order by M.T. Coelho Quintino with J. Bavaresco and Č. Brukner at Institute for Quantum Optics and Quantum Information, and M. Araújo at Institute for Theoretical Physics
- Quantum information processing with hybridized quantum systems
  - Robust control of two-qubit gates under inherent Hamiltonian dynamics by R. Sakai, A. Soeda, and M. Muraio with D. Burgarth at Aberystwyth University
  - Thermal equilibration algorithm exploiting higher-order detailed balance of energy transition by S. Nakayama, O. Lindvall, and M. Muraio

Please refer our webpage: <http://www.eve.phys.s.u-tokyo.ac.jp/indexe.htm> for more details. The publication list for the year is available at the end of the Japanese version of the group research summary.

## 21 Ueda Group

**Research Subjects:** Bose-Einstein condensation, fermionic superfluidity, topological phenomena, reservoir engineering, information thermodynamics, quantum information, measurement theory

**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 coarsening dynamics in spinor BECs, non-unitary dynamics in driven-dissipative systems, Efimov physics and impurity problems under the control of an atomic interaction strength, quantum Hall effect and vortex lattices 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 formulations of state reduction dynamics and Hamiltonian estimation in light of information flow under measurements and feedback controls. We list our main research subjects in FY2018 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms
  - Quantum many-body dynamics under measurement backaction [1, 2]
  - Variational approach to quantum impurity problems in and out of equilibrium [3, 4]
  - Impurity-induced multibody resonances in a Bose gas [5, 6]
  - Collective modes of vortex lattices in two-component BECs under synthetic gauge fields [7]

- Quantum information, quantum measurement, and foundation of statistical mechanics
    - Classification of topological phases in non-Hermitian systems [8, 9]
    - Bulk-edge correspondence in non-Hermitian topological systems [10, 11]
    - Topological entanglement-spectrum crossing in quench dynamics [12]
- [1] Y. Ashida and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **120**, 185301 (2018).
- [2] Y. Ashida, K. Saito, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **121**, 170402 (2018).
- [3] Y. Ashida, T. Shi, M. C. Banuls, J. I. Cirac, and E. Demler, Phys. Rev. Lett. **121**, 026805 (2018).
- [4] Y. Ashida, T. Shi, M. C. Banuls, J. I. Cirac, and E. Demler, Phys. Rev. B **98**, 024103 (2018).
- [5] Z.-Y. Shi, S. M. Yoshida, M. M. Parish, and J. Levinsen, Phys. Rev. Lett. **121**, 243401 (2018).
- [6] S. M. Yoshida, Z.-Y. Shi, J. Levinsen, and M. M. Parish, Phys. Rev. A **98**, 062705 (2018).
- [7] T. Yoshino, S. Furukawa, S. Higashikawa, and M. Ueda, New J. Phys. **21**, 015001 (2019).
- [8] Z. Gong, Y. Ashida, K. Kawabata, K. Takasan, S. Higashikawa, and M. Ueda, Phys. Rev. X **8**, 031079 (2018).  
See also Viewpoint: Physics **11**, 96.
- [9] K. Kawabata, S. Higashikawa, Z. Gong, Y. Ashida, and M. Ueda, Nat. Commun. **10**, 297 (2019). Selected as Editors' Highlights.
- [10] K. Kawabata, Y. Ashida, H. Katsura, and M. Ueda, Phys. Rev. B **98**, 085116 (2018). Selected as Editors' Suggestion.
- [11] K. Kawabata, K. Shiozaki, and M. Ueda, Phys. Rev. B **98**, 165148 (2018).
- [12] Z. Gong and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **121**, 250601 (2018).

## 22 Yokoyama (J) Group

### Research Subjects: Theoretical Cosmology and Gravitation

#### Members: Jun'ichi Yokoyama and Kohei Kamada

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 have also been working on gravitational wave data analysis to prepare for completion of KAGRA. Below is the list of topics studied during the academic year 2018.

#### Early Universe Cosmology

- Higgs-  $R^2$  inflation
- Effects of phase transition during inflation on the primordial perturbations
- Anisotropic inflation
- Creation of the Universe from inhomogeneous fields
- Long-term dynamics of axion strings
- Electroweak symmetry breaking in the Twin Higgs models
- Gravitational reheating in the inflation models without inflaton oscillation
- Dark matter from the gravitational reheating
- Higgs vacuum instability around the compact objects
- Micro blackhole dark matter
- Reheating of the Universe triggered by the Higgs field
- Magnetogenesis and baryogenesis through the chiral anomaly

**Astroparticle Physics**

- Indirect detection of axions at the magnetosphere of neutron stars

**Observational Cosmology**

- Constraints on primordial non-Gaussianity through mini halo

**Gravitational Waves**

- Test of quantum gravity by the observation of the ringdown gravitational waves
- Independent component analysis with iKAGRA data

## 23 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

In Takase Group, we perform experiments on the TST-2 spherical tokamak ( $R_0 = 0.36$  m,  $a = 0.23$  m,  $I_p < 120$  kA) at the Kashiwa Campus to develop physics understanding and technology to realize fusion energy. Spherical tokamaks are able to achieve high  $\beta$ , but non-inductive plasma current start-up is a formidable challenge. We collaborate with other fusion experiments within Japan and abroad, including JT-60SA, LHD, LATE, and QUEST.

Our present focus on TST-2 is the establishment of plasma current ramp-up method using lower-hybrid waves (LHW). In FY2018, we have used the antenna installed at the top-side and the outboard-side of the plasma. To better understand the wave physics, we have installed new magnetic probes and interferometer chords. We have also made modification to the top-launch antenna to extend the plasma size.

When the LHW was launched from the top-side of the plasma, strong up-shift of the poloidal wavenumber was expected above the plasma current of 16 kA for the TST-2 parameters. In the experiment, dramatic increase of soft X-ray radiation was observed which may be consistent with the strong up-shift in the wavenumber. Hard X-ray radiation have been measured to study the dynamics of lower-hybrid wave driven fast electrons. A new detector using LYSO was installed and the time resolution was improved by a factor of 4 compared to the previous NaI based detectors. With power modulation experiment, existence of barely confined, and thus quickly lost fast electrons were suggested. An interferometer chord was added at  $Z = 0.3$  m, above the midplane. The density measured by this chord decreased by 40 % immediately after the RF power turn on whereas density change at the midplane chord was negligible. This may be an indication of density reduction due to the ponderomotive force. Magnetic probes were used to study lower-hybrid wave propagation. The newly installed probes at the center stack showed drastically different wave propagation characteristics between the top-launch and the outboard-launch antennas, partially consistent with the ray-tracing calculations.

Ohmic discharges were also studied. Microwave imaging reflectometry (MIR) was used to observe the MHD fluctuations leading to internal reconnection events. It was found that the peak of the density fluctuation intensity measured by MIR occurred slightly (100–400  $\mu$ s) before those of the magnetic probes and the radiation measurements.

AC Ohmic coil operation attempts to reduce the size of the Ohmic coil by applying AC current instead of DC current. It has been shown that AC Ohmic operation can successfully pre-ionize the plasma, which in turn, can be ramped up using LHW. Theoretical model to better describe the pre-ionization process was developed.

Several diagnostic developments were performed in FY2018. The stray-light of the Thomson scattering diagnostic was quantitatively measured and the source was identified. By installing four apertures at the critical locations along beam line, the stray-light was reduced to 4 % of the previous value.

LYSO based hard X-ray imaging diagnostic was designed to identify the source of hard X-ray radiation more accurately. Polarimeter is being developed to measure the internal current profile which is hard to estimate only with external magnetic diagnostics. Initial measurement was performed and polarimeter phase was successfully measured, but reduction of noise is necessary.

As a collaboration, Thomson scattering on QUEST is being developed. Thomson scattering measurement was performed for ECH driven discharges. For 28 GHz ECH driven discharge, the parallel refractive index was scanned. Much higher temperature was achieved at lower parallel refractive index suggesting bulk heating.

Soft X-ray imaging system is being developed as a collaboration with PPPL. In FY2018, design optimization for a DIII-D H-mode discharge and a JT-60SA neutral beam driven discharge was performed. A similar system is planned to be installed on TST-2 and the design is being finalized.

## 24 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) Establishing the method to verify the scaling law in the absorbing phase transition [2]
  - (2) Non-equilibrium dynamics in large-degree of freedom system including electroconvection of liquid crystals and absorbing phase transition
2. Active matters
  - (1) Self-propulsion of colloidal particle under AC fields
  - (2) Collective motion of self-driven colloidal particles
  - (3) Collective motion of filamentous proteins
3. Biological systems
  - (1) Collective migration of neural stem cells on the restricted range of adherable substrate
  - (2) Theory on mechanics of cellular dynamics and morphogenesis [1, 3, 4]

- [1] T. Hiraiwa and R. R. Netz: Systematic bottom-up theory for the viscoelastic response of worm-like-chain networks, *Europhysics Letters* **123**, 58002 (2018).
- [2] K. Tamai and M. Sano: How to experimentally probe universal features of absorbing phase transitions using steady state, *J. Stat. Mech.* **2018**, 123207 (2018).
- [3] T. Hiraiwa, F.-L. Weng, T. Shibata and E. Kuranaga: Mathematical Modeling of Tissue Folding and Asymmetric Tissue Flow during Epithelial Morphogenesis, *Symmetry* **11**, 113 (2019).
- [4] T. Hiraiwa: Two types of exclusion interactions for self-propelled objects and collective motion induced by their combination, *Physical Review E* **99**, 012614 (2019).
- [5] T. Yamamoto, and M. Sano: Hydrodynamic rotlet dipole driven by spinning chiral liquid crystal droplets, *Physical Review E*, **99**, 022704 (2019).

## 25 Yamamoto Group

**Research Subjects:** Millimeter- and submillimeter-wave Astronomy, Star and Planet Formation, Chemical Evolution of Interstellar Molecular Clouds

**Member:** Satoshi Yamamoto and Yoko Oya

Molecular clouds are birthplaces of new stars and planetary systems, which are being studied extensively as an important target of astronomy and astrophysics. Although the main constituent of molecular clouds is a hydrogen molecule, various atoms and molecules also exist as minor components. The chemical composition of these minor species reflects formation and evolution of molecular clouds as well as star formation processes. It therefore tells us how each star has been formed. We are studying star formation processes from such an astrochemical viewpoint.

Since the temperature of a molecular cloud is 10 ? 100 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. Particularly, there exist many atomic and molecular lines in the millimeter/submillimeter wave region, and we are observing them toward formation sites of Solar-type protostars mainly with ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array).

So far, it has well been recognized that an envelope/disk system of a Solar-type protostar shows a significant chemical diversity. One distinct case is so called Warm Carbon Chain Chemistry (WCCC), which is characterized by rich existence of various unsaturated carbon-chain molecules such as C<sub>2</sub>H, C<sub>4</sub>H, and HC<sub>5</sub>N. A prototypical source is L1527 in Taurus. Another distinct case is so called hot corino chemistry, which is characterized by rich existence of various saturated organic molecules such as CH<sub>3</sub>OH, HCOOCH<sub>3</sub>, and C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>CN. A prototypical source is IRAS 16293-2422 in Ophiuchus. Recently, sources having the both characteristics have also be found. Such chemical diversity would reflect the star formation history of each source, more specifically, a duration time of the starless core phase.

We are now studying how such chemical diversity is brought into protoplanetary disks by using ALMA. For the WCCC source L1527, we have found that carbon-chain molecules only exist in an infalling-rotating envelope outside its centrifugal barrier ( $r = 100$  AU), while SO preferentially exists around the centrifugal barrier. For the hot corino source IRAS 16293-2422, OCS traces an infalling-rotating envelope, while saturated organic molecules such as CH<sub>3</sub>OH and HCOOCH<sub>3</sub> trace the centrifugal barrier. Hence, chemical compositions drastically change across the centrifugal barrier of the infalling gas. Since a protostellar disk is formed inward of the centrifugal barrier, the chemical diversity at an envelope scale ( $\sim 1000$  au) is indeed inherited in the disk forming region ( $\sim 100$  au). Then, what is the initial chemical condition of the Solar System? Is it a common occurrence in our Galaxy? To answer these questions, extensive ALMA observations 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. The receiver equipped with this HEB mixer is now used for laboratory spectroscopy of interstellar molecules at RIKEN in collaboration with Dr. Nami Sakai.

[1] Oya, Y. et al. Infalling-Rotating Motion and Associated Chemical Change in the Envelope of IRAS 16293-2422 Source A Studied with ALMA, *Astrophys. J.* bf 824, 88 (2016).

[2] Imai, M. et al. Discovery of Hot Corino in the Bok Globule B335, *Astrophys. J. Lett.* **830**, L37 (2016).

[3] Okoda, Y. et al. The Co-evolution of Disks and Stars in Embedded Stages: The Case of the Very-low-mass Protostar IRAS 15398-3359, *Astrophys. J. Lett.* **864**, L25 (2018).

## 26 Sakai (Hirofumi) Group

**Research Subjects:** Experimental studies of atomic, molecular, and optical physics

**Members:** 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) Electron-wave-packet dynamics extracted from the ellipticity dependence of high-order harmonic generation in benzene molecules [4]**

We measure the ellipticity dependence of high-order harmonic intensities generated from benzene ( $C_6H_6$ ) molecules with and without an yttrium aluminum garnet (YAG) laser field. We successfully extract the expansion dynamics of the electron wave packet by analyzing the ellipticity dependence based on the semiclassical electron trajectory. Without the YAG laser pulse, we find that the ellipticity dependence reflects the expansion dynamics of the electron wave packet and the difference in highest occupied molecular orbital compared to nitrogen ( $N_2$ ) molecules. We also measure the ellipticity dependence under the YAG laser field and show that the difference in the ellipticity dependence with and without the YAG laser field is qualitatively explained by the harmonic-order-dependent efficiency of the sum and difference frequency generation, whose efficiency is higher as the harmonic order becomes higher.

**(2) Improving molecular orientation by optimizing relative delay and intensities of two-color laser pulses [5]**

We numerically explore molecular orientation dynamics with moderately intense nanosecond two-color laser pulses. It is believed that the nanosecond two-color pulse can adiabatically control the molecular orientation. However, in our simulation based on the time-dependent Schrödinger equation, which naturally includes nonadiabatic effects, the orientation dynamics shows clear deviation from the adiabatic approximation (AA) results, while the molecular alignment dynamics is in good agreement with the AA results. The nonadiabaticity is significantly influenced by three parameters, the intensities, and the relative delay of the two wavelengths. In this work, we clarify the reason behind the nonadiabaticity and provide the solution for achieving higher degrees of orientation.

- [1] Hiroyuki Shimada, Kazma Komatsu, Wataru Komatsubara, Tomoya Mizuno, Soichiro Miyake, Shinichirou Minemoto, Hirofumi Sakai, Takuya Majima, Shigeki Owada, Tadashi Togashi, Makina Yabashi, and Akira Yagishita, “Two- and three-photon double ionization of helium by soft x-ray free-electron laser pulses,” *J. Phys. B* **52**, 065602 (2019) (8 pages).
- [2] Shinichirou Minemoto, Hiroyuki Shimada, Kazma Komatsu, Wataru Komatsubara, Takuya Majima, Soichiro Miyake, Tomoya Mizuno, Shigeki Owada, Hirofumi Sakai, Tadashi Togashi, Makina Yabashi, Piero Decleva, Mauro Stener, Shota Tsuru, and Akira Yagishita, “Time-resolved photoelectron angular distributions from nonadiabatically aligned  $CO_2$  molecules with SX-FEL at SACLA,” *J. Phys. Commun.* **2**, 115015 (2018) (8 pages).
- [3] Hiroyuki Shimada, Shinichirou Minemoto, Kazma Komatsu, Wataru Komatsubara, Shintaro Yoshida, Takuya Majima, Tomoya Mizuno, Hirofumi Sakai, Shigeki Owada, Tadashi Togashi, Makina Yabashi, and Akira Yagishita, “Photoelectron spectroscopy of Rydberg excited states in singly charged molecular ions  $CS_2^+$  by NIR laser pulses,” *J. Phys. B* **51**, 225601 (2018) (8 pages).
- [4] Wataru Komatsubara, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Electron-wave-packet dynamics extracted from the ellipticity dependence of high-order harmonic generation in benzene molecules,” *Phys. Rev. A* **98**, 023416 (2018) (8 pages).
- [5] Je Hoi Mun and Hirofumi Sakai, “Improving molecular orientation by optimizing relative delay and intensities of two-color laser pulses,” *Phys. Rev. A* **98**, 013404 (2018) (8 pages).

## 27 Gonokami, Yumoto and Ideguchi Group

**Research Subjects:** Experimental studies on light-matter interaction in many-body quantum systems, optical phenomena in artificial nanostructures, and development of laser based coherent light sources

**Member:** Makoto Gonokami, Junji Yumoto and Takuro Ideguchi

We explore new aspects of many-body quantum systems and their exotic quantum optical effects by designing light-matter interactions. Our current target topics consist of a wide variety of matters, including excitons and electron-hole ensembles in semiconductors, antiferromagnetic materials and ultra-cold atomic gases. In particular, we have been investigating the phase of Bose-Einstein condensation of excitons, which has not been experimentally proven while considered as the ground state of an electron-hole ensemble. Based on quantitative spectroscopic measurements, the temperature and density of the excitations are determined in a quasi-equilibrium condition where they are trapped in a highly pure crystal kept below 1 K. We are now investigating a stable quantum degenerate state of dark excitons at the low temperature. We also study novel optical and terahertz-wave responses of artificial nanostructures fabricated by advanced technologies. Furthermore, a project has started for developing new coherent light sources that cover broad spectral range from terahertz to soft X-rays. The Foundation for Coherent Photon Science Research was established for the project in collaboration with RIKEN. 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 running at a high repetition rate (the facility is called "Photon Ring").

The group activities of this year are as follows:

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 new technology to measure laser ablation thresholds
  - 2.2. Fabrication of Moth-Eye THz Anti-Reflection Structures by Femtosecond Laser Processing
  - 2.3. Novel design and modeling technique for additive manufacturing of functional objects with arbitrarily graded internal structures
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. Label-free microscope using coherent Raman spectroscopy
  - 3.4. "Photon ring" project
  - 3.5. Institute for Photon Science Technology

## 28 Ando Group

**Research Subjects:** Experimental Relativity, Gravitational Wave, Laser Interferometer

**Member:** Masaki Ando and Yuta Michimura

Gravitational waves has a potential to open a new window onto the Universe and brings us a new type of information about catastrophic events such as supernovae or coalescing binary neutron stars or binary black holes; these information can not be obtained by other means such as optics, radio-waves or X-ray. Worldwide efforts are being continued in order to construct and improve detectors.

In Japan, we are constructing a large-scale cryogenic gravitational-wave antenna, named KAGRA, at Kamioka underground site. This underground telescope is expected to catch gravitational waves from the

coalescence of neutron-star binaries at the distance of 200 Mpc. 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
- Space laser interferometer, DECIGO
- Development of TOBA (Torsion Bar Antenna)
- High-precision experiments on relativity and opto-mechanics
  - Opto-mechanics experiments with triangular cavity
  - Optical levitation experiments
  - Experimental study of space isotropy

## Reference

- [1] KAGRA collaboration, KAGRA: 2.5 Generation Interferometric Gravitational Wave Detector, *Nature Astronomy* **3**, 35 (2019).
- [2] Nobuyuki Matsumoto, Seth B. Cataño-Lopez, Masakazu Sugawara, Seiya Suzuki, Naofumi Abe, Kentaro Komori, Yuta Michimura, Yoichi Aso, Keiichi Edamatsu, Demonstration of Displacement Sensing of a mg-Scale Pendulum for mm- and mg-Scale Gravity Measurements, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 071101 (2019).
- [3] KAGRA Collaboration, Vibration isolation system with a compact damping system for power recycling mirrors of KAGRA, Accepted in *Classical and Quantum Gravity* (2019).
- [4] T. Shimoda, Naoki Aritomi, Ayaka Shoda, Yuta Michimura and Masaki Ando, Seismic cross-coupling noise in torsion pendulums, *Phys. Rev. D* **97**, 104003 (2018).
- [5] KAGRA Collaboration, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Prospects for Observing and Localizing Gravitational-Wave Transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA, *Living Reviews in Relativity* **21**, 3 (2018).
- [6] Kentaro Komori, Yutaro Enomoto, Hiroki Takeda, Yuta Michimura, Kentaro Somiya, Masaki Ando, Stefan W. Ballmer, Direct approach for the fluctuation-dissipation theorem under nonequilibrium steady-state conditions, *Phys. Rev. D* **97**, 102001 (2018).
- [7] Yuta Michimura, Kentaro Komori, Atsushi Nishizawa, Hiroki Takeda, Koji Nagano, Yutaro Enomoto, Kazuhiro Hayama, Kentaro Somiya, Masaki Ando, Particle swarm optimization of the sensitivity of a cryogenic gravitational wave detector, *Phys. Rev. D* **97**, 122003 (2018).
- [8] Hiroki Takeda, Atsushi Nishizawa, Yuta Michimura, Koji Nagano, Kentaro Komori, Masaki Ando, Kazuhiro Hayama, Polarization test of gravitational waves from compact binary coalescences, *Phys. Rev. D* **98**, 022008 (2018).
- [9] Ippei Obata, Tomohiro Fujita, Yuta Michimura, Optical Ring Cavity Search for Axion Dark Matter, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 161301 (2018).

## 29 Bamba Group

**Research Subjects:** High-energy astrophysics, mainly utilizing X-ray observatories in orbit. Targets are, supernova remnants, black-holes, neutron-stars, magnetars, white dwarfs, cluster of galaxies, as well as thunder-cloud gamma-rays.

**Member:** Associate Prof: Aya Bamba, Assistant Prof: Hirokazu Odaka

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 targets for us. Supernova remnants are the origin of diversity of the universe, in the context of chemical evolution, cosmic ray acceleration, and the explosion mechanism of supernovae.

For further better observations, we develop a new generation X-ray satellites. We are members of XRISM, planned to launch on Japanese fiscal year of 2021, and charges the science management of galactic diffuse sources and softwares. We also study on future missions to measure the X-ray polarimetry, using CMOS sensors and coded apertures, which mission aims to launch 2020's.

We are also working on the enigmatic MeV gamma-ray emission from thunder-clouds themselves.

- [1] Hitomi Collaboration, A. Bamba, H. Odaka, et al., “Hitomi X-ray Observation of the Pulsar Wind Nebula G21.5 – 0.9” . PASJ, 70, 38 (2018)
- [2] K. Nakazawa, H. Odaka, et al., “Hard x-ray imager onboard Hitomi (ASTRO-H)” , Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 4, 021410 (2018)
- [3] H. Tajima, H. Odaka, et al., “Design and performance of Soft Gamma-ray Detector onboard the Hitomi (ASTRO-H) satellite” , Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 4, 021411 (2018)
- [4] R. Tomaru, C. Done, H. Odaka, S. Watanabe, T. Takahashi, “Monte Carlo simulations of the detailed iron absorption line profiles from thermal winds in X-ray binaries” , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 476, 1776 (2018)
- [5] H. Odaka, M. Asai, K. Hagino, T. Koi, G. Madejski, T. Mizuno, M. Ohno, S. Saito, T. Sato, D. Wright, et al. ”Modeling of proton-induced radioactivation background in hard X-ray telescopes: Geant4-based simulation and its demonstration by Hitomi’s measurement in a low Earth orbit”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 891, 92 (2018)
- [6] M. Kubota, H. Odaka, T. Tamagawa, T., Nakano, “Discovery of Redshifted He-like Iron Absorption Line from Luminous Accreting Neutron Star SMC X-1” , The Astrophysical Journal Letters, 868 L26 (2018)
- [7] M. Mizumoto, K. Ebisawa, M. Tsujimoto, C. Done, K. Hagino, H. Odaka, “X-ray reverberation lags of the Fe-K line due to AGN disc winds” , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 482, 5316 (2019)
- [8] H. Suzuki, A. Bamba, K. Nakazawa, Y. Furuta, M. Sawada, R. Yamazaki, K. Koyama, “Discovery of recombining plasma from the faintest GeV supernova remnant HB 21 and a possible scenario for cosmic rays escaping from supernova remnant shocks” , PASJ, 70, 75 (2018)
- [9] T. Kasuga, T. Sato, K. Mori, H. Yamaguchi, A. Bamba, “Asymmetric Expansion of the Fe ejecta in Kepler’s Supernova Remnant” , PASJ (2018)
- [10] Hitomi Collaboration, A. Bamba, H. Odaka, et al., “Detection of polarized gamma-ray emission from the Crab nebula with Hitomi Soft Gamma-ray Detector” , PASJ, 70, 113 (2018)
- [11] T. Tanaka, H. Yamaguchi, D.R. Wik, H. Uchida, Y. Uchiyama, F.A. Aharonian, A. Bamba, F. Castro, A.R. Foster, R. Petre, J. Rho, R.K. Smith, B.J. Williams, “NuSTAR Observations of the Supernova Remnant W49B: II. Nonthermal Aspect” , ApJL, 866, L26 (2018)
- [12] H. Yamaguchi, T. Tanaka, D.R. Wik, J. Rho, A.R. Foster, A. Bamba, R. Petre, B.J. Williams, H. Uchida, R.K. Smith, D. Castro, “NUSTAR OBSERVATIONS OF THE SUPERNOVA REMNANT W49B: I. THERMAL ASPECT” , ApJL, 868, 35 (2018)
- [13] Y. Wada, G. S. Bowers, T. Enoto, M. Kamogawa, Y. Nakamura, T. Morimoto, D. M. Smith, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, A. Matsuki, M. Kubo, T. Tamagawa, K. Makishima, H. Tsuchiya, ”Termination of Electron Acceleration in Thundercloud by Intracloud/Intercloud Discharge”, Geophysical Research Letters, 45, 5700-5707 (2018)

## 30 Kusaka Group

**Research Subjects:** Observational Cosmology, Cosmic Microwave Background (CMB) Observation. (1) Study of Inflation in the early universe and the evolution of the universe through gravitational lensing using POLARBEAR and Simons Array

experiment; (2) Design, Development, and Construction of Simons Observatory aiming to study Inflation, evolution of the universe, Neutrinos, Dark Energy, and Dark Radiation; (3) Research and Development of technologies for Simons Observatory and CMB-S4.

**Member:** A. Kusaka and K. Kiuchi

- POLARBEAR experiment and its successor, Simons Array, are optimized to measure both inflationary signature and the gravitational lensing effect in CMB polarization. POLARBEAR experiment has just concluded its observation campaign, and Simons Array experiment is about to be deployed. Our focus is on data analysis as well as the development and characterization of the continuously-rotating half-wave plate (HWP) enabling accurate measurement of CMB polarization.
- Simons Observatory experiment is planned for the first light in a few years. We plan to deploy an array of what we call “small aperture cameras,” which are dedicated for the inflationary signal, and a six-meter “large aperture telescope,” which enables observation for Neutrinos and the dark content of the universe. We are primarily focusing on the design and development for the small aperture camera.
- Research and Development for the next generation experiments such as Simons Observatory and CMB-S4 are crucial component of our research program. We specifically work on superconducting technologies used in the detectors and cryogenic bearing system for HWP. We also develop techniques for high-performance computation (HPC) enabling data analysis for new experiments producing order-of-magnitude larger data volume than the current instruments.

## 31 Takeuchi Group

**Research Subjects: Physics of out-of-Equilibrium systems**

**Member: Kazumasa A. Takeuchi**

We aim to explore laws of physics underlying out-of-equilibrium phenomena, by pushing forward research subjects encompassing soft matter such as liquid crystal and granular systems, fluids, and biological populations, mostly by experiments. In addition to understanding specific problems, we aim to extract laws of physics that are hopefully common across different systems and phenomena. As a result, there are a relatively wide range of subjects ongoing in the lab. Currently, our main subjects are “exploration of universal out-of-equilibrium scaling laws using liquid-crystal turbulence” and “search for physical principles governing populations of living cells by means of microfluidic devices”, but we also continue being motivated to launch “new projects that are interesting and realistic to challenge”. Below is a list of subjects we carried out in the scholar year 2018.

- (1) Exploration of universal out-of-equilibrium scaling laws using liquid-crystal turbulence
  - (1-1) Direct test of universal statistics for the non-equilibrium steady state of interface fluctuations
  - (1-2) Measuring dynamic scaling laws of Ising-type relaxation and connection to critical percolation
- (2) Search for physical principles governing populations of living cells by means of microfluidic devices
  - (2-1) Development of a microfluidic device for observing dense bacterial suspensions
  - (2-2) Observation of competing two neutral bacterial populations
  - (2-3) Lane formation and voter-model statistics in a model of bacterial populations [3]
- (3) Other experimental or experimentally motivated projects
  - (3-1) Development of a method to measure instability of large chaotic systems [2]
  - (3-2) Reversible-irreversible transition in a dense particle system under periodic shear

Published papers:

- [1] K. A. Takeuchi, An appetizer to modern developments on the Kardar-Parisi-Zhang universality class. *Physica A* **504**, 77-105 (2018).
- [2] T. P. Shimizu and K. A. Takeuchi, Measuring Lyapunov exponents of large chaotic systems with global coupling by time series analysis. *Chaos* **28**, 121103 (2018). (fast track article)
- [3] T. Shimaya and K. A. Takeuchi, Lane formation and critical coarsening in a model of bacterial competition. *Phys. Rev. E* (in press).

## 32 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. Divergent Connectivity of Homologous Command-like Neurons Mediates Segment-Specific Touch Responses in *Drosophila*.**

Animals adaptively respond to a tactile stimulus by choosing an ethologically relevant behavior depending on the location of the stimuli. Here, we investigate how somatosensory inputs on different body segments are linked to distinct motor outputs in *Drosophila* larvae. Larvae escape by backward locomotion when touched on the head, while they crawl forward when touched on the tail. We identify a class of segmentally repeated second-order somatosensory interneurons, that we named Wave, whose activation in anterior and posterior segments elicit backward and forward locomotion, respectively. Anterior and posterior Wave neurons extend their dendrites in opposite directions to receive somatosensory inputs from the head and tail, respectively. Downstream of anterior Wave neurons, we identify premotor circuits including the neuron A03a5, which together with Wave, is necessary for the backward locomotion touch response. Thus, Wave neurons match their receptive field to appropriate motor programs by participating in different circuits in different segments. (Collaboration with Drs. Albert Cardona, Marta Zlatic, and James Truman groups at the Janelia Research Institute in the USA and Dr Hokto Kazama at RIKEN BSI)

### **2. Data-driven analysis of motor activity implicated 5-HT<sub>2A</sub> neurons in backward locomotion of larval *Drosophila*.**

Rhythmic animal behaviors are regulated in part by neural circuits called the central pattern generators (CPGs). Classifying neural activities correlated with body movements and identifying component neurons associated with the activities are critical steps in understanding the workings of CPGs and animal locomotion. Here, we present a novel method for classifying motor activities in large-scale calcium imaging data of *Drosophila* larvae. The method is based on pre-trained convolutional neural network model VGG-16 and unsupervised learning, and successfully classified activities correlated with forward and backward locomotion in activity data of different types of neurons and under different imaging conditions. By applying these methods to neurons targeted by 5-HT<sub>2A</sub>-Gal4, we identified two classes of interneurons, termed Seta and Leta, which are specifically active during backward but not forward fictive locomotion. Several behavior assays suggest that 5-HT modulates backward locomotion by acting on Seta and Leta neurons via the 5-HT<sub>2A</sub> receptor. This study establishes an accelerated pipeline for activity profiling and cell identification in larval *Drosophila* and implicates a serotonergic system in the modulation of backward locomotion. (Collaboration with Dr. Shu Kondo at NIG and Dr. Hiromu Tanimoto at Tohoku university)

## References

- [1] Takagi S, Cocanougher BT, Niki S, Miyamoto D, Kohsaka H, Kazama H, Fetter RD, Truman JW, Zlatic M, Cardona A, Nose A.: Divergent Connectivity of Homologous Command-like Neurons Mediates Segment-Specific Touch Responses in *Drosophila*. *Neuron*. 96(6): 1373-1387 (2017)
- [2] Park, J., Kondo, S., Tanimoto, H., Kohsaka, H., Nose, A.: Data-driven analysis of motor activity implicated 5-HT<sub>2A</sub> neurons in backward locomotion of larval *Drosophila*. *Sci Rep*. 257568 (2018)

## 33 Higuchi Group

The function of biological system is originated by the bio-molecular function. It is difficult to measure the molecular functions in cells and animals precisely. Therefore, we understand the molecular function, especially dynamic function, of purified protein molecule first by single molecule technology. Then we investigate the function of molecules or organelle by the single and imaging method. Finally, we imaged the molecules in mouse auricle to understand the function of molecule in vivo.

**Super-resolution method to detect the movement of myosin heads** The direct observation of coordinated force generations in acto-myosin system has not been performed due to the technical difficulty that is the diffraction limit. Now, in order to overcome such a problem, we have applied the super-resolution imaging technique developed by Prof. Ueda's group from our department. In our single molecule assay, gold nanoparticles (GNPs) were attached to 2-3 myosin molecules embedded in each single myosin filament. The scattered images of GNPs were recorded by high-speed camera and were typically merged together because they are positioned within the diffraction limit. Therefore, the Multi-Emitters Localization algorithm (Ashida and Ueda, 2014) was used to detect the positions of individual GNPs at every 100 $\mu$ s interval. We found that each myosin molecules are substantially displaced during acto-myosin interactions and their displacements appear to be occasionally synchronized. However, we realized that scattered images can be influenced each other, causing a potential artifact, if their positions are too closed. Thus, we need to develop a new laser projection method and analysis technique to overcome this issue.

**Reverse stroke generated by cardiac myosin** In order to elucidate the molecular mechanism of how dynamics of cardiac myosins contribute to heart function, we measured forces of synthetic  $\beta$ -cardiac myosin filaments using optical tweezers and revealed stepwise displacements of actin filaments driven by myosins under a wide range of loads. The stepping ratio, which is the ratio of the number of forward steps relative to backward steps, under unloaded conditions decreased with increasing ATP concentrations. Compared with skeletal myosin, the stepping ratio of cardiac myosin is much lower than that of skeletal myosin, indicating cardiac myosin shows frequent backward steps. Meanwhile, the peak forces generated by cardiac myofilaments with 15 interacting molecules were 1.5-2 times higher than those observed in skeletal myofilaments with nearly the same number of interacting molecules. Based on these findings, we developed the simulation model to understand which molecular properties critically effect on stepping behaviors and force outputs in cardiac myofilaments. The simulation suggested that reverse stroke in ADP states is a key feature to cause frequent backward steps at higher ATP concentrations, resulting lower stepping ratio. Moreover, switching between two ADP states associated with the alternate execution of power and reverse strokes keeps many myosin molecules populated in force-generating states, enhancing the duty ratio and force outputs. Therefore, we further investigated whether single cardiac myosin can execute the power and reverse strokes in ADP state under a variety of loading conditions. When single cardiac myosin molecules interacting with single actin filaments were stretched by optical tweezers, beads' positions were occasionally switched between two discrete levels for high loads, implying the load-dependent execution of power and reverse strokes. To know physiological meaning of reverse stroke, we simulated dynamics of myosin molecules in sarcomere and found that the reverse stroke plays a crucial role in reducing the rate of ATP consumption during isometric contraction.

**Molecular mechanism of beating of sperm flagella** To investigate the collective force generation of an ensemble of dynein in sperm axoneme, we planned to measure force generation of dynein still attached on a doublet microtubule. We disintegrated axoneme by adding ATP after treating by protease to obtain doublet microtubules. We measured force generated by dynein molecules on the edge of a bundle of doublet microtubules and found two types of characteristic force. In the first type, microtubule was interacted to a

bundle of doublet microtubules at right angles and then oscillatory force was measured. The peak-to-peak forces and amplitude of oscillation was about 10-15 pN and 10-15 nm, respectively. The fact that dyneins on a bundle of doublet microtubules can generate oscillatory force suggests that dynein retain characteristic oscillatory force generation in higher order of structure. In the second type, a microtubule was interacted to a bundle of doublet microtubules in parallel in which hundreds of dynein molecules can interact to a microtubule and then force of about 8 pN was generated. This suggests the possibility that very small number of dynein molecules activate at the same time.

**Collective motion on cell assembly** Collective motion of spindle-shaped cells has been seen during development, for example rostral migratory stream, or cancer invasion after epithelial-mesenchymal transition. As spindle-shaped cells has many functions which are significant on collective migration, their collective migration is understood only qualitatively. To establish a model on the collective migration, we have been studying on the collective motion, with nematic order, of murine neural stem cells, one of the cell types with spindle shape, under adhesive culture. To make a mechanical model on the collective motion of particles with spontaneous motility and with high aspect ratio, the system is usually coarse-grained assuming two-fold rotational symmetry. From the argument on symmetry, force generation, which is proportional to the vector calculated as the distortion of the field of particle orientation, is derived. In our study conducted until last year, this force was measured on the collective migration system of neural stem cells, utilizing the traction force microscopy. In this year, we constructed the system where we can force neural stem cells adhere on a selected area of the substrate, and this system showed the chiral migration of neural stem cells, especially on the boundary of the selected area. On the other hand, we confirmed the expression of a protein which is shown to play important roles on left-right asymmetric development. So we are trying to inhibit the function or the expression of the protein in neural stem cells, aiming to reveal the role of the protein in the collective migration.

## 34 Okada Group

**Research Subjects:** Biophysics, cell biology, super-resolution microscopy, live cell imaging and single molecule imaging.

**Member:** Yasushi Okada, Sawako Enoki and Keigo Ikezaki

Our primary goal is to answer the very basic question “What is life”. To answer this question, we are trying to fill the gap between the world of molecules and the world of living cells. Direct measurement of molecules in living cells would serve as a basic technology to fill this gap. Thus, we have been working on the development of the technologies for the visualization and non-invasive measurement of the molecular processes in living cells. High-speed, super-resolution live-cell imaging and single-molecule measurement in living cells are the two main technologies we develop.

By using these technologies, we are trying to understand the regulatory mechanisms of motor proteins during axonal transport. Despite the many studies in the past decades by our group and others, it is still unclear how the biophysical properties of motor proteins are related to their biological functions. For example, a point mutation in kinesin-1 can cause hereditary spastic paraplegia, but it is unclear why this mutation selectively affects neurons in the longest tract in the aged patients.

Through these studies and development, we have realized the importance of the cellular states, and our microscope technologies can also be applied to the measurement of the cellular states. Thus, we have proposed a project for the visualization, prediction and control of cellular states. We are now leading this project, and the project members in our lab are working on the development of the technologies to visualize and control cellular states.

In short, our effort is now divided into the following three areas: 1) development of imaging technologies [1, 2, 3, 8], 2) study of axonal transport [5, 6], 3) measurement and control of cellular states [4].

- [1] Takeshima T et al., A multi-emitter fitting algorithm for potential live cell super-resolution imaging over a wide range of molecular densities. *J Microsc.* 271: 266-281. (2018)

- 
- [2] Komatsu N et al., A platform of BRET-FRET hybrid biosensors for optogenetics, chemical screening, and in vivo imaging. *Sci Rep* 8: 8984. (2018)
  - [3] Gzrybowski M et al., A highly photostable near-infrared labeling agent based on a phospho-rhodamine for long-term and deep imaging. *Angew. Chem.* 57:10137-10141 (2018)
  - [4] Okamoto K et al., Single cell analysis reveals a biophysical aspect of collective cell-state transition in embryonic stem cell differentiation. *Sci Rep.* 8:11965. (2018)
  - [5] Hayashi K et al., Application of the fluctuation theorem for non-invasive force measurement in living neuronal axons. *Mol Biol Cell*, 29:3017-3025. (2018)
  - [6] Shima T et al., Kinesin-binding-triggered conformation switching of microtubules contributes to polarized transport. *J Cell Biol.* 217:4164-4183. (2018)
  - [7] Hasegawa S et al., Investigation of multiple-dynein transport of melanosomes by non-invasive force measurement using fluctuation unit  $\chi$ . *Sci Rep.* in press (2019).
  - [8] Lu CH et al., Towards rapid, large-scale, and three-dimensional super-resolution imaging via lightsheet localization microscopy. *Commun Biol.* in press (2019).
  - [9] Alexandr Y et al., A Method for Automatic Tracking of Cell Nuclei in 2D Epifluorescence Microscopy Image Sequences. Eighth International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA). 2018
  - [10] Yasushi Okada, Mechanisms of axonal transport investigated by high-speed and high-resolution imaging. 15th Annual German-Japanese Colloquium, Harnack-Haus, Berlin, Germany, 2019.
  - [11] Yasushi Okada, Regulatory mechanisms of axonal transport investigated by single-molecule and super-resolution live imaging. The 66th NIBB Conference/ABiS international symposium. Okazaki Conference Center, Okazaki, 2019.

## 35 Furusawa Group

**Research Subjects:** Theoretical Biophysics, Evolutionary Biology, Complex Systems

**Member:** Chikara Furusawa and Nen Saito

Biological systems have both robustness and plasticity, a property that distinguishes them from artificial systems and is essential for their survival. Biological systems generally exhibit robustness to various perturbations, including the noise in gene/protein expressions and unexpected environmental changes. At the same time, they are plastic to the surrounding environment, changing their state through processes like adaptation, evolution and cell differentiation. Although the coexistence of robustness and plasticity can be understood as a dynamic property of complex and interacting networks consisting of a large number of components, the mechanisms responsible for the coexistence are largely unknown.

The goal of our work is to extract the universal features of cellular dynamics that are responsible for robustness and plasticity in biological systems. We aim to describe the systems using a relatively small number of degrees of freedom with the macroscopic state variables. We expect that such a description will provide novel methods for the prediction and control of complex biological systems.

The current research topics in our group are followings:

1. Construction of macroscopic state theory describing adaptation and evolution of biological systems
2. Laboratory evolution of bacterial cells to analyze dynamics of phenotype-genotype mappings
3. Theoretical analysis for symbiotic relationships in ecosystems
4. Analysis of amoeba morphogenesis using phase-field models
5. Decoding gut microbiota using artificial neural networks

### References

- [1] K. Kaneko and C. Furusawa: Macroscopic Theory for Evolving Biological Systems Akin to Thermodynamics, *Annu. Rev. Biophys.* **47**, 273-290 (2018).

- [2] C. Furusawa and K. Kaneko: Formation of Dominant Mode by Evolution in Biological System, *Phys. Rev. E* **97**(4), 042410 (2018).
- [3] K. Tokuyama, Y. Toya, T. Horinouchi, C. Furusawa, F. Matsuda, H. Shimizu: Application of adaptive laboratory evolution to overcome a flux limitation in an *Escherichia coli* production strain, *Biotechnol. Bioeng.* **115**(6), 1542-1551 (2018).
- [4] T. Hirasawa, M. Saito, K. Yoshikawa, C. Furusawa, H. Shimizu: Integrated Analysis of the Transcriptome and Metabolome of *Corynebacterium glutamicum* during Penicillin-Induced Glutamic Acid Production, *Biotechnol. Jour.* **13**(5), e1700612 (2018).
- [5] A. Germond, T. Ichimura, T. Horinouchi, H. Fujita, C. Furusawa, T. M. Watanabe: Raman spectral signature reflects transcriptomic features of antibiotic resistance in *Escherichia coli*, *Comm. Biology* **1**, 85 (2018).
- [6] K. Okamoto, A. Germond, H. Fujita, C. Furusawa, Y. Okada, T. M. Watanabe: Single cell analysis reveals a biophysical aspect of collective cell-state transition in embryonic stem cell differentiation, *Sci. Rep.* **8**(1), 11965 (2018).
- [7] T. Horinouchi, T. Maeda, C. Furusawa: Understanding and engineering alcohol-tolerant bacteria using OMICS technology, *World Jour. Microb. Biotech.* **34**(11), 157 (2018).
- [8] T. Komori, A. Shibai, H. Saito, Y. Akeno, A. Germond, T. Horinouchi, C. Furusawa, S. Tsuru: Enhancement of K-strategy evolution in histidine utilization using a container with compartments, *Genes Cells* **23**(10), 893-903 (2018).
- [9] A. Shibai, S. Tsuru, T. Yomo: Development of an Automated UV Irradiation Device for Microbial Cell Culture, *SLAS Technol.*, September 10, 1-7 (2018).
- [10] T. Maeda, T. Horinouchi, N. Sakata, A. Sakai, C. Furusawa: High-throughput identification of the sensitivities of an *Escherichia coli*  $\Delta$ recA mutant strain to various chemical compounds, *Jour. Antibiot.*, in press

### III

## 2018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 : 櫻井博儀

1. 特殊相対性理論: 相対性原理、ローレンツ変換、速度の変換、時空間の幾何学と時空のダイアグラム、固有时间と時間の遅れ、ローレンツ収縮、相対論的エネルギーと運動量、エネルギーと運動量のローレンツ変換と保存則
2. 電磁気学と特殊相対論: スカラー・ベクトル・テンソル、4元ベクトル、連続の方程式と4元電流、4元ポテンシャルとローレンツゲージ、一定速度で運動する点電荷がつくる電磁場電磁場テンソルと場のローレンツ変換
3. 電磁場内の電荷の運動: 場の中の粒子の運動方程式、一様な静電場中の運動、一様な静磁場中の運動、一様な静電磁場中の運動、電磁場のラグランジアン、エネルギーと運動量の保存則、点電荷の自己エネルギー

### 1.1.2 解析力学 : 常行 真司

1. ニュートンの法則からラグランジュ形式へ
  - 1.1 ニュートンの法則
  - 1.2 ガリレイ変換
  - 1.3 オイラー-ラグランジュ方程式
  - 1.4 一般化座標と拘束条件
  - 1.5 ダランベールの原理
  - 1.6 ホロノーム系に対するラグランジュ方程式
2. 最小作用の原理
  - 2.1 最小作用の原理
  - 2.2 オイラー-ラグランジュ方程式の導出
  - 2.3 自由粒子のラグランジアン
  - 2.4 相互作用する質点からなる孤立系のラグランジアン
  - 2.5 ラグランジュ未定乗数法と拘束条件
3. 対称性と保存則
  - 3.1 時間の一様性 → エネルギー保存則
  - 3.2 空間の一様性 → 運動量保存則
  - 3.3 空間の等方性 → 角運動量保存則
  - 3.4 循環座標
  - 3.5 ネーターの定理
4. さまざまなラグランジアン
  - 4.1 回転座標系とコリオリ力
  - 4.2 ローレンツ力
  - 4.3 摩擦のある系
5. ハミルトン形式と正準変換
  - 5.1 ルジャンドル変換
  - 5.2 ハミルトニアンと位相空間
  - 5.3 正準方程式
  - 5.4 正準変換と母関数
  - 5.5 正準変換の例
  - 5.6 正準変換の条件
  - 5.7 無限小変換
  - 5.8 ポアソン括弧式
  - 5.9 ポアソン括弧式と正準方程式
  - 5.10 ポアソン括弧式と無限小変換
  - 5.11 ハミルトン-ヤコビの方程式
  - 5.12 リウヴィルの定理
6. 補遺
  - 6.1 相対論における解析力学
  - 6.2 分子動力学法

### 1.1.3 量子力学 I: 福嶋健二

#### 1. 量子力学の導入

- 1.1 歴史的背景
- 1.2 粒子と波動の二重性
- 1.3 運動方程式 (古典論から量子論へ)
- 1.4 波動関数の確率解釈
- 1.5 Schrödinger 方程式の自由解・運動量表示

#### 2. 1次元 Schroedinger 方程式

- 2.1 変数分離法
- 2.2 1次元束縛問題
- 2.3 1次元散乱問題
- 2.4 半古典 (WKB) 近似 [発展]

#### 3. 調和振動子

- 3.1 1次元調和振動子の解法 I (生成消滅演算子)
- 3.2 1次元調和振動子の解法 II (Sturm-Liouville 固有値問題)
- 3.3 1次元調和振動子の解法 III (WKB 近似) [発展]
- 3.4 3次元調和振動子
- 3.5 コヒーレント状態、スクイーズド状態

#### 4. Hilbert 空間とブラケット記法

- 4.1 Hilbert 空間
  - 4.1.1 Dirac のブラケット
  - 4.1.2 基底の変換
- 4.2 Schrödinger 方程式の形式解と Heisenberg 表示
- 4.3 密度行列

#### 5. Berry 位相入門

- 5.1 時間に陽に依存する Schrödinger 方程式の断熱近似解
- 5.2 Berry 位相
  - 5.2.1 Berry 位相の諸性質
  - 5.2.2 2準位状態
  - 5.2.3 Weyl スピノル

#### 6. Dirac 方程式入門

- 6.1 電子のスピン
- 6.2 Pauli 方程式
- 6.3 Dirac 方程式

### 1.1.4 物理実験学：酒井 広文, 藤森 淳

#### 1. 序論 (物理実験の魅力)

#### 2. 単位

- 2.1 SI 基本単位の定義
- 2.2 代表的な物理量の単位
- 2.3 各種の常用単位系とその変換

#### 3. 各種の計測法

- 3.1 レーザーの基礎と光の計測
- 3.2 放射線の基礎とその計測

#### 4. 実験の基礎技術

- 4.1 実験環境技術
- 4.2 試料作製技術

#### 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を書く上での注意事項

### 1.1.5 物理数学 I：松尾 泰

#### Part I 複素関数論

1. 無限和と収束性
2. 複素関数
3. 正則関数の基本的な性質
4. 多価関数とリーマン面
5. 複素積分：応用例
6. デルタ関数
7. 部分分数展開、無限積表示

8. ガンマ関数・ベータ関数・ゼータ関数、解析接続
9. 漸近展開と最急降下法
10. 等角写像

#### Part II 常微分方程式論

1. 解の存在と一意性
2. 積分により可解な微分方程式の例
3. 線形微分方程式
4. Laplace 変換

## 1.1.6 物理数学 II : 吉田 直紀

## 1. フーリエ級数とフーリエ変換

- 1.1 フーリエ級数展開
- 1.2 フーリエ変換
- 1.3 離散フーリエ変換

## 2. 偏微分方程式

- 2.1 波動方程式
- 2.2 熱伝導方程式
- 2.3 ラプラス方程式とポアソン方程式

## 2.4 ラプラス変換

## 3. 直交多項式と特殊関数

- 3.1 エルミート多項式
- 3.2 ラゲール多項式
- 3.3 ルジャンドル多項式
- 3.4 ベッセル関数
- 3.5 超幾何関数
- 3.6 スツルム-リュウビル型固有値問題

## 1.1.7 物理のための科学英語基礎 : 小野 義正

- 1. The DNA Controversy, 動詞の適切な時制、科学英語とは、日本人英語の欠点と改善策
- 2. Molecular Computers, 句読点の使い方、直接翻訳するな、和文和訳せよ、物主構文
- 3. Hurricanes and Global Warming, 文頭・数字の書き方、英語の基本は三拍子、パラグラフ・ライティング
- 4. Viruses Old and New, 関係代名詞の制限用法・非制限用法、パラグラフ・リーディング
- 5. The Names of Living Things, 並列構造で書く、読みやすい英語（論文）を書く
- 6. Fermat's Last Theorem, 数字・記号の表現法。起承転結はやめよう、日本語の構造 vs. 英語の構造
- 7. Nanoscience's Benefits and Risks, 名詞、「英語の

発想で書く」(Leggett's Trees)、英語活用メモを作り、英借文する

- 8. Time and the Brain, 冠詞、否定形をやめて、肯定形で書く、あいまいな現をさけ、きっぱりと書く
- 9. The Neanderthals and Us, 短い簡潔な文を書く。辞書の使い方、参考文献
- 10. The Cold Fusion Dispute, 受動態を避けて能動態で書く、通じる英語のしゃべり方 1
- 11. The K-T Boundary, 連結語を使う、通じる英語のしゃべり方 2
- 12. Detecting and Deflecting Asteroid, 不必要な単語は省く、通じる英語のしゃべり方 3
- 13. Scientific Fraud, 元素記号、化学用語の音の仕方、英語口頭発表での注意点

## 1.2 3年生 S セメスター

## 1.2.1 電磁気学 II : 岡本 徹

## 1. 静電場

- 1.1 基本法則
- 1.2 電荷分布と静電場
- 1.3 物質があるときの静電場
- 1.4 境界値問題

## 2. 静磁場と準静的な磁場

- 2.1 基本法則
- 2.2 磁気双極子モーメント
- 2.3 物質の磁化
- 2.4 境界値問題

## 2.5 準静的な磁場と電磁誘導

## 3. Maxwell の方程式と保存則

- 3.1 物質中の Maxwell 方程式
- 3.2 電磁ポテンシャル
- 3.3 電磁場のエネルギー
- 3.4 電磁場の運動量

## 4. 電磁波

- 4.1 平面電磁波の基本的性質
- 4.2 反射と屈折
- 4.3 物質の交流電場に対する応答

## 1.2.2 量子力学 II : 上田 正仁

- |                   |                |
|-------------------|----------------|
| 1. シュレディンガー方程式の性質 | 5. 摂動論         |
| 2. 角運動量           | 6. 準古典近似       |
| 3. スピン            | 7. 観測過程        |
| 4. 対称性と保存則        | 8. EPR のパラドックス |

## 1.2.3 現代実験物理学 I : 岡田 康志, 北川 健太郎

- |                                   |                                    |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1. 生細胞イメージングの物理的基盤、幾何光学と顕微鏡の基礎    | 8. X 線結晶構造解析 (無機)                  |
| 2. 結像光学系とフーリエ変換                   | 9. X 線を用いた実験                       |
| 3. 顕微鏡の分解能限界と電顕、X 線結晶構造解析 (タンパク質) | 10. 極限環境技術の原理とその応用、発生方法 I (真空、低温)  |
| 4. 顕微鏡光学系 1.(位相差顕微鏡、微分干渉顕微鏡)      | 11. 極限環境技術の原理とその応用、発生方法 II (圧力、磁場) |
| 5. 顕微鏡光学系 2.(蛍光顕微鏡、共焦点顕微鏡)        | 12. 電子の運動・軌道を利用した物性実験              |
| 6. 顕微鏡光学系の応用 (1 分子イメージング、光ピンセット)  | 13. スピンを利用した物性実験 I                 |
| 7. 生体分子モーターの動作機構とブラウン運動           | 14. スピンを利用した物性実験 II、核磁気共鳴法         |

## 1.2.4 流体力学 : 江尻 晶

- |                     |                          |
|---------------------|--------------------------|
| 1. 様々な流体            | 3.3 揚力                   |
| 2. 流体の基礎方程式         | 4. 粘性流                   |
| 2.1 流体を特徴づける量       | 4.1 Reynolds 数           |
| 2.2 連続の式            | 4.2 ストークス近似              |
| 2.3 力と運動方程式         | 4.3 一様等方乱流と Kolmogorov 則 |
| 2.4 エネルギー方程式        | 4.4 フラクタルによる乱流の表現        |
| 2.5 粒子の方程式から流体の方程式へ | 5. 水波                    |
| 2.6 渦度と渦度方程式        | 5.1 長い波                  |
| 3. 関数による流れの表現       | 5.2 表面波                  |
| 3.1 ポテンシャル流         | 6. 不安定性                  |
| 3.2 複素速度ポテンシャル      |                          |

## 1.2.5 統計力学 I : 桂 法称

- |                       |                  |
|-----------------------|------------------|
| 1. 統計力学とは何か?          | 5.1 理想気体         |
| 2. 確率論からの準備           | 5.2 調和振動子        |
| 3. 量子論からの準備           | 5.3 常磁性と関連するモデル  |
| 4. カノニカル分布と平衡統計力学     | 5.4 古典的な粒子の系     |
| 4.1 平衡状態とは何か?         | 6. 結晶の比熱         |
| 4.2 等重率の原理とミクロカノニカル分布 | 6.1 アインシュタイン・モデル |
| 4.3 カノニカル分布           | 6.2 デバイ・モデル      |
| 4.4 熱力学との関係           | 7. グランドカノニカル分布   |
| 5. カノニカル分布の応用         | 8. 量子理想気体の統計力学   |

8.1 多粒子系の量子力学 (同種粒子の扱い)

8.2 理想フェルミ気体

8.3 理想ボース気体

8.4 ボース・アインシュタイン凝縮

### 1.2.6 計算機実験 I : 藤堂 眞治

#### 1. UNIX の基礎

1.1 UNIX コマンド

1.2 C 言語プログラミング

1.3 Gnuplot によるグラフ作成

1.4 LaTeX による文書作成

#### 2. 数値誤差・数値積分・ニュートン法

#### 3. 常微分方程式

3.1 初期値問題と境界値問題

3.2 Euler 法・Runge-Kutta 法

3.3 陽解法と陰解法

3.4 Numerov 法

3.5 シンプレクティック積分法

#### 4. 連立一次方程式

4.1 物理に現れる連立一次方程式

4.2 ガウスの消去法・LU 分解

4.3 逆行列の求め方

4.4 LAPACK の利用

4.5 反復解法

#### 5. 固有値問題

5.1 行列の性質・べき乗・指数関数

5.2 Jacobi 法・Givens 法・Householder 法

5.3 疎行列に対する反復法・べき乗法・Rayleigh-Ritz の方法・Lanczos 法

5.4 特異値分解・一般化逆行列

5.5 行列の低ランク近似

5.6 最小二乗法

講義資料は、<https://exa.phys.s.u-tokyo.ac.jp/ja/lectures> で公開。

## 1.3 3年生 A セメスター

### 1.3.1 光学 : 井手口 拓郎, 湯本 潤司

1. 光学入門

2. 幾何光学

3. 波動光学

4. 回折、フーリエ光学

5. 偏光光学

6. ビーム光学

7. 電磁波光学

8. 光の統計性

9. 光増幅器

10. 導波光学 (平面導波路)

11. 導波光学 (光ファイバー)

### 1.3.2 物理数学 III : 立川 裕二

#### 1. 群の基本的な性質

1.1 群の定義と例

1.2 群の作用と軌道

1.3 群の同型、部分群

1.4 準同型と正規部分群

#### 2. 群に関する幾つかの話題

2.1  $SO(3)$  の有限部分群について

2.2 結晶群の話

2.3  $SO(3)$  と  $SU(2)$  の関係

2.4 古典群の話

2.5 有限群の話

#### 3. 群の表現

- 3.1 可換群の場合
- 3.2 有限群の場合
- 3.3 コンパクト連続群の場合
- 3.4 リー代数とルート系、その分類

## 4. 雑多な話題

- 4.1 スピノル表現によるイジング模型の解法
- 4.2 Monstrous Moonshine の話

## 1.3.3 量子力学 III : 諸井 健夫

## 1. 同種粒子

- 1.1 同種粒子からなる多体系 : ボース粒子
- 1.2 同種粒子からなる多体系 : フェルミ粒子
- 1.3 第 2 量子化

## 2. 電磁場中の荷電粒子

- 2.1 ゲージ対称性とシュレディンガー方程式
- 2.2 磁場中の荷電粒子

## 2.3 ランダウ準位

## 2.4 アハラノフ・ボーム効果

## 3. 散乱

- 3.1 散乱断面積
- 3.2 グリーン関数
- 3.3 ボルン近似
- 3.4 部分波展開と位相のずれ

## 1.3.4 生物物理学 : 岡田 康志, 樋口 秀男

- 1. 生命とは何か、生命誕生と遺伝情報
- 2. タンパク質の構造と安定性
- 3. タンパク質の 1 分子機能
- 4. 筋肉運動の分子論
- 5. エネルギー生産系
- 6. 細胞内の分子たち
- 7. 人体の分子による制御

- 8. 神経科学概論
- 9. 細胞膜の電気的性質 1. 平衡電位と静止電位
- 10. 細胞膜の電気的性質 2. 活動電位と H-H 方程式
- 11. 細胞膜の電気的性質 3. ケーブル理論と伝導速度
- 12. シナプスと可塑性
- 13. チャネル、ポンプ、レセプター
- 14. 神経細胞の生物物理学

## 1.3.5 固体物理学 I : 小形 正男

## 1. 概要と復習

量子力学、統計力学、原子構造など

- 2. 原子から分子・固体へ
- 3. 周期ポテンシャル中の電子とエネルギーバンド
- 4. 電子物性、電子比熱、DOS

- 5. 格子振動とフォノン、格子比熱
- 6. 固体中電子のダイナミクス
- 7. 金属と伝導電子  
電気伝導、熱電効果などの輸送係数

## 1.3.6 電磁気学 III : 安東 正樹

## 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
- 6. 電磁波と重力波

### 1.3.7 現代実験物理学 II : 浅井 祥仁, 馬場 彩

- |                |                      |
|----------------|----------------------|
| 1. 実験における統計・誤差 | 4. 断面積と崩壊率           |
| 2. 放射線と物質の反応基礎 | 5. 加速器実験装置           |
| 3. 相対論         | 6. マルチメッセンジャー宇宙物理学実験 |

### 1.3.8 統計力学 II : 宮下 精二

- |                     |                 |
|---------------------|-----------------|
| 1. 相互作用がある系での統計力学   | 2.1 線形応答理論      |
| 1.1 相転移現象           | 2.2 オンサーガーの相反定理 |
| 1.2 平均場近似           | 2.3 久保公式        |
| 1.3 転送行列            | 2.4 マスター方程式     |
| 1.4 臨界現象の普遍性とスケーリング | 2.5 ランジェバン方程式   |
| 2. 非平衡統計力学          |                 |

### 1.3.9 計算機実験 II : 藤堂 眞治

- |                     |                            |
|---------------------|----------------------------|
| 1. 対角化と量子力学         | 3.1 数え上げ                   |
| 1.1 二重井戸ポテンシャル      | 3.2 転送行列法                  |
| 1.2 積分による解法         | 3.3 C 言語における行列・LAPACK の利用  |
| 1.3 二分法             | 3.4 分子動力学法                 |
| 1.4 対角化による解法        | 4. 最適化                     |
| 1.5 解析計算による次元削減     | 4.1 最適化問題                  |
| 2. モンテカルロと統計力学      | 4.2 ニュートン法                 |
| 2.1 多体系の統計力学        | 4.3 囲い込み法                  |
| 2.2 モンテカルロ積分        | 4.4 最急降下法・勾配降下法・共役勾配法      |
| 2.3 疑似乱数            | 4.5 Nelder-Mead の滑降シプレックス法 |
| 2.4 マルコフ連鎖モンテカルロ    | 4.6 シミュレーテッド・アニーリング        |
| 3. 行列の方法・分子動力学と統計力学 |                            |

講義資料は、<https://exa.phys.s.u-tokyo.ac.jp/ja/lectures> で公開。

## 1.4 4年生 S セメスター

### 1.4.1 場の量子論 I : 濱口 幸一

- |  |  |
|--|--|
| 1. Introduction                                | 1.6 Hilbert space and Hamiltonian of (infinitely) many particles |
| 1.1 Course objectives                          | 1.7 About homework problems (and the grade)                      |
| 1.2 Quantum Mechanics and Quantum Field Theory | 2. Scalar (spin 0) Field   |
| 1.3 Notation and convention                    | 2.1 Lagrangian and Canonical Quantization of Scalar Field        |
| 1.4 Various fields                             | 2.3 Equation of motion (EOM)                                     |
| 1.5 Plan                                       | 2.4 Solution of the EOM  |

- 2.4 Commutation relations of  $a$  and  $a^\dagger$
- 2.5  $a^\dagger$  and  $a$  are the creation and annihilation operators
- 2.6 Vacuum state, one-particle state and n-particle state
- 3. Lorentz transformation, Lorentz group and its representations**
  - 3.1 Lorentz transformation of coordinates
  - 3.2 Infinitesimal Lorentz transformation and generators of Lorentz group (in the 4-vector basis)
  - 3.A Other (disconnected) Lorentz transformations
  - 3.3 Lorentz transformation of scalar field
  - 3.4 Lorentz transformations of other fields, and representations of Lorentz group
  - 3.5 Spinor Fields
  - 3.6 Spinor bilinears

**4. Fermion (spin 1/2) Field**

- 4.1 Lagrangian
- 4.2 Dirac equation and its solution
- 4.3 Quantization of Dirac field
- 5. Interacting Scalar Field**
  - 5.1 Outline: what we will learn
  - 5.2 S-matrix, amplitude  $M \Rightarrow$  observables ( $\sigma$  and  $\Gamma$ )
  - 5.3 Interacting Scalar Field: Lagrangian and Quantization
  - 5.4 What is  $\phi(x)$  ?
  - 5.5 In/out states and the LSZ Reduction Formula
  - 5.6 Heisenberg field and Interaction picture field
  - 5.7  $a$  and  $a^\dagger$  (again)
  - 5.8  $\langle 0|T(\phi(x)\cdots)|0\rangle = ?$
  - 5.9 Wick's theorem
  - 5.10 Summary, Feynman rules, examples

**1.4.2 サブアトムック物理学 : 相原 博昭****1. Elementary Particle Physics**

- 1.1 Species of elementary particles
- 1.2 Interactions and gauge bosons
- 1.3 Relativistic kinematics
- 1.4 Particle and anti-particles
- 1.5 Structures of subatomic particles
- 1.6 Gauge theory and electroweak unified theory
- 1.7 Higgs mechanism/ Higgs physics

**2. Nuclear Physics**

- 2.1 Hadrons and quarks

**2.2 Nuclear force**

- 2.3 Structure of nuclei
- 2.4 Nuclear reactions

**3. Nuclear Energy**

- 3.1 Nuclear fission
- 3.2 Nuclear fusion
- 3.3 Nuclear reactors
- 3.4 Breeder reactors

**4. Particle Accelerators****5. Nuclear Medicine****1.4.3 一般相対論 : 横山 順一****1. 序論 等価原理と一般相対性原理**

- 1.1 等価原理
- 1.2 一般相対性原理
- 1.3 一般相対論の物理世界

**2. 数学的準備**

- 2.1 スカラーとベクトル
- 2.2 双対空間
- 2.3 テンソル
- 2.4 計量テンソル
- 2.5 内積とテンソルの縮約
- 2.6 微分

**2.7 計量テンソルの共変微分とクリストッフェル記号****2.8 リーマンの曲率テンソル****3. 曲がった時空の物理**

- 3.1 曲率テンソル
- 3.2 重力場中の自由粒子の運動方程式
- 3.3 ニュートン極限
- 3.4 測地線と測地線偏差
- 3.5 ビアンスキの恒等式
- 3.6 対応原理
- 3.7 正準エネルギー運動量テンソル

- 3.8 曲がった時空中におけるエネルギー運動量テンソル
- 3.9 エネルギー運動量テンソルの現象論的定義
- 4. 一般相対論
  - 4.1 アインシュタイン方程式
  - 4.2 作用原理
- 5. 球対称時空
  - 5.1 球対称真空解
  - 5.2 重力による時間の遅れと光の赤方偏移
  - 5.3 シュバルツバルト時空中における粒子の運動
  - 5.4 水星の近日点移動
  - 5.5 光線の屈曲
  - 5.6 シャピーロ遅延
- 6. ブラックホール
  - 6.1 シュバルツシルトブラックホール
  - 6.2 事象の地平線
  - 6.3 座標系について
- 7. 重力波
  - 7.1 弱重力下の線形化したアインシュタイン方程式
  - 7.2 摂動変数のゲージ自由度
  - 7.3 重力波の伝播
  - 7.4 重力波の放出
- 8. 宇宙論
  - 8.1 宇宙原理とロバートソン・ウォーカー計量
  - 8.2 ルメートル・フリードマン宇宙

#### 1.4.4 宇宙物理学：須藤靖・馬場彩

- 1. 宇宙物理学とは
  - 1.1 「宇宙物理学」 $\approx$ 「天体物理学」 $\neq$ 「宇宙論」 $\neq$ 「天文学」
  - 1.2 世界は法則に支配されているか
  - 1.3 物理学における必然と偶然
  - 1.4 世界を知るための天文学
- 2. 自然界のスケールと宇宙の階層
  - 2.1 物理定数が世界のスケールを決める
  - 2.2 自然界の特徴的スケール
  - 2.3 宇宙の階層構造
  - 2.4 宇宙の年表
- 3. 物理法則と宇宙
  - 3.1 物理法則と初期条件
  - 3.2 木星型（ガス）惑星
  - 3.3 恒星（主系列星）
- 3.4 宇宙の階層と基本物理定数
- 4. 宇宙史
  - 4.1 一様等方宇宙モデル
  - 4.2 ビッグバン元素合成
  - 4.3 宇宙の中性化とマイクロ波背景放射
  - 4.4 宇宙の組成と暗黒成分
- 5. 星の一生
  - 5.1 主系列星
  - 5.2 縮退星
  - 5.3 超新星爆発とその残骸
- 6. 宇宙の高エネルギー現象
  - 6.1 降着天体
  - 6.2 宇宙線
- 7. 宇宙を観測する機器の原理

#### 1.4.5 固体物理学 II：林 将光

- 1. バンド理論
  - 1.1 強束縛近似
  - 1.2 グラフェン
  - 1.3 ディラック方程式
  - 1.4 クラインパラドックス
  - 1.5 半導体
- 2. 伝導
  - 2.1 ホール効果
  - 2.2 2次元電子系
  - 2.3 ランダウ準位
  - 2.4 整数量子ホール効果
- 3. 磁性

- 3.1 交換相互作用
- 3.2 ハバードモデル
- 3.3 ストナー強磁性
- 3.4 スピン流

- 4. 超伝導
- 4.1 クーパー対
- 4.2 BCS 超伝導

#### 1.4.6 量子光学：島野 亮

- 1. 光の放出と吸収
  - 1.1 電磁場のモード密度、電磁場のエネルギー
  - 1.2 黒体放射、プランクの熱放射式
  - 1.3 自然放出と誘導放出
  - 1.4 光の吸収
- 2. 電磁場と二準位系との相互作用（半古典論）
  - 2.1 双極子近似、回転波近似
  - 2.2 ラビ振動
  - 2.3 密度行列
  - 2.4 光ブロッホ方程式
  - 2.5 縦緩和と横緩和
- 3. 電磁場の量子論
  - 3.1 自由場の量子化
  - 3.2 光子数状態

- 3.3 コヒーレント状態
- 3.4 スクイーズド状態
- 3.5 ウィグナー関数
- 4. 非線形光学の基礎
  - 4.1 古典振動子モデル
  - 4.2 非線形分極と非線形感受率
  - 4.3 二次の非線形光学効果
  - 4.4 位相整合
  - 4.5 光パラメトリック過程
- 5. レーザーの基礎
  - 5.1 光共振器のモード
  - 5.2 光共振器の安定性
  - 5.3 発振条件
  - 5.4 各種レーザー

#### 1.4.7 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
- 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効果
  - 6.3 速度空間不安定性と非線形理論

#### 1.4.8 統計力学特論：川島 直輝

- 1. Phase transitions, critical phenomena and universality
- 2. Mean-field theory, variational principle,
- and Landau expansion
- 3.  $\phi^4$  model and Ornstein-Zernike form
- 4. Ginzburg criterion

- |   |   |
|---|---|
| 5. Migdal-Kadanoff approximation                | 9. Perturbative renormalization group         |
| 6. Fixed-point and scaling operators            | 10. Wilson-Fisher fixed point                 |
| 7. Critical phenomena and renormalization group | 11. Some Applications                         |
| 8. Operator product expansion                   | 12. Berezinski-Kosterlitz-Thouless Transition |

#### 1.4.9 計算科学概論：大久保 毅 ほか6名

- |                         |                            |
|-------------------------|----------------------------|
| 1. スーパーコンピュータと並列プログラミング | 5. 格子スピン模型の計算科学            |
| 2. 高性能計算機のアーキテクチャ       | 6.1 連続体の並列有限要素法解析入門        |
| 3. 高性能プログラミングと性能測定      | 6.2 構造解析アプリケーションによる CAE 実践 |
| 4. 大規模疎行列ソルバー入門         | 7. 大規模疎行列固有値問題と量子多体問題      |

#### 1.4.10 生物物理学特論 II：樋口 秀男, 能瀬 聡直, 野口 博司

- |                           |                  |
|---------------------------|------------------|
| 1. 序論                     | 8. 曲面の物理、表面張力、濡れ |
| 2. 脳神経系における情報の流れ          | 9. 生体膜のシミュレーション  |
| 3. 脳情報処理の素子としてのニューロンの機能   | 10. 赤血球、血流       |
| 4. 神経ネットワーク研究の方法論：細胞から個体へ | 11. 枯渇力          |
| 5. 神経活動の測定と操作             | 12. 生体内の運動と機能    |
| 6. 脳の可塑性と記憶               | 13. 細胞内の運動       |
| 7. 生体膜の構造と機能              | 14. マウス個体内の分子の運動 |

#### 1.4.11 現代物理学入門：日下 暁人, 竹内 一将

- |                                |                           |
|--------------------------------|---------------------------|
| 1. 宇宙背景放射観測で探る初期宇宙と宇宙進化        | 2. 非平衡に普遍性はあるか？－吸収状態転移の例－ |
| 1.1 観測的宇宙論の最前線 - 未知の物理への扉      | 2.1 プロローグ（平衡）             |
| 1.2 ビッグバン宇宙論と標準モデル             | 2.2 プロローグ（非平衡）            |
| 1.3 宇宙背景放射の物理とその歴史             | 2.3 吸収状態転移の基礎（現象）         |
| 1.4 宇宙背景放射観測の最前線               | 2.4 吸収状態転移の実験             |
| 1.5 最先端プロジェクトに見る方法論            | 2.5 吸収状態転移の理論             |
| 1.6 多様な宇宙論へのアプローチ              | 2.6 乱流転移                  |
| 1.7 新しい物理を切り開くための新技術・観測的宇宙論の未来 | 2.7 吸収状態転移と対称性            |
|                                | 2.8 吸収状態転移と保存則            |

## 1.5 4年生 A セメスター

### 1.5.1 化学物理学：山本 智

- |              |          |
|--------------|----------|
| 1. イントロダクション | 4. 分子分光學 |
| 2. 分子の形と対称性  | 5. 分子間力  |
| 3. 分子の電子状態   | 6. 化学反応  |

## 7. トピックス

## 1.5.2 素粒子物理学：大谷 航

1. Introduction
2. Basic Concepts
3. Experimental Tools
4. Decay and Cross Sections
5. Dirac Equation
6. Quantum Electrodynamics (QED)

7. Weak Interactions
8. Electroweak Theory
9. Quark Model and QCD
10. Quark Mixing and CP Violation
11. Forefront of Particle Physics

## 1.5.3 場の量子論 II：筒井 泉

1. 電磁場とその量子化
  - 1.1 実スカラー場の量子論（復習）
  - 1.2 複素スカラー場と保存則
  - 1.3 局所対称性とゲージ原理
  - 1.4 電磁場
  - 1.5 量子電磁力学
2. 非可換ゲージ理論
  - 2.1 古典場と非可換ゲージ群
  - 2.2 ゲージ変換と対称性

- 2.3 量子化
- 2.4 ゲージ変換とトポロジー
- 2.5 経路積分と Theta 項
3. 発散と繰り込み
  - 3.1 正則化
  - 3.2 繰り込み
  - 3.3 繰り込み可能性
  - 3.4 繰り込み群

## 1.5.4 原子核物理学：Kathrin Wimmer

1. Global properties of the nucleus
2. Stability and decay
3. Particle accelerators
4. Detectors
5. Nucleon-nucleon interaction
6. Nuclear models
  - 6.1 single-particle properties

- 6.2 collective excitations
7. Nuclear reactions
8. Nuclear astrophysics
  - 8.1 hydrogen and helium burning
  - 8.2 synthesis of heavy elements
9. Super heavy elements
10. Hartree Fock theory for nuclei

## 1.5.5 固体物理学 III：北川 健太郎, 高木 英典

1. 磁性
  - 1.1 孤立イオンの磁性、結晶場
  - 1.2 原子間相互作用
  - 1.3 スピン波
  - 1.4 ハバード模型
  - 1.5 遍歴磁性
  - 1.6 量子スピン磁性とフラストレーション

2. 相関電子の超伝導
  - 2.1 電子相関
  - 2.2 モット絶縁体と磁性
  - 2.3 フェルミ液体論
  - 2.4 金属絶縁体転移
  - 2.5 層状銅酸化物の高温超伝導
  - 2.6 異方的超伝導

### 1.5.6 重力波物理学 : Kipp Cannon, Raffaele Flaminio

- |   |   |
|---|---|
| 1. Review of general relativity and gravitational waves | 3. Signal identification and interpretation     |
| 2. Astrophysical sources of gravitational waves         | 4. Gravitational-wave detectors                 |
|   | 5. Gravitational wave astronomy: recent results |

### 1.5.7 電子回路論 : 勝本信吾

電子回路は、直接の物理的には電磁場を人間の役に立つように飼いならす工夫である。一方、線形応答、信号・雑音(ゆらぎ)、制御、など、メタなレベルでの極めて一般的な概念が活躍する小宇宙でもある。この講義では、これらの上位概念を紹介するとともに、これを電磁場を使って実現するための物質科学のような泥臭い話まで、物理学ならではの広い視野を提供する。

- |                    |                           |
|--------------------|---------------------------|
| 1. 電磁場と電子回路        | 5.1 伝送路                   |
| 1.1 この講義について       | 5.2 伝送路の伝播現象              |
| 1.2 電子回路とは         | 5.3 S行列(Sパラメタ)            |
| 1.3 2端子素子          | 5.4 シュレディンガー方程式とLC伝送路     |
| 1.4 回路図            | 6. 信号, 雑音, 波形解析           |
| 1.5 抵抗器            | 6.1 ゆらぎ                   |
| 1.6 キャパシタ          | 6.2 増幅器の雑音                |
| 1.7 インダクタ          | 6.3 変調とアナログ信号伝送           |
| 2. 線形回路序論          | 6.4 離散化信号                 |
| 2.1 線形システムと電子回路    | 7. デジタル信号とデジタル回路          |
| 2.2 電源             | 7.1 デジタル信号序論              |
| 2.3 回路網            | 7.2 論理ゲート                 |
| 2.4 4端子(2端子対)回路    | 7.3 論理ゲートの実装              |
| 2.5 端子対回路の諸定理      | 7.4 論理演算の回路化と簡単化          |
| 2.6 双対性            | 7.5 A-D/D-Aコンバータ          |
| 2.7 受動素子と能動素子      | 7.6 デジタルフィルタ              |
| 3. 伝達関数と周波数応答・過渡応答 | 7.7 ハードウェア記述言語:HDL        |
| 3.1 受動素子2端子回路の伝達関数 | 8. ニューラルネットワーク(NN)        |
| 3.2 2端子受動素子回路      | 8.1 フィードフォワードNNと多層パーセプトロン |
| 3.3 受動素子回路の過渡応答    | 8.2 制限ボルツマンマシン            |
| 4. 増幅回路            | 8.3 畳み込みNN                |
| 4.1 増幅回路と系の制御      | 8.4 FPGAとNN               |
| 4.2 OPアンプ          | 1. 回路の線形応答と伝達関数           |
| 4.3 トランジスタ         | 2. 増幅回路                   |
| 4.4 電場効果トランジスタ     | 3. 雑音と信号処理                |
| 5. 分布定数回路          | 4. デジタル回路とデジタル信号処理        |

### 1.5.8 普遍性生物学 : 金子 邦彦, 古澤 力

- |                            |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| 1. 生命システムのマクロ状態理論の可能性      | 可塑性                   |
| 1.1 基本的性質: 多様性、活動性、ロバストネス、 | 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

### 1.5.9 系外惑星：須藤 靖, 相川 祐理

1. 物理定数と世界の安定性
  - 1.1 宇宙と世界はどちらが大きい？
  - 1.2 天体形成史
  - 1.3 宇宙の階層構造
  - 1.4 物理法則と初期条件
  - 1.5 ガス惑星の質量
  - 1.6 恒星の質量
  - 1.7 宇宙の階層と基本物理定数
  - 1.8 物理学における必然と偶然
  - 1.9 世界を知るための天文学
2. 系外惑星検出史
  - 2.1 系外惑星発見数
  - 2.2 太陽系外惑星検出方法のまとめ
  - 2.3 太陽系外惑星発見の歴史
  - 2.4 プロキシマ・ケンタウリの周りのハビタブル惑星
3. 系外惑星系の軌道進化と古在効果
  - 3.1 古在効果とは
  - 3.2 惑星形成の標準シナリオ：コア集積モデル
  - 3.3 重力 2 体問題
  - 3.4 ケプラー問題とハミルトン・ヤコビ方程式
  - 3.5 重力 3 体問題と永年摂動
  - 3.6 古在効果
  - 3.7 潮汐作用
4. 惑星内部
  - 4.1 太陽系の惑星 (概観)
  - 4.2 内部構造の基礎
  - 4.3 ホットジュピター
  - 4.4 クールジュピター
  - 4.5 スーパーアースとミニネプチューン
5. 惑星大気
  - 5.1 太陽系の惑星 (概観)
  - 5.2 大気構造の基礎
  - 5.3 大気透過観測
  - 5.4 大気放射観測
6. 惑星系の多様性と起源
  - 6.1 巨大惑星
  - 6.2 小規模惑星
  - 6.3 恒星タイプ依存性

### 1.5.10 物理のための科学英語特論：小野 義正

1. 英語論文作成の概要 1. 科学英語とは、日本人英語の欠点と改善策、直接翻訳はするな、和文和訳せよ、英語活用メモをつくり英借文する
2. 英語論文作成の概要 2. 英語の発想で書く (Leggett's Trees)、英語の基本は三拍子、起承転結はやめよう、読みやすい論文を書く、結論を先に、理由を後に、否定文を避けて肯定文で書く
3. 英語論文の構成と作法 1. 効率のよい英語論文執筆の進め方、よい英語論文の書き方、基本的な注意、英語論文の構成 (IMRAD 方式)、英語論文の各項目の書き方 1 (表題、著者と所属、著者抄録)
4. 英語論文の構成と作法 2. 英語論文の各項目の書き方 2 (序論、本論、結果、考察、結論、謝辞、引用文献、図と表)、辞書の使い方
5. 作文技術 1. 文頭、数字の使い分け、用語の統一、リスト項目の一貫性 (並列構造で書く)、つ

- づりの統一、簡潔な文を書く、受動態を避け能動態を使う、連結語を使う
6. 作文技術 2. 不必要な単語を省く、日本人に多い間違いを直す、自動詞と他動詞の取り違え、よく使われる略語、注意すべき単語
  7. 文法的事項 1. 動詞の適切な時制、主語を明確に、冠詞の使い方、名詞の使い方、和製英語に注意、スペリングに注意
  8. 文法的事項 2. 前置詞、句読法、数字・数式の表現法、記号の読み方、元素記号、参考書
  9. 英語プレゼンの概要. プレゼンテーション（口頭発表）とは、プレゼンの心構え、英語プレゼンの構成、スライドの効果的な使い方、標準スライド
  10. 英語の構造としゃべり方. 英語の構造、英語のしゃべり方、発音のコツ、和製（カタカナ）英語に注意、わかってもらえる英語のしゃべり方（事前準備）
  11. 発表のマナー・テクニック. 原稿は読むべきか、原稿・メモ作成上の注意、発表練習（リハーサル）、発表時のマナー・テクニック、Non-verbal Communication、プレゼン当日のコツ
  12. 英語プレゼンの実際. 最初の挨拶、プレゼンの流れと決まり文句、図表の説明、数字・数式・記号の読み方、グラフ表現、図形
  13. 質疑応答・ポスターセッション. 質疑応答（Q&A）の心構え・指針、質問が聞きとれなかったとき・答えられないときの対応、ポスターセッションの利点・発表の技術、プレゼンの注目点と評価のポイント、チェックリスト、Hints for a Successful Conference、参考書
  14. (補遺) 論文投稿と査読者対策

## 2 各賞受賞者紹介

### 2.1 佐藤勝彦 名誉教授

— 瑞宝重光章 —

2018年秋の叙勲において、本研究科名誉教授（物理学専攻）の佐藤勝彦先生が瑞宝重光章を授与されました。瑞宝重光章は「公務等に長年にわたり従事し成績を挙げた方」を授与対象とするものです。佐藤先生は、京都大学理学部物理学科、同大学院をご卒業後、同学科・助手を経て1982年に本学理学部助教授に就任されました。その後、同教授、ビッグバン宇宙国際研究センター長、理学部長・大学院理学系研究科長として、本研究科に大きな貢献をされました。佐藤先生は、宇宙物理学において宇宙の創生とその進化さらには天体現象を素粒子物理学によって研究する新たな分野を開拓し、宇宙構造の基本的な性質を説明するインフレーション宇宙論を提唱したことを始めとして、世界的に知られた数多くの業績を挙げておられます。先生のご受章を心からお喜び申し上げますとともに、今後のますますのご健康とご活躍をお祈りいたします。

### 2.2 小林俊一 名誉教授

— 瑞宝中綬章 —

本研究科名誉教授（物理学専攻）の小林俊一先生が、2018年秋の叙勲において瑞宝中綬章を受章されました。小林先生は、大阪大学大学院理学研究科で博士号を取得された後、1968年に本学理学部助手になられ、講師を経て1975年から助教授、1985年から1998年まで教授として本研究科の研究と教育に尽力され、多くの後進を育成されました。小林先生は、金属微粒子の久保効果や金属薄膜のアンダーソン局在など、極低温下で発現する新奇な物理現象を核磁気共鳴や輸送特性の測定手段で次々と見出され、今日のメゾスコピック系やナノサイエンス研究の礎を作られました。この間、低温センター長、理学系研究科長、副学長として学内行政にも辣腕を振るわれ、本学ご退職後も、理化学研究所理事長、秋田県立大学理事長・学長として我が国の先端科学の推進と高等教育の発展に、引き続き大きな足跡を残されました。この度のご受章を心よりお祝い申し上げ、益々のご健康とご活躍をお祈りいたします。

### 2.3 永嶺謙忠 名誉教授

— 日本学士院賞 —

本物理学専攻の名誉教授の永嶺謙忠先生が、日本学士院賞を受賞されました。永嶺先生は本物理学専攻で学位を取得され、本学工学部助手、同理学部助手を経て、1978年から1996年まで助教授、教授として、1997年からは高エネルギー加速器研究機構教授として在職されました。永嶺先生はミュオンの性質を活かして素粒子から物質科学、学際科学にわたる幅広い領域での研究を開拓されています。本受賞の対象となった「ミュオンラジオグラフィーの開拓と大規模構造体の非破壊的研究」では、宇宙線ミュオンを用いたラジオグラフィー法を創始され、巨大物体の内部構造の探索を可能にしました。火山体の活動状況の経時変化をオンライン透過像で調べることに成功され、福島第一原子力発電所の溶融燃料棒の調査等にも貢献されています。永嶺先生は現在もミュオン科学を先導されており、今後もますますご活躍されることを祈念いたします。

## 2.4 櫻井博儀 教授

— 平成 30 年度全国発明表彰 21 世紀発明賞 —

櫻井博儀教授ほか 8 名が「放射性廃棄物の処理方法」のコンセプト特許により、公益社団法人発明協会「平成 30 年度全国発明表彰」の「21 世紀発明賞」を受賞しました。原子力発電所の運転で生成された放射性核廃棄物の内、10 万年以上の寿命を持つ、長寿命核分裂生成物 (LLFP) と呼ばれる放射性同位元素は地層処分される予定ですが、国内での処分場は決定されていない状況です。受賞対象のコンセプト特許は、これらの原子核を加速器を用いて生成した中性子で、原子核反応を生じさせ、短寿命化もしくは安定な原子核へと核変換するという方法を提案したものです。さらに核変換する前に、核スピンを利用したレーザーでの偶奇分離法を組み合わせることで、効率良く核変換を行うことを目指しています。LLFP の一種であるパラジウムはレアメタルであり、安定な原子核に核変換することで、廃棄物の低減だけでなく、資源化をも狙うという野心的な特許になっています。本発明により期待される、地層処分場の容量の低減、処理用の大容量加速器とレアメタルのリサイクルの分野の発展が評価され、受賞に至りました。

## 2.5 北川健太郎 講師

— 日本物理学会 第 24 回 (2019 年) 論文賞 —

本論文賞は、鉄系超伝導体に対する母物質の磁性基礎研究論文について日本物理学会より与えられています。磁気共鳴の精密測定と解析によって、As 核がこの系の反強磁性電子状態の優れたプローブになることを明らかにしたことが主要な理由です。特に、ストライプ型磁気構造を仮定して決定された超微細相互作用テンソルの値は、他の鉄系超伝導体に対する核磁気共鳴研究のデータ解析でおおいに参照されています。超伝導状態を直接解明するアプローチでなく、母物質の磁性に焦点を当てて鉄系超伝導体の物性研究の基礎を築いた点で高く評価され、日本物理学会論文賞にふさわしい業績であると認められました。

## 2.6 松永隆佑 氏 (島野研助教、現 物性研究所)

— 平成 30 年度文部科学大臣若手科学者賞 —

松永隆佑氏が、「高強度テラヘルツ波を用いた非平衡超伝導と集団励起の研究」で平成 30 年度文部科学大臣若手科学者賞を受賞されました。近年、フェムト秒パルスレーザーを用いたテラヘルツ周波数帯の電磁波発生、検出、分光技術が飛躍的に進展し、これを用いた強電場下での固体中電子のダイナミクスや非線形応答、物質相制御の研究が発展しました。松永氏はこの技術を用いて、s 波超伝導体の光励起非平衡状態の研究で優れた先駆的成果を挙げました。特に、ヒッグスモードと呼ばれる超伝導の秩序変数の振幅振動の観測は、その理論予測から約半世紀を経て初めて明瞭に観測され、素粒子のヒッグス粒子と共通する物理学の普遍性を示す顕著な例として、分野を超えて世界的にも大きな反響をもたらしました。

## 2.7 大栗真宗 助教 (須藤研)

— 第 23 回 日本天文学会林忠四郎賞 —

大栗真宗氏が、「重力レンズ天文学への基礎的貢献」に対して、2018 年度の日本天文学会林忠四郎賞を受賞しました。大栗氏は、SDSS クェーサー重力レンズカタログ、非球対称形状のダークマターハロー、重力レンズ超新星、最遠方の単独星の発見など、理論と観測の両面から重力レンズ現象を宇宙論と天文学の広範な問題に応用し、多くの国際共同研究を主導しながら画期的な成果を上げて来ました。今後のさらなる活躍を期待します。

## 2.8 森貴司 氏 (宮下研助教、現 理化学研究所)

— 第 22 回 久保亮五記念賞 —

森貴司氏が「量子系の非平衡時間発展における厳密な結果」に関する研究で第22回久保亮五記念賞を受賞されました。この賞は統計物理学・物性科学における波及効果の大きい基礎的研究で優れた業績をあげた45歳未満の研究者に対し授与される賞です。今回はこれまでの最年少の受賞でした。森氏は、近年極低温原子系実験の展開などに相まって、盛んに研究が進んでいる量子非平衡緩和現象に関して、量子マスター方程式の精密な定式化、フロケ束縛状態の存在、pre-thermalization、固有状態熱化仮説 (Eigenstate Thermalization Hypothesis) など統計力学の基礎的な問題を数理物理的なアプローチによって現象の基礎的特徴の厳密な性質を明らかにし、量子系のダイナミクス一般や量子統計物理分野への幅広い波及効果を与えてきたことが評価されています。

## 2.9 大屋瑤子 助教 (山本研)

— 第35回井上研究奨励賞 —

物理学専攻の大屋瑤子助教が第35回井上研究奨励賞を受賞されました。大屋氏は、アルマ望遠鏡を用いて太陽型原始星の近傍に付随するガスの物理・化学構造を電波スペクトル線観測によって調べ、星・惑星系形成分野で大きな成果を挙げてきました。主な成果は、(1) 観測した6個の原始星の物理構造はいずれも簡単な物理モデルでよく表されること、(2) 物理構造は共通しているにもかかわらず、惑星系サイズでの化学組成は天体ごとに大きく異なっていること、そして、(3) 化学組成が回転落下エンベロープの遠心力バリア近傍で大きく変化することを明らかにしたことです。これらは、星形成から惑星系形成に至る物理過程と物質進化の核心を突くもので、宇宙物理学、天文学、地球惑星科学の分野にインパクトを与えました。今回、これらの点が評価されて受賞につながりました。大屋氏は学位取得後、物理学専攻の助教として同分野を中心に研究・教育に携わっており、今後の一層の活躍が期待されます。

## 2.10 蘆田祐人 氏 (上田研)

— 東京大学総長賞、日本物理学会若手奨励賞、第9回 (平成30年度) 日本学術振興会 育志賞 —

蘆田祐人氏が、東京大学総長賞、日本物理学会若手奨励賞、第9回 (平成30年度) 日本学術振興会 育志賞を受賞されました。蘆田氏は、物性物理学における量子多体系の理論と、量子光学で確立された開放量子系の理論を巧みに組み合わせることで開放量子多体物理に関する多くの先駆的研究を行いました。具体的には、トポロジカル相転移の枠組み (2016年ノーベル物理学賞) を開放系の視点を取り入れて研究することで、量子臨界現象の普遍クラスを発見した。さらに、近藤系など不純物が外部環境と強く結合した開放量子系を研究し、現存する最高の数値計算手法よりも格段に高効率な計算を可能にする理論手法を開発しました。今後革新的な発展が期待される量子技術分野において、同氏が開拓しつつある開放量子多体系の研究は重要性を増してゆくものと期待されます。

## 2.11 川畑幸平 氏 (上田研)

— 東京大学総長賞 —

川畑幸平氏が、東京大学総長賞を受賞されました。川畑氏は、非エルミート物理において、対称性とトポロジという物理学における基礎概念がどのような変更を受けるかという本質的な問題に取り組み、その理論的枠組みの構築に成功しました。特に、時間反転対称性と粒子正孔対称性というエルミートな物理系においては本質的に異なる基本対称性が、非エルミート系においては統一されるという注目すべき事実を発見しました。そして、その帰結として平衡系には対応物をもたないトポロジカル相が発現することを明らかにし、この対称性の統一に基づき、すべての非エルミートなトポロジカル相を包括的に分類する一般理論を構築しました。この分類理論は、基礎物理学の観点から重要であるだけでなく、新しい機能を有するトポロジカルレーザーの実現可能性を示すなど、応用面での重要性も期待されます。

## 2.12 陳詩遠 氏 (駒宮研)

— 日本物理学会若手奨励賞 —

世界最高エネルギー加速器 LHC のヒッグス粒子発見にあとの新たな目標は、そのヒッグス粒子の存在を可能にしている新しい原理の発見であります。その最有力な候補は超対称性であるが、自由度が高すぎていろいろな可能性があります。陳さんは、この問題に、宇宙の暗黒物質の残存量を軸に、超対称性粒子の存在の予言されている領域を絞り、探索が困難領域にも新しい手法で感度を広げ、特にバックグラウンドを高い精度で予言することに成功しました。この網羅的な超対称性探索を行った研究が評価されて、日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。おめでとうございます。現在も、LHC 実験で超対称性研究で中心的な役割を果たしながら、その鍵となる飛跡検出器の運用でも中心的な役割を果たしており、今後の益々の飛躍が期待されています。

## 2.13 高木優 氏 (能瀬研)

— 平成 30 年度時実利彦記念神経科学優秀博士研究賞 —

物理学専攻博士課程 3 年の高木優さんが「平成 30 年度時実利彦記念神経科学優秀博士研究賞」を受賞しました。日本における神経科学・脳科学分野の更なる発展に寄与することが期待される大学院博士課程学生に与えられる賞です。受賞の対象となったテーマは「相同なコマンドニューロンの多様化による適応的な逃避行動の実現」です。オプトジェネティクスやコネクトミクスなどの最先端の技術を駆使して、コマンドニューロンの結合様式の多様化が行動選択の多様性を生むための基本機構である可能性を初めて提示した点において高い評価を受けました。

## 2.14 一ノ倉聖 氏 (長谷川研、現 東京工業大学)

— 日本物理学会若手奨励賞 —

一ノ倉聖氏が、博士論文の主題であった原子層超伝導に関する研究で標記賞を受賞しました。スピン分裂した表面電子状態での超伝導 (ランジュバ超伝導) の発見、2 層グラフェンの超伝導の発見、ボーズ金属と呼ばれる状態の発見を報告する 3 つの論文が評価されました。対称性の破れや強いスピン軌道相互作用、大きな揺らぎなどの効果のため、結晶表面上の 1, 2 原子層だけが超伝導に転移する原子層超伝導は、従来型超伝導ではない可能性を秘め、現在盛んに研究が進められています。一ノ倉氏の研究は、その先鞭をつけるもので多大な影響を与えています。

## 2.15 本郷優 氏 (初田研、現 理化学研究所)

— 日本物理学会若手奨励賞 —

2019 年日本物理学会理論核物理領域若手奨励賞を、本郷優氏が受賞しました。受賞業績は、「局所ギブスアンサンブルに基づく場の量子論による相対論的流体力学の定式化」です。本郷氏らは、局所ギブス分布を初期条件として、局所平衡からのずれを時空の微分展開により系統的に求め、散逸項を含む 1 次の相対論的流体方程式を場の量子論に基づいて導出しました。この成果は、高エネルギー原子核反応への応用のみならず、理論物理学全般にわたる重要な進展として高く評価されています。

## 2.16 大小田結貴 氏 (山本研)

— 「BBC が選ぶ今年の女性 100 人」に選出 —

大小田結貴さん (修士課程 2 年) が、BBC が選ぶ今年の女性 100 人のうちの 1 人に選ばれました。これは、世界の人々に影響を与えた、あるいは、活躍している女性を、いろいろな年齢層といろいろなジャンルから

選ぶ企画で、日本人は大小田さんを含めて 2 名選ばれています。大小田さんは、アルマ望遠鏡を用いた電波観測で、生まれたばかりの原始星のまわりに、すでに惑星系のもととなる回転円盤が形成されていることを初めて観測的に明らかにする成果を挙げました。この成果は、太陽系の起源の理解を一新する可能性を秘めたもので、内外で注目を集めつつあります。まだ修士課程在学中でありながら、そのような素晴らしい活躍を見せたことが、今回の選出につながりました。これからも博士課程の研究の中で、大きく羽ばたいてほしいと期待しています。

## 2.17 平成 30 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 30 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） 蘆田祐人 氏、大下翔誉 氏、播金優一 氏、東川翔 氏
- 理学系研究科 研究奨励賞（修士課程） 川畑幸平 氏、内藤智也 氏、中塚洋佑 氏、中西健 氏
- 理学部 学修奨励賞 稲村寛生 氏、黒岩広大 氏、田中宏明 氏

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]

小高 裕和	助教	H30/4/1	採用	理化学研究所
小杉 太一	特任研究員	H30/4/1	採用	本学工学系研究科
仲山 将順	特任研究員	H30/4/1	採用	国立情報学研究所
奥澤 浩未	学術支援職員	H30/4/1	採用	本学工学系研究科
佐山 芳恵	学術支援職員	H30/4/1	採用	
竹内 一将	准教授	H30/5/1	採用	東京工業大学
CHATE Hugues Pascal Louis	GSGC 客員教授	H30/9/16	採用	
HARTWIG TILMAN	助教	H30/12/1	採用	知の物理学研究センター
LIU ZIYIN	技術補佐員	H30/12/1	採用	本専攻修士課程
MANSKE DIRK	GSGC 客員教授	H30/12/3	採用	
COELHO QUINTINO MARCO TULIO	特任研究員	H31/3/1	採用	本研究科 PD
飯田 英明	特任研究員	H31/3/1	採用	Far Eastern Federal University

[物理学教室から移られた方々]

木下 慶美	特任研究員 (樋口研)	H30/8/31	辞職	本研究科生物科学専攻
佐藤 貴恵	学術支援職員 (物理事務室)	H30/8/31	辞職	
森 貴司	助教 (宮下研)	H30/9/30	辞職	理化学研究所
CHATE Hugues Pascal Louis	GSGC 客員教授	H30/12/15	辞職	
和田 由美子	学術支援職員 (第二事務分室)	H31/1/31	辞職	早稲田大学
MANSKE DIRK	GSGC 客員教授	H31/3/2	辞職	
佐野 雅己	教授	H31/3/31	定年退職	本学国際高等研究所東京カレッジ
藤森 淳	教授	H31/3/31	定年退職	早稲田大学
宮下 精二	教授	H31/3/31	定年退職	日本物理学会
芝田 悟朗	助教 (藤森研)	H31/3/31	辞職	東京理科大学
平岩 徹也	助教 (佐野研)	H31/3/31	辞職	シンガポール国立大学
古川 俊輔	助教 (上田研)	H31/3/31	辞職	慶應義塾大学
岩本 康之介	特任研究員 (横山研)	H31/3/31	辞職	日本学術振興会 (横山研)
小杉 太一	特任研究員 (常行研)	H31/3/31	辞職	東京工業大学
仲山 将順	特任研究員 (村尾研)	H31/3/31	辞職	東芝
檜原 太一	特任研究員 (宮下研)	H31/3/31	辞職	本学物性研究所
栗本 千苗	学術支援職員 (佐野研)	H31/3/31	辞職	本学医学系研究科
島崎 裕子	学術支援職員 (藤森研)	H31/3/31	辞職	本学工学系研究科
八島 恵子	学術支援職員 (宮下研)	H31/3/31	辞職	本学工学系研究科
石川 隆	技術補佐員	H31/3/31	辞職	
小倉 聡司	係長 (物理事務室)	H31/3/31	配置換え	教育・学生支援部学生支援課

## 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 幹事 専攻主任 専攻副主任 常置委員 教務  学生実験 リーディング大学院 外国人学生・留学	山本 樋口、小形 上田 櫻井 高木、須藤 松尾(理)、酒井(大学院)、馬場(ガイダンス) 北川(学生相談) 浅井、福山、安東、横山(将) 浅井、吉田、相原、横山(将)	小倉、野澤、藤田  物理教務 物理教務 物理教務  佐伯、八幡 物理事務、物理教務
優先配置 海外学部生インターンシップ受入 GSGC 留学	村尾 高木、島野 吉田、横山(順) 安東	物理教務 物理教務 物理教務 物理教務
駒場生進学		
進振委員 進学指導/推薦入試アドバイザー 駒場対策	安東 松尾、村尾 岡田、松尾、Wimmer、馬場、桂、井手口	物理教務 物理教務 物理教務
奨学金・支援		
奨学金 博士課程学生支援制度 就職 部屋割 安全衛生 放射線 管理技術室 (技術室会議メンバー)  図書 コロキウム 年次報告 記録係 事務分室 理交会 親睦会 ホームページ、IT オープンキャンパス	長谷川 濱口 湯本、櫻井 林 岡本 横山(将) 岡田(統括、試作室) 浅井(学生実験) 岡本(安全衛生・低温) 藤堂(IT関連) 村尾(理)、北川、Wimmer 常行、横山(順)、島野 馬場、日下 井手口、日下、竹内 第一：酒井、第二：濱口 諸井 桂 藤堂、吉田 北川	尾澤 渡辺、小倉 仁井田、野澤 小倉 八幡 物理事務 下澤 佐伯、八幡 八幡 南野  物理事務 仁井田、八幡 物理事務  物理事務 物理事務 南野 物理事務

## 5 教室談話会

- 2018年9月13日(木) 15:00-16:00  
Robert Garisto 氏 (Editor for Physical Review Letters, APS)  
“Secrets of PRL”
- 2018年12月4日(火) 17:00-18:30  
Gregory A. Good 氏 (Director of Center for History of Physics, American Institute of Physics)  
“History of Modern Physics and History Programs at the American Institute of Physics”
- 2018年12月20日(木) 17:00-18:30  
Dirk Manske 氏 (Max Planck Institute for Solid State Research)  
“Higgs spectroscopy of superconductors”
- 2019年3月12日(火) 11:00-12:30  
藤森淳教授 (最終講義)  
「d 電子と光電子に魅せられて」
- 2019年3月12日(火) 14:00-15:30  
宮下精二教授 (最終講義)  
「ゆらぎの物理学」
- 2019年3月12日(火) 16:00-17:30  
佐野雅己教授 (最終講義)  
「晴れときどきカオス ～非平衡系の法則を求めて～」

## 6 物理学教室コロキウム

- 2018年5月11日(金) 17:00-18:30  
竹内一将氏(東京大学大学院理学系研究科)  
「非平衡界面ゆらぎの普遍法則— ありふれた現象から物理と数学の諸分野をめぐる —」
- 2018年5月18日(金) 17:00-18:30  
Mark Devlin氏(University of Pennsylvania)  
“The Cosmic Microwave Background”
- 2018年6月8日(金) 17:00-18:30  
村山斉氏(東京大学 カブリ IPMU/ University of California, Berkeley)  
「International Linear Collider (ILC250) の物理」
- 2018年6月22日(金) 17:00-18:30  
大谷義近氏(東京大学物性研究所)  
「スピン流を媒介としたスピン変換現象」
- 2018年10月19日(金) 17:00-18:30  
樺島祥介氏(東京工業大学)  
「スパースモデリングへの統計力学的アプローチ」
- 2018年11月9日(金) 17:00-18:30  
松田祐司氏(京都大学)  
「マヨラナ・フェルミオンによる量子ホール効果現象」
- 2018年12月14日(金) 17:00-18:30  
中村 哲氏(東北大学)  
「高強度電子・光子ビームで探るハイパー核と中性子星深部」
- 2019年1月25日(金) 17:00-18:30  
三宅 隆氏(産業技術総合研究所)  
「強力永久磁石」

## 7 金曜ランチトーク

- 2018年4月27日(金) 奥村恭幸(東京大学素粒子物理国際研究センター)  
“The latest results of LHC/ATLAS experiment”
- 2018年5月11日(金) 大屋瑤子(山本研究室)  
“A Few Tens au Scale Physical and Chemical Structures around Young Low-Mass Protostars”
- 2018年5月18日(金) 木内健司(日下研究室)  
“Ground-based telescopes for Cosmic Microwave Background observation”
- 2018年6月22日(金) Kathrin WIMMER氏(物理学専攻)  
“Shapes and Symmetries of Exotic Nuclei”
- 2018年7月13日(金) 小高裕和(馬場研究室)  
“What shall we learn from the energetic universe?”
- 2018年11月9日(金) 山口弘悦氏(ISAS)  
“X-ray and gamma-ray spectroscopy to diagnose non-equilibrium plasma and application to high-energy astrophysics”
- 2018年12月14日(金) Tilman Hartwig(吉田研究室)  
“Stellar Archaeology with Machine Learning”

## 年次研究報告 2018年度

---

---

2019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 山本 智  
編集 竹内 一将  
日下 暁人  
八幡 和志

---

---