ISSN 0910-0709

*Department of Physics*

*School of Science*

*The University of Tokyo*

# Annual Report

2019

# 令和元年度 年次研究報告



東京大学 大学院　理学系研究科・理学部
物理学教室

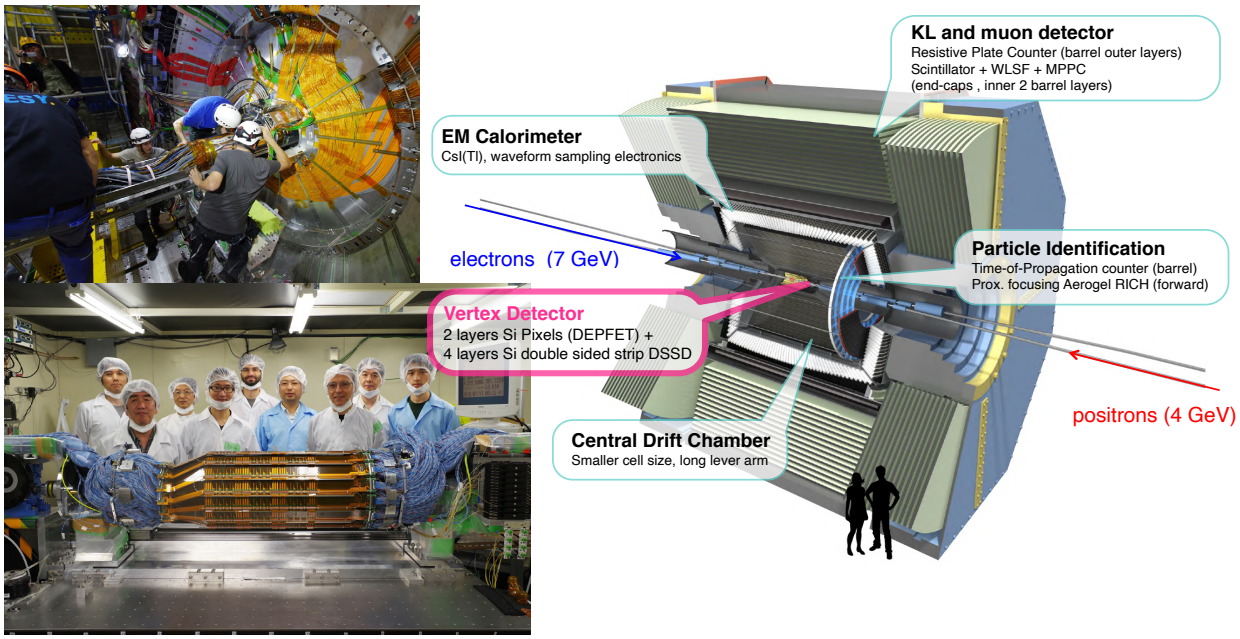



図 1: 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では、第 3 世代のクォークを含む B 中間子や、第 3 世代レプトンの $\tau$ 粒子などの崩壊を超精密に測定することで、素粒子の標準模型を越えた物理の発見を目指す、Belle II（ベルツー）実験が 2019 年から本格的に開始された。ナノメートルレベルまで絞られた、70 億電子ボルトの電子と 40 億電子ボルトの陽電子の衝突で生成される多様な粒子をとらえるのは、縦・横・高さがそれぞれ 8 メートル、総重量 1,400 トンの巨大な Belle II 測定器（右図）である。その心臓部であるシリコン崩壊点検出器（左下：組み上げ時の写真）は、電子と陽電子が衝突する中心部の最も近くに設置され（左上：設置時の写真）、荷電粒子の位置を 10$\mu$m 程度の精度で測定する。（相原-横山研究室 / 高エネルギー加速器研究機構, Belle II 実験グループ）

In 2019, the Belle II experiment, which aims to discover physics beyond the Standard Model by precisely measuring the decay of B mesons and $\tau$ leptons, started at the High Energy Accelerator Research Organization (KEK). The gigantic Belle II detector (right), which is 8 meters long, wide, and high and weighs 1,400 tons, captures particles produced by the collision of electrons of 7 billion electron volts and positrons of 4 billion electron volts. The Silicon Vertex Detector (bottom left: picture during assembly), is installed closest to the collison point (top left: picture during installation) and precisely measures the position of charged particles. (Aihara-Yokoyama Group / High Energy Accelerator Research Organization and Belle II Collaboration)

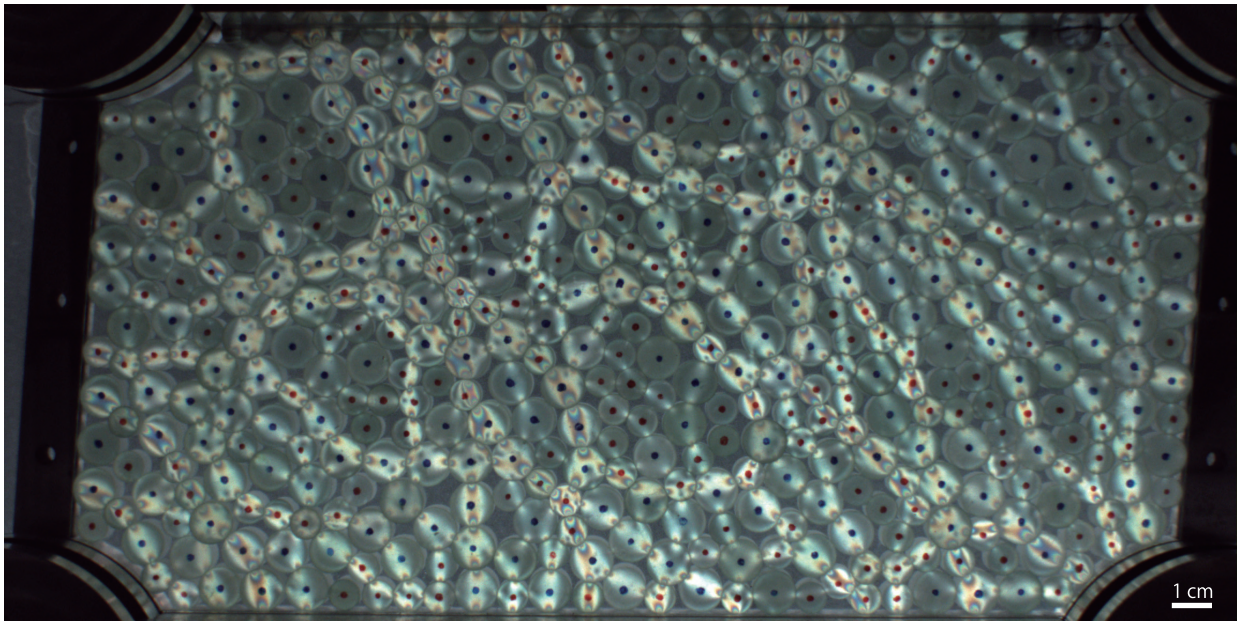



図 2: 周期的せん断下の光弾性粒子系で見られる相互作用ネットワークの様子。光弾性とは、物質が局所的な応力に応じて複屈折を示す現象のことで、偏光観察によって応力分布を可視化できる。よく知られているように、多数の粒子が充填されていても、負荷は一部の粒子に集中し、それが鎖状のネットワークを構成していることがわかる。我々は、近年研究が進んでいる、周期的なせん断を受けた多粒子系における粒子運動の可逆性相転移に対して、光弾性材料を用いることで運動と相互作用を同時に観察し、相転移の性質とレオロジーの理解を目指している。(竹内研究室)

Force chain network of a photoelastic particle system under periodic shear. Photoelasticity refers to the property of material that leads to birefringence depending on the local stress at each point. Therefore one can visualize stress distribution by polarized light observation. The photograph shows a well-known fact that, even in a densely packed system, stress concentrates on some of the particles and forms a chain-like network. We apply this method to study a phase transition in reversibility of particle motion, in a densely packed particle system under periodic shear, which has been a target of intense studies recently. (Takeuchi Group)

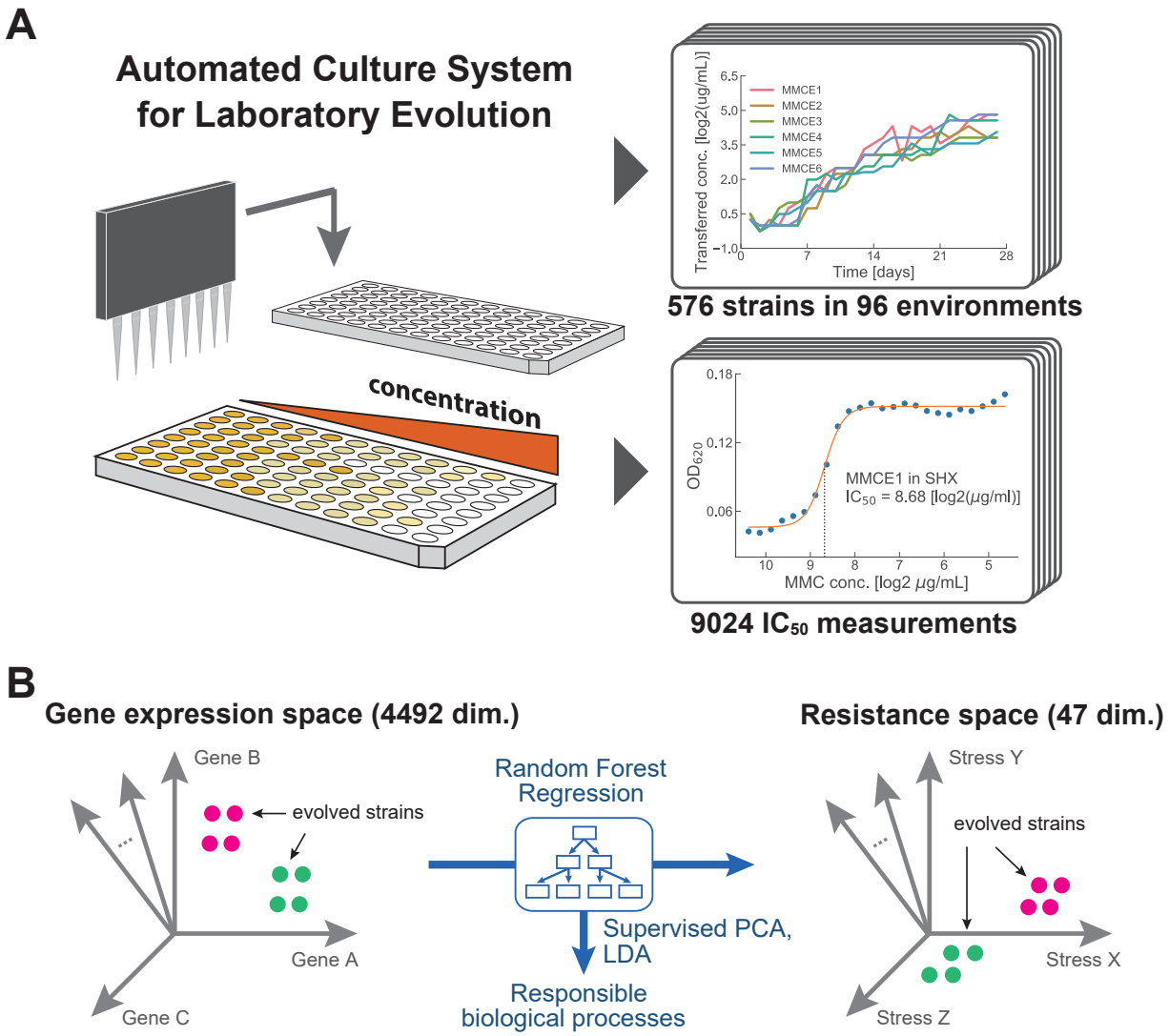



図 3: 多環境・多系統での大腸菌進化実験。ラボオートメーションを用いた全自動進化実験システムを用い、96 のストレス環境条件でそれぞれ 6 系統の大規模進化実験を実施し、それぞれのストレスに対する耐性大腸菌株を取得した。それらの耐性株について、遺伝子発現量プロファイルの定量と、様々なストレス環境に対する耐性能を定量したところ、大腸菌の表現型進化は比較的少数の特徴量によって記述可能であることが示された（古澤研究室）。

High-throughput laboratory evolution of Escherichia coli. We performed laboratory evolution of E. coli under 96 stress environments by using an automated culture system and obtained stress-resistant strains. Then, we quantified gene expression profiles and resistance to various stresses for these resistant strains. The data demonstrated that phenotypic changes in evolution can be described by a relatively small number of features, which will be a basis for prediction and control of evolutionary dynamics (Furusawa Group).

# 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 31 年・令和元年度（2019 年 4 月-2020 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、教授として、小林研介氏（量子物性実験：大阪大学より）、中辻知氏（物性物理学実験：本学物性研究所より）、助教として、中川大也氏（上田研）、西口大貴氏（竹内研）が着任されました。また、Wimmer Kathrin 講師（現 Instituto de Estructura de la Materia）と松井朋裕助教（福山研）が転出されました。また、福山寛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。藤堂眞治教授が平成 31 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞（科学技術振興部門）を、小林研介教授が第 37 回（2019 年度）大阪科学賞を、酒井広文教授が第 23 回松尾財団宅間宏記念学術賞（第 23 回松尾学術賞）を、岡田康志教授が塚原仲晃記念賞（ブレインサイエンス振興財団）を、馬場彩准教授が日本物理学会第 1 回（2020 年）米沢富美子記念賞を受賞されました。同賞は、川口由紀氏（元上田研・現名古屋大学）、所裕子氏（元宮下研・現筑波大学）も受賞されています。さらに、赤城裕助教（桂研）が第 25 回日本物理学会論文賞を、小高裕和助教（馬場研）、中川大也助教（上田研）、西口大貴助教（竹内研）、肥後友也特任助教（中辻研）、吉岡信行氏（桂研）、安達俊介氏（元浅井研、現京都大学）、遠藤晋平氏（元上田研・現東北大学）、谷内稜氏（元櫻井研・現 York 大学）が第 14 回（2020 年）日本物理学会若手奨励賞を、吉川尚孝助教（島野研）が井上研究奨励賞を、佐伯喜美子氏（技術専門員）が生物学技術研究会功績賞を、龔宗平氏（上田研）が日本学術振興会育志賞を受賞されました。馬場研 cipher 衛星計画グループ（代表：春日知明氏 (D1)、共著：會澤優輝氏 (M2)、畠内康輔氏 (M1)）は、第 27 回衛星設計コンテストの文部科学大臣賞およびアイデア大賞を受賞されました。また、猪又敬介氏、濱崎立資氏、室谷悠太氏、吉岡信行氏、和田有希氏が令和元年度理学系研究科研究奨励賞（博士課程）を、小野清志郎氏、川田拓弥氏、永井瞭氏、廣瀬葉菜氏が同研究奨励賞（修士課程）を、青木匠氏、高橋拓豊氏、増木亮太氏が令和元年度理学部学修奨励賞を受賞しました。

物理学教室の教育・研究体制にも、大きな進展がありました。大学院教育では、物理学専攻を中心に、カブリ数物連携宇宙研究機構の村山斉教授をプログラムコーディネーターに迎えた修士博士一貫の５年間の学位プログラム「変革を駆動する先端物理・数学プログラム（FoPM）」が、文部科学省卓越大学院プログラム（WISE プログラム）に採択されました。FoPM では、海外の 17 の大学・研究機関、3 つの国内企業、11 の学内組織が連携し、先端物理学・数学を活用して、実際の社会問題の解決にも取り組める基礎科学の専門家を育成します。

また物性研究所、カブリ数物連携宇宙研究機構、低温科学研究センターとともに、トランススケール量子科学国際連携研究機構を立ち上げました。この連携研究機構では量子科学を基軸とした物理の階層構造を貫く概念の創出に向けて、東京大学の知と先端研究環境を結集させ、世界を先導する海外機関との人材交流・連携を推進してまいります。

物理学教室ではこのほかにも、産業界との大型連携の具体化を進めるなど、社会における基礎科学の新たな役割を模索しつつ、持続可能な基礎研究・教育の実現に向けて努力しています。先輩の先生方、卒業生の皆様、ならびに関係各位には、引き続きご指導ご鞭撻をお願い申し上げます。折しも新型コロナウイルスが世界中で猛威を振るい、2020 年度の新学期は在宅勤務・在宅学習で始まりました。社会情勢は先行き不透明な上に、様々な不便が生じていますが、学生の皆さんは動揺することなく、今できる勉学と研究に打ち込んでいただきたいと思います。

この年次研究報告は、小林研介教授、竹内一将准教授、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。

2020 年 5 月 1 日
物理学専攻 専攻長・物理学科 学科長
常行 真司

# 目 次


**I 研究室別 2019 年度 研究活動報告** **1**

**1 原子核・素粒子理論** **2**
1.1 原子核理論 (福嶋) 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 . . . 7

**2 原子核・素粒子実験** **12**
2.1 原子核実験グループ（櫻井研究室・Wimmer 研究室） . . . 12
2.1.1 軽い陽子過剰核における共鳴状態の分光 . . . 12
2.1.2 パラジウム同位体のミューオン捕獲 . . . 12
2.1.3 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 . . . 13
2.1.4 RIBF での高分解能インビームガンマ線核分光 (HiCARI Project) . . . 13
2.1.5 パイオン生成断面積の系統的測定 . . . 14
2.1.6 ミューオン X 線を使った元素分析装置 LeXSea の開発 . . . 14
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 . . . 18
2.2.4 HSC 暗黒エネルギー研究 . . . 18
2.2.5 アクシオンおよび軽い暗黒物質探索実験の実現可能性研究 . . . 18
2.3 浅井研究室 . . . 21
2.3.1 LHC・ATLAS 実験での研究 . . . 21
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 . . . 22

**3 物性理論** **27**
3.1 小形研究室 . . . 27
3.1.1 ディラック電子系 . . . 27
3.1.2 熱応答・熱電応答の理論 . . . 27
3.1.3 トポロジカル物質の理論 . . . 28
3.1.4 高温超伝導の理論 . . . 29
3.1.5 有機伝導体 . . . 29
3.1.6 ボロフェン関連物質 . . . 29
3.1.7 スピン系およびスピン軌道相互作用 . . . 29
3.2 常行研究室 . . . 33
3.2.1 データ同化を用いた結晶構造探索: 一部元素が無秩序化した系への応用 . . . 33
3.2.2 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 . . . 33
3.2.3 スピンゆらぎ効果を考慮した超伝導密度汎関数理論 . . . 33
3.2.4 逆コーン・シャム法の応用 . . . 33
3.2.5 Floquet 系における基底状態の定義 . . . 33
3.2.6 圧力誘起高温超伝導体 $H_3S$ のバンド形成機構 . . . 34

3.2.7 各種構造シミュレーションにおけるニューラルネットワークポテンシャルの利用 . . . 34
3.3 藤堂研究室 . . . 37
3.3.1 強相関系のシミュレーション手法 . . . 38
3.3.2 統計的機械学習による物質科学 . . . 38
3.3.3 量子コンピュータ基礎理論 . . . 39
3.3.4 強相関多体系における新奇な状態・相転移現象 . . . 39
3.3.5 動的協調現象・非平衡ダイナミクス . . . 40
3.3.6 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 . . . 40
3.4 桂研究室 . . . 43
3.4.1 強相関系・トポロジカル系 . . . 43
3.4.2 散逸のある量子多体系 . . . 44
3.4.3 数理物理学・統計力学 . . . 45
3.4.4 その他 . . . 45

**4 物性実験 49**
4.1 長谷川研究室 . . . 49
4.1.1 表面での電子・スピン輸送 . . . 49
4.1.2 表面・原子層ナノ構造 . . . 50
4.1.3 新しい装置・手法の開発 . . . 51
4.2 福山研究室 . . . 54
4.2.1 2 次元ヘリウムの量子相の研究 . . . 54
4.2.2 グラフェンのエッジ状態の研究 . . . 55
4.2.3 極低温実験技術の開発 . . . 56
4.3 岡本 研究室 . . . 58
4.3.1 劈開表面に形成された 2 次元電子系 . . . 58
4.3.2 金属超薄膜の超伝導 . . . 58
4.3.3 ビスマス超薄膜の電気伝導 . . . 60
4.4 島野研究室 . . . 61
4.4.1 超伝導体 . . . 62
4.4.2 二次元層状物質 . . . 63
4.4.3 半導体電子正孔系 . . . 63
4.4.4 トポロジカル非線形光学 . . . 64
4.5 高木・北川研究室 . . . 67
4.5.1 スピン軌道相互作用を利用した擬スピン量子相 . . . 67
4.5.2 3 次元ディラック電子 . . . 68
4.6 林研究室 . . . 71
4.6.1 スピン流物性 . . . 71
4.6.2 界面スピン軌道相互作用とカイラル磁性 . . . 72
4.7 小林研究室 . . . 74
4.7.1 量子液体の非平衡ダイナミクス . . . 74
4.7.2 スピン依存伝導 . . . 75
4.7.3 原子層物質の物性測定 . . . 75
4.7.4 測定技術開発 . . . 76
4.8 中辻研究室 . . . 78
4.8.1 トポロジカル反強磁性体におけるベリー位相効果 . . . 79
4.8.2 多極子揺らぎによる異常金属相 . . . 79
4.8.3 パイロクロア酸化物における強相関量子現象 . . . 80

**5 一般物理理論 84**
5.1 宇宙理論研究室 (須藤・吉田) . . . 84
5.1.1 観測的宇宙論 . . . 84

5.1.2 系外惑星 . . . 85
5.1.3 星・ブラックホール形成 . . . 87
5.1.4 高エネルギー天文現象 . . . 87
5.2 村尾研究室 . . . 94
5.2.1 高階量子演算 . . . 94
5.2.2 量子系のダイナミクスの制御 . . . 95
5.2.3 分散型量子情報処理 . . . 95
5.3 上田研究室 . . . 97
5.3.1 冷却原子気体・非平衡開放系 . . . 98
5.3.2 量子論・統計力学と情報理論の融合 . . . 99
5.4 横山 (順) 研究室 . . . 102
5.4.1 初期宇宙論 . . . 102
5.4.2 天体素粒子物理 . . . 103
5.4.3 超重力理論および拡張重力理論 . . . 104
5.4.4 重力波解析 . . . 104

**6 一般物理実験 108**
6.1 高瀬研究室 . . . 108
6.1.1 TST-2 実験の概要 . . . 108
6.1.2 高周波実験 . . . 108
6.1.3 オーミックプラズマ実験 . . . 110
6.1.4 計測器開発 . . . 111
6.1.5 共同研究 . . . 111
6.2 山本研究室 . . . 114
6.2.1 星形成の観測研究 . . . 114
6.3 酒井広文 研究室 . . . 118
6.3.1 レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展 . . . 118
6.3.2 全光学的配向制御法で配向度を向上させるための考察 . . . 120
6.3.3 マクロな 3 回対称性をもつ分子アンサンブルの生成 . . . 120
6.3.4 PAL-XFEL 施設の軟 X 線自由電子レーザーを用いた光電子角度分布の計測 . . . 121
6.3.5 その他 . . . 122
6.4 五神-湯本 研究室 . . . 123
6.4.1 物質系の巨視的量子現象の探索 . . . 123
6.4.2 非自明な光学現象の探索とその応用 . . . 124
6.4.3 誘電体ナノメンブレンを用いた真空紫外第三次高調波発生 . . . 125
6.4.4 正方格子誘電体フォトニック結晶ナノメンブレンを用いた真空紫外領域におけるコヒーレント円偏光発生 . . . 125
6.4.5 新規コヒーレント光源開発と新しい分光手法開拓 . . . 126
6.4.6 フォトンサイエンス研究機構 . . . 127
6.5 安東研究室 . . . 130
6.5.1 大型重力波望遠鏡 KAGRA . . . 130
6.5.2 周波数依存スクイーズ光の開発 . . . 131
6.5.3 宇宙空間レーザー干渉計 . . . 131
6.5.4 ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA . . . 132
6.5.5 地震の早期アラート . . . 132
6.5.6 相対論 · 量子光学精密実験 . . . 133
6.6 馬場研究室 . . . 136
6.6.1 はじめに . . . 136
6.6.2 超新星残骸に関する研究の進展 . . . 136
6.6.3 ブラックホール・中性子星研究の進展 . . . 137
6.6.4 将来計画のための検出器開発 . . . 137

6.6.5 雷放電・雷雲からのガンマ線に関する研究 . . . 138
6.7 日下 研究室 . . . 142
6.7.1 POLARBEAR 実験と Simons Array 実験 . . . 142
6.7.2 Simons Observatory 実験 . . . 143
6.7.3 次世代 CMB 実験用 装置開発 . . . 143
6.8 竹内研究室 . . . 145
6.8.1 ソフトマター系の非平衡実験 . . . 145
6.8.2 微生物系の非平衡実験 . . . 146
6.8.3 非線形動力学によるアプローチ . . . 148

**7 生物物理 151**
7.1 能瀬研究室 . . . 151
7.1.1 神経回路の活動ダイナミクス . . . 151
7.1.2 運動出力ダイナミクスの定量的解析 . . . 152
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 . . . 153
7.1.4 機能的神経回路の発達機構 . . . 155
7.2 樋口研究室 . . . 156
7.2.1 はじめに . . . 156
7.2.2 ウニ精子鞭毛ダイニン集団による力発生 . . . 157
7.2.3 細胞集団運動の秩序化と働く力 . . . 157
7.2.4 心筋ミオシンの力発生メカニズム . . . 158
7.2.5 細胞死における細胞の物性の変化 . . . 158
7.3 岡田研究室 . . . 160
7.3.1 超解像顕微鏡開発 . . . 160
7.3.2 超解像顕微鏡のための蛍光色素開発 . . . 161
7.3.3 細胞内動的構造の超解像/一分子イメージング . . . 162
7.3.4 機械学習を利用した顕微鏡画像解析 . . . 162
7.4 古澤研究室 . . . 163
7.4.1 大腸菌進化実験を用いた進化的拘束の定量解析 . . . 164
7.4.2 変動する環境下での進化軌跡の制御手法の開発 . . . 164
7.4.3 フェイズフィールドモデルによる 3D アメーバ運動動態の解析 . . . 164
7.4.4 機械学習を用いた生物形態の定量化 . . . 165
7.4.5 変動する環境における進化ダイナミクスに関する理論研究 . . . 165
7.4.6 遺伝子発現量のゆらぎと環境応答量の量的関係の解析 . . . 165
7.4.7 シアノバクテリアをモデルとしたゲノム複製機構の進化解析 . . . 165

**8 技術部門 169**
8.1 実験装置試作室 . . . 169
8.1.1 利用状況 . . . 169
8.2 技術室 . . . 169
8.2.1 安全衛生 . . . 169
8.2.2 IT 関連 . . . 169
8.2.3 学生実験 . . . 169
8.2.4 研究支援 . . . 170
8.2.5 各種委員会 . . . 170

**II Summary of group activities in 2019 171**
1 Theoretical Nuclear Physics (Fukushima) Group . . . 172
2 High Energy Physics Theory Group . . . 172
3 Sakurai-Wimmer Group . . . 174

4 Aihara-Yokoyama Group . . . 175
5 Asai group . . . 176
6 Ogata Group . . . 176
7 Tsuneyuki Group . . . 177
8 Todo Group . . . 178
9 Katsura Group . . . 179
10 Hasegawa Group . . . 180
11 Fukuyama Group . . . 181
12 Okamoto Group . . . 182
13 Shimano Group . . . 182
14 Takagi-Kitagawa Group . . . 183
15 Hayashi Group . . . 184
16 Kobayashi Group . . . 185
17 Nakatsuji Group . . . 186
18 Theoretical Astrophysics Group . . . 187
19 Murao Group . . . 189
20 Ueda Group . . . 190
21 Yokoyama (J) Group . . . 191
22 Takase Group . . . 192
23 Yamamoto Group . . . 193
24 Sakai (Hirofumi) Group . . . 193
25 Gonokami and Yumoto Group . . . 194
26 Ando Group . . . 195
27 Bamba Group . . . 196
28 Kusaka Group . . . 197
29 Takeuchi Group . . . 198
30 Nose Group . . . 199
31 Higuchi Group . . . 200
32 Okada Group . . . 201
33 Furusawa Group . . . 202

**III 2019 年度 物理学教室全般に関する報告 203**

**1 学部講義概要 204**
1.1 2 年生 A セメスター . . . 204
1.1.1 電磁気学 I : 櫻井 博儀 . . . 204
1.1.2 解析力学 : 相原 博昭 . . . 204
1.1.3 量子力学 I : 諸井 健夫 . . . 205
1.1.4 物理実験学 : 酒井 広文, 中辻 知 . . . 205
1.1.5 物理数学 I : 松尾 泰 . . . 205
1.1.6 物理数学 II : 吉田 直紀 . . . 206
1.1.7 物理のための科学英語基礎 : 小野 義正 . . . 206
1.2 3 年生 S セメスター . . . 206
1.2.1 電磁気学 II : 湯本 潤司 . . . 206
1.2.2 量子力学 II : 上田 正仁 . . . 207
1.2.3 現代実験物理学 I : 樋口 秀男, 北川 健太郎 . . . 207
1.2.4 計算機実験 I : 藤堂 眞治 . . . 207
1.2.5 統計力学 I : 竹内 一将 . . . 208
1.2.6 流体力学 : 江尻 晶 . . . 208
1.3 3 年生 A セメスター . . . 209

1.3.1 光学：井手口 拓郎 . . . 209
1.3.2 物理数学 III：桂 法称 . . . 209
1.3.3 量子力学 III：常行 真司 . . . 209
1.3.4 生物物理学：樋口 秀男, 能瀬 聡直 . . . 210
1.3.5 固体物理学 I：岡本 徹 . . . 210
1.3.6 現代実験物理学 II：馬場 彩, 日下 暁人 . . . 211
1.3.7 電磁気学 III：浅井 祥仁 . . . 211
1.3.8 統計力学 II：小形 正男 . . . 211
1.3.9 計算機実験 II：藤堂 眞治 . . . 212
1.4 4 年生 S セメスター . . . 212
1.4.1 一般相対論：横山 順一 . . . 212
1.4.2 サブアトミック物理学：横山 将志 . . . 213
1.4.3 計算科学概論：大久保 毅 ほか 6 名 . . . 213
1.4.4 統計力学特論：川島 直輝 . . . 213
1.4.5 現代物理学入門：中辻 知, 安東 正樹 . . . 213
1.4.6 場の量子論 I：濱口 幸一 . . . 214
1.4.7 系外惑星：生駒 大洋, 相川 祐理 . . . 214
1.4.8 量子光学：島野 亮 . . . 215
1.4.9 固体物理学 II：林 将光 . . . 215
1.4.10 プラズマ物理学：高瀬 雄一 . . . 216
1.4.11 宇宙物理学：馬場 彩, 須藤 靖 . . . 216
1.4.12 生物物理学特論 II：岡田 康志, 古澤 力, 新井 宗仁 . . . 217
1.5 4 年生 A セメスター . . . 217
1.5.1 化学物理学：山本 智 . . . 217
1.5.2 素粒子物理学：大谷 航, 田中 純一 . . . 217
1.5.3 場の量子論 II：筒井 泉 . . . 218
1.5.4 原子核物理学：今井 伸明 . . . 218
1.5.5 電子回路論：安東 正樹 . . . 218
1.5.6 固体物理学 III：北川 健太郎, 高木 英典 . . . 219
1.5.7 非平衡科学：伊藤 創祐 . . . 219
1.5.8 物性物理学特論：長谷川 修司, 小森 文夫 . . . 219
1.5.9 普遍性生物学：金子 邦彦, 古澤 力 . . . 219
1.5.10 重力波物理学：Kipp Cannon, Raffaele Flaminio . . . 220
1.5.11 物理のための科学英語特論：小野 義正 . . . 220

**2 各賞受賞者紹介 221**
2.1 岡田康志 教授 . . . 221
2.2 小林研介 教授 . . . 221
2.3 酒井広文 教授 . . . 221
2.4 藤堂眞治 教授 . . . 221
2.5 馬場彩 准教授 . . . 222
2.6 赤城裕 助教 . . . 222
2.7 小高裕和 助教 . . . 222
2.8 中川大也 助教 . . . 223
2.9 西口大貴 助教 . . . 223
2.10 肥後友也 特任助教 . . . 223
2.11 吉川尚孝 助教 . . . 223
2.12 佐伯喜美子 技術専門員 . . . 224
2.13 春日知明 氏、會澤優輝 氏、畠内康輔 氏（馬場研） . . . 224
2.14 龔宗平（ゴン ゾンピン）氏（上田研） . . . 224

2.15 吉岡信行 氏（桂研） . . . . . 224
2.16 令和元年度 理学系研究科 研究奨励賞・理学部 学修奨励賞 . . . . . 225

**3 人事異動 226**

**4 役務分担 227**

**5 教室談話会 228**

**6 物理学教室コロキウム 229**

**7 金曜ランチトーク 230**

# I

# 研究室別 2019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、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を精力的に行った。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の性質など、幅広く様々な難問に挑戦している。特に、原子核ハドロン物理の現象論とともに、より俯瞰して「場の量子論」の現代的な課題に取り組んでいるのが特色である。

### 高次微分形式の格子ゲージ理論

通常のゲージ理論は 1-form ゲージ場を含み、その秩序変数は粒子の閉じ込め・非閉じ込め相転移を記述する。これに対して 2-form ゲージ場を含むゲージ理論では、弦の閉じ込め・非閉じ込め相転移が存在する。山本らは、2-form ゲージ理論における弦の閉じ込め・非閉じ込め相転移を、格子ゲージ理論のシミュレーションによって数値解析した [5]。

### ねじれのある時空上での格子ゲージ理論

山本と今木は、時空に「ねじれ（torsion)」が存在する場合の格子ゲージ理論の定式化を行った [4, 41]。格子ゲージ理論の数値計算と連続理論の解析計算をそれぞれ実行し、整合的な結果が得られたことから、定式化の正当性が確認できた。

### 格子 QCD におけるリー・ヤン・ゼロの計算を用いた相転移点探索

飯田らは、格子 QCD においてリー・ヤン・ゼロ (LYZ) を計算し、有限温度・密度 QCD 相図に関する研究を行った [1]。虚数化学ポテンシャル領域でバリオン数密度を計算し、フガシティー展開を用いて解析接続することで、熱力学ポテンシャルを実化学ポテンシャル領域で計算し、これから LYZ を計算した。LYZ の体積依存性を計算することで、いくつかの温度に対して温度-化学ポテンシャル平面での相転移点を求めた。その相転移点は、重イオン衝突実験におけるバリオン数のゆらぎから求められた LYZ による相転移点の解析と無矛盾であることがわかった。

### グルーボールダークマターの自己散乱断面積に関する研究

飯田らは、SU($N_c$=2) のヤン・ミルズ理論において、GB2 体の南部・ベーテ・サルピータ振幅を格子 QCD で計算し、この振幅を用いてシュレーディンガー方程式を逆解きすることで GB 間のポテンシャルを計算した。さらにこのポテンシャルから GB 間の自己散乱断面積を計算し、ラージ $N_c$ 極限を用いることで、任意の $N_c$ での断面積を求めた。一方、観測により、ダークマターの自己散乱断面積には制限がついており、これと求めた断面積を比較することで、HGT の可能な $N_c$ およびスケールに関して制限をつけた [35]。

### 機械学習によるトポロジーの検出

飯田、福嶋らは、ホモトピー $\pi_1(S^1)$ で分類される多数の図形サンプルを作成し、これらに対し畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いた自己符号化器による教師なし学習を行うことで、機械学習により自発的にホモトピー的分類がなされるかを調べた。その結果、CNN のユニットの反応のサンプル平均にはホモトピーの情報が明白に現れることがわかった。一方、平均化しない各サンプルに対する CNN のユニットの反応は揺らぎが大きいが、教師あり学習を援用し、各サンプルの反応にもホモトピーの情報が保持されていることを明らかにした。これらの成果は arXiv に公表した他、飯田が学会で口頭発表した [36]。

### Chirality Generation via the Schwinger Mechanism

Copinger examined the role of the Schwinger mechanism for the axial anomaly in an in and out-of equilibrium context. He found that both Schwinger pair production and the anomaly vanish in equilibrium, whereas, out-of equilibrium the processes are exponentially suppressed with quadratic mass. In support of this conclusion he calculated fluctuations in chiral density, too, in and out-of equilibrium and found an out-of-equilibrium exponential suppression. Furthermore, he explored the anomaly's reliance on the Schwinger mechanism in a semimetal environment [11].

### 第一原理計算における外挿の不定性評価

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。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。吉田らは、配置間相互作用の方法、とくに No-Core Shell Model と呼ばれる第一原理計算における模型空間に対する外挿手法として、物理的な制約を加えたガウス過程を用いた一般的な手法を提唱し、論文の投稿と招待講演等を行った [18, 24, 26]。

### 中性子星状態方程式の機械学習による推定

藤本、福嶋らは、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を観測量から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 [6]。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、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モデル化した。

### 2 フレーバークォーク・ハドロン連続性

藤本、福嶋らは、中性子からなる核物質と 2 フレーバーのクォーク物質が高密度領域で連続的につながっていることを明らかにした。中性子物質は $^3P_2$ 超流動になることが知られているが、この超流動性がカラー超伝導状態にあるクォーク物質ではどのようになるか調べ、中性子物質と同様の機構で $^3P_2$ 状態の対形成が起きることがわかった。これらの成果は arXiv に公表した他、藤本が国際会議の口頭発表に選出され発表した [21]。

### ハドロン相におけるカイラル磁気効果

今木は、ハドロン相におけるカイラル磁気効果を解析した。カイラル磁気効果は、量子異常に起因して磁場に沿った電流が流れる現象で、重イオン衝突実験で重要である。従来は、カイラル磁気効果はハドロン相でもカイラル相と同じ公式で表されると考えられていた。本研究は、ハドロン相におけるカイラル磁気効果の公式が、擬スカラー中間子の媒質効果によって、カイラル相から形を変えることを示した。また、この効果によって、カイラル磁気効果に誘起される電流が弱められる可能性を示唆した [37]。

### Anomalous Casimir effect in axion electrodynamics

In axion electrodynamics, the $\mathcal{CP}$-violating $\theta$-term brings about novel physics. Particularly, a linearly inhomogeneous $\theta$ with constant $\partial_\mu\theta$ provides an effective description for anomalous transport phenomena such as chiral magnetic effect and anomalous Hall effect. Apart from the current, the energy dispersion relation of photon is also influenced by the $\partial_\mu\theta$. Then naturally, the vacuum energy is expected to be altered, so is the Casimir effect. Based on such an idea, Qiu, Imaki and Fukushima quantified the Casimir force between two parallel conductor plates inserted in the $\theta$-vacuum of axion electrodynamics [3, 9]. Intriguingly, they revealed such anomalous Casimir force to be repulsive in the presence of $\nabla\theta$, indicating a theoretical circumvention of a previous "no-go" theorem about the sign of Casimir force, as well as an application prospect in nanotechnology for one possible solution to stiction. In reality, their discovery will be experimentally verifiable by means of imitating the $\theta$-vacuum with chiral matter like Weyl semimetal, suggesting an observable manifestation of the chiral anomaly.

### Lefschetz-thimble 法に基づく Schwinger 機構の研究

外場下における粒子・反粒子対生成機構である Schwinger 機構は、量子二準位系の問題と捉えることができる。島崎と福嶋は、Lefschetz-thimble 法に基づいて、量子二準位系の遷移振幅を与える公式として従来用いられてきた Dykhne-Davis-Pechukas 公式が破綻する場合にも適用可能な公式を導出した。更にその公式に基づいて、パルス型を始めとする種々の電場下における Schwinger 効果を議論した [7, 14, 39]。

### 負の磁気抵抗率の場の量子論的な導出

負の磁気抵抗率はカイラル磁気効果の実験的証拠と考えられている。福嶋らは、場の量子論の複雑な再和計算を慎重に行い、負の磁気抵抗率をミクロな理論から導出することに成功した [8]。

＜報文＞

(原著論文)


[1] M.Wakayama, V.G. Bornyakov, D.L. Boyda, V.A. Goy, H. Iida, *et al.*, "Lee-Yang zeros in lattice QCD for searching phase transition points", Phys. Lett. B **793**, 227-233 (2019).

[2] B. Abromeit, V. Tripathi, H.L. Crawford, S.N. Liddick, S. Yoshida, *et al.*, "$\beta$-decay of $T_z = 11/2$ isotopes $^{37}$Al and $^{39}$Si: Understanding Gamow Teller strength distribution in neutron rich nuclei", Phys. Rev. C **100**, 014323 (2019).

[3] K. Fukushima, S. Imaki and Z. Qiu, "Anomalous Casimir effect in axion electrodynamics", Phys. Rev. D **100**, 045013 (2019).

[4] S. Imaki and A. Yamamoto, "Lattice field theory with torsion", Phys. Rev. D **100**, 054509 (2019).

[5] T. Hayata and A. Yamamoto, "String confinement in two-form lattice gauge theory", Phys. Rev. D **100**, 074504 (2019).

[6] Y. Fujimoto, K. Fukushima and K. Murase, "Mapping neutron star data to the equation of state using the deep neural network" Phys. Rev. D **101**, 054016 (2020).

[7] K. Fukushima and T. Shimazaki, "Lefschetz-thimble inspired analysis of the Dykhne-Davis-Pechukas method and an application for the Schwinger Mechanism", Ann. Phys. **415**, 168111 (2020).

[8] K. Fukushima and Y. Hidaka, "Resummation for the field-theoretical derivation of the negative magnetoresistance", JHEP (2020) in press.

(学位論文)

[9] Z. Qiu, "Anomalous Casimir Effect in Axion Electrodynamics", 修士論文.

[10] 阿部雄哉, "Dispersion and damping rate of plasmino excitations in the high density Yukawa model", 博士論文.

[11] P. Copinger, "Chirality Generation under Strong Electromagnetic Fields and the Schwinger Mechanism", 博士論文.

[12] 吉田聡太, "Uncertainty quantification in configuration interaction methods for nuclear many-body problems", 博士論文.

[13] 奥津明俊, "Quantification of chiral anomalous contribution to negative magnetoresistance in holographic QCD", 修士論文.

[14] 島崎拓哉, "The Lefschetz-thimble inspired approach to the Schwinger mechanism", 修士論文.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[15] A. Yamamoto, "Mesons in Magnetic Fields", Frontiers in Lattice QCD and related topics, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, April 15-26, 2019.

[16] Y. Fujimoto, "Probing neutron star equation of state with deep learning", The 8th Huada (CCNU) School on QCD, Wuhan, China, May 6-10, 2019.

[17] Y. Fujimoto, K. Fukushima and K. Murase, "Extracting equation of state from neutron star observation using machine learning", The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions, Tokyo, Japan, June 24-26, 2019.

[18] S. Yoshida, "Towards inverse modeling problems in nuclear physics", The 18th CNS International Summer School (CNSSS19), RIKEN/UTokyo, Saitama/Tokyo, Japan, August 21-27, 2019.

[19] Y. Fujimoto, "Machine Learning Inference of the Dense Matter EoS and Quark-Hadron Continuity", International School of Nuclear Physics 41st Course, Erice, Italy, Sep. 16-24, 2019.

[20] Y. Fujimoto, "Machine Learning Inference of the Dense Matter EoS and Quark-Hadron Continuity", The international workshop on nuclear physics for astrophysical phenomena, Tokyo, Japan, Oct. 23-25, 2019.

[21] Y. Fujimoto, K. Fukushima and W. Weise, "Continuity from neutron matter to color-superconducting quark matter with $^3P_2$ superfluidity", XXVIIIth International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Wuhan, China, Nov. 4-9, 2019.

招待講演

[22] K. Fukushima, "Some Topics on Hadrons in Extreme Environments", Functional Methods in Strongly Correlated Systems, Hirschegg, Austria, April 5, 2019.

[23] K. Fukushima, "New Developments in Magnetic Field and Rotation Induced Effects", The 5th Workshop on Chirality, Vorticity and Magnetic Field in Heavy Ion Collisions, Tsinghua University, Beijing, China, April 12, 2019.

[24] S. Yoshida, "Underlying uncertainties in configuration interaction methods", Nuclear Chemistry Gordon Research Conference, Exploring Simple Structural Patterns and the Dynamics of Nuclei, Colby-Sawyer College, 541 Main Street, New London, NH, US, June 16-21, 2019.

[25] A. Yamamoto, "Lattice with external fields and rotation", The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions, University of Tsukuba, Tokyo, Japan, June 24-26, 2019.

[26] S. Yoshida, "Inverse modeling problem in nuclear structure physics", Bayesian Inference in Subatomic Physics - A Marcus Wallenberg Symposium, The House of William Chalmers, Göteborg, Sweden, Sep. 17-20, 2019.

[27] K. Fukushima, "Quark Matter under Rotation", Theory of Hadronic Matter under Extreme Conditions, JINR, Dubna, Russia, Sep. 16, 2019.

[28] K. Fukushima, "Chirality, Helicity, Anomaly in High-Energy Nuclear Physics", Quantum Systems in Extreme Conditions (QSEC2019), Heidelberg University, Heidelberg, Germany, Sep. 27, 2019.

[29] K. Fukushima, "Continuity from nuclear matter to two-flavor quark matter with $^1S_0$ and $^3P_2$ superfluid", Quo vadis QCD theory: heavy-ion collision perspectives and beyond, Stavanger University, Stavanger, Norway, Oct. 1, 2019.

[30] K. Fukushima, "The decomposition and the interpretation of the orbital and the spin angular momenta", New Development of Hydrodynamics

and Its Applications in Heavy-ion Collisions, Fudan University, Shanghai, China, Oct. 30, 2019.

[31] K. Fukushima, "Quarkyonic and Whatelse?", Contemporary QCD Physics and Relativistic Nuclear Collisions, Central China Normal University, Wuhan, China, Nov. 11, 2019.

[32] K. Fukushima, "Hadronic EoS at Finite Baryon Density", Workshop on the QCD Phase Structure at High Baryon Density Region, Central China Normal University, Wuhan, China, Nov. 12, 2019.

[33] P. Copinger, "Chirality Generation in Strong Electromagnetic Fields via the Schwinger Mechanism", Quantum kinetic theories in magnetic and vortical fields, Kyoto, Dec. 9-13, 2019.

[34] K. Fukukshima, "RG-type flow diagram of the distribution and the scaling solutions," Turbulence of all kinds, Osaka City University, Osaka, Japan, Jan. 9, 2020.

(国内会議)

一般講演

[35] 飯田英明, "2018 年度 JHPCN 計算資源利用報告", JHPCN:学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第 11 回シンポジウム, 2019 年 7 月 11 日 (木), 12 日 (金), THE GRAND HALL (品川).

[36] 阿部雄哉, 飯田英明, 福嶋健二, 船井正太, "機械学習によるトポロジーの検出", 日本物理学会 2019 年秋季大会, 山形大学小白川キャンパス, 2019 年 9 月 17-20 日.

[37] 今木翔太, "ハドロン相におけるカイラル磁気効果", 日本物理学会 2019 年秋季大会, 山形大学小白川キャンパス, 2019 年 9 月 17-20 日.

[38] 藤本悠輝, 福嶋健二, W. Weise, "Continuity from neutron matter to two-flavor quark matter with ${}^1S_0$ and ${}^3P_2$ superfluidity", 日本物理学会 第 75 回年次大会, 名古屋大学, 2020 年 3 月 16-19 日.

[39] 福嶋健二, 島崎拓哉, "レフシェッツシンブル法に基づく Dykhne-Davis-Pechukas 公式の解析、及び Schwinger 機構への応用", 日本物理学会 第 75 回年次大会, 名古屋大学, 2020 年 3 月 16-19 日.

招待講演

[40] 福嶋健二, "Photon and CGC", The 36th Heavy Ion Cafe, 上智大学, 2019 年 6 月 22 日.

(セミナー)

[41] 今木翔太, "Lattice field theory with torsion", 東京工業大学, 2019 年 10 月 4 日.

[42] 藤本悠輝, "Quark-hadron continuity for two-flavor matter with ${}^3P_2$ pairing", 慶應義塾大学矢上, 2020 年 3 月 3 日.

# 1.2 素粒子論研究室

## 1.2.1 現象論

### ニュートリノ物理とフレーバー対称性

浅井は荒木 (工学院大), 佐藤 (埼玉大), 下村 (宮崎大) とともに, $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ ゲージ模型を研究し, 実験で測定されたミューオンの異常磁気能率やニュートリノの質量, 混合角を実現しつつ, 高エネルギー宇宙ニュートリノにおける sub-PeV 領域での IceCube ギャップを説明し得るニュートリノとスカラー場の隠れた相互作用を実現する模型を構築した [1]。

浅井は, $U(1)_{L_e - L_\mu}$, $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ および $U(1)_{B-L}$ の線形結合で与えられるゲージ群により拡張された最小 U(1) ゲージ理論におけるニュートリノの質量行列の構造を解析し, ニュートリノ振動観測や CMB 観測の最新の結果との整合性を研究した [2]。その結果, 3 つの U(1) ゲージ群のみが実験的に許されていること, その全てにおいてニュートリノの質量階層性は順階層が支持されることなどを明らかにした。

千草, 中山は粕谷 (神奈川大) とともに非可換離散対称性にもとづいたニュートリノ質量生成の模型について調べ, 特に $S_4$ フレーバー対称性の模型についてフラボン安定化の新たな機構を提案し, 従来の模型に比べて格段に模型を簡単化することに成功した。また現在のニュートリノ質量・混合および CP 位相の実験値と無矛盾であることを示した [3]。

### 超対称標準模型の現象論

千草, 諸井は浅井, 齊藤 (東大 ICEPP), および加地 (早稲田大) と共に, 将来計画されている 100TeV 粒子加速器を用いた超対称模型の現象論について調べた [4]。特に anomaly mediastion の機構により超対称性が破れる模型に着目し, 新粒子の質量がどの程度の精度で測定できるかを調べると共に, 測定結果により模型パラメータに関するどのような示唆が得られるかを議論した。

千草, 細見, 諸井は齊藤 (東大 ICEPP) と共に, 上記と同様のセットアップに着目し, ウィーノと呼ばれる長寿命粒子の寿命の測定法を調べた [5]。数層存在する飛跡検出器のイベント検出数を比較することで寿命に関する情報を得て, 寿命の関数としてその決定精度を見積もった。

福田と永田は, 生出 (東工大), 音野 (九大), 白井 (Kavli IPMU) とともに, ヒッグス粒子の超対称パートナー粒子であるヒッグシーノを探索する新しい手法を提案した [6]。ヒッグシーノが他の超対称フェルミ粒子と比較して非常に軽い場合, 荷電ヒッグシーノと中性ヒッグシーノとの質量差 $\Delta m$ が小さくなり, 前者の寿命が長くなることが知られている。この場合, 荷電ヒッグシーノの崩壊によって生じる低運動量パイ中間子がもたらす荷電トラックは, 衝突点から有意に離れて観測される。この特徴的な信号を探ることにより, これまでに探索しえなかった

$\simeq 0.5$ GeV 程度の $\Delta m$ を持つヒッグシーノを LHC 実験において探索しうることが明らかになった。

ミューオン異常磁気能率は測定値と標準模型における予言値との間に $3\sigma$ 以上のずれが報告されており，標準模型を超える物理の兆候かもしれないとして注目されている。浜口は，遠藤（KEK）岩本（パドヴァ大&ELTE）北原（Technion&名古屋大）と共に，ミューオン異常磁気能率に動機付けられた超対称性標準模型を最新の LHC Run2 の結果に基づいて再解析し，smuon が chargino より重い場合は依然として広いパラメータ領域において LHC の制限を逃れつつミューオン異常磁気能率のずれを説明出来ることを示した [7]。

永田は，E. Kpatcha (UAM; IFT), I. Lara (UAM; IFT; IBS), D. E. López-Fogliani (Universidad de Buenos Aires), C. Muñoz (UAM; IFT), 音野（九大）, R. Ruiz de Austri (CSIC–UV) とともに，衝突点から離れた崩壊点から生じるレプトンを探ることにより，$\mu\nu$SSM 模型における第 3 世代スニュートリノを探索する可能性について研究した [8]。

### 将来加速器実験における新粒子探索

千草, 諸井は阿部 (名古屋大), および江間 (DESY) と共に，100TeV 粒子加速器を用いた精密測定によって電弱相互作用を持つ新粒子を探索する方法を調べた [9]。フィッティングを用いた統計解析により系統誤差の影響を抑え，この方法で探索できる新粒子の質量領域を明らかにすることで，寿命の短い新粒子を粒子加速器で探索する手法として，我々の方法が優れていることを示した。

長寿命粒子探索に特化した新たな検出器を LHC に建設する計画が近年いくつか提案されている。そのうちの一つである MATHUSLA 実験に関して，永田は，国外の研究者総勢 88 名とともに，その可能性を理論側から検討して総説にまとめ報告した [10]。

### 真空崩壊

千草，諸井は庄司（名古屋大）と共に，真空崩壊率の見積もりに必要なバウンス解と呼ばれる場の配位の導出方法を調べた [11]。複数スカラー場がバウンスに寄与する難しい状況に特に着目し，真空崩壊率を 1 次の補正項まで含めて計算する際に必要なバウンスの無限遠点周りでの振る舞いが抜き出しやすい計算方法を与えた。

### 中性子星

柳，永田，濱口は，中性子星冷却に対する非平衡ベータ過程の効果について研究を行った。特に，陽子・中性子がクーパー対を形成する効果を取り入れて解析を行い，最近の観測で示唆されている『年老いているにも関わらず未だに温かい』中性子星の温度を非平衡ベータ過程の効果によって説明しうることを明らかにした [12]。

一方，宇宙の暗黒物質が中性子星内部に堆積し，そこで対消滅して熱を与えることで中性子星が温まりうる可能性が知られている。中性子星の温度観測を通じてこの効果を検出することで暗黒物質を探りうる。しかしながら，上述した非平衡ベータ過程の効果が暗黒物質消滅による効果と比較して優勢である場合，この方法で暗黒物質を探索することができなくなってしまう。そこで，濱口，永田，柳は，これら 2 つの効果を共に取り入れて中性子星表面温度の時間発展を計算し，典型的な中性子星の場合時間が十分経過した後に暗黒物質消滅による中性子星加熱効果が優勢となることを定量的に示した [13]。

### 超対称大統一理論

永田は，J. Evans (TDLI), K. Olive（ミネソタ大）とともに，pure gravity mediation 型の超対称粒子スペクトルを持つ最小 SU(5) 大統一理論を研究し，ヒッグス質量および暗黒物質残存量の観測値を説明しうるパラメーター領域において将来の陽子崩壊実験で $p \to \pi^0 e^+$ 崩壊モードを観測しうることを示した [14]。また，CMSSM 型の超対称粒子スペクトルを持つ最小 SU(5) 大統一理論の場合についても，J. Ellis (King's College London; CERN; NICPB), J. Evans (TDLI), K. Olive（ミネソタ大）, L. Velasco-Sevilla（ベルゲン大）とともに研究を行い，この場合 $p \to K^+\bar{\nu}$ 崩壊モードを将来の陽子崩壊実験で探索することにより模型を検証することができることを明らかにした [15]。

永田は，J. Ellis (King's College London; CERN; NICPB), M. Garcia (IFT), D. Nanopoulos (テキサス A&M 大; HARC; Academy of Athens), K. Olive（ミネソタ大）とともに, No-scale flipped SU(5)×U(1) 大統一理論において標準模型シングレット場がインフラトンとなっているシナリオを研究し，結果得られるインフレーションが CMB 観測と無矛盾であること，またニュートリノ振動実験において得られたニュートリノ混合角および質量二乗差の観測値を説明しつつ宇宙のバリオン数非対称性および暗黒物質の残存量をも説明可能であること，をそれぞれ示した [16, 17]。

### 重力的粒子生成

江間，中山，Tang は宇宙初期での重力的粒子生成の効果を詳しく調べ，重力以外の相互作用を持たないフェルミオンおよびベクトルボゾンの生成率を求めた。その結果，これらの粒子が暗黒物質になり得ることが分かった [18]。

中山は，超重力理論における重力的粒子生成を調べ, 通常のアインシュタイン重力の場合に比べてスカラー粒子の生成率が大きく落ちることを示した [19]。

#### ベクトル暗黒物質

軽い暗黒物質が近年注目されており，その中でベクトル暗黒物質も提案されている。中山はこれまで知られていたベクトルボゾンのコヒーレント振動模型が，ゴースト不安定性という深刻な問題を含むことを指摘した。さらにそういった不安定性のない無矛盾なベクトルボゾンのコヒーレント振動暗黒物質の模型の構築に成功した [20]。

#### ブラックホールの超放射

非常に軽いボゾンが存在すると, Kerr ブラックホールの周りでボゾンの雲が成長することが知られている（超放射：superradiance)。福田と中山はボゾンが非線形相互作用を持つときの superradiance への影響を調べ，ブラックホールの角運動量の減少率が大きく抑制されること，それに伴い従来の軽いボゾンへの制限が緩くなることを示した [21]。

#### 天体からの偏光を用いたアクシオン検出

千草, 諸井, 中山はアクシオン暗黒物質中を光が伝播したときに偏光面が回転することに注目し, 様々な天体からの偏光観測を用いてアクシオンの信号を検出する可能性を議論した。特に偏光面の時間変動の情報がアクシオン検出に有用であることを示した [22]。

#### 暗黒物質と宇宙の構造形成

柳は Bae (IBS), 神野 (DESY), 鎌田 (IBS), と共に，beyond-WIMP 暗黒物質を宇宙の構造形成から制限する方法について研究した。そのような解析では模型のパラメータ毎に matter power spectrum を計算するため，重い数値計算が必要になる。我々はニューラルネットを使ってこの計算結果をフィットする事で，将来の再解析に便利な形でコミュニティで共有することを提案した [23]。またこの研究の中で, 数値計算の結果をよく再現する解析公式を見つけたため，そちらも独立に鎌田と論文にまとめた [24]。

### 1.2.2 弦理論，場の理論全般

#### 格子上の場の理論

吾郷は菊川（東大駒場）とともに Grabowska と Kaplan によって提案されたドメインウォールフェルミオンとグラディエントフローを用いた格子カイラルゲージ理論の定式化について調べた。彼らの提案はグラディエントフローそのものがゲージ場を非局所的なものへと発展させるため理論の局所性は明らかではなかったが，具体的に U(1) ゲージ理論の場合でこの問題点について調べ，有効作用が非局所的になることを明らかにした [25]。

#### ストリング・ゲージ理論の双対性の数理的研究

超対称ゲージ理論やストリング理論には双対性という顕著な性質があり，その応用として様々な非自明な知見が得られることが知られているが，その数理的な基礎はまだ明らかにされていない部分がある。松尾研究室ではこの数年，量子変形された無限次元代数（量子トロイダル代数）をもちいて双対性についての数学的に厳密な結果を導いてきている。また，この代数は Calogero-Sutherland 模型など厳密に解ける系（可解系）とも密接に関連し，新しい数理物理学の分野の一つになりつつある。これに関連して，関連する数学・統計力学・ストリング理論の研究者を招聘した国際研究会を行った [68]。

松尾，原田，渡辺はブレーンを組み合わせて構成されるコーナー頂点代数に関する異なる自由場表示の予想について等価性を調べた [37]。

渡辺は朱 (Dublin Institute for Advance Studies) とともに Argyres-Douglas 理論の Macdonald index がカイラル代数の refined character と一致するという Song の予想について検証および一般化を行った [27]。

#### 位相的頂点と自由フェルミオンの双対性

位相的頂点 (topological vertex) とはファインマン則の頂点演算子のように用いることにより位相的弦理論の振幅，あるいは超対称ゲージ理論の分配関数を与える，基本的な構成要素である。元来，それは自由フェルミオンにより記述されていることが知られていた。笹，渡辺，松尾はこの系に量子トロイダル代数を応用し，その双対性をあからさまな形に表すことに成功した [26]。

#### BCD 型ゲージ理論とトロイダル代数の Reflection 状態

ゲージ群が A 型の場合以外 (BCD 型) の超対称ゲージ理論の取り扱いは A 型の場合と比べて極端に難しく, 明確な記述法が見つかっていない。Bourgine と松尾はトロイダル代数の $Z_2$ orbifolding を通じて BCD ゲージ理論に対する一つのアプローチを考案している。特に，orbifolding を共形場理論の境界状態を一般化した状態を用いて実現する方法を提案した [69]。

#### 弦理論の代数的構造

福田は白石氏 (東大数理) と大久保氏 (東大数理) とともに，linear quiver ゲージ理論に関する S 双対性の証明を行い [28]，これを元に博士論文を執筆した [33]。その際に generalized Macdonald function を Fock-tensor 空間に具体的に構成する方法を与えた。また，これを用いて，surface defect が入った 5

次元 $\mathcal{N}=1^*$ 理論の分配関数 (で adjoint mass を特殊化したもの) に対する S 双対性から導かれる非自明な等式を証明し，これを元に論文を執筆した [29]。

### 共形場理論の演算子積展開とそのホログラフィックな記述法

西岡は H-Y. Chen, L-C. Chen (National Taiwan University), 小林 (IPMU) らとともに Minkowski 時空上の共形場理論における演算子積展開とそのホログラフィックな記述法に関する研究を行った [30]。二つのスカラー演算子が互いに空間的に離れている場合，その演算子積展開は一次元高い AdS 時空上を伝搬する粒子をある曲線に添って積分したもので与えられることを一般的に示した。一方，二つの演算子が互いに時間的に離れている場合，その演算子積展開は一次元高い時間を二つ持つある時空上の粒子の積分で与えられることが分かった。この結果は先行研究で予想されていたものと異なる新たな見方を与えており，Lorentz 計量での共形場理論の因果構造を強く反映している。

### 境界のある共形場理論での量子状態の複雑性とその重力双対

渡邊は，佐藤 (IPMU) とともに，境界のある共形場理論の真空状態について量子状態の複雑性とその指標に関する２つの異なる重力双対を調べた [31]。場の理論側では，２次元において経路積分の効率化を用いて定義された複雑性を計算し，境界からの寄与が対数的に発散することを示した。重力理論側では，２つの異なる重力双対が３次元において異なる発散の構造を持つが，高次元においては同様の構造を持ち，一般に発散の構造による区別ができないことを示した。

＜受賞＞

＜報文＞

(原著論文)


[1] T. Araki, K. Asai, J. Sato and T. Shimomura, Phys. Rev. D **100**, no. 9, 095012 (2019) [arXiv:1909.08827 [hep-ph]].

[2] K. Asai, Eur. Phys. J. C **80**, no. 2, 76 (2020) [arXiv:1907.04042 [hep-ph]].

[3] S. Chigusa, S. Kasuya and K. Nakayama, Phys. Rev. D **100**, no. 1, 015030 (2019) [arXiv:1905.11517 [hep-ph]].

[4] S. Asai, S. Chigusa, T. Kaji, T. Moroi, M. Saito, R. Sawada, J. Tanaka, K. Terashi and K. Uno, JHEP **05** (2019), 179 [arXiv:1901.10389 [hep-ph]].

[5] S. Chigusa, Y. Hosomi, T. Moroi and M. Saito, Phys. Lett. B **803** (2020), 135260 [arXiv:1912.00592 [hep-ph]].

[6] H. Fukuda, N. Nagata, H. Oide, H. Otono and S. Shirai, Phys. Rev. Lett. **124**, no. 10, 101801 (2020) [arXiv:1910.08065 [hep-ph]].

[7] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto and T. Kitahara, [arXiv:2001.11025 [hep-ph]]. JHEP 発表予定.

[8] E. Kpatcha, I. Lara, D. E. López-Fogliani, C. Muñoz, N. Nagata, H. Otono and R. Ruiz De Austri, Eur. Phys. J. C **79**, no. 11, 934 (2019) [arXiv:1907.02092 [hep-ph]].

[9] T. Abe, S. Chigusa, Y. Ema and T. Moroi, Phys. Rev. D **100** (2019) no.5, 055018 [arXiv:1904.11162 [hep-ph]].

[10] D. Curtin *et al.*, Rept. Prog. Phys. **82**, no. 11, 116201 (2019).

[11] S. Chigusa, T. Moroi and Y. Shoji, Phys. Lett. B **800** (2020), 135115 [arXiv:1906.10829 [hep-ph]].

[12] K. Yanagi, N. Nagata and K. Hamaguchi, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **492**, no. 4, 5508 (2020) [arXiv:1904.04667 [astro-ph.HE]].

[13] K. Hamaguchi, N. Nagata and K. Yanagi, Phys. Lett. B **795**, 484 (2019) [arXiv:1905.02991 [hep-ph]].

[14] J. L. Evans, N. Nagata and K. A. Olive, Eur. Phys. J. C **79**, no. 6, 490 (2019) [arXiv:1902.09084 [hep-ph]].

[15] J. Ellis, J. L. Evans, N. Nagata, K. A. Olive and L. Velasco-Sevilla, arXiv:1912.04888 [hep-ph]; accepted for publication in EPJC.

[16] J. Ellis, M. A. G. Garcia, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, Phys. Lett. B **797**, 134864 (2019) [arXiv:1906.08483 [hep-ph]].

[17] J. Ellis, M. A. G. Garcia, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, JCAP **2001**, no. 01, 035 (2020) [arXiv:1910.11755 [hep-ph]].

[18] Y. Ema, K. Nakayama and Y. Tang, JHEP **1907**, 060 (2019) [arXiv:1903.10973 [hep-ph]].

[19] K. Nakayama, Phys. Lett. B **797**, 134857 (2019) [arXiv:1905.09143 [hep-ph]].

[20] K. Nakayama, JCAP **1910**, no. 10, 019 (2019) [arXiv:1907.06243 [hep-ph]].

[21] H. Fukuda and K. Nakayama, JHEP **2001**, 128 (2020) [arXiv:1910.06308 [hep-ph]].

[22] S. Chigusa, T. Moroi and K. Nakayama, Phys. Lett. B **803**, 135288 (2020) [arXiv:1911.09850 [astro-ph.CO]].

[23] K. J. Bae, R. Jinno, A. Kamada and K. Yanagi, "Fingerprint matching of beyond-WIMP dark matter: neural network approach," JCAP **03** (2020) no.03, 042 [arXiv:1906.09141 [astro-ph.CO]].

[24] A. Kamada and K. Yanagi, "Constraining FIMP from the structure formation of the Universe: analytic mapping from $m_{\rm WDM}$," JCAP **11** (2019), 029 [arXiv:1907.04558 [hep-ph]].

[25] T. Ago and Y. Kikukawa, JHEP **03** (2020) 044 [arXiv:1911.10925 [hep-lat]].

[26] S. Sasa, A. Watanabe and Y. Matsuo, "A note on S-dual basis in free fermion system," PTEP 2020 (2020) 2, 023B02.

[27] A. Watanabe and R.-D. Zhu, JHEP **02** (2020) 004 [arXiv:1909.04074 [hep-th]].

[28] M. Fukuda, Y. Ohkubo, and J. Shiraishi, "Generalized Macdonald Functions on Fock Tensor Spaces and Duality Formula for Changing Preferred Direction," arXiv:1903.05905 [math.QA].

[29] M. Fukuda, Y. Ohkubo, and J. Shiraishi, "Non-stationary Ruijsenaars functions for $\kappa = t^{-1/N}$ and intertwining operators of Ding-Iohara-Miki algebra," arXiv:2002.00243 [math.QA].

[30] H-Y. Chen, L-C. Chen, N. Kobayashi and T. Nishioka, "The gravity dual of Lorentzian OPE blocks," arXiv: 1912.04105, Accepted by JHEP.

[31] Y. Sato and K. Watanabe, "Does Boundary Distinguish Complexities?," JHEP **1911**, 132 (2019), [arXiv:1908.11094 [hep-th]].

(会議抄録)

(国内雑誌)

(学位論文)

[32] 博士論文： S. Chigusa, "Probing Electroweakly Interacting Massive Particles with Drell-Yan Process at 100 TeV Colliders"

[33] 博士論文：福田 真之, "Algebraic Proof of S-Duality Formula in Refined Topological Vertex."

[34] 博士論文：K. Yanagi, "Thermal Evolution of Neutron Stars as a Probe of Physics beyond the Standard Model."

[35] 修士論文： 平尾 魁梧, "超対称性大統一理論における電気双極子モーメント"

[36] 修士論文： Shih-Yen Tseng, "Leptogenesis with Minimal gauged $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ models"

[37] 修士論文: 渡辺 彬生, "コーナー頂点代数とその自由場表示について."

(著書)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[38] K. Asai, "Predictions for the neutrino parameters in the minimal model extended by general lepton flavor-dependent U(1) gauge symmetries", DSU 2019 Buenos Aires, Argentina, July 17, 2019.

[39] K. Asai, "Predictions for the neutrino parameters in the minimal model extended by general lepton flavor-dependent U(1) gauge symmetries", SI 2019, Gangneung, Korea, August 20, 2019.

[40] K. Asai, "Predictions for the neutrino parameters in the minimal model extended by general lepton flavor-dependent U(1) gauge symmetries", NDM-2020, Hurghada, Egypt, January 13, 2020.

[41] S. Chigusa, "Indirect Studies of Electroweakly Interacting Particles at 100 TeV Hadron Colliders", Pheno 2019, Pittsburgh, US (2019/5/6)

[42] S. Chigusa, "Indirect Studies of Electroweakly Interacting Particles at 100 TeV Hadron Colliders", SUSY 2019, Texas, US (2019/5/22)

[43] S. Chigusa, "Flowing to the Bounce", NHWG26, Osaka, Japan (2019/8/9)

[44] S. Chigusa, "Indirect Studies of Electroweakly Interacting Particles at 100 TeV Hadron Colliders", SI2019, Gangneung, Korea (2019/8/20)

[45] S. Chigusa, "Flowing to the Bounce", Berkeley Week, IPMU, Japan (2020/1/14)

[46] S. Chigusa, "Flavon Stabilization without Domain Wall Problem in Discrete Flavor Symmetry Models", Neutrino Oscillation and Flavor Physics, Nagoya, (2019/6/11)

[47] Koichi Hamaguchi, "A Limit on Axion from the Cooling Neutron Star in Cassiopeia A," 22nd International Conference From the Planck Scale to the Electroweak Scale, Granada, Spain, 2019/6/6.

[48] Koichi Hamaguchi, "Dark Matter Heating vs. Rotochemical Heating in Old Neutron Stars," Summer Institute 2019, Gangneung, Korea, 2019/8/22.

[49] N. Nagata, "Limit on the Axion Decay Constant from the Cooling Neutron Star in Cassiopeia A", Dark Side of the Universe 2019, Buenos Aires, Argentina, Jul. 18, 2019.

[50] N. Nagata, "Limit on the Axion Decay Constant from the Cooling Neutron Star in Cassiopeia A", Opportunities at Future High Energy Colliders, IFT-UAM/CSIC, Madrid, Jul. 1, 2019.

[51] N. Nagata, "Limit on the Axion Decay Constant from the Cooling Neutron Star in Cassiopeia A", SUSY 2019, Corpus Christi, US, May. 20–24, 2019.

[52] Shih-Yen Tseng, "Minimal gauged $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ models driven into a corner", Berkeley Week at Kavli IPMU, Kavli IPMU, 2020 年 1 月 17 日

[53] Shih-Yen Tseng, "Leptogenesis in the minimal gauged $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ model", The annual Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2020), KEK, 2020 年 2 月 18 日

[54] K. Watanabe, *Path-Integral Optimization and Complexity in CFT,* Quantum Information and String Theory 2019, YITP, Kyoto, Japan, May 27 - June 28, 2019.

[55] K. Yanagi, Dark matter searches in the 2020s - At the crossroads of the WIMP, 東京大学宇宙線研究所, 2019 年 11 月

[56] K. Yanagi, Berkeley week, Kavli IPMU, 2020 年 1 月

招待講演

[57] Koichi Hamaguchi, “Discussion: Astrophysical signatures of / bounds on axions,” Axions in the Lab and in the Cosmos, CERN, 2019/7/19.

[58] Koichi Hamaguchi, “Dark Matter Heating vs. Rotochemical Heating in Old Neutron Stars,” IBS-Busan Workshop 2019, Busan, Korea, 2019/12/5.

[59] T. Moroi, “CMB, GW, and Inflation,” The 40th Anniversary Symposium of the US-Japan Science and Technology Cooperation Program in High Energy Physics (April 15 – 16, 2019), Hawaii, U.S.A.

[60] T. Moroi, “Lifetime of Our Universe,” ICCMSE 2019 (May 1 – 5, 2019), Rhodes Island, Greece.

[61] T. Moroi, “Studying EWIMPs at Future Colliders,” LCWS 2019 (October 28 – November 1, 2019), Sendai, Japan.

[62] T. Moroi, “Higgsino LSP and Higgsino Dark Matter” Dark matter searches in the 2020s - At the crossroads of the WIMP (November 11 – 13), Kashiwa, Japan.

[63] N. Nagata, “Axion Cooling in Neutron Stars”, IBS-ICTP Workshop on Axion-Like Particles, IBS, Daejeon, Korea, Nov. 8–12, 2019.

[64] N. Nagata, “Dark Matter Heating vs. Rotochemical Heating in Old Neutron Stars”, 15th Rencontres du Vietnam, Behind and Beyond the Standard Model at the LHC, Future Colliders and Elsewhere, ICISE, Quy Nhon, Vietnam, Sep. 15–21, 2019.

[65] N. Nagata, “Proton Decay: Theory”, Prospects of Neutrino Physics, Kavli IPMU, Kashiwa, Japan, Apr. 8–12, 2019.

[66] K. Nakayama, “Gravitational Particle Production and Dark Matter”, Johns Hoplins Workshop, Kavli IPMU, Japan (2019/6/8).

[67] K. Nakayama, “Gravitational Particle Production at Reheating”, The third NRF-JSPS workshop in particle physics, cosmology and gravitation, Ishigaki Island, Japan (2019/6/18).

[68] Y. Matsuo, organizer of ”Workshop New Trends in Integrable Systems 2019”, Media Center, Osaka CIty University, September 9-20, 2019.

[69] Y. Matsuo, *Real topological vertex, boundary state, and quantum toroidal algebra,* Rikkyo Math-Phys 2020, Rikkyo University, January 11-20, 2020.

[70] T. Nishioka, *Quantum information measures and quantum field theory,* Workshop on recent developments in AdS/CFT, OIST, Japan, April 2-3, 2019.

[71] T. Nishioka, *Entanglement, free energy and C-theorem in DCFT,* Quantum Information and String Theory 2019, YITP, Kyoto, Japan, May 27 - June 28, 2019.

[72] T. Nishioka, *Entanglement, free energy and C-theorem in DCFT,* Boundaries and Defects in Quantum Field Theory, Perimeter Institute, Canada, August 6-9, 2019.

[73] T. Nishioka, *Entanglement, free energy and C-theorem in DCFT,* Youth Symposium on theoretical high energy physics, Shing-Tung Yau Center of Southeast University, China, August 20-22, 2019.

[74] T. Nishioka, *Entanglement, free energy and C-theorem in DCFT,* KIAS-YITP 2019, KIAS, Korea, September 23-27, 2019.

[75] T. Nishioka, *The gravity dual of Lorentzian OPE block II,* East Asia Joint Workshop on Fields and Strings 2019, NCTS, Taiwan, October 28 - November 1, 2019.

[76] T. Nishioka, *Entanglement, free energy and C-theorem in DCFT,* NCTS Annual Theory Meeting 2019, NCTS, Taiwan, December 12-14, 2019.

(国内会議)

一般講演

[77] 吾郷太一, “グラディエントフローによる格子カイラルゲージ理論の構成と局所性の問題”, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 山形大学, 2019 年 9 月 18 日

[78] 浅井健人, “Predictions for the neutrino parameters in the minimal model extended by general lepton flavor-dependent U(1) gauge symmetries”, 基研研究会 素粒子物理学の進展 2019, 京都大学 基礎物理学研究所, 2019 年 7 月 31 日.

[79] 浅井健人, “ニュートリノと新物理”, 新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」 第 1 回地下宇宙若手研究会, 東京大学 宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設, 2020 年 2 月 23 日.

[80] 浅井健人, “Low Scale seesaw models for low scale $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ symmetry”, 日本物理学会第 75 回年次大会, 名古屋大学, 2020 年 3 月 16-19 日.

[81] 中山和則, “Purely Gravitational Dark Matter”, 日本物理学会 2019 年秋期大会, 山形大学 (2019/9/20).

[82] 中山和則, “Vector Coherent Oscillation Dark Matter”, 日本物理学会 第 75 回年次大会 (2020/3/19).

[83] Shih-Yen Tseng, “Non-thermal leptogenesis with $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$” (poster), 基研研究会 PPP2019, 京都大学基礎物理学研究所, 2019 年 7 月 31 日

[84] 渡辺 彬生, “Testing Macdonald Index as a Refined Character of Chiral Algebras,” 日本物理学会第 75 回年次大会, 名古屋大学, 2020 年 3 月.

[85] 渡邊 賢人, “Does Boundary Distinguish Complexities?,” 日本物理学会第 75 回年次大会, 名古屋大学, 2020 年 3 月 19 日.

[86] 柳 圭祐, 基研研究会 素粒子物理学の進展２０１９, 京都大学 基礎物理学研究所, 2019 年 8 月

招待講演

[87] Koichi Hamaguchi, “暗黒物質理論 ,” ダークマターの懇談会 2019, 早稲田大学, 2019/7/5.

[88] 濱口幸一, “物質の起源を解明する新たな素粒子模型と初期宇宙進化の理論研究,” 新学術「地下宇宙研究会」, 大阪大学, 2019/8/25.

[89] 永田夏海, “陽子崩壊と大統一理論研究の現状と展望,” 日本物理学会 第 75 回年次大会, 名古屋大学, Mar. 18, 2020.

[90] 永田夏海, “中性子星の温度観測を用いた新物理模型探索,” E 研夏の学校 2019, 名古屋大学, Sep. 25–27, 2019.

(セミナー)

[91] Kento Asai, “Minimal Gauged $U(1)_{L_\alpha - L_\beta}$ Models Driven into a Corner”, Tohoku University, Sendai, Japan, May 9, 2019.

[92] S. Chigusa, “Indirect Studies of Electroweakly Interacting Particles at 100 TeV Hadron Colliders”, KEK (2019/4/9)

[93] S. Chigusa, “Indirect Studies of Electroweakly Interacting Particles at 100 TeV Hadron Colliders”, Florida State University (2019/5/10)

[94] S. Chigusa, “Indirect Studies of Electroweakly Interacting Particles at 100 TeV Hadron Colliders”, University of Florida (2019/5/16)

[95] S. Chigusa, “Indirect Studies of Electroweakly Interacting Particles at 100 TeV Hadron Colliders”, 大阪大学 (2019/7/23)

[96] S. Chigusa, “Flowing to the Bounce”, 東北大学 (2019/10/24)

[97] N. Nagata, “Limit on the Axion Decay Constant from the Cooling Neutron Star in Cassiopeia A,” University of Minnesota, Minneapolis MN, USA, Feb. 10, 2020.

[98] N. Nagata, “Axion Cooling in Neutron Stars”, KEK, Tsukuba, Japan, Nov. 28, 2019.

[99] N. Nagata, “On the WIMP dark matter signature in old neutron stars,” University of Sydney, Australia, Oct. 31, 2019.

[100] N. Nagata, “Neutron Star Heating by WIMP Dark Matter,” Université Paris-Sud, France, Sep. 9, 2019.

[101] N. Nagata, “On the WIMP dark matter signature in old neutron stars,” LPTHE Jussieu, France, Sep. 6, 2019.

[102] N. Nagata, “Neutron Star Cooling Theory,” Université Paris-Sud, France, Aug. 27, 2019.

[103] N. Nagata, “Nucleon Superfluidity,” Université Paris-Sud, France, Aug. 22, 2019.

[104] N. Nagata, “Introduction to Neutron Stars,” Université Paris-Sud, France, Aug. 20, 2019.

[105] N. Nagata, “Limit on the Axion Decay Constant from the Cooling Neutron Star in Cassiopeia A,” Université Paris-Sud, France, Jul. 11, 2019.

[106] N. Nagata, “Limit on the Axion Decay Constant from the Cooling Neutron Star in Cassiopeia A,” Osaka University, Osaka, Japan, Apr. 16, 2019.

[107] 柳 圭祐, 京都大学, 2019 年 6 月

[108] 柳 圭祐, 名古屋大学, 2019 年 6 月

[109] 柳 圭祐, 高エネルギー加速器研究機構, 2019 年 6 月

[110] 柳 圭祐, 大阪大学, 2020 年 1 月

[111] 柳 圭祐, 東京大学, 2020 年 3 月

# 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、現在櫻井研究室、Wimmer 研究室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有し、セミナーやコロ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子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　軽い陽子過剰核における共鳴状態の分光

軽い不安定核や安定核の励起状態には、クラスター構造やハローといった特異な構造が現れることが知られている。軽い不安定核では、中性子過剰核に比べると陽子過剰核の実験結果は少ない。これは、陽子過剰な原子核はクーロン斥力によって束縛せずに共鳴状態をもつ場合が多く、実験で探索するのが困難であることが一つの要因である。また、共鳴状態は理論的なとり扱いも難しく、その基礎となる実験データが求められている。陽子過剰核は、鏡映核となる中性子過剰核との比較によって原子核の基本的な対称性である鏡映対称性を議論する上でも重要である。

我々は、陽子過剰な軽い不安定核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。$^{9}$C、$^{8}$B、$^{7}$Be、$^{6}$Li を含む二次ビームを $^{12}$C の核破砕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 $(p, d)$ 反応で生じた $d$ 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 2.1.1) で測定することで、目的の $^{8}$C、$^{7}$B、$^{6}$Be、$^{5}$Li 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、新たな共鳴状態を観測した。



図 2.1.1: フランス GANIL で使用した反跳粒子検出器 MUST2 の写真。それぞれの検出器はシリコン半導体検出器と CsI シンチレーターで構成される $\Delta E$-$E$ 検出器で、本実験では全部で 8 台の検出器を使用した。

### 2.1.2　パラジウム同位体のミューオン捕獲

ミューオン捕獲は電子捕獲の類似反応で、ミューオンの質量 (約 106 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ガンマ線を複数個放出して崩壊する。実験的・理論的な難しさから、このミュー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。

我々はパラジウムの同位体のミューオン捕獲反応について、大阪大学核物理研究センター (RCNP) の DC ミューオンビームと、J-PARC および英国 RAL 研究所のパルスミューオンビームを併用して実験を行なった。RCNP では、DC ミューオンビームを用いて中性子とガンマ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ー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。またパルスミューオンビームを用いてミューオン捕獲後の不安定核がベータ崩壊する際のガンマ線を測定し、

ミュー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。[30, 34]

### 2.1.3 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である。

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と運動量広がりを評価する手法を構築している。大電流ビーム輸送では、ビーム自身が励起する電磁場 (空間電荷効果) による発散力を抑制するために、ビームを大口径化し、空間電荷密度を希薄化し、$\phi$600 mm 程度の大口径のソレノイド磁石による収束力を設けたビームラインによって、ビームを後段加速器のアクセプタンスにマッチさせる。この方式ではビーム口径が従来よりも大きいために、従来のビーム光学計算手法で採用される近軸近似の精度が悪化する点、およびビームとソレノイド磁石が励起する多重極電磁場に起因するビームハロー生成が課題になる。現在、多重極電磁場の影響を考慮したビームハローの計算手法の開発に取り組んでいる。さらに、空間電荷効果起因の多重極電磁場をソレノイドコイルの適切な配置と励磁によって打ち消す手法の成立性についても検討中である。[35]

### 2.1.4 RIBF での高分解能インビームガンマ線核分光 (HiCARI Project)

我々は、理化学研究所の RI ビームファクトリー (RIBF) にある高効率ガンマ線検出器 DALI2+を用いて、不安定核のインビームガンマ線核分光実験を行ってきた。これまでに、偶々核 (陽子・中性子数がともに偶数である原子核) の第一 $2^+$ 励起エネルギーやクーロン励起による換算遷移確率 $B(E2)$ を測定し、魔法数の進化やアイソスピン対称性の破れの探索を行ってきた。一方で、準位密度の大きい奇核 (質量数が奇数である原子核) の分光や、励起準位の寿命を測定することも核構造を理解するためには重要であるが、NaI(Tl) シンチレーターを使用している DALI2+の限られたエネルギー分解能ではこれらの実験を行うことが困難であった。そこで、高分解能のガンマ線核分光実験を RIBF で実現するため、2019 年度から新たなガンマ線検出器アレイ建設計画 (HiCARI project: High-Resolution Cluster Array at RIBF) を開始した。

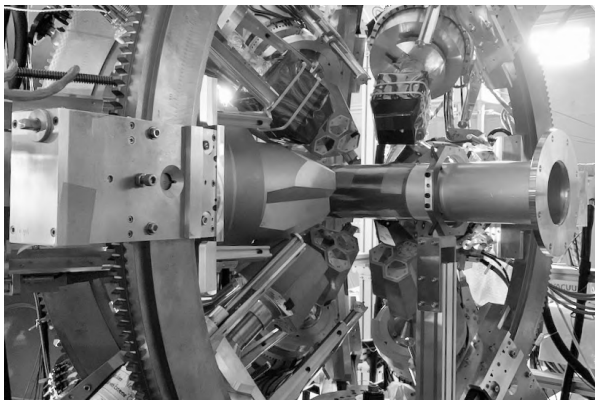


図 2.1.2: 建設中の HiCARI アレイの様子。不安定核ビームは写真の右側から入射し、ダクト中に設置された標的との原子核反応によってガンマ線を放出する。12 台のゲルマニウム検出器は標的を覆うように設置され、高効率・高分解能でガンマ線のエネルギーを測定することができる。

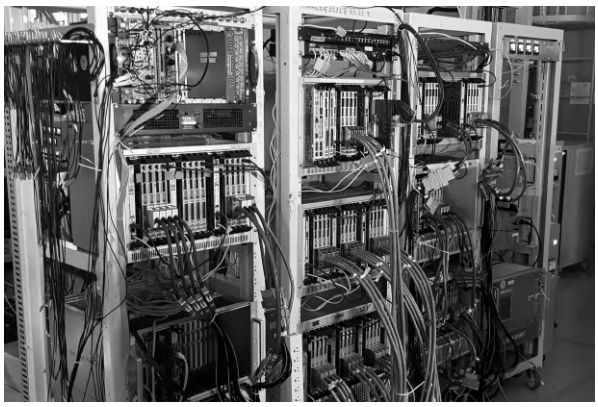


図 2.1.3: 開発中の HiCARI データ収集システムの写真。ビームラインのデータ収集システムと同期しながら、合計約 500ch のゲルマニウム検出器の出力信号波形をフラッシュ ADC で取得することができる。

HiCARI プロジェクトでは、国内外から高分解能ガンマ線検出器を集結し高効率・高分解能の検出器アレイを建設する。CERN・ISOLDE において使用されているセグメントゲルマニウム検出器 Miniball、大阪大学 RCNP と米国ローレンス・バークレー国立研究所が所有する Gretina 型ガンマ線トラッキング検出器、韓国 IBS が所有するクローバー型検出器の計 12 台のゲルマニウム検出器から構成されるアレイを建設した。(図 2.1.2) RIBF におけるインビームガンマ線核分光実験では、測定するガンマ線は光のおよそ 50%程度の速度で飛行する原子核から放出されることによりドップラーシフトの影響を受ける。高分解能のガンマ線測定には、このドップラーシフトを高精度で補正するために、検出器のエネルギー分解能に加えてガンマ線の検出位置を高い分解能で測定する必要がある。Gretina 型の検出器は出力波形をフラッシュ ADC で記録しその波形解析を行うことで、検出したガンマ線の位置をおよそ 5 mm の精

度で決定することができる。HiCARI プロジェクトでは集結した検出器を統一したデータ収集系で計測し、また RIBF の既存のビームラインのデータ計測システムと同期して測定するために、Gretina で開発されたシステムを元に新たなデータ収集システムを開発した。(図 2.1.3) HiCARI プロジェクトでは、全部で約 15 課題の実験を 2020 年度に行う予定である。

我々のグループでは、特に中性子過剰なチタン同位体の核分光実験を考案した。最近の我々の研究により、中性子過剰なカルシウム同位体では新たな中性子魔法数 34 が発現し、陽子数を増やすことで急速に消滅することが知られている。しかし、この核構造進化の定量的な評価は未だ実験的になされていない。カルシウムよりも陽子が 2 つだけ多いチタン同位体において中性子一粒子軌道の配位を測定することで、この領域中性子殻構造の進化を解明する、本実験提案は RIBF の実験採択委員会において A グレードの課題として採択された。

### 2.1.5 パイオン生成断面積の系統的測定

近年、原子炉等から排出される長寿命の放射線核廃棄物処理の方法の一つとして、負ミューオン捕獲反応を用いた核変換が提案されている。このミューオン核変換の実現のためには、大量の負ミューオンを高効率かつ低コストで生成が必要である。ミューオンは原子核の衝突によって生じるパイオンの崩壊によって得られるため、大強度ミューオンの生成には、効率化的なパイオン生成のために原子核反応反応エネルギーを最適化する必要がある。

パイオンは正負と中性の電荷を持つ 3 種類 $(\pi^{\pm}, \pi^{0})$ があるが、核変換に必要なのは負電荷を持つミューオンであり、それは負パイオン $(\pi^{-})$ の崩壊によって得られる。負パイオンは、原子核内の陽子 $(p)$・中性子 $(n)$ が

$$p + n \to p + p + \pi^{-} \quad (1.5.1)$$
$$n + n \to p + n + \pi^{-} \quad (1.5.2)$$

という反応を起こすことで生成される。一般的に 1.5.2 の反応の方が 1.5.2 に比べ反応断面積が大きいため、より多くの中性子を含むビームと標的の組み合わせによる核反応を使う方が、効率的に負パイオンを生成することができる。しかし、パイオンの生成断面積が詳しく調べられている過程は核子間衝突と陽子ビーム（または陽子標的）を用いた反応に限られている。大強度ミューオンビームの生成には、様々な原子核反応やビームエネルギーによるパイオン生成の系統的な断面積測定を通じてその反応機構を解明することが重要である。現在、重陽子、三重陽子、$^{4}$He,$^{6}$Li ビームの炭素標的への照射によるパイオン生成断面積を、ドイツ重イオン研究所（GSI）で測定する計画を進めている。

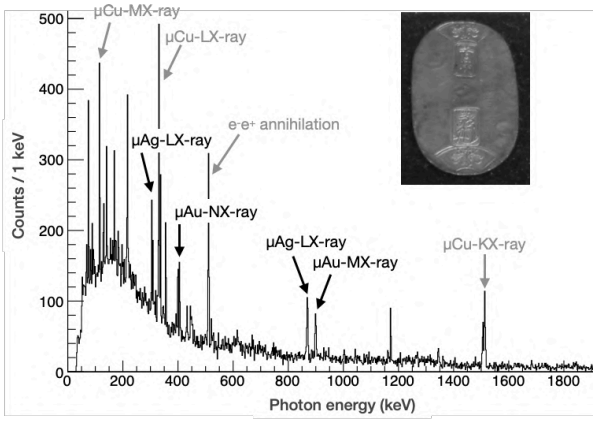



図 2.1.4: 銅板に挟まれた天保小判 (19 世紀) にミューオンを照射して測定したミューオン X 線のエネルギースペクトル。デモンストレーションとして使用した天保小判（写真）は金と銀の混合物であり、それぞれのミューオン特性 X 線に相当するピークを見ることができる。[24]

### 2.1.6 ミューオン X 線を使った元素分析装置 LeXSea の開発

元素分析は科学研究において基礎となる重要な技術の一つであり、これまでにも多くの元素分析手法が開発され様々な分野で利用されている。その中でも、非破壊分析法は他の分析法や各種試験に同じ資料を再利用できる点、貴重資料への適応が可能である点で有用である。ミューオン原子の特性 X 線測定による元素分析法 (MIXE: Muon Induced X-ray Emission) は最近注目されている非破壊元素分析手法の一つである。我々のグループでは、これまで大阪大学 RCNP において考古学資料や隕石などの MIXE の開発を行う他（図 2.1.4 は RCNP での初めての MIXE デモンストレーションの結果）、ミューオン原子 X 線エネルギーの原子核の密度分布依存性についての基礎研究も行っている。

これまで各地で行われてきた MIXE は、主に 2,3 台の一般的な P 型ゲルマニウム検出器を用いて行われてきたが、特に軽元素では X 線のエネルギーが低く信号ノイズ比が悪いため、元素分析の精度は例えば炭素では 1wt%程度が限界となっていた。そこで現在、低いエネルギーの X 線を高効率・高精度で測定するための検出器システム $\mu$LeXSea (Low-energy muonic X-ray spectrometer for element analysis) の開発を行っている。LeXSea は、低エネルギーの X 線にも感度が高い N 型または平行平板型のゲルマニウム検出器と、高いエネルギーの X 線やガンマ線のコンプトンに起因するバックグラウンドを軽減するための BGO シンチレーターを用いたコンプトン抑制装置で構成される検出器である。2019 年度は検出器の基礎設計を行いプロトタイプの製作を行った (図 2.1.5)。今後このプロトタイプの性能試験を進め、2021 年には全部で 4,5 台の検出器アレイを完成させ高精度の MIXE を行う計画である。

＜報文＞




図 2.1.5: 開発中の LeXSea 検出器のプロトタイプの写真。平行平板型のゲルマニウム検出器を BGO シンチレーターで覆う形状をしている。

(原著論文)

[1] J. Hwang *et al.*, "Angle-tunable wedge degrader for an energy-degrading RI beamline", Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 043D02 (2019).

[2] S. Michimasa *et al.*, "OEDO, the energy-degrading beamline at RI Beam Factory", Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 043D01 (2019).

[3] A.Tolosa-Delgado *et al.*, "Commissioning of the BRIKEN detector for the measurement of very exotic $\beta$-delayed neutron emitters", Nucl. Instrum. Method A925, 133 (2019).

[4] Z. Q. Chen *et al.*, "Proton Shell Evolution below $^{132}$Sn: First Measurement of Low-Lying $\beta$-Emitting Isomers in $^{123,125}$Ag", Phys. Rev. Lett. 122, 212502 (2019).

[5] R. Taniuchi *et al.*, "$^{78}$Ni revealed as a doubly magic stronghold against nuclear deformation", Nature 569, 53 (2019).

[6] K. Wimmer *et al.*, "First spectroscopy of 61Ti and the transition to the Island of Inversion at $N = 40$", Phys. Lett. B792, 16 (2019).

[7] H. Watanabe *et al.*, "New isomers in $^{125}$Pd$_{79}$ and $^{127}$Pd$_{81}$: Competing proton and neutron excitations in neutron-rich palladium nuclides towards the $N = 82$ shell closure", Phys. Lett. B792, 263 (2019).

[8] H. Wang *et al.*, "Enhancement of element production by incomplete fusion reaction with weakly bound deuteron", Comm. Phys. 2, 78 (2019).

[9] V. H. Phong *et al.*, "Observation of a $\mu$s isomer in $^{134}_{49}$In$_{85}$: Proton-neutron coupling "southeast" of $^{132}_{50}$Sn$_{82}$", Phys. Rev. C 100, 011302(R) (2019).

[10] K. Wimmer *et al.*, "Discovery of $^{68}$Br in secondary reactions of radioactive beams", Phys. Lett. B795, 266 (2019).

[11] V.Vaquero *et al.*, "Inclusive cross sections for one- and multi-nucleon removal from Sn, Sb, and Te projectiles beyond the $N = 82$ shell closure", Phys. Lett. B795, 356 (2019).

[12] B. Elman *et al.*, "Probing the role of proton cross-shell excitations in $^{70}$Ni using nucleon knockout reactions", Phys. Rev. C 100, 034317 (2019).

[13] R. Yokoyama *et al.*, "Strong one-neutron emission from two-neutron unbound states in beta decays of the r-process nuclei Ga-86, Ga-87", Phys. Rev. C 100, 031302 (2019).

[14] S. Chen *et al.*, "Quasifree Neutron Knockout from $^{54}$Ca Corroborates Arising $N = 34$ Neutron Magic Number", Phys. Rev. Lett. 123, 142501 (2019).

[15] K. Nakano *et al.*, "Isotope production in proton-, deuteron-, and carbon-induced reactions on $^{93}$Nb at 113 MeV/nucleon", Phys. Rev. C 100, 044605 (2019).

[16] L. Sinclair *et al.*, "Half-lives of $^{73}$Sr and $^{76}$Y and the consequences for the proton dripline", Phys. Rev. C 100, 044311 (2019).

[17] J.Estee *et al.*, "Extending the dynamic range of electronics in a Time Projection Chamber", Nucl. Instrum. Method A944, 162509 (2019).

[18] G. X. Zhang *et al.*, "Interplay of quasiparticle and vibrational excitations: First observation of isomeric states in $^{168}$Dy and $^{169}$Dy", Phys. Lett. B799, 135036 (2019).

[19] M. Cortes *et al.*, "Shell evolution of N=40 isotones towards Ca-60: First spectroscopy of Ti-62", Phys. Lett. B800, 135071 (2020).

[20] V. Vaquero *et al.*, "Fragmentation of Single-Particle Strength around the Doubly Magic Nucleus Sn-132 and the Position of the $0f_{5/2}$ Proton-Hole State in In-131", Phys. Rev. Lett. 124, 022501 (2020).

[21] A. Ertoprak *et al.*, "Evidence for octupole collectivity in $^{172}$Pt", Euro. Phys. J. A56, 65 (2020).

[22] M. Tanaka *et al.*, "Swelling of Doubly Magic Ca-48 Core in Ca Isotopes beyond N=28", Phys. Rev. Lett. 124, 102501 (2020).

[23] F. Boulay *et al.*, "$g$ Factor of the $^{99}$Zr $(7/2^+)$ Isomer: Monopole Evolution in the Shape-Coexisting Region", Phys. Rev. Lett. 124, 112501 (2020).

[24] 二宮 和彦 他, "連続ミューオン源 RCNP-MuSIC を用いた非接触での物体内部の元素濃度分析実験", RADIOISOTOPES 69, 13 (2020).

(会議抄録)

[25] H. Okuno *et al.*, "Proposal of a 1-ampere-class deuteron single-cell linac for nuclear transmutation", Proc. Japan Acad. Ser. B95, 430 (2019).

[26] T. Goigoux *et al.*, "$^{67}$Kr TWO-PROTON RADIOACTIVITY: RESULTS AND THEORETICAL INTERPRETATIONS", Acta. Phys. Pol. B50, 399 (2019).

[27] F. Recchia *et al.*, “ISOMER SPECTROSCOPY IN ODD–EVEN Ti ISOTOPES: APPROACHING $N = 40$”, Acta. Phys. Pol. B50, 669 (2019).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[28] T. Koiwai, “Single-particle structure of $^{55}$Ti and $^{57}$Ti”, Workshop on high-resolution gamma-ray spectroscopy at the RIBF, April 2019, Darmstadt (Germany).

[29] T. Koiwai, “In-beam γ-ray spectroscopy of $^{55}$K and $^{55}$Ca via nucleon knockout reactions”, International Nuclear Physics Conference (INPC 2019), July-August 2019, Glasgow (UK).

[30] T. Y. Saito, “Neutron emission property after nuclear muon capture of palladium”, International Nuclear Physics Conference (INPC 2019), July-August 2019, Glasgow (UK).

[31] T. Koiwai, “$N = 34$ beyond $^{54}$Ca: Single-particle structure of $^{55,57}$Ti”, 8th SUNFLOWER Workshop / HiCARI Workshop (JSPS A3Foresight), August 2019, Osaka (Japan).

招待講演

[32] H. Sakurai, “In-flight Radioactive Isotope Beam Facilities and Nuclear Physics at RIKEN”, The First African Nuclear Physics Conference (ANPC), July 2019, Kruger (South Africa).

(国内会議)

招待講演

[33] 櫻井博儀, “RIBF での核物理研究”, 研究会「シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて（QUCS2019)」, 2019 年 12 月, 京都.

[34] 新倉潤, “ミューオニクス”, 若手放談会, 2019 年 2 月, 理化学研究所神戸キャンパス.

[35] 青木孝道, “加速器の大電流化”, 若手放談会, 2019 年 2 月, 理化学研究所神戸キャンパス.

## 2.2 相原・横山研究室

当研究室では, 茨城県つくば市にある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と, 茨城県東海村の J-PARC 加速器を使ったニュートリノ振動および核子崩壊の研究, 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建設, 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, 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

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）は, 蓄積した高統計データを用いて, 標準模型と呼ばれる現在の素粒子物理のパラダイムの精密な検証を行い, 小林・益川両博士のノーベル賞受賞の決め手になるなど, 多大な成功を収めた。

この成果を発展させ, 標準模型を越えるより根源的な原理の探求を行うべく, 装置のアップグレードが行われ, B ファクトリーはスーパー B ファクトリー（SuperKEKB 加速器と Belle II 測定器）として生まれ変わった。SuperKEKB は, KEKB の 40 倍のルミノシティ ($8 \times 10^{35}$ cm$^{-2}$s$^{-1}$) を実現するよう設計された最先端ファクトリー型加速器であり, Belle II 測定器（図 2.2.1）は, その加速器から最大限の物理成果を引き出すために最先端技術を駆使して作られた測定器である。本研究室は, Belle II 測定器の主要な構成要素である SVD 検出器の開発・量産を主導してきた (図 2.2.2)。

2019 年に, Super KEKB 加速器と Belle II 検出器の本格的な運転・データ収集が開始された。2020 年には, Belle II 実験からの最初の物理成果が出版された [24]。

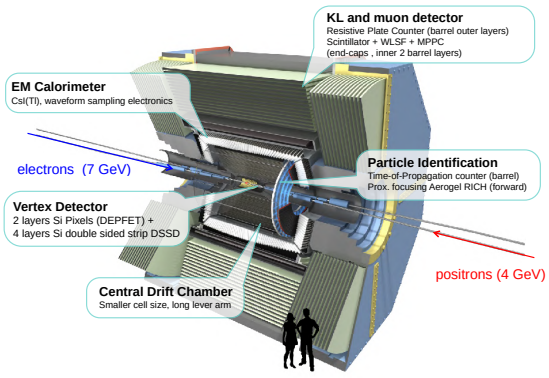



図 2.2.1: Belle II 検出器。

本研究室では Belle II 実験とその SVD 検出器の運用を行いつつ, フレーバーの変換を引き起こす中性カレント (Flavor Changing Neutral Current, FCNC) 過程による B 中間子の崩壊の測定と, 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 $\phi_1$ の測定による新物理探索を進めている。未知の新物理・新粒子が存在する場合, それらが FCNC 過程のような場の理論の高次効果によって引き起こされる遷移の中間状態に寄与し, 遷移確率や運動学的分



図 2.2.2: 本研究室が貢献した BelleII 実験 SVD 崩壊点検出器。

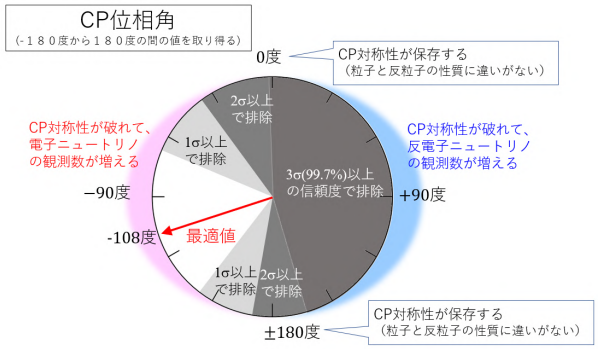



図 2.2.3: T2K 実験の 2020 年の解析による，観測結果と最も良く合う CP 位相角の値（矢印）と各信頼度で排除された範囲（灰色部分）。理論的に取り得る値の範囲の半分近くを排除した。

布を変化させることが予想される。このような過程を精密に測定し，標準模型に基づく計算と比較することで，感度の高い新物理探索が可能となる。

近年，FCNC 過程の一つである $B \to K^{(*)} l^+ l^-$ ($l^\pm$ は電子あるいはミューオン）崩壊事象において，標準模型の予言値から 3 標準偏差を超えるズレが報告されており，より精密な測定による検証が期待されている。本研究室では，Belle II 実験のデータを用いた $B \to K l^+ l^-$ 崩壊事象の測定を目指して解析を進めている。

標準模型の枠組みにおける CP 対称性の破れパラメータ $\phi_1$ は，$B \to J/\psi K_S$ 崩壊を用いると最も高い精度で測定でき，これまで Belle 実験などの B ファクトリー実験で数%の精度で測定されている。一方，FCNC 過程において対応する量を測定した場合，もし新物理が存在すれば，その効果で値がずれる可能性がある。本研究室では，$B \to J/\psi K_S$ 崩壊を用いて $\phi_1$ の測定精度を更に高めるとともに，$B \to K_S K_S K_S$ 崩壊などの測定を進めて新物理発見を目指している。

### 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。

**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して，ニュートリノ振動を世界最高精度で測定している。

2019 年度には，前年度までに取得したデータの詳細な解析を進めた結果，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に対し，CP 対称性を破る複素位相 $\delta_{CP}$ に対する制限を求めた。世界で初めて，3 $\sigma$ の信頼度で，可能なパラメータ空間の大部分を排除することに成功した（図 2.2.3）[36]。

**T2K 前置検出器アップグレード**　本研究室では，T2K 実験の感度をさらに向上させることを目標に，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 年度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。2019 年度には，この計画が CERN で正式なプロジェクト NP07 として認可され，10 ヵ国と CERN を含む国際協力で測定器の建設準備を進めた。本研究室では，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（図 2.2.4）の設計・要素開発を進めている。

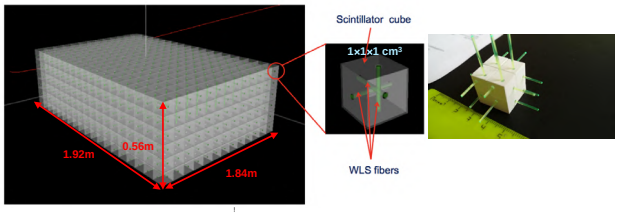



図 2.2.4: SuperFGD 検出器の概念図。$1 \times 1 \times 1$ cm$^3$ のプラスチックシンチレータを約 200 万個組み上げ，波長変換ファイバーと MPPC で 3 方向から読み出すことで，内部で起きたニュートリノ反応の詳細な情報を捉える。

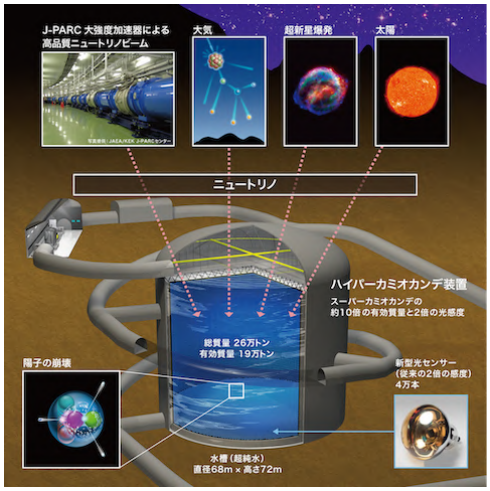



図 2.2.5: ハイパーカミオカンデ検出器の概念図。

**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，研究室規模で可能な比較的小規模な実験として，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。前置検出器ホールのスペースに WAGASCI 検出器を設置する計画を立案し，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%の精度で測定した結果を出版した [29]。また，2 台目の WAGASCI 検出器モジュールを用いた，反ニュートリノビームによる反応断面積断面積測定の結果も公表した。

### 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 2.2.5）の実現のための研究を進めてきた。

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。本年度には，スーパーカミオカンデ内に取り付けた 100 本以上の新型光電子増倍管の長期安定性を確認した。

2020 年初頭から，いよいよハイパーカミオカンデの建設が始まった。今後もハイパーカミオカンデでの研究に向け，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，国立天文台などと共同で、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，それを用いた広視野深宇宙の観測によっ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（満月約 9 個分相当）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。

本年度，HSC グループは，すばる望遠鏡での約 90 晩の観測で得られた約 140 平方度（満月約 3000 個分相当）の重力レンズデータに含まれる約 1000 万個の銀河形状における重力レンズ歪み効果の測定に成功した。それによって，宇宙の全エネルギーに占める物質の割合と現宇宙の構造形成進化の度合いを表す物理量（$S_8$）を求めた（図 2.2.6 参照）。結果は，標準宇宙模型と矛盾がない。最終的な HSC データ量は，今回の解析に使ったデータの 10 倍になる予定であり，標準宇宙模型のより厳密なテストになることが期待されている。

### 2.2.5 アクシオンおよび軽い暗黒物質探索実験の実現可能性研究

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を開発している。太陽コア中心で熱的に励起した $^{57}$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 $^{57}$Fe で吸収し，脱励起で放出される 14.4 keV の γ 線を最先端のシリコンピクセル X 線検出器で検出する計画である。

また，シリコン検出器は，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ため，軽い暗黒物質の直接探索にも適している。さ

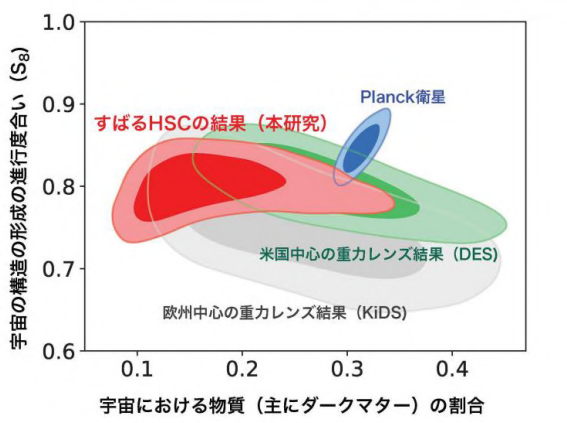



図 2.2.6: 宇宙の全エネルギーに占める物質の割合と現宇宙の構造形成進化の度合いを表す物理量（$S_8$）[37]。

らなる高感度化により，軽い暗黒物質の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。

これらの探索においては，周辺回路に含まれる放射性同位元素（RI）からの放射線が背景事象となる。そこで，安価だが RI が微量含まれるリジッド基板と，RI は少ないが高価なフレキシブル基板を組み合わせたリジッドフレキ基板を用い，検出器由来の背景事象を大幅に低減可能な装置を開発した。現在，この検出器を用いて実験準備を進めている。

＜受賞＞

[1] 小川 夏実，第 9 回高エネルギー物理春の学校 優秀賞

＜報文＞

(原著論文)

B ファクトリー関連


[2] R. Garg *et al.* [Belle Collaboration], "Search for the $B \to Y(4260)K$, $Y(4260) \to J/\psi\pi^+\pi^-$ decays," Phys. Rev. D **99**, no. 7, 071102 (2019).

[3] B. Pal *et al.* [Belle Collaboration], "Evidence for the decay $B^0 \to p\bar{p}\pi^0$," Phys. Rev. D **99**, no. 9, 091104 (2019).

[4] H. Aihara, "Charm Reflects Poorly on Anticharm," APS Physics **12**, 52 (2019).

[5] V. Bhardwaj *et al.* [Belle Collaboration], "Search for $X(3872)$ and $X(3915)$ decay into $\chi_{c1}\pi^0$ in $B$ decays at Belle," Phys. Rev. D **99**, no. 11, 111101 (2019).

[6] R. Seidl *et al.* [Belle Collaboration], "Transverse momentum dependent production cross sections of charged pions, kaons and protons produced in inclusive $e^+e^-$ annihilation at $\sqrt{s} = 10.58$ GeV," Phys. Rev. D **99**, no. 11, 112006 (2019).

[7] Y. T. Lai *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of branching fraction and final-state asymmetry for the $\bar{B}^0 \to K^0_S K^{\mp}\pi^{\pm}$ decay," Phys. Rev. D **100**, no. 1, 011101 (2019).

[8] K. Chilikin *et al.* [Belle Collaboration], "Evidence for $B^+ \to h_c K^+$ and observation of $\eta_c(2S) \to p\bar{p}\pi^+\pi^-$," Phys. Rev. D **100**, no. 1, 012001 (2019).

[9] P.-C. Chou *et al.* [Belle Collaboration], "Search for $B^0 \to X(3872)\gamma$," Phys. Rev. D **100**, no. 1, 012002 (2019).

[10] Y. B. Li *et al.* [Belle Collaboration], "First measurements of absolute branching fractions of the $\Xi_c^+$ baryon at Belle," Phys. Rev. D **100**, no. 3, 031101 (2019).

[11] S. Jia *et al.* [Belle Collaboration], "Search for $\Omega(2012) \to K\Xi(1530) \to K\pi\Xi$ at Belle," Phys. Rev. D **100**, no. 3, 032006 (2019).

[12] E. Waheed *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the CKM matrix element $|V_{cb}|$ from $B^0 \to D^{*-}\ell^+\nu_\ell$ at Belle," Phys. Rev. D **100**, no. 5, 052007 (2019).

[13] Y. Jin *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of $\tau^- \to \pi^-\nu_\tau e^+e^-$ and search for $\tau^- \to \pi^-\nu_\tau\mu^+\mu^-$," Phys. Rev. D **100**, no. 7, 071101 (2019).

[14] P. K. Resmi *et al.* [Belle Collaboration], "First measurement of the CKM angle $\phi_3$ with $B^{\pm} \to D(K^0_S\pi^+\pi^-\pi^0)K^{\pm}$ decays," JHEP **1910**, 178 (2019).

[15] R. Mizuk *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of a new structure near 10.75 GeV in the energy dependence of the $e^+e^- \to \Upsilon(nS)\pi^+\pi^-$ (n = 1, 2, 3) cross sections," JHEP **1910**, 220 (2019).

[16] H. Li *et al.* [Belle Collaboration], "Azimuthal asymmetries of back-to-back $\pi^{\pm} - (\pi^0, \eta, \pi^{\pm})$ pairs in $e^+e^-$ annihilation," Phys. Rev. D **100**, no. 9, 092008 (2019).

[17] F. Abudinén *et al.* [Belle-II Collaboration], "Measurement of the integrated luminosity of the Phase 2 data of the Belle II experiment," Chin. Phys. C **41**, 021001 (2020).

[18] E. Kou *et al.* [Belle-II Collaboration], "The Belle II Physics Book," PTEP **2019**, no. 12, 123C01 (2019).

[19] Y. Li *et al.* [Belle Collaboration], "Measurements of the Branching Fractions $\mathcal{B}(B^- \to \bar{\Lambda}_c^- \Xi_c^{\prime 0})$, $\mathcal{B}(B^- \to \bar{\Lambda}_c^- \Xi_c(2645)^0)$ and $\mathcal{B}(B^- \to \bar{\Lambda}_c^- \Xi_c(2790)^0)$," Phys. Rev. D **100**, no. 11, 112010 (2019).

[20] S. Jia *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of a vector charmoniumlike state in $e^+e^- \to D_s^+ D_{s1}(2536)^- + c.c.$," Phys. Rev. D **100**, no. 11, 111103 (2019).

[21] M. T. Prim *et al.* [Belle Collaboration], "Search for $B^+ \to \mu^+\nu_\mu$ and $B^+ \to \mu^+ N$ with inclusive tagging," Phys. Rev. D **101**, no. 3, 032007 (2020).

[22] K. Chu *et al.* [Belle Collaboration], "Study of $B \to p\bar{p}\pi\pi$," Phys. Rev. D **101**, 052012 (2020).

[23] P. Katrenko *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of the radiative decays of $\Upsilon(1S)$ to $\chi_{c1}$," Phys. Rev. Lett. **124**, 122001 (2020).

[24] I. Adachi *et al.* [Belle-II Collaboration], "Search for an Invisibly Decaying $Z'$ Boson at Belle II in $e^+e^- \to \mu^+\mu^-(e^\pm\mu^\mp)$ Plus Missing Energy Final States," Phys. Rev. Lett. **124**, no.14, 141801 (2020).

ニュートリノ実験関連

[25] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Search for light sterile neutrinos with the T2K far detector Super-Kamiokande at a baseline of 295 km," Phys. Rev. D **99**, no. 7, 071103 (2019).

[26] M. Jiang *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Atmospheric Neutrino Oscillation Analysis with Improved Event Reconstruction in Super-Kamiokande IV," PTEP **2019**, no. 5, 053F01 (2019).

[27] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Search for neutral-current induced single photon production at the ND280 near detector in T2K," J. Phys. G **46**, no. 8, 08LT01 (2019).

[28] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Search for heavy neutrinos with the T2K near detector ND280," Phys. Rev. D **100**, no. 5, 052006 (2019).

[29] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Measurement of the $\nu_\mu$ charged-current cross sections on water, hydrocarbon, iron, and their ratios with the T2K on-axis detectors," PTEP **2019**, 093C02 (2019).

[30] C. Simpson *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Sensitivity of Super-Kamiokande with Gadolinium to Low Energy Anti-neutrinos from Pre-supernova Emission," Astrophys. J. **885**, 133 (2019).

[31] K. Hagiwara *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Search for Astronomical Neutrinos from Blazar TXS 0506+056 in Super-Kamiokande," Astrophys. J. **887**, no. 1, L6 (2019).

[32] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Measurement of neutrino and antineutrino neutral-current quasielasticlike interactions on oxygen by detecting nuclear deexcitation $\gamma$ rays," Phys. Rev. D **100**, no. 11, 112009 (2019).

[33] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Measurement of the muon neutrino charged-current single $\pi^+$ production on hydrocarbon using the T2K off-axis near detector ND280," Phys. Rev. D **101**, no. 1, 012007 (2020).

[34] L. Marti *et al.*, "Evaluation of Gadolinium's Action on Water Cherenkov Detector Systems with EGADS," Nucl. Instrum. Meth. A **959**, 163549 (2020).

[35] M. Tanaka *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Search for proton decay into three charged leptons in 0.37 megaton-years exposure of the Super-Kamiokande," Phys. Rev. D **101**, 052011 (2020).

[36] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Constraint on the Matter-Antimatter Symmetry-Violating Phase in Neutrino Oscillations," Nature, **580**, 339–344 (2020).

HSC 関連

[37] C. Hikage *et al.* [HSC Collaboration], "Cosmology from cosmic shear power spectra with Subaru Hyper Supreme-Cam first-year data," Publ. Astron. Soc. Jap. **71** (2), 43 (1-44) (2019).

[38] T. Namikawa *et al.* [POLARBEAR and HSC Collaborations], "Evidence for the Cross-correlation between Cosmic Microwave Background Polarization Lensing from POLARBEAR and Cosmic Shear from Subaru Hyper Suprime-Cam," Astrophys. J. **882**, 62 (2019).

[39] H. Aihara *et al.*, "Second Data Release of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program," Publ. Astron. Soc. Jap. **71** (6), 114 (2019).

[40] T. Hamana, M. Shirasaki, S. Miyazaki, C. Hikage, M. Oguri, S. More, R. Armstrong, A. Leauthaud, R. Mandelbaum, H. Miyatake, A. Nishizawa, M. Simet, M. Takada, H. Aihara, J. Bosch, Y. Komiyama, R. Lupton, H. Murayama, M. Strauss and M. Tanaka, "Cosmological constraints from cosmic shear two-point correlation functions with HSC survey first-year data," Publ. Astron. Soc. Jap. **72** (1), 16 (2020).

(会議抄録)

[41] M. Yokoyama, "Long-baseline neutrino experiments," PoS ICHEP **2018**, 696 (2019).

[42] G. Casarosa *et al.* [Belle-II SVD Collaboration], "Commissioning of the Belle II Silicon Vertex Detector," Nucl. Instrum. Meth. A **958**, 162184 (2020).

(学位論文)

修士論文

[43] Kohei Matsushita, "Improvement of timing performance of the WAGASCI neutrino detector," Jan. 2020.

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[44] Hiroaki Aihara, "Particle physics at the high energy frontier with the next electron-positron collider," The Tenth International Accelerator Conference, May 19–24, 2019, Melbourne, Australia.

[45] Masashi Yokoyama, “Hyper-Kamiokande,” 19th Lomonosov Conference, August 22–28, 2019, Moscow, Russia.

[46] Masashi Yokoyama, “Status of Hyper-Kamiokande,” KPS Pioneer Symposium, October 24, 2019, Kimdaejung Convention Center, Daegu, South Korea.

一般講演

[47] Konosuke Iwamoto, “ND280-Upgrade and the neutrino cross section measurements in T2K,” 2019 Joint Workshop of FKPPL and TYL/FJPPL, May 8-10, 2019, Seogwipo KAL Hotel, Jeju island, South Korea.

[48] Konosuke Iwamoto, “T2K Results and Plans,” Precision Investigations of the Neutrino Sector (PINS) 2019, July 14-17, 2019, SLAC National Accelerator Laboratory, USA.

(国内会議)

招待講演

[49] 相原博昭,「研究不正の背景と研究公正推進の課題」, 文部科学省 研究公正推進事業第 3 回研究公正シンポジウム, 2019 年 9 月 9 日, ホテルグランドアーク半蔵門

一般講演

[50] 江口碧,「位置感応型ゲルマニウム検出器の性能評価, 第 9 回高エネルギー物理春の学校」, 2019 年 5 月 17 日–19 日, 滋賀県大津市北小松 湖邸滋びわこクラブ

[51] 鞠谷温士,「ニュートリノ検出器 WAGASCI 用エレクトロニクスの性能試験, 第 9 回高エネルギー物理春の学校」, 同上

[52] 小川夏実,「10 MeV $\gamma$ 線の測定に向けた高分解能型 GAGG(Ce) シンチレーターの性能測定」, 同上

[53] 岩本康之介,「T2K 前置検出器アップグレードのための SuperFGD の飛跡再構成アルゴリズムによる性能評価」, 日本物理学会 2019 秋季大会, 2019 年 9 月 17 日–20 日, 山形大学　小白川キャンパス

[54] 小貫良行,「Belle II 実験時間依存 CP 解析のための Flavor specific hadronic 崩壊事象の研究」, Flavor Physics Workshop 2019, 2019 年 11 月 19 日–22 日, 大阪府冨田林市かんぽの宿

[55] 鞠谷温士,「T2K 実験での新型シンチレータ検出器 SuperFGD に用いる MPPC の大量試験システムの開発」, 第 26 回 ICEPP シンポジウム, 2020 年 2 月 16 日–19 日, 長野県, 志賀レークホテル

[56] 岩本康之介,「T2K 前置検出器アップグレードのための SuperFGD の飛跡再構成アルゴリズムによるミューオン検出効率の評価」, 2020 年 3 月 16 日–19 日, 名古屋大学

[57] 江口碧,「T2K 新型前置検出器 SuperFGD におけるシャワー再構成アルゴリズムを用いた電子識別効率の評価」, 同上

[58] 小川夏実,「SK-V におけるニュートリノ事象再構成性能の評価」, 同上

[59] 小貫良行,「Belle II 実験時間依存 CP 非保存解析のためのフレーバ固有 $B \to D^{(*)}\pi/\rho$ 崩壊事象の研究」, 同上

[60] 鞠谷温士,「T2K 実験での新型シンチレータ検出器 SuperFGD に用いる MPPC の大量試験システムの開発」, 同上

[61] Zhang Tingyu, “Study of resolution function for the Belle II experiment,” *ibid.*

[62] Wan Kun, “Reconstruction performance optimization of $B^0 \to K_S K_S K_S$ with Belle II MC data,” *ibid.*

(セミナー，その他)

[63] Masashi Yokoyama, “Status and future prospect of long baseline experiments with J-PARC neutrino beam and near detectors,” April 26, 2019, IHEP Protvino, Russia.

[64] Masashi Yokoyama, “Status and future prospect of long baseline experiments with J-PARC neutrino beam and near detectors,” April 25, 2019, Institute for Nuclear Research, Moscow, Russia.

[65] Masashi Yokoyama, “The Hyper-Kamiokande project,” May 28, 2019, University of Melbourne, Australia.

[66] Masashi Yokoyama, “Long baseline experiments with J-PARC neutrino beam,” May 29, 2019, University of Sydney, Australia.

[67] Masashi Yokoyama, “The Hyper-Kamiokande project,” May 31, 2019, University of Adelaide, Australia.

## 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 fb$^{-1}$ の実験データが得られ、



図 2.3.1: LHC 加速器

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。

超対称性は、力の統一を実現する上で鍵となる性質であり、LHC での発見が大いに期待されている。ヒッグス粒子の質量 125GeV をうけて、naturalness などを一部緩和し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. 電弱ゲージーノがウィーノ/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。

#### 電弱ゲージー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・ヒッ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。

### 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。なお、最新の情報や成果はテーブルトップ実験 web ページ `https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/` に掲載し、随時更新している。

#### ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却

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 (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。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。2021 年度までに Ps レーザー冷却を実現すべく、KEK 低速陽電子実験施設 (SPF) で実験を行っている。今年度は、陽電子輝度増強システム開発に向けた KEK 陽電子ビーム集束、Ps レーザー冷却に向けた Ps レーザー励起実験、冷却用レーザー開発、Ps-BEC 実現のための材料開発を行った。陽電子ビーム集束では、プロトタイプ磁気集束レンズを用いてビーム径を 20 mm から 2.6 mm に集束し、フラックスを 3.5 倍に高めることに成功した。Ps レーザー励起実験では、KEK-SPF に設置した実験装置 (図 2.3.2) において Ps の 1S-2P レーザー励起 (波長 243 nm) を行い、Ps・レーザー反射装置を用いることで 1S-2P 励起量を増大させることに成功した (図 2.3.3)。Ps 冷却レーザーシステムは五神研究室・工学系研究科吉岡研究室と共同で開発しており、Ps 冷却のために新しい光学システムを開発し、性能の定式化を行うとともに現状のプロトタイプ冷却レーザーでそのほぼ最大の性能を実現した。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。

#### オルソポジトロニウムの invisible 崩壊の探索

オルソポジトロニウム (o-Ps) は、余剰次元やミリチャージ粒子などの標準模型を超えた新しい物理現象が存在した場合、不可視 (invisible) 崩壊する可能性がある。例えば 1 TeV オーダーの余剰次元が存在した場合、invisible 崩壊分岐比は $10^{-7}$–$10^{-8}$ のオーダーになる。そこで $10^{-8}$ オーダーの分岐比で invisible 崩壊を探索する新しい実験セットアップを提案し、モンテカルロシミュレーションによるバックグラウンド評価を行った。具体的には半径 50 cm の液体キセノン球に円筒 CsI を埋め込んだセットアップ (図 2.3.4) を仮定し、崩壊 $\gamma$ 線 (511 keV) のすり抜けと、トリガー $\gamma$ 線 (1275 keV) の混入によるバックグラウンドについて抑えられることを示した。今後、詳

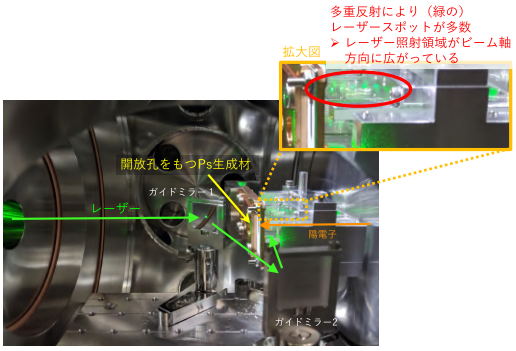



図 2.3.2: KEK-SPF における Ps レーザー励起実験セットアップ [123]。真空チャンバーへのレーザーの入射アラインメントにより反射装置でレーザーを多重反射させるかどうか選択できる。

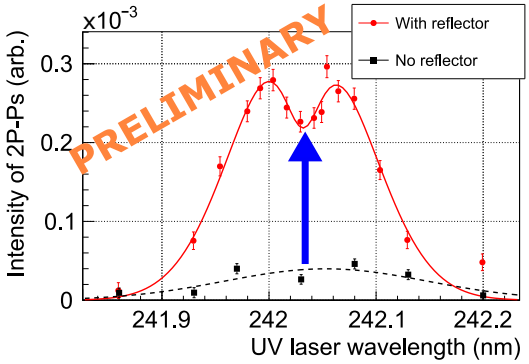



図 2.3.3: Ps の 1S-2P 遷移曲線 (Preliminary) [123]。四角は Ps・レーザー反射装置なし、丸は Ps・レーザー反射装置ありの測定結果。横軸は利用したレーザー装置の設定値 (較正前) であるが、較正後の遷移中心波長は Ps の Lyman-$\alpha$ 遷移波長と一致している。Ps・レーザー反射装置によって励起量が増大しており、反射装置ありで頂点がくぼんでいるのは反射装置ミラー間で対向する光が重なっていることによるラム・ディップである。

細な実験セットアップの設計と他のバックグラウンドの評価を行う。

### 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 (Observing VAcuum with Laser (OVAL) 実験)。図 2.3.5 に実験セットアップを示す。2017 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ており、今年度は 1 週間の長期安定測定の確立と新型磁石導入による 30 倍の感度向上を目指した準備を行った。来年度はこれらを用いた測定により世界最高感度と同程度の実験を行うとともに、将来的には実験の大型化や長期化、雑音減の理解によって真空複屈折の世界初観測を目指す。

### X 線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 X 線自由電子レーザー施設 SACLA を用いる。2017 年度のプロトタイプ実験を踏まえ、補償光学システムを導入してレーザーを集光することによりシグナルを増強するとともに X 線ビーム shaper を開発して BG を抑制することで感度を向上させ、2nd 実験 (図 2.3.6) を行った。0.6 TW の fs レーザーを 2 $\mu$m に集光し、13 $\mu$m の X 線自由電子レーザー (8.4 keV) との空間および時間アラインメントを行い、レーザー照射タイミングでスキャンすることでシグナルを測定した。暫定的な測定結果を図 2.3.7 に示す。現在詳細な解析を行っており、将来の真空回折観測へ向け、偏光子開発、500 TW レーザーを用いた実験、軟 X 線ビームラインを pump 光に用いた実験を検討している。

### 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。HP Dark Matter (HPDM) について、SIS 検出器を用いた理研の分子分光実験装置を使った場合に達成できる 0.9–1.1 meV の質量領域での到達予想感度を計算し、live time で 50 分間測定することで世界最高感度で探索可能であることを示した。

＜報文＞

(原著論文)

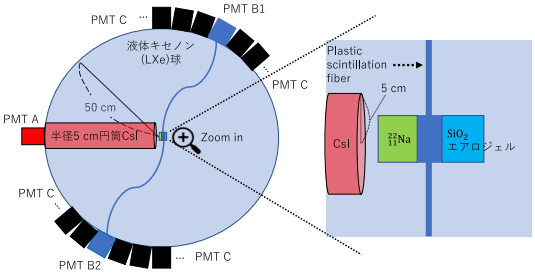



図 2.3.4: オルソポジトロニウムの invisible 崩壊探索のために提案した実験セットアップ [124]。

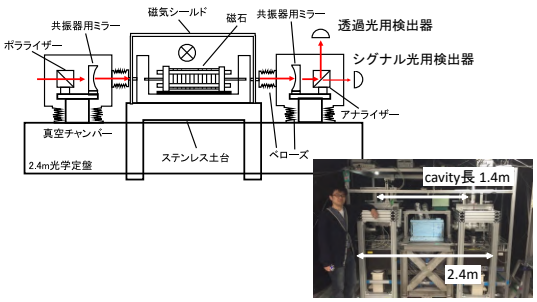



図 2.3.5: OVAL 実験セットアップ [126]。2.4 m の光学定盤で実験し、偏光子とミラーは真空中に封入、1.4 m の共振器の中央に磁石を 1 個設置している。磁石からの擾乱への対策が実験の鍵。

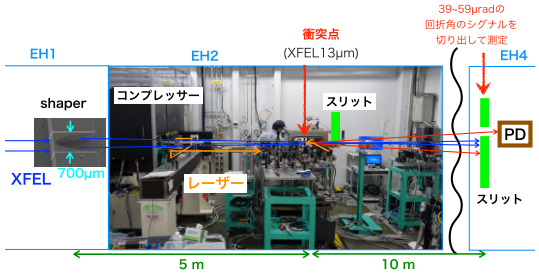



図 2.3.6: 真空回折探索実験セットアップ [120]。

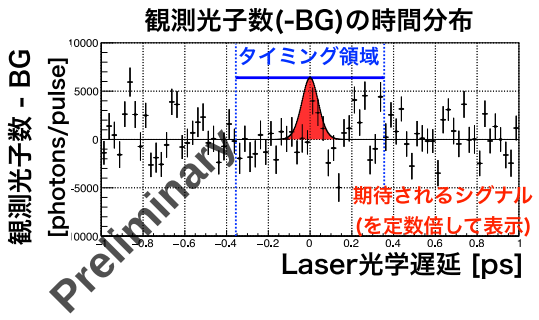



図 2.3.7: 真空回折探索 2nd 実験測定暫定結果 [120]。Preliminary 解析では有意なシグナルはなさそうである。


[1] M. Saito, R. Sawada, K. Terashi and S. Asai, "Discovery reach for wino and higgsino dark matter with a disappearing track signature at a 100 TeV *pp* collider," Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.6, 469

[2] S. Asai, S. Chigusa, T. Kaji, T. Moroi, M. Saito, R. Sawada, J. Tanaka, K. Terashi and K. Uno, "Studying gaugino masses in supersymmetric model at future 100 TeV *pp* collider," JHEP **05** (2019), 179

[3] CERN Yellow Rep. Monogr. **7** (2019), 585-865

[4] Y. Seino, T. Inada, T. Yamazaki, T. Namba and S. Asai, "New Estimation of the Curvature Effect for the X-ray Vacuum Diffraction Induced by an Intense Laser Field", arXiv:1912.01390 (2019).

The ATLAS Collaboration

[5] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.12, 1028

[6] Phys. Rev. C **100** (2019) no.6, 064901

[7] JHEP **12** (2019), 060

[8] JHEP **10** (2019), 203

[9] JINST **14** (2019) no.12, P12006

[10] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.12, 1017

[11] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.11, 935

[12] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.10, 847

[13] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.11, 970

[14] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.12, 985

[15] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.11, 901

[16] JINST **14** (2019) no.09, P09011

[17] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.10, 836

[18] Phys. Rev. D **100** (2019) no.5, 052011

[19] JHEP **09** (2019), 091

[20] Phys. Rev. D **100** (2019) no.5, 052013

[21] Phys. Rev. Lett. **123** (2019) no.16, 161801

[22] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.9, 803

[23] JHEP **10** (2019), 265

[24] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.8, 666

[25] Phys. Rev. D **100** (2019) no.3, 032007

[26] JHEP **10** (2019), 127

[27] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.10, 884

[28] JINST **14** (2019) no.06, P06012

[29] JHEP **11** (2019), 150

[30] Phys. Lett. B **798** (2019), 134942

[31] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.9, 760
[32] Phys. Rev. Lett. **122** (2019) no.23, 231801
[33] Phys. Rev. Lett. **123** (2019) no.5, 052001
[34] Phys. Lett. B **798** (2019), 134913
[35] Phys. Lett. B **798** (2019), 134949
[36] Phys. Lett. B **796** (2019), 68-87
[37] JHEP **05** (2019), 141
[38] JHEP **08** (2019), 033
[39] Phys. Lett. B **796** (2019), 230-252
[40] JHEP **05** (2019), 142
[41] Phys. Rev. D **99** (2019) no.9, 092004
[42] Phys. Rev. Lett. **123** (2019) no.4, 042001
[43] JHEP **06** (2019), 144
[44] JHEP **05** (2019), 088
[45] JHEP **04** (2019), 048
[46] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.6, 535
[47] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.8, 639
[48] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.6, 481
[49] Phys. Rev. D **99** (2019) no.9, 092007
[50] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.9, 733
[51] Phys. Lett. B **795** (2019), 56-75
[52] Phys. Rev. C **100** (2019) no.3, 034903
[53] JHEP **04** (2019), 093
[54] JHEP **07** (2019), 117
[55] Phys. Rev. D **99** (2019) no.7, 072009
[56] JHEP **05** (2019), 123
[57] Phys. Lett. B **793** (2019), 469-492
[58] JHEP **05** (2019), 041
[59] Phys. Rev. D **99** (2019) no.5, 052004
[60] Phys. Rev. D **100** (2019) no.1, 012006
[61] JHEP **05** (2019), 164
[62] JINST **14** (2019) no.03, P03017
[63] Phys. Rev. D **99** (2019) no.5, 052003
[64] JHEP **04** (2019), 098
[65] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.5, 382
[66] JHEP **04** (2019), 046
[67] Phys. Lett. **790** (2019), 595
[68] JHEP **05** (2019), 124
[69] Phys. Rev. D **99** (2019), 072001
[70] Phys. Rev. D **99** (2019) no.5, 052005
[71] JHEP **04** (2019), 092
[72] Phys. Rev. Lett. **122** (2019) no.15, 151801
[73] Phys. Rev. D **99** (2019) no.5, 052009
[74] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.2, 128
[75] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.3, 205
[76] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.4, 290
[77] JHEP **01** (2019), 016
[78] Phys. Lett. B **789** (2019), 167-190
[79] Phys. Lett. B **793** (2019), 499-519
[80] Phys. Rev. D **99** (2019) no.1, 012008
[81] Phys. Lett. B **789** (2019), 508-529
[82] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.5, 375
[83] Phys. Rev. D **99** (2019) no.1, 012009
[84] Phys. Lett. B **788** (2019), 96-116
[85] Phys. Rev. D **99** (2019) no.1, 012001
[86] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.1, 58
[87] Phys. Lett. B **788** (2019), 347-370
[88] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.2, 135
[89] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.2, 120
[90] Phys. Lett. B **789** (2019), 444-471
[91] Phys. Lett. B **790** (2019), 1-21
[92] Phys. Lett. B **790** (2019), 108-128
[93] JHEP **01** (2019), 030
[94] Phys. Lett. B **788** (2019), 316-335

FCC Collaboration

[95] Eur. Phys. J. ST **228** (2019) no.2, 261-623
[96] Eur. Phys. J. ST **228** (2019) no.4, 755-1107
[97] Eur. Phys. J. ST **228** (2019) no.5, 1109-1382
[98] Eur. Phys. J. C **79** (2019) no.6, 474

(国内雑誌)

[99] 周健治, “物質反物質非対称性探索を目指したポジトロニウムのレーザー冷却”, Photon Factory NEWS **37** No. 2 (2019)23–26.

(学位論文)

[100] 齊藤真彦, “Search for direct Chargino production based on a disappearing-track signature at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, 博士論文 (2019).

[101] 邱奕寰, “Search for the neutral heavy Higgs bosons decaying to hadronic ditau in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, 博士論文 (2019).

[102] 周健治, “Laser Excitation of Confined Positronium in Porous Materials for Rapid Cooling”, 博士論文 (2019).

[103] 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高速冷却光源の開発”, 修士論文 (2020).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[104] A. Ishida, “Recent progress towards positronium Bose-Einstein condensation”, 15th International Workshop on Positron Beam Techniques and Applications (SLOPOS-15), September 2, 2019, Prague, Czech Republic.

4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (JWPS 2019), October 31, 2019, Nara, Japan

[105] K. Yamada, “Development of cooling laser for positronium Bose-Einstein condensation”.

[106] K. Hashidate, “Development of focusing lens for high-density positron beam”.

[107] K. Shu, “Excitation of positronium by laser for efficient cooling”.

招待講演

[108] A. Ishida, “Experimental progress towards positronium Bose-Einstein condensation”, 8th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2019), August 26, 2019, Crete, Greece.

[109] A. Ishida, “Experimental progress towards positronium Bose-Einstein condensation”, 4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (JWPS 2019), October 31, 2019, Nara, Japan.

(国内会議)

一般講演

[110] 石田明, “ボース・アインシュタイン凝縮実現のためのポジトロニウム冷却”, 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」、2019 年 12 月 5 日、京都大学複合原子力科学研究所.

第 56 回アイソトープ・放射線研究発表会:東京大学弥生講堂:2019 年 7 月

[111] 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”.

[112] 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”.

[113] 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 III”.

日本物理学会秋季大会:岐阜大学:2019 年 9 月

[114] 石田明, “ボース・アインシュタイン凝縮を目指した高密度・低温ポジトロニウム生成”.

日本物理学会秋季大会:山形大学:2019 年 9 月

[115] 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”.

[116] 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”.

[117] 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”.

[118] 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”.

[119] 邱奕寰, “LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるハドロニックタウ粒子に崩壊する重い中性ヒッグス粒子の探索”

日本物理学会:第 75 回年次大会:名古屋大学 (現地開催中止):2020 年 3 月

[120] 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”.

[121] 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 I”.

[122] 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”.

[123] 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 III”.

[124] 水原慎一, “液体キセノン検出器を用いたオルソポジトロニウムのインビジブル崩壊の探索実験の提案”.

[125] 成田佳奈香, “ミリ波領域における Hidden Photon Dark Matter の探索”.

[126] 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”.

ポスター

[127] 周健治, “高速レーザー冷却を目指したポジトロニウムのレーザー励起”, 2019 年度量子ビームサイエンスフェスタ、2020 年 3 月 14 日、ザ・ヒロサワ・シティ会館、茨城 (中止、発表成立).

# 3　物性理論

## 3.1　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)、トポロジカル物質、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、巨大応答の熱電物質、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。

### 3.1.1　ディラック電子系

#### 物質中の量子電磁力学

ビスマス、グラフェン、ワイル半金属などは、ディラックハミルトニアン、あるいは質量ゼロのワイルハミルトニアンによって記述される。ところが、自然なカットオフをもつディラックハミルトニアンにおいて久保公式に基づいて電磁応答を計算すると、ゲージ不変性が破れてしまうという困難に直面する。たとえば、正常状態でもマイスナー電流が存在するといった非物理的な結果が得られる。この問題に対し、従来の計算では見落とされていた異常交換関係と呼ばれる寄与に着目することによって根本的な解決に導いた。この異常交換関係に対応して反磁性電流の寄与があることが分かり、これによって理論のゲージ不変性が回復することを示した。[32, 51, 56]

#### 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を取り入れた場合、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。我々はこの不純物の効果によりワイル半金属で起こ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。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は温度の三乗から二乗へ変化することが分かった。また、スケーリング則によると $1/T_1T$ 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。(図 3.1.1)[6, 33]

#### 高磁場領域でのディラック電子系の熱電輸送係数

ギャップがある場合と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、ゼーベック係数・ネルンスト係数を調べた。その結果、モット公式と Wiedemann-Franz 則が成り立つことが示された。また電気伝導度はギャップの有無に関わらず定性的な変化は無いが、ゼーベック係数・ネルンスト係数については、この有無が大きな違いを与えることが分かった。[3, 30, 41, 53]

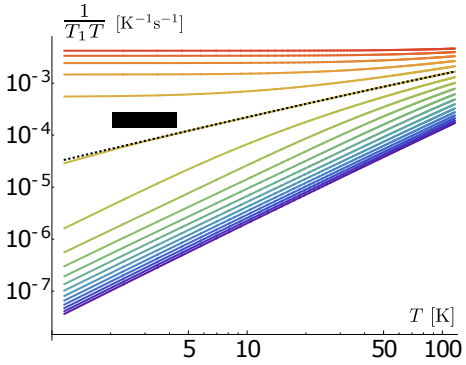



図 3.1.1: 自己無撞着ボルン近似によって計算された乱れたワイル半金属の $1/T_1T$ の温度依存性。$W_c$ は臨界点における不純物散乱強度を表す。

### 3.1.2　熱応答・熱電応答の理論

#### Sommerfeld-Bethe 関係式の成立範囲

ゼーベック係数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、我々は、この関係式の成立範囲を一般的な線形応答の理論の枠組みに基づいて調べた。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と期待される。[1, 45, 46, 49, 81]

#### 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、近藤絶縁体 $FeSb_2$ 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。これは銅や金などの金属に比べ 3 桁近く大きく、その起源が注目されている。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しかなかった。そこで、不純物バンドを適切に扱う自己無撞着 $t$-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、実験でみ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。[2, 28, 47, 77, 79, 85, 86]

#### 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 BEC 的あるいは BCS 的に凝縮した状態はエキシトニック

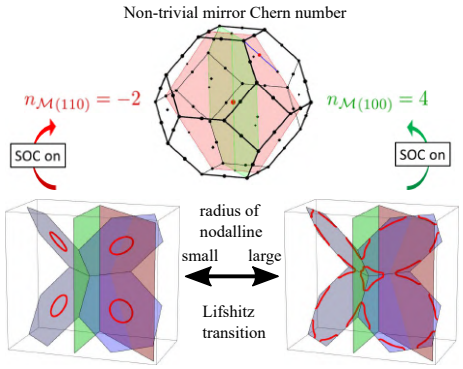



図 3.1.2: ノーダルラインの経路とミラーチャーン数の関係

絶縁体と呼ばれる。候補物質である $TmSe_{0.45}Te_{0.55}$ において低温での熱伝導率の増大が報告されているが、これをエキシトンによるものと考えて熱伝導率の計算を行った。Sommerfeld-Bethe 関係式が成立すると特異な振る舞いは説明できないが、先行研究とは異なる方法で相互作用を取り入れることで、熱流演算子に Sommerfeld-Bethe 関係式を破る寄与が現れることが分かった。この寄与によってエキシトニック絶縁体の熱伝導率が転移温度以下で増大し得ることを示した。[25, 62, 72]

### 3.1.3 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をもつ系が注目されている。そのような物質の探索においては、空間反転固有値から計算される $Z_2$ 指数や、それを一般の空間群に拡張した対称性指標を用いた方法が提案されている。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 SnSe、$Ca_2As$ など)。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、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対応関係を見出した。さらに面心立方格子において、この対応関係を用いることで、対称性指標など従来の手法では判別できない相を区別できると示した。(図 3.1.2) [14, 15, 87]

#### 磁気スカーミオン結晶におけるマグノンエッジ状態の磁場制御

磁気スカーミオンは整数トポロジカル電荷によって特徴づけられる渦状のスピン構造を持つ。この系は低磁場下で六回回転対称性を持つが、我々はこのスカーミオン結晶におけるマグノンバンドのトポロジカルな性質を調べた。スカーミオン結晶固有の励起モードとして回転モードとブリージングモードがあるが、外部磁場によってこれらのモードのエネルギーは変化し、高磁場でトポロジカル相転移を伴うバンド反転が起きることがわかった。これを用いれば、外部磁場によりトポロジカルに保護されるエッジ流の制御ができる可能性がある。[10]

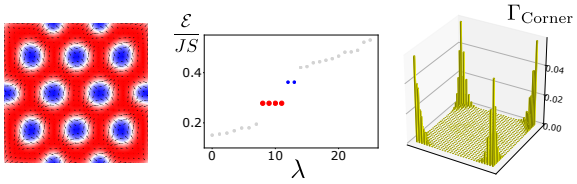



図 3.1.3: 左) 有限系でのスカーミオン結晶の古典スピン基底状態。半月型の分数スカーミオンが端で安定化している。中央) マグノンのエネルギースペクトル。右) コーナー状態波動関数の実空間確率分布。

#### 分数スカーミオンによって現れるマグノンのコーナー状態

DM 相互作用を持つ強磁性体は有限系において端の不安定性を持つことが知られ、その結果として起きる端からのスカーミオンの形成が実験的に確認されている。本研究ではこれまで強磁性相でのみ議論されてきた端の不安定性に着目し、スカーミオン結晶相で端の不安定性によって生じるスピン構造の変化とそのマグノン励起の研究を行った。その結果、低磁場で半月型のスカーミオン (分数スカーミオン) が端に安定化することを見出した (図 3.1.3)。さらに、分数スカーミオンが安定化することでバンドギャップ中にコーナーに局在するマグノンモードが現れることを明らかにした。[39, 61]

#### 二層スカーミオンにおけるトポロジカル電荷双極子によるスピン波放射

磁気スカーミオンの回転モードは一様な振動磁場によって励起されるため、強磁性体中でスピン波の発生源として用いることができる。我々は回転モードの向きがトポロジカル電荷によって異なることを利用し、逆符号のトポロジカル電荷を持つスカーミオンとアンチスカーミオンの重ね合わせによってスピン波を増強できることを明らかにした。放出されるスピン波の波状はトポロジカル電荷のつくる双極子放射と解釈することができる。上記の成果から、二層スカーミオン系をスピン波を放射するアンテナとして用いることができると提案した。[11]

#### 軌道–ゼーマン交差帯磁率の量子化

磁気応答として軌道効果とゼーマン効果がよく知られているが、一般にはそれらの交差項 (以下、軌道–Zeeman 交差項) も存在する。軌道–ゼーマン交差項に対する表式を微視的に調べると、この交差項は物質の Berry 曲率を反映し、特に 2 次元のトポロジカル絶縁体では普遍的な値に量子化されることが分

かった。この量子化は、トポロジカル絶縁体に特有のカイラルエッジ状態が、磁場の影響によって再配置されることに起因している。トポロジカル相転移に伴って交差項の値はジャンプするので、トポロジカル相転移のバルク量による検出ができると考えられる。[26, 36, 40, 42, 43, 63, 74]

### 3.1.4 高温超伝導の理論

#### T′ 型銅酸化物超伝導体の超伝導転移

T′ 型銅酸化物超伝導体では、ホールではなく電子がドープされて超伝導となる。最近、T′ 型において適切かつ十分に試料の還元処理を行うと、低電子密度領域においても超伝導が見られるという報告がなされた。我々は、T′ 型では電荷移動ギャップ $\Delta$ が小さいとして、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、揺らぎ交換近似（FLEX）で超伝導を調べた。その結果、過剰酸素が除去されれば $\Delta$ が小さくなり、超伝導転移が広い範囲で生じることを見出した。[7]

#### モットギャップを超える励起による絶縁体-導体転移

最近、モット絶縁体に光を当てることによって絶縁体-導体の相転移を引き起こす実験がなされている。基底状態では電子の二重占有状態とホールの状態が束縛状態を形成して絶縁体となっているが、光励起によって自由な二重占有状態が生じたと考えられる。このことを調べるために、二重占有状態の密度が一定値以上になるように固定した変分法を開発して調べた。その結果、実験と比較できるような金属状態が実現することが分かった。[22, 37, 65]

### 3.1.5 有機伝導体

#### 量子スピン液体候補物質 HCat の低温熱伝導率

$\kappa$-$H_3$(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結びついた物資であり、低温で量子スピン液体状態が実現していると言われている。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ノン励起とフォノン間の相互作用を考慮して熱伝導度を調べた。その結果、温度依存性や実験を再現する結合定数がスピノンフォノン相互作用と矛盾しないことが分かった。

#### Floquet 理論を用いた光誘起相転移の理論研究

近年、フロケ理論を用いた光誘起トポロジカル相転移が注目を集めている。我々は $\alpha$-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ における傾いた Dirac cone に対して円偏光レーザーを照射したときの振舞いをフロケ理論を用いて解析した。その結果、円偏光レーザーによって Dirac cone にギャップが開き、各バンドがノンゼロな Chern 数を獲得することを予言した。レーザー照射の振幅と振動数の相図上では、Chern 絶縁体の他に普通の絶縁体や半金属などが現れることがわかった。これはグラフェンでは現れなかった相である。[17, 35, 64, 73, 75]

### 3.1.6 ボロフェン関連物質

近年、2 次元単原子層物質が、特異な物理的性質とその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。ホウ素を用いたボロフェンは、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。最近、水素化ボロフェン単原子シートが作られるようになり、この電子状態を調べた。その結果、水素化ボロフェンは、半金属であり、ホールは $MgB_2$ のホウ素の性質に近いことが分かった。また非共型 (nonsymmorphic) な空間群に属する 2 次元ホウ素シートについても解析を行い、その結果、ノーダルラインが生じる場合があることが分かった。この有無は $\Gamma$ 点のバンドの性質のみから判別できることを示した。[16, 18]

### 3.1.7 スピン系およびスピン軌道相互作用

#### 磁気モノポール系での磁化過程とスピン液体状態

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古典スピン液体が出現する。励起状態は、「ガウス則」という局所保存則が働くモノポールであり、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実現することがわかっている。我々は、磁気モノポールの密度依存性を調べるために、カゴメ格子上およびチェッカーボード格子上の $J_1$-$J_2$-$J_3$ イジング模型の磁化過程を議論イした。その結果、有限磁場中でプラトーとして表れる新しい古典スピン液体状態を見出した。[8, 9, 24, 38]

#### カイラル磁性体 $CsCuCl_3$ 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 $CsCuCl_3$ において高圧下で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、縦熱伝導度の磁気構造依存性を調べた。マグノンの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と Boltzmann 方程式と組み合わせることにより熱伝導度テンソルを求めた。その結果、実験と整合する結果を得ることが出来た。[31]

#### 希土類パイロクロア化合物における多極子スピン液体相の検出理論

希土類パイロクロア化合物は、3 次元的なフラストレーションと多極子自由度の絡み合いにより多彩な物理現象が発現する。中でも $Pr_2Zr_2O_7$ は U(1) 量子スピン液体状態が低温で実現しているとされる。この系では、四重極子自由度があるために、スピン液体相のほかに 3 種類の多極子秩序相の発現の可能性がある。そこで、対称性に基づいて磁歪の表式を導き、各相に対して磁歪の磁場依存性を解析することで U(1) スピン液体相の場合のみ特異な振る舞いを見せることを発見した。[12, 58, 71] さらに基底状態が

二重項である Ce,Nd 系に拡張し、磁歪の磁場依存性が 2 種類の相で大きく異なることを示した。[13]

＜報文＞

(原著論文)


[1] M. Ogata and H. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 074703-1-10 (2019). “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: J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 074601 (2019). “Effect of Phonon Drag on Seebeck Coefficient Based on Linear Response Theory: Application to $FeSb_2$” (selected as Editors’ Choice)

[3] V. Könye and M. Ogata: Phys. Rev. B **100**, 155430 (2019). “Thermoelectric transport coefficients of a Dirac electron gas in high magnetic field”

[4] Y. Suzumura, T. Tsumuraya, R. Kato, H. Matsuura, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 124704 (2019). “Role of Velocity Field and Principal Axis of Tilted Dirac Cones in Effective Hamiltonian of Non-Coplanar Nodal Loop”

[5] H. Maebashi, T. Hirosawa, M. Ogata, and H. Fukuyama: J. Phys. Chem. Solids **128**, 138 (2019). “Nuclear Magnetic Relaxation and Knight Shift Due to Orbital Interaction in Dirac Electron Systems”

[6] T. Hirosawa, H. Maebashi, and M. Ogata: Phys. Rev. B **101**, 155103 (2020). “Nuclear spin relaxation rate near the disorder-driven quantum critical point in Weyl fermion systems”

[7] K. Yamazaki, H. Tsuchiura, T. Yoshioka, M. Ogata: preprint. “Theoretical study of a possible superconducting transition near half-filling in T′-structure cuprates”

[8] K. Tokushuku, T. Mizoguchi, M. Udagawa: arXiv: 2003.03594 “Field-selective classical spin liquid and magnetization plateaus on kagome lattice”

[9] K. Tokushuku, T. Mizoguchi and M. Udagawa: Phys. Rev. B **100**, 034415 (2019). “Trimer classical spin liquid from interacting fractional charges”

[10] S. A. Díaz, T. Hirosawa, J. Klinovaja and D. Loss: Phys. Rev. Research **2**, 013231 (2020). “Chiral magnonic edge states in ferromagnetic skyrmion crystals controlled by magnetic fields”

[11] S. A. Díaz, T. Hirosawa, D. Loss, and C. Psaroudaki: arXiv:2002.12282 (2020). “Spin Wave Radiation by a Topological Charge Dipole”

[12] A.S. Patri, M. Hosoi, S. Lee, and Y.B. Kim, arXiv: 1912.04291 (2019). “Probing multipolar quantum spin ice in pyrochlore materials”

[13] A.S. Patri, M. Hosoi, and Y.B. Kim, arXiv: 2001.02685 (2020). “Contrasting magnetostriction signatures in dipolar-octupolar quantum spin ice”

[14] I. Tateishi: arXiv:2004.02160 (2020). “Mapping rules from Nodal Line Semimetal to Topological Crystalline Insulator in Face centered Cubic Lattice”

[15] I. Tateishi: arXiv:2004.02161 (2020). “Nodal Lines and Mapping rule to Mirror Chern numbers in $Ca_2As$ Family”

[16] N. T. Cuong, I. Tateishi, M. Cameau, M. Niibe, N. Umezawa, B. Slater, K. Yubuta, T. Kondo, M. Ogata, S. Okada, and I. Matsuda: to appear in Phys. Rev. B. “Topological Dirac nodal loops in nonsymmorphic hydrogenated monolayer boron”

[17] K. Kitayama, M. Mochizuki: preprint. “Predicted Photo-Induced Topological Phses in Organic Salt $\alpha$-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$”

[18] I. Tateishi, et al., Phys. Rev. Materials **3**, 024004 (2019). “Semi-metallicity of free-standing hydrogenated monolayer boron from $MgB_2$”

[19] Y. Togawa, et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 017204 (2019). “Anomalous Temperature Behavior of the Chiral Spin Helix in $CrNb_3S_6$ Thin Lamellae”

[20] M. Hosoi, T. Mizoguchi, T. Hinokihara, H. Matsuura, and M. Ogata: submitted to J. Phys. Soc. Jpn.. “Dzyaloshinskii-Moriya Interaction between Multipolar Moments in $5d^1$ Systems”


(会議抄録)


[21] H. Yokoyama, R. Sato, K. Kobayashi, T. Watanabe, M. Ogata: JPS-conf-proc **30**, 011003 (2020). “Metallization of Mott Insulators through Percolation in Partially Filled Impurity Hubbard Model”

[22] H. Yokoyama, K. Kobayashi, T. Watanabe, M. Ogata: to appear in J. Phys. Conf. Ser., “Insulator-to-superconductor transition by exciting half-filled d-wave pairing statebeyond Mott gap”

[23] S. Fukuda, K. Yamazaki, H. Tsuchiura, and M. Ogata, J. Phys.: Conf. Ser. **1293**, 012026 (2019). “The coexisting state of the staggered flux and d-wave superconducting order in a $t$-$J$ type model”


(学位論文)


[24] 徳宿邦夫：“Field-induced novel classical spin liquids in frustrated systems” (フラストレート系における磁場に誘起された新奇なスピン液体) (東京大学大学院理学系研究科・博士論文)

[25] 寶田真太：“エキシトニック絶縁体の熱伝導率に関する理論的研究” (Theoretical study on thermal conductivity in excitonic insulators) (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)

[26] 尾崎壮駿：“2 次元絶縁体おける軌道-ゼーマン交差帯磁率の量子化” (Quantization of orbital-Zeeman cross magnetic susceptibility in two-dimensional insulators) (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)


＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[27] H. Matsuura, International Workshop Dzyaloshinskii-Moriya Interaction and Exotic Spin Structures (Petrozavodsk, Russia, July 8–12, 2019). “Theory of Magnetic Phase Diagram in Chiral Magnet $CsCuCl_3$ under High Pressures”

[28] H. Matsuura, H. Maebashi, M. Ogata, and H. Fukuyama: International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2019) (Okayama, September 23–28, 2019). “Phonon-Drag Thermoelectric Effects in $FeSb_2$ Based on Linear Response Theory”

[29] H. Yokoyama, R. Sato, K. Kobayashi, T. Watanabe, M. Ogata: SCES 2019. “Metallization of Mott Insulators through Percolation in Partially Filled Impurity Hubbard Model”

[30] V. Könye and M. Ogata: Gordon Research Conference (Hong Kong, China, June 16–21, 2019) “Thermal transport coefficients of a Dirac electron gas in high magnetic fields”

[31] M. Hosoi, H. Matsuura, M. Ogata: JSPS Core-to-Core Program International meeting: (Jaca, Spain, September 2-6, 2019). “The magnetic phase diagram of $CsCuCl_3$ under high pressure and its thermal transport properties”

[32] H. Maebashi and M. Ogata: International Conference on Topological Materials Science (TopoMat2019) (Kyoto, December 3–7, 2019) “Diamagnetic Currents in Weyl Systems”

[33] T. Hirosawa, H. Maebashi, and M. Ogata: TopoMat2019. “Nuclear spin lattice relaxation rate near the disorder driven quantum critical point (QCP) in Weyl fermion systems”

[34] V. Könye and M. Ogata: TopoMat2019. “Nodal line semimetals in a magnetic field”

[35] K. Kitayama, M. Mochizuki: TopoMat2019. “Theoretical study of photo-induced phase transition in $\alpha$-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ using Floquet theory”

[36] S. Ozaki and M. Ogata: TopoMat2019. “Magnetic Susceptibility Quantization of Orbital-Zeeman Cross term in 2D Insulators”

[37] H. Yokoyama, K. Kobayashi, T. Watanabe, M. Ogata: International Symposium on Superconductivity (ISS 2019), (Kyoto, December 3–5, 2019) “Variational Monte Carlo Study of Excited States in Strongly Correlated Hubbard Model”

[38] K. Tokushuku, T. Mizoguchi and M. Udagawa: LOMA Theory Day (Bordeaux, France,July 2019). “Interacting fractional charge and magnetic field induced trimer classical spin liquid”

[39] T. Hirosawa, S. A. Díaz, J. Klinovaja, and D. Loss: 9th NCCR QSIT Winter School (Ferbruary 3-5, 2020). “Magnonic corner modes stabilized by fractional skyrmions”

[40] S. Ozaki and M. Ogata: CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials (Tokyo, May 22–24, 2019). “Berry Curvature Contribution to Magnetization in a Honeycomb Lattice Model”

[41] V. Könye and M. Ogata: New Trends in Topological Insulators 2019, (Hiroshima, July 14–19, 2019). “Thermal transport coefficients of a Dirac electron gas in high magnetic fields”

[42] S. Ozaki and M. Ogata: New Trends in Topological Insulators 2019, “Berry Curvature Contribution to Magnetization in a Honeycomb Lattice Model”

[43] S. Ozaki and M. Ogata: Recent Progress in Graphene and 2D Materials Research (Matsue, October 6–10, 2019). “Berry Curvature Contribution to Magnetization in a Honeycomb Lattice Model”

[44] S. Fukuda, K. Yamazaki, H. Tsuchiura, and M. Ogata: SNS2019 (Tokyo, June 16–21, 2019) “The staggered flux state with nematic charge-density order for the pseudogap phenomena”

招待講演

[45] M. Ogata: The 2019 Spring Meeting of the European Materials Research Society (E-MRS) (Nice, France, May 27–31, 2019). “Effect of Phonon Drag on Seebeck Coefficient Based on Linear Response Theory: Application to $FeSb_2$”

[46] M. Ogata: Materials Research Meeting 2019 (MRS-J) (Yokohama, December 10–14, 2019). “Effect of Phonon Drag on Seebeck Coefficient Based on Linear Response Theory: Application to $FeSb_2$”

[47] H. Matsuura: Swiss-Japan Bilateral workshop, Trend in Theory of Correlated Materials (Kyoto, October 7–9, 2019). “Effect of Phonon Drag on Seebeck Coefficient Based on Linear Response Theory: Application to $FeSb_2$”

(国内会議)

一般講演

[48] 小形正男、松浦弘泰、立石幾真：日本物理学会、岐阜大学 2019, 9.10–9.13 (秋季大会) “ノーダルライン物質の物性”

[49] 福山秀敏、小形正男：日本物理学会、岐阜大学 “ゼーベック係数へのフェーゾン・ドラッグ効果”

[50] 松浦弘泰、前橋英明、小形正男、福山秀敏： 日本物理学会、岐阜大学 “ビスマスにおける巨大ネルンスト効果の理論的研究”

[51] 前橋英明、小形正男：日本物理学会、岐阜大学 “ディラック電子系の電磁応答に対するゲージ不変な定式化”

[52] 田中康寛、小形正男：日本物理学会、岐阜大学 “有機導体 $\alpha$-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ における電子相関効果と温度圧力相図”

[53] Viktor Könye and Masao Ogata：日本物理学会、岐阜大学 “Thermoelectric transport coefficients of a Dirac electron gas in high magnetic fields”

[54] 宮藤大輔、松浦弘泰、小形正男：日本物理学会、岐阜大学 “擬一次元有機錯体 HMTSF-TCNQ の軌道磁性に関する理論的研究”

[55] 徳宿邦夫、溝口知成、宇田川将文：日本物理学会、岐阜大学 “パイロクロア格子上の Valence Bond Crystal 相に ドープされたホールのダイナミクス”

[56] 前橋英明、広沢智紀、小形正男、福山秀敏：日本物理学会、名古屋大学 2020, 3.16–3.19 (年次大会). “質量のない擬二次元ディラック電子系の軌道電流に起因する核磁気緩和”

[57] 徳宿邦夫、松浦弘泰、Viktor Könye、小形正男：日本物理学会、名古屋大学 “金属有機構造体における酸素吸着に誘起されたスピンアイス状態と磁化の温度依存性の理論的研究”

[58] A. S. Patri, M. Hosoi, S. Lee, and Y. B. Kim: 日本物理学会、名古屋大学 “希土類パイロクロア酸化物における多極子磁性の検出理論”

[59] 宮藤大輔、松浦弘泰、小形正男：日本物理学会、名古屋大学 “擬一次元有機錯体 HMTSF-TCNQ の異常物性の理論的研究”

[60] Viktor Könye, Hiroyasu Matsuura, Ikuma Tateishi, and Masao Ogata：日本物理学会、名古屋大学 “Nodal Line Semimetal in a Magnetic Field”

[61] 広沢智紀, Sebastián A. Díaz, Jelena Klinovaja, and Daniel Loss：日本物理学会、名古屋大学 “有限系における分数スカーミオンとマグノン励起の研究”

[62] 寶田真太、小形正男、松浦弘泰：日本物理学会、名古屋大学 “エキシトニック絶縁体の熱伝導率に関する理論的研究”

[63] 尾崎壮駿、小形正男：日本物理学会、名古屋大学 “軌道ーゼーマン交差帯磁率の量子化の理論とトポロジカル絶縁体に対するその応用”

[64] 北山圭亮、望月維人：日本物理学会、名古屋大学 “Floquet 理論を用いた $\alpha$-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ の光誘起トポロジカル相転移の理論研究”

[65] 横山寿敏、小林憲司、渡邉努。小形正男：日本物理学会、名古屋大学 “モットギャップを超える励起による半充填状態の絶縁体-導体転移”

[66] 小林憲司、横山寿敏、渡邉努、小形正男：日本物理学会、名古屋大学 “強相関ハバード模型における電荷とスピンの局所相関の効果と磁気ポーラロン形成の可能性”

[67] 福田周平、山崎国人、土浦宏紀、小形正男：日本物理学会、名古屋大学 “交替フラックスとｄは超伝導の共存相における４回対称性の破れた電荷秩序”

[68] 松浦弘泰、徳宿邦夫、Viktor Könye, 小形正男：有機固体若手の会 2019 冬の学校、伊東 2019, 12.5–6. “金属有機複合骨格磁性体における磁気ガス応答の理論的研究” (ポスター発表賞)

[69] 前橋英明、小形正男：第 13 回物性科学領域横断研究会、東京大学 2019, 11.27–11.28 “ディラック電子系の反磁性電流”

[70] V. Könye and M. Ogata: 第 13 回物性科学領域横断研究会 “Nodal line semimetals in a magnetic field”

[71] A. S. Patri, M. Hosoi, S. Lee, and Y. B. Kim: J-Physics 多極子伝導系の物理 神戸大学 2020, 1.6–9 “パイロクロア結晶における多極子秩序の検出理論”

[72] 寶田真太：第 64 回物性若手夏の学校ぎふ長良川温泉ホテルパーク “エキシトニック絶縁体の熱伝導率について”

[73] 北山圭亮、望月維人：第 64 回物性若手夏の学校、“$\alpha$-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ の光誘起トポロジカル相転移”

[74] 尾崎壮駿、小形正男：第 13 回物性科学領域横断研究会、東京大学 2019, 11.27–28 “2 次元絶縁体における軌道ーゼーマン交差帯磁率の量子化”

[75] 北山圭亮、望月維人：第 13 回物性科学領域横断研究会 “Floquet 理論を用いた $\alpha$-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ の光誘起相転移の理論研究”

招待講演

[76] 小形正男：日本物理学会、岐阜大学 2019, 9.10–9.13 (秋季大会) 領域７, ８一般シンポジウム「熱電応答の最近の進展」“はじめに”

[77] 松浦弘泰：日本物理学会、岐阜大学 シンポジウム「熱電応答の最近の進展」“$FeSb_2$ での巨大熱電効果：理論”

[78] 松浦弘泰：第 29 回日本 MRS 年次大会 (横浜情報文化センター 2019,11.27-29). “ジャロシンスキー・守谷相互作用の微視的導出と関連現象の理論的研究”

[79] 松浦弘泰：熱電変換材料の科学と工学の新展開.(東京理科大学 森戸記念館 2019, 12.25). “フォノンドラッグによる熱電効果の線形応答理論：$FeSb_2$ への応用”

[80] 前橋英明：分子研研究会「有機ディラック電子系におけるトポロジカル現象と新奇物性開拓」、分子科学研究所 2019, 8.8–8.10 “ディラック, ワイル, トポロジカル物質の軌道電流に起因する核磁気緩和率”

[81] 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・ベーテの関係式について”

[82] 松浦弘泰：熱電研究の新展開ワークショップ “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”

[83] 松浦弘泰：科研費合同研究会指宿 2019, 12.20–22. “バレンススキップに由来した電荷近藤効果と超伝導”

[84] 小形正男：科研費合同研究会、指宿 “モット絶縁体から見た銅酸化物超伝導の理解と問題点”

(セミナー)

[85] 松浦弘泰：東京理科大学山本研究室セミナー (熱海第一ビル, 2020,1 6). “フォノンドラックによる熱電効果の線形応答理論”

[86] H. Matsuura Seminar in Max Planck Institute, Stuttgart (2020, Feb.27). “Phonon-Drag Thermoelectric Effects in $FeSb_2$ Based on Linear Response”

[87] Ikuma Tateishi: Condensed Matter Theory Seminar, University of Cologne, May 31, 2019. “The topological phase classification based on the shape of nodal lines”

## 3.2 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、物性物理学および物質科学の基礎研究を行っている。

2019 年度の主要な研究テーマは、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査手法の開発、遅い物理現象を取り扱うシミュレーション手法の開発、電子相関を正しく考慮した新しい第一原理電子状態計算手法の開発、超伝導転移温度の第一原理計算手法の開発、物質の光励起と光加工、水素を含む新物質と物性の理論予測などである。

### 3.2.1 データ同化を用いた結晶構造探索: 一部元素が無秩序化した系への応用

結晶構造は、他の物性や物理化学現象を解析するにあたって出発点となる重要な情報である。これまでに X 線、中性子線及び電子回折法などの実験的手法を用いた解析により多くの結晶構造が推定されてきたが、高温高圧下といった極限状態における材料合成や材料の機能化のための複雑な組成等が原因で、近年、実験的手法のみでは構造推定が困難な材料系が数多くみられる。このような材料推定が困難な原因の 1 つとして、材料内の特定元素の無秩序化、すなわち、特定の元素が単位胞内の複数のサイトや配置を部分的に占めていたり、2 成分が一定の確率で同じサイトを占めているといった状態が挙げられる。

当研究室では、これまでに ∼100 原子程度の系について、不完全な粉末回折実験データより定義されたペナルティ関数と従来の原子間ポテンシャルを組み合わせた分子動力学計算により高い成功率で結晶構造を予想することに成功してきた。また原子間力ポテンシャルとペナルティ関数を足し合わせず、その勾配を利用して独立に取り扱うことで、局所安定解を避けながら構造探索する手法を開発してきた [2, 10]。ところがこれらの手法を用いて、上記のような無秩序化を考慮して結晶構造を一意に決定するには、典型的には数百原子以上を含む大きな単位胞を必要とする。また、小さい単位胞を利用して決定するにも、無秩序化を表現するための多数の原子配置を網羅する必要があり、長時間のサンプリングが必要と考えられる。そこで本年度は、このような特定元素が無秩序化した未知結晶構造を推定するため、系の平均的な回折パターンの効率的サンプリングについて検討した。また、数百原子以上の比較的大きい単位胞での解析のため、ニューラルネットポテンシャルとこの手法を組み合わせテスト計算を行った。

### 3.2.2 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。明石と Nagornov はこのような探索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、オープンソースコードとして公開した。例として炭化水素鎖およびアルゴン固体相に適用し、原子が集団で協調的に動く非自明な構造変化経路を生成することに成功した [3]。また開発コード”AtomREM”を公開した [14]。

### 3.2.3 スピンゆらぎ効果を考慮した超伝導密度汎関数理論

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効果を取り入れる拡張手法が提案された (Essenberger et al, 2014)。日詰らはこの手法を物性研究所との共同研究で開発してきた SCDFT のプログラムに実装し、遷移金属単体 V, Nb, Al に応用することにより、強磁性スピンゆらぎがその物質の価電子の局在性に応じて転移温度を抑制することを見出した。

### 3.2.4 逆コーン・シャム法の応用

密度汎関数法 (コーン・シャム法) では, エネルギー密度汎関数から、それぞれの系に適用可能な有効ポテンシャルを計算し、その中の 1 粒子状態を計算することで、系の密度を導く。一方で、実験や波動関数理論を用いて密度が得られた場合に、有効ポテンシャルを導く逆問題の手法として、逆コーン・シャム法という手法が知られている。しかし、逆コーン・シャム法で得られる有効ポテンシャルは導くために用いた系のみに適用可能であり、導いた有効ポテンシャルには汎用性がないため、逆コーン・シャム法は殆ど使われていなかった。

内藤らは、逆コーン・シャム法で得られた有効ポテンシャルと密度汎関数接道理論 (DFPT) を用いて、既知の汎関数の精度を改善する手法 “IKS-DFPT” を提唱し、ベンチマーク計算で実際に精度が改善することを示した [4]。この改善された汎関数は,、通常のコーン・シャム法に適用可能であるため、原理的にはすべての物質の計算にもちいることができる.

### 3.2.5 Floquet 系における基底状態の定義

レーザーのような周期的な外場に駆動された電子の状態は Floquet 理論によって記述される。このような系を議論する原理的問題として固有状態の順番

付けの問題が古くから知られる。時間依存項を持たないハミルトニアンの固有状態のエネルギーは変分原理により最小値を持つ。このエネルギーの値により基底状態、第一励起状態、…と状態の順番付けができる。しかし Floquet 系においてはこのような変分原理に従う量は知られていなかった。例えば Floquet 系の固有状態は擬エネルギーなる量でラベル付けができるが、これは mod $\omega$ （$\omega$: 外場の振動数）の任意性があるため変分原理には従わない。また無限自由度の系では無限に多くの状態が擬エネルギー空間 $[0, \omega]$ に畳み込まれてしまうため、その区別が不可能になる問題が知られていた。

Le は Floquet 系における変分量「平均エネルギー」の性質を調べた。これは時間依存ハミルトニアンの期待値を無限時間について平均化したものであり、その定義は時間非依存系におけるエネルギーの自然な拡張となっている。Le は平均エネルギーが下限を持つことを証明した。また、擬エネルギー空間で区別がつかない状態 (共鳴状態) も平均エネルギーには大きな差が現れる例を示した。この結果は Floquet 系において物理的に relevant な状態を抽出するための重要な特徴量を指摘するものである。

### 3.2.6 圧力誘起高温超伝導体 $H_3S$ のバンド形成機構

2015 年に発見された硫化水素の高圧相 ($H_3S$) は −70 ℃で超伝導となることから大きな注目を浴び、その後の水素化合物における超伝導相探索ブームに火をつけた。その高い超伝導転移温度が電子フォノン相互作用によることがこれまで分かっているが、そもそもなぜ電子フォノン相互作用が強いのかについては理解が進んでいなかった。原理的には、電子フォノン相互作用は Fermi レベルにおける状態密度に比例する。明石はこの $H_3S$ の電子状態が Fermi レベル近傍に集中している点に着目し、これが起こる仕組みを解き明かした。$H_3S$ の電子バンド構造において鞍点が線状につながった「鞍線」が生じていること、また圧縮下において生じる遠距離電子遷移過程が「鞍線」をもたらしていることを指摘、それを再現するミニマムモデルの構築に成功した。これは加圧による結晶構造変化を経て電子状態の集中が起こる一つの一般的機構を打ち立てるものである [6]。

### 3.2.7 各種構造シミュレーションにおけるニューラルネットワークポテンシャルの利用

当研究室では多種多様な物質・物性の原子スケールシミュレーションを行なっているが、多くの場合、第一原理電子状態計算を用いた原子間相互作用の計算コストが問題となっている。そこで今年度より、第一原理電子状態計算のデータから原子間相互作用を学習するニューラルネットワークポテンシャルの導入を図り、データ同化結晶構造探索、ポテンシャル極小脱出経路探索で利用を開始したほか、電子励起を考慮したレーザー非熱的加工シミュレーションでも利用に向けた検討を行った。

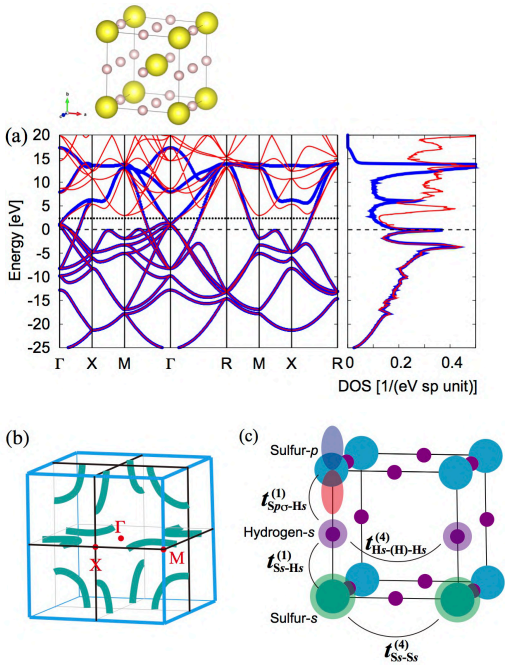



図 3.2.1: (a) $H_3S$ の結晶構造および電子バンド構造、状態密度。Fermi レベル (点線) 近傍に状態密度のピークが見られる。(b) 波数空間における「鞍線」の位置。(c) 「鞍線」を再現する最も簡単なモデル。(a) の結晶の一部分を抜き出し、各サイトに水素 s 軌道、硫黄 s, p 軌道を置き、s 軌道間の遠距離遷移を導入している。

＜受賞＞

[1] T. Naito, 2020 CAEN Best Young Speaker Award (Vth Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure: The Many Facets of Nuclear Structure), Bormio, Italy, February 4–9, 2020.

＜報文＞

(原著論文)

[2] 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. 241, 92 (2019)

[3] Y. S. Nagornov and R. Akashi, "Non-empirical weighted Langevin mechanics for the potential escape problem: Parallel algorithm and application to the Argon clusters", Physica A 528, 121481 (2019).

[4] T. Naito, D. Ohashi, and H. Liang, "Improvement of functionals in density functional theory by the inverse Kohn–Sham method and density functional perturbation theory", J. Phys. B 52, 245003 (2019).

[5] I. A. Kruglov, D. V. Semenok, H. Song, R. Szcz ☒ ☒ niak, I. A. Wrona, R. Akashi, M. M. D. Esfahani, D. Duan, T. Cui, A. G. Kvashnin, and A. R. Oganov, "Superconductivity of $LaH_{10}$ and $LaH_{16}$ polyhydrides", Phys. Rev. B 101, 024508 (2020).

[6] R. Akashi, "Archetypical "push the band critical point" mechanism for peaking of the density of states in three-dimensional crystals: Theory and case study of cubic $H_3S$", Phys. Rev. B 101, 075126 (2020)

[7] Y. S. Nagornov and R. Akashi, "AtomREM: Non-empirical seeker of the minimum energy escape paths on many-dimensional potential landscapes without coarse graining", Comput. Phys. Commun., accepted.

[8] R. Nagai, R. Akashi, and O. Sugino, "Completing density functional theory by machine learning hidden messages from molecules" npj Comput. Mater., accepted.

(会議抄録)

[9] T. Naito, R. Akashi, Gianluca Colò, H. Liang, and Xavier Roca-Maza, "Coulomb Energy Density Functionals for Nuclear Systems: Recent Studies of Coulomb Exchange and Correlation Functionals", EPJ Web Conf. 223, 01044 (2019).

(国内雑誌)

[10] 藤堂 眞治, 常行 真司, 「X 線回折実験とシミュレーションのデータ同化による結晶構造解析」, 日本結晶学会誌 62, 51-56 (2020).

[11] 永井瞭, 明石遼介, 「ニューラルネットワーク形式の交換相関ポテンシャル」, シミュレーション (日本シミュレーション学会; 採録決定).

(学位論文)

[12] 佐々木秀, 「マンガン水素化物における磁気構造の第一原理計算」, 修士論文, 東京大学（東京大学、2020 年 3 月 修士（理学））.

[13] 清澤郁人, Theoretical prediction of crystal structure by energy regression utilizing sparse representation （疎な表現を用いたエネルギー回帰による結晶構造の理論的予測）（東京大学、2020 年 3 月 修士（理学））.

(ソフトウエア公開)

[14] R. Akashi and Y. S. Nagornov, "AtomREM", https://github.com/ryosuke-akashi/AtomREM

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[15] T. Naito, R. Akashi, G. Colò, H. Liang, and X. Roca-Maza. "Coulomb Energy Density Functionals for Nuclear Systems", Nuclear Structure and Dynamics 2019 (NSD2019), Venice, Italy, May. 14, 2019.

[16] T. Naito, D. Ohashi, and H. Liang, "How to Improve Functionals in Density Functional Theory?", International Nuclear Physics Conference 2019 (INPC2019), Glasgow, United Kingdom, Jul. 30, 2019.

[17] T. Naito, R. Akashi, G. Colò, H. Liang, and X. Roca-Maza. "Coulomb Energy Density Functionals for Nuclear Systems", International Nuclear Physics Conference 2019 (INPC2019), Glasgow, United Kingdom, Jul. 30, 2019.

[18] H. Liang, T. Hatsuda, T. Naito, Y. Niu, and H. Sakakibara. "Attempts to derive nuclear EDF directly from Functional Renormalization Group approaches", International Nuclear Physics Conference 2019 (INPC2019), Glasgow, United Kingdom, Jul. 30, 2019.

[19] H. Liang, W. H. Long, J. Meng, T. Naito, P. Ring, S. Shen, Z. Wang, S. Zhang, and Q. Zhao. "Effects of tensor force in covariant density functional theory", International Nuclear Physics Conference 2019 (INPC2019), Glasgow, United Kingdom, Jul. 30, 2019.

[20] T. Naito, R. Akashi, H. Liang, and S. Tsuneyuki: Development of relativistic density functional theory with finite-light-speed correction toward electronic structures of super-heavy elements, The 18th International CNS Summer School, Tokyo, Japan, Aug. 23, 2019.

[21] T. Yokota and T. Naito, "Application of the functional-renormalization-group aided density functional theory to the two-dimensional homogeneous electron gas", 4th International Symposium on Research and Education of Computational Science (RECS), Tokyo, Japan, Oct. 02, 2019.

[22] T. Naito, "Electromagnetic Contribution to Nuclear Binding Energy", China-Japan Collaboration Workshop on "Nuclear Mass and Life for Unraveling Mysteries of R-process", Beijing, People's Republic of China, Oct. 11, 2019.

[23] K. Tsutsumi, Y. Hizume, M. Kawamura, R. Akashi, and S. Tsuneyuki, "First-principle calculation of superconducting transition temperatures of elemental transition metals including the effect of spin fluctuations", The 22nd Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, Osaka, Japan, Oct. 28, 2019.

[24] R. Sato, T. Sato, T. Otomo, S. Orimo and S. Tsuneyuki, "Crystal structure prediction of Li(CB9H10): an example of XRD-data-assimilated molecular dynamic simulation", The 22nd Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, Osaka, Japan, Oct., 28-30, 2019

[25] T. Naito, "Electromagnetic Contribution to Nuclear Binding Energy and Its Future Applications, International Molecule-type Workshop "Nuclear Fission Dynamics 2019", Kyoto, Japan, Nov. 01, 2019.

[26] T. Naito, R. Akashi, H. Liang, and S. Tsuneyuki, "Development of relativistic density functional theory with finite-light-speed correction toward electronic structures of super-heavy elements" 4th International Symposium on Superheavy Elements (SHE2019), Hakone, Japan, Dec. 03, 2019.

[27] R. Akashi, "General theory on the electronic states in layered materials with commensurate interlayer shift", Materials Research Meeting 2019 (MRM2019), Yokohama, Japan, Dec. 10–14, 2019.

[28] R. Sato, Y. Shibuta, F. Shimojo, and S. Yamaguchi, "Proton conduction on hydrated oxide surface for 'electrolyte' of metal/oxide catalysts", Materials Research Meeting 2019 (MRM2019), Yokohama, Japan, Dec., 10-14, 2019.

[29] R. Sato, T. Sato, T. Honda, T. Otomo, S. Orimo and S. Tsuneyuki, "Crystal Structure Prediction of Li(CB9H10) by XRD-assisted molecular dynamic simulation", 1st International Symposium "Hydrogenomics" combined with 14th International Symposium Hydrogen & Energy", Sapporo, Japan, Jan., 5-10, 2020.

[30] T. Naito, D. Ohashi, and H. Liang, "Improvement of functionals in density functional theory by inverse Kohn-Sham method", Vth Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure—The Many Facets of Nuclear Structure— (Bormio2020), Bormio, Italy, Feb. 07, 2020.

[31] T. Naito, X. Roca-Maza, G. Colò, and H. Liang, "Coulomb Energy Density Functionals for Nuclear Systems", Vth Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure—The Many Facets of Nuclear Structure— (Bormio2020), Bormio, Italy, Feb. 07, 2020.

招待講演

[32] S. Tsuneyuki, "Transcorrelated method: the idea and its applications", International Conference on Frontiers of Correlated Electron Sciences, The University of Tokyo, Japan, May 29, 2019.

[33] S. Tsuneyuki, "Crystal Structure Prediction by Assimilating Incomplete Powder Diffraction Data", The 18th International Conference on Density Functional Theory and its Applications (DFT2019), Allicante, Spain, Jul. 21–27, 2019,

[34] R. Akashi, "On the electronic structure in sulfur superhydride $H_3S$", Superstripes 2019, Ischia, Italy, Jun. 23–29, 2019.

[35] R. Akashi, "Weighted Langevin mechanics for potential escape problems", Nuclear Fission Dynamics 2019, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, Oct. 26–Nov. 08, 2019.

[36] T. Naito, "Electromagnetic Contribution to Nuclear Binding Energy", International workshop for graduate students and young physicists on nuclear physics, Beijing, People's Republic of China, Nov. 23, 2019.

[37] S. Tsuneyuki, "First-principles material simulation and beyond", Materials Research Meeting 2019 (MRM2019), Yokoyama, Japan, Dec. 10–14, 2019 (Plenary).

[38] R. Akashi, "Ab initio study on the high temperature superconductivity in compressed sulfur hydrides", Materials Research Meeting 2019 (MRM2019), Yokohama, Japan, Dec. 10–14, 2019.

[39] R. Akashi, "Some basic methodologies for the next-generation electronic and ionic structures simulations", International Workshop on High-Performance Computing and Programming on Quantum Chemistry and Physics 2020 (HPCPQCP2020), RIKEN Center for Computational Science, Kobe, Japan, Jan. 15–17, 2020.

[40] S. Tsuneyuki, "First-principles material simulation and beyond", MANA International Symposium 2020 Jointly with ICYS, Epochal Tsukuba, Tsukuba, Mar. 4-6, 2020 (Keynote Lecture).

(国内会議)

一般講演

[41] 明石遼介, Y. S. Nagornov, 水口敦喜, "反応座標を用いない反応経路探索: 固体系への応用" 第 3 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, 2019 年 8 月 1 日.

[42] 佐藤 龍平, 小松 遊矢, 清水 亮太, 福谷 克之, 一杉 太郎, 常行 真司, 「$YO_xH_y$ 系のバンド・構造計算及び励起状態構造の推定」, ハイドロジェノミクス第 4 回若手育成スクール, 2019 年 8 月 23-24 日.

[43] 内藤智也, 「Coulomb Energy Density Functionals for Nuclear Systems」, The 5th workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model (Sado2019), 佐渡 尖閣荘 (佐渡市), 2019 年 09 月 06 日.

[44] 明石遼介, "高圧下硫化水素超伝導体における電子状態密度ピークの形成機構", 日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学柳戸キャンパス, 2019 年 9 月 10 日–13 日.

[45] 明石遼介, "Kohn-Sham 交換相関ポテンシャルの断熱接続公式", 日本物理学会 2019 年秋季大会岐阜大学柳戸キャンパス, 2019 年 9 月 10 日–13 日.

[46] Y. S. Nagornov and Ryosuke Akashi ”AtomREM: A Program Code for Atomistic Chemical Reaction Simulation Using Weighted Langevin Mechanics” 日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学柳戸キャンパス, 2019 年 9 月 10 日–13 日.

[47] C. M. Le, R. Akashi and S. Tsuneyuki ”Defining a Floquet ground-state by the average energy” 日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学柳戸キャンパス, 2019 年 9 月 10 日–13 日.

[48] 内藤智也: 「Introduction and Application of Density Functional Theory Toward Understanding Super-heavy Elements」, 第 58 回核化学夏の学校, ゆふトピア (由布市), 2019 年 09 月 12 日.

[49] 内藤智也: 「(一般シンポジウム講演) 量子多体問題としての超重元素科学」, 日本物理学会 2019 年秋季大会 (素核宇) 一般シンポジウム, 山形大学 (山形市), 2019 年 09 月 17 日.

[50] 板垣直之, 内藤智也, 東崎昭弘: 「jj-coupling シェル模型波動関数を用いたクラスター構造の研究」, 日本物理学会 2019 年秋季大会 (素核宇), 山形大学 (山形市), 2019 年 09 月 20 日.

[51] R. Sato, T. Sato, T. Honda, T. Otomo, S. Orimo and S. Tsuneyuki: Crystal Structure Prediction of LiCB9H10 by XRD-data-assimilated Molecular Dynamic Simulation, ” TIA かけはし” ポスター交流会 2019, 2019 年 12 月 6 日.

[52] Y. S. Nagornov, ”多粒子系における稀な構造変態のシミュレーター「AtomREM」”, 第 9 回材料系ワークショップ〜「富岳」で飛躍へ！ 計算データの価値〜, 秋葉原コンベンションホール, 2020 年 2 月 17–18 日.

[53] Y. S. Nagornov, 水口敦喜, 明石遼介, ”Nonempirical seeking of the minimum energy escape paths in solids: Application to H3S under pressure” 日本物理学会第 75 回年次大会, 名古屋大学東山キャンパス, 2020 年 3 月 16–19 日.

招待講演

[54] 常行真司「CDMSI プロジェクト概説」, ポスト「京」重点課題 (7) 第 5 回シンポジウム「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成 (CDMSI)」, 2019 年 8 月 9 日 (東京大学伊藤謝恩ホール).

[55] 常行真司「不完全な実験データを用いたデータ同化結晶構造探索」, 早稲田大学材研オープンセミナー, 2019 年 11 月 11 日 （早稲田大学西早稲田キャンパス）.

[56] 常行真司 「計算物質科学の立場からの新物質開発について」第 9 回電子光技術シンポジウム「機能性マテリアルの設計と実証 —電子・光デバイスのイノベーション開拓に向けて－」, 2019 年 12 月 20 日 （秋葉原 UDX カンファレンス）.

[57] 明石遼介”水素化物超伝導体研究における人工知能技術と直観的理解” 第 2 回 Mi2I JAIST 合同シンポジウム　データ科学における予測と理解の両立を目指して -複眼で見る-　JST 東京本部別館 (東京都) 2019 年 6 月 5 日

[58] 明石遼介”第一原理計算で探る硫化水素における圧力誘起超伝導相の結晶構造” ハイドロジェノミクス　第 4 回若手育成スクール　自然科学研究機構　岡崎コンファレンスセンター (愛知県) 2019 年 8 月 23 日–24 日

[59] 明石遼介”ニューラルネットワークによる Kohn-Sham 交換相関ポテンシャルの構成” 第 3 回計算物質科学イノベーションキャンプ　ほほえみの宿　滝の湯 2019 年 10 月 8 日–10 日

[60] 明石遼介”Density functional theory for superconductors: Theory and applications” DFT 検討会 京都大学基礎物理学研究所　2019 年 11 月 6 日

[61] 明石遼介”交換相関密度汎関数開発の新展開” 第九回「凝縮系理論の最前線」イマジンホテル&リゾート函館　2020 年 2 月 6 日–8 日

[62] 内藤智也: 「相対論的密度汎関数理論の構築〜超重元素の理解に向けて〜」, Sendai Nuclear Science Colloquium, 東北大学 (仙台市), 2019 年 04 月 17 日.

[63] 内藤智也: 「Introduction and Application of Density Functional Theory Toward Understanding Super-heavy Elements」, 760th ASRC Seminar, 日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター (東海村), 2019 年 06 月 19 日.

(セミナー)

[64] T. Naito, ”How to Improve Functionals in Density Functional Theory?”, Seminar (University of Zagreb), Zagreb, Croatia, Feb. 11, 2020.

## 3.3 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。

### 3.3.1 強相関系のシミュレーション手法

#### テンソルネットワークくりこみ群

テンソルネットワークを用いた実空間くりこみ群法は、多体スピン系に対する数値計算手法として近年広く用いられてきている。テンソルくりこみ群法では大規模な古典系/量子系の物理量を効率的に計算することができる。しかしながら、Tensor Renormalization Group (TRG) や Higher-Order Tensor Renormalization Group (HOTRG) といった既存の手法では、高次元になるほど計算量が膨大になってしまうという問題点があった。この問題を解決するために、既存手法に比べて計算量が低い手法や、同じ計算時間でより精度の高い複数の手法を開発してきた。例えば、Anisotropic Tensor Renormalization Group (ATRG) では、3 次元量子系など高次元系における計算量を劇的に減らすことができる。さらに、ボンド重みを取り入れたテンソルくりこみ群法や Graph-independent loop reduction methods といった手法との組み合わせにより、ATRG の精度のさらなる向上を進めている [18, 21, 34, 41, 55]。

#### 非一様系のテンソルネットワークくりこみ

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 とプロジェクタを用いる計算手法を非一様系に拡張した。ボンド希釈を含むイジングモデルに適用し、非一様系に対する手法の有効性を確認した [49, 60]。

#### 行列積状態による応答関数の計算

行列積状態 (MPS) に基づくテンソルネットワーク法は、1 次元のスピン系に対して大きな成功を収めてきた。特に動的密度行列くりこみ群 (DDMRG) により低励起状態の計算も可能となってきている。テンソルネットワークによる励起状態計算の適用範囲をさらに広げることを目指し、新しい手法の開発を行っている。具体的には、MPS で表現された基底状態の波動関数と行列積演算子 (MPO) を用いて励起状態に対するクリロフ部分空間を構成することで、精密な励起状態を計算する。さらに、FET などの手法や富岳などのスーパーコンピュータを用いることで、周期境界条件の下での 1 次元ハイゼンベルグモデルの系統的な計算が可能となった。

#### 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、系の量子性に由来した非局所な相関を定量化する物理量であり、特に基底状態のエンタングルメント・エントロピーは系の量子性を反映した多彩な振る舞いを示す。我々は、基底状態の Rényi エンタングルメント・エントロピーを計算する手法として、連続虚時間・有限温度の量子モンテカルロ法を絶対零度に拡張した基底状態量子モンテカルロ法を用いて、温度のチューニングを必要としないアルゴリズムを開発した。さらに、部分系の形を確率変数とみなし、Wang-Landau 法を援用して遷移させることで計算性能を向上させることに成功した [19, 25, 40, 47, 58]。

#### 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。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が、さらに、新しいデータ構造を取り入れることで、より効率よく有限温度のシミュレーションを行うことが可能となった。この新しい非局所更新モンテカルロ法と有限サイズスケーリングを組み合わせることで、2 次元量子ダイマー模型の有限温度相図を精密に決定した [56]。

### 3.3.2 統計的機械学習による物質科学

#### 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 $SiO_2$ 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 [4, 17, 33, 62, 63]。

#### 4 次元変分法によるデータ同化の量子系への適用

4 次元変分法は、初期状態とパラメータが未知な方程式系について観測データが与えられている時に、アジョイント方程式と呼ばれる方程式を解いて、自動微分により初期状態・パラメータの推定を行うデータ同化手法である。従来古典系に対して用いられてきた 4 次元変分法の量子系に対する適用を模索すると、4 次元変分法における「状態」として何を用いるかを決める必要が出てくる。純粋状態の場合は量子

状態のオイラー角表示などを、密度行列の場合はコレスキー分解した時の成分の実部・虚部を分けて並べたものを用いると、原理的には量子系にも適用することができる [50]。

#### 戸田格子における逆変換可能な作用角変数への正準変換の深層学習を用いた構成

昨今、深層学習の目覚ましい発展に伴い物理においても深層学習を応用した新しい物理現象の理解、発見が期待され、盛んに研究されている。特に深層学習の表現力を用いることで、これまで具体的な形を得ることが難しかった、複雑な変換や関数を取得できると期待されている。このような複雑な変換として、可積分系における作用角変数への変換が挙げられる。作用角変数への正準変換は、一般に逆散乱法といった方法によって得られるが、一方でその逆変換を得ることは難しい。本研究では、深層学習の手法を用いて、特に戸田格子における逆変換可能な作用角変数への正準変換を求めた [46, 51, 57]。

#### 機械学習によるランダムゲージイジング模型の秩序変数の抽出

近年、イジング模型に機械学習を適用する研究が精力的に行われている。しかし、強磁性イジング模型のように自明な秩序変数をもつ場合を考えることが多い。すなわち見かけ上スピンが揃っているか否かだけを見ており、系の物理的本質を捉えられていないかもしれないという懸念がある。我々は、ランダムなゲージのかかったイジング模型を導入し、全結合/畳み込みニューラルネットワークによりどのように学習が進むのかを調べた。その結果、どちらのネットワークにおいても学習過程において正しいゲージが自動的に選ばれ、その影響を補正した上で温度推測などが行われていることが分かった。これは、見かけの乱雑さにとらわれず、機械学習によりイジング模型の物理的本質が抽出されることを示している。

### 3.3.3 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。ハミルトニアンの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 [8]。

### 3.3.4 強相関多体系における新奇な状態・相転移現象

#### キタエフスピン液体のテンソルネットワーク解析

近年、強いスピン軌道相互作用の存在により、有効スピンの間に異方的なキタエフ相互作用を持つ物質群が注目を集めている。キタエフ相互作用のみが存在するハニカム格子上の $S = 1/2$ 量子スピン模型 (キタエフ模型) の基底状態は非磁性のスピン液体状態になっており、このような “キタエフスピン液体” が現実の物質で実現する可能性が議論されている。我々は、以前に提案したキタエフスピン液体のテンソルネットワーク表現 (ループガス状態) を拡張することで、スター格子と呼ばれる格子上でのキタエフ模型の基底状態相図を計算した。その結果、ループガス状態は、「カイラルスピン液体」と呼ばれるスピン液体をを定性的・定量的に表現することができ、さらに、異なるカイラルスピン液体 Abelian と Non-Abelian の間の相転移も表現できることを明らかにした。また、$RuCl_3$ の有効模型に対する磁場中基底状態の解析にもテンソルネットワーク表現を適用し、磁場の印加によりゼロ磁場での磁性状態が抑制されて、非磁性状態が安定化することを明らかにした [7, 12, 14, 32, 37, 38, 38, 44, 64, 66, 68]。

#### フェリ磁性体スピネル化合物における顕著なスピン格子結合

これまで反強磁性体では、スピンフラストレーションとスピン格子結合の競合現象が起きることが知られていた。このような現象が他の系や物質でも生じるのかどうかは興味深い問題である。我々はフェリ磁性体スピネル化合物においても、スピン格子結合が重要な役割を担うことを明らかにした。フェリ磁性体スピネル化合物 $MnCr_2S_4$ の磁化曲線を 110 テスラの高磁場まで調べ、新たな磁場誘起相転移を発見し、磁場温度相図を決定した。また磁歪と超音波を 60 テスラまで測定し顕著なスピン格子結合を見出した。この物質に対する有効模型を考案し、モンテカルロ計算を用いて実験結果を高精度で再現することに成功した。実験的に観測された巨大プラトー相と非対称スピン秩序相が、スピン格子結合により安定化されることを明らかにした。我々が発見した

非対称スピン秩序相ではマルチフェロイックな性質が創発されるため、今後の工学的応用が期待される [13]。

#### テンソルネットワーク法による古典ダイマー模型の相転移

古典/量子ダイマー模型においては、ダイマーの配置に強い幾何学的制約があるため、モンテカルロ法シミュレーションは小さな系に限られてしまう。有限サイズの影響を避け、より精密なシミュレーションを行うため、我々は古典ダイマー模型に対するテンソルネットワーク表現を導入した。HOTRG 法と組み合わせることで、熱力学的極限における自由エネルギーや秩序変数を精度良く計算することが可能となった。

### 3.3.5 動的協調現象・非平衡ダイナミクス

#### 共振器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 1 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模型から解析を行った。具体的には多数のフォトンと多数の 2 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 1 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 [11, 26, 30, 35]。

#### 量子多体系の非平衡定常状態のテンソルネットワークによる記述

冷却原子系やイオントラップ系の実験において、散逸を人工的に制御することで新奇な量子状態を生み出す研究が発展している。量子マスター方程式はこのような散逸を含む量子系の時間発展を記述する方程式の一種であり、現在に至るまで多くの理論的・数値的研究が行われてきた。量子マスター方程式は状態ベクトルではなく密度行列の時間発展を記述する方程式であるため、計算機上で扱えるシステムサイズには状態ベクトルを扱う場合以上に厳しく制限される。我々は、テンソルネットワークを用いて無限系の密度行列を直接表現することで、熱力学極限における量子マスター方程式によるダイナミクスを効率的にシミュレーションする手法を開発した。さらに、テンソルネットワークで表現された密度行列の間の Rényi divergence を計算する方法を明らかにし、密度行列の間の熱力学的な等価性の議論が可能であることを示した [42]。

### 3.3.6 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 [1, 16, 52, 53, 54]。

#### テンソルネットワーク法パッケージ TeNeS

量子多体系の状態を表すベクトル（状態ベクトル）の次元は、粒子数に対して指数関数的に増大するため、大きな量子多体系を計算機を用いて解析するには、状態ベクトルの情報を効率的を圧縮し、精度良く近似することが有用である。そのような情報圧縮法の一つであるテンソルネットワーク法は、特に相互作用にフラストレーションの存在する量子スピン系の解析に対して強力な方法である一方、これまでに、一般的な模型に簡単に適用できるシミュレーションソフトウェアは存在しなかった。我々は、任意の 2 次元格子上のスピン模型に対してテンソルネットワーク法を適用して基底状態を計算できるソルバー「TeNeS」を開発し公開した。また、量子モンテカルロ法など量子格子模型のための汎用シミュレーションソフトウェア ALPS や並列厳密対角化パッケージ HΦ などの公開・開発も行っている [2]。

＜受賞＞

[1] 藤堂眞治、文部科学大臣表彰 科学技術賞、2019 年 4 月

＜報文＞

(原著論文)

[2] 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).

[3] 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).

[4] Daiki Adachi, Naoto Tsujimoto, Ryosuke Akashi, Synge Todo, Shinji Tsuneyuki, Search for Common Minima in Joint Optimization of Multiple Cost Functions, Comp. Phys. Comm. **241**, 92–97 (2019).

[5] 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).

[6] 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).

[7] Hyun-Yong Lee, Ryui Kaneko, Tsuyoshi Okubo, Naoki Kawashima, Gapless Kitaev Spin Liquid to Classical String Gas through Tensor Networks, Phys. Rev. Lett. **123**, 087203 (6pp) (2019).

[8] Ken M. Nakanishi, Kosuke Mitarai, Keisuke Fujii, Subspace-search variational quantum eigensolver for excited states, Phys. Rev. Research **1**, 033062 (7pp) (2019).

[9] Hayate Nakano, Seiji Miyashita, Characterization of localized effective spins in gapped quantum spin chains, Phys. Rev. B **100**, 195105 (11pp) (2019).

[10] Tokuro Shimokawa, Tsuyoshi Okubo, Hikaru Kawamura, Multiple-$q$ states of the $J_1$-$J_2$ classical honeycomb-lattice Heisenberg antiferromagnet under magnetic fields, Phys. Rev. B **100**, 224404 (15pp) (2019).

[11] Tatsuhiko Shirai, Synge Todo, Seiji Miyashita, Dynamical phase transition in Floquet optical bistable systems: An approach from finite-size quantum systems, Phys. Rev. A **101**, 013809 (7pp) (2020).

[12] Hyun-Yong Lee, Ryui Kaneko, Tsuyoshi Okubo, Naoki Kawashima, Abelian and Non-Abelian Chiral Spin Liquids in a Compact Tensor Network Representation, Phys. Rev. B **101**, 035140 (9pp) (2020).

[13] A. Miyata, H. Suwa, T. Nomura, L. Prodan, V. Felea, Y. Skourski, J. Deisenhofer, H.-A. Krug von Nidda, O. Portugall, S. Zherlitsyn, V. Tsurkan, J. Wosnitza, A. Loidl, Spin-lattice coupling in a ferrimagnetic spinel: Exotic $H - T$ phase diagram of $MnCr_2S_4$ up to 110 T, Phys. Rev. B **101**, 054432 (8pp) (2020).

[14] Hyun-Yong Lee, Ryui Kaneko, Li Ern Chern, Tsuyoshi Okubo, Youhei Yamaji, Naoki Kawashima, Yong Baek Kim, Magnetic field induced quantum phases in a tensor network study of Kitaev magnets, Nat. Comm. **11**, 1639 (7pp) (2020).

(国内雑誌)

[15] 藤堂眞治, 「1968 年のモンテカルロシミュレーション」50 周年に寄せて, 日本物理学会誌 **74**, 787–789 (2019).

[16] 井戸康太, 加藤岳生, 三澤貴宏, 藤堂眞治, ソフトウェア紹介「物質科学シミュレーションのポータルサイト MateriApps ― 分子動力学シミュレーションのはじめの一歩, 分子シミュレーション学会誌 “アンサンブル” **22**, 74–80 (2020).

[17] 藤堂眞治, 常行真司, X 線回折実験とシミュレーションのデータ同化による結晶構造解析, 日本結晶学会誌 **62**, 51–55 (2020).

(学位論文)

[18] Daiki Adachi, High-accuracy tensor renormalization group algorithms and their applications (博士論文)

[19] Chihiro Kondo, Measurement of entanglement entropy by ground-state quantum Monte Carlo method (修士論文)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[20] Hidemaro Suwa, Gia-Wei Chern, Kipton Barros, and Cristian D. Batista, “Large-scale dynamical simulation of Hubbard model,” International Conference on Frontiers of Correlated Electron Sciences, May 2019, Tokyo.

[21] Daiki Adachi, Tsuyoshi Okubo, Synge Todo, “Anisotropic Tensor Renormalization Group,” Frontiers of Statistical Physics, June 2019, Tokyo.

[22] Fumihiro Ishikawa , “Localized Mode and Nonergodicity of a Harmonic Oscillator Chain with the Generalized Langevin Equation Analysis,” Frontiers of Statistical Physics, June 2019, Tokyo.

[23] Tsuyoshi Okubo, Naoki Kawashima, “Study on Z2-vortex ordering by massively parallel Monte Carlo simulation,” Frontiers of Statistical Physics, June 2019, Tokyo.

[24] Hidemaro Suwa, “Finite-temperature self-consistent dynamical simulation,” Computational Approaches to Quantum Many-body Problems, July 2019, ISSP.

[25] Chihiro Kondo, Synge Todo, “Measurement of entanglement entropy by ground-state Monte Carlo,” 4th International Symposium on Research and Education of Computational Sience (RECS2019), October 2019, Tokyo.

招待講演

[26] Synge Todo, “Optical bistability in a quantum low photon-density regime,” International Conference on Frontiers of Correlated Electron Sciences, May 2019, Tokyo.

[27] Hidemaro Suwa , “Self-consistent dynamics of Hubbard Model,” Frontiers of Statistical Physics, June 2019, Tokyo.

[28] Hidemaro Suwa , “Machine learning for molecular dynamics with strongly correlated electrons,” The 5th Conference on Condensed Matter Physics, June 2019, Liyang, China.

[29] Synge Todo, “Markov-chain Monte Carlo without detailed balance,” X Brazilian Meeting on Simulational Physics, July 2019, Ouro Preto.

[30] Synge Todo, “Optical bistability in a quantum low photon-density regime,” Computational Approaches to Quantum Many-body Problems, July 2019, ISSP.

[31] Tsuyoshi Okubo, “Large spin fluctuation in the magnetization process of frustrated square lattice Heisenberg model ,” Computational Approaches to Quantum Many-body Problems, August 2019, ISSP.

[32] Tsuyoshi Okubo, “Tensor network approach to two-dimensional frustrated spin systems,” Computational Approaches to Quantum Many-body Problems, August 2019, ISSP.

[33] Synge Todo, “Data Assimilation in Materials Science - crystal Structure Prediction Supported by Incomplete Experimental Data,” ENS/UTokyo WS on Physics, November 2019, Tokyo.

[34] Tsuyoshi Okubo, “Anisotropic tensor renormalization group and BTRG,” Workshop on Tensor Network States: Algorithms and Applications 2019-2020, December 2019, National Cheng-Chi University.

[35] Synge Todo, “Optical bistability in a low-photon-density regime,” 2019 Workshop of Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials, December 2019, Vancouver.

[36] Hidemaro Suwa, “How to play geometric puzzles for efficient Monte Carlo updates,” School on algorithms in lattice gauge theory and spin systems, January 2020, Kolkata, India.

[37] Tsuyoshi Okubo, “Tensor network study on extended Kitaev models,” 33rd Annual CSP Workshop, February 2020, Athens, Georgia.

(国内会議)

一般講演

[38] 大久保毅,「無限系テンソルネットワーク状態の変分最適化とフラストレート磁性体への適用」, 物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会「計算物質科学の新展開」, 2019 年 4 月, 物性研.

[39] 大久保毅、金子隆威、Hyun-Yong Lee, 山地洋平、川島直輝, ポスト「京」重点課題 (7) 第 5 回シンポジウム, 2019 年 8 月, 東大.

[40] 近藤千尋, 藤堂眞治,「基底状態量子モンテカルロによるエンタングルメント・エントロピーの測定」, 第 64 回物性若手夏の学校, 2019 年 8 月, 岐阜県岐阜市.

[41] 足立大樹, 大久保毅, 藤堂眞治,「非等方的なテンソルくりこみ群」, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月, 岐阜大学.

[42] 中野颯, 白井達彦, 森貴司,「テンソルネットワークによる散逸のある量子多体系の非平衡定常状態の解析」, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月, 岐阜大学.

[43] 諏訪秀麿, Lin Hao, Jian Liu, Cristian D. Batista,「イリジウム酸化物薄膜における 2 次元反強磁性体の巨大磁気応答」, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月, 岐阜大学.

[44] 大久保毅,「無限系テンソルネットワークの変分最適化による拡張キタエフ模型の解析」, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月, 岐阜大学.

[45] 諏訪秀麿, Gia-Wei Chern, Kipton Barros, Cristian D. Batista,「弱いモット絶縁体のダイナミクス」, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月, 岐阜大学.

[46] 石川文啓, 藤堂眞治,「FPU 模型を用いた準可積分系の熱化と非熱的固定点の数値的研究」, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月, 岐阜大学.

[47] 近藤千尋, 藤堂眞治,「基底状態量子モンテカルロによるエンタングルメント・エントロピーの測定」, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月, 岐阜大学.

[48] 諏訪秀麿, Justin Smith, Nicholas Lubbers, Cristian D. Batista, Gia-Wei Chern, Kipton Barros,「機械学習を用いた強相関電子系の分子動力学」, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月, 岐阜大学.

[49] 山本卓矢, 藤堂眞治,「非一様クロック模型に対するテンソルネットワーク法の応用」, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月, 岐阜大学.

[50] 石井隆志,「Towards the application of 4D Variational Method to the dynamics of diamond NV centers」, TIA かけはしポスター交流会 2019, 2019 年 12 月, 東大.

[51] 石川文啓, 藤堂眞治, 諏訪秀麿,「Mode extraction by flow-based generative model to non-linear lattice」, TIA かけはしポスター交流会 2019, 2019 年 12 月, 東大.

[52] Synge Todo,「Materials Science Simulation by using MateriApps LIVE!」, TIA かけはしポスター交流会 2019, 2019 年 12 月, 東大.

[53] 藤堂眞治,「物質科学シミュレーションのポータル MateriApps」, 第 4 回元素戦略シンポジウム〜産学連携研究新展開〜, 2020 年 2 月, 東大.

[54] 藤堂眞治,「MateriApps - A Portal to Materials Science Simulation」, MI2I 最終成果報告会, 2020 年 2 月, 東京.

[55] 足立大樹, 大久保毅, 藤堂眞治, 「ボンド重み付きテンソルくりこみ群」, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2020 年 3 月, 名古屋大学.

[56] 曹睿梟, 諏訪秀麿, 藤堂眞治, 「量子ダイマー模型の有限温度相転移」, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2020 年 3 月, 名古屋大学.

[57] 石川文啓, 藤堂眞治, 諏訪秀麿, 「深層学習を用いた非線形格子における作用角変数への正準変換」, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2020 年 3 月, 名古屋大学.

[58] 近藤千尋, 藤堂眞治, 「Wang-Landau 法によるエンタングルメント ・エントロピーの計算手法の改良」, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2020 年 3 月, 名古屋大学.

[59] 諏訪秀麿, Shang-Shun Zhang, Gia-Wei Chern, Kipton Barros, Cristian D. Batista, 「有限温度における自己無撞着密度行列の実時間発展シミュレーション」, 日本物理学会第 75 回年次大会, 2020 年 3 月, 名古屋大学.

[60] 山本卓矢, 藤堂眞治, 「テンソルネットワーク法を用いた bond-dilution 系に対する有限温度相図」, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2020 年 3 月, 名古屋大学.

招待講演

[61] 藤堂眞治, 「マルコフ連鎖モンテカルロ法の発展と長距離相互作用系への応用」, 物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会「計算物質科学の新展開」, 2019 年 4 月, 物性研.

[62] 藤堂眞治, 「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」, TIA かけはし 2018 成果報告会, 2019 年 7 月, 東大.

[63] 藤堂眞治, 「データ同化による結晶構造予測」, 第 9 回極限物質科学研究会 動力学的回折理論による結晶構造解析, 2019 年 9 月, 東京.

(セミナー)

[64] Tsuyoshi Okubo, 「Compact tensor network representation for Kitaev spin liquid」, 統計力学セミナー, July 2019, 東大.

[65] Synge Todo, 「Geometric allocation approaches in Markov chain Monte Carlo」, Seminar @ ENS, September 2019, Paris.

[66] 大久保毅, 「テンソルネットワークによるキタエフスピン液体のコンパクトな表現」, セミナー@新潟大学, 2019 年 11 月, 新潟大学.

[67] 藤堂眞治, 「計算科学ロードマップ」, NGACI ミーティング, 2020 年 1 月, 東大.

[68] 大久保毅, 「テンソルネットワークによる情報圧縮と物性物理への応用」, 計算科学フォーラム, 2020 年 2 月, 東大.

## 3.4 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、平均場近似やスピン波理論などの従来的な手法や、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、非平衡系に関する数理物理学的研究も行っている。

### 3.4.1 強相関系・トポロジカル系

#### わずかに分散のあるバンドをもつ SU($n$) Hubbard 模型における強磁性

固体中で互いに相互作用しあう電子を記述する単純化された模型である Hubbard 模型は、そのスピン自由度に関する SU(2) 対称性を持つ。近年では冷却原子系の技術の発展により、SU($n$) 対称性を持つ多成分フェルミオン系も実現されており、理論的にはこれらの系は SU($n$) Hubbard 模型で記述される。しかし SU(2) Hubbard 模型に比べて、この模型で知られている厳密な結果は少なく、平坦バンド強磁性に関する先行研究 [R. Liu, W. Nie, and W. Zhang, Sci. Bull. **64**, 1490 (2019)] などに限られる。ここで、平坦バンドとは巨視的に縮退した一粒子のエネルギースペクトルを指し、この縮退に由来する状態密度の発散をともなう。平坦バンド強磁性はこのような特異的な状況における厳密な結果である。

田村と桂は 1 次元の場合の平坦バンド強磁性を SU($n$) Hubbard 模型において議論し、先行研究より一般的なパラメータに対しても厳密に成立することを示した。さらに摂動を加えることで状態密度の発散を取り除いた場合 (図 3.4.1) の強磁性も議論した。その結果、摂動に対してバンドギャップと相互作用が十分大きな領域で強磁性相が現れることを示し、特異性のない SU($n$) Hubbard 模型における厳密な結果を確立した。これらの結果は、国際会議等 [22, 30, 40] で発表されたほか、原著論文 [8] にまとめられた。また、田村はこれらの結果を修士論文としてまとめた [16]。

#### ３次元マグノン・トポロジカル

当初は電子系を中心に進展していた物質のトポロジカル相の研究は、その後大きな広がりを見せており、フォトンやフォノン、マグノンといったボゾン系においても対応する現象が研究されている。マグノンとは磁性体中のボゾン的素励起であるが、近年スピンホール絶縁体の対応物がマグノン系においても理論的に提案されている。また、近藤・赤城・桂は、このような系を特徴づけるトポロジカル不変量を論文 [H. Kondo, Y. Akagi, and H. Katsura, Phys. Rev. B **99**, 041110(R) (2019)] で提案している。このように、マグノンのトポロジカル相についての理

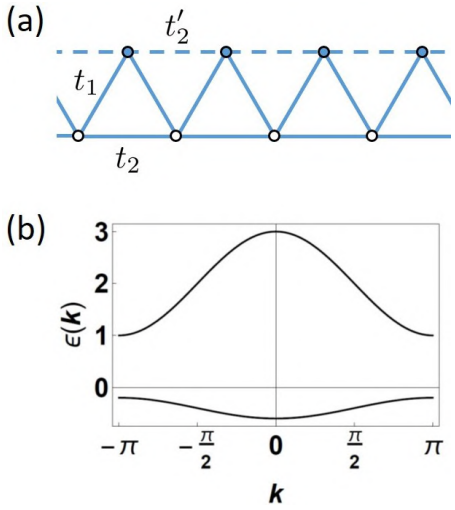



図 3.4.1: (a) ほぼ平坦なバンドをもつ tight-binding 模型が定義される 1 次元格子と (b) そのエネルギーバンド。下のバンドがほぼ平坦。

解は進んでいるものの、研究の多くは 2 次元以下の系に限られてきた。

近藤・赤城・桂は、今年度新たに 3 次元トポロジカル絶縁体に対応するマグノン系のモデルを構築した。その一例は、電子系における Fu-Kane-Mele 模型 [Phys. Rev. Lett. **98**, 106803 (2007)] の、マグノン系における自然な対応物とみなせる。これらの系は昨年度の研究において導入された、Kramers 対の存在を保証する擬時間反転対称性を有しており、この対称性によって保護された表面状態が現れる。我々はこの対称性に基づいて系を特徴づけるトポロジカル数を定義し、その表面状態の数の偶奇との対応関係を確認した。また、表面に磁場を印加することにより誘起される熱ホール効果についても議論した。これらの結果は、国際学会等 [20, 28, 29, 31, 56, 57, 59] で発表されたほか、原著論文 [7] にまとめられた。

### 3.4.2 散逸のある量子多体系

#### 散逸のある量子多体系の定常状態のニューラルネットワークを用いた構成

内部で閉じた相互作用のために、ユニタリーな時間発展により記述される量子系と、外界との相互作用により、非ユニタリーな時間発展をする量子系は、それぞれ「孤立量子系」と「量子開放系」と呼ばれ、区別される。いずれも特定の条件を満たす場合には、熱平衡状態への緩和が生ずるが、一般には非自明な定常状態に落ち着くことも許される。特に近年は、量子開放系のエンジニアリングに関して実験的にも進展していることから、非平衡定常状態の探求を加速させるためにも、理論的・数値的な手法の確立が急務となっている。

吉岡と濱崎 (東大理物・上田研) は、ニューラルネットワークの一種である制限ボルツマン機械によって表現した変分状態を用いて、非平衡定常状態を数値的に近似する手法を開発した。具体的には、モンテカルロ法によって、状態の変分パラメターを最適化する、「変分モンテカルロ法」を用いた。例えばギャップの開いた孤立量子系では、エネルギーを最小化するよう勾配法によって最適化するが、量子開放系においては、目的関数を時間発展の生成演算子により表現することで、非平衡定常状態を求めることが可能となる。以上の手続きによって制限ボルツマン機械による変分状態を最適化することで、1 次元・2 次元の量子スピン系における数値計算のほか、量子エンタングルメントが非常に複雑な状態でも効率的に表現できることを示した。これらの結果は、国際会議など [18, 25, 37, 42, 46, 53, 58, 60] で発表されたほか、原著論文 [5] にまとめられた。また、吉岡はこれらの結果を学位論文としてまとめた [17]。また、これらの業績により、日本物理学会の若手奨励賞 (領域 11) 等を受賞した [1, 3, 52]。

#### 散逸のある 1 次元量子多体系と非エルミート量子力学

Lindblad 方程式は、量子開放系を記述する代表的な方程式である。従来、Lindblad 方程式は少数系のダイナミクスを記述するために用いられてきたが、近年では多体系での Lindblad 方程式も扱おうとする動きが加速している。しかし、解析の難しさゆえ、その理解は発展途上である。先行研究としては、数値計算による結果が多く、解析的に調べられた例は、自由フェルミオンの問題に帰着できるものや、1 次元系の端にだけ散逸を入れたもの、および摂動的な取り扱いに限られている。

柴田と桂は、バルクに散逸が働く開放量子多体系で、以下の 2 つの可解模型を新たに見出した: (i) 1 次元量子コンパス模型に、位相緩和と呼ばれる散逸が働く模型、(ii) 1 次元量子 Ising 模型に、位相緩和と隣接 2 サイトに及ぶ散逸が働く模型。(i), (ii) どちらの場合についても、密度演算子をベクトルとみなすマッピングにより、対応する Liouvillian を梯子状に配置された非エルミートな量子スピン系のハミルトニアンとみなすことができる。

(i) については、Kitaev のハニカム格子模型と呼ばれる、可解な量子スピン模型を解く際に用いられたマヨラナフェルミオンの解法を、この非エルミートなハミルトニアンにも適用することができ、Lindblad 方程式のダイナミクスを完全に解析することができる。この方法を用いて、定常状態が二重縮退していること、および、パラメターの大小によりある種の相転移現象を起こすことを明らかにした。また、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。加えて、端スピンの自己相関関数についても、組合せ論の手法を用いて、厳密な表式を得た。その結果から、元々の量子コンパス模型がト

ポロジカル相にある時、散逸によるデコヒーレンスが抑制されることを示した。

(ii) については、梯子系へのマッピングにより、元の Louvillian は、非エルミートな量子 Ashkin-Teller 模型に帰着する。これは、Jordan-Wigner 変換によって相互作用のあるマヨラナフェルミオンの模型、さらには、異方性パラメターが純虚数の staggered XXZ 模型へとマップされる。このマッピングにより、系の定常状態が二重縮退していることを厳密に示した。さらに、うまくパラメターを選んだ場合は、可積分な非エルミート一様 XXZ 模型に対応するので、ベーテ仮設法などにより系の性質をより詳しく調べられる。その結果、厳密な緩和時間の表式を得て、やはり散逸の大小によりある種の相転移現象を起こすことを明らかにした。これらの結果は、国際学会等 [21, 26, 33, 38, 39, 44, 51, 62] で発表されたほか、(i) については [4]、(ii) については [6] として原著論文にまとめている。

### 3.4.3 数理物理学・統計力学

#### Onsager 代数に起因する完全スカー状態

非可積分な孤立量子多体系における熱化 (もしくは平衡化) の条件は、ミクロな量子力学とマクロな統計力学を繋ぐ非常に重要な問題として、長年精力的に調べられている。特に最近、[H. Bernien *et al.*, Nature **551**, 579 (2017)] において異様に長時間のあいだ減衰しない秩序状態間の振動を示す Rydberg 原子の実験系が発見されたことから、「一部の特異的な励起状態 (スカー状態) のみが熱化を示さない物理系」が注目を集めている。また、このような状態の背後にある数学的な構造の探求も盛んに行われている。

柴田・吉岡・桂は、Onsager 代数と呼ばれる数学的構造をもつ可積分な模型に、その可積分性を壊す摂動を加えることで、熱的な状態から完全に分離した部分 Hilbert 空間内において周期的運動を繰り返す、完全スカー状態を構成可能であることを明らかにした (図 3.4.2)。スピン 1/2 の場合は XY 模型、スピン 1 の場合は、Fateev-Zamolodchikov 模型に摂動を加えたものなどがその具体例であるが、我々はそのような模型が任意のスピン量子数 $S$ に対して、原理的には無限に構成できることを示した。また、このスカー状態のエンタングルメント・エントロピーは体積則に従わないことを証明した。この完全スカー状態は、ある種の並進対称性を破るような摂動に対しては、ロバストに非熱的な性質を示すが、このような並進不変でない系においても安定な完全スカー状態を陽に構成したのは、この研究が初めてである。これらの結果は、原著論文 [10] にまとめられた。

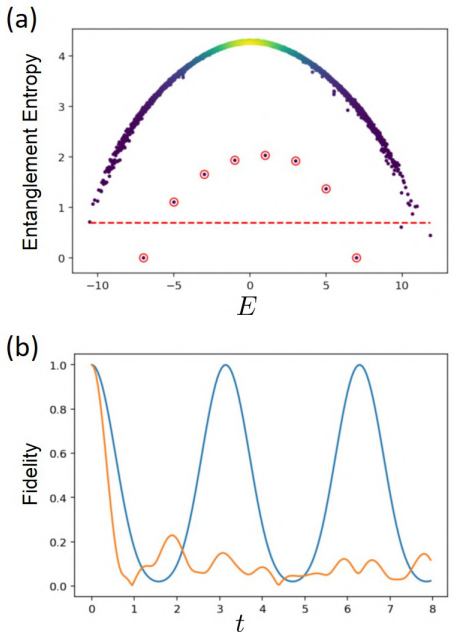



図 3.4.2: (a) $S = 1/2$ の模型 ($L = 8$ サイト) における各エネルギー固有状態のエンタングルメント・エントロピー。体積則に従わない、孤立した準位がスカー状態に対応する。(b) 初期状態とのフィデリティを時間 $t$ の関数として表したもの。初期状態がスカー状態の重ね合わせの場合は減衰せず振動するが、直積状態の場合は急激に減衰する。

### 3.4.4 その他

#### 遍歴ボゾン系における Haldane 相

Yang と桂、中野 (東大理物・藤堂研) は、スピン自由度をもつ Bose-Hubbard 模型における Haldane 相に関する研究を行った。具体的には、デルタ鎖と呼ばれる格子上の $F = 1$ Bose-Hubbard 模型を考え、ある種の状況では有効スピン模型が、$S = 1$ bilinear-biquadratic 模型となることを摂動的に示した。さらに、有効スピン模型が Affleck-Kennedy-Lieb-Tasaki (AKLT) 模型となる場合には、元の Bose-Hubbard 模型においても基底状態を陽に書き下すことが可能であり、その表式を用いてストリング秩序等の各種の相関関数が求まることを示した。この点は、この系における Haldane 相を代表する点と考えられる。さらに、一般の相互作用パラメターに対する相図を、variational uniform matrix product state (VUMPS) 法を用いて数値的に調べ、AKLT 模型に対応する点の周辺に Haldane 相が拡がっていることを明らかにした [11, 32, 45, 47]。Yang はこの研究と、昨年度行った研究 [H. Yang and H. Katsura, Phys. Rev. Lett.

**122**, 053401 (2019)] を修士論文にまとめた [14]。

### 断熱量子計算とエネルギーギャップの下限

断熱量子計算と標準的な量子回路模型の等価性を示す際に、Feynman のクロック・ハミルトニアンと呼ばれる定常ハミルトニアンのエネルギーギャップが、計算ステップ $L$ の多項式の逆数で下から押さえられることが重要となる。このエネルギーギャップの下限は、先行研究では複雑な議論を用いて証明されていたが、桂と Dublin 高等研究所 (アイルランド) の Dooley, Kells, Dorlas は、初等関数により固有値をあらわに書き下すことができる三重対角行列の性質と、エルミート行列に関する Weyl の定理を組み合わせることで、より良い下限をシンプルに導出できることを明らかにした。この結果は、原著論文 [9] にまとめられた。

＜受賞＞

[1] 吉岡 信行, 第 14 回日本物理学会若手奨励賞 (領域 11), 「ニューラルネットワークによる物理状態の分類と表現に関する理論的研究」, 日本物理学会 第 75 回年次大会 2020 年.

[2] 赤城　裕, 第 25 回日本物理学会論文賞, Yutaka Akagi and Yukitoshi Motome, "Spin Chirality Ordering and Anomalous Hall Effect in the Ferromagnetic Kondo Lattice Model on a Triangular Lattice", J. Phys. Soc. Jpn. 79, 083711 (2010), 日本物理学会 第 75 回年次大会 2020 年.

[3] 吉岡 信行, 理学系研究科研究奨励賞 (博士課程), 東京大学, 2020 年 3 月 23 日.

＜報文＞

(原著論文)

[4] Naoyuki Shibata and Hosho Katsura: Dissipative spin chain as a non-Hermitian Kitaev ladder, Phys. Rev. B **99**, 174303 (2019).

[5] Nobuyuki Yoshioka and Ryusuke Hamazaki: Constructing neural stationary states in open quantum many-body systems, Phys. Rev. B **99**, 214306 (2019) [Featured in Physics, Editors' Suggestion].

[6] Naoyuki Shibata and Hosho Katsura: Dissipative quantum Ising chain as a non-Hermitian Ashkin-Teller model, Phys. Rev. B **99**, 224432 (2019).

[7] Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura: Three-dimensional topological magnon systems, Phys. Rev. B **100**, 144401 (2019) [Editors' Suggestion].

[8] Kensuke Tamura and Hosho Katsura: Ferromagnetism in the SU($n$) Hubbard model with a nearly flat band, Phys. Rev. B **100**, 214423 (2019).

[9] Shane Dooley, Graham Kells, Hosho Katsura, and Tony C. Dorlas: Simulating quantum circuits by adiabatic computation: improved spectral gap bounds, Phys. Rev. A **101**, 042302 (2020).

[10] Naoyuki Shibata, Nobuyuki Yoshioka, and Hosho Katsura: Onsager's scars in disordered spin chains, Phys. Rev. Lett. **124**, 180604 (2020) [Editors' Suggestion].

[11] Hong Yang, Hayate Nakano, and Hosho Katsura: Haldane Phase in Spin-1 Bosons with a Flat Band, Preprint, arXiv:2003.01705 (2020).

(国内雑誌)

[12] 吉岡　信行, 赤城　裕, 桂　法称: ニューラルネットワークによる物理状態の判定から表現まで, 固体物理 **54**, No. 9, 51 (2019).

[13] 桂 法称: パズドラの数理と物理 (理学エッセイ), 理学部ニュース, 2019 年 7 月号.

(学位論文)

[14] Hong Yang: Rigorous Results for the Ground States of Spinor Bose-Hubbard Models (修士論文).

[15] 饗場亮介: 機械学習を用いたトポロジカル絶縁体・超伝導体の相の分類 (修士論文).

[16] 田村建佑: Rigorous results for ferromagnetism in non-singular SU($n$) Hubbard models (修士論文).

[17] 吉岡信行: Classification and Representation of Physical States by Neural Networks (博士論文).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[18] Nobuyuki Yoshioka: Constructing neural stationary states for open quantum many-body systems, *Engineering Nonequilibrium Dynamics of Open Quantum Systems*, Dresden, Germany, June 2019.

[19] Nobuyuki Yoshioka (Yutaka Akagi, and Hosho Katsura): Transforming Generalized Ising Model into Boltzmann Machine, *StatPhys 27– International Conference on Statistical Physics*, Buenos Aires, Argentina, July 2019

[20] Hiroki Kondo: Topological invariants and surface states in magnon systems, *Topological phase workshop*, Sendai, Japan, August 2019.

[21] Naoyuki Shibata: Integrable dissipative spin chains, *IIS-Chiba Workshop NH2019*, Kashiwa, Chiba, Aug. 2019.

[22] Kensuke Tamura (and Hosho Katsura): Ferromagnetism in the SU($n$) Hubbard model with nearly flat band, *The Fourth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases*, YITP, Kyoto, Japan, Oct. 2019.

[23] Hong Yang (and Hosho Katsura): Rigorous Results on the Ground States of the Spin-2 Bose-Hubbard Model, *The Fourth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases*, YITP, Kyoto, Japan, Oct. 2019.

[24] Kensuke Tamura (Tatsuhiko Shirai, Hosho Katsura, Shu Tanaka, and Nozomu Togawa): Performance comparison of integer encoding methods in Ising machines, *Deep Learning And Physics DLAP2019*, YITP, Kyoto, Japan, Nov. 2019.

[25] Nobuyuki Yoshioka (and Ryusuke Hamazaki): Constructing neural stationary states for open quantum many-body systems, *Deep Learning And Physics DLAP2019*, YITP, Kyoto, Japan (2019.10).

[26] Naoyuki Shibata (and Hosho Katsura): Integrable dissipative spin chains, *Thermalization, Many body localization and Hydrodynamics*, ICTS, Bangalore, India, Nov. 2019.

[27] Hong Yang (and Hosho Katsura): Rigorous Results on the Ground States of the Spin-2 Bose-Hubbard Model, *Thermalization, Many body localization and Hydrodynamics*, ICTS, Bangalore, India, Nov. 2019.

[28] Hiroki Kondo: Three-dimensional topological magnon systems, *International Conference on Topological Materials Science 2019 (TopoMat2019)*, Kyoto University, Kyoto, Dec. 2019.

[29] Hiroki Kondo: Three-Dimensional Topological Magnon Systems, *Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts [BE/BC2020F]*, Tokyo, Japan, Feb. 2020.

[30] Kensuke Tamura (and Hosho Katsura): Ferromagnetism in the SU($n$) Hubbard model with nearly flat band, *APS March Meeting 2020*, Denver, US, Mar. 2020.

[31] Hiroki Kondo (Yutaka Akagi, and Hosho Katsura): Three-dimensional topological magnon systems, *APS March Meeting 2020*, Denver, US, Mar. 2020.

[32] Hong Yang (and Hosho Katsura): Haldane Phase in Spin-1 Bose-Hubbard Model with Flat Band, *APS March Meeting 2020*, Denver, US, Mar. 2020.

[33] Naoyuki Shibata (and Hosho Katsura): Dissipative quantum Ising chain as a non-Hermitian Ashkin-Teller model, *APS March Meeting 2020*, Denver, US, Mar. 2020.

[34] Nobuyuki Yoshioka (Yuya O. Nakagawa, Kosuke Mitarai, and Keisuke Fujii), Variational Quantum Algorithm for Markovian Open Quantum Systems, *APS March Meeting 2020*, Denver, US, Mar. 2020.

招待講演

[35] Hosho Katsura: Frustration-free Majorana fermion models, *Interacting Majorana Fermions*, Vancouver, Canada, May 2019.

[36] Hosho Katsura: Supersymmetry breaking and Nambu-Goldstone fermions in lattice models, *KIAS Workshop on Topology and Correlation in Quantum Materials*, Busan, Korea, May 2019.

[37] Nobuyuki Yoshioka: Approximate and exact representation of physical states by neural networks, *5th Conference on Condensed Matter Physics*, Liyang, China, June 2019.

[38] Hosho Katsura: Integrable dissipative spin chains, *Amsterdam Summer Workshop on Low-D Quantum Condensed Matter 2019*, Amsterdam, Netherland, July 2019.

[39] Hosho Katsura: Integrable dissipative spin chains, *Topological phase workshop*, Sendai, Japan, August 2019.

[40] Hosho Katsura: Ferromagnetism in the SU($n$) Hubbard model with a nearly flat band, *Rigorous Statistical Mechanics and Related Topics*, Kyoto, Japan, Nov. 2019.

[41] Yutaka Akagi: Topological Invariants for Magnon Systems with Disorder, *Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts [BE/BC2020F]*, Tokyo, Japan, Feb. 2020.

[42] Nobuyuki Yoshioka: Neural Networks in Open Quantum System, *Mini-Workshop on Quantum Optimization*, Keio University, Kanagawa, Japan Mar 2020.

(国内会議)

一般講演

[43] 桂法称: ディリクレ・ノイマン混合境界条件と half SSD, サイン 2 乗変形 (SSD) とその周辺 2019, 2019 年 7 月, 理研 iTHEMS.

[44] 柴田直幸, 桂法称: 散逸のある量子 Ising 鎖と非エルミート Ashkin-Teller 模型, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月, 岐阜大学.

[45] Hong Yang, 桂法称: The Haldane Phase of Spinful Bosons with Flat Band, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月, 岐阜大学.

[46] 吉岡信行, 濱崎立資: ニューラルネットワークによる量子開放系の定常状態の表現, 第 13 回物性科学領域横断研究会, 2019 年 11 月, 東京大学.

[47] 桂法称: スピン自由度をもつ Bose-Hubbard 模型の SPT 相, 2020 年 2 月, 大阪大学.

[48] 近藤寛記, 赤城裕, 桂法称: 時間反転×並進対称性に保護されたマグノンディラック表面状態と電場応答, 日本物理学会 第 75 回年次大会, 2020 年 3 月, 名古屋大学.

[49] 田村健祐, 白井達彦, 桂法称, 田中宗, 戸川望: イジングマシンにおける整数バイナリ変換の性能比較, 日本物理学会 第 75 回年次大会, 2020 年 3 月, 名古屋大学.

[50] 赤城裕: 実空間表現によるボゾン系の $\mathbf{Z}_2$ トポロジカル不変量, 日本物理学会 第 75 回年次大会, 2020 年 3 月, 名古屋大学.

招待講演

[51] 桂　法称: 量子開放系の問題へのマヨラナ・フェルミオンの応用, 第 *12* 回トポロジー連携研究会「マヨラナ励起の実証に向けて」, 2018 年 11 月, 東京工業大学.

[52] 吉岡信行: ニューラルネットワークによる物理状態の分類と表現に関する理論的研究, 日本物理学会第 *75* 回年次大会 若手奨励賞受賞講演, 2020 年 3 月, 名古屋大学.

(セミナー)

[53] 吉岡信行: Representation of Quantum Many-body Systems by Neural Networks, TQM seminar, 2019 年 4 月, OIST.

[54] 桂　法称: Fradkin, Fredkin, or Fridkin?, 統計力学 seminar, 2019 年 5 月, 東京大学.

[55] 吉岡信行: 物性物理における機械学習, Graph Neural Network の最前線, 2019 年 6 月, NestHongo.

[56] 近藤寛記：マグノン系の $\mathbf{Z}_2$ トポロジカル相と表面状態, ASRC Seminar, 2019 年 6 月, JAEA.

[57] 桂　法称: 磁性体におけるマグノンの熱ホール効果, 応用物理学談話会, 2019 年 6 月, 名古屋大学.

[58] 吉岡信行: Designing neural networks for stationary states in open quantum many-body systems, Theoretical Quantum Physics Laboratory Seminar, 2019 年 7 月, 理化学研究所.

[59] 桂 法称: マグノン系・量子スピン系とトポロジカル不変量, 新学術領域「次世代物質探索の離散幾何学」2019 年度第 1 回領域会議および研究成果発表会, 2019 年 8 月, 名古屋大学.

[60] 吉岡信行: Designing neural networks for representation of many-body spin systems, Informal Seminar, 2019 年 9 月, 東京大学.

[61] 桂 法称: 格子上のフェルミオン系の話題, QCD Club, 2019 年 10 月, 慶応大学.

[62] 桂　法称: Integrable dissipative spin chains, 量子物理学・ナノサイエンスセミナー, 2020 年 1 月, 東京工業大学.

[63] 吉岡信行: “ニューラル物性物理”, ASRC Seminar, 2019 年 11 月, JAEA.

# 4　物性実験

## 4.1　長谷川研究室

4 月から修士課程 1 年生として樋渡功太と鄭帝洪が新しくメンバーに加わった。3 月末には遠藤由大が博士課程を、渡邉和己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、ヘテロ接合界面などを利用し、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 *in situ*」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。

### 4.1.1　表面での電子・スピン輸送

#### In/SnTe 接合における界面超伝導

s 波超伝導体とトポロジカル絶縁体との接合では、近接効果によってトポロジカル表面状態に超伝導が誘起され、カイラル p 波超伝導状態が実現すると期待されている。本研究ではトポロジカル結晶絶縁体である SnTe の薄膜上に s 波超伝導体である In を蒸着した系について、その超伝導特性の In 蒸着量依存性を超高真空中 *in-situ* 電気伝導測定によって調べた。その結果、抵抗の温度依存性において In 蒸着量 3 ML 以上の系で超伝導転移が観測された。10 ML 以上の系では二段階の転移が観測され、二種類の超伝導相の存在が示唆された。一方は，その臨界磁場が小さいことから In アイランドによる超伝導と考えられる。もう一方の起源は明らかではないが、超伝導近接効果によって SnTe 層に誘起された超伝導である可能性が考えられる。今後、トポロジカル超伝導の検証を行う必要がある。

#### Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-(Sn,Tl) における Rashba 超伝導

スピン分裂した表面バンドが 2 次元超伝導を担うと、従来の BSC 理論によって説明できないような、スピン 3 重項クーパー対成分を含む新奇な超伝導（トポロジカル超伝導の一種）が理論的に予測されている。共同研究グループの研究により、半導体 Si 表面に Sn と Tl を蒸着した Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-(Sn,Tl) 表面超構造が新たに発見され、さらに Rashba 型の金属的な表面スピン分裂が観測されたことから Rashba 超伝導が期待される。そこで本系を当研究室で再現し、その場 4 端子電気伝導測定を行ったところ、約 4 K で表面超伝導に由来すると思われる抵抗値のドロップが観測された。今後はゼロ抵抗の実現を目指して試料の質を向上を試み、超伝導が非従来型であることを裏付ける物性測定につなげていきたい。（ロシア科学アカデミーとの共同研究）

#### トポロジカル結晶絶縁体 (Pb,Sn)Se の異方的表面電気伝導

最近、トポロジカル結晶絶縁体 (Pb,Sn)Se の (100) 表面上の原子ステップに 1 次元トポロジカル状態が存在することが発見され、高次トポロジカル状態と解釈されている。そこで、この 1 次元トポロジカル状態の表面電気伝導への影響を、超高真空中の正方 4 探針プローブ法で測定した。$Pb_{0.67}Sn_{0.33}Se$ の $n$ 型単結晶を超高真空中で室温でへき開して (001) 面を出し、ステップ 列に平行方向および垂直方向の抵抗、$R_{//}$ と $R_{\perp}$ を測定した。室温から冷却するにしたがって $R_{\perp}$ が $R_{//}$ より著しく増大した。この結晶の立方晶の結晶構造からは、この異方的な伝導度は説明できず、表面ステップが伝導キャリアに対して障壁になっていることに起因していると言える。今後、Sn の濃度を制御することによってフェルミ準位をチューニングし、トポロジカル表面状態での伝導を感度良く検出して 1 次元トポロジカル状態の伝導を捉えたい。（ポーランド科学アカデミーとの共同研究）

#### Yb 修飾グラフェンにおける異常ホール効果

d，f 電子軌道を持つ金属原子をグラフェンに導入すると、金属原子とグラフェンのπ軌道との相互作用により、グラフェンに強磁性が発現されることが理論的に示唆されていたが、実験的には実証されていなかった。本研究では、6H-SiC(0001) 基板を Ar 大気中で通電加熱して得られる単層・数層グラフェン/SiC の表面に、常磁性である Yb 原子を MBE 法にて室温蒸着させた試料、さらにそれを室温蒸着後アニールによってインターカレートを狙った試料を作製し電気伝導の *ex situ* 測定を行った。その結果、すべての試料において明瞭な異常ホール効果を示すヒステリシスループが観測された。また，Yb の蒸着量によってキュリー温度が変化した。Yb が強いスピン軌道相互作用をもつことから、Yb 修飾グラフェン

における量子異常ホール効果発現の可能性が期待できる。

### 磁性トポロジカル絶縁体サンドイッチ構造での異常ホール効果

トポロジカル絶縁体 (TI) と強磁性 (FM) 体の界面では、トポロジカル表面状態で時間反転対称性が破れるため、エネルギー無散逸なカイラルエッジ状態 (量子異常ホール状態) や FM 秩序とは異なった渦状の磁気構造 (磁気スキルミオン状態) が実現可能である。これら 2 つの状態が共存するかを検証するために、当研究室では FMTI/TI/FMTI サンドイッチ構造である $Mn(Bi,Sb)_2Te_4/(Bi,Sb)_2Te_3/\ Mn(Bi,Sb)_2Te_4$ を分子線エピタキシー法で作製し、その電気伝導特性を物性測定システム (PPMS) によって磁気抵抗およびホール抵抗を *ex situ* 測定した。その結果、量子異常ホール効果観測には至っていないが、磁気スキルミオン由来と思われるホール抵抗の増強の観測に成功した。今後はバルクの影響をさらに抑制するために液体イオンゲートによるフェルミ準位の制御を行い、量子異常ホール状態と磁気スキルミオン状態の遷移の観測を目指す。

### 非対称光照射による逆スピンホール効果

これまでの我々の研究によって、円偏光をトポロジカル絶縁体 $Bi_2Se_3$ 薄膜の端付近に照射すると、偏光方向に依存した光電流成分が発生することを見出し、逆スピンホール効果 (ISHE) によって説明できることを示した。また、有限要素法によるシミュレーションによっても非対称光照射誘起 ISHE が再現された。しかし、トポロジカル表面状態とバルク状態の寄与の区別など詳細なメカニズムは不明のままである。そこで、$Bi_2Se_3$ 薄膜上に Bi 膜を蒸着し、円偏光依存光電流の Bi 膜厚依存性を測定した。その結果、Bi 膜厚依存性が見られず、14 原子層の Bi 膜でも円偏光依存光電流が観測された。これは、トポロジカル表面状態が $Bi/Bi_2Se_3$ 界面に存在し続けるためであり、それが光電流の発生に主に寄与していると考えられる。

### SiC 上 Ca インターカレート単層グラフェンの超伝導

超伝導を発現することが報告されている SiC 上の Ca インターカレート 2 層グラフェンの構造解析を行った結果、グラフェン層とバッファー層 (SiC 基板と結合をもつ炭素原子層) の間に Ca 原子がインターカレートしていることが明らかとなった [Y. Endo *et al.*, Carbon **157**, 857 (2020).]。この結果から SiC 上の単層グラフェンにおいても Ca 原子がインターカレートし、単層グラフェンで初となる超伝導の発現が期待される。そこで Ca 原子を SiC 上単層グラフェンにインターカレートする試料作製プロセスを確立した結果、インターカレートした Ca 原子により形成される $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 超周期構造を示す反射高速電子回折パターンが観察された。さらに、その試料を大気曝露することなく超高真空中で *in-situ* 電気伝導測定を行った結果、約 4 K で超伝導転移によるゼロ抵抗が観測された。本結果はディラック電子をもつ SiC 上単層グラフェン化合物で初めて超伝導発現を明確に示した結果である。

### 鉄系超伝導原子層の成長

$FeSe_xTe_{1-x}$ は鉄系超伝導体の一種であり、Se と Te の濃度比率を変えると超伝導特性やバンドトポロジーを制御することができる。また、グラフェンやチタン酸ストロンチウム表面上に形成された $FeSe_xTe_{1-x}$ 薄膜が超伝導を示すことが分光学的に示されている。我々は 2 つの方法で $FeSe_xTe_{1-x}$ 薄膜を作成した。まず、トポロジカル絶縁体である $Bi_2Se_xTe_{3-x}$ 薄膜上に Fe 原子を蒸着した後アニールすると、3 つの異なる方位のドメインをもつ $FeSe_xTe_{1-x}$ 層が $Bi_2Se_xTe_{3-x}$ 表面上に形成されていることを反射高速電子回折 (RHEED) による解析からわかった。もう一つの方法として、グラフェン上に Fe、Se、Te を同時蒸着すると、c 軸周りに回転したドメインをもつ繊維構造の $FeSe_xTe_{1-x}$ 薄膜が成長することが RHEED からわかった。2 つの方法で作成した薄膜上に保護膜としてアルミナを蒸着して PPMS で *ex situ* 測定した結果、両者の電気抵抗の温度依存性が極めて似ていたが, 2 K まで超伝導を確認できなかった。その理由を探るにはドメイン構造や歪みの影響を調べる必要がある。

### 原子層青リンのエピタキシャル成長と電気伝導特性

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。先行研究では単結晶 Au 上に青リンの結晶成長が行われ、電気伝導には適していなかったが、本研究では SiC(0001) 上の Au(111) 薄膜上に成長することに成功した。今後は試料作製条件をより最適化して超高真空中での *in situ* 極低温電気伝導測定を中心に行う。

## 4.1.2 表面・原子層ナノ構造

### Mn ドープ $Sn_{1-x}Mn_xSe_2$ の強磁性

ファンデルワールス (vdW) 層状物質は、容易にヘテロ構造を作ることができ、また超伝導や電荷密度波現象など興味深い物性を示すことから最近盛んに研究されている。その一種である $SnSe_2$ は、約 1.2 eV のバンドギャップをもつ vdW 半導体である。また、Mn 原子をドーピングすると強磁性を発現するこ

とが理論的に示されていた。我々は化学気相輸送法によって Mn を 3% ドーピングした $Sn_{0.97}Mn_{0.03}Se_2$ 単結晶を作成した。SQUID 測定によって転移温度が 65 K の希薄磁性半導体であることを確認した。独自の計算によって、磁性は Mn 原子のｄ軌道由来であることがわかった。次に、強磁性転移温度の Mn 濃度依存性を調べる。（中国科学技術大学との共同研究）

**EuS/SnTe 接合における強磁性近接効果**

強磁性体 EuS とトポロジカル絶縁体 $Bi_2Se_3$ とのヘテロ接合において、$Bi_2Se_3$ に磁性が滲みだす現象が知られているが、その起源の詳細は明らかになっていない。本研究では磁化の滲み出し（磁気近接効果）とトポロジカル表面状態の有無との関係を明らかにする目的で、トポロジカル結晶絶縁体 SnTe とトリビアル絶縁体 PbTe それぞれについて EuS とのヘテロ接合を作製し、その磁気特性を調べた。SQUID による磁化測定では、EuS/SnTe においては 100 K-300 K において面直磁化が増強する振る舞いが見られた。これは先行研究の EuS/$Bi_2Se_3$ における振る舞いと酷似しており、EuS/SnTe の界面磁化によるものと考えられる。一方で EuS/PbTe ではそのような振る舞いは観測されなかった。さらに、J-PARC の BL17 写楽において偏極中性子反射率（PNR）測定を行ったところ、PNR データは EuS/SnTe においては磁気滲み出しが存在するモデルと整合的であるが、EuS/PbTe では磁気滲み出しが小さいことがわかった。以上の結果は、強磁性体/トポロジカル絶縁体界面における磁気滲み出しの発現にトポロジカル表面状態の存在が寄与していることを示唆している。これはトポロジカル表面状態で時間反転対称性を破っているので、今後、電気伝導測定において量子異常ホール効果の観測などを目指す。（筑波大学と総合科学研究機構との共同研究）

**Fe/SnTe 接合における強磁性近接効果**

トポロジカル表面に強磁性を導入すると、エネルギー無散逸流であるカイラルエッジ電流を生じる量子異常ホール効果やアクシオン状態などの興味深い量子現象が期待される。トポロジカル結晶絶縁体は磁化方向によって Dirac ギャップの大きさを制御できるなどの興味深い物性を持つと理論的に予想されているが、その実証は未だなされていない。量子異常ホール効果を実現するにはトポロジカル絶縁体の結晶性を崩さずに均一に強磁性を導入することが求められており、その方法の一つとしてヘテロ接合における近接効果による強磁性導入が挙げられる。本研究では、トポロジカル結晶 SnTe 薄膜表面上に Fe 原子層を成長させ、その磁気特性を SQUID 測定し、面直磁気異方性を持つことが分かった。さらに X 線結晶構造評価によって、異相の析出はなく界面でのラフネスはとても小さいと分かった。そこで J-PARC の BL17 写楽において偏極中性子反射率法によって強磁性の深さ方向の分布を解析した結果、Fe 層から SnTe 層へ約 3 nm の強磁性相互作用の滲み出しがあることがわかった。ただ、Fe は金属であるため、量子異常ホール効果などの観測のためには強磁性絶縁体との接合が望ましく、SnTe と格子マッチングの良い材料の探索が必要である。（筑波大学と総合科学研究機構との共同研究）

**Ge(111) 上の (Pb,Bi) 表面合金層**

超伝導ギャップが非自明なトポロジーを持つトポロジカル超伝導は、そのエッジや渦糸中に発現すると言われるマヨラナ粒子のトポロジカル量子コンピュータへの応用などが期待され、精力的に研究されている。先行研究の理論予測によると、トポロジカル超伝導を 2 次元で実現する系として、Ge 基板上に成長した Pb と Bi の表面合金層が候補に挙げられたが、その作製例や実験報告はこれまでなかった。本研究では試料作製条件を細かく振ることで (Pb,Bi)/Ge(111) の構造相図を作製し、今回新たに発見された $2\times2$ および $2\sqrt{3}\times2\sqrt{3}$-(Pb,Bi) 表面超構造を安定して作製することに成功した。角度分解光電子分光測定により金属的なバンドが観測され、その場電気伝導測定からは空間電荷層が主な伝導を担っていることが分かった。（ロシア科学アカデミーとの共同研究）

### 4.1.3 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伝導性（電気抵抗ゼロ）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、当研究室では表面の電気伝導を超高真空 *in situ* 測定してきており、表面数原子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。交流磁場を用いることで間接的に反磁性を確認している研究はあるが、直接的に完全反磁性を確認した研究は未だ存在しない。そこで、超高真空中の試料の電気伝導と同時に磁化率を *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を目指し、既存の極低温超高真空マイクロ 4 端子電気伝導測定装置の改良を行っている。本年度はピックアップコイルの設計と磁場オフセット機構の調整を見直し、ダイナミックレンジの拡張およびフラックスジャンプの防止対策を行った。今後は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や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、汎用性や迅速性に欠ける。本研究室では、原子間力顕微鏡や走査トンネル顕微鏡、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注入プローブの開発を行ってきた。本年度は、スピン圧を直接測定できるプローブの設計を行い製作に取りかかっている。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、新たな機構や物質を模索している。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、山梨大学白木研と共同で装置の改良を行っている。今後は本研究室に既存の独立駆動型 4 探針 STM および山梨大学白木研にある独立駆動型 4 探針 STM においてプローブの実証を行う予定である。(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た。
・日本学術振興会 二国間交流事業共同研究（ロシア）「極低温での表面 2 次元物質」（代表 長谷川修司）
・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] 鄭 帝洪：“*Yb* 蒸着されたグラフェン*/SiC* における強磁性の発現”、日本物理学会領域 9 第 6 回学生優秀発表賞 (日本物理学会 2019 秋季大会), 2019 年 9 月.

＜報文＞

(原著論文)

[2] S. Ichinokura, Y. Nakata, K. Sugawara, Y. Endo, A. Takayama, T. Takahashi, and S. Hasegawa: *Vortex-induced quantum metallicity in mono-unit-layer superconductor $NbSe_2$*, Phys. Rev. B **99**, 220501(R) (Jun, 2019).

[3] N. V. Denisov, A. V. Matetskiy, A. N. Mihalyuk, S. V. Eremeev, S. Hasegawa, A. V. Zotov, and A. A. Saranin: *Superconductor-insulator transition in an anisotropic two-dimensional electron gas assisted by one-dimensional Friedel oscillations: (Tl, Au)/Si(100)-c*$(2 \times 2)$, Phys. Rev. B **100**, 155412 (Oct, 2019).

[4] Y. Endo, Y. Fukaya, I. Mochizuki, A. Takayama, T. Hyodo, S. Hasegawa: *Structure of Superconducting Ca-intercalated Bilayer Graphene/SiC studied using Total-Reflection High-Energy Positron Diffraction*, Carbon **157**, 857-862 (Jan, 2020).

[5] Y. Takeuchi, R. Hobara, R. Akiyama, A. Takayama, S. Ichinokura, R. Yukawa, I. Matsuda, S. Hasegawa: *Two-dimensional conducting layer on SrTiO3 surface induced by hydrogenation*, Phys. Rev. B **101**, 085422 (Feb, 2020).

[6] Di Fan , Rei Hobara, Ryota Akiyama , and Shuji Hasegawa: *Inverse Spin Hall Effect Induced by Asymmetric Illumination of Light on Topological Insulator $Bi_2Se_3$*, Physical Review Research **2**, 023055 (Apr, 2020).

[7] Y. C. Lau, R. Akiyama, H. Hirose, R. Nakanishi, T. Terashima, S. Uji, S. Hasegawa, M. Hayashi: *Concomitance of superconducting spin-orbit scattering length and normal state spin diffusion length in W on $(Bi,Sb)_2Te_3$*, Journal of Physics: Materials **3**, 034001 (May, 2020).

[8] H. Huang, H. Toyama, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, A. Takayama, R. Hobara, R. Akiyama, A. V. Zotov, A. A. Saranin, and S. Hasegawa: *Superconducting proximity effect in a Rashba-type surface state of Pb/Ge(111)*, Superconductor Science and Technology, accepted (cond-mat arXiv:1910.03760).

[9] Ryota Akiyama, Ryo Ishikawa, Kazuhiro Akutsu, Ryosuke Nakanishi, Yuta Tomohiro, Kazumi Watanabe, Kazuki Iida, Masanori Mitome, Shuji Hasegawa, Shinji Kuroda:*Direct probe of ferromagnetic proximity effect at the interface in Fe/SnTe heterostructure by polarized neutron reflectometry*, cond-mat arXiv:1910.10540 (Oct, 2019).

(国内雑誌)

[10] 一ノ倉聖、長谷川修司:超高真空中での電気伝導測定による原子層物質の超伝導の研究, 固体物理 **54**(6), 279-290 （Jun, 2019）.

[11] 高山あかり、長谷川修司:超高真空中の“その場”電気伝導測定で` 探る原子層超伝導, 材料表面 **4**(3), 87-96 （Sep, 2019）.

(その他)

[12] 長谷川修司, 会誌編集委員会:「平成の飛跡」の企画について, 日本物理学会誌 **74** (5), 目次 （May, 2019）.

[13] 長谷川修司: 14 回目の IPhO 日本代表団の派遣, JPhO News Letters No. 24 （Jul, 2019）.

(学位論文)

[14] 遠藤由大: SiC 上グラフェンへの金属原子インターカレーションによる構造変化と超伝導発現 (博士論文).

[15] Liu Shengpeng:*Transport Properties of FeSe Thin Films on $SrTiO_3$* (修士論文).

[16] 高城拓也：室温強磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ接合における量子異常ホール効果の探索 (修士論文).

[17] 渡邉和己：強磁性・超伝導とトポロジカル結晶絶縁体との協奏現象の探求（修士論文）.

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[18] R. Akiyama: *Structural and magnetic effects on surface states in topological (crystalline) insulators*, New Trends in Topological Insulators 2019, 広島, 2019 年 7 月 15 日.

[19] S. Hasegawa: *Towards high-temperature quantum anomalous Hall effect*, IBS Conference on Surface Atomic Wires 2019, 2019 年 8 月 27 日, Pohang (Korea).

[20] S. Hasegawa: *Atomic-Layer Superconductors*, The 27th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSOM 27), 2019 年 12 月 5 日, 修善寺.

[21] S. Hasegawa: *Graphene Intercalation*, The 11th International Conference on Advanced Materials and Devices (ICAMD2019), 2019 年 12 月 12 日, Jeju, Korea.

一般講演

[22] S. Hasegawa: *Conductivity measurements by micro-four-point probes*, The 1st Meeting of Core-to-Core Program on Coordination Nanosheets, 2019 年 5 月 10 日, 東京大学.

[23] T. Takashiro, R. Akiyama, I. A. Kibrev, A. V. Matetskiy, H. Toyama, K. Hiwatari, R. Nakanishi, A. V. Zotov, A. A. Saranin, and S. Hasegawa: *Fabrication and Evaluation of High TC Ferromagnetic/Topological Insulator Heterojunction* $MnTe/(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3$, New Trends in Topological Insulators 2019, 広島, 2019 年 7 月 15 日.

[24] Y. Guo, R. Hobara, R. Akiyama, H. Toyama, G. Mazur, T. Dietl and S. Hasegawa: *Anisotropic electrical conductance on a (001) surface of topological crystalline insulator (Pb,Sn)Se*, The 27th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSOM 27), 2019 年 12 月 7 日, 修善寺.

[25] D. Fan, R. Hobara, R. Akiyama, A. Takayama, S. Hasegawa: *Non-reciprocal photocurrent induced by illumination of circularly polarized light onto topological insulators*, Symposium on Surface and Nano Sciences 2020, 2020 年 1 月 23 日, 雫石（岩手）.

(国内会議)

招待講演

[26] 長谷川修司： 研究者、このクリエイティブで人間的な職業, 日本学校保健学会第 66 回学術大会, 2019 年 12 月 1 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京).

一般講演

[27] 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：半導体基板上の 2 次元 (Pb,Au) 層の構造と物性, 日本表面真空学会 2019 年度関東支部学術講演大会, 東京理科大学葛飾キャンパス, 2019 年 4 月 13 日.

[28] 高城拓也，秋山了太，I. A. Kibrev，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 $MnTe/(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3$ の作製とその評価, 日本表面真空学会 2019 年度関東支部学術講演会, 東京理科大学葛飾キャンパス, 2019 年 4 月 13 日.

[29] 渡邉和己, 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、日本表面真空学会 2019 年度関東支部学術講演大会, 東京理科大学葛飾キャンパス, 2019 年 4 月 13 日.

- **日本物理学会 2019 秋季大会**, 2019 年 9 月 10 日-13 日 (岐阜大学)

[30] 高城拓也, 秋山了太, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, 遠山晴子, 中西亮介, 樋渡功太, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司：室温強磁性トポロジカル絶縁体 $MnTe/(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3$ の電気伝導特性, 9 月 11 日.

[31] 秋山了太, 佐藤瞬亮, 遠藤由大, 長谷川修司：SiC(0001) 上に成長した青リンの構造と伝導特性, 9 月 10 日.

[32] 渡邉和己, 友弘雄太, 嶋野武, 石川諒, 秋山了太, 阿久津和宏, 飯田一樹, 黒田眞司, 長谷川修司：偏極中性子反射率法を用いた EuS/SnTe および EuS/PbTe ヘテロ界面における磁化の測定, 9 月 10 日.

[33] 遠藤由大, 鄭帝洪, 秋山了太, 長谷川修司：K 修飾された Ca インターカレートグラフェン/SiC の輸送特性, 9 月 10 日.

[34] 鄭帝洪, フェルバケルヨルト, 遠藤由大, 秋山了太, 長谷川修司：Yb 蒸着されたグラフェン/SiC における強磁性の発現, 9 月 10 日.

[35] 長谷川修司, 石川真理代, 市原光太郎, 一宮彪彦, 大塚洋一, 井通暁, 海老崎功, 右近修治, 川村康文, 岸澤眞一, 毛塚博史 I, 小牧研一郎 J, 近藤泰洋 K, 櫻井一充 G, 下田正 L, 真梶克彦, 末元徹, 鈴木功, 瀬川勇三郎, 武士敬一, 遠山潤志, 林壮一, 深津晋, 松本益明 S, 松本悠, 味野道信：物理チャレンジ 2019 報告：II. 第 2 チャレンジ実験問題, 9 月 13 日.

[36] 松本益明, 中屋敷勉, 杉山忠男, 東辻浩夫, 金子朋史, 真梶克彦, 高橋拓豊, 荒船次郎, 上杉智子, 大原仁, 興治文子, 加藤岳生, 栗原進, 田中忠芳, 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, 小宮山智浩, 中江優介, 渡邉明大, 北原和夫：第 50 回国際物理オリンピック報告, 9 月 13 日.

- **日本表面真空学会 2019 年学術講演会**, 2019 年 10 月 28 日-30 日 (つくば国際会議場)

[37] 遠山晴子, Huang Hongrui, 中村友謙, Bondarenko Leonid, Tupchaya Alexandra, Gruznev Dimitry, 保原麗, 高山あかり, 秋山了太, Zotov Andrey, Saranin Alexander, 長谷川修司：Ge(111) 基板上の 2 次元 Pb の表面構造および超伝導, 10 月 28 日.

[38] Guo Yuxiao, 保原麗, 秋山了太, 遠山晴子, 長谷川修司：*Anisotropic electrical conductance on a (001) surface of topological crystalline insulator (Pb,Sn)Se*, 10 月 28 日.

[39] 秋山了太，宮内恵太，遠藤由大，佐藤瞬亮，保原麗，長谷川修司：SiC(0001) 上に成長した原子層単結晶青リンの特性, 10 月 28 日.

[40] 遠藤由大，鄭帝洪，秋山了太，長谷川修司：K 修飾された Ca インターカレートグラフェン/SiC による超伝導, 10 月 28 日.

[41] 渡邉和己, 友弘雄太, 嶋野武, 石川諒, 秋山了太, 阿久津和宏, 飯田一樹, 黒田眞司, 長谷川修司：偏極中性子反射率法による強磁性体/トポロジカル結晶絶縁体ヘテロ界面における磁化の深さ依存性の測定, 10 月 28 日.

[42] 鄭帝洪, フェルバケルヨルト, 遠藤由大, 秋山了太, 長谷川修司：SiC 基板上 Yb 蒸着グラフェンにおける強磁性の発現, 10 月 29 日.

[43] 高城拓也, 秋山了太, KibirevIvan, MatetskiyAndrey, 遠山晴子, 中西亮介, 樋渡功太, ZotovAndrey, Saranin Alexande, 長谷川修司：室温強磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ接合 $MnTe/(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3$ の電気伝導特性評価, 10 月 30 日.

- **日本物理学会 第 75 回年次大会**, 2020 年 3 月 16 日-19 日 (名古屋大学, 東山キャンパス)（中止のため、講演概要提出による発表）

[44] 鄭帝洪, V. Jort, 遠藤由大, 渡邉和己, 遠山晴子, 高城拓也, 保原麗, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 秋山了太, 長谷川修司：Yb 吸着グラフェン/SiC の磁性, 3 月 17 日.

[45] Hongrui Huang, 秋山了太, 長谷川修司: Si(111) と SiC(0001) とグラフェンに成長した層状 SnSe2 の輸送特性, 3 月 17 日.

[46] 郭宇嘯, 秋山了太, 保原麗, 遠山晴子, Grzegorz MazurA, Tomasz DietlA, 長谷川修司：トポロジカル結晶絶縁体 (Pb,Sn)Se(001) 表面における異方的な電気伝導特性, 3 月 17 日.

[47] 高城拓也, 秋山了太, I. A. KibirevA, B, A. V. MatetskiyA, B, 遠山晴子, 中西亮介, 樋渡功太, A. V. ZotovA, B, A. A. SaraninA, B, 長谷川修司：強磁性トポロジカル絶縁体サンドイッチ構造 $Mn(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4/(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3/Mn(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4/Si(111)$ の電気伝導特性, 3 月 17 日.

[48] ファン ディ, 保原麗, 秋山了太, 長谷川修司：$Bi_2Se_3$ 上への Bi 蒸着による偏光誘起光電流の変調, 3 月 17 日.

(セミナー)

[49] S. Hasegawa: *Atomic-Layer Superconductors and Topological Insulators*, National Synchrotron Laboratory, 中国科学技術大学 2019 年 4 月 3 日.

(講義等)

[50] 長谷川 修司：未来を拓くナノサイエンス —ノーベル賞は遠くない—, 早稲田大学基幹理工学部『理工文化論』, 2019 年 6 月 8 日, 早稲田大学 （西早稲田).

[51] 長谷川修司: 初年次ゼミナール「歴史を変えた物理」（学部 1 年生）, 2019 年度夏学期（駒場）.

[52] 長谷川修司, 秋山了太, 遠山晴子 (TA), HUANG Hongrui (TA), 樋渡 功太 (TA), 鄭 帝洪 (TA)：物理学実験 II（学部 3 年生）電子回折, 2019 年度冬学期（本郷）.

(アウトリーチ)

[53] 長谷川修司：物理チャレンジから始まる主体的な学び・生き方, 岡山物理コンテスト 2019　サイエンス講演会（岡山県教育委員会）, 2019 年 10 月 19 日, 岡山大学.

[54] 長谷川修司：私たちの生活を支えるナノサイエンス, （公財）加藤山崎教育基金 軽井沢教室, 2019 年 8 月 5 日, 軽井沢.

[55] 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 6 月 9 日, 茨城県立水戸第一高等学校 (茨城)：2019 年 12 月 18 日, 大阪星光学院中学高校 (大阪)：2020 年 2 月 1 日, 栃木県立宇都宮女子高等学校（栃木).

[56] 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」, 2019 年 8 月 8 日, 理学部 1 号館 B101 号室 (東京大学)

[57] 模擬授業および研究室見学受入神奈川県立湘南高等学校, 2019 年 8 月 8 日: 茨城県立竹園高等学校, 2019 年 8 月 8 日：茨城県立土浦第一高等学校, 2019 年 8 月 9 日:群馬県立前橋高等学校, 2019 年 11 月 12 日：栃木県立宇都宮高等学校, 2019 年 12 月 3 日.

## 4.2 福山研究室

我々はできるだけ純粋かつ単純な 2 次元物質を対象として、新規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い温度範囲で探索している。具体的な対象物質は、主に量子効果が強いヘリウム (He) の液体・固体、炭素の 2 次元シートであるグラフェンである。

### 4.2.1 2 次元ヘリウムの量子相の研究

グラファイト表面に低温で物理吸着した単原子層 $^3$He(フェルミ粒子) と $^4$He(ボース粒子) を舞台に新たな量子相の探索を行っている。グラファイト上の 2 層目の単原子層 He 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) と相変化することが従来から知られていた。我々は 2016 年に、融解比熱異常の観測から C2 相が新規な “量子液晶”であることを提唱した。続いて、単原子層 $^3$He で 2 種類のギャップレス量子スピン液体を見出し、そのうち一方の磁気的振る舞いが量子液晶状態の大きな密度ゆらぎで説明できることが分かってきた。そしていまボース粒子系の $^4$He-C2 相が低温で超流動性を示すかの探索実験に取り組んでいる。超流動性が検証されれば、この新規相が絶対零度でも流動性をもつことの証拠となるからである。

#### 超流動液晶の検証実験

$^4$He-C2 相の近傍密度では、過去複数のグループによるねじれ振り子実験で、密度に対する reentrant な超流動応答が $T \leq 300$ mK の温度域で報告されてい

る。しかし、これらの実験では、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明確でなかった。

この問題を解決するため、低温で作成した 2 層目 $^4$He 試料に対し、ねじれ振り子と比熱の同時測定を行うことができる装置を開発し改良を重ねてきた。比熱の温度・密度変化はそれぞれの相で振る舞いが大きく異なるので、比熱測定から試料の相同定が確実にできる。今年度は、前年度までに開発した装置にさらなる改良を加え、最終的にねじれ振り子専用装置と遜色ない感度と安定度を実現できた。

図 4.2.1(a) に、2 層目の L2 相 (17.5 nm$^{-2}$)、C2 相 (19.9 nm$^{-2}$)、IC2 相 (21.2 nm$^{-2}$) の試料で観測したねじれ振り子の共鳴周波数を、1 層目の固相 (IC1) データからの差分として示す。L2 相では約 200 mK 以下から有限の周波数シフトすなわち超流動応答が観測された。シフトの温度依存性は非常に緩やかで、先行研究でも報告されていたこの奇妙な振る舞いを我々も確認した。特筆すべきは C2 相の結果である。同じように約 200 mK 以下で一旦緩やかに周波数シフトが増加した後、50 mK 以下でより顕著なシフト変化が観測された。これが超流動応答であるならば、C2 相が量子液晶であることを補強するさらなる実験結果が得られたことになる。

超流動密度が 2 段ステップで変化することは逐次相転移を想起させ、回転対称性とゲージ対称性の 2 種類の対称性の破れを伴う超流動液晶では自然に期待される現象である。実際、我々の先行比熱測定では、2 種類の素励起の存在を示唆する 2 重指数関数的な比熱の温度依存性が観測されている。一方、固体相 (IC2) でも一定の周波数シフトが 200 mK 以下で見られ、超固体的な振る舞いにも見える。しかし、その変化量は測定誤差と比べて十分には大きくなく、今後さらなる検証が必要である。

図 4.2.1(b) はこれまで得られた周波数データの密度依存性で、その上部に比熱測定から決めた状態相図を示す。現在、この超流動相図の完成を目指して詳細な測定が続いている。今後、量子液晶相の構造を直接観測するための X 線あるいは中性子の散乱実験が待たれるところである。

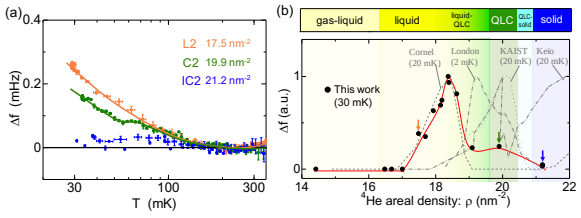



図 4.2.1: 2 層目 $^4$He の液相 (L2)、量子液晶相 (C2)、固相 (IC2) で測定したねじれ振り子の共鳴周波数シフトの温度依存性 (a)。超流動応答に対応する周波数シフトの密度依存性。上部は我々の比熱測定から決めた状態相図 (b)。

### 4.2.2 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活発な研究が続いている。これまで我々は、グラフェンがもつ 2 種類のエッジのうちジグザグ型にのみ存在する局在電子状態 (エッジ状態) と、ジグザグエッジで挟まれた幅数十 nm 以下のジグザグ・グラフェン・ナノリボン (z-GNR) で理論的に期待されるスピン偏極状態の観測に取り組んできた。z-GNR はスピントロニクスの観点からも注目されている。

我々のアプローチの特色は、グラファイト結晶あるいはエピタキシャル成長させたグラフェンを高温下で水素プラズマに曝すことで、その表面にジグザグエッジで囲まれた単原子層深さの六角形ナノピットを作成し、孤立ジグザグエッジや 2 つのナノピットの間に z-GNR を多数形成するという試料作成法にある。ジグザグエッジ状態やそのスピン偏極状態は、60 mK $\leq T \leq$ 2 K の極低温で走査トンネル顕微/分光 (STM/STS) 測定で観測している。

前年度までに、グラファイト表面に作成した幅 5~20 nm の多数の z-GNR 試料についてスピン偏極エッジ状態の STS 観測に成功し、分裂した 2 つの局所状態密度 (LDOS) ピーク間のエネルギー差 ($\Delta_{\text{p-p}}$) のリボン幅依存性、$\Delta_{\text{p-p}}$ のエッジ原子の副格子依存性などを調べた。得られた結果は 2 層グラフェンに対する第一原理計算の結果と大局的には一致するものの、$\Delta_{\text{p-p}}$ の副格子依存性や 2 つのピークの分光強度比など、定量的に説明できない性質もある。

ここで、多くの計算は孤立したナノリボンに対するもので、基板の効果を理論的に調べた研究はほとんどないことに注意が必要である。そこで我々は、基板効果を実験的に調べるため、まず SiC(0001) 上にエピタキシャル成長させた単層/2 層グラフェン試料について STS 観測を行った。しかし、この試料は基板との相互作用が強すぎるためか、あるいはエッジの直線性が不足していたためか、ジグザグエッジ状態自体を STS 観測できなかった。

#### SiC(000$\bar{1}$) 面に成長させた数層グラフェンのエッジ状態

今年度は、SiC 単結晶の Si 面ではなく反対側の C 面 (SiC(000$\bar{1}$)) にエピタキシャル成長させた z-GNR 試料について STS 観測を実施した。z-GNR 試料の作成法は、グラファイト表面に対する水素プラズマエッチ法と基本的に同じである。作成できたエッジの直線性はグラファイト表面よりは劣るが、Si 面試料とは異なり、C 面試料は基板からの相互作用が相対的に弱いため、ほとんどの孤立ジグザグエッジでエッジ状態由来の明瞭な LDOS ピークを観測できた。基板からのドーピング効果によるフェルミエネルギーのシフトは、場所によって −160 mV から +100 mV

まで広く分布するが、エッジ状態はドーピングに対してかなり安定であることが分かった。

ところが、この試料の場合、z-GNR でのスピン偏極状態に由来する LDOS ピークの分裂はまったく観測されなかった。図 4.2.2 に典型的なデータを示す。リボン幅は 7 nm で (図 4.2.2(a))、両端のエッジは B サイト原子列とほぼ並行でエッジがジグザグ方向であることが分かる (図 4.2.2(b))。図 4.2.2(c)(d) に示すように、リボンの両端のどちらにもエッジ状態由来の LDOS のシングルピークが観測されているが、それらは顕著にはスピン分裂していない。図 4.2.2(e) のトンネルスペクトルを見ると、このリボンの左端 (B 副格子エッジ) のエッジ状態は −160 mV に、右端 (A 副格子エッジ) のエッジ状態は −6 mV に現れており、両者のほぼ中間のエネルギー (−80 mV) に Dirac 点が存在する (図中 2 本の破線の交点)。このように大きなドーピングのもとで z-GNR のエッジ状態がスピン偏極しないことは、定性的には Stoner の強磁性条件から期待される結果である。

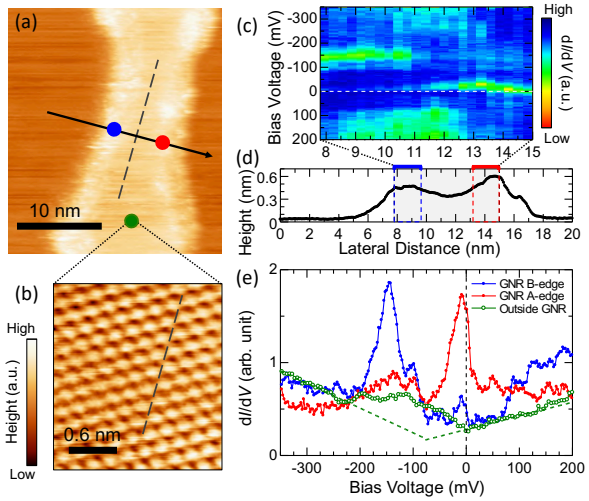



図 4.2.2: 水素プラズマ処理した SiC(000$\bar{1}$) 上グラフェンに作成したジグザグ・グラフェン・ナノリボンの STM 像 (a)、リボン内の B 副格子原子配列が分かる STM 像 (b)、(a) 図中の実線に沿ったトンネルスペクトルのカラーマップ (c)、その実線に沿った height profile (d)、そして (a) 図中の 3 地点におけるトンネルスペクトル。2 本の破線はリボン中央のスペクトルから Dirac 点 (交点) を評価するための補助線 (e)。

### 4.2.3 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 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 (CNDR) の開発を進めている。磁気作業物質は増強核磁性体 $PrNi_5$(0.2 mol) の核スピン系で、これを最大磁場 1.2 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。

前年度は、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」時の熱伝導度を $70 \leq T \leq 900$ mK の温度範囲で実測し、十分な熱絶縁性をもつことを確認した。今年度は、小型超伝導ソレノイドで Zn の臨界磁場以上の磁場を印加したスイッチ「閉」時の熱伝導度を測定した。結果は、常伝導状態で期待される温度に比例した熱伝導度が観測され、その比例係数と別途測定した残留抵抗比 (RRR = 2000) の値は Wiedemann-Franz 則とも合致する。スイッチの開閉比は $T = 30$ mK で $10^5$ と十分大きい。設計時の熱計算から、CNDR の冷却性能は熱スイッチの熱伝導性能に大きく依存することが分かっていたが、完成した熱スイッチはその要求を満たす。

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。

＜受賞＞

[1] Jun Usami, Best Poster Award at QFS2019, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2019), (The University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, August 7-13, 2019).

＜報文＞

(原著論文)

[2] Jun Usami, Nobuyuki Kato, Tomohiro Matsui, and Hiroshi Fukuyama: The Role of Substrate Roughness in Superfluid Film Flow Velocity, Journal of Low Temperature Physics, **196**, 52-59 (2019).

[3] Hiroshi Fukuyama, Makoto Tsubota, Takeo Takagi, Hyoungsoon Choi: Preface: International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018), Journal of Low Temperature Physics, **196**, 4-5 (2019).

[4] André E. B. Amend, Tomohiro Matsui, Hiroki Hibino, and Hiroshi Fukuyama: STM/S observations of graphene on SiC(0001) etched by H-plasma, Japanese Journal of Applied Physics, **58**, SIIA13 (2019).

[5] Tomohiro Mattsui, Hideki Sato, Kazuma Kita, André E. B. Amend, and Hiroshi Fukuyama: Hexagonal Nanopits with the Zigzag Edge State on Graphite Surfaces Synthesized by Hydrogen-Plasma Etching, Journal of Physical Chemistry C, **123**, 22665-22673 (2019).

[6] Shohei Takimoto, Ryo Toda, Satoshi Murakawa, and Hiroshi Fukuyama: Performances of a Compact Shielded Superconducting Magnet for Continuous Nuclear Demagnetization Refrigerator, Journal of Low Temperature Physics, published online on Jan. 2020 (DOI: 10.1007/s10909-019-02331-2).

(国内雑誌)

[7] 福山寛: 遅きをおそれず、留まるをおそれる、理学部ニュース（東京大学大学院理学系研究科・理学部）.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[8] J. Usami, R. Toda, S. Nakamura, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Simultaneous Measurements of Superfluidity and Heat-capacities of Novel Phases in $^4$He Monolayers, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2019), (The University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, August 7-13, 2019).

[9] S. Takimoto, R. Toda, S. Murakawa, and Hiroshi Fukuyama: Performances of a Compact Shielded Superconducting Magnet for Continuous Nuclear Demagnetization Refrigerator, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2019), (The University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, August 7-13, 2019).

[10] M. Kamada, K. Ogawa, R. Nakamura, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Substrate Corrugation Effects on Self-Binding of $^3$He in Two Dimensions, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2019), (The University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, August 7-13, 2019).

[11] J. Usami, K. Tokeshi, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Niobium Calorimeter for Studies of Adsorbed Helium Monolayers, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2019), (The University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, August 7-13, 2019).

[12] J. Usami, R. Toda, S. Nakamura, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Simultaneous Measurements of Superfluidity and Heat-capacities of Novel Phases in $^4$He Monolayers, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2019), (The University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, August 7-13, 2019).

(国内会議)

一般講演

[13] 花田尚輝、松井朋裕、鈴木将太、井邊昂志、谷口祐紀、福山寛、小林研介、新見康洋：グラフェンナノリボンを用いたスピン輸送測定の試み、日本物理学会 2019 年秋季大会（岐阜大学、2019 年 9 月 10-13 日）.

[14] 宇佐美潤、戸田亮、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 III、日本物理学会 2019 年秋季大会（岐阜大学、2019 年 9 月 10-13 日）.

[15] 宇佐美潤、渡慶次孝気、松井朋裕、福山寛：ヘリウム吸着膜研究のための超伝導ニオブ製熱容量測定セルの開発、日本物理学会 2019 年秋季大会（岐阜大学、2019 年 9 月 10-13 日）.

[16] 松井朋裕、André E. B. Amend、福山寛：グラフェン・ナノリボンにおけるスピン偏極ジグザグ端状態の STM/S 観測、日本物理学会 2019 年秋季大会（岐阜大学、2019 年 9 月 10-13 日）.

[17] André E. B. Amend、Tomohiro Matsui、Hiroshi Fukuyama：STM/S Observation of Spin-polarized Edge States on Graphene Zigzag Nanoribbons、第 11 回 低温センター研究交流会（東京大学、2020 年 3 月 3 日）.

[18] 宇佐美潤、戸田亮、松井朋裕、福山寛：理想的な 2 次元ボソン系における超流動と空間秩序共存の可能性、第 11 回 低温センター研究交流会（東京大学、2020 年 3 月 3 日）.

[19] 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のための磁気シールド付超伝導マグネットの開発、第 11 回 低温センター研究交流会（東京大学、2020 年 3 月 3 日）.

[20] 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超伝導熱スイッチの開発、第 11 回 低温センター研究交流会（東京大学、2020 年 3 月 3 日）.

[21] 横井雅彦、藤原聖士、河村智哉、荒川智紀、青山和司、福山寛、小林研介、新見康洋：表面弾性波照射により生じる超伝導 NbSe2 薄膜の負抵抗状態の起源、日本物理学会第 75 回年次大会（名古屋大学、2020 年 3 月 16-19 日）.

[22] 花田尚輝、浅野拓也、鈴木将太、松井朋裕、福山寛、小林研介、新見康洋：ジグザグ端グラフェンの作製及び輸送測定の試み、日本物理学会第 75 回年次大会（名古屋大学、2020 年 3 月 16-19 日）.

[23] 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用超伝導熱スイッチの開発、日本物理学会第 75 回年次大会（名古屋大学、2020 年 3 月 16-19 日）.

[24] 瀧本翔平、戸田亮、村川智、福山寛：亜鉛はんだを用いた $PrNi_5$ 核ステージの製作、日本物理学会第 75 回年次大会（名古屋大学、2020 年 3 月 16-19 日）.

[25] 宇佐美潤、戸田亮、松井朋裕、福山寛：グラファイト上単原子層ヘリウム 4 の超流動相図、日本物理学会第 75 回年次大会（名古屋大学、2020 年 3 月 16-19 日）.

[26] André E. B. Amend、Tomohiro Matsui、Hiroshi Fukuyama：STM/S study of epitaxial graphene on SiC(000-1) etched by H-plasma、日本物理学会第 75 回年次大会（名古屋大学、2020 年 3 月 16-19 日）.

招待講演

[27] 福山寛：国家戦略としてのヘリウム備蓄〜BLM を訪問して、ISSP ワークショップ「ヘリウム危機の現状と今後の課題」（東京大学物性研究所、2019 年 11 月 6 日）.

(セミナー)

[28] Hiroshi Fukuyama：Quantum Liquid Crystal and Emergent Novel States in Helium Monolayers, Department of Chemistry, University of British Columbia, (Vancouver, Canada, Aug. 14, 2019).

[29] Hiroshi Fukuyama：STS Observations of the Spin-Polarized Edge State in Zigzag Graphene Nanoribbons, Department of Physics & Astronomy, University of British Columbia, (Vancouver, Canada, Aug. 15, 2019).

[30] Hiroshi Fukuyama：Quantum Liquid Crystal Phase and Emergent Spin Liquid State in $^3$He Monolayers, Department of Quantum Materials, Max Planck Institute for Solid State research, (Stuttgart, Germany, Sept. 3, 2019).

[31] 福山寛：極低温への招待、北海道室蘭栄高校「東京大学低温センター見学会」講義 (2020 年 1 月 9 日).

## 4.3 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。$^3$He-$^4$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。

### 4.3.1 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。最近は、吸着原子に磁性体を用いて、スピンに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、新奇な磁気的物理現象の観測を目指す。

### 4.3.2 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。

#### 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、クーパ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)）。

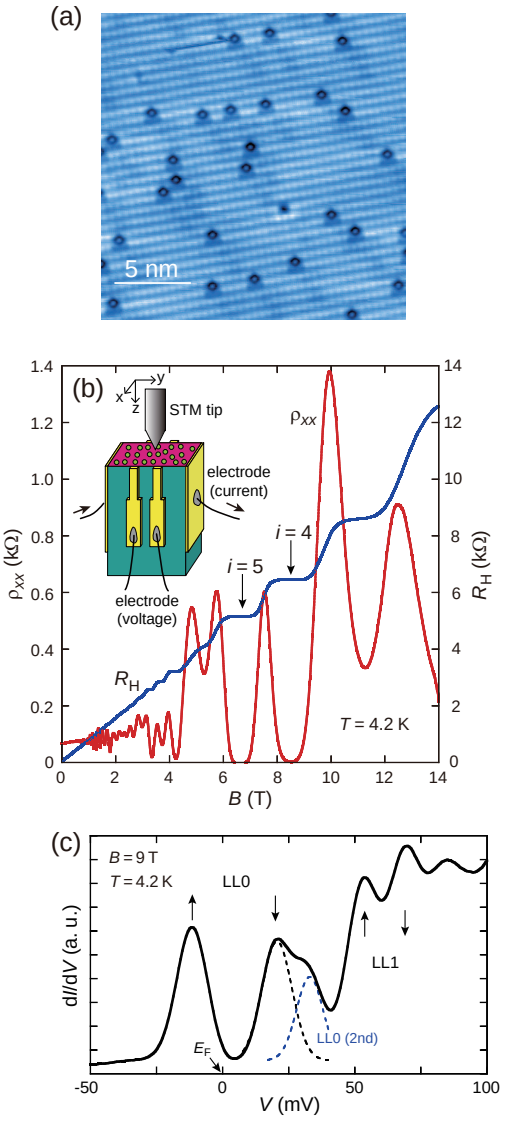



図 4.3.1: (a) InSb 劈開表面に鉄を 0.01 ML つけた場合の STM 像 ($20 \times 20$ nm$^2$)。黒い輪郭を持った丸が Fe であり、明るい縞模様が Sb の格子である。(b) 4.2 K における縦抵抗率とホール抵抗の磁場依存性。明瞭な整数量子ホール効果が観測されている。(c) 走査トンネル分光の測定例。微分コンダクタンスから 2 次元電子系の状態密度を調べることができる。ここでは、スピン分裂したランダウ準位が観測されている。

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 4.3.2 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

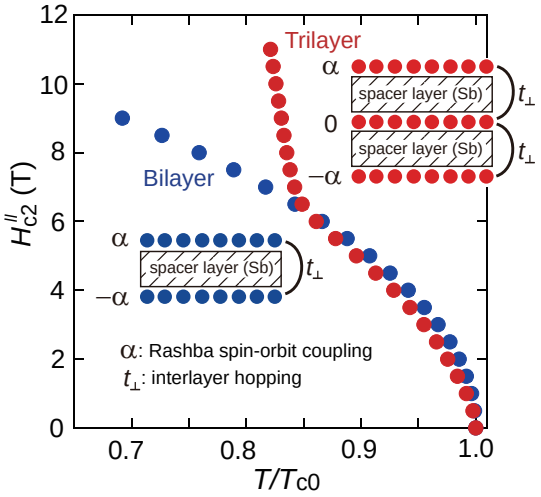



図 4.3.2: 2.0 nm の Sb をスペーサー層として、Pb 単原子膜を二層あるいは三層重ねた試料における臨界磁場の温度依存性。磁場は膜面に平行に印加しており、横軸はゼロ磁場における超伝導転移温度 $T_{c0}$ を用いて規格化している。三層系試料において、複素ストライプ相からヘリカル相へのクロスオーバーに起因すると考えられる急激な立ち上がりが、高磁場・低温領域で観測された。

部臨界磁場の温度依存性を図 4.3.2 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 4.3.2 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 4.3.2 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。

### 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

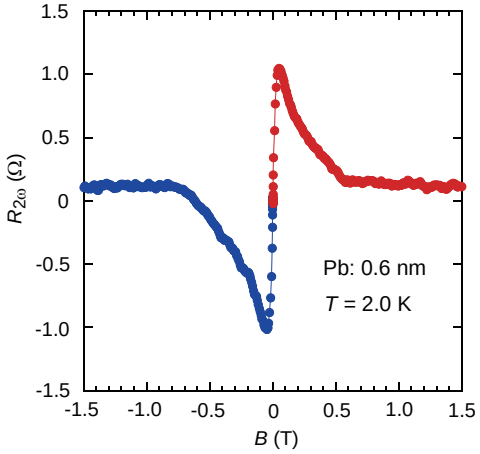



図 4.3.3: Pb 超薄膜における第二高調波から得られる電気抵抗。磁場の正負に対して反対称になっている。

な非相反伝導が観測されることが知られている。また、この効果は超伝導整流デバイスなどへの応用面からも注目されている。

本年度は、我々が近年研究を行ってきた GaAs 劈開表面上に作成された超伝導薄膜において非相反伝導が観測されるか検証を行った。鉛とアルミの超薄膜 (0.3 - 2 nm 程度) に対して磁場中の電気伝導測定を行うと、第二高調波から得られる電気抵抗が磁場の正負に対して反対称になることがわかった（図 4.3.3)。さらに、この電気抵抗は超薄膜の超伝導転移温度以下で観測されることがわかった。このことから、GaAs 劈開表面上に作成された超薄膜においても超伝導により増強された非相反伝導が生じている可能性が高いと考えられる。しかしながら、現時点においてそれが発現する機構については全く理解できていない。今後、温度依存性や磁場の角度依存性の系統的な測定を行うことにより、非相反伝導が生じる機構を明らかにする予定である。

### 2 層構造を用いたスピン三重項電子対の検証

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考えられる。本年度より、田代が中心となり、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 層構造試料を用いる研究に着手した。この試料を用いることにより、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。

図 4.3.4 は障壁層に Ni を配置した場合の結果である。1 層の Pb 超薄膜の上に Sb のスペーサー層を挟んで Ni を蒸着すると、超伝導転移温度が大きく下が

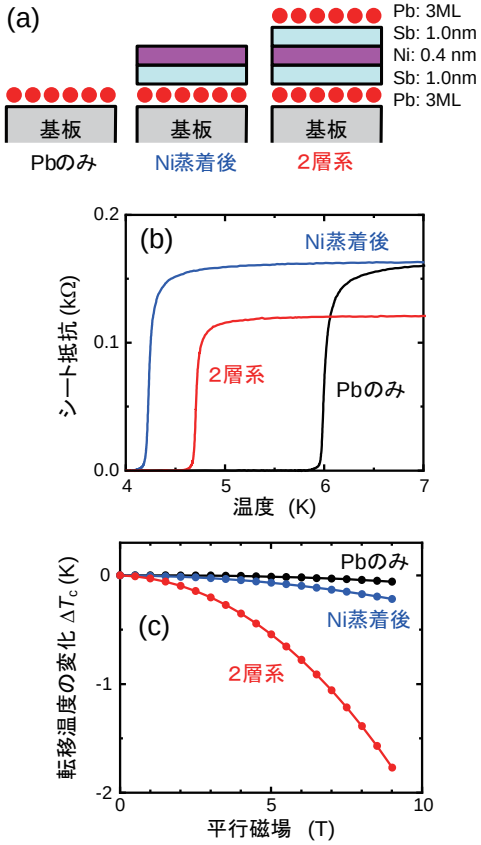



図 4.3.4: (a) 一層の Pb 超薄膜（黒)、Sb を介して Ni 超薄膜を近接させた試料（青)、Ni を障壁層に配置した Pb の 2 層構造試料（赤)。(b) ゼロ磁場における電気抵抗の温度依存性。(c) 超伝導転移温度の平行磁場依存性。

る。Ni の磁性の影響が、スペーサー層越しに Pb の超伝導に及んでいることが示唆される。さらに、Pb 層を乗せて 2 層構造を作製して、転移温度の平行磁場依存性を見ると、層間を貫く磁束の効果と思われる、1 層系では見られなかった大きな減少が観測された。中間に Ni 層があるのにもかかわらず、2 枚の超伝導層の間に Josephson 結合が存在することが示されたことになる。ただし、現時点において Ni 層が強磁性状態になっていることの確証は得られていない。今後、異常 Hall 効果や磁気抵抗のヒステリシスを詳細に調べるなどして検証を行う。

## 4.3.3 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、数ケルビンの超伝導転移温度をもつアモルファス状態であるが、極低温から昇

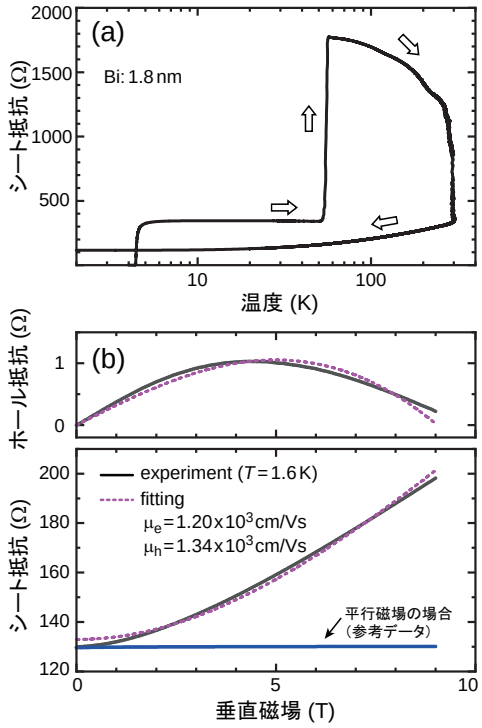



図 4.3.5: (a) 1.8 nm の Bi 超薄膜に対する熱処理効果。(b) 熱処理後の磁気抵抗効果と Hall 抵抗、およびパドル・モデルによるフィッティング。

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し、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（図 4.3.5(a)）。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として理解できる。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、大きな正の磁気抵抗効果が観測された（図 4.3.5(b)）。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は、大きな Hall 効果が期待されるが、意外なことに縦抵抗の 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が、バルクのビスマスに対する解析でしばしば用いられる 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ことを仮定する必要がある。実際、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、小さくない Hall 抵抗が観測される。

我々の実験結果とよく似た、大きな正の磁気抵抗と小さな Hall 抵抗は、電子正孔対称性をもつグラフェンの系において報告されている。Dirac 点近傍のグラフェンの磁場中電気伝導の解析にしばしば用いられるパドル・モデルを用いた解析を行ったところ、実験結果を良く再現することができた（図 4.3.5(b) の破線）。我々の Bi 超薄膜においても、Dirac 状態が形成されていることが期待される。直接的な検証を行うためには、電界効果によるキャリア密度制御が有効な方法であると考えられる。Bi 超薄膜の表面にイオン液体を乗せて、電気二重層トランジスタ構造によるキャリア密度制御を試みたところ、移動度は大きく減少したものの、キャリア密度変化とコンシステントな Hall 抵抗の変化を観測することに成功した。

＜報文＞

(原著論文)

[1] R. Masutomi, T. Okamoto, Y. Yanase: Unconventional superconducting phases in multilayer films with layer-dependent Rashba spin-orbit interactions, accepted for publication in Phys. Rev. B .

(学位論文)

[2] 伊藤尚人：「GaAs 劈開面上のビスマス超薄膜の磁場中輸送特性」（修士論文）

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[3] R. Masutomi, T. Okamoto, Y. Yanase: Observation of crossover from a complex-stripe phase to a helical phase in multiple one-atomic-layer films, Recent Progress in Graphene and two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2019) (口頭発表), (Matsue, Japan), October 6-10, 2019.

(国内会議)

一般講演

[4] 伊藤尚人、岡本徹：GaAs 劈開面上の Bi 薄膜の磁場中輸送特性、第 11 回 低温科学研究センター研究交流会（ 2020 年 3 月 3 日開催予定だったが中止．概要集による発表のみ）.

招待講演

[5] 岡本徹: 金属単原子層における二次元超伝導と磁性, 2019 年日本表面真空学会学術講演会 (つくば国際会議場) 2019 年 10 月 28 日-30 日.

## 4.4 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。

### 4.4.1 超伝導体

#### 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

ヒッグスモードは超伝導のオーダーパラメータ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オーダーパラメータ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されている。特に銅酸化物高温超伝導体においては、電荷密度波や電荷・スピンストライプなどの複数の競合秩序が存在することが明らかにされており、その超伝導との関係の解明や、それら多重秩序相の光による制御が模索されている。ヒッグスモードの観測はその新たな手がかりを与えるものと期待される。本年度、我々はこのヒッグスモード観測を利用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。超伝導ゆらぎは超伝導転移温度 $T_c$ 以上での局所的なクーパー対形成と関連していると考えられ、銅酸化物高温超伝導体において超伝導ゆらぎがどの温度から発現するかは高温超伝導の機構解明に向けて重要な問題である。このため、これまでテラヘルツ (THz) 周波数帯の光学伝導度測定や走査型トンネル顕微鏡（STM)、角度分解光電子分光など多様な実験手法によって調べられてきたが、超伝導ゆらぎのオンセット温度は実験手法ごとに異なり、統一的な理解は得られていない。そこで我々は、超伝導のオーダーパラメータを直接反映するヒッグスモードを用いて超伝導ゆらぎのオンセット温度の決定を目指した。

不足ドープ及び過剰ドープ領域の $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ (Bi2212) 薄膜試料に対し、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 THz パルスを照射し誘起された非平衡ダイナミクスを近赤外光パルスの反射率変化 $\Delta R/R$ を通して測定した。反射率変化 $\Delta R/R$ には THz 電場波形の 2 乗に追随して振動する信号成分が現れ（THz Kerr 効果)、その振動の振幅が急速に発達する温度 ($T_1^{\rm ons}$) は $T_c$ より 10 K 程度高いことがわかった。これまでの研究から、超伝導転移温度以下での THz Kerr 効果の信号はヒッグスモードに由来することを明らかになっていることから、Bi2212 薄膜試料における $T_1^{\rm ons}$ はヒッグスモードのオンセット温度、即ち超伝導の位相コヒーレンスが発達する温度と考えられた。この解釈を確かめるため、THz 周波数帯の光学伝導度測定によって超流動密度 $N_s$ を評価すると、不足ドープと過剰ドープの Bi2212 薄膜試料において $T_1^{\rm ons}$ は $N_s$ のオンセット温度と確かに一致した。さらに、THz Kerr 信号は $T_1^{\rm ons}$ よりも 100 K 程度高温の $T_2^{\rm ons}$ まで残存することがわかった。幅広い正孔ドープ濃度の Bi2212 単結晶試料においても $T_2^{\rm ons}$ は $T_1^{\rm ons}$ よりかなり高温に位置し、さらに $T_2^{\rm ons}$ は STM で報告されたギャップ形成のオンセット温度と一致することから、$T_2^{\rm ons}$ は局所的なクーパー対形成温度に相当している可能性が高いと考えられる。

今後はヒッグスモード観測の手法を用いて、光による銅酸化物高温超伝導体の超伝導位相コヒーレンスの増強の研究を展開していく予定である。

#### 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

超伝導体に超伝導ギャップエネルギー程度の光子エネルギーを持つ光を照射すると、ヒッグスモードと光との非線形相互作用を介して第 3 高調波が発生する。我々は、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 THz 波光源 TELBE の高強度かつ狭帯域な THz 波パルス光源を用いて、4 種類の銅酸化物高温超伝導体 Bi2212、$La_{1.84}Sr_{0.16}CuO_4$、$DyBa_2Cu_3O_{7-x}$ に対して THz 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 高調波が観測され、その強度は超伝導転移温度 $T_c$ 付近以下で急増すること、入射 THz 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。第 3 高調波発生強度の温度依存性には s 波超伝導体で観測されたような共鳴増大が見られないことから、銅酸化物高温超伝導体のヒッグスモードはオーバーダンプ的であると考えられる。一方で、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。この結果を簡単な結合振動子モデルで考察し、ヒッグスモードと結合する新たな集団励起モードの存在を示唆するものと解釈した。さらに、すべての試料において $T_c$ 以上でも有意な第 3 高調波を観測し、クーパー対形成が転移温度の 1.5 倍程度の高温から始まっている可能性を示唆する結果を得た。

#### 鉄系超伝導体の光制御

鉄系超伝導体の多くは Γ 点に正孔バンド、M 点に電子バンドを持ち、転移温度 $T_c$ 以下でその両方に超伝導ギャップが開くマルチバンド超伝導体である。中でも FeSe や $FeSe_{1-x}Te_x$ はこれらのバンドのフェルミエネルギーが 10 meV 程度と小さく、外部からのキャリア注入などによってフェルミ面のトポロジーが大きく変化する。FeSe においてはこのフェルミ面の変化に伴って $T_c$ が 8 K から 40 K 程度まで劇的に上昇することが報告されており、超伝導発現機構とも関連して興味が持たれている。我々は鉄系超伝導体 $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ において光キャリア注入による相制御を目指し、THz 波を用いてその光励起状態を調べた。超伝導体に強い THz 波を照射すると、ヒッグスモードや超伝導準粒子励起と THz 波が非線形に結合し、入射 THz 波の 3 倍の周波数を持つ第 3 高調波が高効率に発生することが s 波超伝導体や銅酸化物

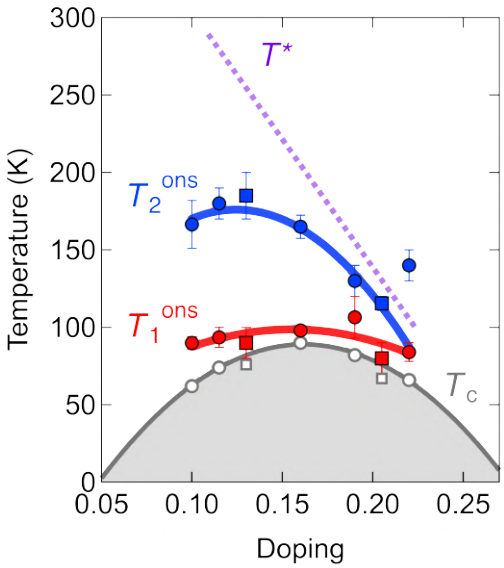



図 4.4.1: ヒッグスモードの観測から調べた銅酸化物高温超伝導体 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ の相図。$T_1^{ons}$ はヒッグスモードのオンセット温度で位相コヒーレンス発達の温度に対応する。$T_2^{ons}$ は局所的なクーパー対形成温度を示唆する。$T^*$ は擬ギャップ形成温度。

系高温超伝導体において示されている。我々はこの第 3 高調波発生 (THG) が超伝導秩序に敏感であることに着目し、近赤外光パルス照射の効果を THG の測定から調べた。まず近赤外光を照射しない平衡状態にある試料からの THG を測定した結果、$T_c$ 以下で立ち上がり、超伝導秩序変数の成長に伴って増加する THG 信号を観測した。続いて転移温度以下にある試料に光パルスを照射した状態で THG を測定したところ、光励起後 2 ps 程度まで THG 信号の増強が観測され、その後は減衰・消失する様子が見られた。さらに光励起後の THz 周波数帯の光学伝導度を測定したところ、光励起後 1.5 ps 程度の時間領域においては超流動密度を反映する光学伝導度虚部の増加が観測され、その後温度上昇で記述できる状態に熱緩和する様子が見られた。この二つの異なるプローブによる光励起ダイナミクスの実験から、光励起により過渡的に超伝導が増強していることを見出した。

### 4.4.2 二次元層状物質

#### 二次元層状物質の光による量子クエンチと電子相制御

量子クエンチ、すなわち量子系のハミルトニアンを瞬時に変化させたときの秩序相の時間発展では、平衡状態には現れない準熱的な状態が過渡的に現れることがあり、非平衡量子ダイナミクスの問題として理論研究が進んでいる。多重の秩序が絡み合う強相関電子系において、新たな電子相探索の手法としてこの量子クエンチに注目して研究に取り組んでいる。特に、近年のレーザー技術の発展によってテラヘルツ波や中赤外光領域の高強度超短パルス光源が得られるようになり、これを用いて低エネルギーのフォノンや集団励起モードを大振幅駆動することが可能になってきた。これは、実効的に電子相関や電子トランスファーエネルギーを動的に変化させうることを意味する。我々は高強度 THz 波（光子エネルギー ~ 4 meV）を用いて電荷密度波物質の格子振動を励起することによる電子相制御を目指した。

電荷密度波 (CDW) および超伝導を示す層状遷移金属ダイカルコゲナイド 3R-$Ta_{1+x}Se_2$ の CDW 相に対して、CDW の振幅モード（電荷密度波の振幅振動を伴う格子振動モード）を高強度 THz 波で励起することで生じる非平衡状態をポンプ-プローブ分光によって調べた。まず近赤外超短パルスを用いた光ポンプ-光プローブを行い、中心振動数 2.3 THz の CDW 振幅モードが存在することを確かめた。さらに、この振幅モードが高強度 THz 波によっても励起されることを THz ポンプ-光プローブ分光によって明らかにした。このように振幅モードが駆動された際の THz 領域での差分光学伝導度を測定すると、その実部にギャップ構造が、対応して虚部にディップ構造が現れた。失われたスペクトルウェイトは高周波側へ移動することから、ギャップ形成の起源として、THz 波励起による隠れた CDW 相の出現が示唆された。励起直後の差分光学伝導度のダイナミクスを詳細に調べると CDW 振幅モードの振動数で振動しており、さらに隠れた CDW 相は平衡状態の CDW 転移温度以下で顕著になることから、隠れた CDW 秩序と平衡状態の CDW 秩序との間に明瞭な相関があることを見出した。

### 4.4.3 半導体電子正孔系

#### 光誘起電子正孔 BCS 状態の観測

高密度に光励起された半導体中ではクーロン力が遮蔽されるため、水素原子様の励起子は安定に存在できない。しかし、十分に低温では緩く結合した電子正孔クーパー対が多体効果によって安定化し、協力的に量子凝縮して電子正孔 BCS 状態になると考えられている。しかし、多くの半導体では予想される転移温度は一般に極めて低くなることが理論的に予想されており、実際、準熱平衡状態における電子正孔 BCS 状態は未だ明確に実証されていない。そこで我々は、直接遷移型半導体の励起子に共鳴する強いレーザー光を照射することで、電子系に余剰のエネルギーを注入することを避け、光励起直後から低温の電子正孔対（低密度では励起子）をつくる手法に着目した。環境温度 5 K に冷却したバルク GaAs を対象として光強度を徐々に増加させると、光吸収スペクトルが、励起子的な構造から電子正孔 BCS 状態

を反映する構造へと連続的に移り変わることを見出した。平均場理論の範囲で理論シミュレーションを行い、光によって生成される励起子が電子正孔クーパー対と連続的につながっていることを確認した。

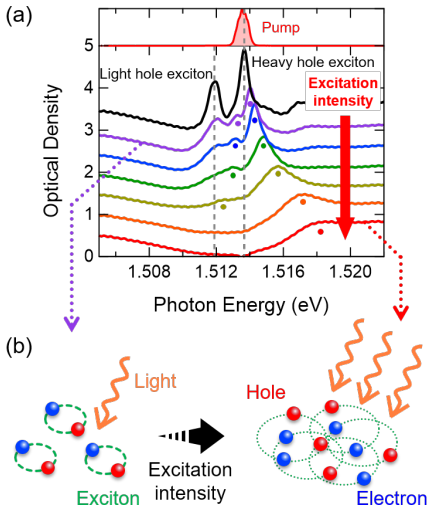



図 4.4.2: (a) レーザー光の照射下における GaAs の過渡光吸収スペクトル（図 (a) 下段)。励起光の波長 (図 (a) 上段) は励起子のエネルギー（図中「重い正孔励起子」）に合わせている。励起光強度の増大に伴い、励起子の吸収ピークが二つに分裂し (図中の点)、崖のような構造に変化していく。これは励起子の状態から電子正孔 BCS 状態に変遷していく様子を示している。(b) 励起子の集団から電子正孔 BCS 状態への移り変わりの概念図。光強度の増大に伴い、電子正孔対の密度が上昇して励起子から電子正孔クーパー対へと変わっていく。

この光励起された電子正孔 BCS 状態のエネルギー構造をより明瞭に観測するために四光波混合の測定を行った。四光波混合は複数の光波が物質中で新しい光波を生み出す非線形光学過程であり、電子正孔対のコヒーレンスに由来する現象を観測するのに適している。本研究では二本の光波を用い、一方には励起子吸収線に共鳴した狭帯域・高強度の近赤外光パルスを用いて電子正孔 BCS 状態を光誘起した。もう一方には広帯域の近赤外超短パルスを採用し、電子正孔系の時間発展を高い時間分解能かつ広い周波数帯域で追跡することを試みた。

この結果、励起強度が低いときには励起子や励起子分子に由来する信号のみが見られたが、BCS 的な相関が生成される高強度領域では励起子由来の信号が分裂していく様子が観測された。これは光誘起された電子正孔 BCS 状態をドレスト状態として捉えたものとみなすことができ、ドレスト状態のエネルギーやスペクトル幅など、以前の実験手法ではやや得づらかった情報をはっきり抽出することができた。これはインコヒーレントな背景を伴うポンプ・プローブ分光と異なり、純粋にコヒーレントな信号のみを観測する四光波混合の利点である。本研究のように異なる光源を用いた非縮退四光波混合は、今後、強い光と物質との相互作用を探るうえで重要なツールになっていくことが予想される。また現時点では上記の実験結果と定量的に比較できるような理論が存在しないため、高次の相関を考慮した微視的理論が発展することも期待される。

### 4.4.4 トポロジカル非線形光学

固体物質中の電子波動関数が持つ幾何学的な位相がもたらす特異な非線形光学応答、トポロジカル相が示す非自明な電気磁気現象、フロッケエンジニアリングに基づくトポロジカル相の光制御に関する研究を開始した。

#### Bi 薄膜からのテラヘルツ波放射

Bi は巨大反磁性をはじめとする特異な物性を数多く示す物質であり、古くから盛んに研究されてきた。その性質の多くは L 点における特殊なバンド構造に起因するものであると理解されている。この特殊なバンド上の電子は、相対論的量子力学のディラック方程式で記述される電子と類似した性質を持っていることから、ディラック電子とも呼ばれる。近年では、ディラック点に付随するベリー位相によって大きなスピンホール効果が生じることが理論的に予測され、スピントロニクスの観点からも新たな注目を集めている。最近、本物理学教室林研究室から、この Bi 薄膜に円偏光を照射することで、直線偏光の照射では生じない光電流が発生することが報告された。この光電流は励起光のヘリシティを反転すると流れる向きが反転するという性質を持つ。この円偏光に誘起される光電流現象をテラヘルツ波発生から調べた。具体的には、Bi 薄膜に円偏光のフェムト秒レーザーパルスを照射し、誘起される過渡的な光電流によって放射されるテラヘルツ波を観測することを試みた。その結果、励起光パルスのヘリシティの反転に伴い位相が反転するようなテラヘルツ波放射が観測された。さらに光の入射角、放射テラヘルツ波の偏光、Bi 薄膜の厚み依存性についての系統的な測定を行い、それらの結果からテラヘルツ波放射を起こす過渡電流の起源について考察した。さらに放射テラヘルツ波の電場波形から過渡電流の時間発展の情報を抽出し、それによって過渡電流の緩和ダイナミクスについての情報が得られた。このような情報は輸送測定では得ることは難しく、テラヘルツ波放射のサブサイクル時間領域測定によってはじめて得られる情報である。円偏光によってスピン流が誘起されるメカニズムについては Bi のディラック電子の存在に由来する可能性が高く、今後詳しく研究していく予定である。

### 光パラメトリック増幅器と高出力中赤外光源の開発

波長 3–50 $\mu$m の電磁波は中赤外光とよばれ、可視光とテラヘルツ光の中間の波長領域に位置する。これまで中赤外領域では高出力かつ安定な超短パルス光源を得ることが難しく、またその取り回しも困難であったため、固体の光励起状態の研究において未開拓な波長領域であった。一方で中赤外領域には様々な物質のフォノン吸収が存在するため、中赤外光を照射して固体中のフォノンを大振幅駆動することで平衡状態では見られない特異な性質が発現することが期待される。また、近年理論的研究が進展している固体におけるフロッケ状態を実現するためにも、中赤外光は重要な波長領域となっている。このような新奇な量子現象の観測を目的とし、波長可変で高出力な中赤外光源の開発を行った。

今回開発した光源では、まず光パラメトリック増幅で波長の異なる 2 つの近赤外光を発生させ、その差周波発生により中赤外光を得ている。そのため高強度かつ安定な中赤外光を得るためには、光パラメトリック増幅の変換効率や安定性を両立する必要がある。今回開発した光源では光パラメトリック増幅を 2 段階に分けて行うことで高強度かつ安定な中赤外光パルス生成に成功した。出力は中心波長を 7–17 $\mu$m の範囲で任意に変化させることができ、中心波長 7.5 $\mu$m では 3 $\mu$J のパルスエネルギーが得られた。またパルスごとのエネルギーのゆらぎも 5%以内に抑えられている。今後は開発した光源を用いて、銅酸化物を始めとした超伝導体、ワイル半金属のフロッケエンジニアリングの研究を展開する予定である。

＜受賞＞

[1] Kota Katsumi: International conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2019), Young Researchers Award, June, 2019.

[2] 吉川尚孝：「高強度レーザー電場による単原子層固体の高次高調波発生」、第 36 回（2019 年度）井上研究奨励賞、2019 年 12 月

[3] 室谷悠太：理学系研究科研究奨励賞、2020 年 3 月

＜報文＞

(原著論文)

[4] Yuta Murotani and Ryo Shimano: Nonlinear optical response of collective modes in multiband superconductors assisted by nonmagnetic impurities, Phys. Rev. B **99**, 224510 (2019).

[5] Sachiko Nakamura, Yudai Iida, Yuta Murotani, Ryusuke Matsunaga, Hirotaka Terai, Ryo Shimano: Infrared Activation of the Higgs Mode by Supercurrent Injection in Superconducting NbN, Phys. Rev. Lett. **122**, 257001 (2019).

[6] Naotaka Yoshikawa, Masayuki Takayama, Naoki Shikama, Tomoya Ishikawa, Fuyuki Nabeshima, Atsutaka Maeda, Ryo Shimano: Charge carrier dynamics of FeSe thin film investigated by terahertz magneto-optical spectroscopy, Phys. Rev. B **100**, 035110 (2019).

[7] Hiroaki Niwa, Naotaka Yoshikawa, Kaito Tomari, Ryusuke Matsunaga, Dongjoon Song, Hiroshi Eisaki, Ryo Shimano: Light-induced nonequilibrium response of the superconducting cuprate $La_{2-x}Sr_xCuO_4$, Phys. Rev. B **100**, 104507 (2019). (Editors' suggestion)

[8] Yuta Murotani, Changsu Kim, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, Ryo Shimano: Light-driven electron-hole Bardeen-Cooper-Schrieffer-like state in bulk GaAs, Phys. Rev. Lett. **123**, 194401 (2019). (Editors' suggestion)

[9] Hao Chu, Min-Jae Kim, Kota Katsumi, Sergey Kovalev, Robert David Dawson, Lukas Schwarz, Naotaka Yoshikawa, Gideok Kim, Daniel Putzky, Zhi Zhong Li, Hélène Raffy, Semyon Germanskiy, 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: Phase-resolved Higgs response in superconducting cuprates, Nature Communications, in press.

[10] Ryo Shimano and Naoto Tsuji: Higgs mode in Superconductors, Annual Review of Condensed Matter Physics **11**, 103-124 (2020).

(国内雑誌)

[11] 島野亮・森本剛史・岡本博、「テラヘルツ・赤外パルスによるサブサイクル分光」、固体物理＜高強度テラヘルツ・赤外パルスが拓く非平衡物性＞特集号、vol. 54, pp 541-552 (2019).

[12] 島野亮・室谷悠太・勝見恒太、「超伝導のヒッグスモード―最近の研究から―」、固体物理＜高強度テラヘルツ・赤外パルスが拓く非平衡物性＞特集号、vol. 54, pp 623-636 (2019).

(プレスリリース)

[13] 島野亮、室谷悠太、秋山英文: レーザー光で半導体中に超伝導に類似した電子正孔ペア状態をついに実現, 2019 年 11 月 7 日.

(学位論文)

[14] 室谷 悠太：半導体中に光誘起された電子正孔 BCS 状態の研究（博士論文）

[15] 菅沼 大貴：電荷密度波物質 $TaSe_2$ における光誘起相転移の研究（修士論文）

[16] 礒山 和基：テラヘルツ分光法による鉄系超伝導体 $FeSe_{1-x}Te_x$ の光励起ダイナミクスに関する研究（修士論文）

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[17] Kazuki Isoyama, Naotaka Yoshikawa, Keisuke Tomita, Naoki Shikama, Tomoya Ishikawa, Fuyuki Nabeshima, Atsutaka Maeda, Ryo Shimano: Mid-infrared Pulse Induced Nonequilibrium Dynamics in FeSe Thin Film (poster presentation), 2019 CIFAR Quantum Materials Summer School, UBC, Vancouver Campus, Canada, April 11 -13, 2019.

[18] Kota Katsumi, Zhi Zhong Li, Hélène Raffy, Yann Gallais, Ryo Shimano: Study of superconducting fluctuation in cuprate superconductors through the observation of Higgs mode oscillation (poste), Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS 2019), Univ. Tokyo, Tokyo, Japan, June 17-21, 2019.

[19] Hiroaki Niwa, Naotaka Yoshikawa, Dongjoon Song Song, Hiroshi Eisaki, Ryo Shimano: Photoexcited dynamics of superconductivity in $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ probed by Josephson plasma resonance (poster), Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS 2019), Univ. Tokyo, Tokyo, Japan, June 17-21, 2019.

[20] Naotaka Yoshikawa, Kazuki Isoyama, Keisuke Tomita, Naoki Shikama, Tomoya Ishikawa, Fuyuki Nabeshima, Atsutaka Maeda, Ryo Shimano: Nonequilibrium dynamics of iron-based superconductor FeSe induced by mid-infrared light excitation (poster), Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS 2019), Univ. Tokyo, Tokyo, Japan, June 17-21, 2019.

[21] Sachiko Nakamura, Yudai Iida, Yuta Murotani, Ryusuke Matsunaga, Hirotaka Terai, Ryo Shimano: Infrared activation of Higgs mode in superconducting NbN by supercurrent injection (poster), Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS 2019), The University of Tokyo, Tokyo, Japan, June 17-21, 2019.

[22] Yuta Murotani and Ryo Shimano: Effects of nonmagnetic impurity scattering on nonlinear terahertz response by Higgs and Leggett modes (poster), Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS 2019), Univ. Tokyo, Tokyo, Japan, June 17-21, 2019.

[23] Sachiko Nakamura, Yudai Iida, Yuta Murotani, Ryusuke Matsunaga, Hirotaka Terai, Ryo Shimano: Infrared activation of Higgs mode in superconducting NbN by supercurrent injection (poster), The Challenge of 2-Dimensional Superconductivity, Leiden Univ. Leiden, Nederlands, July 8-12, 2019.

[24] Yuta Murotani and Ryo Shimano: High-density electron-hole BCS-like dressed state in bulk GaAs (poster), Fundamental Optical Processes in Semiconductors (FOPS) 2019, Banff Centre for Arts and Creativity, Banff, Canada, August 4-9, 2019.

[25] Kota Katsumi, Zhi Zhong Li, Hélène Raffy, Yann Gallais, Ryo Shimano: Superconducting fluctuation probed by the terahertz pulse-driven Higgs mode in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ thin films (poster), Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials 2019 Workshop, University of British Columbia Vancouver Campus, December 9-10, 2019.

[26] Yoshua Hirai, Naotaka Yoshikawa, Hana Hirose, Masashi Kawaguchi, Masamitsu Hayashi, Ryo Shimano: Terahertz emission from circular photogalvanic effect in bismuth thin films, APS March Meeting 2020, Denver, United States, March 2-6, 2020.(Meeting was cancelled. Only the abstract avaialbe on the web.)

招待講演

[27] Ryo Shimano: Dynamical control of superconducting order parameter by light, International Conference on Frontiers of Correlated Electron Sciences(FCES), Koshiba Hall, Univ.of Tokyo, May 30, 2019.

[28] Naotaka Yoshikawa: Higgs mode in iron-based superconductor $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$, International Conference on Ultrafast and Nonlinear Dynamics of Quantum Materials (Paris Ultrafast 2019), Paris, France, June 5, 2019.

[29] Ryo Shimano: Higgs spectroscopy of high $T_c$ cuprates in equilibrium and nonequilibrium, Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS 2019), The University of Tokyo, Tokyo, Japan, June 18, 2019.

[30] Ryo Shimano: Electron-hole Bardeen-Cooper-Schrieffer state in photoexcited semiconductors , Fundamental Optical Processes in Semiconductors (FOPS) 2019, Banff Centre for Arts and Creativity, Banff, Canada, August 8, 2019.

[31] Ryo Shimano: Electron-hole Bardeen-Cooper-Schrieffer state in photoexcited semiconductors, Workshop on Quantum Materials from Frequency to Time Domain, UBC, Vancouver Campus, Canada, August 17, 2019.

[32] Ryo Shimano: Higgs spectroscopy of unconventional superconductors, Workshop on Ordering and Dynamics of Correlated Quantum Systems, É vora, Portugal, October 25, 2019.

[33] Ryo Shimano: Electron-hole Bardeen-Cooper-Schrieffer state in photoexcited semiconductors, ENS-UT Workshop, Univ. of Tokyo, Tokyo, November 25, 2019.

[34] Ryo Shimano: Nonreciprocal response in superconductors in the terahertz regime, Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials 2019 Workshop, UBC, Vancouver Campus, Canada, December 9, 2019.

(国内会議)

一般講演

**• 日本物理学会 2019 年秋季大会 (2019 年 9 月 10-13 日、岐阜大学)**

[35] 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 $TaSe_2$ の広帯域テラヘルツポンプ－プローブ分光

[36] 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：FeSe 薄膜のテラヘルツ磁気光学分光

[37] 中村祥子, 勝見恒太, 寺井弘高, 島野亮：電流注入下の s 波超伝導体 NbN におけるピン止めされた磁束に由来する偶数次高調波発生

**• 第 11 回低温科学研究センター研究交流会 (2020 年 3 月 3 日、東京大学 (web 開催))**

[38] 室谷悠太, 金昌秀, 秋山英文, 島野亮：半導体 GaAs 中に光誘起された電子正孔クーパー対状態

[39] 勝見恒太, Zhi Zhong Li, Hélène Raffy, Yann Gallais, 島野亮：ヒッグスモードを用いた銅酸化物超伝導体 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ における超伝導ゆらぎの観測

[40] 礒山和基, 吉川尚孝, Wong Jeremy, 勝見恒太, 色摩直樹, 崎下雄稀, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮：テラヘルツ波で見る鉄系超伝導体 $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ の光励起状態

[41] 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：テラヘルツ波励起による CDW 物質 3R-$TaSe_2$ の光誘起相転移

[42] 西田森彦, 勝見恒太, 島野亮：光パラメトリック増幅と差周波発生を用いた中赤外光源の開発

[43] 中村祥子, 勝見恒太, 寺井弘高, 島野亮：電流注入下の s 波超伝導体 NbN における非相反テラヘルツ第 2 高調波発生

**• 日本物理学会第 75 回年次大会 (2020 年 3 月 16-19 日、名古屋大学 (現地開催中止))**

[44] 室谷悠太, 金昌秀, 秋山英文, 島野亮：バルク GaAs 中の光誘起電子正孔 BCS 状態における四光波混合

[45] 吉川尚孝, 平井誉主在, 廣瀬葉菜, 河口真志, 林将光, 島野亮：Bi 薄膜からのテラヘルツ波放射

[46] 礒山和基, 吉川尚孝, Wong Jeremy, 勝見恒太, 色摩直樹, 崎下雄稀, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮：光励起された鉄系超伝導体 $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ からのテラヘルツ第 3 高調波発生

招待講演

[47] 島野亮：超伝導体からのテラヘルツ高調波発生、日本物理学会 2019 年秋季大会　領域 5, 領域 1, 領域 4, 領域 7, 領域 8 合同シンポジウム「高次高調波発生の最近の進展；発生機構と物質科学への応用」, 岐阜大学, 2019 年 9 月 10 日

(セミナー)

[48] 島野　亮: 超伝導体のヒッグスモード, 東邦大学物理学科コロキウム, 東邦大学, 2019 年 5 月 15 日

[49] Ryo Shimano: Higgs mode in superconductors, Seminar at Stewart Blusson Quantum Material Institue, UBC, Vancouver, Canada, August 16, 2019.

[50] Ryo Shimano: Higgs mode in superconductors, Physics Department Seminar, University of Paris, Paris, France, September 19, 2019.

[51] Ryo Shimano: Higgs mode in superconductors - a route to control the superconductivity by light-, Seminar at the Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA) , ENSTA, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, September 25, 2019.

## 4.5 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。令和元年度は、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。

### 4.5.1 スピン軌道相互作用を利用した擬スピン量子相

#### 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いてのマイルストーンは、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) 格子上での厳密解の模型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、この模型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。さらに、トポロジカル量子コンピュータへの応用可能性などから非常に注目されている。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 $H_3LiIr_2O_6$ においてこの模型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 $d^5$ 酸化物はボンド依存の異方的なスピン間相互作用を実現することが出来る擬スピン 1/2 を持ち、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、キタエフ型相互作用を持ちうる広い物質群に対して物質スクリーニングを推進している。

一つの方向性として、ここ数年来キタエフ候補物質の新しい舞台として理論的に提案されたランタノイド系の一つ、$Pr^{4+}$ 化合物の $Na_2PrO_3$ の磁性状態を明らかにしたことを挙げる。$^{23}$Na-NMR 測定とその解析から、渦糸的磁気構造の非コリニア反強磁性が基底状態と思われ、$Na_2PrO_3$ が理論予想の相図上

で反強磁性キタエフスピン液体に近い磁性状態にあることが確認できた。まだ詳細が知られていない $4f^1$ 類縁ハニカム構造物質はより液体に近い場所に位置する可能性がある。$Na_2PrO_3$ の研究は今後の真なるキタエフスピン液体の実現を目指すための指針を与えたと言える。現在、$Ce^{3+}$ ハロゲン化合物など次なる候補物質の良質な単結晶の合成に成功したところであり、キタエフ系のマヨラナ物性の評価を進めている。

他方では擬スピン 1/2 ハニカム構造化合物に対して先進的な加圧装置を用いた圧力下物性制御によりキタエフ液体を実現させることを目指している。これまでの超高圧 NMR 技術に加えて、迅速な高圧磁気相図作成の為に新たな超高圧下磁化測定技術を開発している。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。我々は最先端の非磁性超硬素材の採用に加え、3D-CAD と磁界シミュレーションを組み合わせることにより従来の 1/10〜1/100 にバックグラウンド信号の最小化を行い、さらに最小自乗フィットによらない磁化推定法の開発により目標を達成した。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 LS 結合の極限で、$J_{\rm eff}=0$ 基底状態からなる非磁性モット絶縁体状態と $J_{\rm eff}=1$ 励起子の凝縮による「励起子磁性」の競合が予想されている。前年度まで、$4d^4$ $Ru^{4+}$ を含むハニカム構造ルテニウム酸化物 $Li_{2+x}RuO_3$ 及び $Ag_3LiRu_2O_6$ に着目し、$J_{\rm eff}=0$ 非磁性モット絶縁体状態の存在と励起子磁性との競合を明らかにした。令和元年度は、立方対称を有し、より理想的な系である $K_2RuCl_6$、$K_2OsCl_6$ に着目し、LS 結合の極限の $J_{\rm eff}=0$ 非磁性モット絶縁体状態と $jj$ 結合の極限であるバンド絶縁体の競合を調べた。光学応答と RIXS 測定とバンド計算の比較から特に Os 系について $jj$ 結合性について知見を得た。今後は、高圧印加により励起子磁性の発現を目指す。

## 4.5.2 3 次元ディラック電子

### アンチペロブスカイト型酸化物

$Sr_3PbO$ 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。これまで、アンチペロブスカイト系のディラック的特徴を巨大横磁気抵抗効果と量子振動などから明らかにしてきた。また、$^{207}$Pb-NMR 測定と磁化測定からディラック半金属特有の温度依存する巨大反磁性を見出した。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いた。令和元年度は、カイラル異常を検証するために新開発の小型二軸回転機構と雰囲気試料パックを用いて精密角度回転磁気抵抗測定を行った。その結果、負の縦磁気抵抗効果とカレントジェット効果を分離して観測することに概ね成功した。現在、再現性を高めたより確定的な測定を進めている。

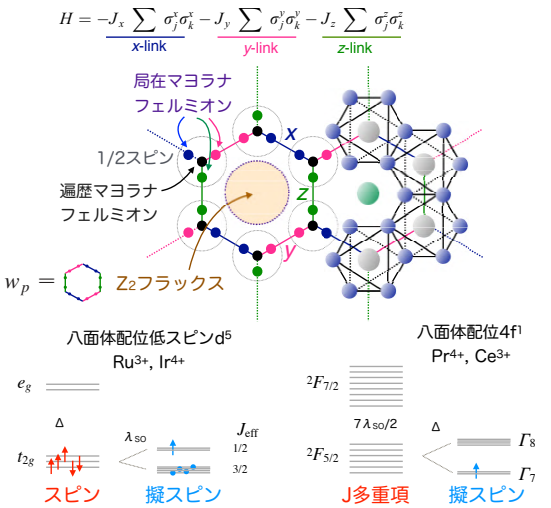



図 4.5.1: ハニカム格子・ハイパーハニカム格子系における量子スピン液体 (左) Kitaev Honeycomb 模型ハミルトニアンのスピンとマヨラナフェルミオンの関係。(右) 異方的相互作用を持つ擬スピン 1/2 での八面体配位結晶場分裂 Δ とスピン一軌道相互作用 $\lambda_{\rm SO}$ の関係。(左) 現在まで Mott 転移、主要なキタエフ候補物質の研究対象とされてきた代表的な $4d^5, 5d^5$ 電子。(右) 最近キタエフ型相互作用の実現が提唱された $4f^1$ 電子。

＜報文＞

(原著論文)

[1] S. Bette, T. Takayama, V. Duppel, A. Poulain, H. Takagi, R. E. Dinnebier: Crystal structure and stacking faults in the layered honeycomb, delafossite-type materials $Ag_3LiIr_2O_6$ and $Ag_3LiRu_2O_6$, Dalton Transactions **48**, 9250 - 9259 (2019).

[2] K. V. Dorn, B. Blaschkowski, H. Bamberger, J. van Slageren, K. Doll, R. Claus, Y. Matsumoto, H. Takagi, and I. Hartenbach: Black Current: Structure, Characterization, and Optoelectronic Properties of $Ce_3Cl_3[MoO_6]$, Chem. Eur. J. **25**, 7921 - 7926 (2019).

[3] G. Grissonnanche, A. Legros, S. Badoux, E. Lefrançois, V. Zatko, M. Lizaire, F. Laliberté, A.

Gourgout, J.-S. Zhou, S. Pyon, T. Takayama, H. Takagi, S. Ono, N. Doiron-Leyraud, and L. Taillefer: Giant thermal Hall conductivity in the pseudogap phase of cuprate superconductors, Nature **571**, 376 - 380 (2019).

[4] H. Ishikawa, T. Takayama, R. K. Kremer, J. Nuss, R. Dinnebier, K. Kitagawa, K. Ishii, and H. Takagi: Ordering of hidden multipoles in spin-orbit entangled $5d^1$ Ta chlorides, Phys. Rev. B **100**, 045142 (2019).

[5] L. S. I. Veiga, K. Glazyrin, G. Fabbris, C. D. Dashwood, J. G. Vale, H. Park, M. Etter, T. Irifune, S. Pascarelli, D. F. McMorrow, T. Takayama, H. Takagi, and D. Haskel: Pressure-induced structural dimerization in the hyperhoneycomb iridate $\beta$-$Li_2IrO_3$ at low temperatures, Phys. Rev. B. **100**, 064104 (2019).

[6] M. Negishi, N. Hiraoka, D. Nishio-Hamane, and H. Takagi: Contrasted Sn Substitution effects on Dirac line node semimetals $SrIrO_3$ and $CaIrO_3$, APL Materials **7**, 121101 (2019).

[7] D. Huang, H. Nakamura, K. Küster, A. Yaresko, D. Samal, N. B. M. Schröter, V. N. Strocov, U. Starke, and H. Takagi: Unusual valence state in the antiperovskites $Sr_3SnO$ and $Sr_3PbO$ revealed by x-ray photoelectron spectroscopy, Phys. Rev. Mat. **3**, 124203 (2019).

[8] Y. Chiba, T. Mitsuoka, N. L. Saini, K. Horiba, M. Kobayashi, K. Ono, H. Kumigashira, N. Katayama, H. Sawa, M. Nohara, Y. F. Lu, H. Takagi, and T. Mizokawa: Valence-bond insulator in proximity to excitonic instability, Phys. Rev. B. **100**, 245129 (2019).

[9] A. W. Rost, J. Kim, S. Suetsugu, V. Abdolazimi, K. Hayama, J. Bruin, C. Mühle, K. Kitagawa, A. Yaresko, J. Nuss, and H. Takagi: Inverse-Perovskites $A_3BO$ ($A$ = Sr, Ca, Eu / $B$ = Pb, Sn): A platform for control of Dirac and Weyl Fermions, APL Materials **7**, 121114 (2019).

[10] H. Ishikawa, U. Wedig, J. Nuss, R. K. Kremer, R. Dinnebier, M. Blankenhorn, M. Pakdaman, Y. Matsumoto, T. Takayama, K. Kitagawa, H. Takagi: Superconductivity at 4.8 K and Violation of Pauli Limit in $La_2IRu_2$ Comprising Ru Honeycomb Layer, Inorg. Chem. **58**, 12888-12894 (2019).

[11] B. Zwartsenberg, R. P. Day, E. Razzoli, M. Michiardi, N. Xu, M. Shi, J. D. Denlinger, G. Cao, S. Calder, K. Ueda, J. Bertinshaw, H. Takagi, B. J. Kim, I. S. Elfimov, and A. Damascelli: Spin-Orbit-Controlled Metal-Insulator Transition in $Sr_2IrO_4$, Nature Physics (2020) https://doi.org/10.1038/s41567-019-0750-y

[12] S. Choi, H.-S. Kim, H.-H. Kim, A. Krajewska, G. Kim, M. Minola, T. Takayama, H. Takagi, K. Haule, D. Vanderbilt, and B. Keimer: Lattice dynamics and structural transition of the hyperhoneycomb iridate $\beta$-$Li_2IrO_3$ investigated by high-pressure Raman scattering, Phys. Rev. B **101**, 054102 (2020).

[13] A. Krajewska, T. Takayama, R. Dinnebier, A. Yaresko, K. Ishii, M. Isobe, and H. Takagi: Almost pure $J_{\rm eff} = 1/2$ Mott state of $In_2Ir_2O_7$ in the limit of reduced intersite hopping, Phys. Rev. B **101**, 121101(R) (2020).

[14] H. Nakamura, D. Huang, J. Merz, E. Khalaf, P. Ostrovsky, A. Yaresko, D. Samal, and H. Takagi: Robust weak antilocalization due to spin-orbital entanglement in Dirac material $Sr_3SnO$ Nature Comm. (2020) https://doi.org/10.1038/s41467-020-14900-1.

[15] Tatsunori Okada, Yoshinori Imai, Kentaro Kitagawa, Kazuyuki Matsubayashi, Masamichi Nakajima, Akira Iyo, Yoshiya Uwatoko, Hiroshi Eisaki, Atsutaka Maeda, ” Superconducting-Gap Anisotropy of Iron Pnictides Investigated via Combinatorial Microwave Measurements” Scientific Reports 誌, accepted for publication, 2020 年.

(修士論文)

[16] 安藤翔: Study on $5d/4f$-electron based honeycomb magnets as Kitaev quantum spin liquid candidate ($5d/4f$ 電子系ハニカム量子磁石における Kitaev 量子スピン液体候補の研究)

[17] 露木裕太: ハニカム格子希土類酸化物の磁性 (Magnetism of honeycomb-lattice rare earth oxide)

(博士論文)

[18] 末次祥大: Three-dimensional Dirac electrons in $Sr_3PbO$ antiperovskite ($Sr_3PbO$ アンチペロブスカイトにおける三次元ディラック電子 )

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[19] Ryosuke Oka, Kentaro Kitagawa, Hidenori Takagi: LS/$jj$ coupling scheme study on cubic $K_2TMCl_6$ (TM = Ru, Os) as seen by NQR (Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials 2019 Workshop, poster, University of British Columbia, Vancouver, Canada, Dec. 9, 2019).

[20] M. Negishi, N. Hiraoka, D. Nishio-Hamane, H. Ohsumi, and H. Takagi: Contrasting effects of Sn doping in correlated Dirac node semimetals $SrIrO_3$ and $CaIrO_3$ (Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials 2019 Workshop, poster, University of British Columbia, Vancouver, Canada, Dec. 9, 2019).

招待講演

[21] H. Takagi: Exotic spin-orbital entangled phases on honeycomb lattice, (PCTS conference, “Strongly Correlated Systems & Interactions in Quantum Matter”, Princeton, USA, 27/04/2019).

[22] H. Takagi: Exotic spin-orbital entangled phases in 4d and 5d transition metal oxides, (Conference on Strongly Correlated Quantum Materials, Santa Fe, USA, 30/04/2019).

[23] H. Takagi: Exotic spin-orbital entangled phases in 4d and 5d transition metal oxides, (Workshop “Low-dimensional emergent phenomena in correlated systems and topological quantum matter”, Tbilisi, Georgia, 02/06/2019).

[24] H. Takagi: Exotic spin-orbital entangled phases in 4d and 5d transition metal oxides, (MPI-PKS Workshop ”Quantum Criticality and Topology in Correlated Electron Systems”, Dresden, Germany, 05-09.08.2019).

[25] H. Takagi: Exotic spin-orbital entangled phases in 5d and 4d transition metal oxides, (26th Int. Workshop on Oxide Electronics (iWOE 26), Kyoto, Japan, 29.09.-02.10.2019).

[26] H. Takagi: Giant orbital diamagnetism of three-dimensional Dirac electrons in Sr3PbO antiperovskite+, (ICTP workshop, Trieste, Italy, 21/10/2019).

[27] H. Takagi: Giant isotope effect observed in the honeycomb iridate H3LiIr2O6, (3rd Asia-Pacific Workshop on Quantum Magnetism, Shanghai, 27/11/2019).

[28] K. Kitagawa: Pseudospin Magnetism and Phase Diagram in quest of Kitaev Spin Liquid, (Strongly Correlated Electron Systems 2019 Okayama, Japan, Sep. 24, 2019).

[29] K. Kitagawa: Pseudospin-1/2 Magnetism and Phase Diagram in quest for Kitaev Spin Liquid, (International Conference on Topological Materials Science 2019 (TopoMat2019) Kyoto University, Kyoto, Japan, Dec. 5, 2019).

[30] K. Kitagawa: Pseudospin magnetism and phase diagram in quest of Kitaev spin liquid (Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials 2019 Workshop, University of British Columbia, Vancouver, Canada, Dec. 9, 2019).

[31] H. Takagi: Giant orbital diamagnetism of three-dimensional Dirac electrons in Sr3PbO antiperovskite, (KTJ 2020, Seoul, South Korea, 07/01/2020).

[32] H. Takagi: Spins, charges and orbitals on frustrated lattices in complex vanadates, (Workshop on “Strongly correlated materials – perspectives, challenges and dreams”, Dresden, Germany, 25/02/2020).

(国内会議)

一般講演

[33] 安藤翔, 北川健太郎, 松本洋介, 高木英典: f 電子系ハニカム量子磁石 $YbCl_3$ における Kitaev 量子スピン液体の探索, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学柳戸キャンパス（岐阜）, ポスター, 2019 年 9 月 10 日.

[34] 北川健太郎, 松本洋介, 三宅厚志, 徳永将史, 露木裕太, 安藤翔, 高木英典: ランタノイド擬スピン 1/2 磁性とキタエフ量子スピン液体の探索, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学柳戸キャンパス（岐阜）, 2019 年 9 月 11 日.

[35] 鈴木剛, 篠原康, 魯楊帆, 渡邉真莉, 徐佳笛, 高木英典, 野原実, 片山尚幸, 澤博, 藤澤正美, 金井輝人, 石井順久, 板谷治郎, 溝川貴司, 石川顕一, 岡崎浩三, 辛埴: 周波数領域角度分解光電子分光法による $Ta_2NiSe_5$ における光誘起絶縁体金属転移の研究 (実験), 日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学柳戸キャンパス（岐阜）, 2019 年 9 月 11 日.

[36] 篠原康, 鈴木剛, 魯楊帆, 渡邉真莉, 徐佳笛, 高木英典, 野原実, 片山尚幸, 澤博, 藤澤正美, 金井輝人, 石井順久, 板谷治郎, 溝川貴司, 岡崎浩三, 辛埴, 石川顕一: 周波数領域角度分解光電子分光法による $Ta_2NiSe_5$ における光誘起絶縁体金属転移の研究 (理論), 日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学柳戸キャンパス（岐阜）, 2019 年 9 月 11 日.

[37] 田中志和, 藤原賢二, 本山岳, 北川健太郎, 小林達生, 平田倫啓, 佐々木孝彦, S. Seiro, C. Geibel, F. Steglich: $CeCu_2Si_2$ の高圧下 NQR/NMR, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学柳戸キャンパス（岐阜）, ポスター, 2019 年 9 月 11 日.

[38] 末次祥大, 葉山慶平, 北川健太郎, A. W. Rost, J. Nuss, C. Mühle, 高木英典: アンチペロブスカイト $Sr_3PbO$ における 3 次元ディラック電子の磁気輸送測定, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学柳戸キャンパス（岐阜）, 2019 年 9 月 12 日.

[39] 石川孟, 高山知弘, K. Reinhard, N. Jürgen, D. Robert, 北川健太郎, 石井賢司, 高木英典: $5d^1$ タンタル塩化物の電子状態と多極子秩序, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学柳戸キャンパス（岐阜）, 2019 年 9 月 12 日.

[40] 密岡拓心, 鈴木剛, 渡邉真莉, 藤澤正美, 金井輝人, 石井順久, 板谷治郎, 岡崎浩三, 辛埴, 野原実, 片山尚幸, 澤博, 魯楊帆, 高木英典, 溝川貴司: 励起子絶縁体 $Ta_2Ni_{1-x}Co_xSe_5$ の時間分解光電子分光, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学柳戸キャンパス (岐阜), ポスター, 2019 年 9 月 12 日.

[41] 吉田章吾, 山田陽彦, 小山岳秀, 中井祐介, 上田光一, 水戸毅, 北川健太郎, 芳賀芳範: 高圧下 $^{33}$S-NMR 測定による SmS の圧力誘起非磁性－磁性転移研究, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学柳戸キャンパス（岐阜）, ポスター, 2019 年 9 月 12 日.

[42] 露木裕太, 北川健太郎, K. Whiteaker, M. Blankenhorn, 高木英典: キタエフ系ハニカム化合物の超高圧磁化測定, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学柳戸キャンパス（岐阜）, 2019 年 9 月 13 日.

[43] M. Negishi, N. Hiraoka, D. Nishio-Hamane, H. Ohsumi, and H. Takagi Contrasting effects of Sn

doping in correlated Dirac node semimetals $SrIrO_3$ and $CaIrO_3$ 第 13 回 物性科学領域横断研究会（領域合同研究会）, 東京大学小柴ホール, ポスター, 2019.11.27

[44] 露木裕太, 北川健太郎, K. Whiteaker, M. Blankenhorn, 高木英典: ハニカム格子希土類酸化物の磁性第 13 回 物性科学領域横断研究会（領域合同研究会）, 東京大学小柴ホール, ポスター, 2019.11.27

## 4.6 林研究室

電子は「電荷」と自転に相当する角運動量「スピン」を持っています。今日の半導体エレクトロニクスは電子の「電荷」を制御することで大きく発展してきました。一方、電子の「スピン」が生み出す物性、物理は未解明なところが多く、ただその様相は多彩です。たとえば、物質中の電子スピン間の相互作用によって、磁性や超伝導などが発現します。一方、表面の電子状態がバルクと比べて異質な「トポロジカル絶縁体」では、表面だけにスピンの向きに依存した散逸のない電子の流れ「スピン流」が生成され、その特異な伝導が量子演算などに利用できるとして注目されています。このように、固体中では電子が持つスピンが非常に重要な役割を果たしています。一方で光もまた、電子と同様、スピンを有しており、主に情報通信や分光測定などで利用されています。

本研究室では、物質中の電子スピンと光が誘起するさまざまな現象を探求する「量子スピントロニクス/フォトニクス」の研究を行っています。特に、スピン軌道相互作用が大きい物質を含む、原子層レベルで制御した薄膜ヘテロ構造を舞台に、スピンと光が絡む新たな物性の探索と物理の解明に関する研究を推進しています。

### 4.6.1 スピン流物性

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。

#### 巨大音響プレーナーホール効果

強磁性薄膜における格子振動とスピンの相互作用は準粒子の強結合状態を実現できるとして注目されています。強誘電体の基板を使って励起する表面弾性波はコヒーレントな格子振動を励起できるとして様々な研究で利用されています。

強磁性薄膜における格子振動とスピンの相互作用を調査するため、表面弾性波が励起された状態の輸送特性を調べました。その結果、レイリー型の表面弾性波を励起した強磁性薄膜 (CoFeB) において、巨大なプレーナーホール電圧が誘起されることを見出しました。観測されたプレーナーホール電圧は表面弾性波の伝搬方向に依存しない一方向性のものであり、これまで明らかになっている電流磁気効果や熱磁気効果と対称性が異なる「音響磁気効果」が存在することが示唆される結果が得られました。微視的な発現機構の解明が今後の課題です (参考文献 [5])。

#### 人工反強磁性積層膜における巨大スピン軌道トルク

反強磁性材料は磁気共鳴周波数が THz 帯域にあるため、新たな機能性を有する磁性材料として注目されています。反強磁性を実現するには、Mn や Cr などのように原子間の交換相互作用が反強磁性的な物質を用いる方法が一般的です。一方で、Ru や Ir などの非磁性超薄膜を強磁性薄膜で挟んだ構造では、非磁性膜の膜厚に依存して 2 つの強磁性薄膜の磁化の結合が強磁性的または反強磁性的になる「振動性交換結合」が存在することが知られています。この現象を利用することで、強磁性/非磁性/強磁性... の多層構造において隣り合う強磁性薄膜の磁化が反強磁性的に並んだ人工反強磁性積層膜が実現できます。

Co 層間の磁気結合が反強磁性的である多層膜を作製し、電流印加による磁化の応答 (スピン軌道トルク) を調べました。試料には Co 層の間に数原子層厚の Pt と Ir の 2 層膜を挟んだ構造反転対称性が破れた多層膜を用いました。その結果、Co 層間の磁気結合が反強磁性の時、大きなスピン軌道トルクが発現することがわかりました。Co 層間の結合が強磁性的な場合と比較して、反強磁性結合膜では 15 倍大きくなりました。モデル計算の予想値をはるかに上回っており、その機構解明が今後の課題ですが、工学的にはスピン軌道トルクを利用した情報記憶デバイスへの展開が期待されます (参考文献 [8])。

#### ディラック電子が誘起する大きなスピンホール効果

ディラック型のバンド構造を有する BiSb 半金属において、スピンホール角が 1 を超える大きなスピンホール効果が発現することがわかりました。温度や積層構造、組成や膜厚依存性などから、BiSb 半金属におけるスピンホール効果がトポロジカル表面状態ではなく、バルク中のディラック電子に起因するものであることを見出しました。これらの結果はディラック電子系が巨大なスピンホール移動度を持ち、ス

ピン流源として大きなポテンシャルを有していることを示唆するものです (参考文献 [9])。

### 4.6.2 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、これまでにない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。たとえば、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。

#### Ir/Co 界面のジャロシンスキー守谷相互作用とスピン軌道トルク

多層膜におけるジャロシンスキー守谷相互作用 (DMI) を大きくする手段として、強磁性層の下と上の界面に DMI の符号が異なる物質を配置することが提案されています。特に注目されているのは Co を Ir と Pt で挟んだ積層構造で、Pt/Co は非常に大きな DMI を有するため、それと逆の DMI の符号を有する候補物質として Ir が検討されています。しかしながら、Ir/Co 界面の DMI の符号に関しては、異なる結果が報告されていました。

電流駆動磁化反転現象から、Ir/Co 界面の DMI を調査しました。その結果、Ir/Co 界面の DMI は Pt/Co 界面のそれとほぼ同等の大きさで、符号が同じであることがわかりました。そのため、Pt/Co/Ir などの積層膜では DMI が Pt/Co の 2 層膜より小さくなることが判明しました。また、Ir のスピンホール角は 0.01 程度と小さく、高い伝導率と合わせて、良いスピン吸収体になることも明らかにしました (参考文献 [4])。

#### ジャロシンスキー守谷相互作用の電流制御

カイラル磁気構造の起源であるジャロシンスキー守谷型交換相互作用 (DMI) のうち、強磁性/非磁性金属の界面で発現する DMI の大きさが電流で変調できることがわかりました。電流の向きに関わらず、DMI は電流の増加とともに大きくなり、そのレートはスピンドップラー効果に基づく予測と概ね一致しました。この結果は界面の DMI が平衡スピン流によって誘起されている可能性を示唆しており、DMI が外部制御できることを実証するものです (参考文献 [6])。

#### 反強磁性結合多層膜における巨大な垂直磁気異方性

「振動性交換結合」を示す Co/Pt/Ir/Co... 多層膜で非常に大きな垂直磁気異方性が発現することを見出しました。Co 層の層間結合が反強磁性の時、多層膜の異方性磁界が 10 T を超える大きな垂直磁気異方性を持つことがわかりました。大きな異方性磁界は Co 層間の反強磁性結合によるところが大きいですが、それだけでは説明できないことも判明しました。特に、Ir 層の膜厚が 1-2 原子層程度と薄い時、構造反転対称性の破れによるラシュバ垂直磁気異方性が寄与している可能性があります (参考文献 [7])。

＜受賞＞

[1] T. Kawada, Best student presentation award (Finalist), 2019 MMM Conference, 11/6/2019.

[2] 川田拓弥, 理学系研究科研究奨励賞 (修士課程) 東京大学大学院理学系研究科, 2020 年 3 月 23 日.

[3] 廣瀬葉菜, 理学系研究科研究奨励賞 (修士課程) 東京大学大学院理学系研究科, 2020 年 3 月 23 日.

＜報文＞

(原著論文)

[4] Y. Ishikuro, M. Kawaguchi, N. Kato, Y.-C. Lau, M. Hayashi, Dzyaloshinskii-Moriya interaction and spin-orbit torque at the Ir/Co interface. Phys. Rev. B 99, 134421 (2019).

[5] T. Kawada, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Unidirectional planar Hall voltages induced by surface acoustic waves in ferromagnetic thin films. Phys. Rev. B 99, 184435 (2019).

[6] N. Kato, M. Kawaguchi, Y.-C. Lau, T. Kikuchi, Y. Nakatani, M. Hayashi, Current induced modulation of interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction. Phys. Rev. Lett. 122, 257205 (2019).

[7] Y.-C. Lau, Z. Chi, T. Taniguchi, M. Kawaguchi, G. Shibata, N. Kawamura, M. Suzuki, S. Fukami, A. Fujimori, H. Ohno, M. Hayashi, Giant perpendicular magnetic anisotropy in Ir/Co/Pt multilayers. Phys. Rev. Mater. 3, 104419 (2019).

[8] Y. Ishikuro, M. Kawaguchi, T. Taniguchi, M. Hayashi, Highly efficient spin-orbit torque in Pt/Co/Ir multilayers with antiferromagnetic interlayer exchange coupling. Phys. Rev. B 101, 014404 (2020).

[9] Z. Chi, Y.-C. Lau, X. Xu, T. Ohkubo, K. Hono, M. Hayashi, The spin Hall effect of Bi-Sb alloys driven by thermally excited Dirac-like electrons. Science Advances, 6, eaay2324 (2020).

(国内雑誌)

[10] 林将光, 河口真志, スピン軌道トルクの計測と物理, 日本磁気学会誌, 15, 1, 4-14 (2020).

(学位論文)

[11] 川田拓弥, 非磁性/強磁性ヘテロ構造における表面弾性波誘起スピン流の研究, 修士論文.

[12] 廣瀬葉菜, ビスマス系ヘテロ構造における光－スピン変換現象, 修士論文.

(著書)

[13] 深見俊輔, 林将光, SOT-MRAM, 2020 版薄膜作製応用ハンドブック (監修: 權田俊一), エヌ・ティー・エス, 2020 年 2 月.

[14] 林将光, レーストラックメモリ, 2020 版薄膜作製応用ハンドブック (監修: 權田俊一), エヌ・ティー・エス, 2020 年 2 月.

[15] J. Torrejon, V. Raposo, E. Martinez, R. P. del Real, M. Hayashi, Current induced Dynamics of Chiral Domain Walls in Magnetic Heterostructures, Magnetic Nano- and Microwires, 2nd Edition, Woodhead Publishing (2020).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[16] T. Kawada, M. Kawaguchi, T. Funato, H. Kohno, M. Hayashi, Observation of surface acoustic wave-induced voltages in thin film heterostructures (poster), Quantum Materials Summer School, Max Planck-UBC-UTokyo-CIFAR, 4/9/2019, Vancouver, Canada.

[17] Y. Marui, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Optical measurement of spin orbital torque in perpendicular mangnetic anisotropy films (poster), Quantum Materials Summer School, Max Planck-UBC-UTokyo-CIFAR, 4/9/2019, Vancouver, Canada.

[18] M. Kawaguchi, Y. Marui, H. Hirose, M. Hayashi, Optical observation of spin orbit interaction in multilayers (poster), The 4th UTokyo-Tsinghua Joint Multidisciplinary Symposium, 5/29/19, Tsinghua University, China.

[19] Z. Chi, Y.-C. Lau, M. Hayashi, Giant spin Hall effect in Bi-Sb alloy driven by thermal broadening (poster), The 4th UTokyo-Tsinghua Joint Multidisciplinary Symposium, 5/29/19, Tsinghua University, China.

[20] H. Hirose, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Light – spin conversion through interfacial spin – momentum locked states in semimetal heterostructures, 64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 11/5/2019, Las Vegas, NV.

[21] S. Isogami, Y. Shiokawa, A. Tsumita, T. Taniguchi, S. Mitani, T. Sasaki, M. Hayashi, Spin orbit torque switching and thermal stability factor of W/CoFeB/MgO-based three terminal magnetic tunnel junctions. 64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 11/5/2019, Las Vegas, NV.

[22] T. Kawada, M. Kawaguchi, T. Funato, H. Kohno, M. Hayashi, Surface acoustic wave induced DC spin current in spin-orbit heterostructures, 64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 11/5/2019, Las Vegas, NV.

[23] Z. Chi, Y.-C. Lau, M. Hayashi, Giant Spin Hall Angle in $Bi_{1-x}Sb_x$ Semimetals Driven by Thermally Excited Dirac-like Electrons, 64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 11/7/2019, Las Vegas, NV.

招待講演

[24] M. Hayashi, Spin conversion effects in spin orbit materials. Spin Caloritronics X, 5/22/2019, Groningen, The Netherlands.

[25] Y.-C. Lau, Z. Chi, M. Hayashi, Giant spin-orbit torque in BiSb/CoFeB heterostructures. SPIE Spintronics XII, 8/11/2019, San Diego, CA.

(国内会議)

一般講演

[26] 川田拓弥, 河口真志, 林将光, 重金属/強磁性二層膜におけるスピン音響起電力, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月 12 日, 岐阜大学, 柳戸キャンパス.

[27] Z. Chi, Y.-C. Lau, M. Hayashi, Spin-orbit torque in sputtered $Bi_{1-x}Te_x$/CoFeB bilayers, 第 67 回応用物理学会春季学術講演会, 2020 年 3 月 14 日, 上智大学, 四谷キャンパス.

[28] T. Kawada, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Probing pseudo two-dimensional current in metals, 第 67 回応用物理学会春季学術講演会, 2020 年 3 月 14 日, 上智大学, 四谷キャンパス.

[29] G. Qu, K. Nakamura, M. Hayashi, Magnetization direction dependent spin Hall effect in 3d ferromagnets, 第 75 回日本物理学会年次大会, 2020 年 3 月 16 日, 名古屋大学, 東山キャンパス.

[30] 川田拓弥, 河口真志, 船戸匠, 河野浩, 林将光, スピン軌道相互作用を介したフォノン-スピン流変換, 第 75 回日本物理学会年次大会, 2020 年 3 月 16 日, 名古屋大学, 東山キャンパス.

[31] 吉川尚孝, 平井誉主在, 広瀬葉菜, 河口真志, 林将光, 島野亮, Bi 薄膜からのテラヘルツ波放射, 第 75 回日本物理学会年次大会, 2020 年 3 月 18 日, 名古屋大学, 東山キャンパス.

[32] 河口真志, 石黒雄人, 松本峻弥, 谷川悠飛, 谷口知大, 林将光, 人工反強磁性体におけるスピン軌道トルク, 第 75 回日本物理学会年次大会, 2020 年 3 月 19 日, 名古屋大学, 東山キャンパス.

招待講演

[33] 廣瀬葉菜、河口真志、林将光, スピン軌道物質における光-スピン変換現象, 第 86 回ナノマグネティクス専門研究会, 2019 年 7 月 5 日, 東京大学, 本郷キャンパス.

[34] 河口真志, 丸井幸博 , 廣瀬葉菜 , 川田拓弥 , 梶山陸 , 林将光, 光で見るスピン軌道相互作用, 応用物理学会スピントロニクス研究会・日本磁気学会スピンエレクトロニクス専門研究会, 2019 年 11 月 22 日, 中央大学, 駿河台記念館.

[35] 林将光, スピン軌道物質の光-スピン結合, 日本磁気学会第 41 回光機能磁性デバイス・材料専門研究会, 2020 年 1 月 30 日, 長岡技術科学大学, 東京サテライト.

## 4.7 小林研究室

半導体や金属を微細加工して作製される微小な電子回路をメゾスコピック系と呼ぶ。その特長は、量子力学的効果が本質的であるようなスケールにおいて、制御性の高い実験ができる点にある。実際に、微小な電子波干渉計や、量子ドット（人工原子）等で発現する電子の電荷・スピン・コヒーレンス・多体効果に基づく多彩な量子現象とその制御は、1980 年代以降、物性物理学の発展に大きな貢献を果たしてきた。我々は、このようなメゾスコピック系における様々な現象、特に量子多体現象・非平衡現象・スピン輸送現象に注目して研究を行っている。高精度な伝導度・電流ゆらぎ測定によって定量的に量子輸送を理解でき、これまで実現が困難であったような実験に挑むことが可能になる。さらに、メゾスコピック系ならでは新現象の発見を目指して測定技術の開発も行っている。

### 4.7.1 量子液体の非平衡ダイナミクス

#### 近藤状態のゆらぎ

近藤効果とは、固体中の局在電子のスピンがその周りの伝導電子のスピンと結合することによって、特異な量子状態（近藤状態）を形成する量子多体現象である。近藤効果については、強相関電子系の研究などにおいて半世紀にわたって多くの研究が行われてきた。理論的には、近藤状態は「局所フェルミ液体」として記述されることが確立している。したがって、近藤状態の振る舞いを研究することは、強相関量子液体を研究することと等価である。

これまでの多くの実験的研究においては、巨視的な試料を用いて、多数のスピンの関わる集団平均を相手とする方法がとられてきた。しかしながら、1999 年、人工原子における単一サイトの近藤効果の制御が報告され、実験手法に新展開がもたらされた。そのような系においては、近藤温度・電子数・スピン状態・軌道状態・平衡 – 非平衡状態など、近藤効果に関するあらゆるパラメータを制御できる（図 4.7.1）。つまり、人工原子における近藤効果は、非平衡状態も含む量子多体系についての理論を、理論に忠実な形で高い精度で検証できる理想的な系である。

我々は，カーボンナノチューブに作製した人工原子における近藤効果を研究してきた。我々は、近藤状態においては一粒子の伝導過程だけではなく二個の粒子が関与する伝導過程もあり，それによって電流ゆらぎが通常の値よりも増大することを明らかとした。電流ゆらぎから、量子液体を特徴づけるウィルソン比を求めることができ、人工原子が極めて強い量子多体状態にあることを実証した。さらに，これまでに知られていなかった非平衡スケーリング則を実験的に確立した。また，SU(2) と SU(4) という対称性の異なる近藤状態の間の連続的な遷移にともなうウィルソン比の変化を定量的に抽出することにも成功した。本年度はこれまでの成果を総説として報告した [4]。

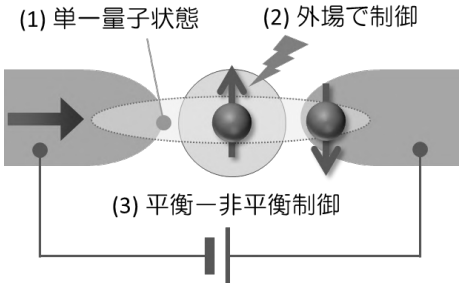



図 4.7.1: 二つの導線に挟まれた人工原子で近藤効果が起きている様子。単一の量子状態を相手に、外場によって電子の個数や軌道状態を精密に制御できる。印加電圧によって、平衡状態から極端な非平衡状態まで連続的に制御することも可能。

#### 非平衡に顔を表す近藤相関

人工原子における近藤効果は、微分伝導度におけるゼロバイアスピークとして観測される。これは平衡状態近傍の性質であるが、それに対し、有限バイアス下（非平衡）においても、近藤相関が輸送に影響を与える場合がある。例えば、カーボンナノチューブ人工原子における近藤効果は、電子がスピンと軌道の両方の自由度を持つため、SU(2)×SU(2) の対称性を示す。この場合、近藤相関があるために、クラマース擬似スピンが保存されるようなバイアス電圧においては、本来は伝導が生じない。ところが、我々は、そのようなバイアス電圧においても伝導が観測されることを実験的に見出した。この現象は、そのバイアス電圧において擬似スピンが保存しないような 2 種類の遷移が共鳴し強め合うことによって生じることを理論的に明らかにした。2 つのクラマース二重項とリード線との結合が非対称であることがその原因である。

本研究は、たとえ平衡から遠く離れた状況にあったとしても、対称性を通じて近藤効果が輸送現象に姿を表すことを微視的に実証したものである [5]。

### 4.7.2 スピン依存伝導

#### 二層系におけるラシュバ型スピン軌道相互作用

二次元電子系が近接して存在する 2 層 2 次元電子系は、擬スピン渦状態に起因する meron と呼ばれる素励起のコステリッツ-サウレス転移が予言されるなど、非自明な秩序が創発する舞台として知られる。我々は、GaAs/AlGaAs トンネル結合二重量子井戸構造の中に実現された 2 層 2 次元電子系上に量子ポイントコンタクト構造を作製し、量子輸送過程を伝導度とショット雑音測定によって精密に調べた。その結果、二重井戸のトンネルバリアを横切るポテンシャル勾配に起因するラシュバ型のスピン軌道相互作用が重要な役割を果たしていることを実証した。

本研究は、GaAs/AlGaAs のヘテロ構造を工夫することによってスピン軌道相互作用を増強できることを意味している [6]。

#### スピン軌道トルクによる磁化の準安定状態の実現

スピン注入による磁化状態の制御は、スピントロニクスにおける中心的なテーマである。近年では、スピンホール効果等、スピン軌道相互作用に起因するトルク（スピン軌道トルク）を用いたスピン反転の高速・高効率化も実現されつつある。一方で、スピン注入により反転状態へ励起された磁化状態は熱的擾乱のため一般に不安定であるという問題から、磁化状態の安定化をもたらす物理現象の探索も盛んに行われている。我々は、MgO/CoFeB/W を基本構造とした垂直磁気異方性を持つナノピラーにおいて、スピン注入が磁化安定性に及ぼす影響を調べた。異方性磁場および外部磁場により、磁化方向についてのポテンシャルは非対称な双安定性を持つ。その結果、W 層へのパルス誘起磁化反転に加えて、直流電流を流した時にのみ現れる準安定な磁化反転状態が観測された。磁化が準安定状態に留まる平均時間は、数秒〜数十秒のスケールであり、直流電流の強度・方向に大きく依存した。これらの結果を解析することで、スピン軌道トルクのダンピング成分によって、磁化ゆらぎを大きく抑制できることが示唆された。

本研究は、磁気異方性を変調する従来の原理に加えて、スピントルクにより磁化のエネルギーを散逸させることで磁化状態を安定化できることを示したものである [3]。

#### ビスマス/ニッケル細線のスピン輸送測定

ビスマス（Bi）やニッケル（Ni）は単層では超伝導を示さないが、数 nm の Ni 層を Bi 薄膜の下に敷くことにより、超伝導転移する。その転移温度は Bi と Ni の膜厚に依存し、Bi(35 nm)/Ni(2 nm) で 4.2 K に達する。Bi/Ni 薄膜の磁化測定から、超伝導転移後も Ni 層は強磁性を保っていることが明らかにされており、超伝導と強磁性が共存するユニークな系である。我々は、強磁性体パーマロイ（Py、$Ni_{81}Fe_{19}$）の細線、Bi(35 nm)/Ni(2 nm) 細線、及びスピン軌道相互作用の弱い Cu 細線で構成された素子を作製した。Py/Cu 界面で生じるスピン流を、Cu 細線を介して Bi/Ni 細線に注入できる。本研究ではまず Bi/Ni 細線の特性を調べるために、抵抗の温度依存性と磁気抵抗を測定した。3.4 K で Bi/Ni 細線の超伝導転移を観測した。また Bi/Ni 細線に面内磁場を印加すると、通常の超伝導体の場合に予想されるものとは異なるユニークな磁気抵抗効果を観測した。転移温度以上でスピン輸送測定を行うことによって、スピンホール角が約 0.008 と求められた [2]。

### 4.7.3 原子層物質の物性測定

#### 磁気ゆらぎによる巨大磁気抵抗効果

近年、反強磁性体ベースのデバイスで多くの興味深い物理的性質が報告されている。我々は、マイクロメートルサイズの三角格子反強磁性体 $Ag_2CrO_2$ がバタフライ型の特殊な磁気抵抗を示すことを発見した。この物質は、反強磁性的に結合した $S = 3/2$ スピンの 2 次元三角格子 $CrO_2$ 層と、高い導電性を持つ $Ag_2$ 層で構成されている。バタフライ型の磁気抵抗は、磁場が $CrO_2$ 平面に垂直に印加された状況で、磁気秩序温度付近でのみ発現する点でユニークである。しかも、その磁気抵抗比は最大で約 15 %であり、単一結晶が低磁場下で示す磁気抵抗としては非常に大きい。我々はスピンのゆらぎが巨大な磁気抵抗をもたらしていることを理論的に明らかにした。

本研究は、磁気ゆらぎ機構に基づいた巨大磁気抵抗効果を利用することによって、単一結晶のみを利用した磁気メモリデバイスへの応用につながる一歩となる [7] 。

#### ファンデルワールス強磁性体

近年、一原子あるいは数原子の厚みしかない二次元ファンデルワールス物質の研究が盛んに行われている。その中には超伝導や強磁性を示す物質もあり、ファンデルワールス超伝導体やファンデルワールス強磁性体と呼ばれて興味をもたれている。$Fe_5GeTe_2$ は近年見いだされたファンデルワールス強磁性体の一つである。我々は、$Fe_5GeTe_2$ を用いて、数原子層の厚みしか持たない極薄デバイスを作製し、磁場中で電気抵抗測定を行った。その結果、バルクの $Fe_5GeTe_2$ 結晶と比べて、数原子層の極薄デバイスに加工することによって、垂直磁気異方性が強くなることを見出した。さらに高温でクエンチした試料の方が、垂直磁気異方性がより強くなることを発見した [8]。

### 4.7.4 測定技術開発

#### 電流雑音測定のための低温増幅器の開発

メゾスコピック系における電子輸送を研究する方法の一つに電流ゆらぎ測定がある。現在、我々を含む世界の複数のメゾスコピック研究グループにおける電流ゆらぎ測定系の精度は $10^{-30}$ $A^2$/Hz 程度である。この精度は量子化伝導度 $2e^2/h$ を持つ抵抗体から発生する 1 mK の熱揺らぎをかろうじて測定できる程度であり、分数量子ホールの詳細なメカニズムや準粒子の統計性を議論するには十分ではない。信号対雑音比を向上させるためには専用の高電子移動度トランジスタ（HEMT）が必要である。我々は、AlGaAs/GaAs ヘテロ構造で作製された HEMT が低温かつ MHz 領域で低雑音化できるという先行研究に基づいて、電流雑音測定用の HEMT を作製し、その性能を評価した。その結果、市販の HEMT（ATF-HEMT）を用いた増幅器より高増幅率が得られ、信号対雑音比が向上した。

#### 単一量子スピン顕微鏡の開発

NV センタとは、ダイヤモンド結晶の中に安定して存在する格子欠陥の一つである。隣接した 2 個の炭素原子が、窒素と原子空孔のペアに置き換わった構造をとる。近年の研究により、NV センタ内の電子や原子核スピンの量子状態が極めて長く保持されることが分かってきた。また、NV センタ内の量子準位の精密測定によって、NV センタが感じている磁場を超高精度で測定できることも確立している。この点で NV センタを原子サイズの単一量子スピンセンサと呼ぶことができる。我々は、NV センタを用いて単一量子スピン顕微鏡を開発しメゾスコピック系の研究に活用したいと考え、現在、光学測定系の開発を進めている。

＜受賞＞

[1] 小林研介、第 37 回（2019 年度）大阪科学賞「固体素子におけるゆらぎと非平衡機能に関する実験的研究」、大阪府・大阪市・一般財団法人大阪科学技術センター、2019 年 11 月 13 日。

＜報文＞

(原著論文)

[2] M. Tokuda, N. Kabeya, K. Iwashita, H. Taniguchi, T. Arakawa, D. Yue, X. Gong, X. Jin, K. Kobayashi, and Y. Niimi, “Spin transport measurements in metallic Bi/Ni nanowires”, *Applied Physics Express* **12,** 053005 (2019).

[3] S. Iwakiri, S. Sugimoto, Y. Niimi, K. Kobayashi, Y. K. Takahashi, and S. Kasai, “Observation of the magnetization metastable state in a perpendicularly magnetized nanopillar with asymmetric potential landscape”, *Applied Physics Letters* **115,** 092407 (2019).

[4] M. Ferrier, R. Delagrange, J. Basset, H. Bouchiat, T. Arakawa, T. Hata, R. Fujiwara, Y. Teratani, R. Sakano, A. Oguri, K. Kobayashi, and R. Deblock, “Quantum Noise in Carbon Nanotubes as a Probe of Correlations in the Kondo Regime”, *Journal of Low Temperature Physics* (2019) [published online]. https://doi.org/10.1007/s10909-019-02232-4

[5] A. Lahiri, T. Hata, S. Smirnov, M. Ferrier, T. Arakawa, M. Niklas, M. Marganska, K. Kobayashi, and M. Grifoni, “Unraveling a concealed resonance by multiple Kondo transitions in a quantum dot”, *Physical Review* B **101,** 041102(R) (2020).

[6] D. Terasawa, S. Norimoto, T. Arakawa, M. Ferrier, A. Fukuda, K. Kobayashi, and Y. Hirayama, “Conductance quantization and shot noise of a double-layer quantum point contact”, *Physical Review* B **101,** 115401 (2020).

[7] H. Taniguchi, M. Watanabe, M. Tokuda, S. Suzuki, E. Imada, T. Ibe, T. Arakawa, H. Yoshida, H. Ishizuka, K. Kobayashi, and Y. Niimi, “Butterfly-shaped magnetoresistance in triangular-lattice antiferromagnet $Ag_2CrO_2$”, *Scientific Reports* **10,** 2525 (2020).

[8] T. Ohta, K. Sakai, H. Taniguchi, B. Driesen, Y. Okada, K. Kobayashi, and Y. Niimi, “Enhancement of coercive field in atomically-thin quenched $Fe_5GeTe_2$”, *Applied Physics Express* **13,** 043005 (2020).

(国内雑誌)

[9] 荒川智紀、小林研介、スピン流とそのゆらぎ、日本物理学会誌 **74**(4), 222-227 (2019).

[10] 小林研介、第 37 回 大阪科学賞・記念講演 ゆらぎ～自然のささやきが教えてくれるもの、（財）大阪科学技術センター機関誌 the OSTEC、第 29 巻 1 号 (通巻 197 号)、5-7 (2020).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[11] S. Norimoto, S. Iwakiri, M. Yokoi, T. Arakawa, Y. Niimi, and K. Kobayashi, “Fine etching process for fabrication of single electron sources”, 20th Anniversary of Superconducting Qubits (SQ20th): Progress and Future Directions, Tsukuba, Japan, May 13-15, 2019 (poster).

[12] H. Taniguchi, M. Watanabe, M. Tokuda, S. Suzuki, T. Ibe, T. Arakawa, H. Yoshida, H. Ishizuka, K. Kobayashi, and Y. Niimi, “Butterfly-shaped magnetoresistance in Ising system induced by spin fluctuations”, 2019 Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2019), Las Vegas, Nevada, USA, November 4-8, 2019 (oral).

[13] H. Taniguchi, M, Tokuda, T. Taniguchi, T. Arakawa, B. Go, T. Ziman, S. Maekawa, K. Kobayashi, and Y. Niimi, “Determination of Spin Freezing Temperature in Nanoscale Spin Glasses”, 2019 Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2019), Las Vegas, Nevada, USA, November 4-8, 2019 (oral).

[14] M. Tokuda, N. Kabeya, K. Iwashita, H. Taniguchi, T. Arakawa, D. Yue, X. X. Gong, X. F. Jin, K. Kobayashi, and Y. Niimi, “Spin transport measurements in metallic Bi/Ni nanowires”, 2019 Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2019), Las Vegas, Nevada, USA, November 4-8, 2019 (oral).

[15] D. Terasawa, S. Norimoto, T. Arakawa, M. Ferrier, A. Fukuda, K. Kobayashi, and Y. Hirayama, “Spin Splitting Induced by Spin - Orbit Interaction in a Double-Layer Quantum Point Contact”, International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (HQS2019), Matsue, Japan, December 1-4, 2019 (oral).

[16] M. Watanabe, T. Ibe, M. Tokuda, H. Taniguchi, Y. Okada, K. Kobayashi, and Y. Niimi, “Hall measurements in atomically thin $CeTe_3$ films”, International Symposium for Nano Science (ISNS2019), Osaka, Japan, November 27-28, 2019 (poster).

[17] M. Watanabe, S.-H. Lee, T. Asano, T. Ibe, M. Tokuda, H. Taniguchi, U. Daichi, Y. Okada, K. Kobayashi, and Y. Niimi, “Hall and butterfly-shaped magnetoresistance effects in atomically thin $CeTe_3$ films”, New Perspective in Spin Conversion Science (NPSCS2020), Kashiwa, Japan, February 3-4, 2020.

[18] M. Tokuda, H. Taniguchi, T. Arakawa, D. Yue, X. X. Gong, X. F. Jin, K. Kobayashi, and Y. Niimi, “Upper critical field measurements in Bi/Ni superconducting bilayer film”, New Perspective in Spin Conversion Science (NPSCS2020), Kashiwa, Japan, February 3-4, 2020.

[19] T. Ohta, K. Sakai, H. Taniguchi, B. Driesen, Y. Okada, K. Kobayashi, and Y. Niimi, “Measurements of anomalous Hall Effect in van der Waals ferromagnet $Fe_5GeTe_2$”, New Perspective in Spin Conversion Science (NPSCS2020), Kashiwa, Japan, February 3-4, 2020.

[20] S. Suzuki, T. Hajiri, R. Miki, H. Asano, K. Zhao, P. Gegenwart, K. Kobayashi, and Y. Niimi, “Spin transport measurement in noncollinear antiferromagnet $Mn_3Ni_{1-x}Cu_xN$”, New Perspective in Spin Conversion Science (NPSCS2020), Kashiwa, Japan, February 3-4, 2020.

招待講演

[21] K. Kobayashi, “Non-equilibrium Fluctuations in Correlated Quantum Liquids”, Workshop of ENS-UTokyo, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, November 25-26, 2019.

(国内会議)

一般講演

[22] K. Kobayashi, “Detection and control of fluctuations in mesoscopic systems”、新学術領域研究「量子液晶の物性科学」キックオフ・ミーティング、東京大学、2019 年 8 月 19 日。

[23] M. Watanabe, T. Ibe, M. Tokuda, H. Taniguchi, Y. Okada, K. Kobayashi, and Y. Niimi, “Magneto transport measurements in atomically thin $CeTe_3$ films” 、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019 年 9 月 10 日-13 日（口頭）。

[24] 花田尚輝、松井朋裕、鈴木将太、井邊昂志、谷口祐紀、福山寛、小林研介、新見康洋、グラフェンナノリボンを用いたスピン輸送測定の試み、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019 年 9 月 10 日-13 日（ポスター）。

[25] 川原遼馬、谷口祐紀、河上司、Youssef Aziz Alaoui、荒川智紀、乾皓人、島本雄介、高阪勇輔、戸川欣彦、小林研介、新見康洋、カイラル磁性体 $CrNb_3S_6$ 薄膜のスピン輸送測定、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019 年 9 月 10 日-13 日（ポスター）。

[26] 太田智陽、川原遼馬、鈴木将太、谷口祐紀、小林研介、新見康洋、スピン軌道相互作用の強い原子層物質におけるスピン輸送測定の試み、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019 年 9 月 10 日-13 日（ポスター）。

[27] 岩切秀一、杉本聡志、新見康洋、小林研介、葛西伸哉、スピントルク発振素子における非線形現象、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019 年 9 月 10 日-13 日（口頭）。

[28] Lee Sanghyun、浅野拓也、坂井康介、新見康洋、小林研介、4 層グラフェンにおける伝導度測定および雑音測定、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019 年 9 月 10 日-13 日（ポスター）。

[29] 坂井康介、Lee Sanghyun、浅野拓也、荒川智紀、新見康洋、小林研介、雑音測定を用いたグラフェン量子ホールブレークダウン前駆現象検出の試み、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019 年 9 月 10 日-13 日（ポスター）。

[30] 鈴木将太、岩崎拓哉、森山悟士、中払周、若山裕、宮坂茂樹、田島節子、小林研介、新見康洋、高温超伝導体 Bi2212/グラフェン接合素子の作製、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019 年 9 月 10 日-13 日（ポスター）。

[31] 徳田将志、岩下孔明、壁谷奈津紀、谷口祐紀、荒川智紀、新見康洋、小林研介、Gong Xin-Xin、 Yue Di、Jin Xiao-Feng、Bi/Ni 薄膜における超伝導特性の細線幅依存性、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019 年 9 月 10 日-13 日（ポスター）。

[32] 藤原聖士、横井雅彦、荒川智紀、小林研介、新見康洋、原子層超伝導 $ZrTe_{3-x}Se_x$ 薄膜における電気伝導特性、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019 年 9 月 10 日-13 日（ポスター）。

[33] 谷口祐紀、渡邉杜、徳田将志、井邊昂志、荒川智紀、吉田紘行、石塚大晃、小林研介、新見康洋、三角格子反強磁性体 $Ag_2CrO_2$ 薄膜における磁気伝導測定、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019 年 9 月 10 日-13 日（口頭）。

[34] M. Watanabe, T. Ibe, M. Tokuda, H. Taniguchi, Y. Okada, K. Kobayashi, and Y. Niimi, "Hall and butterfly-shaped magnetoresistance effects in atomically thin $CeTe_3$ films", スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク拠点 2019 年度年次報告会、大阪大学、2019 年 12 月 9 日（ポスター）。

[35] 小林研介、固体素子におけるゆらぎの研究と将来展望、トランススケール量子科学国際連携機構 キックオフ会議、東京大学、2020 年 2 月 21 日。

[36] 太田智陽、坂井康介、Benjamin Driesen、岡田佳憲、小林研介、新見康洋、ファンデルワールス強磁性体 $Fe_5GeTe_2$ における異常ホール効果の測定、日本物理学会 第 75 回年次大会 [現地開催中止・発表成立扱い]、名古屋大学、2020 年 3 月 16 日-19 日（口頭）。

[37] 井邊昂志、渡邉杜、谷口祐紀、荒川智紀、谷口年史、小林研介、新見康洋、リエントラントスピングラス AuFe における異常ホール効果とスピンホール効果の測定、日本物理学会 第 75 回年次大会 [現地開催中止・発表成立扱い]、名古屋大学、2020 年 3 月 16 日-19 日（口頭）。

[38] 今田絵理阿、谷口祐紀、渡邉杜、徳田将志、鈴木将太、荒川智紀、吉田紘行、石塚大晃、小林研介、新見康洋、三角格子反強磁性体 $Ag_2CrO_2$ 高純度薄膜における磁気異方性の電気的検出、日本物理学会 第 75 回年次大会 [現地開催中止・発表成立扱い]、名古屋大学、2020 年 3 月 16 日-19 日（ポスター）。

[39] 鈴木将太、羽尻哲也、三木竜太、浅野秀文、Kan Zhao、Philipp Gegenwart、小林研介、新見康洋、反強磁性体 $Mn_3(Ni_{1-x}Cu_x)N$ におけるスピン輸送測定、日本物理学会 第 75 回年次大会 [現地開催中止・発表成立扱い]、名古屋大学、2020 年 3 月 16 日-19 日（ポスター）。

[40] 佐々木壱晟、川原遼馬、谷口祐紀、荒川智紀、乾皓人、島本雄介、高阪勇輔、戸川欣彦、小林研介、新見康洋、カイラル磁性体 $CrNb_3S_6$ 薄膜におけるスピン流注入の試み、日本物理学会 第 75 回年次大会 [現地開催中止・発表成立扱い]、名古屋大学、2020 年 3 月 16 日-19 日（ポスター）。

[41] 横井雅彦、藤原聖士、河村智哉、荒川智紀、青山和司、福山寛、小林研介、新見康洋、表面弾性波照射により生じる超伝導 $NbSe_2$ 薄膜の負抵抗状態の起源、日本物理学会 第 75 回年次大会 [現地開催中止・発表成立扱い]、名古屋大学、2020 年 3 月 16 日-19 日（口頭）。

[42] 藤原浩司、岩切秀一、横井雅彦、渡邉杜、小林研介、新見康洋、$NbSe_3$ 薄膜における電荷密度波特性、日本物理学会 第 75 回年次大会 [現地開催中止・発表成立扱い]、名古屋大学、2020 年 3 月 16 日-19 日（口頭）。

[43] 寺澤大樹、則元将太、荒川智紀、Meydi Ferrier、福田昭、小林研介、平山祥郎、2 層系量子ポイントコンタクトにおける巨大なゼーマン分裂、日本物理学会 第 75 回年次大会 [現地開催中止・発表成立扱い]、名古屋大学、2020 年 3 月 16 日-19 日（口頭）。

[44] 岩切秀一、杉本聡志、大湊友也、加藤岳生、松尾衛、新見康洋、葛西伸哉、小林研介、磁気トンネル接合におけるマグノン支援トンネル、日本物理学会 第 75 回年次大会 [現地開催中止・発表成立扱い]、名古屋大学、2020 年 3 月 16 日-19 日（口頭）。

[45] 花田尚輝、浅野拓也、鈴木将太、松井朋裕、福山寛、小林研介、新見康洋、ジグザグ端グラフェンの作製及び輸送測定の試み、日本物理学会 第 75 回年次大会 [現地開催中止・発表成立扱い]、名古屋大学、2020 年 3 月 16 日-19 日（ポスター）。

[46] Lee Sanghyun、橋坂昌幸、秋保貴史、小林研介、村木康二、電流雑音測定のための GaAs HEMT 低温増幅器の開発、日本物理学会 第 75 回年次大会 [現地開催中止・発表成立扱い]、名古屋大学、2020 年 3 月 16 日-19 日（口頭）。

[47] 徳田将志、谷口祐紀、荒川智紀、Yue Di、Jin Xiao-Feng、小林研介、新見康洋、「Bi/Ni 超伝導薄膜の上部臨界磁場測定」、日本物理学会 第 75 回年次大会 [現地開催中止・発表成立扱い]、名古屋大学、2020 年 3 月 16 日-19 日（ポスター）。

招待講演

[48] 小林研介、ゆらぎは語る — 人工原子における非平衡量子液体、物理学教室コロキウム、東京大学大学院理学系研究科、2019 年 6 月 28 日。

[49] 小林研介、ゆらぎで探る量子液体、KEK 連携コロキウム高エネルギー加速器研究機構、つくば、2019 年 7 月 29 日。

[50] 小林研介、磁気的トンネル接合における非線形伝導、令和元年度 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会「固体素子における非平衡ダイナミクスの精緻な理解と機能開拓、宮城県仙台市、2019 年 11 月 1 -2 日。

[51] 小林研介、ゆらぎ 〜 自然のささやきが教えてくれるもの、第 37 回（2019 年度）大阪科学賞表彰式・記念講演、大阪科学技術センター、大阪、2019 年 11 月 13 日。

(セミナー)

[52] K. Kobayashi, "Fluctuations in Mesoscopic Systems", ipi seminar, Institute for Physics of Intelligence, The University of Tokyo, Japan, July 8, 2019.

[53] 小林研介、人工原子における近藤効果と非平衡ゆらぎ、大阪大学大学院理学研究科、2019 年 7 月 10 日。

[54] K. Kobayashi, "Current Fluctuations in Mesoscopic Systems", BK21+ Seminar, POSTECH, Pohang, Korea, January 17, 2020.

## 4.8 中辻研究室

今、物性分野で重要な発見が相次いでいます。これまでの磁性や超伝導、スピントロニクスといった分野が、トポロジーという概念によって、再び見直さ

れ整理・統合され、多くの新しい物理や現象の発見に繋がっています。また、素粒子論で発達した概念が物性分野の実験で初めて確認されたり、宇宙論・量子情報の技術が量子液体や超伝導の研究でブレークスルーをもたらしたりと、既存の分野を超えた新しい視点での研究が物性分野に変革をもたらしています。こうした大きな潮流を先導しているのは、実は、新しい概念を具現する量子物質（Quantum Materials）の発見です。その原動力は、物性の深い理解に基づいた物質探索とその合成であり、世界最高精度の物性測定技術です。私たちが生み出す量子物質は新しい物理概念を提供し基礎分野で世界を先導するだけでなく、その驚くべき機能性ゆえに産業界からも注目を集めています。これらの独自の量子物質を用いて、様々な環境での精密測定を自ら行うことで、新しい物性とその背後にある物理法則の解明を目指しています。

主な研究テーマ

1. 物質中の相対論的粒子及び新規量子現象
   - ワイル粒子とカイラル異常
   - 量子スピンアイスの磁気単極子、フォトン
2. トポロジカル磁性体の室温量子伝導
   - ワイル反強磁性体のスピントロニクス
   - ベリー曲率と熱・光巨大応答
3. 強相関電子系における量子相転移
   - 多極子揺らぎによる異常金属相・高温超伝導

## 4.8.1 トポロジカル反強磁性体におけるベリー位相効果

ベリー曲率は量子ホール系における整数（チャーン数）に相当する量であり、垂直方向の量子伝導を誘起する。その端緒は TKNN 公式 (Thouless-Kohmoto-Nightingale-den Nijs) として知られ、Thouless はこの功績で 2016 年にノーベル物理学賞を受賞している。一方、異常ホール効果はゼロ磁場で発現するホール効果であり、同様のベリー曲率機構による理解が進んでいたものの、１９世紀の発見以来、強磁性体でしか観測例がなかった。その中、我々は磁性体 $Mn_3Sn$ を用い、世界で初めて反強磁性状態において巨大異常ホール効果を観測した [Nature (2016)]。この物質は強磁性体の 1/1000 の磁化しか持たないため、ベリー曲率が極端に大きくなる機構の解明が課題であった。そこで、ベリー曲率は波数空間の仮想磁場であり、ワイル点を源として現れることに着目し、電子状態の解明やカイラル異常の研究を行い、物質中に磁気ワイルフェルミオンがいることをその世界初の例として明らかにした [Nat. Mater. (2017)]。これらの現象はすべて室温で現れることから、スピントロニクスやエネルギーハーベスティングへと波及しており、巨大な異常ネルンスト効果や磁気光学カー効果の発見 [Nat. Phys. (2017), Nat. Photonics (2018)]、磁気スピンホール効果の発見 [Nature (2019)] などに繋がっている。

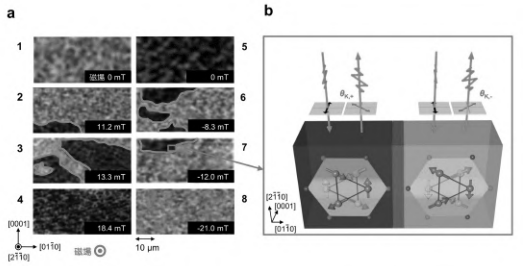



図 4.8.1: 図　(a) 室温での $Mn_3Sn$ における MOKE 像。(b) コントラストに対応した磁気八極子ドメインの概要図 [Nat. Photonics (2018)]

### ワイル反強磁性体のスピントロニクス

ワイル反強磁性体は微小磁化にもかかわらず巨大な応答を示すため、漏れ磁場がなく高速動作する不揮発性メモリ用途としても注目されている。そのためには薄膜を用いて、表面・界面物性や光学特性を明らかにすることが重要である。我々はまずスパッタ法を用いて、バルクに匹敵する巨大な異常ホール効果を室温・ゼロ磁場下で示す $Mn_3Sn$ 薄膜を作製した。得られた薄膜を数 100 nm の細線に加工して横型スピンバルブ素子を作製し、それを用いて非局所スピンバルブ測定を行うことで、$Mn_3Sn$ のスピンホール角やスピン拡散長を明らかにした [3]。また、光学測定の研究グループと共同で THz 光を用いた実験を行い、光学伝導度による電子構造の変化や THz 異常ホール効果の観測にも成功した [5, 13]。

## 4.8.2 多極子揺らぎによる異常金属相

### 高磁場四極子秩序相における巨大な異方的磁気抵抗効果

次世代の高密度メモリの候補として漏れ磁場の小さな非強磁性材料へ注目が集まっている。これらの記憶層の読み取りには異方的磁気抵抗効果（AMR）の利用が候補の一つとして考えられているが、反強磁性体では通常 AMR は数%程度と非常に小さい。本研究では $PrV_2Al_{20}$ が高磁場四極子秩序相（$B \parallel [100]$）で 30%を超える AMR を示すことを明らかにした [4]。これは四極子と伝導電子の混成の結果、四極子の再配列がフェルミ面に大きな変化を与えている事によって起きていると理解できる。多極子が伝導に寄与する例は非常に少なく、この系は多極子伝導体として期待されるフェルミ液体以外の新しい物理を開拓する系として、中心的な役割を果たすと期待される。

#### 負の磁気抵抗効果と四極子近藤効果

多極子と伝導電子の間のエンタングルメントは、新しいタイプの量子液体を生み出す格好の研究舞台を提供すると同時に、宇宙のミニマムモデルとして知られる SYK 模型にも通じる可能性などから非常に興味深い研究対象である。その中で最も単純な系 t として期待されるのが四極子近藤効果を実現する物質群である。その数は依然数が限られており、我々が開発した $PrV_2Al_{20}$ はスピン自由度を持たない $\Gamma_3$ 結晶場二重項基底状態を持ち、さらに $T_Q = 0.75$ K, 0.65 K で多極子転移、$T_c = 0.05$ K で重い電子超伝導といった現象を示し注目を集めている。また電気抵抗の $-\ln T$ 依存性や光電子分光による近藤共鳴ピークなど明確な $cf$ 混成効果を示す。$T_Q$ 以上の温度では四極子近藤効果による非フェルミ液体的異常が観測されているが、理解は進んでいなかった。そこで本研究では縦磁気抵抗、比熱、磁化率の詳細な低温測定を行い検証を試みた。その結果 8 K 以上の温度で負の磁気抵抗を示し、同じ領域で四極子近藤効果の理論予測に従うことを明らかにした [11]。さらに低温で磁気抵抗は正に転じ、四極子近藤スケーリングからも逸脱する。これはコヒーレンス効果など、理論計算で考慮されていない寄与が現れるためだと考えられる。

#### 磁歪測定による磁気八極子秩序

$PrV_2Al_{20}$ は $T_Q = 0.75$ K, 0.65 K で多極子の 2 段転移を示し、その転移は純度の高いものほどシャープかつ高温になることが知られているが、秩序パラメータの詳細はわかっていない。そこで格子歪みと直接カップルする磁歪を測定することで秩序相の解明を目的に研究を行った。その結果、磁場に線形に比例する成分の磁歪と、それに伴うヒステリシスを低磁場（$B <\sim 2$ T）で観測した。これは強的な磁気八極子秩序が起きていると考えると自然に理解できる。実際、GL 理論による計算で再現された [9]。今後の研究によりさらなる理解の進展が期待される。

### 4.8.3 パイロクロア酸化物における強相関量子現象

#### ラッティンジャー半金属 $Pr_2Ir_2O_7$ に誘起されるワイル半金属相

トポロジカル相の研究は、これまで弱相関に注力されてきたが、強相関系では我々の見出したワイル反強磁性体 $Mn_3Sn$ などの例があるのみで、あまり研究が進んでいない。その中でも、私たちの研究室で開発したパイロクロア型 $Pr_2Ir_2O_7$ は、2 重縮退した放物面形状の価電子帯と伝導帯がフェルミ準位上の 1 点で接するラッティンジャー半金属であり、電子相関が強いことが知られている大変、興味深い系である。$Pr_2Ir_2O_7$ は格子歪みや外部磁場等の摂動でワイル半金属になることが理論的に予測されていたが、実験的に証明されていなかった。　そこで、エピタキシーを利用して $Pr_2Ir_2O_7$ に格子歪みを導入することを目的として薄膜作製を試みた。その結果、固相エピタキシー法を用いることでエピタキシャル薄膜の作製に世界で初めて成功した [2]。この薄膜の結晶構造を詳細に調べたところ、格子歪みが導入された結晶粒と格子緩和した結晶粒とが共存していることが分かった。$Pr_2Ir_2O_7$ 薄膜は 50 K 以下で自発的ホール効果を示すが、これは Ir の磁気モーメントが all-in-all-out 構造をとり、時間反転対称性が破れるためと考えられる。この場合、格子が歪んでいる部分では、立方対称性と時間反転対称性が同時に破れており、ワイル半金属が現れるための条件を満たす。一方、格子緩和した部分は本来ラッティンジャー半金属であるが、外部磁場の印加で時間反転対称性が破れると、磁性ワイル半金属が現れると考えられる。これは、カイラル異常に起因する負の縦磁気抵抗とプレーナーホール効果を観測することで確認できた。

以上から、ラッティンジャー半金属が歪みの効果でワイル半金属に、外部磁場の印加で磁性ワイル半金属になることを実証した。この結果を契機として今後、強相関系のトポロジカル相の探索が進むことが期待される。

#### 四極子駆動量子スピンアイス $Pr_2Zr_2O_7$

量子スピン液体の研究は量子エンタングルメントや量子情報の研究につながる非常に重要な実験の舞台である。理論的な提案がたくさんある一方、実験的に実現したという例は全くないというのが現状である。そのなかで、最も有力な候補として量子スピンアイスがある。その量子スピンアイスの研究はこれまで様々な物質・測定によって行われてきたが、結晶の乱れにより本質的な議論が困難であるという問題があった。本研究では量子スピンアイス候補物質 $Pr_2Zr_2O_7$ の純良単結晶を育成し、極低温での磁化と磁歪を測定した [16]。その結果、磁化、磁歪ともに臨界磁場 $B_c \sim 2.1$ T においてメタ磁性転移による飛びを観測した。磁化の変化に対し、磁歪は非常にシャープに飛びを示す。これは非クラマース 2 重項およびスピンアイス相関が乱れにより壊されることなく残っており、さらに量子効果を生む四極子自由度が重要であることを示している。

＜受賞＞

[1] 肥後友也、第 14 回日本物理学会若手奨励賞 (領域 3)、日本物理学会、2020/3/17

＜報文＞

(原著論文)

[2] T. Ohtsuki *et al.*, “Strain-induced spontaneous Hall effect in an epitaxial thin film of a Luttinger semimetal”, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **116**, 8803 (2019).

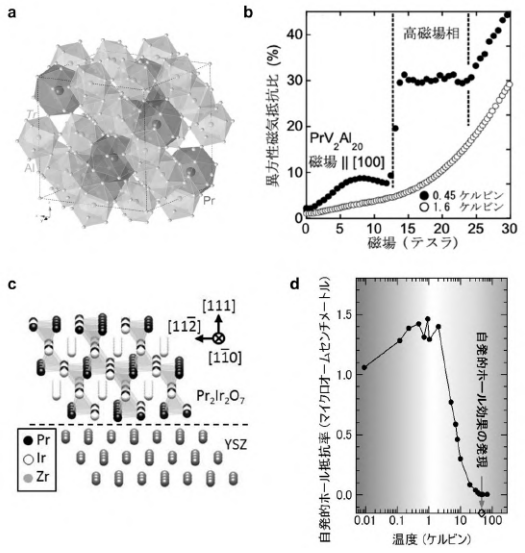



図 4.8.2: 図　**a-b** $PrV_2Al_{20}$ の結晶構造 (a) と異方的磁気抵抗効果 (b) [4]、**c-d** $Pr_2Ir_2O_7$ 薄膜の結晶構造 (c) と自発異常ホール効果 (d) [2]


[3] P. K. Muduli *et al.*, "Evaluation of spin diffusion length and spin Hall angle of the antiferromagnetic Weyl semimetal $Mn_3Sn$", Phys. Rev. B **99**, 184425 (2019).

[4] Y. Shimura *et al.*, "Giant Anisotropic Magnetoresistance due to Purely Orbital Reaarangement in the Quadrupolar Heavy Fermion Superconductor $PrV_2Al_{20}$", Phys. Rev. Lett. **122**, 256601 (2019).

[5] B. Cheng, Y. Wang, D. Barbalas, Tomoya Higo, S. Nakatsuji, and N. P. Armitage, "Terahertz conductivity of the magnetic Weyl semimetal $Mn_3Sn$ films", Appl. Phys. Lett. **115**, 012405 (2019).

[6] H.-H. Yang *et al.*, "Scanning tunneling microscopy on cleaved $Mn_3Sn$(0001) surface", Sci. Rep. **9**, 9677 (2019).

[7] T. Taniguchi *et al.*, "Field-induced switching of ferro-quadrupole order parameter in $PrTi_2Al_{20}$", J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 084707 (2019).

[8] K. Kuga *et al.*, "Effect of Anisotropic Hybridization in $YbAlB_4$ Probed by Linear Dichroism in Core-Level Hard X-Ray Photoemission Spectroscopy", Phys. Rev. Lett. **123**, 036404 (2019)

[9] A. S. Patri, A. Sakai, S.-B. Lee, A. Paramekanti, S. Nakatsuji, and Y. B. Kim, "Unveiling hidden multipolar orders with magnetostriction", Nat. Commun. **10**, 4092 (2019).

[10] K. Kuga *et al.*, "Linear polarization-dependent core-level photoemission spectroscopy in Yb-based valence fluctuating system", J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **238,** 146889 (2020).

[11] M. Fu *et al.*, "Unveiling Quadrupolar Kondo Effect in the Heavy Fermion Superconductor $PrV_2Al_{20}$", J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 013704 (2020).

[12] T. Ohtsuki, Z. Tian, M. Halim, S. Nakatsuji, and M. Lippmaa, "Growth of $Pr_2Ir_2O_7$ thin films using solid phase epitaxy" J. Appl. Phys. **127**, 035303 (2020).

[13] T. Matsuda *et al.*, "Room-temperature terahertz anomalous Hall effect in Weyl antiferromagnet $Mn_3Sn$ thin films" Nat. Commun. **11**, 1 (2020).

(会議抄録)

[14] H. Nakamura, *et al.* "Crystal structure and magnetic properties of the ferromagnet CoMnSb", JPS. Conf. Proc. **29**, 013004 (2020).

[15] T. Ohtsuki, *et al.* "Extracting the chiral contribution to the negative longitudinal magnetoresistance in epitaxial $Pr_2Ir_2O_7$ thin films" JPS. Conf. Proc. **30**, 011181 (2020).

[16] N. Tang, *et al.* "Magnetization and Thermal Expansion Properties of Quantum Spin Ice Candidate $Pr_2Ir_2O_7$", JPS. Conf. Proc. **30**, 011090, (2020)

(国内雑誌)

[17] 酒井明人、中辻知, "新しい熱電変換技術：磁性体の異常ネルンスト効果", O pluse E, **7-8 月号**, 546-549 (2019).

[18] 肥後友也, Danru Qu, 大谷義近, 中辻 知, "室温で巨大な応答を示すワイル反強磁性体 $Mn_3Sn$ の薄膜化に成功", 物性研だより **59**, 4 (2019).

(学位論文)

[19] 曽我部尚希, "カゴメ格子反強磁性金属のマイクロデバイス化と磁気ドメイン制御の研究"（東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻・修士論文）(2020).

[20] 中村紘人, "金属磁性体における異常磁気輸送現象の観測とトポロジカルな起源の検証"（東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻・修士論文）(2020).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[21] Nan Tang: "Metamagnetism, criticality and dynamics of quantum spin ice $Pr_2Zr_2O_7$", International Conference on Strongly Correlated Electron System 2019 (Okayama, Japan 2019/9/25) (oral)

[22] Hiroto Nakamura: "Anomalous hall and nernst effects observed in ferromagnet CoMnSb" J-Physics 2019 International Conference (Kobe University, Japan 2019/9/19) (poster)

[23] Yangming Wang: "Topological enhanced anomalous Nernst effect in L12-structure ferromagnet Fe3Pt" J-Physics 2019 International Conference (Kobe University, Japan 2019/9/19) (poster)

[24] Mingxuan Fu: "Unveiling Quadrupolar Kondo Effect in the Heavy Fermion Superconductor $PrV_2Al_{20}$" J-Physics 2019 International Conference (Kobe University, Japan 2019/9/19) (poster)

[25] Akito Sakai: "Giant anomalous Nernst effect and quantum critical enhancement at room temperature in Weyl ferromagnet" International Conference on Strongly Correlated Electron System (SCES) 2019 (Okayama, Japan 2019/9/24) (poster)

[26] Takumi Ohtsuki: "Tuning of Luttinger semimetal into magnetic Weyl semimetal in an epitaxial thin film of pyrochlore iridate" SCES 2019 (Okayama, Japan 2019/9/24) (poster)

[27] Muhammad Ikhlas: "The influence of composition on the magnetic phases of non-collinear antiferromagnet $Mn_3Sn$" SCES 2019 (Okayama, Japan 2019/9/24) (poster)

[28] Muhammad Ikhlas: "Magnetic Phase Diagram of Non-Collinear Weyl antiferromagnet $Mn_{3+x}Sn_{1-x}$" APS March Meeting 2020 (Denver, Colorado, USA 2020/3/4) (oral)

招待講演

[29] S. Nakatsuji: "Quantum Metamagnetic Transition in a Spin Ice Systems —Spin-Orbital-Liquid?—"CAQMP2019 "Computational Approaches to Quantum Many-body Problems" (ISSP, 2019/8/5)

[30] S. Nakatsuji: "Topological Spintronics using Weyl Antiferromagnets " UBC-UTokyo workshop "Quantum Materials from Frequency to Time Domain" (U. Tokyo, 2019/8/17)

[31] Tomoya Higo: "Large Time-Reversal-Odd Responsesin the Weyl Antiferromagnet $Mn_3Sn$ for Antiferromagnetic Spintronics" 11th International Conference on Magnetic and Superconducting Materials (Seoul National University, Seoul, Korea 2019/8/20)

[32] Tomoya Higo: "Large spontaneous responses induced by ferroic order of cluster magnetic octupoles in $Mn_3Sn$" J-Physics 2019 International Conference (Kobe University, Japan 2019/9/19)

[33] Akito Sakai: "Giant anomalous Nernst effect at room temperature in the Weyl ferromagnet $Co_2MnGa$" The 2nd Workshop on Spin-orbit Coupled Topological States (SOCTS 2019) (Pohang, Korea 2019/9/19)

[34] S. Nakatsuji: "Multipole control of electric and magnetic responses in Weyl magnets" SCES 2019 (Okayama, Japan 2019/9/24)

[35] Takahiro Tomita: "Topological Responses in Magnetic Weyl Metals" SCES 2019 (Okayama, Japan 2019/9/24)

[36] S. Nakatsuji: "Large Spintronic Responses in Weyl Antiferromagnets" Antiferromagnetic Spintronics: from topology to neuromorphic computing, (Johannes Gutenberg University, Mainz,2019/10/7)

[37] S. Nakatsuji: "Topological Spintronics using Frustrated Magnets"Dresden High Magnetic Field Laboratory, (2019/10/11)

[38] S. Nakatsuji: "Novel topological phases in frustrated magnets" Symposium on Unconventional Superconductivity and Spin liquids 2019 (Ringberg Castle, 2019/10/18)

[39] S. Nakatsuji: "Strange Metal Phase Due to Multipolar Dynamics" CIFAR workshop CIFAR – Quantum Materials Program Meeting (Jouvence, Canada, 2019/11/1)

[40] Tomoya Higo: "Large time-reversal-odd responses in the topological antiferromagnet $Mn_3Sn$" Materials Research Meeting 2019 (Yokohama, Kanagawa, Japan 2019/12/11)

[41] Akito Sakai: "Novel quantum phases in non-Kramers systems" CCES regular seminar (Seoul National University, Seoul, Korea 2020/2/21)

[42] S. Nakatsuji: "Weyl Fermions and Topological Spintronics" CSU Colloquium (Colorado State University, US, 2020/2/24)

[43] T. Higo: "Large magneto-optical Kerr effect in the non-collinear AF metal $Mn_3Sn$ "APS March Meeting 2020 (Denver, US, 2020/3/2)

[44] S. Nakatsuji: "Multipole control of electric and magnetic responses in magnetic Weyl metals" APS March Meeting 2020 (Denver, US, 2020/3/2)

(国内会議)

一般講演

[45] Takahiro Tomita: "Topological Phenomena in Magnetic Weyl Metal" J-physics 地域研究会-本郷 (東京大学, 2019/6/28) (oral)

[46] 酒井明人: "四極子近藤格子系 $PrTr_2Al_{20}$ (Tr = Ti, V) における多極子秩序、非フェルミ液体、超伝導" J-physics 地域研究会-本郷 (東京大学, 2019/6/28) (oral)

[47] Nan Tang："Metamagnetism, Criticality and Dynamics in Quantum Spin Ice $Pr_2Zr_2O_7$" 第 13 回物性科学領域横断研究会 (東京大学, 2019/11/27) (poster)

[48] Nan Tang: "Role of quadrupole-strain coupling in quantum spin ice material $Pr_2Zr_2O_7$" J-Physics 令和元年度領域全体会議 (神戸大学, 2020/1/6) (poster)

[49] Akito Sakai: "Kondo effect and magnetic octupole in quadrupole Kondo lattice $PrV_2Al_{20}$" J-Physics 令和元年度領域全体会議 (神戸大学, 2020/1/6) (poster)

[50] 上杉良太: "Phase dependence of anomalous Nernst effect in full-Heusler alloy $Co_2MnGa$" 第 67 回応用物理学会春季学術講演会 (上智大学 2020/3/13) (oral)

招待講演

[51] 中辻知: “ワイル粒子物理学：巨大ベリー曲率と室温トポロジカル物性” 理学部一号館　物理学教室コロキウム　(東京大学, 2019/6/14)

[52] 酒井明人: “ワイル強磁性体 $Co_2MnGa$ における室温巨大異常ネルンスト効果” 第 11 回トポロジー連携研究会「トポロジカル半金属」（名古屋大学 2019/8/2）

[53] 中辻知: “Topological Spintronics using Weyl Antiferromagnets” 第 43 回日本磁気学会学術講演会（京都大学, 2019/9/25）

[54] Tomoya Higo: “Large room temperature spontaneous responses in the Weyl antiferromagnet $Mn_3Sn$” CSRN-Tokyo Workshop 2019 (U. Tokyo, Japan 2019/11/22)

[55] 中辻知: “磁性体におけるワイル粒子の巨大応答とその制御に向けて” 第 32 回　QCD　Club, (理化学研究所, 2019/12/26)

[56] 肥後友也: “ノンコリニア反強磁性体 $Mn_3Sn$ におけるクラスター磁気八極子由来の室温巨大応答” J-Physics 領域全体会議 (神戸大学, 兵庫 2020/1/7)

[57] 肥後友也: “非共線・非共面スピン構造を持つ反強磁性体における新奇機能物性の開拓” 日本物理学会 第 75 回年次大会 (名古屋大学, 愛知 2020/3/17)

# 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。しかしそれらの共通のゴールは、宇宙の誕生から現在、 さらには未来に至る進化史を物理学によって記述することである。そのためには、常に学際的かつ分野横断的な活動が本質的であり、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

#### 弱重力レンズ効果と熱的 Sunyaev-Zel'dovich 効果の共相関関数の測定

銀河団は宇宙における最大の束縛された天体であり、その形成と進化は宇宙における構造形成と密接に関係している。銀河団を観測する手法として弱重力レンズ効果や宇宙背景放射の異方性の一種である熱的 Sunyaev-Zel'dovich（tSZ）効果が挙げられる。各々単体でも銀河団の性質を探る上で重要な観測量であるが、これらの共相関関数からさらに独立な情報を得ることが可能である。我々はすばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam の重力レンズ効果観測と Planck 衛星による tSZ 効果観測のデータを用いて、共相関関数を測定した。この測定結果を用いて銀河団質量を推定する上で系統誤差となる非熱的圧力の寄与を定量的に評価した。この共相関関数は X 線では観測が困難な遠方の銀河団の情報を含んでおり、非熱的圧力の時間進化を探る重要な手法になることが期待される。[49]

#### ALMA 干渉計による遠方輝線銀河探査

近年の高感度の遠赤外線観測は、可視光で暗い星形成銀河の存在を明らかにし、その種族の宇宙の星形成史への寄与は無視できないことがわかった。我々は ALMA を用いた無バイアス輝線サーベイから候補天体を抽出し [16, 18, 179]、さらに擬似観測データを生成することで、そのような銀河の検出可能性を統計的に議論した。[19, 76, 147, 185] また、新たに可視光で暗い銀河を発見し、追観測によって赤方偏移を同定した。[107, 194] 今後は, この新天体の星形成の状態や、可視光で暗い銀河が星形成史への影響を議論する。

#### 宇宙再電離期における相互相関シグナルの検出

SKA などの次世代望遠鏡では、宇宙再電離期における 21cm 線シグナルの検出が期待される。21cm 線観測では前景の寄与が大きいが、同じ時代における銀河分布との相互相関を取ることでその寄与を取り除くことが可能である。我々は、宇宙論シミュレーションと輻射輸送計算を用いて銀河と 21cm 線の相互パワースペクトルを計算した。大スケールでのシグナルを検出し、再電離の開始時期の推定を推定することができることを明らかにした。[29, 132, 137]

#### 機械学習を用いた輝線インテンシティマップの分離

輝線インテンシティマッピング観測では、輝線銀河の三次元大規模分布を捉えることができるが、異なる赤方偏移からの異なる輝線の寄与が混在するという問題がある。我々は機械学習（敵対的生成モデ

ル）を用いて異なる輝線の寄与を取り除けることを明らかにした。[103, 148]

#### 重力レンズコズミックシア宇宙論

すばる望遠鏡 HSC サーベイの初年度データを用いたコズミックシア宇宙論の結果を出版した。[3, 54] 測定された近傍宇宙での密度ゆらぎの大きさはプランク衛星による宇宙背景放射測定の結果とコンシステントであったがわずかに小さな密度ゆらぎの大きさを示しており、競合する DES、KiDS サーベイの結果と合わせると初期宇宙と後期宇宙の矛盾の可能性を示唆する興味深い結果であり今後のより大きなサーベイデータを用いた解析結果が待たれる。

#### HSC 重力マイクロレンズ観測による原始ブラックホール制限

アンドロメダ銀河のすばる望遠鏡 HSC を用いた観測による重力マイクロレンズ探査を行い、有力な候補がほとんど発見できなかったことから原始ブラックホールの存在量について厳しい制限を与え、広い質量範囲で原始ブラックホールがダークマターの主成分である可能性を棄却した。[6]

#### 銀河団質量測定の理論と観測

銀河団内外の銀河の速度分布を含めた位相空間分布を用いることで銀河団の質量を統計的に測定しまた銀河団銀河の性質を調べる新しい手法を提案した。[23, 28] HSC サーベイを用いて銀河団の質量を SZ 信号やリッチネスの関数として精密に測定し銀河団宇宙論の足がかりをえた。[7, 32] また HSC サーベイで発見された銀河団の X 線解析により銀河団の衝突の様々な物理量への影響を系統的に調べた。[21, 42, 44] 理論解析により重力レンズ効果で選択された銀河団サンプルに対する質量バイアスを定量化しその重要性を示した。[58]

#### 遠方天体の重力レンズ増光の効果

銀河団の重力レンズ増光を利用した $z \sim 6$ の超新星観測の可能性を検討した。[8, 9] Ia 型超新星宇宙論への重力レンズ効果を見積もりその影響が小さいことを示した。[14] $z \sim 6$ で例外的に明るいクエーサー SDSS J010013.02+280225.8 について、アルマ望遠鏡の観測を元に重力レンズ効果で大幅に増光されている可能性を指摘した。[57] 超新星や連星合体重力波などの突発天体の重力レンズ効果について包括的に調査した。[40]

#### 超大質量ブラックホールと活動銀河核の宇宙論的進化

活動銀河核 (AGN) の統計的性質は、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。我々は宇宙論的構造形成に基づく準解析的銀河形成モデルを構築した。モデルは観測される AGN の光度関数をよく再現する。このモデルは、SMBH は宇宙初期に超臨界ガス降着による急速なブラックホール成長によって形成されたことを予言する。[12] また、AGN のクラスタリングは、AGN の光度関数とともに SMBH へのガス降着のタイムスケールの制限となることがわかった。[98, 101, 105, 129, 130, 136, 144]

#### 銀河団における中心銀河とダークマターハローの向きの相関

(1) 標準的な $\Lambda$ CDM モデルを採用したシミュレーションにおいて銀河団とその中心銀河の主軸の向きはよく揃っていることを確認した。またその理論予言は観測事実と整合的であることを明らかにした。(2) 銀河団楕円率に対する新たな観測的制限を与え、シミュレーションと比較した。その理論予言は質量依存性を仮定すれば観測事実と整合的であることを明らかにした。(3) シミュレーションの解析から $\Lambda$ CDM 宇宙において現在の角度相関は、フィラメントに沿った質量降着によって引き起こされるという物理的描像を得た。[46]

#### AI を用いた物理系の解析

天文学においてデータが重要な時代になり、物理をよりよく理解するために人工知能（AI）を用いた解析を行っている。教師ありクラスタリングを用いて金属欠乏星の化学組成の解釈を行っている。また、物理学を応用して AI の手法を改善している。複雑な物理系を AI でモデル化することで、AI がどのようにデータを理解し、解釈するかをより理解でき、アルゴリズムの透明性の分野での新たな発見ができる。AI に関する最先端の研究以外にも、大学院生を対象とした対応セミナー、社内勉強会、公開講座などを実施している。

### 5.1.2 系外惑星

#### 光度変動による星の自転周期推定と星震学

自転周期は恒星の最も基本的パラメータの一つである。ケプラー探査機の高精度光度曲線を用いて、恒星の自転周期が正確に推定されるようになっているが、微分回転や黒点の分布の影響のために、星震学による独立な推定値と食い違う場合があることが知られている。[11] 我々は、Lomb-Scargle 解析、wavelet、

及び自己相関関数による測光的自転周期推定を系統的に行い、それを星震学の結果と比較することを試みている。また、測光的自転周期を星震学解析と組み合わせることで、系外惑星系の主星自転軸のずれの測定精度の向上を目指している。[94]

### 原始惑星系円盤 HL Tau の予言する惑星系の安定性

惑星系の多様性の起源が初期条件によるものなのか、あるいはその後のカオス的な重力進化によるものなのかはまだ定説がない。特に、従来の理論計算は、人為的な初期条件から出発しており、その結果として、複数惑星系の不安定性が過大評価されている可能性がある。そこで我々は、ALMA で観測された HL Tau 円盤のリングの位置に惑星が存在すると仮定し、惑星と円盤相互作用を考慮した数値シミュレーションによって、最終的に生まれる惑星系の性質を計算した。その結果、ほとんどの場合、従来の研究とは異なり 100 億年程度の長期間安定な系が生まれることがわかった。[59, 93, 133, 134]

### 原始惑星系円盤回転軸と主星自転軸の角度

現在までに 100 個以上の系外惑星系に対して、主星自転軸と惑星公転軸のなす角度が測定されている。そのうち 3 割程度は、その角度が 30 度以上ずれていることが知られている。その起源として、原始惑星系円盤誕生時の主星自転軸とガス円盤の軌道回転軸がどのような分布をしているかを、Smoothed Particle Hydrodynamic Simulation によって系統的に調べた。その結果、誕生した原始星が質量膠着して成長するにしたがって、周りの円盤の角運動量の方向に整列することがわかった。原始星の誕生時には、その自転軸は周りの円盤の公転軸に対してかなりランダムに分布しているが、ほぼ質量膠着が終える頃には、それらは約 20 度以下で整列することがわかった。[51]

### スパースモデリングを用いた第二の地球の地図作成

第二の地球の直接撮像が将来成功した時に、それから得られる反射光の時間変動から逆に惑星の表層反射率を推定できることが知られている。我々は、既存の手法を拡張し、スパースモデリングを含む様々な方法で第二の地球の地図作りをシミュレートした。検証のために、模擬観測に加え、実際の地球の反射光の 2 年のデータから地球の表層を推定し、新たな手法と既存の手法を比較した。結果として、我々の提案した方法の方がよい精度で地図を作成できることが示された。また、仮に観測する惑星が地球から 10pc の位置にあったとしても、2 年のうち 1 月に 1 日の観測をするだけで地球の大陸が十分に再現できうることを示した。

### 原始惑星系円盤における惑星の軌道進化

恒星形成時にその周囲に形成される原始惑星系円盤と呼ばれるガス円盤の中で惑星は生まれると考えられている。現在までに多数の太陽系外惑星が発見されており、その大部分は太陽系内の惑星とは異なる質量、軌道長半径の分布を持っている。このような多様性は原始惑星円盤内の惑星の進化に密接に関連していると考えられている。実際に惑星が作ったと考えられる円盤構造も多数観測されている。[15, 47] 我々はガス-ダスト 2 流体の数値流体シミュレーションを行い、ダストが巨大惑星の移動に及ぼす影響を調べた。その結果、惑星が作るギャップ外縁部にダストが集積し、ダスト-ガス相互作用によってダストが集積した領域とその付近のガス面密度が低下する。そのため、惑星が円盤外側のガスから受けるトルクが低下し、惑星の内側移動が大幅に減速することが分かった。さらに、木星質量程度の惑星であれば外側に動きうることも分かった。これは従来理論の未解決問題である惑星落下問題を解決しうるものである。[20, 96, 110, 135, 141] また惑星が内側移動しているときには、惑星の軌道長半径とギャップの中心（最も深い場所）にはずれが生じる。このずれから惑星移動速度を見積もるモデルを構築した。[60, 100, 102]

### 大気大循環モデルを用いた系外惑星の模擬観測と光度曲線解析

系外惑星からの反射光が自転公転によって時間変動することを利用して、表層の情報を再構築することが可能と考えられている。この方法論が雲のある惑星についても有用であるか調べるため、我々は惑星大気大循環モデルによる雲構造の計算結果を用いて系外惑星の観測シミュレーションを行い、そのデータを解析した。その結果、雲の少ない大陸が見える場合は自転軸傾斜角を推定できることが示唆された。[97, 91, 126, 163]

### ガス惑星の大気散逸

ホットジュピターのような中心星の近くに位置する系外惑星は中心星からの放射による加熱で大気が散逸することが知られている。従来の理論研究では EUV による加熱が散逸を駆動すると考えられていた。EUV よりも長波長で惑星大気の深部まで透過する FUV による加熱を取り入れたシミュレーションを行った。A 型星のような FUV 放射が卓越する中心星の周りでは EUV ではなく、FUV による加熱が主要となり、大気が散逸することがわかった。[78]

### 5.1.3 星・ブラックホール形成

#### 星形成領域内の円盤の向きの分布解析

星や円盤の角運動量の起源の有力な候補の一つは分子雲中の乱流運動である。仮にこれが正しいとすると、星や円盤の回転軸の向きが同一領域でランダムになっているはずである。我々は、これを近年のALMA による原始惑星円盤のイメージデータを用いて 5 つの代表的な星形成領域で検証することを試みた。結果として、基本的には円盤の向きはランダムになっていることを確認したが、一方で Lupus III cloud 内で円盤の向きが特定の方向に向いている示唆が得られた。さらに、既存の円盤の向きを決める手法に加え、新たにスパースモデリングを用いた円盤イメージングを行い、向き推定を比較した。結果として、スパースモデリングは高解像度画像を与えるものの、向き推定の精度は既存の手法と変わらないことを実証した。

#### 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蒸発する。この現象は、巨大分子雲中の星形成効率や星形成率に大きく寄与するため、銀河進化などの文脈においても重要となるプロセスである。銀河進化と共に金属量が局所的に変化するため、このプロセスの金属量依存性を系統的に知ることが重要であるが、これまで明らかにされていなかった。本研究では、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 3 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抑制され得ることを明らかにした 。[34]

#### 銀河円盤および星周円盤の力学的不安定性

移動格子法を用いた流体シミュレーションを行い、銀河形成および星形成の過程において渦状腕が果たす役割を明らかにした。特に、自己重力とガス圧力およびコリオリ力の釣り合いによって成り立つ腕の安定性が破れる際に、質量の小さなガス塊が複数個生成され、それらの中で新たな星形成が起こることを示し、その不安定性条件を解析的に求めた。この力学的考察は、リング銀河形成や多重星形成に適用することができる。[38, 24, 10]

#### 視線速度を用いた長周期連星ブラックホール探査

連星ブラックホール合体に前駆して、長周期連星ブラックホールが存在することが予想される。本研究では直接観測が困難なそれらを、周囲を公転する恒星の視線速度変動を通じて探査する方法の提案・検証を行った。模擬観測の結果、高精度観測が可能であれば、視線速度の短周期変動を通じた連星ブラックホール探査が可能であることが分かった。また三体系の軌道が傾斜している場合には、歳差運動・古在機構によって軌道傾斜角の変化が生じ、それに伴った視線速度振幅の長周期変動も有効な探査法となりうることが分かった。[55, 95, 106, 138]

#### 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る前のダストが存在しない銀河である。このような銀河では、通常ダストに覆われおり無視できる前主系列星が観測されるスペクトルに含まれる可能性がある。前主系列星を含む銀河スペクトルの理論計算を行った。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。また、銀河スペクトルはダストによっても赤くなるが、前主系列星によって赤化された初代銀河スペクトルでは若い主系列星による青い成分も含まれるため区別可能であることもわかった。[17]

### 5.1.4 高エネルギー天文現象

#### 中性子星形成と超新星爆発

大質量星の重力崩壊で形成される中性子星とそれに伴う超新星爆発の多様性の関係解明を目指した研究に取り組んだ。[5, 36, 39] 特に [5] では、生まれたての中性子星が超新星残骸で起こるダスト形成に与える影響に注目。中性子星の磁場や回転速度に依存して形成されるダストの化学特性やサイズ分布、放射スペクトルがどのように変化するかを系統的に計算、JWST を含めた将来計画への向けて観測戦略の提言を行った。また [36] では、謎の電波突発天体現象、fast radio burst(FRB) に関して、最有力候補である超高輝度超新星残骸起源説に着目。この説を検証するため、Very Large Array を用いた超高輝度超新星残骸のフォローアップ観測を実施した。超高輝度超新星残骸からの FRB は検出されなかったが、FRB と超高輝度超新星残骸の中性子星モデルに対して有意な制限が得られた。

#### 連星白色矮星合体残骸

連星白色矮星合体により形成される強磁場高速回転白色矮星からの星風解を新たに構成した。[45] この星風解を 2019 年 4 月に発見された特異な白色矮星、WD J005311 に適用、質量、回転速度、磁場強度を求め、この白色矮星が連星白色矮星合体起源の強磁場高速回転白色矮星であること示した。

### 超矮小銀河における r 過程元素生成

中性子星連星合体 (NSM) では r 過程という元素合成が起こる。超矮小銀河 (UFD) 内において中性子星連星合体が起きたと仮定し、合成された元素の銀河内での拡散、星への取り込まれ方をシミュレートした。その結果、r 過程元素を多量に含む UFD(Reticulum II) は、銀河中心での NSM で説明できること、r 過程元素を少量含む UFD(Tucana III) は、銀河外縁部での NSM で説明できることがわかった。また、一つの UFD の星々に見られる r 過程元素量の分散は、星形成の長さにより決定されることが明らかになった。

### 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星が破壊される場合があり、この現象は潮汐破壊現象と呼ばれる。白色矮星が潮汐破壊される場合の特徴の一つは、潮汐破壊現象を起こすことの出来るブラックホールの質量が $10^5$ 太陽質量以下に限定されることである。二つ目は、破壊・圧縮される白色矮星が核爆発を起こしうるという点である。特に核爆発を起こした場合には、Ia 型超新星爆発に似た現象として観測されうるということが示唆されている。我々は流体シミュレーション、元素合成シミュレーション、輻射輸送シミュレーションを組み合わせることで本現象からの観測兆候への理論予言を与えた。その結果、ヘリウムを主として構成される低質量の白色矮星の潮汐破壊現象から生じる観測兆候は Ia 型超新星爆発よりも短いタイムスケールで、暗い突発天体として観測されることを明らかにした。さらに、突発天体の観測データの中から本理論予言と一致する候補天体を発見、報告した。

＜受賞＞

[1] 樫山和己、研究奨励賞、日本天文学会、2020 年 2 月 18 日

[2] Tilman Hartwig, Yuta Tarumi *et al.*, best poster award at the conference “First Stars VI”, March 2020

＜報文＞

(原著論文)


[3] Hikage C., Oguri M., et al., 2019, PASJ, 71, 43

[4] Sakurai Y., Yoshida N., Fujii M., MNRAS, 484, 2019, 4665

[5] Omand, C., Kashiyama, K., Murase, K., 2019, MNRAS, 484, 5468

[6] Niikura H., et al. (incl. Oguri M.), 2019, Nature Astronomy, 3, 524

[7] Miyatake H., et al. (incl. Oguri M.), 2019, ApJ, 875, 63

[8] Moriya T. J., et al. (incl. Oguri M.), 2019, PASJ, 71, 59

[9] Wong K. C., Moriya T. J., Oguri M., et al., 2019, PASJ, 71, 60

[10] Inoue S., Yoshida N., MNRAS, 485, 2019, 3024

[11] Suto Y., Kamiaka S., Benomar O., 2019, AJ, 157, 172

[12] Shirakata H., Kawaguchi T., Oogi T., Okamoto T., Nagashima M., 2019, MNRAS, 487, 409

[13] Yasuda N. , et al. including Naoki Yoshida, 2019, PASJ, 71, 74

[14] Sakakibara H., Nishizawa A. J., Oguri M., et al., 2019, MNRAS, 486, 4365

[15] Tsukagoshi T., Muto T., Nomura H., Kawabe R., Kanagawa K.D., *et al.*, 2019, ApJL, 878, L8

[16] Yamaguchi, Y., et al. (incl. N. H. Hayatsu), 2019, ApJ, 878, 73

[17] Mitani H., Yoshida N., Omukai K., Hosokawa T., 2019, MNRAS, 488, L64

[18] Hayatsu, N. H., et al. 2019, RNAAS, 3, 97

[19] Vio, R., et al. (incl. N. H. Hayatsu), 2019, A&A, 627, A103

[20] Kanagawa K. D., 2019, ApJL, 879, L19

[21] Okabe N., Oguri M., et al., 2019, PASJ, 71, 79

[22] M. Surace *et al.* (incl. Tilman Hartwig Hartwig): 2019, MNRAS, 488, 3995

[23] Hamabata A., Oogi T., Oguri M., Nishimichi T., Nagashima M. 2019, MNRAS, 488, 4117

[24] Inoue S., Yoshida N., MNRAS, 488, 2019, 4400

[25] Chen W., et al. (incl. Oguri M.), 2019, ApJ, 881, 8

[26] T. E. Woods *et al.* (incl. Tilman Hartwig Hartwig): 2019, PASA , 36, 27

[27] Shirasaki M., Yoshida N., Ikeda S., PRD, 100, 2019, 3527

[28] Hamabata A., Oguri M., Nishimichi T., 2019, MNRAS, 489, 1344

[29] Moriwaki K., Yoshida N., Eide M. B., Cialdi B., 2019, MNRAS, 489, 2471

[30] Namikawa T., et al. (incl. Oguri M.), 2019, ApJ, 882, 62

[31] Moriya, T. J., Tanaka, M., Morokuma, T., et al. 2019, APJ, 882, 70

[32] Murata R., Oguri M., et al., 2019, PASJ, 71, 107

[33] Sonnenfeld A., et al. (incl. Oguri M.), 2019, A&A, 630, A71

[34] Nakatani R., Yoshida N., ApJ, 883, 2019, 127

[35] Matsuoka Y., et al. (incl. Oguri M.), 2019, ApJ, 883, 183

[36] Tsuna, D., Kashiyama, K., Toshikazu, S., 2019, ApJ, 884, 87s

[37] Coe D., et al. (incl. Oguri M.), 2019, ApJ, 884, 85

[38] Inoue S., Yoshida N., MNRAS, 491, 2020, L24

[39] Law, C., Omand, C., Kashiyama, K., et al. 2019, ApJ, 886, 24

[40] Oguri M., 2019, Rep. Prog. Phys., 82, 126901

[41] Huber S., et al. (incl. Oguri M.), 2019, A&A, 631, A161

[42] Tanaka K., et al. (incl. Oguri M.), 2020, MNRAS, 491, 2268

[43] Aihara H., et al. (HSC collaboration), 2019, PASJ, 71, 114

[44] Ota N., et al. (incl. Oguri M.), 2020, PASJ, 72, 1

[45] Kashiyama, K., Fujisawa, K., Shigeyama, T., 2019, ApJ, 887, 39

[46] Okabe T., Nishimichi T., Oguri M., Peirani S., Kitayama T., Sasaki S., Suto Y., Pichon C., Dubois Y., 2020, MNRAS, 491, 2268

[47] Kim S., et al. (incl. Kanagawa K.D.), 2020, ApJ, 888, 72

[48] Marques-Chaves R., et al. (incl. Oguri M.), 2020, MNRAS, 492, 1257

[49] Osato K., Shirasaki M., Miyatake H., Nagai D., Yoshida N., Oguri M., Takahashi R., MNRAS, 492 , 2020, 4780

[50] Strait V., et al. (incl. Oguri M.), 2020, ApJ, 888, 124

[51] Takaishi D., Tsukamoto Y., Suto, Y., 2020, MNRAS, 492, 5641–5654

[52] Tarumi Y., *et al.*, 2020, MNRAS 494, 120T

[53] Kawana K., Maeda K., Yoshida N., et al. 2020, ApJL, 890, L26

[54] Hamana T., et al. (incl. Oguri M.), 2020, PASJ, 72, 16

[55] Hayashi T., Wang S., Suto Y., 2020, ApJ, 890, 112

[56] Umetsu K., et al. (incl. Oguri M.), 2020, ApJ, 890, 148

[57] Fujimoto S., Oguri M., Nagao T., Izumi T., Ouchi M., 2020, ApJ, 891, 64

[58] Chen K.-F., Oguri M., Lin Y.-T., Miyazaki S., 2020, ApJ, 891, 139

[59] Wang S., Kanagawa K.D., Hayashi T., Suto Y., 2020, ApJ, 891, 166

[60] Kanagawa K. D., Nomura H., Tsukagoshi T., Muto T., Kawabe R., 2020, ApJ, 892, 83

[61] Suto Y., 2019, "Astronomers receice the 2019 Nobel prize in physics", Bulletin of Association of Asia Pacific Physical Societies, 29, 5–8

(会議抄録)

[62] Kazuhiro Kanagawa, Hidekazu Tanaka, Ewa Szuszkiewicz, EPSC-DPS Joint Meeting 2019, held 15-20 September 2019 in Geneva, Switzerland, id. EPSC-DPS2019-22

(国内雑誌)

[63] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その四十六: 火星と宇宙植物学"、東京大学出版会 UP **560**(2019)6 月号, pp.41–48.

[64] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その四十七: 眠れなくなる桁の桁の話"、東京大学出版会 UP **563**(2019)9 月号, pp.19–25.

[65] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その四十八: 我々は宇宙人をどこまで理解できるか"、東京大学出版会 UP **566**(2019)12 月号, pp.31–37.

[66] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その四十九: ブラック天文学：24 時間戦えますか"、東京大学出版会 UP **569**(2020)3 月号, pp.43–48.

[67] 須藤 靖: "宇宙生物学と学術会議越しに見た海部先生"、天文月報 **112**(2019) pp.574–575.

[68] 須藤 靖: "2019 年ノーベル物理学賞:宇宙の構造進化と太陽系外惑星"、現代化学 **585**(2019)12 月号, pp.33–37.

[69] 須藤 靖: "2019 年ノーベル物理学賞：標準宇宙論を確立したジェームス・ピーブルズ"、岩波 科学 **90**(2020)1 月号, pp.51–55.

[70] 須藤 靖: "2019 年ノーベル物理学賞：James Peebles 氏、Michel Mayor 氏、Didier Queloz 氏 – 宇宙の進化と宇宙におけるこの地球の立ち位置に関する人類の理解への貢献"、日本物理学会誌 **75**(2020) pp.47–48.

[71] 大栗真宗, "新種の時間変動重力レンズの発見", 天文月報 **112** (2019) pp.758-769

[72] 樫山和己：" 謎の天体 Fast Radio Burst は若い中性子星が起源か？" , 日本物理学会誌 Vol. 74, No. 7, 2019

[73] 森脇可奈, 吉田直紀: 宇宙の大規模構造と銀河形成、数理科学 2020 年 3 月号

(学位論文)

[74] Masataka Aizawa: "Observational characterization of protoplanetary disks, exo-rings, and Earth-twins in exoplanetary systems" (博士論文)

[75] Taizo Okabe: "Non-sphericities and alignments of clusters and central galaxies from cosmological hydrodynamical simulation: theoretical predictions and observational comparison" (博士論文)

[76] Natsuki H. Hayatsu: "Probing Cosmic Star-Formation History with Blind Millimetre Searches for Galaxy Emission Lines" (博士論文)

[77] Yuta Tarumi: "Dilution of heavy elements in galaxies and its implications"(修士論文)

[78] 三谷啓人: "ガス惑星大気の光蒸発過程" (修士論文)

(著書)

[79] 須藤 靖: "解析力学・量子論 (第 2 版)"、 東京大学出版会 (2019 年 5 月刊行、308 ページ)

[80] Tilman Hartwig: contributed chapter “Statistical predictions for the first black holes”, published in “Formation of the First Black Holes”, edited by Latif, M.; Schleicher, D. Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2019. ISBN 9789813227958, pp. 161-175

[81] 須藤 靖: “一般相対論入門（改訂版）”、日本評論社 (2019 年 9 月刊行、218 ページ)

[82] 須藤 靖: シリーズ 現代の天文学 第 3 巻 “宇宙論 II – 宇宙の進化 第 2 版” 日本評論社 (2019 年 5 月刊行、280 ページ、第一章 pp.1–60 北山哲と共同執筆)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[83] Naoki Yoshida: “Big Data Cosmology with Subaru HSC”, 5th CREST International Symposium on Big Data Application (Akihabara, Tokyo, January 10, 2019)

[84] Oguri M., “HSC Catalogs”; First HSC-eROSITA-DE joint collaboration meeting, Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, Garching, Germany (May 13–16, 2019)

[85] Kojiro Kawana: “Emission from thermonuclear explosions in white dwarf TDEs”; FOE19 Fifty-one Erg (Raleigh, United States of America, May 20 - 24, 2019 )

[86] Tilman Hartwig: “Multiplicity of the first stars from machine learning-based classification of stellar fossils”, EWASS, Lyon (June 20, 2019)

[87] Tilman Hartwig: “Under the Same Sky: Teaching the Teachers in Liberia”, EWASS, Lyon (June 21, 2019)

[88] Oguri M., “Comparison of CAMIRA and XXL clusters: Selection bias and cluster astrophysics”; Joint XXL-HSC meeting, Ovronnaz, Switzerland (July 4–5, 2019)

[89] Kojiro Kawana: “Emission from thermonuclear explosions in white dwarf TDEs”; Workshop to bring together experts on High Energy Astrophysics from Japan and Israel (Saitama, Japan, July 18-23, 2019)

[90] Masataka Aizawa: “Systematic study of alignment of disk orientations in nearby star-forming regions”; RESCEU Summer School (Akita, Japan, Aug 23 - 26, 2019)

[91] Nakagawa Y., “Obliquity of an earth-like planet from photometric frequency modulation: Time-Frequency Analysis of GCM simulation data for the Earth”, Planet$^2$ / RESCEU Summer School From the Solar System to the Universe, August 26, Kakunodate

[92] Tilman Hartwig: “Multiplicity of the first stars from machine learning-based classification of stellar fossils”, Conference “CEMP Stars as Probes...”, Geneva (September 10, 2019)

[93] Wang S.,”Planetary Migration and accretion effects on the evolutionary outcomes of a multi-planetary system: HL Tau”, JSPS Planet$^2$/the 12th RESCEU International Symposium “From Protoplanetary Disks through Planetary System Achitecture to Planetary Atmospehers and Habitability”, October 18, 2019, Okinawa

[94] Lu Y., ”Systematic comparison of photometric and asteroseismic rotation periods of 33 Kepler stars with transiting planets ”, JSPS Planet$^2$/the 12th RESCEU International Symposium “From Protoplanetary Disks through Planetary System Achitecture to Planetary Atmospehers and Habitability”, October 18, 2019, Okinawa

[95] Toshinori Hayashi, Shijie Wang, Yasushi Suto: “A strategy to search for an inner binary black hole from the motion of the tertiary star”; Planet2/RESCEU Symposium 2019, (Okinawa, Japan, October 15-18, 2019)

[96] Kazuhiro D. Kanagawa, RESCEU/Planet2 Symposium, October 2019, Okinawa, Japan

[97] Nakagawa Y., “Obliquity of an earth-like exoplanet from frequency modulation of its directly imaged light curves: analysis of the GCM data for the Earth”, Planet$^2$ / RESCEU Symposium 2019 “From Protoplanetary Disks through Planetary System Architecture to Planetary Atmospheres and Habitability”, October 14, 2019, Okinawa

[98] Taira Oogi: “Clustering and halo occupation of AGNs using a semi-analytic model of galaxy formation”; The first Shanghai Assembly on Cosmology and Galaxy Formation (Shanghai, China, November 8, 2019)

[99] Naoki Yoshida: “Cosmological SImulations of Galaxy Formation”, UTokyo-ENS Joint Workshop (University of Tokyo, November 25, 2019)

[100] Kazuhiro D. Kanagawa, Planet Formation Workshop 2019, November 25th-28th, 2019, NAOJ

[101] Taira Oogi: “Clustering and halo occupation of X-ray AGNs using a semi-analytic model”; Galaxy Formation and Evolution Across the Cosmic Time (Taipei, Taiwan, December 9, 2019)

[102] Kazuhiro D. Kanagawa, ALMA Workshop 2019: Early Planet Formation in Embedded Disks, December 2019, The University of Tokyo

[103] Kana Moriwaki: ”Emission line as a tracer of ISM properties and the large-scale structure of the universe”; The interstellar medium of high redshift galaxies (Sesto, Italy, January 13-17, 2020)

[104] Kojiro Kawana: “Emission from thermonuclear explosions in white dwarf TDEs”; Tidal Disruptions in Kyoto: Confronting Theory with Observations (Kyoto, Japan, January 14-16, 2020)

[105] 大木 平: “Semi-analytic modeling of AGNs: clustering and halo occupation”; HSC-AGN face-to-face meeting (Kyoto University, 1/23, 2020)

[106] Toshinori Hayashi, Shijie Wang, Yasushi Suto: "A strategy to search for an inner binary black hole from the motion of the tertiary star"; The Evolution of Massive Stars and Formation of Compact Stars: from the Cradle to the Grave, (Tokyo, Japan, February 26-28, 2020)

[107] Natsuki H. Hayatsu :"What is Darth Vader: the story and background", Japan (March 2020)

招待講演

[108] Naoki Yoshida: "Cosmology and Fundamental Physics with AI", Information Search, Integration and Personalization 2019 (Crete, Greece, May 10, 2019)

[109] Suto Y., "From unknown knowns to known knowns: cases of dark baryon and exo-ring", the conference on *Continuous Challenges for X-ray Astronomy*, June 8, 2019, Tokyo

[110] Kazuhiro D. Kanagawa, Great Barriers in Planet Formation, July 2019, Palm Cove, Queensland, Australia

[111] Kazumi Kashiyama, "Optically thick rotating magnetic wind from a massive white-dwarf merger product", High Energy Astrophysics Japan Israel Workshop (Kobe, Japan, July 22, 2019)

[112] Naoki Yoshida: "Formation of the First Stars and Blackholes", First Light (Sao Paulo, Brazil, August 2, 2019)

[113] Oguri M., "New directions in strong lensing"; CosmoCruise 2019: From the Early to the Late Universe, Venice, Italy (August 18–25, 2019)

[114] Suto Y., "Spin-orbit architecture of planetary systems with the Rossiter-McLaughlin effect and asteroseismology", JSPS Planet$^2$/RESCEU workshop on exoplanets, August 27, 2019, Tokyo

[115] Kazuhiro D. Kanagawa, Hidekazu Tanaka, Ewa Szuszkiewicz, EPSC-DPS Joint Meeting 2019, September 2019, Centre International of Conferences, Geneva, Switzerland

[116] Oguri M., "Gravitational waves in the inhomogeneous Universe"; Cosmological Frontiers in Fundamental Physics 2019, Perimeter Institute for Theoretical Physics, Waterloo, Canada (September 3–6, 2019)

[117] Kazumi Kashiyama, "White dwarf merger remnants and fast radio bursts", YITP long-term workshop: Multi-Messenger Astrophysics in the Gravitational Wave Era (Kyoto, Japan, September 26, 2019)

[118] Naoki Yoshida: "Formation and Evolution of Stars", ISYA2019 (Yunnan, China, October 17, 2019)

[119] Suto Y., "Spin-orbit architecture of planetary systems", JSPS Planet$^2$/the 12th RESCEU International Symposium "From Protoplanetary Disks through Planetary System Achitecture to Planetary Atmospehers and Habitability", October 18, 2019, Okinawa

[120] Suto, Y., "Universe unveiled through holes of aluminum plates", The 2019 Kyoto prize workshop " Wide-Field Sky Survey of the Universe: From the Past to the Future of Astronomy", November 13, 2019, Tokyo

[121] Oguri M., "SDSS, Gravitational Lensing, and Quasars"; Wide-Field Sky Survey of the Universe: From the Past to the Future of Astronomy, Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan (November 13, 2019)

[122] Oguri M., "Weak Lensing and Cluster Science with Subaru HSC-SSP Survey"; Science with Subaru: An Indian Perspective, Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India (December 18–20, 2019)

[123] Oguri M., "Gravitational waves in the inhomogeneous Universe"; Dark Odyssey 2020: Gravitational-Wave Probes of Dark Universe, Seoul National University, Seoul, South Korea (January 3–7, 2020)

[124] Naoki Yoshida: "Physics of the ISM", The interstellar medium of high redshift galaxies (Sest, Italy, January 16, 2020)

[125] Suto, Y., "Lessons from Mars and Earth for future explorations of bio-signatures from earth-like planets", ABC Project/CPS Workshop "Climates of Terrestrial Planets in Various Solar Systems", February 11, 2020, Kobe

[126] Nakagawa Y., "Planetary obliquity from frequency modulation of direct imaged light curve: mock observation and analysis from GCM simulation of an Earth-like planet", ABC Project/CPS Workshop on Climates of Terrestrial Planets in Various Solar Systems, February 12, 2020, Kobe

[127] Tilman Hartwig: "Exploring new Frontiers with Gravitational Waves from Massive Black Holes", First Stars VI, Concepcion (2020/03/03)

[128] Oguri M., "Science with gravitationally lensed quasars"; The blind search for hidden galaxies in an abundant line of sight, zoom (March 11–12, 2020)

(国内会議)

一般講演

[129] 大木 平: "AGN クラスタリングで探る超巨大ブラックホールの成長過程"; 超巨大ブラックホール研究推進連絡会 (京都大学, 5/30, 2019)

[130] 大木 平: "Exploring the AGN clustering using a semi-analytic model of galaxy formation"; 銀河進化研究会 (カブリ IPMU, 6/5, 2019)

[131] Kojiro Kawana: "Searching for the fastest spinning single white dwarfs with Tomo-e Gozen"; 木曽シュミットシンポジウム 2019 (長野県, 7/9-10, 2019)

[132] 森脇可奈: ”宇宙再電離期における 21cm 線と輝線銀河の相互相関”; SKA-Japan シンポジウム 2019（国立天文台, 9/2-6, 2019）

[133] Wang, S., “Effects of planetary migration and accretion on the long-term orbital stability of a multi-planetary system: case of HL Tau”, ALMA workshop “Early Planet Formation in Embedded Disks”, December 9, 2019, Tokyo

[134] Wang, S.,“Effects of planetary migration on the long-term orbital stability of a multi-planetary system: case of HL Tau”, Annual Meeting of Astronomical Society of Japan, P329a, September 12, 2019, Kumamoto

[135] 金川和弘, 日本天文学会秋季年会（熊本大学, 9/11-13, 2019）

[136] 大木 平: “AGN クラスタリングで探る X-ray AGN の発現機構”; 日本天文学会 2019 年 秋季年会 (熊本大学, 9/11, 2019)

[137] 森脇可奈: ”宇宙再電離期における 21cm 線と [OIII] 銀河の相互パワースペクトル”; 日本天文学会 2019 年秋季年会（熊本大学, 9/11-13, 2019）

[138] 林利憲, Shijie Wang, 須藤靖： “視線速度法を用いた長周期連星ブラックホールの探査の提案と検証”; 日本天文学会 2019 年秋季年会（熊本大学, 9/11-13, 2019）

[139] 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からの観測兆候”; 日本天文学会 2019 年秋季年会 (熊本県, 9/11-13, 2019)

[140] 大栗真宗, “Optically selected clusters”; The 3rd HSC-X Cluster Workshop (名古屋大、2019 年 9 月 18 日)

[141] 金川和弘, 惑星科学会秋季講演会, 京都産業大学, 2019 年 10 月

[142] Tilman Hartwig: “Teaching the Teachers: Astronomy as Gateway to Scientific Literacy in Liberia”, IAU Symposium, NAOJ (2019/11/13)

[143] Tilman Hartwig: “Multiplicity of the first stars from machine learning-based classification of stellar fossils”, Workshop “JINA-CCE”, NAOJ (2019/12/03)

[144] 大木 平: “準解析的モデルによる AGN 空間統計”; 第３２回理論懇シンポジウム (国立天文台, 12/25, 2019)

[145] 大栗真宗, “Splashback radius of clusters in the HSC survey”; Cosmic Acceleration (東京大学、2020 年 2 月 17 日–19 日)

[146] 大栗真宗, “Overview of Euclid/UNIONS”; Euclid 衛星とすばる望遠鏡とのシナジー (東京大学、2020 年 2 月 22 日)

[147] Natsuki H. Hayatsu and ADF22 team: “遠赤外線輝線銀河のブラインド探査による星形成史の研究”, 天文学会 2020 年春季年会 (筑波大学, 3/16-3/19, 2020)

[148] 森脇可奈, 吉田直紀, 白崎正人: ”機械学習を用いた輝線強度マップの分離”; 日本天文学会 2020 年春季年会（筑波大学, 3/16-19, 2020）

招待講演

[149] 須藤靖: “生まれ続ける新たな宇宙像”、国際天文連合 100 年記念シンポジウム 「天文学の 100 年：過去から未来へ」2019 年 5 月 27 日、国立科学博物館講堂

[150] 吉田 直紀: “機械学習と宇宙論”; 第３２回 理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム (国立天文台, 12/27, 2019)

[151] 樫山和己, ”Searching for the origin of fast radio bursts”, 高エネルギー突発現象の多波長・多粒子観測と理論, （宇宙線研究所, 11/19-20,2019）

[152] 大栗真宗, “SDSS Quasar Lens Search”; 第 2 回データアーカイブワークショップ (zoom、2020 年 3 月 30 日)

[153] Tilman Hartwig: “News from the Past: 2019 Updates on Metal-Poor Stars’, 初代星初代銀河研究会名古屋 (2019/11/11)

(セミナー)

[154] 須藤靖: “その世界の先を探る”、麻布高校教養総合リレー授業「現在の『宇宙』研究、その地平の広がり」第３回（2019 年 5 月 11 日）

[155] 須藤靖: “ロシター効果と星震学で探る系外惑星系のアーキテクチャー”、神戸大学物理学科宇宙論研究室セミナー （2019 年 5 月 22 日）

[156] 吉田直紀: “Cosmology and Fundamental Physics with AI”, 名古屋大学理学研究科 (名古屋, 7 月 8 日, 2019)

[157] 吉田直紀: “宇宙 x AI”, 第 416 回 東工大地惑セミナー (東京工業大学, 7 月 17 日, 2019)

[158] 須藤靖: “向陽の空ノムコウを探る”、土佐高校東京大学研修班講義（2019 年 11 月 19 日）

[159] 須藤靖: “太陽系外惑星系の普遍性と多様性”、東京大学ビッグバンセンター・物理学教室合同談話会「宇宙進化と太陽系外惑星が切り拓いた新たな世界観: 2019 年ノーベル物理学賞紹介」(2019 年 12 月 11 日)

[160] 須藤靖: “宇宙と惑星の観測からこの世界を知る”、科学技術館ライブショー「ユニバース」(2019 年 12 月 14 日)

[161] 須藤靖: “地球外生命の探し方”、丸善市民大学 第 9 回 (2019 年 12 月 18 日)

[162] 須藤靖: “宇宙を観て世界を知る”、室蘭栄高校 SSH 研修（2020 年 1 月 9 日）

[163] 中川雄太、“DCPAM の出力を使った系外惑星の模擬観測と光度曲線解析による自転傾斜角推定”、北大惑星宇宙グループコロキウム、2020 年 1 月 22 日、北海道

[164] 須藤靖: “2019 年ノーベル物理学賞紹介：宇宙と惑星の観測から生まれた新たな世界観”、高知工科大学特別講義（2020 年 1 月 24 日）

[165] Tilman Hartwig: “Machine Learning for Classification of Astronomical Data”, University of Tokyo (2019 April 25)

[166] Yasushi Suto: "Unveiling a pale blue dot: lands, oceans, clouds, vegetation, and spin-obliquity from photometric variation of a directly-imaged second earth", seminar at Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux, June 13, 2019, University of Bordeaux, France

[167] Tilman Hartwig: "The Mysterious Formation of Supermassive Black Holes", Tokyo Space Cafe (2019 June 13)

[168] Yasushi Suto: "Spin-orbit architecture of transiting planetary systems probed with the Rossiter-McLaughlin effect and asteroseismology", seminar at Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux, June 14, 2019, University of Bordeaux, France

[169] Tilman Hartwig: "Machine Learning for Classification of Metal-Poor Stars", Astronomisches Institut Potsdam (2019 June 20)

[170] Kojiro Kawana: "Emission from thermonuclear explosions in white dwarf TDEs"; AP セミナー (京都大学, June 26, 2019)

[171] Yasushi Suto: "Unveiling a pale blue dot: lands, oceans, clouds, vegetation, and spin-obliquity from photometric variation of a directly-imaged second earth", seminar at Theoretical Astrophysics and Planetary Science, June 24, 2019, University of Bern, Switzerland

[172] Yasushi Suto: "Simulating the spin-orbit architecture of planetary systems: hydrodynamical simulation of turbulent proro-planetary disks and the facte of multi-planet systes via disk-planet migration in the HL Tau disk", seminar at Theoretical Astrophysics and Planetary Science, June 25, 2019, University of Bern, Switzerland

[173] Tilman Hartwig: "Machine Learning for Classification of Astronomical Data", University of Tokyo (2019 July 02)

[174] Kana Moriwaki: "Cross-correlation between the 21-cm signale and [OIII] emitters during early cosmic reionization" (Nagoya University, July 8, 2019)

[175] Kojiro Kawana: "Emission from thermonuclear explosions in white dwarf TDEs"; セミナー (国立天文台, July 16, 2019)

[176] Tilman Hartwig: "Machine Learning for Classification of Astronomical Data", NAOJ (2019 July 24)

[177] Tilman Hartwig: "Artificial Intelligence: Application to Scientific Discoveries", University of Liberia (2019 August 20)

[178] Tilman Hartwig: "The Invisible Universe: Black Holes and Gravitational Waves", University of Liberia (2019, August)

[179] Natsuki H. Hayatsu: "ALMA Deep Field in SSA22:Blind Detections of [CII] Line Emitters Shown to be Spurious", National Astronomical Observatory of Japan (September 2019)

[180] Tilman Hartwig: "Multiplicity of the first stars from machine learning-based classification of stellar fossils", Konan University (2019 September 25)

[181] Tilman Hartwig: "Combining Collective and Artificial Intelligence to Understand the Universe", Kyoto (2019 September 25)

[182] Tilman Hartwig: "Machine Learning for Classification of Astronomical Data", Tokyo University of Agriculture and Technology (2019 October 7)

[183] Tilman Hartwig: "Machine Learning for Classification of Astronomical Data", University of Tokyo (2019 October 30)

[184] Naoki Yoshida: "Formation of the First Stars and Blackholes", Yunnan Observatory Seminar (雲南天文台, 中国, October 18, 2019)

[185] Natsuki H. Hayatsu: "Probing the Cosmic Star-Formation History Revealed by Blind Searches for Far-Infrared Emission Line Galaxies", Nanjing University (November 2019)

[186] Kojiro Kawana: "Emission from thermonuclear explosions in white dwarf TDEs"; seminar (Ben-Gurion University of the Negev, November 6, 2019)

[187] Kojiro Kawana: "Emission from thermonuclear explosions in white dwarf TDEs"; seminar (Tel Aviv University, November 11, 2019)

[188] Kojiro Kawana: "Emission from thermonuclear explosions in white dwarf TDEs"; High Energy Meeting (The Hebrew University of Jerusalem, November 14, 2019)

[189] Oguri M., "Cosmolgy with gravitational lensing"; Lectures at winter school "Cosmological Structures in the Era of Large Surveys", KEK (2020 November 21-23)

[190] 森脇可奈: "Line emission as a probe of large-scale structures" (早稲田大学, November 29, 2019)

[191] Kojiro Kawana: "Emission from thermonuclear explosions in white dwarf TDEs"; seminar (Technion, December 19, 2019)

[192] Kojiro Kawana: "Emission from thermonuclear explosions in white dwarf TDEs"; セミナー (理化学研究所, January 10, 2020)

[193] Yasushi Suto: "Origin and evolution of spin-orbit architectures of exoplanetary systems", JAXA seminar, January 29, 2020, ISAS, Sagamihara

[194] Natsuki H. Hayatsu: "About my Research (and Me)", École normale supérieure (February 2020)

[195] Tilman Hartwig: "Machine Learning for Classification of Astronomical Data", Tohoku University (2020 February 18)

[196] Tilman Hartwig: "Machine Learning for Classification of Astronomical Data", UCSC (2020 February 21)

[197] Tilman Hartwig: "Astrophysics and Machine Learning", University of Tokyo, Fall/Winter 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行しようとすること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ー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はなく、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、特任研究員の Marco Túlio Coelho Quintino 博士、日本学術振興会外国人研究員の Wu Jun-yi 博士、博士課程大学院生の董青秀雄氏および修士課程大学院生の横島亘氏、岡本惇志氏、USTEP 大学院生 (ミュンヘン大学からの交換留学生) の Leonie Karr 氏のメンバーで、高階量子演算、量子系のダイナミクスの制御、および分散型量子情報処理に関する研究を行い、多角的な視点から量子情報の理論的研究を進めた。

### 5.2.1 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盤的理解を深めるという、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。

#### 動的順序選択を用いたユニタリ操作の万能識別問題

量子力学では、与えられた量子系に完全に任意の量子操作が可能だとしても、量子状態などのその量子系の特徴を完全に知ることはできない。これまで、量子情報における識別問題として、量子状態の識別問題は詳細に研究されてきたが、「量子操作」の識別問題は依然として未解決問題が多数残されている。量子操作の識別問題では、対象となる量子操作が「量子ゲート」として与えられているとモデル化し、まずは簡単のためこれを 1 回のみ利用して良いことにする。また、この対象量子ゲートは、複数の候補（我々は簡単のため 2 個とする）から確率的に選ばれていることが約束されているとする。先行研究では、これら候補量子ゲートの完全な古典的記述が与えられていると仮定したものが存在するが、我々はそのような古典的記述に依存しない「万能」識別問題を考えた。このとき、候補量子ゲートは新たな量子ゲートとして与えられる。いま、1 番目の候補量子ゲートの利用可能な回数を $N_1$、また 2 番目の候補量子ゲートのを $N_2$ とする。それぞ本研究において、候補量子ゲートと対象量子ゲートをすべて並列的に利用する識別量子回路を用いるとき、$N_2$ および対象量子操作の個数が固定の場合、$N_1$ を増やすことによる最高平均成功確率はある一定の個数以上は向上しないことが証明された。[担当：添田、村尾]

#### 変換順序を前提としない高階量子演算のカテゴライズ

複数の量子変換を一つの量子変換に移す高階量子演算を量子回路上で実装する場合、入力量子変換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、入力量子変換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、入力量子変換としてどんなユニタリ変換を入れても、出力量子変換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、入力量子変換としてユニタリ変換 $U_A, U_B$ を入れると、出力量子変換として、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変換を返す高階量子演算である。先の出力量子変換において制御系の入力状態が 0 と 1 の重ね合わせである場合を考えると、量子スイッチは $A \prec B$ の因果順序を持つ高階量子演算と $B \prec A$ の因果順序を持つ高階量子演算との重ね合わせと見なせる。このように量子スイッチについては物理的解釈が可能な数学的定式化が存在するが、一般の純粋量子プロセスについても同様のことが成り立つかは明らかにされていなかった。本研究では、2 入力純粋量子プロセスは量子コム、または異なる因果順序をもつ量子コムの重ね合わせに限られることを証明した。[担当：横島、Quintino、添田、村尾]

#### 制御量子演算及び制御高階量子演算の定式化とその応用

条件分岐は計算における重要な要素である。量子計算においても、量子的な条件分岐として制御ユニタリ演算は多くの量子アルゴリズムで用いられてい

る。制御ユニタリ演算以外の制御量子演算に関しても、近年応用が提案されており、いくつかの通信タスクにおいて有用性が示されている。一方でこれらの結果は制御量子演算の定義に依存しているが、制御ユニタリ演算以外の制御量子演算に関しては、その統一的な定義がなされていない。本研究では制御量子演算を物理的な実装及び公理的な観点にもとづいて一般的な定義を与え、それらの量子性を特徴づけるコヒーレンスを定量的に評価した。さらに高階量子演算の量子的な条件分岐として、制御高階量子演算についても定義を拡張した。

新たに定義した制御高階量子演算の応用として、ユニタリ演算を対応する制御ユニタリ演算に変換する高階量子演算である、ユニタリ演算の制御化を制御高階量子演算として解析した。その結果として、ユニタリ演算が分割可能な場合の、ユニタリ演算の制御化を実行するアルゴリズムを二種類提案した。これらのアルゴリズムはそれぞれ厳密に実行できる、または補助系が必要という点において、既存のアルゴリズムより優れている。本研究は 2018 年度まで本研究室に在籍した仲山将順博士との共同研究である。[担当：董、添田、村尾]

#### 確率的かつ正確な万能量子回路によるユニタリ操作の高階変換

$k$ 個の $d$ 次元入力ユニタリ操作を別のユニタリ操作に確率的（かつ伝令付き）で参観する万能量子回路を設計する問題を考えた。まず量子回路を次の三種類に分けた：1）入力量子操作を同時に利用することができる並列型回路、2）入力量子操作を段階的に用いることができる段階型回路、3）入力量子操作間に因果順序を設定しない一般型回路。これら三種類にたいし、最大成功確率を与える量子回路を半正定値法を用いて数値的に導出する手法を開発した。この手法を用いて、ユニタリ操作の「転置化」、「複素共役化」、および「逆変換化」を詳細に解析した。転置化および逆変換化については、与えられた次元 $d$ に対し、段階型回路は並列型回路に対し利用個数 $k$ について指数関数的に変換性能が高いことが示された。また、複素共役化と逆変換化について、利用個数 $k$ が $d-1$ より小さくなる時、成功確率はゼロにしかならないことを証明した。さらに、因果順序が不確定な量子回路を用いた場合と、確定した量子回路を用いた場合の差を解析し、前者の後者に対する優位性を示したとともに、入力量子状態遅延型量子回路の概念を発見した。[担当：Quintino、董、添田、村尾]

### 5.2.2 量子系のダイナミクスの制御

#### ハミルトニアン動力学系における量子ビットゲートのロバスト制御の数値最適化

一般に量子ゲートは、ハミルトニアンダイナミクスに従って実装される。このハミルトニアンに不定なパラメータが含まれる場合であっても、その不定パラメータに対してロバストな制御が原理的に可能である。これをロバスト制御といい、パルス列を用いて実装される。先行研究では、このロバスト制御を実装するパルス列を求める数値計算手法が確立された。

しかし、ロバスト制御の実験での実装を考えた時、実験系において不定パラメータが時間に依らず一定である保証はないため、先行研究で示されたロバスト制御が可能である保証はない。またパルスの時間幅やパルスの大きさを数値計算結果通り完璧に制御して実装する事は難しいため、実装されたパルスに誤差がある場合にもロバスト制御が達成されるかは分からない。そこで、ロバスト制御の実験での実装を目指して、実験系におけるロバスト制御の有用性について研究を始めた。

現在までに、実験における制御技術が特に発展している 1 量子ビット系において、不定パラメータが時間的に揺らぐ場合のロバスト制御の安定性や、時間幅や大きさが揺らいだパルス列によるロバスト制御を実行した場合の安定性を数値計算した所、ある程度の頑強性が確認できた。[担当：岡本、添田、村尾]

#### 場の量子論に基づいた人工量子系のダイナミクスモデル

高度な量子情報処理を実現するためには、量子系のダイナミクスを操作し、適切な状態の準備やその変換を高精度に実装することが要求される。各量子系の操作方法を開発する際に、そのダイナミクスの数理モデルが用いられる。このモデルと実際のダイナミクスの間に生じる差は、すべて「エラー」とみなされる。そのため、高精度な量子操作の実現にはダイナミクスの正確な数理モデルが必要となる。本研究では、各候補量子系の実験論文にて、物質と光の相互作用を利用することを前提にして開発実験が主流であることを鑑み、場の量子論に基づく量子電磁気学からダイナミクスの数理モデルを構築することを試みた。[担当：添田]

### 5.2.3 分散型量子情報処理

#### 分散型サンプリング、量子的通信の証明、量子測定の非共立性

準備測定実験では、送信者（アリス）は信頼のおける量子入力を受け取るが信頼できない状態準備装置を持っており、受信者（ボブ）は全く信頼のおけない測定器を持っているという設定を考える。分散型サンプリングは、アリスとボブが与えられた通信路を用いてアリスの量子入力に対してボブの測定統計を再現する際に生じる自然なタスクである。このタスクの達成度は量子的な通信の存在を証明し、これは測定器非依存量子通信証明によって定式化される。また、分散型サンプリングにおいて古典通信に

対する量子通信の優位性を示すための必要十分条件は、ボブの測定が非共立の場合であることを示した。これは測定の非共立性に、操作論的な解釈を与え、そのより一般的な概念を動機づけるものである。我々の結果は基礎論的および応用的な帰結を示すものである。本研究はブラジルの International Centre for Theoretical Physics - South American Institute for Fundamental Research および Instituto de Física Teórica 所属の Leonardo Guerini 博士、および同国 Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro 所属の Leandro Aolita 博士との共同研究である。[担当：Quintino]

### 多光子線形光学回路における相補性

線形光学回路は複数の線形光学素子から構成される光学干渉計であり、量子計測やボソンサンプリングにて多用される。線形光学回路の出力では、異なる種類の入力状態に対して異なる光子統計が形成される。多光子フォック状態の入力に対する線形光学回路の格子統計を古典計算機を用いてシミュレートすることは、計算量クラス $\#P$ 困難に属する問題であることが知られている。このため、相補的非共立的測定を用いた線形光学回路における多光子量子状態の特徴づけを行うことが難しかった。この問題に対処するため、我々は線形光学回路の相補性構造を特徴づけ、互いに相補的な拡張されたパウリ測定の組によって線形光学回路の多光子状態の量子コヒーレンスを示すことができることを見出した。また、相補的パウリ測定の導入により相補性を定量化する理論を構築し、線形光学回路上の多光子状態の特定の量子的性質を物理的に測定する方法を示した。さらに、この理論の応用として、二者間多光子線形光学回路におけるエンタングルメント検知方法を導出した。これより、線形光学回路上の多光子状態の量子性を物理的に操作および検知することが可能になった。[担当：Wu、村尾]

### LOCC 量子状態識別と LOCC 量子情報抽出の差

本研究では、違いに直交する多体エンタングル量子状態の集合に総次元数より少ない古典情報を符号化した場合と、この集合の状態を用いて量子情報を符号化した場合に、LOCC のみを用いて１体量子状態に古典情報/量子情報を復号する (抽出する) 際にあらわれる差を解明すべく、まず、量子状態がアリスとボブの 2 者間で共有されている状況を考えた。古典情報を完全なかたちで復号するためには、符号化された量子状態が完全に識別可能であること（すなわち、状態が互いに直交すること）が必要条件であるが、アリスとボブが利用できる量子操作に制約がある場合、完全識別性に更なる条件が付加される。本研究では、両者がそれぞれ古典通信および各自の量子系への量子操作に限定されている場合（LOCC 設定）を考察した。先行研究において、２量子ビット量子状態の場合については解析されていたため、３準位系２個からなる量子状態の場合について解析した。[担当：Karr、村尾]

＜報文＞

(原著論文)

[1] E. Wakakuwa, A. Soeda, and M. Murao, “Complexity of causal order structure in distributed quantum information processing: More rounds of classical communication reduce entanglement cost”, *Physical Review Letters* **122**, 190502 (2019)

[2] Q. Dong, M. T. Quintino, A. Soeda, M. Murao, “Implementing positive maps with multiple copies of an input state”, *Phys. Rev. A* **99**, 052352 (2019)

[3] J. Miyazaki, A. Soeda and M. Murao, “Complex conjugation supermap of unitary quantum maps and its universal implementation protocol”, *Physical Review Research* **1**, 013007 (2019)

[4] M. T. Quintino, Q. Dong, A. Shimbo, A. Soeda, and M. Murao, “Reversing unknown quantum transformations: A universal quantum circuit for inverting general unitary operations”, *Physical Review Letters* **123**, 210502 (2019)

[5] R. Sakai, A. Soeda, M. Murao, and D. Burgarth, “Robust controllability of two-qubit Hamiltonian dynamics”, *Physical Review A* **100**, 042305 (2019)

[6] M. T. Quintino, Q. Dong, A. Shimbo, A. Soeda, and M. Murao, “Probabilistic exact universal quantum circuits for transforming unitary operations”, *Physical Review A* **100**, 062339 (2019)

[7] J. Bavaresco, M. Araújo, C. Brukner and M. T. Quintino, “Semi-device-independent certification of indefinite causal order”, Quantum **3**, 176 (2019)

[8] L. Guerini, M. T. Quintino, L. Aolita, “Distributed sampling, quantum communication witnesses, and measurement incompatibility”, *Physical Review A* **100**, 042308 (2019)

[9] M. T. Quintino, C. Budroni, E. Woodhead, A. Cabello, D. Cavalcanti, “Device-independent tests of structures of measurement incompatibility”, *Physical Review Letters* **123**, 180401 (2019)

(学位論文)

[10] 横島亘、“Causality and reversibility of higher-order quantum transformations”、 修士論文

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[11] J. Bavaresco, M. Araújo, C. Brukner, M. T. Quintino, “Semi-device-independent certification of indefinite causal order”, *19th Asian Quantum Information Science Conference*, Seoul, South Korea, Aug. 2019 (talk)

[12] L. Guerini, M. T. Quintino, L. Aolita, "Distributed sampling, quantum communication witnesses, and measurement incompatibility", *19th Asian Quantum Information Science Conference*, Seoul, South Korea, Aug. 2019 (poster)

[13] M. T. Quintino, Q. Dong, A. Soeda, and M. Murao, "Reversing unknown quantum transformations: A universal protocol for inverting general unitary operations", *Topical Conference on Quantum Communication and Security 2019* (TCQCS2019), Kyoto, Dec. 2019 (poster)

[14] Q. Dong, J. Miyazaki, M. Murao, S. Nakayama, A. Shimbo, A. Soeda, M. T. Quintino, "Higher order quantum operations of blackbox unitaries", *International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (HQS2019)*, Matsue, December 2019 (talk)

[15] M. T. Quintino, Q. Dong, A. Soeda, and M. Murao, "Adaptive circuits exponentially outperforms parallel ones for universal unitary inversion", *23rd Annual Conference on Quantum Information Processing* (QIP2020), Shenzhen, China, Jan. 2020 (talk)

[16] M. T. Quintino, Q. Dong, A. Soeda, and M. Murao, "Reversing unknown quantum transformations: A universal protocol for inverting general unitary operations", *Quantum Information Structure of Spacetime HKU workshop* (QISS HKU 2020), Honk Kong, Jan. 2020 (talk)

[17] Q. Dong, S. Nakayama, A. Soeda, and M. Murao, "Controlled quantum operations and combs, and their applications to universal controllization of divisible unitary operations", *The 23rd Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2020)*, China, Jan. 2020 (poster)

[18] M. T. Quintino, Q. Dong, A. Soeda, and M. Murao, "Reversing unknown quantum transformations: A universal protocol for inverting general unitary operations", *Japan-France Laboratories of Information*, Tokyo, Feb. 2020 (talk)

招待講演

[19] M. Murao, "Higher order quantum operations of blackbox unitaries", *XI-th International Symposium on Quantum Theory and Symmetries (QTS2019)*, Montreal, Canada, July 2019

[20] M. Murao, "Using quantum computers for processing quantum systems", *Young Researchers Forum on Quantum Information Science*, Hsinchu, Taiwan, August 2019

[21] M. Murao, "Higher order quantum operations of blackbox unitaries", *57th Annual Allerton Conference 2019*, Monticello, IL, USA, September 2019

[22] M. Murao, "Higher order quantum operations of blackbox unitaries", *Quantum Information Processing in Non-Markovian Quantum Complex Systems (QIPQC 2019)*, Nagoya, December 2019

(国内会議)

一般講演

[23] 横島亘、Marco Túlio Quintino、添田彬仁、村尾美緒、「因果律を緩和した高階量子演算の構造について」、新学術領域「ハイブリッド量子科学」第 9 回領域会議、石川県能美市、2019 年 8 月（ポスター）

[24] Q. Dong、M. T. Quintino、A. Shimbo、A. Soeda、M. Murao、「Quantum circuit for inverting unknown unitary operations」、新学術領域「ハイブリッド量子科学」第 9 回領域会議、石川県能美市、2019 年 8 月（ポスター）

[25] Wu Junyi、村尾美緒、「線形光学ネットワークにおけるエンタングルメントの相補的性質」、新学術領域「ハイブリッド量子科学」第 10 回領域会議、東京都、2020 年 2 月 (Poster)

[26] Marco Túlio Quintiono、董青秀雄、新保淳、仲山将順、宮崎慈生、添田彬仁、村尾美緒、「量子計算機による量子ダイナミクスの変換アルゴリズム」、新学術領域「ハイブリッド量子科学」第 10 回領域会議、東京都、2020 年 2 月 (Poster)

## 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、環境への散逸や量子測定の反作用の影響下にある冷却原子系の非ユニタリーダイナミクス、非平衡開放系における相の分類、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で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。さらに、私たちは機械学習や深層学習における情報処理のプロセスに注目し、物理学の視点から AI や機械学習の理解に取り組んでいる。

### 5.3.1 冷却原子気体・非平衡開放系

#### 散逸下の Hubbard 模型における磁性

Mott 絶縁体中の磁性においては、Hubbard 模型からの 2 次摂動によって導かれるスピン交換相互作用が主要な役割を果たす。冷却原子気体で実現される Hubbard 模型において、原子間の非弾性散乱に起因する散逸が存在する場合、スピン交換相互作用が本質的に変更を受け、通常の平衡状態とは全く異なる磁性が発現することを見出した。具体的には、上記の 2 次摂動中の中間状態が有限の寿命を持つことによってエネルギーの高いスピン状態が安定化し（図 5.3.1）、Fermi-Hubbard 模型においては強磁性が発現し、2 成分 Bose-Hubbard 模型においては反強磁性相関が発達することを見出した [21]。

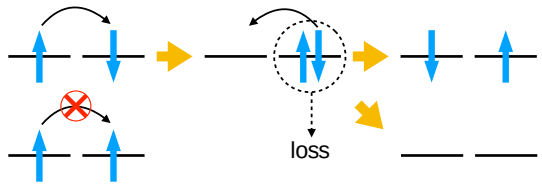



図 5.3.1: 散逸下の Fermi-Hubbard 模型におけるスピン交換相互作用の概念図。通常の平衡系では 2 次摂動によるスピン交換プロセスが反強磁性的スピン配置を安定化させるが、中間状態に散逸が存在する場合は反強磁性的スピン配置に有限の寿命が加わるため、通常とは逆にエネルギーの高い強磁性状態が安定化する [21]。

#### 非エルミートトポロジカル相の分類

近年、非平衡開放系や強相関電子系において、非エルミートな有効ハミルトニアンによって記述される豊かなトポロジカル現象に大きな関心が集まっている。しかし、その多くは個別の具体例にとどまっており、それらを包括的に記述する一般理論の構築が理論・実験の両面からの喫緊の課題であった。そこで、我々は、非エルミートなトポロジカル絶縁体・超伝導体・半金属を記述する分類理論を構築した。得られた分類理論においては、従来の物理において最も基本的な 10 通りの内部対称性クラスが、非エルミート性ゆえに 38 通りに変化することを特徴のひとつとする。また、エネルギーが複素数になることにともなって、2 種類の複素エネルギーギャップが定義され、それゆえに多彩な非エルミートトポロジカル現象が記述されることを明らかにした。とくに、非エルミート系に固有のトポロジカル不変量の存在が、従来のバルク・エッジ対応ではなく、表皮効果を導くことを示した [9, 12, 18]。

#### 非エルミート多体局在

通常のエルミートな量子系ではスペクトルの実性が保証されるが、非エルミート系でも固有値が実になる場合がある。特に重要なクラスである Hatano と Nelson による Anderson 局在と時間反転対称性を持つ模型は、非エルミート性の強さを変化させると固有値の実・複素転移が生じる。一方、今までの研究では相互作用のない一粒子スペクトルの研究が中心であり、相互作用の効果が多体スペクトルの構造にどう影響するかは不明であった。我々は、非対称ホッピングを持つ相互作用する乱れた系において乱れを強くすると、固有値の実・複素転移が多体のスペクトルのレベルで起こること、それが系の動的安定性を劇的に変えることを発見した。そして、この転移が多体の局在転移によって引き起こされることを見出した [10]。

#### 対称性を持つ量子非可積分系におけるランダム行列的振る舞い

近年の熱平衡化の研究において、非可積分な量子多体系のスペクトルの統計がランダム行列で記述されるという仮説が注目を集めている。この仮説は多くの異なるモデルで確かめられているものの、ランダム行列の文脈で重要な反ユニタリー対称性（時間反転対称性など）が異なるクラスに対し系統的に調べた研究は存在しなかった。我々は、反ユニタリー対称性による三種類のクラスをパラメータによって変化できる、一次元の局所相互作用のみを持つ非可積分なスピン模型を提案した。この模型を数値的に調べ、異なる対称性に対する固有値間隔と行列要素の分布が対称性を考慮したランダム行列の予言でよく記述できることを示した [4]。

#### 周期駆動量子系におけるギャップレストポロジカル相とその分類

格子系のバンド構造には Brillouin ゾーンの周期性に起因したトポロジカルな制限が存在する。例えば、3 次元格子系においては Weyl フェルミオンは必ず偶数個現れなければならないという Nielsen-Ninomiya 定理が知られている。一方、時間周期的に駆動された量子系においては離散的な時間並進対称性の帰結としてエネルギー方向にも Brillouin ゾーンに類似した周期構造が現れ、許されるバンド構造のトポロジーを大きく変える。我々は、トポロジーにおけるスマッシュ積の方法と冷却原子系において実現されているスピンポンプを応用して、周期駆動された 3 次元格子系において Weyl フェルミオンをただ一つのみ持つモデルを構成し、熱平衡系では実現が禁止されているカイラル磁気効果が起こることを示した。さらに、我々は 10 種類の内部対称性クラスについて周期駆動された自由フェルミオン系の時間発展演算子をトポロジカルに分類し、静的な格子系では実現でき

ない様々なギャップレストポロジカル相が周期駆動系においては実現可能であることを示した [8]。

### 5.3.2 量子論・統計力学と情報理論の融合

#### 関数推定の標準量子限界とハイゼンベルク限界

量子計測とは、エンタングルメントなどの量子的なリソースを用いた古典的な計測方法より高い効率の推定手法を取り扱う量子情報の分野である。従来、量子計測は少数のパラメーターからなる単純な問題のみが考えられていたが、重力波や量子イメージングにおける計測を考える場合には、計測対象を連続的なデータ、すなわち未知関数として扱わなければならない。我々は多変数の量子計測理論と関数解析学を組み合わせることで、古典的な精度限界である標準量子限界と、量子的な精度限界であるハイゼンベルク限界を導いた。さらに、推定に用いる量子状態として位置固有状態と波数固有状態が同等に精度限界を達成し、量子計測においても Nyquist の標本定理が適用されることを示唆した [16]。

#### 行列積ユニタリー演算子による非平衡トポロジカル相の分類

近年、テンソルネットワークを用いて相互作用する平衡量子多体系のトポロジカル相を分類する研究が盛んに行われてきた。その中で一番よく理解されているのは、行列積状態で記述される一次元系における対称性によって保護されたトポロジカル（SPT）相の完全なる分類である。しかし、この最もシンプルなセットアップの非平衡版「対称性を持つ行列積ユニタリー演算子の分類」はまだ未解明であった。我々はこの未解決問題に着目し、対称性によって保護されたインデックスという新しい位相不変量を発見し、ほぼ完全な分類を行った。この結果は、従来のコホモロジー分類を超えた新しいクラスの二次元フロケトポロジカル相の存在を示唆している [20]。

#### ポートフォリオ理論を利用した深層学習の改良

近年、深層学習は正しい予測や決定を行うための多種多様なタスクに応用されている。しかし、AI が誤る可能性は常にあり、与えられたインプットに対してアウトプットがどの程度信頼できるかは直接には分からない。AI がどこまで信頼できるかは実用上極めて重要な問題であるため、この問題に対する研究や解決法の提案が数多く行われている。AI の不確かさを特徴づけるために、我々は AI のシステムを拡張する代わりに、AI が学習する損失関数を改良し、結論が不確かな場合は判断を保留させるようにした。我々は決定およびそれを保留するプロセスは賭けゲームにおいて賭け金を安全にベットできるかどうかという問題に似ていると考え、不確かな場面に直面したときに AI が長期的に見てどのようにすればよいかを学習させるためにポートフォリオ理論を用いた。我々は、このように学習させた深層学習のモデルは、これまでに知られている他の方法と比べて学習モデルの不確かさをより上手く特徴づけられていることを見出した。加えて、この学習モデルは典型的で信頼の置けるデータサンプルにより重点的に注目し、その結果全体としてのパフォーマンスもわずかに高い値を達成した [14]。

＜受賞＞

[1] Zongping Gong: 第 10 回育志賞、日本学術振興会、2020.3.4.

[2] 中川大也: 第 14 回若手奨励賞（領域１）、日本物理学会、2020.3.17.

[3] 濱崎立資: 理学系研究科研究奨励賞（博士課程）、東京大学、2020.3.23.

＜報文＞

(原著論文)

[4] R. Hamazaki and M. Ueda: Random-matrix behavior of quantum nonintegrable many-body systems with Dyson's three symmetries, Phys. Rev. E **99**, 042116 (2019).

[5] K. Fujimoto, R. Hamazaki, and M. Ueda: Flemish Strings of Magnetic Solitons and a Nonthermal Fixed Point in a One-Dimensional Antiferromagnetic Spin-1 Bose Gas, Phys. Rev. Lett. **122**, 173001 (2019).

[6] N. Yoshioka and R. Hamazaki: Constructing neural stationary states for open quantum many-body systems, Phys. Rev. B **99**, 214306 (2019). Selected as Editors' Suggestion. See also Viewpoint: Physics **12**, 74.

[7] T. Haga: Dimensional reduction in driven disordered systems, J. Stat. Mech. (2019) 073301.

[8] S. Higashikawa, M. Nakagawa, and M. Ueda: Floquet Chiral Magnetic Effect, Phys. Rev. Lett. **123**, 066403 (2019).

[9] K. Kawabata, T. Bessho, and M. Sato: Classification of Exceptional Points and Non-Hermitian Topological Semimetals, Phys. Rev. Lett. **123**, 066405 (2019).

[10] R. Hamazaki, K. Kawabata, and M. Ueda: Non-Hermitian Many-Body Localization, Phys. Rev. Lett. **123**, 090603 (2019).

[11] K. Yamamoto, M. Nakagawa, K. Adachi, K. Takasan, M. Ueda, and N. Kawakami: Theory of Non-Hermitian Fermionic Superfluidity with a Complex-Valued Interaction, Phys. Rev. Lett. **123**, 123601 (2019).

[12] K. Kawabata, K. Shiozaki, M. Ueda, and M. Sato: Symmetry and Topology in Non-Hermitian Physics, Phys. Rev. X **9**, 041015 (2019).

[13] L. Xiao, K. Wang, X. Zhan, Z. Bian, K. Kawabata, M. Ueda, W. Yi, and P. Xue: Observation of Critical Phenomena in Parity-Time-Symmetric Quantum Dynamics, Phys. Rev. Lett. **123**, 230401 (2019).

[14] Z. Liu, Z. Wang, P. P. Liang, R. R. Salakhutdinov, L.-P. Morency and M. Ueda: Deep Gamblers: Learning to Abstain with Portfolio Theory, Advances in Neural Information Processing Systems **2019**, 10622 (2019).

[15] T. Haga: Divergence of the Floquet-Magnus expansion in a periodically driven one-body system with energy localization, Phys. Rev. E **100**, 062138 (2019).

[16] N. Kura and M. Ueda: Standard Quantum Limit and Heisenberg Limit in Function Estimation, Phys. Rev. Lett. **124**, 010507 (2020).

[17] M. Nakagawa, R.-J. Slager, S. Higashikawa, and T. Oka: Wannier representation of Floquet topological states, Phys. Rev. B **101**, 075108 (2020).

[18] N. Okuma, K. Kawabata, K. Shiozaki, and M. Sato: Topological Origin of Non-Hermitian Skin Effects, Phys. Rev. Lett. **124**, 086801 (2020).

[19] E. Yukawa and M. Ueda: Morphological Superfluid in a Nonmagnetic Spin-2 Bose-Einstein Condensate, Phys. Rev. Lett. **124**, 105301 (2020).

[20] Z. Gong, C. Sünderhauf, N. Schuch, and J. I. Cirac: Classification of Matrix-Product Unitaries with Symmetries, Phys. Rev. Lett. **124**, 100402 (2020).

[21] M. Nakagawa, N. Tsuji, N. Kawakami, and M. Ueda, Dynamical Sign Reversal of Magnetic Correlations in Dissipative Hubbard Models, Phys. Rev. Lett. **124**, 147203 (2020).

(会議抄録)

[22] T. Bessho, K. Kawabata, and M. Sato: Topological Classification of Non-Hermitian Gapless Phases: Exceptional Points and Bulk Fermi Arcs, JPS Conf. Proc. **30**, 011098 (2020).

(国内雑誌)

[23] 上田正仁: 量子制御技術の進展、日本物理学会誌 Vol.74, No.6, 368 (2019).

(学位論文)

[24] Ryusuke Hamazaki: Problems of Thermalization in Closed and Open Quantum Many-Body Systems（博士論文）.

[25] Naoto Kura: Quantum estimation theory for continuous data （博士論文）.

[26] Norifumi Matsumoto: Quantum phase transitions in non-Hermitian many-body systems（修士論文).

[27] Zhikang Wang: Quantum control based on deep reinforcement learning（修士論文).

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[28] M. Ueda: Nonequilibrium thermodynamics and many-body dynamics in open quantum systems, Joint Quantum Seminars, Boston, USA, 2019.4.2-6.

[29] M. Ueda: Nonequilibrium thermodynamics and many-body dynamics in open quantum systems, Conference on Quantum Measurement: Fundamentals, Twists, and Applications, Trieste, Italy, 2019.4.28-5.4.

[30] Z. Gong: Emergent Phenomena in Ultracold Atoms: Merging Topology, Interaction, and Dynamics, Beijing, China, 2019.6.3-23.

[31] R. Hamazaki: Localization and universality in non-Hermitian many-body systems, Engineering Nonequilibrium Dynamics of Open Quantum Systems, Dresden, Germany, 2019.6.17-21.

[32] Z. Gong: Topological phenomena in quench dynamics, The 28th Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS' 19), Gyeongju, South Korea, 2019.7.8-12.

[33] M. Ueda: Coarsening dynamics of spinor mixtures, Workshop on Quantum Mixtures, Trento, Italy, 2019.7.14-19.

[34] K. Kawabata: Non-Hermitian topology of exceptional points, Progress in the mathematics of topological states of matter, Sendai, Japan, 2019.7.30.

[35] Z. Gong: Topology out of equilibrium, Progress in the mathematics of topological states of matter, Sendai, Japan, 2019.7.31.

[36] K. Kawabata: Symmetry and Topology in Non-Hermitian Physics, Workshop on non-Hermitian quantum mechanics, Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Kashiwa, Japan, 2019.8.8.

[37] M. Nakagawa: Non-Hermitian quantum many-body physics in ultracold atoms subject to inelastic collisions, Workshop on non-Hermitian quantum mechanics, Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Kashiwa, Japan, 2019.8.9.

[38] M. Ueda: Discrete Time-Crystalline Order in Cavity and Circuit-QED Systems, Time Crystals and Related Phenomena, Krakow, Poland, 2019.9.4-7.

[39] M. Nakagawa: Non-Hermitian Kondo/Hubbard physics in ultracold atoms, The Forth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 2019.10.1.

[40] M. Ueda: Nonequilibrium many-body dynamics under quantum measurement, EPiQS-TMS 3rd Alliance Workshop on Topological Materials Science, Santa Barbara, USA, 2019.10.21-25.

[41] Z. Gong: Topological phases of non-Hermitian systems, Fudan Mini-program on Non-Hermitian Topology and Dynamics, Shanghai, China, 2019.11.30-12.1.

[42] K. Kawabata: Symmetry and Topology in Non-Hermitian Physics, The workshop on topology and dynamics in non-Hermitian physics (The 7th International Workshop on Frontiers in Quantum Physics and Quantum Information), Beijing, China, 2019.12.14.

[43] M. Ueda: Discrete time crystals in cavity- and circuit-QED systems, Frontiers of Quantum Matter, Tel Aviv, Israel, 2019.12.15-22.

[44] Z. Gong: Nonequilibrium quantum dynamics: Order, topology and rigorous results, MPHQ Postdoc Symposium, Garching, Germany, 2020.1.9.

[45] M. Ueda: Many-body physics and thermodynamics in open quantum systems, SFB/ZOQ Seminar, Hamburg, Germany, 2020.2.19.

一般講演

[46] R. Hamazaki: Operator noncommutativity and irreversibility in quantum chaos, Quantum Information and String Theory 2019, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 2019.6.10-14.

[47] N. Matsumoto: Continuous Phase Transition without Gap Closing in Non-Hermitian Quantum Many-Body Systems, The Forth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 2019.9.30-10.3.

[48] T. Yoshino, S. Furukawa and M. Ueda: Intercomponent entanglement spectra in binary Bose-Einstein condensates, The Forth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 2019.9.30-10.3.

[49] R. Hamazaki: The threefold way in non-Hermitian random matrices, THERMALIZATION, MANY BODY LOCALIZATION AND HYDRODYNAMICS, ICTS, India, 2019.11.11-15.

[50] M. Nakagawa: Floquet Gapless Topological Phases: Classification and Characterization, International Conference on Topological Materials Science 2019, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 2019.12.6.

[51] T. Yoshino, S. Furukawa and M. Ueda:Intercomponent entanglement spectra in binary Bose-Einstein condensates, International Conference on Topological Materials Science 2019, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 2019.12.6.

(国内会議)

招待講演

[52] 上田正仁: 物理学との対話 2-科学と AI の接点-、2019 年人工知能学会全国大会、新潟、2019.6.4-7.

[53] 中川大也: 冷却原子気体における平衡および非平衡系の近藤効果の理論（若手奨励賞受賞講演)、日本物理学会第 75 回年次大会、名古屋大学、2020.3.17.

一般講演

[54] 濱崎立資、川畑幸平、久良尚任、上田正仁: 非エルミートランダム行列の普遍性、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019.9.10.

[55] 松本徳文、川畑幸平、蘆田祐人、古川俊輔、上田正仁: 非エルミートな量子多体系における励起ギャップを閉じない連続相転移、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019.9.10.

[56] 久良尚任、上田正仁: 量子計測によるエッジ検出、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019.9.11.

[57] 中川大也、辻直人、川上則雄、上田正仁: 散逸下の Hubbard 模型における負温度量子磁性、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019.9.11.

[58] 芳賀大樹、佐々真一: 古典カオスを再現する離散量子系におけるエンタングルメント・エントロピー生成とコルモゴロフ・シナイエントロピー、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019.9.10.

[59] 吉野匠、古川俊輔、上田正仁: 二成分 Bose-Einstein 凝縮体における成分間エンタングルメント・スペクトル、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019.9.11.

[60] 久良尚任、上田正仁: 量子エッジ検出の理論限界とスケーリング、第 41 回量子情報技術研究会 (QIT41)、学習院大学、2019.11.19.

[61] 中川大也、川上則雄、上田正仁: 原子ロスのある 1 次元 Hubbard 模型における例外点と臨界性、日本物理学会第 75 回年次大会、名古屋大学、2020.3.16.

[62] 川畑幸平、佐藤昌利: 非エルミートなトポロジカル絶縁体における実スペクトル：非エルミートな BHZ 模型、日本物理学会第 75 回年次大会、名古屋大学、2020.3.17.

[63] 芳賀大樹、上田正仁：ランダムポテンシャル中を流れる超流動における非対角長距離秩序の安定性、日本物理学会第 75 回年次大会、名古屋大学、2020.3.17

(セミナー)

[64] 中川大也: State-based characterization of topological phases in periodically driven systems、第 94 回トポロジカル物質科学セミナー、京都大学基礎物理学研究所、2019.5.8.

[65] Zongping Gong: Topological phases of non-Hermitian systems、沙川研究室、東京大学、2019.5.20.

[66] 川畑幸平: Symmetry and Topology in Non-Hermitian Physics、沙川研究室、東京大学、2019.5.20.

[67] 濱崎立資: Localization and universality in non-Hermitian many-body systems、齊藤研究室 矢上統計物理学セミナー、慶應大学、2019.5.27.

[68] 川畑幸平: Symmetry and Topology in Non-Hermitian Physics、京都大学基礎物理学研究所、2019.6.10.

[69] Zongping Gong: Topological phases of non-Hermitian systems、北京大学量子材料科学センター、2019.6.10.

[70] 吉野匠: Collective modes of vortex lattices in two-component Bose-Einstein condensates under synthetic gauge fields、西田研究室、東京工業大学、2019.11.1.

## 5.4 横山 (順) 研究室

当研究室はビッグバン宇宙国際研究センターを本拠として、一般相対性理論、場の量子論、素粒子物理学等の基礎物理学理論に基づいて宇宙論と重力理論の理論的研究を幅広く行うとともに、理学部物理学教室の教育と研究に参画しています。また、大型低温重力波検出器 KAGRA の稼働を控え、ビッグバン宇宙国際研究センターの Cannon 研究室とともに重力波データ解析の研究と人材育成にも携わっています。

### 5.4.1 初期宇宙論

#### 暗黒物質とバリオン非対称生成

クインテッセンシャル・インフレーションに 3 世代の右巻きマヨラナニュートリノを導入することで、暗黒物質の存在量、バリオン数生成、再加熱過程、暗黒エネルギーといった宇宙論の諸問題を、インフレーション後の右巻きニュートリノの重力的粒子生成によって包括的に説明する模型を構築した。この模型に於いては、3 世代の右巻きニュートリノの軽い方から順に $N_1, N_2, N_3$ とおくと、$N_1$ はステライル・ニュートリノと同様に暗黒物質として振る舞い、$N_2$ は $N_3$ との干渉により正味のバリオン数を生成し、$N_3$ は標準模型の粒子に崩壊することで再加熱過程を実現する。重力的粒子生成は共形対称性からのズレに起因する機構である為、これら $N_1, N_2, N_3$ の生成量はその質量によって定まる。我々はこの質量パラメータを上手く選んでやることで、現在得られている観測量を説明できることを示した [3, 17, 22, 24, 30, 40, 37, 60, 74, 80]。また、崩壊暗黒物質理論に対する重力レンズによる制限を解析した [4]。さらに、超対称性におけるウィーノが暗黒物質である場合の、ハローの下限を求めた [5]。

#### 原始ブラックホール形成

我々は放射優勢の初期宇宙での原始ブラックホール生成における角運動量の効果を調べた。原始ブラックホールは閉じたフリードマン宇宙で記述される高密度領域の崩壊で生成されるが、これまで取り入れられていなかったベクトル型摂動を取り入れることにより、角運動量の効果を評価した。ベクトル型摂動は閉じたフリードマン宇宙の膨張率を変化させ、その結果原始ブラックホールへの崩壊のための閾値が変化する。これにより大きな初期角運動量がある領域ではより原始ブラックホールが作られづらくなることがわかった [7, 29, 38, 41, 43, 71, 75] 。

また我々は、原始ブラックホールの生成量を評価するのに広く使われている Press-Schechter (PS) 法が、正確な球対称を持つ biased Bardeen-Bond-Kaiser-Szalay (BBKS) 理論としてゼロ次元密度ピーク統計に従うことを示した。原始ブラックホールは三次元空間中の物体であるから、PS 法は原始ブラックホールの生成量が臨界ピークの値の 3 乗に比例して大きくなることがわかる。インフレーションによる密度揺らぎが狭いスパイクを持ったものになる場合、一般的な空間配位に伴うピーク統計から示唆される原始ブラックホールの質量関数はすべての質量領域において 100 倍になることがわかり、その結果原始ブラックホールがすべての暗黒物質を説明するにはこれまでより厳しい模型への制限が課されることが示された [26, 42, 44]。

#### ヒッグス場の運動を用いたレプトン数生成

重力との非自明な結合や高次相互作用を用いると、標準模型ヒッグス場はインフレーション中に対称性を破り大きな期待値を持ちうる。インフレーション終了後、ヒッグス場は現在の有効ポテンシャルの極小値に向かう緩和過程を経験し、この時時間依存する期待値によって CPT 対称性が自発的に破れる。我々はレプトン非対称および物質反物質非対称がこの緩和過程の間に生成しうることを示した [10, 21, 66]。

#### ヘリカルな原始重力波を起源としたレプトン数生成機構の再考察

擬スカラーのインフラトンと重力的 Chern-Simons 項に結合がある場合、インフレーション中にヘリカルな原始重力波が生成する。この時、$U(1)_L$ 対称性の重力的量子異常により、重力波の偏光の非対称性を起源としてレプトン数が生成することが知られている。瞬間的再加熱を仮定した先行研究では、重力波の左右偏光の差を大きくすればレプトン数も増加し、スファレロン機構によって宇宙のバリオン数を説明できるという結論が得られていた。しかし、偏光差を大きくし過ぎるとゴーストや発散が現れてしまうという問題が指摘されていた。そこで我々は、モデルの整合性が保たれるような偏光差の制限を考慮した上で、一般的な再加熱過程に対してこのモデルで生成可能なバリオン非対称性を評価した。その結果、標準的な再加熱過程の場合、宇宙のバリオン非対称性を説明することは不可能であるということがわかった。一方で、インフラトンの運動エネルギー優勢期を経た重力的再加熱過程の場合は、エントロピー生成が抑えられ、バリオン非対称性の観測値が再現可能であるという結論が得られた。[11, 62]

### 一般化ガリレオンを用いた余剰次元のコンパクト化

一般相対論では空間曲率が正なる場合を除き、一様非等方な膨張宇宙が宇宙項存在下で必ず等方化することが知られている。言い換えれば、一般相対論には等方アトラクターのみが存在する。これは、宇宙無毛定理と呼ばれ、インフレーションによって宇宙が等方化されると期待される根拠のひとつである。一方で一般化ガリレオンを用いると、保存運動量が非線形になり、非等方アトラクターが存在する。非等方アトラクターは、等方な圧力を持つエネルギー成分が支配するときに機能する。したがって、宇宙史で通常想定される時期のうち、インフレーション期、物質優勢期、そして宇宙項優勢期に余剰次元空間の成長を抑制できる。放射優勢期には非等方な圧力を持つと期待されるが、状態方程式が特別な条件を満たすため、余剰次元空間の膨張率が減衰することを示した。したがって、宇宙史の全期間において余剰次元が凍結し、フリードマン方程式に従う 4 次元宇宙が一般化ガリレオンによって実現した [14]。

### ブラックホールを媒介した真空の相転移

準安定な真空を持つスカラー場はブラックホールを核として相転移しうる。我々は、その際に、ホーキング放射による熱揺らぎが真空を安定化する効果を調べた。熱補正を考慮した有効ポテンシャルを用いて相転移確率を計算したところ、熱補正は、多数の粒子が場と強く結合しているような状況でない限り、副次的なものであることがわかった。 また、数値解の結果を理解するために、薄壁近似を用いて相転移レートの近似式を求めた。 その結果、4 点結合定数が摂動論が成り立つほど小さい場合は熱補正が小さくなることが解析的に理解できた。 次に、ヒッグス不安定性に伴う真空相転移に対しても同様の解析を行った。熱補正の有無で相転移レートを比較したところ、スカラー場のモデルによる解析と同様に、熱補正が副次的であることが分かった [15, 25, 57]。

### 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

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。そのような磁場の生成方法として、擬スカラーインフレーション、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を調べた。さらに、アフレックダイン機構と呼ばれる複素スカラー場の運動を用いた物質反物質非対称性生機構の模型の中にこれまで気づかれていなかった磁場生成機構が含まれていることを指摘した [19, 20, 23, 32, 45, 46, 48, 50, 53, 54, 61, 64, 67, 73, 76, 77, 78, 79, 81, 82]。

### Higgs-$R^2$ インフレーション

我々は、$R^2$ 項と Higgs 場のリッチスカラーとの non-minimal coupling 項の寄与を組み合わせたモデルを考えた。この模型はインフレーション中には有効的には単一場による $R^2$ インフレーションとして記述でき、生成される初期ゆらぎは観測的に支持される。インフレーション終了後の再加熱期には二つのスカラー場の複雑な振動が起こるが、この場合単純な non-minimal coupling 項だけの模型 (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、この模型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 [31, 70]。

### 曲がった空間における量子場のトンネル現象

我々は曲がった空間の場の理論における Coleman-De Luccia 形式による偽真空の崩壊の解釈を再考した。この形式において対応する波動関数は時間依存性を持つため、崩壊率と解釈することの妥当性に疑問があった。我々は、この現象が Wheeler-De Witt 波動関数がよりよく記述すると提案し、Hamilton-Jacobi 形式と WKB 近似を用いてトンネル効果を記述する波動関数を導出した。この新しい手法は初期宇宙および量子宇宙論に大きなインパクトを与えうる [39]。

### 背景場の相転移に伴う粒子生成

ある粒子の有効質量が背景場の真空期待値によって与えられている場合、この背景場がトンネル効果等によって相転移を起こすと有効質量が変化し、それによって粒子生成が生じる。我々はこの粒子生成について、ド・ジッター空間中の量子揺らぎによる相転移に対して確率論的形式を用いた手法と、ミンコフスキー時空中のトンネル効果に対して実時間形式を用いた手法によって解析を行った。これにより、実時間形式の妥当性を検証すると共に、背景場の相転移に伴って生成する粒子量を与える簡潔な公式を得た [63]。

## 5.4.2 天体素粒子物理

### 超新星爆発におけるニュートリノ加熱

ニュートリノと物質の相互作用を考慮すると、ニュートリノの分布関数はフェルミ分布からずれる。我々は超新星爆発におけるこの効果を、ニュートリノの輸送方程式であるボルツマン方程式の衝突項をニュートリノと物質間のエネルギー輸送の二次まで展開することにより評価した。その結果、ニュートリノの分布関数のずれが定量的に評価され、さらに単純な熱分布に比べてニュートリノの平均エネルギー、および物質加熱効率が増加することがわかった。こ

の効果はニュートリノ駆動超新星爆発の爆発機構に重要な役割を果たすことが期待される [6]。

### 5.4.3 超重力理論および拡張重力理論

#### 反 D3 ブレーンの有効作用

量子重力理論の有力な候補である超弦理論において現実的な加速膨張宇宙を記述することは重要な課題である。KKLT 模型は加速膨張宇宙を超弦理論の枠組みで実現する重要な例として知られている。正の宇宙項は背景時空の持つ超対称性を自発的に破るで実現されるが、KKLT 模型では反 D3 ブレーンと呼ばれる三次元的物体の導入で超対称性の自発的に破る。背景時空が超対称性を持つことから反 D3 ブレーンも超対称性が明らかな形式でき記述することが有用となる。我々は余剰空間由来のスカラー場と反D 3ブレーン間の結合を含む4次元有効作用を超対称性の非線形表現である制限付超場を用いることで超対称性が明らかな形式で超重力理論有効作用を構築した [8, 51, 56, 69, 72]。

#### 超対称ホルンデスキー模型

宇宙背景放射観測は単一スカラー場によるインフレーションを示唆しているが、最も一般的な単一スカラー場によるインフレーションはホルンデスキー模型（G インフレーション）により記述できることが知られている。一方でそれを基礎理論の候補である超対称理論に埋め込むことは難しいことが知られていた。それはホルンデスキー模型が複数の高次微分相互作用が含まれているので、素朴な超対称化はゴースト自由度を導いてしまうからである。我々は超対称性の非線形表現である制限付超場を用いることでゴーストを伴うことなくホルンデスキー模型を超重力理論に埋め込むことが可能なことを示した [9, 34, 51, 72]。

#### 静的球対称時空の角度方向摂動の安定性条件

一般化ガリレオンの下で、場の配位の仮定として静的球対称性のみを課し、摂動の分散関係を求めた。球対称性により、原点に関する空間反転のパリティによって摂動が分類され、奇パリティモードは重力波の片方の偏光モードを表し、偶パリティモードはもう片方の偏光モードとスカラー波を表す。先行研究によって奇パリティモードの分散関係は動径・角度方向ともに求められていたものの、偶パリティモードは動径方向の分散関係のみが求められていた。我々は、角度方向を含めた完全な分散関係を求め、予想されていた分散関係の混合が起こることを明らかにした [27, 33, 59]。これは、修正重力理論を観測的に制限するための新しい視点を与えると考えられる。また、求められた分散関係を用いて、角度方向の摂動に対する新たな安定性条件を導いた。これにより、ブラックホール解とそれを許す重力モデルのさらなる理論的制限が可能となる。

### 5.4.4 重力波解析

#### 独立成分解析を用いた KAGRA データの非ガウス雑音除去

重力波検出器 KAGRA の本格稼働 [12, 13] に向けて、データ解析の基礎研究を行っている。重力波は非常に微弱な信号であり、それ自体よりずっと大きな検出器雑音の中に埋もれてしまう。検出器雑音が Gauss 分布に従う場合、matched filter 法は最適な検出手法であることが知られており、実際の重力波検出にも用いられている。しかしながら、実際のデータには非 Gauss 雑音が存在し、matched filter 法のパフォーマンスは損なわれてしまう。我々はこのような問題に対処するために、信号源の非 Gauss 性を利用した信号分離手法である独立成分解析に着目した。重力波の検出チャンネル (ストレイン) と環境モニターに独立成分解析を適用すると、ストレインのデータから、環境由来の非 Gauss 雑音を分離し、雑音を削減することができる。この手法を重力波検出器 KAGRA の初期稼動時の実際のデータ、iKAGRA データに対して適用した結果、地面振動計がモニターしていた地震雑音を削減することに成功した [18, 28, 36, 58]。さらに、iKAGRA データの解析においては雑音のストレインへの線形結合を仮定していたが、このような場合、独立成分解析は Wiener filter という別の線形フィルターと同様の式に帰着し、それらが最適な雑音分離手法であることを数学的に示した [16]。

＜受賞＞

[1] 渡慶次孝気、第 49 回天文 · 天体物理若手夏の学校「重力 · 宇宙論分科会」ポスター賞第 3 位、2019/8/2.

[2] S. Hashiba, JGRG presentation award Gold prize, JGRG29 Local Organizing Committee, 2019/11/29.

＜報文＞

(原著論文)

[3] S. Hashiba and J. Yokoyama, “Dark matter and baryon-number generation in quintessential inflation via hierarchical right-handed neutrinos”, Phys. Lett. B **798**, 135024 (2019).

[4] K. Enqvist, S. Nadathur, T. Sekiguchi and T. Takahashi, “Constraints on decaying dark matter from weak lensing and cluster counts,” JCAP **04** (2020) no.04, 015

[5] S. Ando, A. Kamada, T. Sekiguchi and T. Takahashi, “Smallest Halos in Thermal Wino Dark Matter,” Phys. Rev. D **100** (2019) no.12, 123519

[6] Y. Suwa, H. W. H. Tahara, E. Komatsu, “Kompaneets equation for neutrinos: Application to neutrino heating in supernova explosions”, Progress

of Theoretical and Experimental Physics, no.8, 083E04 (2019).

[7] M. He, and T. Suyama, "Formation threshold of rotating primordial black holes", Phys. Rev. D **100** 063520 (2019).

[8] N. Cribiori, C. Roupec, T. Wrase and Y. Yamada, "Supersymmetric anti-D3-brane action in the Kachru-Kallosh-Linde-Trivedi setup", Phys. Rev. D **100**, no. 6, 066001 (2019).

[9] Y. Yamada and J. Yokoyama, "Horndeski model in nonlinearly realized supergravity", Journal of High Energy Physics **1912**, 041 (2019).

[10] Y. P. Wu, L. Yang, A. Kusenko, "Leptogenesis from spontaneous symmetry breaking during inflation", Journal of High Energy Physics **1912**, 088 (2019).

[11] K. Kamada, J. Kume, Y. Yamada and J. Yokoyama, "Gravitational leptogenesis with kination and gravitational reheating", Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **2001**, no. 01, 016 (2020).

[12] T. Akutsu *et al.* [KAGRA], "First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory KAGRA," Class. Quant. Grav. **36** (2019) no.16, 165008

[13] T. Akutsu *et al.* [KAGRA], "KAGRA: 2.5 Generation Interferometric Gravitational Wave Detector," Nat. Astron. **3** (2019) no.1, 35-40

(学位論文)

[14] 田原弘章、「Towards the spontaneous compactification of extra dimensions with generalized gravity (拡張重力理論による余剰次元の自発的コンパクト化への道程)」 (博士論文).

[15] 林拓未、「宇宙論的相転移に対するホーキング放射の影響」(修士論文).

[16] 粂潤哉、「独立成分解析による KAGRA データの非ガウス雑音の除去」(修士論文) .

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[17] S. Hashiba, "Gravitational particle creation for dark matter and reheating", Future Perspective in Cosmology and Gravity, Nagoya, Aichi, 2019/04/3.

[18] J. Kume, T. Sekiguchi, S. Morisaki, Y. Itoh and J. Yokoyama, "The effectiveness of Independent Component Analysis with iKAGRA data : continuous waves", KAGRA 22nd f2f meeting, ICRR, Kashiwa, Japan, 2019/4/19-21.

[19] K. Kamada, "Magnetogeneiss for Baryogenesis from Axion Inflation", mini-workshop: Axion Cosmology, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan, 2019/05/14.

[20] K. Kamada, "Baryon asymmetry from cosmological (hyper)magnetic fields", The Mysterious Universe: Dark Matter − Dark Energy − Cosmic Magnetic Fields, Mainz Institute for Theoretical Physics, Mainz, Germany, 2019/05/24.

[21] Y. P. Wu, "Leptogenesis from heavy Higgs relaxation", IAS program on particle theory, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, 2019/05/30.

[22] S. Hashiba, "Dark matter and baryon-number generation in quintessential inflation via hierarchical right-handed neutrinos", Beyond General Relativity, Beyond Cosmological Standard Model, Warsaw, Poland, 2019/07/2.

[23] K. Kamada, "Affleck-Dine magnetogenesis" (poster), Planet2 / RESCEU Summer School - From the Solar System to the Universe, Akita, Japan, 2019/08/23-26.

[24] S. Hashiba, "Dark matter and baryon-number generation in quintessential inflation via hierarchical right-handed neutrinos", Planet2 / RESCEU Summer School - From the Solar System to the Universe, Akita, Japan, 2019/08.24.

[25] T. Hayashi, "Thermal Effect of a Blackhole on Higgs Instability", Planet2 / RESCEU Summer School - From the Solar System to the Universe, Akita, Japan, 2019/08.24.

[26] Y. P. Wu, "Black hole mass function from peaks of primordial density perturbations", Planet2 / RESCEU Summer School - From the Solar System to the Universe, Akita, Japan, 2019/08/24.

[27] H. Tahara, " Angular stability condition for static and spherically symmetric spacetime" ,Planet2 / RESCEU Summer School - From the Solar System to the Universe, Akita, Japan, 2019/08/24.

[28] J. Kume, T. Sekiguchi, Y. Itoh, S. Morisaki and J. Yokoyama, "Application of independent component analysis to KAGRA data", Planet2 / RESCEU Summer School - From the Solar System to the Universe, Akita, Japan, 2019/8/25.

[29] M. He, "Rotation and Formation Threshold of Primordial Black Holes", Planet2 / RESCEU Summer School - From the Solar System to the Universe, Akita, Japan, 2019/08/26.

[30] S. Hashiba, "Dark matter and baryon-number generation in quintessential inflation via hierarchical right-handed neutrinos" (poster), COSMO' 19, Aachen, Germany, 2019/09/02-06.

[31] M. He, "Preheating in the Mixed Higgs-$R^2$ Model" (poster), COSMO19, Aachen, Germany, 2019/09/02-06.

[32] K. Kamada, "Affleck-Dine Magnetogenesis" (poster), COSMO19, Aachen, Germany, 2019/09/02-06.

[33] H. Tahara, "Angular stability of a static and spherically symmetric solution in the Horndeski theory", COSMO19, Aachen, Germany, 2019/09/04.

[34] Yusuke Yamada, "Horndeski model coupled to pure de Sitter supergravity", COSMO19, Aachen, Germany, 2019/09/04.

[35] T. Sekiguchi "Dynamics of axion strings and implications for axion dark matter,'' TAUP2019, Toyama, Japan, 2019/09/10.

[36] J. Kume, T. Sekiguchi, Y. Itoh, S. Morisaki and J. Yokoyama, "Application of independent component analysis to KAGRA data", GWPAW 2019, University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2019/10/16.

[37] J. Yokoyama, "Dark matter and baryon number generation in quintessential inflation", 14th Asia Pacific Physics Conference, Kuching, Malaysia, 2019/11/19.

[38] M. He, "Formation Threshold of Rotating Primordial Black Holes", APPC2019, Kuching, Malaysia, 2019/11/20.

[39] J. Kristiano, "Coleman-De Luccia Tunneling Wave Function", APPC2019, Kuching, Malaysia, 2019/11/20.

[40] S. Hashiba, "Gravitational production of right-handed neutrinos after quintessential inflation", The 29th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG29), Kobe, Hyogo, 2019/11/26.

[41] M. He, "Formation threshold of rotating primordial black holes", The 29th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG29), Kobe, Japan, 2019/11/27.

[42] Y. P. Wu, "Statistical bias for black hole mass functions from the inflationary power spectrum", APCTP School/Workshop on Gravitational-Wave Cosmology, Academia Sinica, Taiwan 2019/11/30.

[43] M. He, "Formation Threshold of Rotating Primordial Black Holes", Focus Weeks on PBHs, Kavli IPMU, University of Tokyo, Chiba, Japan, 2019/12/05.

[44] Y. P. Wu, "Statistical bias for black hole mass functions from the inflationary power spectrum", Focus Week on Primordial Black Holes, IPMU, the University of Tokyo, Japan 2019/12/06.

[45] K. Kamada, " Magnetogenesis mechanisms for baryogenesis from hypermagnetic helicity decay", Remnants of the Big Bang or TanmayFest2020, Arizona State University, AZ, USA, 2020/01/24.

招待講演

[46] K. Kamada, "Baryon Asymmetry, Chiral Asymmetry, and the Magnetic Fields in the Universe", 43rd John Hopkins Workshop, Kavli IPMU, University of Tokyo, Chiba, Japan, 2019/06/03.

[47] T. Sekiguchi "Self-heating dark matter,'' IDS workshop, University of Jyväskylä (Finland), 2019/06/06.

[48] K. Kamada, "Baryogenesis from cosmological magnetic fields and magnetogenesis", 3rd NRF-JSPS Workshop in particle physics, cosmology, and gravitation, Okinawa, Japan, 2019/06/18.

[49] J. Yokoyama, "Gravitational waves as a probe of the history of the universe," NORDITA program "Gravitational waves from the early universe" Stockholm, Sweden, 2019/9/16

[50] K. Kamada, "Baryogenesis from Primordial Helical Hypermagnetic Fields", Baryon and Lepton Violation 2019, Institute for Theoretical Physics (IFT), Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, Spain, 2019/10/22.

[51] Yusuke Yamada, "Nonlinearly realized supergravity and its applications", APPC2019, Kuching, Malaysia, 2019/11/20.

[52] J. Yokoyama, "Garvitational waves as a probe of the early universe", APCTP School/Workshop on Gravitational-wave cosmology, Academia Sinica (Taipei) 2019/11/30.

[53] K. Kamada, "Magnetic Fields in the Early Universe", KIAS and NRF-JSPS Workshop on Particle, String and Cosmology, High 1 resort, Korea, 2020/02/04.

[54] K. Kamada, "Magnetic Fields and Quantum Anomaly in the Early Universe", The 3rd Univ. Ryukyus International Symposium. of Theoretical and Computational Science (RIS-TCS 2020). -Frontier of Physics and Chemistry- (held as a virtual conference), University of the Ryukyus, Okinawa, Japan, 2020/03/20.

(国内会議)

一般講演

[55] 渡慶次孝気、"Spacetime Thermodynamics: to the Entropic Gravity" (ポスター)、第 49 回天文・天体物理若手夏の学校、ロワジールホテル豊橋、愛知、2019/8/2.

[56] 山田悠介、Niccolò Cribiori、 Christoph Roupec、Timm Wrase、"4 次元 N=1 超重力理論における反 D 3 ブレーンの有効作用"、日本物理学会 2019 年秋季大会、山形大学、2019/9/17.

[57] 林拓未、大下成誉、鎌田航平、横山順一「熱効果を含めたブラックホール周辺でのヒッグス不安定性の解析」、日本物理学会 2019 年秋季大会、山形大学、2019/9/17.

[58] 粂潤哉、関口豊和、森崎宗一郎、伊藤洋介、横山順一、"独立成分解析による KAGRA データの雑音除去"、日本物理学会 2019 年秋季大会、山形大学、2019/9/19.

[59] 田原弘章、小林努、横山順一、"ホルンデスキー理論における静的球対称時空の角度方向摂動に対する安定性"、日本物理学会 2019 年秋季大会、山形大学、2019/9/20.

[60] 羽柴聡一朗、横山順一、“右巻きニュートリノの重力的生成によるバリオン数と暗黒物質の生成”、日本物理学会 2019 年秋季大会、山形大学、2019/9/20.

[61] 鎌田耕平, “銀河間磁場のヘリシティ と宇宙の物質反物質非対称”, 日本 SKA サイエンス会議「宇宙磁場」2019, 国立天文台, 2019/11/22.

[62] 粂潤哉、鎌田耕平、山田悠介、横山順一、“ヘリカルな原始重力波によるレプトン非対称生成の再考”、 日本物理学会第 75 回年次大会、名古屋大学、2020/3/18.

[63] 羽柴聡一朗、山田悠介、横山順一、“背景場のトンネル効果に伴う粒子生成の解析”、日本物理学会第 75 回年次大会、名古屋大学、2020/3/18.

招待講演

[64] 鎌田耕平, “ヘリカル磁場による物質反物質非対称生成”, 基研研究会 素粒子物理学の進展 2019, 京都大学基礎物理学研究所, 2019/07/30.

[65] 横山順一, “重力波のサイエンス”, CRC 将来計画タウンミーティング, グランキューブ大阪, 2019/11/30.

(セミナー)

[66] Y. P. Wu, “Cosmological consequences of heavy Higgs relaxation: from leptogensis to gravity wave production”, 2019 Zhuhai Forum at Sun Yat-Sen University, Zhuhai, China, June 2019 .

[67] K. Kamada, “Baryogengesis from Hypermagnetic Fields at Electroweak Crossover”, Seminar at Theoretical Particle Physics Group, Niigata University, Niigata, Japan, 2019/06/27.

[68] Yusuke Yamada, “Nonlinear realization of supersymmetry”, IBS-CTPU, Daejeon, Korea, 2019/07/09.

[69] Yusuke Yamada, “Application of nonlinearly realized supersymmetry”, IBS-CTPU, Daejeon, Korea, 2019/07/10.

[70] M. He, “Inflation and Preheating in the Mixed Higgs-$R^2$ Model”, Seminar at Astrophysics and Cosmology Group, 早稲田大学, 2019/07/14.

[71] M. He, “Rotation and Formation Threshold of Primordial Black Holes”, Joint Seminar, RESCEU, the University of Tokyo, 2019/07/22.

[72] Yusuke Yamada, “Nonlinear realization in supergravity and its application”, KEK Theory Group, Ibaraki, Japan, 2019/07/23.

[73] K. Kamada, “Cosmological Magnetic Fields and Chiral Anomaly in the Standard Model”, Seminar at Cosmology group, Leiden Institute of Physics, Leiden University, Leiden, Netherlands, 2019/09/09.

[74] S. Hashiba, “Dark matter and baryon-number generation in quintessential inflation via hierarchical right-handed neutrinos”, Seminar at DESY theory group, Deutsches Electronen-Synchrotron, Hamburg, Germany, 2019/09/10.

[75] M. He, “Rotation and Formation Threshold of Primordial Black Holes”, Seminar at Sun Yat-sen University, Guangzhou, China, 2019/09/16.

[76] K. Kamada, “Magnetic Fields in the Universe and Chiral Anomaly”, MPA Cosmology Seminar, Max-Planck-Institute for Astrophysics, Garching, Germany, 2019/09/17.

[77] K. Kamada, “Chiral Anomaly Meets Cosmological Magnetic Fields”, Seminar at Astroparticle Physics Group, Max-Planck-Institute for Physics, Munich, Germany, 2019/09/19.

[78] K. Kamada, “Cosmological Magnetic Fields Meet Chiral Anomaly”, Seminar at E-lab, Nagoya University, Nagoya, Japan, 2019/10/16.

[79] 鎌田耕平, “初期宇宙磁場の引き起こす素粒子論的な諸現象”, 埼玉大学素粒子論研究室セミナー, 埼玉大学, 2019/11/08.

[80] S. Hashiba, “Gravitational production of right-handed neutrinos after quintessential inflation”, Seminar at E-lab, Nagoya University, Nagoya, Japan, 2020/01/15.

[81] K. Kamada, “Cosmological generation of primordial magnetic fields, the origin of the matter / antimatter asymmetry, and the chiral magnetic effect in cosmology”, informal lunch talk at Particle Physics group, Rice University, TX, USA, 2020/01/29.

[82] K. Kamada, “GUT Baryogenesis, Chiral Plasma Instability, and their Relevance to Affleck-Dine Magnetogenesis”, The 23rd New Physics Forum, Ochanomizu University, Tokyo, Japan, 2020/02/10.

＜アウトリーチ＞

(アウトリーチ)

[83] 横山順一, 「輪廻する宇宙」, 全国町村会トップセミナー, 全国町村会館, 2019/6/3.

[84] 横山順一, 「輪廻する宇宙」, 東急グループ幹部候補講演会, 東急本社, 2019/10/29.

[85] 羽柴聡一朗, 春日知明,「物理３分クッキング ～ 宇宙の作り方」, 東京大学理学部オープンキャンパス 2019, 東京大学本郷キャンパス小柴ホール, 2019/8/7.

[86] 鎌田耕平, 科学協力 (”マルチバースとは”), TeNQ 企画展「ウルトラマンゼロ 10 年の軌跡」, 宇宙ミュージアム TeNQ(テンキュー), 東京, 2019/11/8-2020/03/01.

# 6　一般物理実験

## 6.1　高瀬研究室

高瀬研究室では、核融合発電の実現を目標に磁場閉じこめ型トーラスプラズマの研究を行っている。柏キャンパスに設置された TST-2 装置を用いた球状トカマクプラズマの基礎研究を行うと共に、量子科学技術研究開発機構で建設中の JT-60SA 装置、核融合科学研究所の LHD 装置、京都大学の LATE 装置、九州大学の QUEST 装置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、28 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、通常トカマクプラズマの電流駆動に用いられるセンターソレノイドのための空間がないため、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）を用いて高速電子を生成し、それによる電流駆動の研究を行っている。2019 年度は、硬 X 線計測、スクレープ・オフ層プラズマの計測、バルク電子の密度温度計測を充実させるとともに、波動の作る磁場揺動の計測を行った。これらを通じて、高速電子輸送や波動伝搬・吸収の理解を深化させた。また、プラズマ立ち上げの物理を明らかにするための基礎実験、小型センターソレノイドによるプラズマ形状制御実験を行い成果を得た。

### 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 Combline）アンテナを用いて 200 MHz の低域混成波（LHW）の入射によるプラズマ電流駆動実験を行っている。装置の外側および上側に設置された二台のアンテナを用いることで、外側、上側および下側模擬の三種類の入射位置による電流駆動実験を行い、これまでに最大 28 kA のプラズマ電流を達成している。

LHW は、プラズマ中に高速電子を生成することでプラズマ電流を駆動することから、高速電子が放射する X 線の測定が、重要な計測のひとつとなっている。今年度はシンチレーション検出器を用いた硬 X 線計測を行った結果、プラズマから放射される X 線は、プラズマの最外殻磁気面の径方向位置とアンテナリミターの距離が離れているほど、高エネルギーとなる傾向を示すことがわかった。この X 線は LHW によって生成された高速電子が装置外側のアンテナリミターに衝突することで放射されていると考えられ、RF 誘起輸送を取り入れたモデル計算の結果と定性的に一致することが確かめられた。また、入射する LH パワーの AM 変調実験の結果、プラズマからの硬 X 線放射は 10 $\mu$s 以下の時間スケールで LHW の変調に応答することがわかり、理論的に予測される高速電子の閉じ込め時間よりもはるかに高速であることから、閉じ込めが悪くプラズマ電流を担っていない電子の存在が示唆された。さらに、プラズマ中に Mo 製のターゲット球を挿入した実験では、Mo 球がアンテナリミターよりプラズマ側に存在する場合に、プラズマの最外殻磁気面から Mo 球が離れていても非常に高いエネルギーフラックスの X 線が放射されることがわかった。この X 線は高速電子が Mo に衝突することに由来する Thick-target 放射であると考えられ、プラズマの最外殻磁気面よりも外側にプラズマ電流に寄与しない高速電子が多数存在していることが実験的に確かめられた。

#### 高周波プローブ計測

真空容器内側、下側と外側に設置した計 14 個の高周波磁気プローブを用いて、パラメトリック崩壊不安定性（Parametric Decay Instabilities、PDI）による LH 波の崩壊波が観測された。LH 波の外側入射、上側入射、下側模擬入射の 3 つの入射方法による励起波に対する崩壊波のパワー割合を計測した（図 6.1.1）。外側入射では、真空容器外側よりも内側で PDI が強かった（>50 %）。対照的に上側入射では、真空容器内側での PDI パワーの割合は小さく（<50 %）、下側と外側では 100 %以上の割合で存在していることが確認された。下側模擬入射時では、内側での割合は 20 %以下と小さく、下側から外側へと PDI パワーの割合が増加することがわかった。実験はプラズマ電流値 ~20 kA で行われたが、崩壊波の出現による大きな電流駆動効率の低下は見られなかった。

#### 静電プローブ計測

スクレープ・オフ層のプラズマを計測するため、静電プローブ（ラングミュア・プローブ）アレーを新たに製作・設置した。新しいプローブアレーにより、電子密度は $10^{17}$ $m^{-3}$ 程度、電子温度は高周波電力オン時には 30–100 eV、オフ時には 10 eV 以下であることが計測された。プローブにより計測された I-V 特性の評価には通常電子が熱的（マクスウェル分布）であることを仮定する。しかし、高周波駆動プラズマにおいては、特にプラズマ周辺部において、非熱

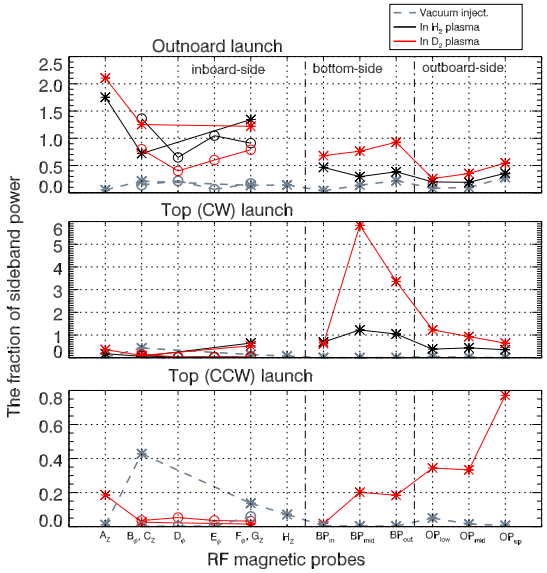



図 6.1.1: 各入射方法における励起波（199.9–200.2 MHz）に対する崩壊波（100–199.8 MHz）の割合。黒：水素プラズマ、赤：重水素プラズマ、灰：真空入射。丸印：RF 磁場のトロイダル偏光成分、米印：RF 磁場のポロイダル偏光成分。

的な高速電子が熱的な電子と同程度存在し得るため、I-V 特性から分布関数を推定することを試みた。その結果、高周波電力オン時には、8 eV の熱的な分布に加えて、<1 keV の成分が存在することが初めてわかった（図 6.1.2）。

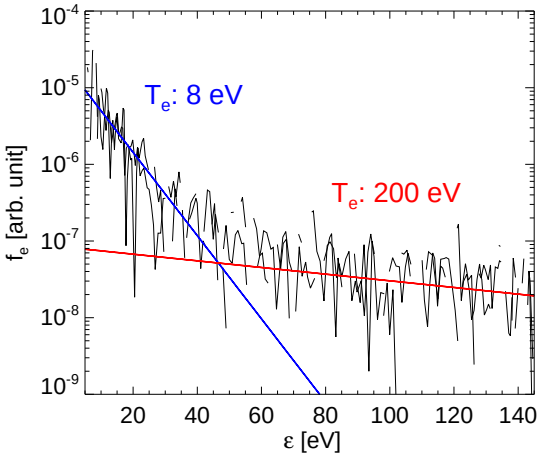



図 6.1.2: プローブの I-V 特性から求められた電子速度分布関数。2 つの異なる温度を持つ成分が存在することがわかる。

### 電子温度計測

最近の放電において、プラズマの中心電子温度が典型的な値（10–20 eV）よりも 2–3 倍高い放電があることがわかった。そこで、プラズマの中心電子温度の電子密度、高周波電力、トロイダル磁場に対するスケーリングを求めた。その結果、電子温度 $T_e$ は概ね電子密度 $n_e$ に反比例していることがわかった（$T_e \propto n_e^{-1.2\pm0.11}$）。磁場 $B_t$ に対しては強い正の相関があった（$T_e \propto B_t^{0.72\pm0.16}$）。磁場強度が高い程、高周波がプラズマ中心部まで伝搬できるようになるので、これは妥当な結果である。一方、高周波電力 $P_{RF}$ への依存性は認められたものの、小さかった（$T_e \propto P_{RF}^{0.11\pm0.079}$）。これは駆動電流が入射電力に対して飽和しているという数値計算の結果と矛盾しない。プラズマ電流 $I_p$ に対しては、弱い負の相関があった（$T_e \propto I_p^{-0.13\pm0.12}$）。高速電子の軌道損失を考えると、これは予想と逆であるが、いずれにしても弱い依存性である。また、バルク電子の加熱が高速電子との衝突によるものと仮定し、エネルギー閉じ込め時間を評価したところ、ITER の L モード閉じ込め時間のスケーリングと矛盾しないことがわかった。

### 拡張 MHD 平衡計算

低域混成波よるプラズマ立ち上げを定量的に記述するためには、有限軌道幅での波動伝搬と軌道平均フォッカー・プランク計算、高速電子を含む拡張 MHD 平衡計算を全て自己無撞着に行う必要がある。このうち MHD モデルの拡張に関して、運動論的に記述される無衝突高速粒子とバルク MHD を組み合わせた拡張 MHD による平衡計算を行った。LH 波により生成される高速電子の速度空間・実空間分布は、ゼロ軌道幅の光線追跡と起動平均フォッカー・プランク計算で得られた知見をもとにパラメータ化した。

TST-2 の典型的な上側入射による放電のフラット・トップにおいて、拡張 MHD による平衡計算を適用したところ、高速電子の有限軌道幅効果により、最外殻磁気面の外側に自然に電流が現れた（図 6.1.3）。プローブによってバルク電子と同程度の密度の高速電子がスクレープ・オフ層に観測されているが、この計算結果はそれと矛盾しない。また、従来の平衡計算に比べて、電子密度分布のフィッティング誤差が 32 %減少した。誤差が減少したのは、高速電子電流が高磁場側に高い電流密度を作ることで、ポロイダル磁束分布がよりピークした分布になり、電子密度分布とより整合性が取れるようになったためであった。LH 立ち上げプラズマにおいては、軌道が磁気面から大きくずれる高速電子の作る磁場が支配的であるが、従来の平衡計算では最外殻磁気面の外を流れる電流をどのように記述するかは自明ではなかった。この結果により、LH 立ち上げプラズマの平衡が、高速電子によって、どの程度従来の MHD 平衡からずれるのかが、初めて実験的に、また定量的に明らかとなった。

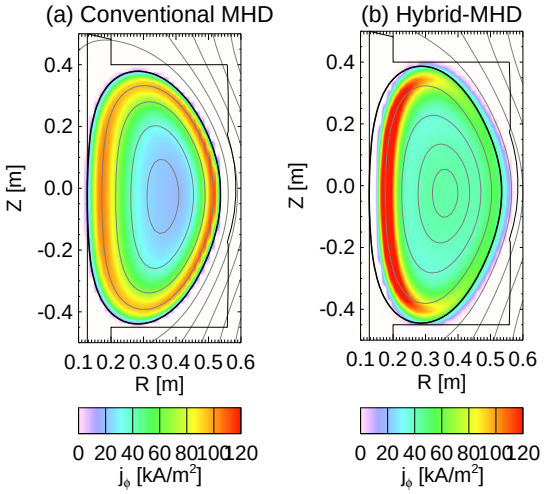



図 6.1.3: (a) 従来の MHD による平衡計算 (b) 拡張 MHD による平衡計算における再構成された電流密度分布。拡張 MHD においては、最外殻磁気面外に電流が存在し、また、内側の電流密度も高くなっている。

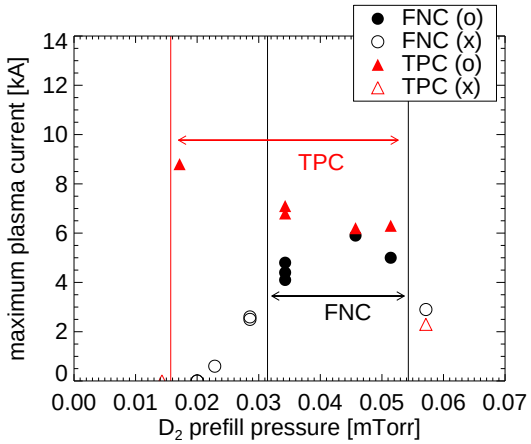



図 6.1.4: 最大プラズマ電流の重水素圧依存性。記号の塗りつぶし有り：立ち上げ成功、塗りつぶし無し：立ち上げ失敗。黒丸：ヌル磁場配位 (FNC)、赤三角：捕捉磁場配位 (TPC)。縦線と矢印はそれぞれ立ち上げ可能なガス圧限界とガス圧領域である。

#### 小型センターソレノイドによるプラズマ形状制御

プラズマの断面形状は、プラズマの閉じ込め性能に大きな影響を与えると考えられ、過去にはビーン型形状、近年では負三角度形状が研究されている。高周波維持プラズマの場合、これらの形状制御は、高速電子の軌道の改変を介して電流駆動性能に大きな影響を与え得る。そこで、交流オーミックコイル運転用に製作した小型センターソレノイドを転用して、プラズマ形状制御を試みた。このコイルは強磁場側赤道面に局所的な磁場摂動を生成することが可能であり、局所的にプラズマを内側に引き付けたり、外側に押し付けることで、負の三角度やビーン型形状を実現できると期待される。電子サクロトロン加熱 (ECH) によって維持されるプラズマを対象に実験を行った結果、予想された形状制御が実現されたことを可視カメラ画像、平衡解析により確認した。また、ビーン形状はプラズマの上下位置不安定性を誘起しやすいことが確認された。一方、プラズマ電流のより高い LH 維持プラズマを対象にした場合は、形状の変化は微小であった。今後、より高いコイル電流での実験、電流駆動への影響の吟味が望まれる。

### 6.1.3 オーミックプラズマ実験

#### 電子サイクロトロン波補助立ち上げ

近年、定常運転の確立を見据えた超伝導トカマクを用いた研究が国内外で始まっている。センターソレノイドを超伝導化した場合、周回電圧の低下によるプラズマ立ち上げの信頼度低下は解決すべき課題である。電子サイクロトロン（Electron Cyclotron、EC）波をオーミック立ち上げに適用することで、立ち上げが容易になることが知られている。従来、放電開始時の磁場配位には、このような EC 補助を行う場合であっても、オーミック立ち上げで一般的なヌル磁場配位（Field-Null Configuration、FNC）が用いられてきた。一方、近年、非誘導 EC 立ち上げで用いられる捕捉磁場配位（Trapped-Particle Configuration、TPC）から放電開始することで、EC 補助オーミック立ち上げにおいても信頼性が向上することが指摘されている。2019 年度は TST-2 球状トカマク装置を用いて、捕捉磁場配位とヌル磁場配位による、プラズマ立ち上げの違いを調査した。

各放電における最大到達プラズマ電流の重水素圧依存性を図 6.1.4 に示す。EC 電力は 5 kW であるが、これは当該放電におけるオーミック加熱電力と同等の値である。塗りつぶし有りの記号が立ち上げに成功した放電、塗りつぶし無しの記号は放電開始（ブレークダウン）しない、または電離完了（バーンスルー）しなかった放電である。縦線は立ち上げ可能なガス圧限界である。立ち上げが可能な高ガス圧限界については、2 つの配位で大きな差異は認められなかった。一方、ガス圧を下げていくと、捕捉磁場配位においては単調に最大到達プラズマ電流が増加したのに対して、ヌル磁場配位においては、0.04–0.05 mTorr あたりをピークに最大到達プラズマ電流が減少した。ヌル磁場配位においては、0.03 mTorr 以下ではブレークダウンが大きく遅れたことにより、垂直磁場波形とプラズマ電流の立ち上がりが不整合となり、立ち上げに失敗した。捕捉磁場配位においても、約 0.015 mTorr 以下ではブレークダウンしなかったため、立ち上げに失敗した。この低ガス圧限界の拡張により、捕捉磁場配位ではヌル磁場配位に対して、立ち上げ可能なガス圧窓が 1.7 倍程広がる

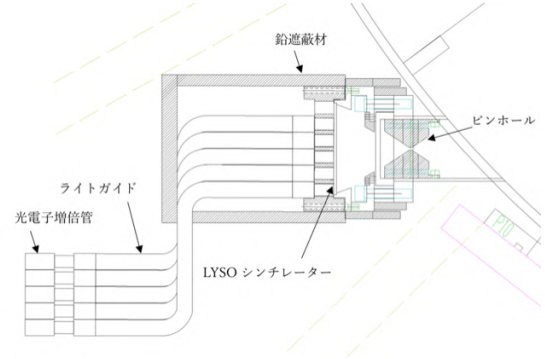



図 6.1.5: 硬 X 線イメージング計測器の概略図。

ことがわかった。

低周回電圧での立ち上げにおいては、EC 電力を適用することが不純物のバーンスルーに効果的であるが、ヌル磁場配位に対して大きな EC 電力を適用すると、低ガス圧限界が大幅に狭まってしまう。今回の実験で、捕捉磁場配位を用いることにより、この問題を回避できることがわかった。また、ヌル磁場配位で立ち上げ可能な領域であっても、捕捉磁場配位の方がプラズマ電流の立ち上がりが速かった。これは、捕捉磁場配位の方が、特に放電開始直後に、EC 電力が効果的に働くためであると考えられる。

#### IRE 時のフロー計測

オーミックプラズマにおいて、内部磁気再結合現象（IRE）前後におけるフローの変化を可視分光器を用いてドップラー法により計測した。また、IRE に伴う磁気揺動を磁気プローブの微分信号を用いて計測した。不純物 CV ($C^{4+}$) のラインを計測した結果、IRE の前後でフローが大きく変化することが確認され、顕著な場合は 20 km/s ほどのフローの変化が見られた。徐々に磁気揺動の大きさが増す放電において、急激にフローが変化し始めるのは磁気揺動の大きさがピークをむかえた後であった。同じ磁気揺動の大きさでもフローの変化量が 2 倍ほど異なることもあり、ピーク時の磁気揺動の大きさとフローの IRE 前後の変化量には相関は見られなかった。

### 6.1.4 計測器開発

#### トムソン散乱計測

TST-2 球状トカマク型装置の低域混成波電流駆動プラズマは $10^{17}$ $m^{-3}$ ほどの低密度プラズマとなっている。今回、特にプラズマ密度の低い周辺部に重点をおいて、トムソン散乱計測を試みた。この際、積算によって低密度プラズマから得られる散乱光信号の明瞭化を行った。積算信号数を 20 とした結果、これまで得られなかった周辺部の散乱光信号を得た。その後に平衡計算から予測される磁気面とトムソン散乱計測による解析結果を比較した。その結果、同じ磁気面状にある異なる測定空間点において、インボード側の電子温度がアウトボード側の電子温度よりも高いことが確認された。

#### 硬 X 線イメージング

高周波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 線の空間分布をイメージングできる計測器を設計し製作した（図 6.1.5）。薄板状の LYSO シンチレーターとタングステン合金のピンホールを用いたピンホールカメラ構造である。シンチレーション光を計測する光電子増倍管が TST-2 の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ライトガイドで伝送して計測した。ピンホールを通過しない X 線はノイズに相当するため、その侵入を防ぐために鉛で遮蔽した。ライトガイドを 1 列に並べて計測するため 1 次元の計測となるが、このライトガイド列の角度を変え、再現性の良いプラズマで計測することで 2 次元空間分布計測ができる。シンチレーター上の信号は強磁場側で大きく、プラズマの位置変化に応じて変化することが確認できた。

### 6.1.5 共同研究

#### QUEST におけるトムソン散乱計測

28 GHz の電子サイクロトロン加熱（Electron Cyclotron Heating, ECH）の磁力線方向屈折率（$n_{\parallel}$）依存性を調べた。結果を図 6.1.6 に示す。$n_{\parallel} = 0.26$ において最も高い電子温度（570 eV）が得られた。

#### 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システムの設計および測定を行った。米国 Wisconsin-Madison 大学の MST 装置において、PPCD（Pulsed Poloidal Current Drive）プラズマを対象とした計測を行い、前年度までに行った軟 X 線発光量の計算値と測定値を比較した。測定の結果、計算ではプラズマ中心において ∼ 120 Photons/pixel/ms の X 線放射が予想されていたのに対し、計測では ∼ 100 Photons/pixel/ms の発光が得られ、計算と実験値が良い精度で一致することが確認できた。また QST の JT-60SA 装置における中性粒子ビーム加熱プラズマを対象とした発光量の計算と本計測システムを導入することの有効性を検討した結果、0.1 mm×4 mm のピンホールを用いた接線視線での計測を行うことで、1 cm の空間分解能と 500 Hz の時間分解能で軟 X 線のイメージング計測が実現可能であることがわかった。

＜報文＞

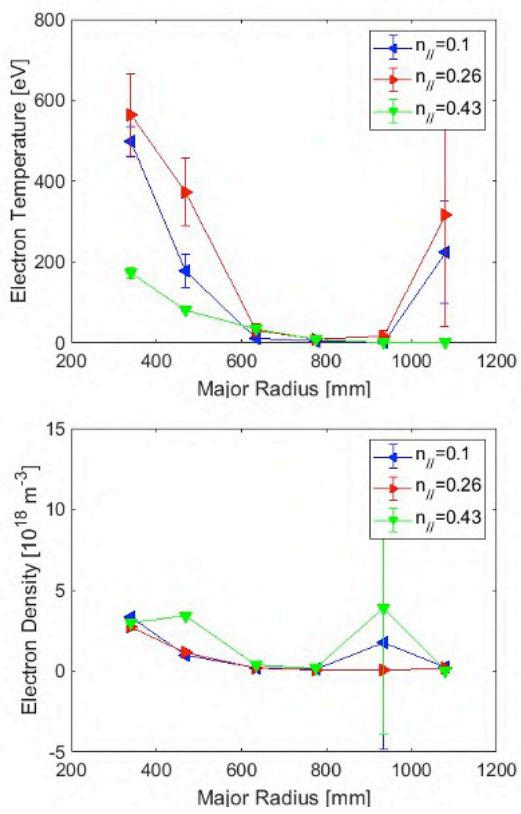



図 6.1.6: QUEST でのトムソン散乱計測結果。（上）電子温度分布。（下）電子密度分布。

(原著論文)

[1] Y Kawamata, A Ejiri, K Matsuzaki, Y. Takase, N. Tsujii, T. Onchi and Y. Nagashima: “Improvement of Aperture Configuration to Reduce the Stray Light for Thomson Scattering Measurement Using a Peripheral Beam Profile Monitor,” Plasma Fusion Res. **14**, 1402072 (2019).

[2] S. Yajima, Y. Takase, Y. Tajiri, Y. Takei, N. Tsujii, H. Yamazaki, C.P. Moeller and T. Shinya: “Development of capacitively-coupled combline antennas for current drive in tokamaks,” Nucl. Fusion **59**, 066004, (2019).

[3] Y. Ko, N. Tsujii, S. Yajima, Y. Takase, A. Ejiri, O. Watanabe, H. Yamazaki, C.P. Moeller, Y. Yoshimura, Y. Yoshida, Y. Iida, K. Iwasaki, Y. Kawamata, S. Sakamoto, Y. Aoi, T. Oishi, K. Matsuzaki and J. Rice: “Measurement of the Lower Hybrid Wave Using RF Magnetic Probes on the TST-2 Spherical Tokamak,” Plasma Fusion Res. **14**, 3402107 (2019).

[4] A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, S. Yajima, H. Yamazaki and O. Mitarai: “Theoretical study of preionization by inductive field in tokamaks,” Nuclear Fusion **60**, 036015 (2020).

(学位論文)

[5] 山崎響：「Study of Plasma Current Start-Up by the Lower Hybrid Wave Using X-ray Measurements on the TST-2 Spherical Tokamak」

[6] 松崎：「高周波立ち上げ球状トカマクにおける電子温度密度分布計測」

[7] 高竜太：「A study of lower hybrid wave propagation using RF magnetic probes on the TST-2 spherical tokamak」

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[8] Y. Takase, A. Ejiri, N. Tsujii, S. Yajima, Y. Aoi, Y. Iida, K. Iwasaki, Y. Kawamata, Y. Ko, K. Matsuzaki, C.P. Moeller, Y. Peng, J. Rice, S. Sakamoto, H. Yamazaki and Y. Yoshida: “Plasma Start-up Experiment and Modelling on the TST-2 Spherical Tokamak,” 23rd Topical Conference on Radiofrequency Power in Plasmas, Hefei, China, May 14–17, 2019.

[9] H. Yamazaki, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, O. Watanabe, Y. Ko, K. Iwasaki, Y. Aoi and TST-2 group: “Lower hybrid current drive experiments and x-ray measurements on TST-2 spherical tokamak,” US-Japan workshop on RF Heating and Current Drive Physics, Princeton Plasma Physics Laboratory, NJ, USA, Sep. 4–6, 2019.

[10] Y. Takase, A. Ejiri, Y. Ko, C.P. Moeller, N. Tsujii, O. Watanabe, H. Yamazaki, Y. Aoi, K. Iwasaki, K. Matsuzaki, Y. Osawa, Y. Peng, J. Rice: “Plasma Current Start-up and Ramp-up Experiments on the TST-2 Spherical Tokamak,” 20th International Spherical Torus Workshop (ISTW2019), ENEA Centre, Frascati, Italy, Oct. 28–31, 2019.

[11] N. Tsujii, Y. Yoshida, Y. Takase, A. Ejiri, O. Watanabe, H. Yamazaki, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Aoi, Y. Ko, K. Matsuzaki, J. Rice, Y. Osawa: “Modeling of the lower-hybrid wave driven plasma equilibrium with a hybrid-MHD model on the TST-2 spherical tokamak,” 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Toki, Gifu, Japan, Nov. 5–8, 2019.

[12] Y. Ko, Y. Takase, A. Ejiri, N. Tsujii, O. Watanabe, H. Yamazaki, J. Rice, K. Matsuzaki, Y. Aoi, Y. Peng, Y. Osawa: “Observation of parametric decay instability in TST-2 lower hybrid wave driven plasmas,” 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Toki, Gifu, Japan, Nov. 5–8, 2019.

[13] J.H.P. Rice, N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, O. Watanabe, H. Yamazaki, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Aoi, Y. Ko, K. Matsuzaki, Y. Osawa: “Development of Langmuir Probe Diagnostic for Measurement of Scrape-Off Layer Conditions in RF-Driven

Plasmas in TST-2," Toki, Gifu, Japan, Nov. 5–8, 2019.

[14] K. Iwasaki, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, O. Watanabe, H. Yamazaki, Y. Peng, Y. Aoi, K. Matsuzaki, Y. Ko, J.H.P. Rice, Y. Osawa: "Measurement of the flow of Ohmic plasmas on the TST-2 spherical tokamak," Toki, Gifu, Japan, Nov. 5–8, 2019.

[15] Y. Nagayama, A. Ejiri, Y. Takase, H. Nakanishi, M. Ohsuna, H. Tsuchiya, S. Yamaguchi: "Measurement of Electron Density Fluctuations by Using the O-mode Microwave Imaging Reflectometry (O-MIR) in TST-2 Spherical Tokamak," 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Toki, Gifu, Japan, Nov. 5–8, 2019.

[16] O. Watanabe, H. Yamazaki, Y. Aoi, A. Ejiri, Y. Ko, K. Iwasaki, J.H.P. Rice, K. Matsuzaki, Y. Peng, Y. Osawa, N. Tsujii and Y. Takase: "Evaluation of X-ray penetration pass through shield gap of a hard X-ray measurement system," 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Toki, Gifu, Japan, Nov. 5–8, 2019.

[17] Y. Takase for the TST-2 Group: "Recent results from TST-2," 8th Workshop RIAM 2020, RIAM, Kyushu University, Jan. 30–31, 2020.

[18] Y. Peng, A. Ejiri, K. Matsuzaki, Y. Takase, N. Tsujii, O. Watanabe, Y. Osawa, H. Yamazaki, K. Iwasaki, Y. Aoi, R. Ko, J. Rice: "Thomson scattering system in TST-2," 8th Workshop RIAM 2020, RIAM, Kyushu University, Jan. 30–31, 2020.

[19] J.H.P. Rice, N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, O. Watanabe, H. Yamazaki, K. Iwasaki, Y. Peng, Y. Aoi, K. Matsuzaki, Y. Ko, Y. Osawa: "Detection of fast electrons in SOL plasma using a Langmuir probe diagnostic," 8th Workshop RIAM 2020, RIAM, Kyushu University, Jan. 30–31, 2020.

[20] Y. Ko, Y. Takase, A. Ejiri, N. Tsujii, O. Watanabe, H. Yamazaki, Y. Peng, J.H.P. Rice and TST-2 group: "Measurement of LH waves using RF magnetic probes," 8th Workshop RIAM 2020, RIAM, Kyushu University, Jan. 30–31, 2020.

招待講演

[21] Y. Takase: "Review of ST Fusion Energy R&D, The First ENN ST & FRC Compact Fusion Workshop and Advisory Board Meeting," ENN, Langfang, China, Dec. 5–6, 2019.

(国内会議)

一般講演

[22] 江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、渡邉理、山崎響、Peng Yi、岩崎光太郎、青井優樹、高竜太、松崎亨平、Rice James、大澤佑規：「球状トカマク TST-2 における最近の研究」、研究会「先進トカマク概念の深化」、核融合科学研究所、土岐 、2019 年 9 月 5–6 日.

[23] 山田巌、弥富豪、辻井直人：「TST-2 におけるプラズマ立ち上げ条件」、研究会「先進トカマク概念の深化」、核融合科学研究所、土岐、2019 年 9 月 5–6 日.

[24] 弥富豪、山田巌、辻井直人：「TST-2 の誘導立ち上げにおけるバーンスルーのモデリング」、研究会「先進トカマク概念の深化」、核融合科学研究所、土岐、2019 年 9 月 5–6 日.

[25] 辻井直人：「TST-2 における無誘導球状トカマク立ち上げ実験」、研究会「先進トカマク概念の深化」、核融合科学研究所、土岐、2019 年 9 月 5–6 日.

[26] 江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、渡邉理、山崎響、彭翊、岩崎光太郎、青井優樹、高竜太、松崎亨平、Rice James、大澤佑規、Moeller C.P.、笠原寛史、斎藤健二、関哲夫、吉村泰夫、御手洗修：「TST-2 における非誘導球状トカマクプラズマの形状制御実験」、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学柳戸キャンパス、岐阜、2019 年 9 月 10–12 日.

[27] 江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、渡邉理、矢島悟、山崎響、御手洗修：「トカマクにおける誘導予備電離の理論研究」、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学柳戸キャンパス、岐阜、2019 年 9 月 10–12 日.

[28] 渡邉理：「計算コード PHITS を利用した X 線計測の改善」、第 16 回 QUEST 研究会〜核融合技術の進展と球状トカマク研究〜、九州大学筑紫キャンパス、2019 年 10 月 3–4 日.

[29] 高竜太、辻井直人、高瀬雄一、江尻晶、渡邉理、山崎響、James Rice、松崎亨平、青井優樹、Peng Yi、大澤佑規：「TST-2 における低域混成波波動計測」、第 16 回 QUEST 研究会〜核融合技術の進展と球状トカマク研究〜, 九州大学筑紫キャンパス, 2019 年 10 月 3–4 日.

[30] 松崎亨平、江尻晶、Peng Yi、大澤佑規、恩地拓巳、永島芳彦、花田和明、出射浩：「QUEST 球状トカマク装置におけるトムソン散乱計測システムの迷光対策」、第 36 回プラズマ・核融合学会年会、中部大学春日井キャンパス、2019 年 11 月 29 日–12 月 2 日.

[31] 青井優樹、高瀬雄一、江尻晶、辻井直人、渡邉理、山崎響、彭翊、岩崎光太郎、高竜太, 松崎亨平、James Rice、大澤佑規：「TST-2 における低域混成波プラズマの硬 X 線空間分布測定の開発」、第 36 回プラズマ・核融合学会年会、中部大学春日井キャンパス、2019 年 11 月 29 日–12 月 2 日.

[32] 長山好夫、江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、中西秀哉、大砂真樹、土屋隼人、山口聡一朗：「TST-2 での MIR 計測」、第 36 回プラズマ・核融合学会年会、中部大学春日井キャンパス、2019 年 11 月 29 日–12 月 2 日.

[33] 渡邉理、江尻晶：「X 線分布計測のためのステップ型コリメータの提案」、第 36 回プラズマ・核融合学会年会、中部大学春日井キャンパス、2019 年 11 月 29 日–12 月 2 日.

招待講演

[34] 高瀬雄一：「シンポジウム S1： BA フェーズ I の成果と BA フェーズ II 計画「先進プラズマ研究からの期待」」、第 36 回プラズマ・核融合学会年会、中部大学春日井キャンパス、2019 年 11 月 29 日–12 月 2 日.

## 6.2 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、特に太陽系近傍における星・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、我々のグループはこれを積極的に活用し研究を進めている。ALMA はこれまでの観測装置よりも 2 桁高い感度と解像度を実現し、星・惑星系形成の理解を大いに進展させつつある。

### 6.2.1 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、炭素鎖分子などの不飽和有機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。その様子が実際に 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。このことを利用すると、分子組成を特定の物理状態をハイライトする「マーカー」として利用できる。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り、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。

特に、2018 年に、本研究グループが中心（山本が PI）となり、仏、伊、独、米などの研究者と共同して提案していた、FAUST（Fifty AU STudy of the chemistry in the disk/envelope system of Solar-like protostars）という ALMA 大型観測プログラムが採択され、観測が進行中である。FAUST は 13 個の太陽型原始星に対して、同一の感度、同一の実空間分解能（50 au）、および同一の分子輝線で観測することにより、それらの物理構造と化学組成の特徴の全貌を明らかにしようとするものである。系統的に観測を遂行することにより、星・惑星系形成における物理・化学進化の全容を明らかにできると期待される。

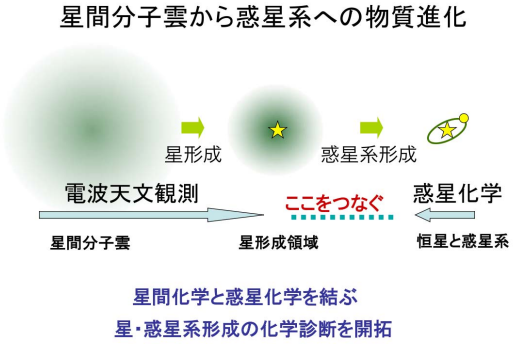



図 6.2.1: A schematic illustration of our goal

**【低質量原始星天体 IRAS 16293–2422 の詳細構造】**
IRAS 16293–2422 は、へびつかい座にある連星系である。ALMA データの解析から、連星系を成す 2 つの低質量原始星のうちの 1 つ (Source A) が、さらに非常に近接した連星系から成ることがわかった。加えて、Source A を取り巻く分子ガスの運動を解析することで、Source A 全体を取り巻いて回転するエンベロープガスと、連星系を成す原始星 A1 を中心に回転する円盤成分があることが示唆された。また、A1 に付随する円盤成分の周囲でガスの温度が局所的に上昇している様子が見られた。この要因としては、周囲から落下してきたガスが回転する円盤に衝突することによる加熱や、複雑な立体構造のガスが原始星

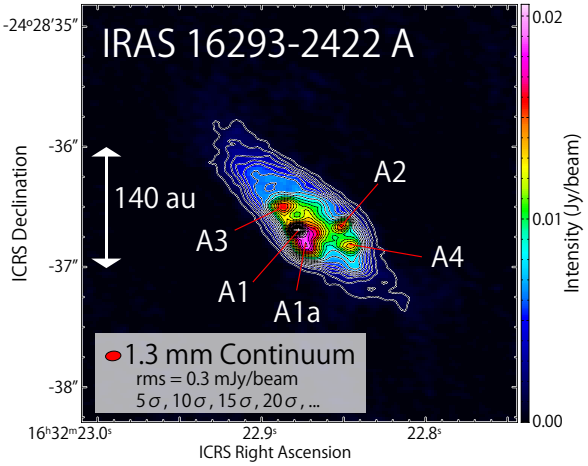



図 6.2.2: 1.3 mm dust continuum emission in IRAS 16293–2422 Source A observed with ALMA. Five intensity peaks are resolved. At least two intensity peaks (A1 and A2) are regarded as protostars constituting the close multiple system Source A.

(A1) からの照射を受けることによる加熱などが考えられる。温度が上昇する位置を境に、ガスの化学組成が急変する様子も見られており、この位置は物理的・化学的な遷移領域になっていると考えられる。

**【低質量原始星天体のエンベロープ・アウトフローモデル】**
近年の ALMA 観測により、原始星を取り巻くエンベロープガスと回転円盤構造を解像することが可能になってきた。観測されたガスの構造と運動を理解し、原始星質量やガスの比角運動量などの基本的な性質を抽出するには、単純化された運動モデルと比較することが有用である。回転支持円盤の解析には、ケプラー回転のモデルが従来よく用いられてきた。一方で、円盤形成の母体となるエンベロープガスの運動は、比角運動量の保存を仮定した弾道軌道でよく表されることが明らかになってきた。また、落下するエンベロープガスから回転円盤を形成するには、ガスの比角運動量を抜き取る機構が必要である。この機構の一つとしてアウトフローが考えられており、その構造は、単純な放物面型のモデルで近似されることが報告されてきた。円盤の形成過程に迫るには、ガスの比角運動量の輸送に着目し、円盤・エンベロープ構造とアウトフローの構造を併せて理解することが不可欠である。本研究では、エンベロープ、回転支持円盤、アウトフローのそれぞれのモデルについて、観測結果との対応を意識して、系統的なシミュレーションを行った。

**【孤立した星形成形成領域：CB68】**
へびつかい座にある Class 0 低質量原始星天体 CB68 について ALMA によって高感度・高分解能観測を行なった。その結果、代表的な孤立天体 B335 と同様に、Hot Corino 化学（飽和有機分子が豊富）と WCCC（不飽和有機分子が豊富）を併せもつハイブリッド型の化学組成をもつことを明らかにした。両者は空間的に分離しており、Hot Corino 化学が原始星近傍の内側に集中して見られ、WCCC が外側 1000 au 程度まで広がって見られる点は B335 と共通している。ところが、Hot Corino 化学の特徴である飽和有機分子は B335 と比べて組成が異なり、その存在量も全般的に一桁程度少ない。物理構造に関しては、この天体のエンベロープでも小さな回転構造が検出された。この回転構造も回転落下運動モデルで説明され、遠心力バリアの上限値は B335 と同様にこれまで知られていた孤立領域以外の原始星のものよりも小さいことが示された。（この結果は ALMA 大型プログラム FAUST のデータを用いたものである。）

**【孤立した星形成形成領域：CB244】**
ケフェウス座にある Class 0 低質量原始星天体 CB244 についてミリ波干渉計 NOEMA によって観測したところ、この天体では WCCC の化学組成の特徴のみが検出された。観測ノイズによる検出限界から推定した飽和有機分子の存在量の上限は B335 のものより 2 桁程度低く、Hot Corino 化学は B335 や CB68 のように明確には見られなかった。また、この天体の物理構造はこれまで観測してきた B335 と CB68 の孤立天体とは異なる。エンベロープの回転構造は、回転落下運動で説明できるが、その遠心力バリアの半径の上限値は B335 や CB68 に比べて 1 桁以上大きいことがわかった。さらに、エンベロープでは、ガスの分布に偏りがある様子が捉えられた。そのような場合にでも、モデルと観測結果の一致度を定量的に判断する方法を開発し、実際に適用した（図参照）。

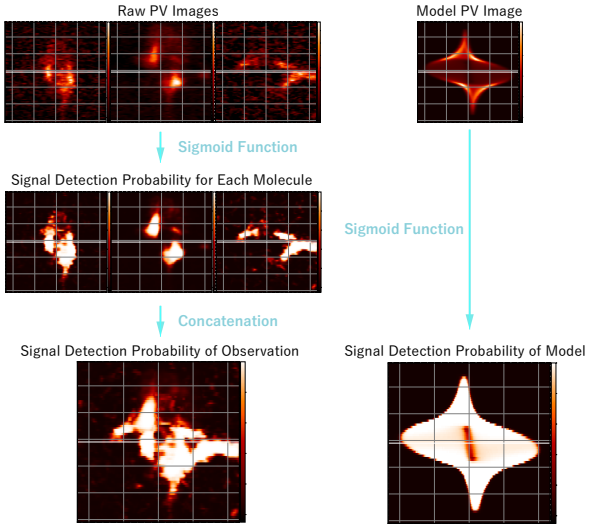



図 6.2.3: The schematic illustration of the procedure to estimate the similarity between the observed kinematic structure and the simulated kinematic structure by a ballistic-model.

**【Principal Component Analysis (PCA) を用いた原始星周りの化学組成分布の解析】**
IRAS 15398–3359 は、おおかみ座にある Class 0 原

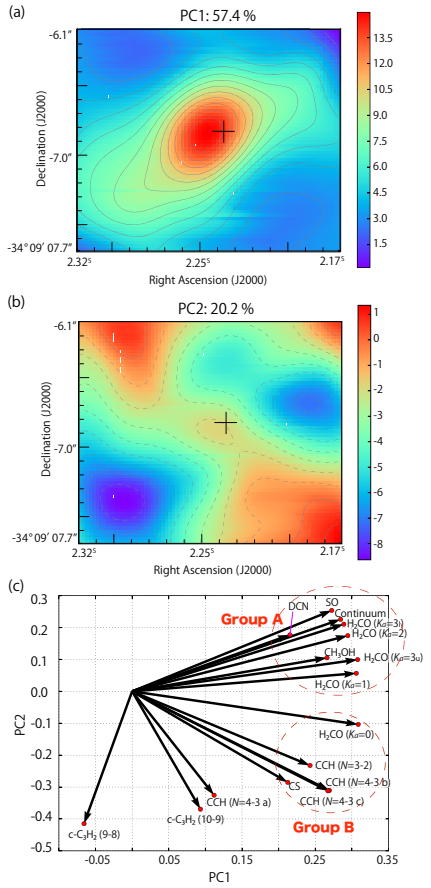



図 6.2.4: (a, b) Two major principal components PC1 and PC2. (c) The plot of the principal components for each distribution on the PC1-PC2 plane

.

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-$C_3H_2$, $CH_3OH$, $H_2CO$, DCN など、多数の分子輝線が見られた。これらの分子輝線と連続波に対して、アウトフローを含む数 1000 au スケールと原始星付近数 100 au スケールという 2 つのスケールで主成分分析を行った。狭い範囲で行なった PCA では、分子輝線が 2 番目の主成分 (PC2) によって、エンベロープ全体に広がる分布と原始星に集中する分布に分類される。また、PC2 の値が増加するに連れて $H_2CO$ の量子数が変化する傾向が見られた。このように、PCA は分子分布の特徴を先入観なく捉える方法として有効であることがわかった。

**【低質量原始星 IRAS 15398-3359 周りの物理・化学構造】**

IRAS 15398–3359 は、Class 0 低質量原始星で、その原始星質量は $0.007^{+0.004}_{-0.003}$ 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。ALMA の 12m Array と ACA を用いて数 50au〜数 1000 au に渡った広い範囲での物理・化学構造を調べた。原始星から南東方向に 2000 au 程度離れた位置にシェルのような広がった分布が、SiO、SO、$CH_3OH$, $H_2CO$ で見られた。SiO、SO、$CH_3OH$ は shocked tracer として知られる。そのため、このシェル構造は shocked region である可能性が考えられる。また、SO では原始星から北西方向に 1000 au 程度離れた位置にも分布が見られ、$H_2CO$ では原始星からこれらの分布に向かって伸びる構造が見られた。これらの構造は全て、これまで報告されているアウトフローと垂直な方向に広がる第二のアウトフローとして解釈できる。この新しい構造はこれまで全く知られていなかったものであり、その起源についての検討が進行中である。(この結果は ALMA 大型プログラム FAUST のデータを用いたものである。)

**【L483 のアウトフローの構造】**

低質量原始星 L483 のアウトフローの構造を ALMA による CS(J= 5-4) 輝線の観測で調べた。アウトフローが回転しながら放出されている場合、エンベロープガスの原始星への降着を促すことができるため、アウトフローの回転運動は注目されている。近年の観測技術の向上により、いくつかの原始星で回転運動が確認されている。L483 では、原始星から 1000 au ほど離れた領域でアウトフローの回転運動が報告されている。そこで本研究では原始星から 100 au 程度離れた領域でアウトフローの回転運動について調べた。その結果、原始星からの距離によりアウトフローの向きが異なっていることが明らかになった。これは周囲のガスとの相互作用やアウトフロー軸の歳差運動が原因と考えられる。また、アウトフローの形状は原始星近傍で急速に広がり、その後、コリメートしていることがわかった。そのため、アウトフローの形状を記述するのに従来よく使われている放物面モデルよりも 4 次関数で表すモデルがよく観測を説明することを示した (Figure 5)。さらに、アウトフローの回転も確かめられ、エンベロープガスと同程度の比角運動量を持っていることを確認できた。

**【NGC2264 CMM3 の化学組成と物理構造】**

CMM3 は太陽系近傍 (738pc) の大質量星形成領域 NGC2264 に存在する天体である。この天体は 2 つの原始星 CMM3A と CMM3B からなる連星系であり、このうち CMM3A は非常に多くの有機分子輝線が観測されるホットコア天体として知られている。この有機分子輝線を分解能 0.7” 程度の ALMA データを用いて解析したところ、光学的に薄い LTE(Local Thermodynamic Equilibrium) を仮定した解析では観測結果を説明できなかった。そこで、光学的厚さを考慮して解析を行ったところ、CMM3A では多くの有機分子 ($CH_3OH$, $CH_3OCHO$, $CH_3CN$, $CH_3OCH_3$, $CH_3CHO$ など) が光学的に厚い分子輝線を持つこと、$CH_3OH$ の分子柱密度が $10^{20}$ cm$^{-2}$ 程度と非常に高いこと、分子輝線が半径数 10 au 程度の、ビームサイズよりも小さいコンパクトな領域から放出されていることがわかった。$CH_3OH$ については、$^{13}C$ 同位体種との存在量の比が太陽系近傍での同位体比 60:1 に近い値であることも確認された。さらに、ALMA を用いた高分解能 (0.1” 程度) の観測データの解析に

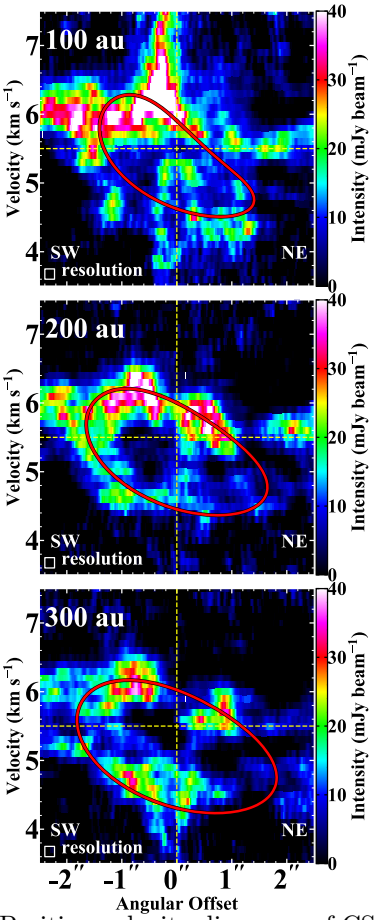



図 6.2.5: Position-velocity diagrams of CS emission and outflow's "Fourth Power Model" (red lines) created at 100 au scale. Numbers at upper left indicate distance from the protostar.

より、CMM3A の回転構造を初めて検出することに成功した。CMM3A と CMM3B は最終的に 2 つ合わせて 8 太陽質量程度まで成長すると考えられているが、この回転構造からは CMM3A の現在の原始星質量は 0.1−0.5 太陽質量程度と推定され、大質量星形成の初期段階にあると考えられる。CMM3A はアウトフローの解析から誕生後 1000 年程度経過していると考えられており、質量降着率が $10^{-4}$ 太陽質量/年 程度となっている。この値は一般的な低質量星の質量降着率 ($10^{-6}$−$10^{-5}$ 太陽質量/年 ) と比べて 10−100 倍程度大きい。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Watanabe, Y., Nishimura, Y., Sorai, K., Sakai, N., Kuno, N., and Yamamoto, S., "A 3 mm Spectral Line Survey toward the Barred Spiral Galaxy NGC 3627", The Astrophysical Journal Supplement Series, **242**, 26 (2019).

[2] Oya, Y., López-Sepulcre, A., Sakai, N., Watanabe, Y., Higuchi, A.E., Hirota, T., Aikawa, Y., Sakai, T., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., and Yamamoto, S., "Sulfur-bearing Species Tracing the Disk/Envelope System in the Class I Protostellar Source Elias 29", The Astrophysical Journal. **881**, 112 (2019).

[3] Higuchi, A.E., Oya, Y., and Yamamoto, S., "First Detection of Submillimeter-wave [$^{13}$C I] $^3P_1$–$^3P_0$ Emission in a Gaseous Debris Disk of 49 Ceti with ALMA", The Astrophysical Journal Letters, **885**, L39 (2019).

[4] Yoshida, K., Sakai, N., Nishimura, Y., Tokudome, T., Watanabe, Y., Sakai, T., Takano, S., and Yamamoto, S., "An ubiased spectral line survey observation toward the low-mass star-forming region L1527", Publ. Astron. Soc. Japan, **71**, S18 (2019).

(学位論文)

[5] 今井宗明、"Physical and Chemical Structures of Young Low-Mass Protostellar Sources in Isolated Condition"（博士論文）

[6] 藤田孝典、 「ALMA を用いた原始星近傍におけるアウトフロー構造の探究」 （修士論文）

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[7] Y. Oya, and S. Yamamoto, "Unified Picture of Chemical Differentiation in Disk-Forming Regions of Young Low-Mass Protostellar Sources", SPICA 2019, Crete, Greek, May 20-23, 2019 (poster)

[8] Okoda, Y., Oya, Y., and Yamamoto, S., "The Co-evolution of Disks and Stars in Embedded Stages", SPICA meeting, Crete, Greek, May 19—23, 2019 (Poster)

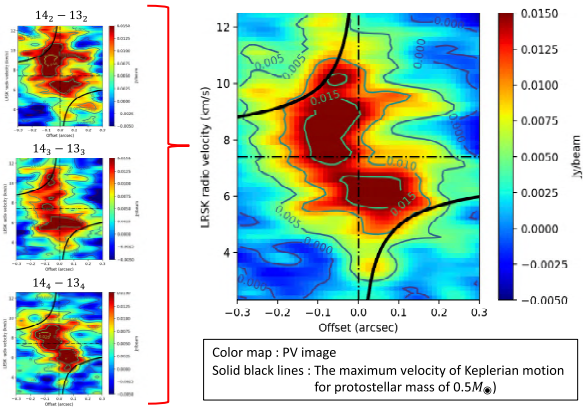



図 6.2.6: Position-velocity diagrams of the $CH_3CN$ emission, which is a composite of the three $K$ structure lines. The protostellar mass is evaluated by assuming the Keplerian rotation for simplicity.

【East Asian ALMA Science Workshop 2019, Taipei, Taiwan, Feb. 19-21, 2020】

[9] Y. Oya, “A 10 au Scale View of the Low-Mass Protostellar Source IRAS 16293-2422 Source A”

[10] Okoda, Y., Oya, Y., and Yamamoto, S., “Co-evolution of Disks and Stars in Embedded Stages”,

[11] Imai, M., Oya, Y., Watanabe, Y., Sakai, N., and Yamamoto, S., “Envelope Structure of Isolated Protostellar Source CB244”（ポスター）

[12] Fujita, T., Oya, Y., and Yamamoto, S., ”Outflow Structures in the Vicinity of the Class 0 Low-mass Protostar in L483” (poster)

招待講演

[13] Oya, Y., “Sub-mm Views of Disk-Forming Regions in Young Low-Mass Protostellar Sources”, East Asian ALMA Development Workshop 2019, Dec. 10-11, 2019, Tokyo, Japan

[14] Yamamoto, S., Oya, Y. and Sakai, N., “Chemical Evolution and Its Diversity in Disk Forming Regions”, WE-Heraeus-Seminar: Chemical Evolution of Cosmic Matter, Oct. 23-24, 2019, Bad Honnef, Germany.

[15] Yamamoto, S., “Why Chemistry in Astronomy”, ENS-UT Workshop on Physics, Nov. 25-26, 2019, Tokyo, Japan.

(国内会議)

一般講演

【天文学会 2019 年秋季年会、熊本大学、2019 年 9 月 11 日–13 日】

[16] 大屋瑶子、山本智、「低質量原始星 IRAS 16293-2422 の 10 au スケールでの円盤/エンベロープ構造」、P109a

[17] 大小田結貴、阿部正太郎、駒木彩乃、大屋瑶子、山本智 、「Principal Component Analysis を用いた低質量原始星 L483 の化学組成の解析」、P134b (ポスター+口頭)

[18] 今井宗明、大屋瑶子、Ana López-Seplucre、渡辺祥正、坂井南美、山本智、「B335 で原始星最近傍に存在する SiO 輝線」、P143a (ポスター)

[19] 藤田孝典、大屋瑶子、山本智、「Class 0 低質量原始星天体 L483 のアウトフローの根元の構造」、P108a

[20] 柴山良希、渡邉祥正、大屋瑶子、山本智、「NGC 2264 CMM3A の ALMA による 0.8 mm 帯化学サーベイの解析」、P122b(ポスター+口頭)

【天文学会 2020 年春季年会、オンライン公開、2020 年 3 月 16 日–19 日】

[21] 大屋瑶子、山本智、「Class 0 低質量原始星天体 IRAS 16293 – 2422 A の内部構造」、P108a

(セミナー)

[22] 大屋瑶子、“Physical and Chemical Structures of Low-Mass Protostars on the Disk-Forming Scale”, NAOJ Science Colloquium, July 19, Tokyo, Japan

## 6.3 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 6.3.1「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。

### 6.3.1 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など、全く新しい実験手法を提供できる。実際、配列した分子試料の有効性は、$I_2$ 分子中の多光子イオン化過程を、時間依存偏光パルスを用いて最適制御することに成功したり (T. Suzuki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 133005 (2004))、配列した分子中からの高次高調波発生実験において、電子のド・ブロイ波の打ち消しあいの干渉効果を観測することに成功したり (T. Kanai *et al.*, Nature (London) **435**, 470 (2005)) するなどの、本研究室の成果でも実証されている。

分子の配向制御については、始めに静電場とレーザー電場の併用により、1 次元的および 3 次元的な分子の配向が可能であることの原理実証実験に成功した。これらの実験は、分子の回転周期に比べてレーザー光のパルス幅が十分長い、いわゆる断熱領域で行われたものである。この場合、分子の配向度は、レー

ザー強度に追随して高くなり、レーザー強度が最大のときに配向度も最大となる。一方、光電子の観測や高精度の分光実験では、高強度レーザー電場が存在しない状況で試料分子の配向を実現することが望まれる。本研究室では、静電場とレーザー電場の併用による手法が断熱領域で有効なことに着目し、分子の回転周期 $T_{\rm rot}$ 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」研究のさらなる推進を目指している。

先ず、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 次元的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))。次いで、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 次元的な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 次元的な配向制御の 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。データ取得のための工夫をして解析をした結果、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。

### 2019 年度の進展

上述したレーザー電場の存在しない条件下での配向制御実験で、プラズマシャッターにより急峻に遮断された後の残留レーザー電場強度を実験と理論の併用により明らかにした。従来、プラズマシャッターを適用した際のナノ秒パルスの立下りと残留電場強度は、ナノ秒 Nd:YAG レーザーパルスとフェムト秒 Ti:sapphire レーザーパルスの和周波を BBO 結晶中で発生させる相互相関測定で評価していた。相互相関測定では、立下り 150–200 fs、残留電場強度 ∼5%

が得られていたが、相互相関測定と気体分子の配向制御実験では、主としてレーザーパルスの集光条件が異なることから、配向制御実験でのレーザー-分子相互作用領域での実際の残留電場強度は詳しく調べられていなかった。そこで、分子偏向器で回転量子状態を選別した OCS 分子を試料とし、プラズマシャッター適用後の配列度の時間発展を観測し、数値計算と比較することにより、残留電場強度を評価した。実験では、OCS 分子の回転周期にほぼ正確なポンプ光-プローブ光間の遅延時間までに配列度が綺麗に 3 回回復する現象が観測された。数値計算との比較の結果、残留電場強度はピーク強度の高々 0.4%程度以下であり、仮に完全にゼロではない残留電場があったとしても、実質的にレーザー電場を急峻に遮断した後の分子の配列・配向ダイナミクスへの影響は無視できることを明らかにした。

一方、残留電場強度の相互相関測定との相違について、その原因を探るべく、Huygens-Fresnel の回折積分を用いてレーザービームの伝搬特性を評価した。その結果、当初の予想通り、相互相関測定時には長焦点レンズを用いて loose focus し、かつ BBO 結晶の損傷を避けるため、焦点位置よりも手前に BBO 結晶を置いて和周波を発生させているのに対し、配向制御実験では、短焦点レンズを用いて tight focus し、かつ集光位置近傍で試料分子と相互作用していることが相違の原因であった。物理的には、相互相関測定では、プラズマ生成時の周縁部で僅かに透過する残留電場成分が和周波発生に一定の寄与をするのに対し、配向制御実験ではプラズマ生成時の周縁部に存在する自由電子の影響で、いわゆる focusability が悪く、tight focus ではレーザー-分子相互作用領域に殆ど集光されないため、実質的に無視できる状況が実現している。本研究成果は、Je Hoi Mun, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, Opt. Express **27**, 19130–19140 (2019) で発表した。従来の「レーザー電場の存在しない条件下で配向制御を実現した。」という酒井グループの主張を完全に正当化する結果であり、今後の実験結果に対する主張の根拠ともなる極めて重要な成果である。

### 6.3.2 全光学的配向制御法で配向度を向上させるための考察

これまでの研究で、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。この様な状況でも配向度を上げることができる手法について、2018 年度からの継続課題として考察を進めた。

#### 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ると、相互作用ポテンシャルが、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十分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、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 CASTECH (Center for Attosecond Science and Technology) 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た (Je Hoi Mun, Hirofumi Sakai, and Rosario González-Férez, Phys. Rev. A **99**, 053424 (2019))。

#### 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

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、上述の「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」を special case として含み、配向度の向上に有効な「一般化された組み合わせ」であることを明らかにした。第 2 高調波パルスを楕円偏光とすることにより、相互作用ポテンシャルが、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ことは、互いに直交した直線偏光の 2 波長パルスの組み合わせのときと同様である。互いに直交した直線偏光の 2 波長パルスの組み合わせと異なって、利用可能な第 2 高調波パルスの強度に応じて、配向度の向上を期待することができる点が大きな特長である。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 次元的配向制御に拡張できる。現在、論文を投稿中である (Md. Maruf Hossain and Hirofumi Sakai, "All-optical orientation of linear molecules with combined linearly- and elliptically-polarized two-color laser fields," to appear in J. Chem. Phys.)。

### 6.3.3 マクロな 3 回対称性をもつ分子アンサンブルの生成

#### 理論

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。この様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, Phys. Rev. A **99**, 043420 (2019))。

この研究を切っ掛けとして、「表現論」と「調和解析」を駆使し、alignment と orientation も包含する気体分子の回転量子状態の制御に関する数理体系を構築した。これは、従来個々の回転量子状態の制御が独立に議論されていたのに対し、包括的な理解を可能とするものであり、関連分野で重要な結果と位置付けられる。

さらに、時間依存 Schrödinger 方程式を数値的に解くコードを開発し、回転対称性をもつ分子アンサンブルの生成過程のダイナミクスをも明らかにした。注目すべき挙動として、分子の向きの揃い方の指標となる order parameter が、レーザーパルスのピークを過ぎてから最大になることを見出した。この興味深い現象の起源を探るため、個々の回転量子状態の population の時間発展を調べることにより、特定の回転量子状態の分布がレーザーパルスの通過後に増大することが主因であることを明らかにした。これは分子の超分極率とレーザー電場との相互作用で発現する典型的な量子力学的効果である。以上の一連の理論研究は、仲林宏斗君の修士論文（英文）としてまとめられた。

#### 実験

上述したマクロな 3 回対称性をもつ分子アンサンブルの生成を、実験でも初めて実現することを目指している。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。この様な実験装置の概念図を図 6.3.1 に示す。今年度、実験装置の立ち上げを行って、所期の性能が得られることを確認した。図 6.3.2 に開発した実験装置の写真を示す。次年度は、実際にマクロな 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。

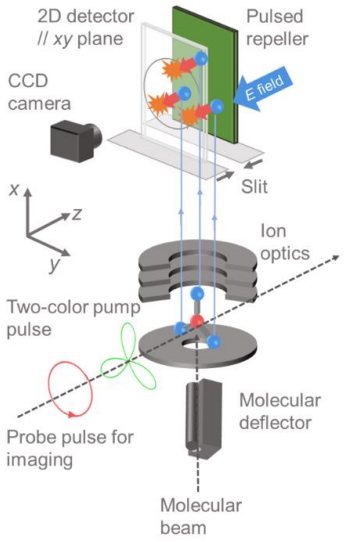



図 6.3.1: マクロな 3 回対称性をもつ分子アンサンブルの生成を観測するための実験装置の概念図。

### 6.3.4 PAL-XFEL 施設の軟 X 線自由電子レーザーを用いた光電子角度分布の計測

本研究室では、フェムト秒スケールで進行する超高速光化学反応ダイナミクスを探求するため、X 線自由電子レーザー (XFEL) を用いた超高速 X 線光電子回折法の開発を進めている。X 線光電子回折法は、X 線照射により生成された内殻光電子の角度分布を解析することによって分子の構造を決定する手法である。光学レーザーの照射後、一定の遅延時間をおいて X 線パルスを照射し、生成された光電子の角度分布 (光電子回折パターン) を測定する。遅延時間を変えながら回折パターンの変化を調べ、理論計算と比較することによって、光化学反応ダイナミクスにおける分子の構造変化を直接調べることができる。

これまでは、兵庫県播磨の SPring-8 内にある XFEL 施設 SACLA の超短パルス X 線、真空紫外パルスを用いて、超高速 X 線光電子回折の実証実験や超短パルス光学レーザーとの同期実験など、基礎技術の開発を行ってきた。まず、光子エネルギー 4.7 keV の XFEL を用いて、配列した $I_2$ 分子の I $2p$ 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、配列用のナノ秒 Nd:YAG レーザー電場中 ($6\times10^{11}$ W/cm$^2$) 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 (K. Nakajima *et al.*, Sci. Rep. **5**, 14065 (2015)、S. Minemoto *et al.*, Sci. Rep. **6**, 38654 (2016))。

さらに、極端紫外 (EUV) 領域の FEL パルスを用いて、フェムト秒 Ti:sapphire レーザーパルスとの同期

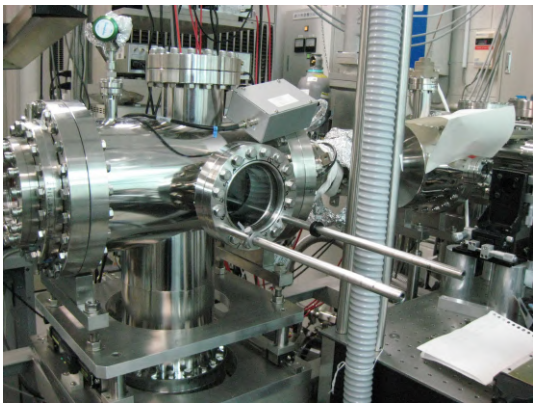


図 6.3.2: 2019 年度に開発した、マクロな 3 回対称性をもつ分子アンサンブルの生成を観測するための実験装置。

実験を行った。具体的には、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、~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))。また、Ti:sapphire 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 EUV-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。この実験では、光電子の角度分布と同時にフラグメントイオンの角度分布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た。光電子スペクトルと配列状態の対応付けをすることにより、光電子スペクトルの時間発展を追うことができた。その結果、FEL パルスの偏光方向に分子軸の向き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 (S. Minemoto *et al.*, J. Phys. Commun. **2**, 115015 (2018))。

一方、超高速X線光電子回折実験を行うには光子エネルギー 200–1000 eV 程度の軟X線領域のパルスが最適であるが、SACLA では軟 X 線 FEL パルスが提供されていない。そこで、2018 年から軟 X 線 FEL パルスを供給する施設として韓国・浦項にある PAL-XFEL に着目し、本年度から、PAL-XFEL の軟X線 FEL パルスを用いて超高速 X 線光電子回折実験を行うための準備を開始した。SACLA でこれまで開発を行ってきた X 線光電子回折装置を PAL-XFEL のビームラインに接続できるように一部を改造して実際に設置した。2019 年 6 月のビームタイムでは、光子エネルギー 750 eV および 800 eV の軟X線 FEL パルスを用いて Xe 原子から生成される Xe 3d 光電子の角度分布を測定し、スピン-軌道相互作用による分裂 (~11 eV) を観測できるほど十分高いエネルギー分解能を有していることを確認した。ただし、現状では軟 X 線 FEL パルスの集光径が大きいため (直径 50–80 $\mu$m 程度)、分子試料の配列用 YAG レーザーパルスとの良好な空間的重なりを確保するに至っていない。例えばヨードベンゼン分子に対しては、配列度が $\langle\cos^2\theta\rangle$=0.59 に留まっており、明瞭な光電子回折像を得るためには不十分である。2020 年度以降、ビームラインスタッフと協力して FEL パルスの集光径を小さくするとともに、光学レーザーと軟X線パルスを同期させて光電子角 度分布の測定を行い、光化学反応ダイナミクスの追跡を本格的に開始する予定である。

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、寺本高啓博士 (大阪大学)、間嶋拓也准教授 (京都大学)、水野智也博士 (東京大学物性研究所)、Dr. Je Hoi Mun、Dr. Kyung Seung Kim(韓国、Institute for Basic Science) との共同研究である。

### 6.3.5 その他

本年度は、修士 1 名 (仲林宏斗君) を輩出した。また、学部 4 年生の特別実験では、伊名波翔君、塚本萌太君 (S セメスター)、岡本直大君、野下剛君 (A セメスター) を受け入れた。4 年生と協力し、主として研究項目 6.3.3 で説明したマクロな回転対称性をもつ分子アンサンブルの観測装置の立ち上げを行った。なお、研究項目 6.3.3 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る。

＜受賞＞

[1] 酒井広文、第 23 回 (令和元年度) 松尾財団宅間宏記念学術賞、2019 年 10 月 25 日.

[2] 酒井広文、2020 年日本分光学会学会賞、2020 年 10 月 27 日.

＜報文＞

(原著論文)

[3] Hiroto Nakabayashi, Wataru Komatsubara, and Hirofumi Sakai, “Recipe for preparing a molecular ensemble with macroscopic threefold symmetry,” Phys. Rev. A **99**, 043420 (2019) (5 pages).

[4] Je Hoi Mun, Hirofumi Sakai, and Rosario González-Férez, “Orientation of linear molecules in two-color laser fields with perpendicularly crossed polarizations,” Phys. Rev. A **99**, 053424 (2019) (10 pages).

[5] Je Hoi Mun, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Development of a plasma shutter applicable to 100-mJ-class, 10-ns laser pulses and the characterization of its performance,” Opt. Express **27**, 19130–19140 (2019) (11 pages).

[6] Md. Maruf Hossain and Hirofumi Sakai, “All-optical orientation of linear molecules with combined linearly- and elliptically-polarized two-color laser fields,” to appear in J. Chem. Phys.

(学位論文)

[7] Hiroto Nakabayashi, “Theoretical studies on molecular ensembles with macroscopic $n$-fold symmetry,” Master’s thesis, March 2020.

＜学術講演＞

(国内会議)

招待講演

[8] 峰本紳一郎、「EUV-FEL による原子・分子の時間分解光電子分光への取り組み」、日本物理学会、2019 年秋季大会、領域 1、領域 2、領域 5 合同一般シンポジウム、主題：レーザー光源の進化と原子分子物理学の深化、岐阜大学柳戸キャンパス (岐阜県岐阜市)、2019 年 9 月 12 日.

[9] 酒井広文、「高強度レーザー電場を用いた気体分子の配列・配向制御とその応用」、2020 年度日本分光学会学会賞記念講演、2020 年度日本分光学会年次講演会、早稲田大学西早稲田キャンパス (東京都新宿区)、2020 年 10 月 27 日.

## 6.4 五神-湯本 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ガス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 プリンタ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。

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などを進めている。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。

### 6.4.1 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、ボース統計に従う準粒子として低温高密度領域において BEC 相を形成することが期待されてきた。励起子が格子と熱平衡になり十分に低温状態となるためには、寿命が非常に長いことが要求されるため、我々はスピン禁制励起子である亜酸化銅 ($Cu_2O$) における 1s パラ励起子に着目してきた。しかし寿命が長いことの代償として、従来の実験手法である発光スペクトル観測による励起子の温度や密度の評価が難しい。そこで我々は、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 ($10^{17}$ cm$^{-3}$) に到達するのは困難であることが判明した。従って BEC を実現するためには励起子間の散乱頻度を下げるべく、より低密度な領域で BEC の条件を実現する必要がある。そこで我々はヘリウム 3 冷凍機を使用し、励起子をサブケルビンの温度領域まで冷却することで、$10^{16}$ cm$^{-3}$ 程度の転移密度を実現し、BEC 転移の観測を試みた。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発見した。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発見され、発光の過程における運動量保存則により凝縮体からの発光は禁制となることとの関係を慎重に調べている。

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。本手法を用いることで、各励起パワーにおける励起子の密度を正確に評価できる。上に述べた励起子発光強度の特徴的な励起パワー依存性と、励起子密度の励起パワー依存性の比較を進めることで、励起子密度と励起子発光強度の関係を調べている。[20]

現在誘導吸収測定法を用いて、空間分布の励起パワー依存性から BEC 転移特有の局所的な高密度分布を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。本年度はトラップ中の励起子の空間ダイナミクスに対して、拡散係数と移動度をフィッティングパラメータとした拡散方程式に基づくシミュレーションを行った。実験結果にフィッティングすることで、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、極低温領域に達したことにより励起子の移動度が従来他の研究で到達しなかった最大の値を有することがわかった。(図 6.4.1) さらにシミュレーションを含めた解析により、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。また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。[3, 18]

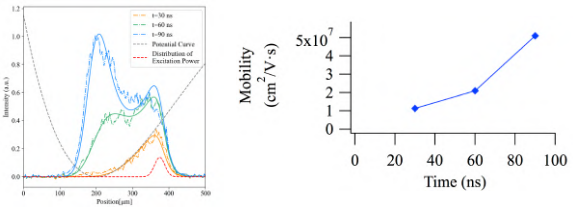



図 6.4.1: (左図)
実験的に得られたトラップへ蓄積中の励起子の発光空間分布の変化 (30 ns- 90 ns) と拡散方程式に基づくシミュレーションの結果 (右図) フィッティングによって抽出された励起子の移動度の時間発展 (30 ns-90 ns)

### 6.4.2 非自明な光学現象の探索とその応用

#### 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 $\mu$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。これまでのレーザー加工によるモスアイ構造作製の研究では、高周波数領域において透過率が減少してしまい、本来のモスアイ構造にあるべき広帯域な無反射特性が実現できていないことという課題があった。我々は、フェムト秒レーザー加工に用いるレーザー光のパルスエネルギーを精密に制御し、なおかつ加工後の洗浄プロセスを改良することによって、1 THz 以上の高周波数領域で透過率の減少が生じない、理想的な透過特性を有するシリコンモスアイ構造を作製することに成功した (図 6.4.2(a))。測定したテラヘルツ波の透過強度を図 6.4.2(b) に示す。モスアイ透過後も、テラヘルツ波強度の減少がほぼ生じておらず、完全無反射特性が実現できていることがわかる。

さらに今年度は、加工に用いるフェムト秒光源を高パワー化し、最大平均パワー 40 W の光源を導入した。この結果、高さ 2 mm を超えるサファイアモ

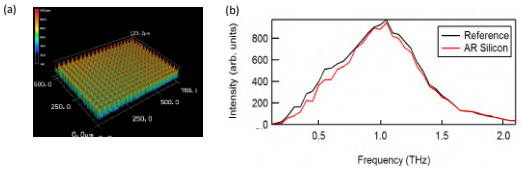



図 6.4.2: (a) 作製したサファイアモスアイ構造のレーザー顕微鏡像 (b) モスアイ構造のテラヘルツ透過強度スペクトル

スアイ構造を、Φ 70 mm の大きさで、約 13.5 時間で作製することに成功した。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。本研究は東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構との共同研究であり、LiteBIRD 計画における CMB 偏光観測小型科学衛星への搭載を目標として研究を進めている。[51, 52]

### 6.4.3 誘電体ナノメンブレンを用いた真空紫外第三次高調波発生

波長 100~200 nm の真空紫外領域における波長可変フェムト秒レーザー光源は、原子・分子の励起状態の観測や、化学反応制御などに用いられてきた。近年では、物資中の電子の励起状態のダイナミクスを直接観測可能な時間分解光電子分光法や、生体分子円二色性計測のプローブ光源としての応用も重要となっている。近年のレーザー技術の進歩により、市販の再生増幅器と光パラメトリック増幅器を用いることによって、紫外から可視光の領域における超短パルス光を高安定かつ簡便に発生させることが可能となった。これらの光源を基本波として用いて、固体の非線形媒質からの真空紫外領域における第二あるいは第三次高調波発生ができれば、テーブルトップで簡便な真空紫外分光用光源としての活用が期待できる。しかしながら、波長変換に広く用いられているバルク非線形光学結晶は、真空紫外領域では吸収が大きいため、この領域への波長変換に用いることはできない。真空紫外への波長変換が可能なバルク結晶としては KBe2BO3F2 結晶が知られているが、高度な結晶成長技術が必要で入手が困難という問題がある。

本研究では、真空紫外コヒーレント光の簡便かつ実用的な発生手法として、厚さ数 100 nm 程度の誘電体自立薄膜 (ナノメンブレン) からの第三次高調波発生が有用であることを明らかにした [42, 10]。厚さ 300 nm の SiO2 ナノメンブレンに対して、波長 470 nm、パルス幅 100 fs、繰り返し周波数 1 kHz のレーザーパルスを、ビーム径約 50 $\mu$m で集光すると、真空紫外領域における波長 157 nm (7.9 eV) の第三次高調波が明瞭に観測された (図 6.4.3)。発生した 1 パルスあたりの最大フォトン数は約 $10^7$ 個と見積もられ、真空紫外分光用プローブ光源としての応用が可能である。これは、誘電体の高いレーザー破壊閾値のために高いパルスエネルギーの基本波を用いることが可能であり、なおかつ薄膜であるため基本波の自己位相変調によるスペクトル広がりの影響が抑制できることによるものである。

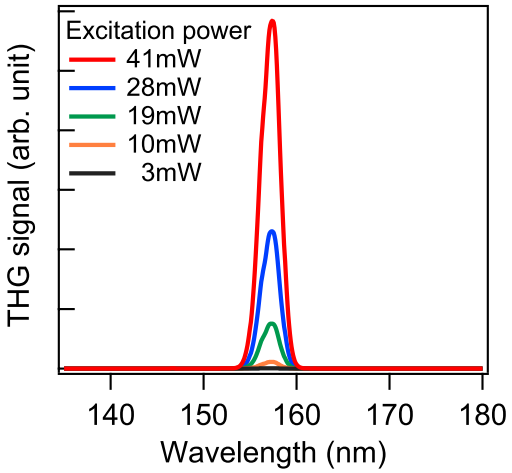



図 6.4.3: 誘電体ナノメンブレンからの第三次高調波スペクトル

### 6.4.4 正方格子誘電体フォトニック結晶ナノメンブレンを用いた真空紫外領域におけるコヒーレント円偏光発生

波長 100~200 nm の真空紫外領域における円偏光フェムト秒レーザー光源は近年、物資中の電子の励起状態のダイナミクスを直接観測可能な時間分解光電子分光法や、生体分子の円二色性分光のプローブ光源など、物性科学や生命科学の分野での重要な応用が広がりつつある。しかしながら、真空紫外より短波長の領域では多くの物質が不透明となるため、この波長領域の偏光制御素子は限られており、簡便に円偏光を発生することは難しい。ここで、基本波の波長より小さな単位構造を有する人工ナノ構造であるメタマテリアルは、その形状の回転対称性を適切に設計することによって、非線形光学過程における円偏光選択則を制御することが可能である。我々は、三回回転対称性を有する金属ナノ周期構造に円偏光を照射することで、逆回りの円偏光の第二次高調波が発生することを、可視光領域で見出している。しかしながら、この手法を真空紫外領域への円偏光波長変換のための手法として用いるには、金属ナノ構造はレーザー破壊閾値が低いため、分光用途に必要な強度での真空紫外光発生が困難であるという問題があった。

本研究では、高いレーザー破壊閾値を有しつつ真空紫外領域への第三次高調波発生が可能な非線形媒質と

して、厚さが基本波の波長以下である誘電体自立薄膜 (ナノメンブレン) に着目し、そこから直接円偏光真空紫外光を発生させる手法を開発した [43, 45, 10]。厚さ 48 nm のγ-Al2O3 薄膜を用いて、フォトニック結晶ナノメンブレン (周期 600 nm、穴径 190 nm) を作製し、フォトニック結晶構造の共鳴波長である 470 nm の円偏光フェムト秒レーザー (パルス幅 100 fs、繰り返し周波数 1 kHz) を入射したところ、基本波と逆回りの円偏光成分が支配的な、波長 157 nm の第三次高調波を観測することに成功した。構造のないナノメンブレンでは円偏光の第三次高調波発生は禁制であるが、四回回転対称性を有する正方格子状に周期的に円孔を作製することによって、それが許容になることが示された。本手法で発生可能な最大のフォトン数は 1 パルス当たり約 $10^5$ 個と見積もられ、真空紫外円二色性分光のプローブ光としての応用が可能である。本手法は、テーブルトップで簡便に真空紫外コヒーレント円偏光を発生するための基盤技術となり得るものであると考えられる。

### 6.4.5 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

近年、極端紫外 (EUV) リソグラフィーをはじめとした EUV 領域における光技術の重要性が増している。その応用を進めるためには多層膜ミラーや光マスクなどの光学素子の高度化が必要である。これらの光学素子は高精度な光位相の制御を必要とするため、様々な材料の光学定数の情報が必要である。だが EUV 領域の光学定数は十分には知られておらず、高度化のためにはそのデーターベース化が不可欠である。

これまで EUV 領域の屈折率測定では放射光施設を利用した測定が行われてきた。一方、EUV 光を発生させる手法として高次高調波発生を用いた研究が昨今進められている。屈折率測定を直接測定する手法としてヤングのダブルスリット干渉を用いた手法が提案されているが、レーザーベースの高次高調波は卓上装置に組み込むことができ、高いコヒーレンスを持つことからダブルスリット干渉を用いた屈折率測定に最適な光源である。そこで我々は、高精度なダブルスリット干渉屈折率測定を目指した。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光パラメトリック変換し、増幅した波長可変のパルス光源を高次高調波発生の基本波とした。この基本波を希ガス (ネオンガス) に絞り込むことで発生した高次高調波を用いることで EUV 領域の任意の波長で測定できる干渉計とした。

我々はテストサンプルとしてアルミニウムの屈折率測定を行った。ダブルスリット法の分光干渉像については、干渉像の位相と明暗度からフィッティングを行い、複素屈折率を定量的に評価できる。本年度はこの測定結果から位相を抽出する過程において、高調波の波面情報とグレーティングの収差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。その結果光位相の決定精度を約 10 mrad まで向上させ、従来の EUV 領域の屈折率測定と比較しても高い精度を実現した。

また、EUV 領域の光は固体中の内殻準位から価電子帯ないし伝導帯への遷移に共鳴する波長となっている。近赤外光などで固体電子系を励起した場合、価電子帯や伝導帯の電子状態が変化する一方、内殻準位は変調をほぼ受けない。そのためこの内殻遷移に共鳴する probe 分光を用いれば、価電子帯や伝導帯の状態変化を直接的に捉えることが可能である。さらに、高次高調波発生技術の進展によりアト秒の極短パルス EUV 光が利用できるようになり、固体電子系の極めて速いダイナミクスを追跡できる手法として近年研究されている。我々は上記に挙げた高次高調波を光源としたダブルスリット干渉測定を pump-probe 内殻分光として用いるための実験系を立ち上げている。本年度は本研究室で従来行われてきた pump 光と probe 光の切り分けの方法を変更し、かつ光源の空間的な揺れを制御することで、10 倍高い精度で pump 光に伴う複素屈折率変調を捉えられるようにした。[9]

#### レーザー励起角度分解光電子分光の開発

本研究室では、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光物性物理学の観点で発展させることを試みている。従来の光物性物理学では発光測定や吸収分光などを用いて光励起に伴う電子や正孔の状態変化を捉えてきた。これらの手法では結合状態密度を反映した結果が得られる。一方、光電子分光においては純粋な電子の状態密度を取得できるという点で電子系の状態を捉える手法として強力である。また電子系の波数に関する情報も取得できるという点で、光励起を受けた電子系がバンド内でどのように変化するかという教科書的な問いについてエネルギースペクトルに着目した光学測定にはない、新たな視点で知見を与える可能性がある。

我々は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。そのため我々は従来の半球型ではなく TOF 形式の角度分解光電子分光装置を採用した。Time of Flight (TOF) 型の光電子分光装置は半球型と比較して放出された電子の取り込みの立体角が 2 桁程度大きく、収率が高い。この点は非占有バンドのバンド構造や、基底状態ではなく光励起された電子系の振る舞いを調べる上でとても有利な点であり、本研究の大きな特色になっている。我々はこの TOF 型の角度分解光電子分光を用いた測定において、エネルギー分解能 1.8 meV、 角度分解能 0.33° という高分解能を達成した。これは類似の TOF 型装置と比べても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 [15, 28]。また、より高強度の光励起を受けた固体電子系の光電子分光測定を行う実験も進めた。具体的にはチタンサファイア再生増幅器から出射された高パルスエネルギー光を基本波とする光源を用いた実験を進めた。この結果、これまで我々が用いてきたモード同期レーザーを基本波とする実験系に比べて数十倍高いパルスエネルギーによる励起を可能とした。

### 6.4.6 フォトンサイエンス研究機構

最先端光科学を通して既存の学術分野を横断する融合科学を創ることを目的とし、2013 年 10 月より理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構が発足した。学内の最先端研究を連携させながら国内外の諸機関とも連携し、フォトンサイエンスの世界拠点を東京大学に形成することを目指すと同時に、産業界との連携も進め、基礎研究の成果を活用した技術を社会に波及浸透させ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、「コヒーレントフォトン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。この事業は令和 3 年度までの 9 年プロジェクトで、「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、「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」(平成 28 年度から令和 2 年度) 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」の活動が開始され、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] Haruyuki Sakurai, Chao He, Kuniaki Konishi, Hiroharu Tamaru, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami, and Arnold Gillner: Effect of damage incubation in the laser grooving of sapphire, J. Appl. Phys. **125**, 173109 (2019).

[2] Petr A. Obraztsov, Pavel A. Chizhov, Tommi Kaplas, Vladimir V. Bukin, Martti Silvennoinen, Cho-Fan Hsieh, Kuniaki Konishi, Natsuki Nemoto, and Makoto Kuwata-Gonokami: Coherent Detection of Terahertz Radiation with Graphene, ACS photon. **6**, 1780 (2019).

[3] Yusuke Morita, Hirosuke Suzuki, Kosuke Yoshioka, and Makoto Kuwata-Gonokami: Observation of ultrahigh mobility excitons in a strain field by space- and time-resolved spectroscopy at subkelvin temperatures Phys. Rev. B **100**, 035206 (2019).

[4] Haruyuki Sakurai, Natsuki Nemoto, Kuniaki Konishi, Ryota Takaku, Yuki Sakurai, Nobuhiko Katayama, Tomotake Matsumura, Junji Yumoto, and Makoto Kuwata-Gonokami: Terahertz broadband anti-reflection moth-eye structures fabricated by femtosecond laser processing, OSA Continuum **2** (9), 2764 (2019).

[5] K. Yoshioka, J. Omachi, M. Sakano, T. Shimojima, K. Ishizaka, and M. Kuwata-Gonokami: Gigahertz-repetition-rate, narrowband-deep-ultraviolet light source for minimization of acquisition time in high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy, Rev. Sci. Instrum. **90**, 123109 (2019).

(国内雑誌)

[6] 小西邦昭, 櫻井治之, 湯本潤司、五神真: 3 次元造形技術のテラヘルツ光学素子作製への展開, レーザー研究, 第 47 巻 7 号, pp356-360 (2019 年 7 月号)

(博士論文)

[7] 鈴木 博祐:
連続的内部構造変調による機能構造体の光造形 (2020 年 3 月, 東京大学理学系研究科)

(修士論文)

[8] 山田 涼平:
フェムト秒レーザーアブレーションにおける発光ダイナミクスの研究 (2020 年 3 月, 東京大学理学系研究科)

[9] 影山 豪大:
コヒーレント EUV 光源を用いたポンプープローブ屈折率測定手法の開発 (2020 年 3 月, 東京大学理学系研究科)

＜特許＞

[10] 小西 邦昭, 湯本 潤司, 五神 真, 石田 誠, 赤井 大輔: 真空紫外光の発生方法及びそれに用いる装置, 特願 2019-150800 (2019 年 8 月 21 日)

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[11] Haruyuki Sakurai: Fabrication of THz anti-reflection moth-eye structures by laser processing, 4th EMN Meeting on Terahertz, Presentation A12, Prague, Czech Republic (2019/06/11).

[12] Kuniaki Konishi: Tunable and nonlinear metamaterials for circular polarization control, META 2019, the 10th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Instituto Superior T′eecnico, Lisbon, Portugal (2019/7/23).

一般講演

[13] Takahiro Tsumori, Munekazu HorikoshiKeisuke Fujii, Yusuke NishidaJunji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami: Measurement of bulk viscosity of ultracold Fermi gas in the unitary regime, 50th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics APS Meeting, Milwaukee, Wisconsin (2019/05/29)

[14] Yiping Chen, Munekazu Horikoshi, Kosuke Yoshioka, Makoto Kuwata-Gonokami : Spontaneously Created Attractive Bose-Einstein Condensates and Their Critical Behaviors, 50th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics APS Meeting, Milwaukee, Wisconsin (2019/05/30)

[15] S Zhdanovich, M. Michiardi, A.L.R. Choa, K. Yoshioka, S.K. Kushwaha, Y. Arashida, D. Hirano, F. Boschini, G. Levy, Y. Morita I. Elfimov, R.J. Cava, M. Kuwata-Gonokami, A. Damascelli: Revealing unoccupied band structure of Sn-$Bi_{1.1}Sb_{0.9}Te_2S$ with two photon ARPES and DFT The International Conference on Ultrafast and Nonlinear Dynamics of Quantum Materials, the University of Paris-Diderot, Paris, (2019/6/5)[poster]

[16] H.Tamaru, A. Kosuge, T. Hira, M. Moriyama, S. Tani, I. Ito, Z. Zhao, Y. Kobayashi, N. Mio, M. Kuwata-Gonokami and J. Yumoto: High Speed Laser Piercing of CFRP using 1W nanosecond UV laser pulses, Lasers in Manufacturing Conference 2019 (LiM 2019), Munich, Germany, (2019/06/25)

[17] R. Takaku, T. Matsumura, H. Sakurai, K. Konishi, H. Imada, S. Hanany, K. Young, Q. Wen, Y. Sakurai, N. Katayama, K. Mitsuda, N. Yamasaki, K. Komatsu, H. Ishino, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami: Broadband anti-reflection coating for LiteBIRD LFT HWP: Sub-wavelength structures fabrication progress and prospects LiteBIRD kick-off symposium, LiteBIRD global F2F meeting, AXA/ISAS (2019/7/1-2, 3-5) [poster]

[18] Yusuke Morita,: Study on spatio-temporal dynamics of trapped paraexcitons in $Cu_2O$ at sub-Kelvin temperatures Thursday, Fundamental Optical Processes in Semiconductors (FOPS) (2019/08/07)[poster]

[19] M. Moriyama, A. Mizutani, S. Tani, R. Nakamura, A. Kosuge, I. Ito, Z. Zhao, T. Hira, Y. Kobayashi, H. Tamaru, N. Mio, M. Kuwata-Gonokami and J. Yumoto: THERMAL DAMAGE EVALUATION OF CFRP PROCESSED WITH NANOSECOND UV LASER PULSES 22nd International Conference on Composite Materials (ICCM22), 4103-4, Melbourne, Australia, (2019)

[20] Yusuke Morita and Makoto Kuwata-Gonokami: Lyman induced absorption spectroscopy of quantum degenerated excitons in $Cu_2O$, Workshop "Quantum Materials from Frequency to Time Domain", University of British Columbia (UBC), Vancouver Campus, USA (2019/08/17)[oral]

[21] M. Moriyama, S. Tani, A. Kosuge, I. Ito, Z. Zhao, T. Hira, Y. Kobayashi, H. Tamaru, N. Mio, M. Kuwata-Gonokami and J. Yumoto IMPROVEMENT OF TRANSVERSE CRACK BEHAVIOR OF CROSS-PLY CFRP PROCESSED WITH NANOSECOND UV LASER PULSES 16th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE-16), 1C-06, Tokyo, Japan, (2019/09/02)

[22] Haruyuki Sakurai, Natsuki Nemoto, Kuniaki Konishi, Yuki Sakurai, Nobuhiko Katayama, Tomotake Matsumura, Junji Yumoto, and Makoto Kuwata-Gonokami: Femtosecond Laser Processing And Evaluation Of Broadband THz Anti-Reflection Structures, IRMMW-THz 2019, Tu-PM2-6-4, Paris, France (2019/9/3) [oral].

[23] X. Ropagnol, M. Matoba, J. E. Nkeck, F. Blanchard, E. Isgandarov, J. Yumoto and T. Ozaki: Efficient Terahertz Generation And Detection Using CdTe Crystal Pumped By Ultrafast Ytterbium Laser, IRMMW-THz 2019, We-PM1-3-3, Paris, France (2019/9/4) [oral]

[24] M. Moriyama, S. Tani, A. Kosuge, I. Ito, Z. Zhao, T. Hira, Y. Kobayashi, H. Tamaru, N. Mio, M. Kuwata-Gonokami and J. Yumoto: SUPERIOR CRACK BEHAVIOR OF CFRP PROCESSED WITH NANOSECOND UV LASER PULSES International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO),Macro 501, Orlando, FL, US, (2019/10/7-10)

[25] R. Takaku, T. Matsumura, H. Sakurai, K. Konishi, H. Imada, S. Hanany, K. Young, Q. Wen, Y. Sakurai, N. Katayama, K. Mitsuda, N. Yamasaki, K. Komatsu, H. Ishino, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami: Demonstration of broadband anti-reflection coating on sapphire based on mm-wave sub-wavelength structures, IRMMW-THz, Paris (2019/9/5) [poster]

[26] N. Tsuji, L. Liu, W. Ootani, K. Yoshioka, Y. Morita, M. Kuwata-Gonokami: Study on Saturation of SiPM for scintillator calorimeter using UV laser, Calorimetry for the High Energy Frontier 2019, Fukuoka, Japan (2019/11/26)[oral]

[27] Junji Yumoto: Laser ablation and laser material processing of non-metallic materials, Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials, University of British Columbia (UBC), Vancouver Campus, USA (2019/12/10) [oral]

[28] Y. Morita, J. Yumoto and M. Kuwata-Gonokami: Development of ARTOF system for measurements of excited states in solids, Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials, University of British Columbia (UBC), Vancouver Campus, USA (2019/12/10) [poster]

[29] R. Takaku, T. Matsumura, H. Sakurai, K. Konishi, H. Imada, S. Hanany, K.Young, Q. Wen, Y. Sakurai, N. Katayama, K. Mitsuda, N. Yamasaki, K. Komatsu, H. Ishino, Y. Kobayashi, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami: The development of SWS as a broadband AR in a large area using laser ablation for LFT HWP LiteBIRD global F2F meeting,B-mode from space, Munich (2019/12/11-13, 16-19) [poster]

[30] Takuya Kosuge, Tetsuo Kan, Kuniaki Konishi, Mizuho Matoba, Natsuki Kanda, and Makoto Kuwata-Gonokami: MECHANICAL LARGE DEFORMATION 3D CHIRAL THZ METAMATERIAL, 33rd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2020), T-264, Vancouver, Canada (2020/01/21)

(国内会議)

一般講演

[31] 堀越 宗一, 小林 淳, 五神 真: フェッシュバッハ共鳴を用いた磁場中励起分子状態の精密分光, 日本物理学会秋季大会, 岐阜大 (2019/09/11)

[32] 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, 日本物理学会秋季大会, 岐阜大 (2019/09/12)

[33] 劉 霊輝, 辻 直希, 大谷 航, 吉岡 孝高, 五神 真, 森田 悠介: UV パルスレーザーによる半導体光センサ SiPM のシンチレーション光に対する飽和現象の測定, 日本物理学会秋季大会, 山形大学 (2019/09/17)

[34] 辻 直希, 大谷 航, 劉 霊輝, 吉岡 孝高, 森田 悠介, 五神真: ILC 電磁カロリメータにおける MPPC の飽和現象の研究, 日本物理学会秋季大会, 山形大学 (2019/09/17)

[35] 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, 和田 健, 甲斐 健師: 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, 日本物理学会秋季大会, 山形大学 (2019/09/17)

[36] 周 健治, 山田 恭平, 橋立 佳央理, 石田 明, 難波 俊雄 A, 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: 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, 山形大学 (2019/09/17)

[37] 上岡 修星, 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, 日本物理学会秋季大会, 山形大学 (2019/09/18)

[38] 櫻井 治之, 小西 邦昭, 田丸 博晴, 湯本 潤司, 五神 真: 加工モルフォロジーとローカルフルーエンス分布の直接比較による解析手法の開発, 応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学 (2019/09/18)

[39] 棚橋 晃宏, アマニ レ, 神田 夏輝, 鍋川 康夫, 五神 真, 緑川 克美: 共振器内高次高調波発生用高繰返し Yb:YAG 薄ディスクレーザーの 969nm 励起による高出力化, 応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学 (2019/09/19)

[40] 小林 真隆, 浅川 寛太, 嵐田 雄介, 小西 邦昭, 湯本 潤司, 五神 真, 武田 淳, 片山 郁文: 高繰り返しシングルショット分光を用いた $Ge_2Sb_2Te_5$ 薄膜の LIPPS 形成に伴う超高速ダイナミクスの観測, 応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学 (2019/09/19)

[41] 森山 匡洋, 谷 峻太郎, 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: ナノ秒 UV パルスレーザー加工における CFRP 切断面周辺の温度変化, 応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学 (2019/09/19)

[42] 小西 邦昭, 赤井 大輔, 三田 吉郎, 石田 誠, 湯本 潤司, 五神 真: 誘電体ナノメンブレンを用いた真空紫外第三次高調波発生, 応用物理学会春季学術講演会, 上智大学 (2020/03/12) 中止

[43] 小西 邦昭, 赤井 大輔, 三田 吉郎, 石田 誠, 湯本 潤司, 五神 真: 正方格子誘電体フォトニック結晶ナノメンブレンを用いた真空紫外領域におけるコヒーレント円偏光発生, 応用物理学会春季学術講演会, 上智大学 (2020/03/13) 中止

[44] 小林 真隆, 浅川 寛太, 嵐田 雄介, 小西 邦昭, 湯本 潤司, 五神 真, 武田 淳, 片山 郁文: 高繰り返しシングルショット分光による Ge2Sb2Te5 薄膜の LIPSS 形成に伴う超高速ダイナミクス, 応用物理学会春季学術講演会, 上智大学 (2020/03/13) 中止

[45] 小西 邦昭, 赤井 大輔, 三田 吉郎, 石田 誠, 湯本 潤司, 五神 真: 四回回転対称誘電体フォトニック結晶からの真空紫外円偏光第三次高調波発生, 日本物理学会第 75 回年次大会, 名古屋大学 (2020/03/16) 中止

[46] 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, 甲斐 健師: 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 $I$, 日本物理学会第 75 回年次大会, 名古屋大学 (2020/03/16) 中止

[47] 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 B, 蔡 恩美 B, 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, 甲斐 健師: 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 $II$, 日本物理学会第 75 回年次大会, 名古屋大学 (2020/03/16) 中止

[48] 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, 甲斐 健師: 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 $III$, 日本物理学会第 75 回年次大会, 名古屋大学 (2020/03/16) 中止

[49] 川崎 彬斗, 山田 恭平, 田島 陽平, 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用 243nm 長持続広帯域パルス光源の開発, 日本物理学会第 75 回年次大会, 名古屋大学 (2020/03/17) 中止

[50] YIPING CHEN, 堀越 宗一, 吉岡 孝高, 五神 真: Approaching towards a textbook ideal Bose gas near condensate temperature in an harmonic trap, 日本物理学会第 75 回年次大会, 名古屋大学 (2020/03/17) 中止

[51] 高久 諒太, 松村 知岳, 櫻井 治之, 小西 邦昭, 今田 大皓, Shaul Hanany, Karl Young, Qi Wen, 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 CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD のためのサフィア広帯域反射防止構造の大面積加工とその光学評価, 日本物理学会第 75 回年次大会, 名古屋大学 (2020/03/17) 中止

[52] 小松 国幹, 石野 宏和, 片坐 宏一, 小西 邦昭, 五神 真, 片山 伸彦, 松村 知岳, 櫻井 治之, 桜井 雄基, 高久 諒太, 湯本 潤司: LiteBIRD 低周波望遠鏡用の広帯域多層半波長板の小型版での低温ミリ波偏光性能評価, 日本物理学会第 75 回年次大会, 名古屋大学 (2020/03/17) 中止

[53] 上岡 修星, 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 75 回年次大会, 名古屋大学 (2020/03/19) 中止

## 6.5 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，それによる宇宙の観測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」が幕をあけた．国内でも 2010 年にスタートした大型低温重力波検出器 KAGRA の観測が開始されつつある．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．

### 6.5.1 大型重力波望遠鏡 KAGRA

2015 年にアメリカの 2 台の重力波望遠鏡 Advanced LIGO により連星ブラックホール合体からの重力波が初観測された．2017 年にはイタリアの Advanced Virgo を加えた 3 台での観測運転により，連星中性子星合体からの重力波が初観測され，複数台の望遠鏡での同時観測が可能にする到来方向の精密な決定と，電磁波やニュートリノなどと組み合わせたマルチメッセンジャー観測が実現された．2019 年 4 月から開始された観測運転 (O3) では，ほぼ 1 週間に 1 個のペースで重力波イベントが見つかっている．

こうした観測ネットワークの拡大による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) の建設が岐阜県神岡で進められている．KAGRA により，到来方向決定精度の向上，偏極モードの分離を利用した重力理論の検証などが期待できる．KAGRA は地下建設と鏡の低温化という次世代重力波望遠鏡に必須と考えられている技術を取り入れたレーザー干渉計であり，技術的にも先進的な望遠鏡ともなっている．

#### KAGRA の現状

KAGRA 計画は 2010 年にスタートした．2019 年 4 月には初期観測運転に必要な機器のインストールが完了し，8 月には 3 km に及ぶ 2 本の光共振器を用いたファブリ・ペロー・マイケルソン干渉計 (FPMI) の動作に成功している．2020 年 2 月にはパワーリサイクリングの導入にも成功し，PRFPMI と呼ばれる構成が完成した．10 月には LIGO，Virgo，KAGRA の間で共同観測協定の調印が行われ，O3 観測で三者のデータを共同で解析するための条件などが決められた．

一方で，低温化した際にサファイア鏡に氷結が起こってしまう問題やサファイア鏡の非一様性と複屈折の影響が想定よりも大きいという問題も判明した．8 月の FPMI の初動作から 2020 年 3 月の時点まで，干渉計の調整により 3 桁以上の感度改善を行い，現時点で連星中性子星に対する観測可能距離は最大で 1 Mpc 程度となっており，2020 年 2 月より観測運転を開始した．今後もさらなる微調整で感度向上を目指すとともに，2021 年頃に開始する O4 観測に向け，サファイア鏡の改良や複屈折の影響を減らす光学素子の導入などを進める．

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，観測ロードマップの作成などを行っている．本年度は特に，干渉計の動作点引き込みに必要となる補助制御システムを完成させ [3]，FPMI の初動作を実現させた．また，干渉計の感度を制限する雑音の同定を進め，感度向上に貢献するとともに，上記の氷結と非一様性が干渉計に与える影響を評価した [13]．装置開発としては他に，光学定盤のカバーの設計と導入，変調光学系の評価 [12] を行った．現状のサファイア鏡を用いた場合の感度計算を進め，O3 観測やその後の観測をどう行っていくかの観測計画の立案を行った．

#### 観測運転へ向けた干渉計動作

この 1 年の KAGRA の開発の最重要課題は，全てのサブシステムを統合して主干渉計を動作させ，重力波が観測可能な状態を達成することであった．主干渉計の動作点への引き込みでは一般に，グリーンロックと呼ばれるグリーンレーザーを用いた補助制御システムが中心的役割を果たす．本年度は，前年度までの評価で得られた知見をもとにシステムに改良を加え，グリーンレーザーを伝送する光ファイバーの振動によって印加される位相雑音をキャンセルする光学系を新たに導入した．その結果，グリーンロックシステムの雑音をより低減することに成功した．この改良されたシステムを KAGRA の両腕に導入することで，FPMI の動作や PRFPMI の動作に成功した．

この研究で開発されたグリーンロックシステムは次世代のより大きな重力波望遠鏡への応用が容易である．本研究室では次世代望遠鏡の動作点引き込みを世界に先駆けて研究・検討し，必要な開発項目や新規手法を提言・提案した [19]．

#### 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二つのテンソル偏極モードを自由度として持つ．しかし，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が，低周波数帯で優れた感度を持つ Einstein Telescope や Cosmic Explorer などの次世代検出器では，地球の自転によって実効的な台数が多くなり，数台でも検出器台数より多くの偏極モードを探査することが可能であると考えられる．本年度は，これらの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重力理論検証がより強重力場で可能になることを示した．

### 6.5.2 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．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重力波望遠鏡の観測帯域である 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，スクイーズ光の開発を進め，20 Hz 以上で 6dB 程度のスクイーズ光の生成に成功した．また，生成されたスクイーズ光を 300 m の光共振器に入射することにより，300 m の光共振器を用いた周波数依存スクイーズ光の生成に世界で初めて成功した (図 6.5.1)．

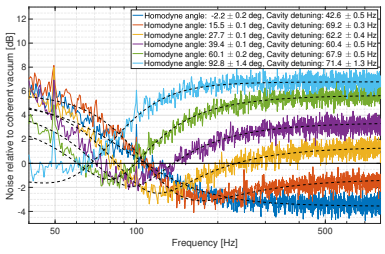



図 6.5.1: 生成された周波数依存スクイーズ光．

### 6.5.3 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．

#### DECIGO のレーザー干渉計制御手法の検討

DECIGO では，一つの Fabry–Pérot 共振器に両側からレーザー光を入射させる，双方向 Fabry–Pérot 共振器と呼ばれる干渉計方式を用いて，三角形型の干渉計を構成する予定である．この方式では，複数の Fabry–Pérot 共振器が互いに影響を与え合うため，すべての干渉計の信号を同時に得るための新しい制御手法の検討が必要であった．本年度は，Fabry–Pérot 型宇宙重力波望遠鏡の制御モデルを構築し，DECIGO の目標感度である $10^{-23}\ 1/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ というひずみ感度と 1 日以上の安定性を持つ干渉計制御の成立解を確立した．また，双方向差動 Fabry–Pérot 干渉計を定式化するとともに，実際に地上の実験室に 55 cm の基

線長を持つセットアップを構築し，その動作を世界で初めて実証した．さらに，共振器の共振点からのずれが，共振器長さを調整することで低減されることを確認した．

### 6.5.4 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．地上でも低周波数帯（0.1 Hz 前後）の重力波に感度を持ち，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．

#### ねじれ振り子の低温化

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であり，雑音を十分に低減するためには (1) 懸架ワイヤの低温化（目標温度：4 K）および (2) 低エネルギー散逸ワイヤの開発（目標 Q 値：$10^8$）が求められる．本年度は前年度に引き続き低温化の開発を進め，プロトタイプねじれ振り子を 4.8 K まで冷却することに成功した. さらに低温下での振り子回転計測を実現し，その信号をもとに低温ねじれ振り子の雑音調査なども行った．35 cm スケールのねじれ振り子に対して低温化・雑音調査が行われた先行研究はなく，これらは本研究で初めて達成された．雑音調査の結果，低温下では磁場変動に対する応答が増大してしまうことが明らかになったが，これは振り子材質の無酸素銅の電気伝導度が増大し，誘導電流を介した電磁力が大きくなっているためだと解釈されている．

#### 能動防振系の開発

TOBA の主要な雑音の一つが地面振動雑音である．

現在我々は，能動防振により並進地面振動の低減することを目指している．今年度は，防振系が設置されているフレームをより強固なものに変更することで機械共振による制御の安定性を高めることに成功し，並進 3 自由度の同時制御に成功した．また低周波数帯に余分な振動を導入する傾斜変動を読み取る傾斜計の開発を進め，懸架系の構築が完了した．今後は傾斜系を防振系に組み込み，並進・回転 6 自由度の制御を目指す．

#### 改良型角度センサの開発

Phase-III TOBA の目標感度を達成するためには，試験マスの差動回転を読み取る際の角度読み取り雑音を $5 \times 10^{-16}$ rad/$\sqrt{\text{Hz}}$ より小さくすることが要求される．これを満たす角度センサとして Coupled 共振器を用いた Wave Front Sensor (Coupled WFS) が考案されている [66].

Coupled WFS は，試験マスに取り付けられた鏡と他の二枚の鏡が同じ軸の上に向かい合って並んだ形をしており，二つの光共振器を構成している．後ろの光共振器の長さに応じて $\text{TEM}_{00}$ モードと $\text{TEM}_{10}$ モードの光の間に異なる位相を与えることができ，Gouy 位相を打ち消して角度信号を増幅する．

本年度は Coupled WFS の原理実証や制御の実現を目的として原理実証を行なった [23]．その結果，試験マスの差動回転に対する角度信号は，WFS に比べて 2.1(5) 倍増幅できることを実証した．また同時に，Coupled WFS の制御が実現可能であることも確認できた．これによって Coupled WFS の定性的な原理実証は完了したと言える．

#### 懸架ファイバでの機械損失の評価

We worked further on experimental research on Q factor measurements of sapphire fibres in torsion. Discovered a link between clamp strength and resonant frequency, providing a deeper understanding of the experimental setup. [69, 51]. Cryogenic measurements are also being prepared, with a new setup being designed for compatibility. Work done in 2018 on Q factor measurements for single strand carbon fibre for an experimental setup was also published [1].

### 6.5.5 地震の早期アラート

断層破壊に伴う地面の密度変化を重力場の変化として検出することで地震発生の早期検知に用いる研究が近年提案された．特に 0.1 Hz 付近の低周波変動を捉えることで，地震波を用いる現行の速報より素早い検出やマグニチュード推定の精度向上ができる可能性が期待されており，TOBA の観測ターゲットの一つに設定されている．

本年度，TOBA での地震検出に関連して (1) 重力勾配テンソル成分間の差を考慮した信号検出可能性，(2) 複数の TOBA を用いた観測ネットワークによる震源位置推定，について計算を行った．その結果，TOBA で観測可能な水平重力勾配のみでも十分な信号検出が可能であることが分かった．また複数検出器間の信号振幅比をもとに震源位置を推定するシミュレーションを行い，観測ネットワークの適切な構成を議論した．

### 6.5.6 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．今年度我々は，mg スケールの曲率つき微小鏡を用いて光共振器を組み，共振器の幾何学的構成から微小鏡をトラップする実験セットアップを新たに構築した．本年度は，安定度を評価する実験を行い，共振器内パワーを増大させるほど，微小鏡に強い復元力が働くことを実際に観測した [61]．同時に，この高感度な系を用いて，量子雑音を低減する手法を古典雑音を用いてデモンストレーションする実験を行い，測定の反作用雑音の回避を示唆する結果を得た [54]．今後は，量子輻射圧ゆらぎ観測に向け，雑音源の特定を進め，現在得られている感度 [61] の向上を目指す．

#### 光学浮上法の安定性検証

巨視的な量子系を観測するためには，対象質量スケールにおいて，レーザー光の量子ゆらぎによって決まる測定限界 (標準量子限界) に到達する必要がある．そのための最大の障害となり得る鏡の懸架に伴う熱雑音を克服するため，私たちは，鏡を光輻射圧で浮上させる光学浮上の開発を行っている．光学浮上法の実現には，浮上した鏡が安定であることが必要であり，鏡の上下から光を当てることで安定浮上を可能とするサンドウィッチ構成を提案した．

本年度は，サンドウィッチ構成の安定性検証を目指し，二段ねじれ振り子の導入と光学系の改良を行った．その上で，ねじれ振り子と Fabry-Perot 共振器の同時制御に成功し，共振状態における光輻射圧による復元力の測定を行なった．結果として，復元力と Fabry-Perot 共振器の光強度の関係が理論と矛盾しないことを確認した．今後は，復元力と Fabry-Perot 共振器の曲率中心間距離の関係を評価した上で，実際に鏡を浮上させるセットアップ構築を行う予定である．

#### 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多くの理論で採用されている．しかし，量子重力理論の理論的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．そのため，Lorentz 不変性をより高い精度で検証することが重要とされる

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．光路の一部に媒質を入れて屈折率を変え，非対称化した光リング共振器を用いると，共振器内を両周りの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．

我々はこれまでに 1 年間に渡る異方性探査を行い，片道光速の異方性で世界最高精度となる $10^{-15}$ の上限値をつけた．しかし，回転に伴う振動雑音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の改良を行った．本年度は，回転に同期した雑音低減のために上部支持を伴わない回転機構を導入し連続回転を実現した．細かい回転軸調整なしで，$2 \times 10^{-15}$ の回転時感度を得ることに成功した．

#### 光共振器を用いたアクシオン暗黒物質探査

数々の宇宙観測によって，宇宙の全物質の約 5/6 は暗黒物質であることが判明しているが，その正体は全くわかっていない．我々は，特にアクシオンと呼ばれる粒子に注目し，レーザー干渉計とのわずかな相互作用を利用した探査を進めている．我々は，アクシオンがその質量に応じた周期で光の左円偏光と右円偏光の位相速度を周期的に変化させる性質に着目し，光リング共振器を用いてこの位相速度差を測定する手法を提案し、$10^{-10}$ eV 程度以下の軽いアクシオンを探査する DANCE (Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment) 計画を 2018 年度よりスタートさせた [2].

本年度は最初のプロトタイプとなる，周回長 1 m のボウタイ型共振器の製作と性能評価，入射光学系と検出光学系の構築を行った．フィネスを測定したところ，設計値である $3 \times 10^3$ に対し，測定値は $5.2 \times 10^2$ 程度に留まったものの，その他の性能については想定通りの結果が得られた．今後は共振器用の鏡の交換と感度向上を行い，2020 年度中の初期観測開始を目指す．

また，本年度は線形のファブリ・ペロー共振器を用いて直線偏光の偏光面回転を調べることで，アクシオン探査を行う新手法を提案した [5]．この手法では，光の往復時間がアクシオンの振動周期の奇数倍と一致する場合にのみ高い感度を持つ．この手法では重力波望遠鏡の 3-4 km に及ぶ巨大な共振器を用いることで，高い感度を得ることができるため，テーブルトップサイズの光リング共振器で広帯域に感度を持たせる DANCE とは相補的な手法となっている．

＜受賞＞

[1] Yutaro Enomoto: 24th KAGRA Meeting Poster Award, KAGRA Scientific Congress (Dec 2019).

[2] 有冨尚紀: 2019 年秋季大会 日本物理学会学生優秀発表賞, 日本物理学会 (2019 年 10 月).

[3] 宮崎祐樹: 2019 年秋季大会 日本物理学会学生優秀発表賞, 日本物理学会 (2019 年 10 月).

[4] 有冨尚紀: The 23rd KAGRA meeting Best Poster Award, KAGRA collaboration (2019 年 8 月).

[5] 榎本雄太郎: 第 74 回年次大会 (2019 年) 日本物理学会学生優秀発表賞, 日本物理学会 (2019 年 5 月).

＜報文＞

(原著論文)

[6] K. Komori et al.: Attonewton-meter torque sensing with a macroscopic optomechanical torsion pendulum, Phys. Rev. A 101, 011802(R) (2020).

[7] Y. Michimura et al.: DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, Journal of Physics: Conference Series 1468, 012032 (2020).

[8] KAGRA Collab.: An arm length stabilization system for KAGRA and future gravitational-wave detectors, Class. Quantum Grav. 37, 035004 (2020).

[9] H. Takeda et al.: Prospects for gravitational-wave polarization tests from compact binary mergers with future ground-based detectors, Phys. Rev. D 100, 042001 (2019).

[10] K. Nagano et al.: Axion Dark Matter Search with Interferometric Gravitational Wave Detectors, Phys. Rev. Lett. 123, 111301 (2019).

[11] KAGRA Collab.: KAGRA: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector, Nature Astronomy 3, 35-40 (2019).

[12] M. Kimura et al.: Earthquake-induced prompt gravity signals identified in dense array data in Japan, Earth, Planets and Space 71, 27 (2019).

[13] T. Shimoda, and M. Ando: Nonlinear vibration transfer in torsion pendulums, Class. Quantum Grav. 36 12 (2019).

[14] KAGRA Collab.: Vibration isolation system with a compact damping system for power recycling mirrors of KAGRA, Class. Quantum Grav. 36, 095015 (2019).

[15] S. Kawamura et al.: Space gravitational-wave antennas DECIGO and B-DECIGO, Int. J. Mod. Phy. D 28, 1845001 (2019).

[16] KAGRA Collab.: First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory KAGRA, Classical and Quantum Gravity 36, 165008 (2019).

[17] K. Yamamoto et al.: Design and experimental demonstration of a laser modulation system for future gravitational-wave detectors, Classical and Quantum Gravity 36, 205009 (2019).

[18] K. Somiya et al.,: Influence of non-uniformity in sapphire substrates for a gravitational wave telescope, Phys. Rev. D 100, 082005 (2019).

(学位論文)

[19] 榎本雄太郎: Interferometer Locking Scheme for Advanced Gravitational-Wave Detectors and Beyond, 博士論文 (2020 年 3 月).

[20] 下田智文: Cryogenic Torsion Pendulum for Observing Low-frequency Gravity Gradient Fluctuation, 博士論文 (2020 年 3 月).

[21] 長野晃士: Control scheme for a Fabry–Pérot type interferometric space gravitational wave antenna, 博士論文 (2020 年 3 月).

[22] 喜多直紀: 巨視的量子系の観測に向けた光学浮上法の安定性検証, 修士論文 (2020 年 3 月).

[23] 宮崎祐樹: ねじれ型重力波検出器 TOBA のための高感度角度センサの開発, 修士論文 (2020 年 3 月).

(著書)

[24] 道村唯太: 低温レーザー干渉計で地下から重力波をとらえる, 大槻義彦, 他 編, 『物理科学, この 1 年 2020』 (丸善出版, 2020 年 1 月).

[25] M. Ando: Advanced Interferometric Gravitational-wave Detectors: Ed: David Reitze, et al., World Scientific Pub. Co. Inc. (2019).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[26] N. Aritomi, *et al.*: Frequency Dependent Squeezing with 300 m filter cavity for Gravitational Wave Detectors, The 2nd QFilter WS (Feb. 2020, Kyoto).

[27] Y. Michimura: Recent news from the optical levitation experiment, The 2nd QFilter WS (Feb. 2020, Kyoto).

[28] Y. Enomoto: Interferometer Locking Scheme for Advanced Gravitational-Wave Detectors and Beyond, 24th KAGRA Meeting (Dec. 2019, Tokyo).

[29] M. Ando: Space-borne Gravitational-Wave Antenna: B-DECIGO, GWPAW 2019 (Oct. 14th, 2019, Univ. of Tokyo, Tokyo).

[30] Y. Michimura: DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, 16th TAUP (Sep. 2019, Toyama).

[31] Y. Michimura for the KAGRA Collab.: Prospects for upgrading the KAGRA gravitational wave telescope, 13th Edoardo Amaldi Conference (Ju.l 2019, Valencia, Spain).

[32] Y. Michimura: Resubmission of bKAGRA Phase 1 Paper, 22nd KAGRA Meeting (Apr. 2019, Kashiwa).

[33] N. Kita: Optical Levitation of a Mirror, 22nd KAGRA Meeting (Apr. 2019, Kashiwa).

ポスター発表

[34] Y. Enomoto: Interferometer Locking Scheme for Advanced Gravitational-Wave Detectors and Beyond, 24th KAGRA Meeting (Dec. 2019, Tokyo).

[35] Y. Michimura: Improving the sensitivity of KAGRA gravitational wave detector, GWPAW 2019 (Oct. 2019, Tokyo, Japan).

[36] N. Aritomi, *et al.*: Control of a Filter Cavity with Coherent Control Sidebands, The 23rd KAGRA Meeting (August 2019, Toyama).

[37] H. Takeda: Prospects for gravitational-wave polarization test from compact binary coalescences with next-generation detectors, 22nd GR 13th Edoardo Amaldi Conference (July, 2019, Valencia, Spain).

[38] N. Aritomi, *et al.*: Control of a Filter Cavity with Coherent Control Sidebands, GWADW 2019 (May, 2019, Isola d'Elba, Italy).

[39] Y. Michimura: How to be a superhero in interferometric gravitational wave detection, 22nd KAGRA Meeting (Apr 2019, Kashiwa).

[40] S. Takano, et al.,: Active Vibration Isolation by Hexapod For TOrsion-Bar Antenna, 22nd KAGRA Meeting (Apr. 2019, Kashiwa).

招待講演

[41] Y. Michimura: Laser Interferometric Search for Non-Standard Physics, The First School on Quantum Sensors for Fundamental Physics (Jan. 2020, Durham, UK).

[42] Y. Michimura for the KAGRA Collab.: Present status and future prospects of KAGRA gravitational wave telescope, Multi-dimensional Modeling and Multi-Messenger observation from Core-Collapse Supernovae (Oct. 2019, Fukuoka).

[43] M. Ando: Gravity-Gradient-Based Early Earthquake Alert, UK-Japan WS (Sep. 10th, 2019, Tokyo).

[44] Y. Michimura: Laser Interferometry for Gravitational Wave Observations, TianQin Summer School on Gravitational Waves 2019 (July 16, 2019, Sun Yat-sen University, China).

[45] M. Ando: Science and Technology of B-DECIGO and DECIGO, TianQin Summer School on Gravitational Waves 2019 (July 16, 2019, Sun Yat-sen University, China).

[46] M. Ando: Gravitational-wave observation - Recent results and prospects -, OMEG15 (July. 4th, 2019, YITP, Kyoto).

[47] M. Ando: B-DECIGO and DECIGO, The 6th KAGRA International Workshop (June 23rd, 2019, WIPM, Wuhan, China).

[48] Y. Enomoto for the KAGRA Collaboration: Topics on Commissioning of KAGRA, GWADW 2019 (May 2019, Isola d'Elba, Italy).

[49] S. Takano et al.,: Development of Cryogenic Torsion-Bar Gravitational Wave Detector, GWADW 2019 (May 2019, Isola d'Elba, Italy).

(国内会議)

一般講演

[50] 有冨尚紀, 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 (3), 日本物理学会 第 75 回年次大会 (2020 年 3 月, 名古屋大学, 名古屋).

[51] Ching Pin Ooi: Development of Phase-III TOBA (TOrsion Bar Antenna) for Gravitational Wave Observation (22): Towards Cryogenic Cooling of Crystal Fibres for Suspension, 同上.

[52] 安東正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (111)：B-DECIGO の概要, 同上.

[53] 長野晃士: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (117)：双方向 Fabry-Perot 干渉計の実証, 同上.

[54] 川崎拓也: 光共振器における古典強度雑音を用いた反作用雑音低減の実証, 同上.

[55] 喜多直紀: 光輻射圧による鏡の光学浮上法の安定性検証, 同上.

[56] 有冨尚紀, 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, 第 39 回 天文学に関する技術シンポジウム (2020 年 1 月 15 日, 国立天文台).

[57] 安東正樹: 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 第 3 回領域会議 (2019 年 11 月 14 日, 東京工業大学, 東京).

[58] 安東正樹: B-DECIGO, 第 18 回 DECIGO ワークショップ (2019 年 11 月 10 日, 京都大学).

[59] 長野晃士: 双方向 Fabry-Perot 干渉計の開発, 同上.

[60] 道村唯太: 小型宇宙重力波望遠鏡の提案, 同上.

[61] 川崎拓也: 線形光共振器による量子輻射圧ゆらぎの観測実験, 日本物理学会 2019 年秋季大会 (2019 年 9 月, 山形大学, 山形).

[62] 喜多直紀: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (11), 同上.

[63] 安東正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (106)：B-DECIGO の概要, 同上.

[64] 武田紘樹: 光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証 (5), 同上.

[65] 長野晃士: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (109): 双方向 Fabry-Perot 干渉計の開発, 同上.

[66] 宮崎祐樹: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (18), 同上.

[67] 高野哲, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (17)：傾斜計の開発, 同上.

[68] 下田智文: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (19)：続・低温ねじれ振り子の開発, 同上.

[69] Ching Pin;Ooi：Development of Phase-III TOBA (Torsion Bar Antenna) for Gravitational Wave Observation (20): Towards cryogenic measurements of suspension mechanical loss for torsion pendulums with crystalline fibres, 同上.

[70] 道村唯太: km 級宇宙レーザー干渉計による重力波望遠鏡の可能性, 同上.

[71] 榎本雄太郎, KAGRA Collaboration: 大型低温重力波検出器 KAGRA の主干渉計制御 II, 同上.

[72] 有冨尚紀, 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 (2), 同上.

[73] 道村唯太: レーザー干渉計によるアクシオン暗黒物質の探索, ダークマターの懇談会 2019 (2019 年 7 月, 早稲田大学).

[74] 安東正樹: 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 第 2 回領域会議 (2019 年 5 月 13 日, 科学技術振興機構・東京本部, 東京).

ポスター発表

[75] 安東正樹, DECIGO グループ: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO 第 18 回 宇宙科学シンポジウム (2020 年 1 月 8-9 日, 宇宙科学研究所, 相模原, 神奈川).

招待講演

[76] 道村唯太: レーザー干渉計による重力波観測の現状と将来展望, 第 32 回 理論懇シンポジウム (2019 年 12 月, 国立天文台).

[77] 道村唯太: 重力波観測と量子技術, 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会 (2019 年 11 月, 東京大学山中寮).

[78] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 第 63 回宇宙科学技術連合講演会 (2019 年 11 月 6 日, アスティとくしま, 徳島).

(セミナー・アウトリーチ講演)

[79] Y. Michimura: Optical levitation of a mirror for probing macroscopic quantum mechanics, ナノサイエンスセミナー (2019 年 12 月, 東京大学生産技術研究所).

[80] 道村唯太: レーザー干渉計型重力波検出器と巨視的量子力学, 宇宙論研究室セミナー (2019 年 10 月, 神戸大学).

[81] 安東 正樹: 重力波で宇宙を聴く, 2019 年度 科学セミナー, 宇宙を観る，聴く，計算する (2019 年 8 月 25 日, 早稲田大学, 東京).

[82] 道村唯太: レーザー干渉計による基礎物理実験, 寄田研究室セミナー (2019 年 8 月, 早稲田大学).

[83] Y. Michimura: Current status and future prospects of KAGRA gravitational wave telescope, ICRR Seminar (Jun 2019, ICRR).

[84] Y. Michimura: km-scale Space Gravitational Wave Detector, Formation Flying Meetup (May 2019, JAXA).

[85] Y. Enomoto: Current status of Large-Scale Cryogenic Gravitational-Wave Telescope KAGRA, ISAS Astrophysics Colloquium (May 2019, ISAS).

## 6.6 馬場研究室

### 6.6.1 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。

### 6.6.2 超新星残骸に関する研究の進展

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 $\mathrm{km\ s^{-1}}$ 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 線で輝き、超新星爆発で供給された重元素は熱せられて特性 X 線を発する。また、マッハ数が 100 以上にもなる衝撃波では荷電粒子が最大 TeV 帯域まで加速され、宇宙線の源となると考えられている。これらの現象について、X 線観測を主体として以下の新たな知見を得た。

#### 超新星残骸の膨張の非等方性測定

超新星爆発の非等方性は、爆発機構の解明や宇宙空間に供給する総重元素量に直結する重要なパラメータである。我々は 1604 年に爆発を Kepler が記録していた Kepler の超新星残骸について非等方膨張の証拠をつかんでいたが、これを他天体にも応用する手段を考案した [28, 29]。これは天体の位置ごとの詳細なスペクトルをとらずに特性 X 線のドップラー偏移の典型値のマップを作ることが出来る手法である。1572 年に爆発が Tycho によって記録されている Tycho の超新星残骸と Kepler の超新星残骸を比較した結果、定性的ではあるが、Tycho の超新星残骸の方がより等方的に膨張している手がかりをつかんだ。これは、同じ種族と考えられていた超新星爆発の残骸でも多様性がある可能性を示している。また、最も爆発エネルギーが大きかったと考えられる超新星残骸 N132D の膨張測定にも挑戦した。大マゼラン雲星雲に存在する比較的遠方の天体のため、残念ながら膨張の有意な測定や非等方性の測定は出来なかった [58] が、有意な膨張率上限値を与えた。

#### 超新星残骸からの宇宙線逃亡測定

超新星残骸で荷電粒子が加速されていることははっきりと分かってきているが、加速された粒子は超新星残骸から「逃亡」し星間空間に供給されないと宇宙線になることは出来ない。これは「宇宙線逃亡問題」として、宇宙線発見以来 100 年経った現在残る宇宙線理解の最後の 1 ピースとされている。

加速粒子はエネルギーが高いほどジャイロ半径も大きく、より短いタイムスケールで超新星残骸から逃亡すると考えられている。実際古い超新星残骸からのガンマ線は数 GeV 程度にピークを持ち、既に高

エネルギー粒子は逃亡するかエネルギーを失ったようにも見える。そこで我々は超新星残骸の年齢を熱的プラズマから推定し、超新星残骸に残る荷電粒子の 最高エネルギーが年毎にどのように変化していくかを調べた。その結果、世界で初めて、超新星残骸が年をとるにつれ残存粒子の最高エネルギーが落ちる様子を定性的に示した [37]。

### 6.6.3 ブラックホール・中性子星研究の進展

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。今年度、特に進展があった項目を以下にまとめた。

#### 降着中性子星 SMC X-1 の「すざく」衛星による X 線スペクトル解析

近年、Eddington 限界光度を一桁以上超えて X 線を放射する中性子星が複数報告されているが、このような高光度天体の降着と放射のプロセスは詳しく解明されていない。高光度天体の降着機構を探るため、我々は大質量 X 線連星 SMC X-1 に着目した。SMC X-1 は、光度が通常時には Eddington 限界を数倍上回る非常に明るい降着駆動パルサーで、そのスペクトルの軌道・超軌道変動は高光度天体の降着流の構造やその機構を探るための重要な情報を含むと考えられる。我々はその全 10 回の観測データの系統的な解析を行った。10 回目の観測では He-like 鉄吸収線を発見し (Kubota et al. 2018)、残り 9 回の観測についても cutoff power law を使った吸収線の探索結果を報告済みである 。さらには、Fermi-Dirac 型のカットオフを持つ冪関数で連続成分を評価し、精密な輝線の解析を行った。また、各観測の広がった鉄輝線に着目し、高速で動く降着物質由来の広がった輝線と 運動しない物質由来の細い輝線を取り入れ、鉄輝線の軌道、超軌道変動による影響を評価した。

#### 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されて、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に一般相対論的効果の導入を行った。

#### 降着中性子星・ブラックホールからのアウトフローのスペクトルモデル化

強重力天体への降着は、物質を吸い込むだけではなく、強力なアウトフローによる物質の吹き出しを伴うことが理論・観測の両面で確立しつつある。このアウトフローは宇宙の進化において重要な役割を果たしていると考えられており、その理解のためには X 線スペクトル解析による物理条件の測定が最も有効な観測的手段である。そこで数値流体シミュレーションとモンテカルロ光子輸送シミュレーションを組み合わせて、活動銀河核からの超高速アウトフローや中性子星連星の降着円盤からのアウトフローのモデル化と観測との比較を行い、観測結果をよく再現する理論モデルを得ることに成功した。

### 6.6.4 将来計画のための検出器開発

天体データの解析と並行して、さらに新しい質のデータを取得するための検出器開発を行っている。今年度は以下の項目で特に進展があった。

#### X 線偏光撮像超小型衛星 cipher の推進

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ときは、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 10–30 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、超小型衛星計画「cipher」を推進している。その技術基盤は微小ピクセル CMOS イメージセンサとレーザー微細加工による符号化開口マスクであり、超小型衛星という大きさの制限の中で、30 秒角という高い角度分解能を実現可能である。KEK Photon Factory と SPring-8 のシンクロトロン放射光を用いて、偏光感度と撮像能力の実証試験を行い成功をおさめた。「cipher」計画は 2019 年度の衛星設計コンテストに出品し、その斬新なアイディアと着実な科学戦略が高く評価され、文部科学大臣賞・アイディア大賞を受賞した。

さらに、将来の硬 X 線観測に向けて、厚い空乏層を持つ SOI 技術を用いた CMOS センサの性能評価も行っており、シミュレーションによる詳細な検出器応答のモデル化により、センサの設計パラメータの探索や天体解析のための応答関数構築の技術を確立した。

#### 液体アルゴン MeV ガンマ線コンプトンカメラ GRAMS の推進

MeV ガンマ線帯域の電磁波は原子核からのラインガンマ線のエネルギーに対応し、宇宙の元素合成・宇宙線粒子加速の現場を解明するのに必要不可欠の情報を提供する。それにもかかわらず、この帯域の観測感度は他の波長域に比べて圧倒的に低いものとなっている。我々は MeV 帯域の性能向上を目指して、従来とは異なるアプローチの検出器を用いたコンプトンカメラの計画「GRAMS」を立ち上げた。これは、液体アルゴンの検出器によって大有効面積・体積を実現し、MeV ガンマ線と反粒子を用いたダークマター間接探索を気球搭載実験によって行うという画期的なものである。現在、複数コンプトン散乱イベントの解析手法の開発を目指して、早稲田大学・寄田研究室が開発した気液 2 相型アルゴン検出機 ANKOK5 のデータのコンプトン散乱イベントの解析を進めている。

### 6.6.5 雷放電・雷雲からのガンマ線に関する研究

馬場研究室では宇宙に存在する高エネルギー天体の研究に加えて、雷放電や雷雲から発せられる高エネルギー現象の地上観測も行っている。雷放電や雷雲の強電場領域では、濃密な大気中において電子がメガ電子ボルトの相対論的エネルギーまで加速され、その制動放射がこれまで衛星や大気圏内での飛翔体、そして地上実験によって観測されている。これらの現象は「その場観測」が可能な天然の粒子加速機構として注目されており、その研究は「高エネルギー大気物理学」という新しい学術分野に発展しつつある。馬場研究室では和田が京都大学、理化学研究所、名古屋大学、日本原子力研究開発機構などとの共同研究で、北陸地方で発生する冬季雷の地上観測を行っている。

雷放電からは時として数十 MeV に達するガンマ線がミリ秒の継続時間で放出されており、地球ガンマ線フラッシュと呼ばれている。和田は 2017 年 11 月に新潟県柏崎市で地上検出した地球ガンマ線フラッシュの観測データから、地上の複数の観測点において 0.01-1 ￥$mu$Gy の線量がもたらされたと解析した。その地上観測の線量データとモンテカルロ・シミュレーションを突き合わせることで、地球ガンマ線フラッシュが高度 $2.5^{+0.3}_{-0.3}$ km で発生し、$10^{19}$ 個の 1 MeV 以上の電子が生成されたと結論づけた。これまで地球ガンマ線フラッシュは主に高度 10 km 付近から宇宙に向けて放出されるものが観測されてきたが、より大気圧の高い地表付近でも同様の電子数をもつ地球ガンマ線フラッシュが生成されることを示した [11]。さらに和田は地球ガンマ線フラッシュと同時に観測された中性子・陽電子のデータを解析し、モンテカルロ・シミュレーションの結果と比較することで、地球ガンマ線フラッシュが大気中で光核反応 ($^{14}$N+￥$gamma$￥$to^{13}$N+$n$) を引き起こしたことを定量評価した [25]。

雷雲からは数十秒から数分続くガンマ線が放出されることがあり、ロングバーストと呼ばれている。これは雷雲の中の準安定な電場が電子を継続的に加速している現象である。和田は 2018 年 1 月に金沢で観測したデータから、1 分以上に渡って検出されたロングバーストが雷放電によって途絶し、さらに地球ガンマ線フラッシュが同時に発生していたことを突き止めた。近畿大学、神戸市立工業高等専門学校による共同研究で、地球ガンマ線フラッシュを発生させた雷放電がロングバーストの加速領域で発生したことが判明し、ロングバーストが雷放電や地球ガンマ線フラッシュの前駆現象として、それらの発生を促進した可能性があることを指摘した [12]。

＜受賞＞

[1] 春日知明, 會澤優輝, 畠内康輔, 「第 27 回衛星設計コンテスト 文部科学大臣賞・アイデア大賞」, 日本機械学会ほか, 2019 年 11 月 9 日

[2] 馬場 彩 “第 1 回米沢富美子賞”, 日本物理学会、2020 年 3 月

[3] 和田有希, 日本物理学会 第 74 回年次大会 宇宙線・宇宙物理領域 学生優秀発表賞, 日本物理学会, 2019 年 5 月

[4] 和田有希, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会 大気水圏科学セクション 学生優秀発表賞, 日本地球惑星科学連合, 2019 年 7 月

[5] 和田有希, 理学系研究科 研究奨励賞 (博士課程), 東京大学大学院理学系研究科, 2020 年 3 月

[6] 小高 裕和, “第 14 回 若手奨励賞”, 日本物理学会、2020 年 3 月

＜報文＞

(原著論文)

[7] 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, 71, 61 (2019)

[8] E. Watanabe, S. Shibata, T. Sakamoto, A. Bamba, “A high-magnetic-field radio pulsar survey with Swift/XRT”, MNRAS, 486, 5323-5334 (2019)

[9] H. Watanabe, A. Bamba, S. Shibata, E. Watanabe, “XMM-Newton Spectrum of the magnetar CXOU J171405.7-381031”, PASJ, 71, 84 (2019)

[10] Y. Wada, T. Enoto, Y. Nakamura, T. Morimoto, M. Sato, T. Ushio, K. Nakazawa, T. Yuasa, D. Yonetoku, T. Sawano, M. Kamogawa, H. Sakai, Y. Furuta, K. Makishima, H. Tsuchiya, “High Peak-Current Lightning Discharges associated with Downward Terrestrial Gamma-ray Flashes”, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125, e2019JD031730 (2020)

[11] Y. Wada, T. Enoto, K. Nakazawa, Y. Furuta, T. Yuasa, Y. Nakamura, T. Morimoto, T. Matsumoto, K. Makishima, H. Tsuchiya, “Downward Terrestrial Gamma-Ray Flash Observed in a Winter Thunderstorm”, Physical Review Letters, 123, 061103 (2019)

[12] Y. Wada, T. Enoto, Y. Nakamura, Y. Furuta, T. Yuasa, K. Nakazawa, T. Morimoto, M. Sato, T. Matsumoto, D. Yonetoku, T. Sawano, H. Sakai, M. Kamogawa, T. Ushio, K. Makishima, H. Tsuchiya, “Gamma-ray glow preceding downward terrestrial gamma-ray flash”, Communications Physics, 2, 67 (2019)

[13] Tsubasa Tamba, Aya Bamba, Hirokazu Odaka, and Teruaki Enoto, “Temporal and spectral X-ray properties of magnetar SGR 1900+14 derived from observations with NuSTAR and XMM-Newton”, PASJ, 71, 90–102, 2019

[14] Hiromasa Suzuki, Aya Bamba, Rei Enokiya, Hiroya Yamaguchi, Paul P. Plucinsky, Hirokazu Odaka, “Uniform distribution of the extremely overionized plasma associated with the supernova remnant G359.1-0.5”, ApJ, 2020, in press

[15] Mizumoto, M., Ebisawa, K., Tsujimoto, M., Done, C., Hagino, K., Odaka, H., “X-ray reverberation lags of the Fe-K line due to AGN disc winds”, MNRAS, 482, 5316, 2019

[16] Tanimoto, A., Ueda, Y., Odaka, H., Kawaguchi, T., Fukazawa, Y., Kawamuro, T., “XCLUMPY: X-Ray Spectral Model from Clumpy Torus and Its Application to the Circinus Galaxy”, ApJ, 877, 95, 2019

[17] H.E.S.S. Collaboration including Odaka, H. as one of the corresponding authors, “H.E.S.S. and Suzaku observations of the Vela X pulsar wind nebula”, A&A, 627, A100, 2019

[18] Ohno, M. and 28 co-authors including Odaka, H., “Event-selection technique for the multi-layer Si - CdTe Compton camera onboard Hitomi”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 924, 327, 2019

[19] Torigoe, K. and 18 co-authors including Odaka, H., “Performance study of a large CsI(Tl) scintillator with an MPPC readout for nanosatellites used to localize gamma-ray bursts”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 924, 316, 2019

[20] Tomaru, R., Done, C., Ohsuga, K., Odaka, H., Takahashi, T., “The thermal-radiative wind in low mass X-ray binary H 1743-322: II. iron line predictions from Monte Carlo radiation transfer”, MNRAS, in press.

(会議抄録)

[21] H. Tsuchiya, T. Enoto, Y. Wada, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, D. Umemoto, K. Makishima, and the GROWTH collaboration, “Gamma-ray observations at the coastal area of Japan Sea in winter seasons”, Proceedings of Science - 36th International Cosmic Ray Conference, 1163 (2019)

(国内雑誌)

[22] 和田有希,「カミナリは「天然の加速器」か? – 冬の雷で原子核反応を発見 -」, NPO 法人 ガリレオ工房通信 2019 年 9 月号 (No.376), 8-11 (2019)

[23] 和田有希,「雷が引き起こす原子核反応 – 冬の北陸が舞台の高エネルギー大気物理学 -」, じっきょう理科資料 No.85 (2019 年 4 月号), 18-22 (2019)

[24] 榎戸輝揚, 和田有希, 土屋晴文「雷放電が拓く高エネルギー大気物理学」, 日本物理学会誌 2019 年 4 月号, 192-200 (2019)

(学位論文)

[25] Y. Wada, ”Observational Studies of Photonuclear Reactions Triggered by Lightning Discharges”, Ph.D thesis

[26] 會澤優輝,「ブラックホール降着系の理解を目指した CMOS センサ型硬X線偏光計の性能評価 (The performance evaluation of an X-ray polarimeter using a CMOS imaging sensor for understanding accreting black holes)」, 修士学位論文

[27] 丹波翼,「XRISM 衛星搭載 X 線 CCD 検出器の高フラックス天体に対する非線形応答の分析と補正アルゴリズムの開発 (The nonlinear effects in observing high-flux sources with X-ray CCDs and analysis algorithm for Xtend onboard XRISM)」, 修士学位論文

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[28] T. Kasuga, T. Sato, K. Mori, H. Yamaguchi, & A. Bamba, “Doppler Velocity Measurement of Fe Ejecta in Kepler’s Supernova Remnant”, “Supernova Remnants II: An Odyssey in Space after Stellar death”, Minoa Palace Luxury Resort & Spa, Greece, 2019.06.03–2019.06.08 (talk)

[29] T. Kasuga, T. Sato, K. Mori, H. Yamaguchi, & A. Bamba, “Doppler velocity measurement of Fe ejecta in type Ia SNRs”, “The cosmos at high energies: exploring extreme physics through novel instrumentation”, The University of Tokyo, Japan, 2019.10.16–2019.10.18 (poster)

[30] T. Kasuga, T. Sato, K. Mori, H. Yamaguchi, & A. Bamba, “Doppler Expansion Measurement of Heated Ejecta in Type Ia SNRs using Chandra”, “20 Years of Chandra Science Symposium”, Boston Park Plaza Hotel, USA, 2019.12.03–2019.12.06 (poster)

[31] Y. Wada, T. Enoto, Y. Nakamura, Y. Furuta, T. Yuasa, K. Nakazawa, T. Morimoto, M. Sato, T. Matsumoto, D. Yonetoku, T. Sawano, H. Sakai, M. Kamogawa, T. Ushio, K. Makishima, H. Tsuchiya, “Simultaneous detection of gamma-ray glow and downward terrestrial gamma-ray flash”, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2019 (talk)

[32] Y. Wada, T. Enoto, K. Nakazawa, Y. Furuta, T. Yuasa, Y. Nakamura, T. Morimoto, T. Matsumoto, K. Makishima, H. Tsuchiya, “Downward Terrestrial Gamma-ray Flash Observed in a Winter Thunderstorm”, The Cosmos at High Energies: Exploring Extreme Physics Through Novel Instrumentation, Kavli IPMU, Japan, October 2019 (poster)

[33] Y. Wada, T. Enoto, K. Nakazawa, Y. Furuta, T. Yuasa, Y. Nakamura, T. Morimoto, T. Matsumoto, K. Makishima, H. Tsuchiya, “Estimated Number of Avalanche Electrons in a Downward TGF during Winter Thunderstorms”, EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 2019 (poster)

[34] Hiromasa Suzuki, Tsubasa Tamba, Hirokazu Odaka, Aya Bamba, Ayaki Takeda, Koji Mori, Takahiro Hida, Masataka Yukumoto, Yusuke Nishioka, ”Development of the detector simulation framework for the Wideband Hybrid X-ray Imager onboard FORCE”, 12th International ”Hiroshima” Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors, 14-18 December 2019, Hiroshima, Japan (oral)

[35] Hiromasa Suzuki, Paul P. Plucinsky, Terrance Gaetz, Aya Bamba, ”Analysis of the ACIS Particle Background and Generation of Model Spectra”, P124, 20 Years of Chandra Science Symposium, December 3-6, 2019, Boston, USA (poster)

[36] Hiromasa Suzuki (The university of Tokyo, Harvard-Smithsonian center for astrophysics), ”An observational study on supply of cosmic rays by supernova remnants”, The Japan-US Science Forum in Boston 2019, 2 November, 2019, Boston, USA (poster + 1 min oral)

[37] Hiromasa Suzuki, Aya Bamba, Hirokazu Odaka, Ryo Yamazaki, Hiroya Yamaguchi, Yutaka Ohira, “A systematic study on escaping of cosmic rays from SNR shocks through observations of thermal X-ray plasmas”, “Supernova Remnants II an odyssey in space after stellar death”, 3-8 June 2019, Chania, Crete, Greece (poster with 1 min oral)

[38] Hiromasa Suzuki, Hirokazu Odaka, Kazuhiro Nakazawa, Koichi Hagino, Aya Bamba, and the HXI team, ”In-orbit Neutron and Radioactivation Background of the Hard X-ray Imager onboard Hitomi”,International Astrophysical Consortium for High Energy Calibration (IACHEC), 20-23 May, 2019, Shonan Village Center, Japan (oral)

[39] Tsubasa Tamba, Hirokazu Odaka, and Aya Bamba, “Xtend Pile-up Simulator”, XRISM Xtend Meeting, Ehime University, 2019/10/8 (oral)

[40] Tsubasa Tamba, Aya Bamba, Hirokazu Odaka, and Teruaki Enoto, “The hard-tail properties of the magnetar SGR 1900+14 unveiled by XMM-Newton and NuSTAR observations”, The cosmos at high energies, Kavli IPMU, 2019/10/16–18 (poster)

[41] Tsubasa Tamba, Aya Bamba, Hirokazu Odaka, and Teruaki Enoto, “The hard-tail properties of the magnetar SGR 1900+14 unveiled by NuSTAR and XMM-Newton observations”, The Future of X-ray Timing, University of Amsterdam, 2019/10/21–25 (oral)

招待講演

[42] A. Bamba, “Observational study of Nonthermal phenomena on SNR shocks”, “Supernova Remnants II: – An Odyssey in Space after Stellar death”, Crete, Greece, 2019, Jun. 3-8

[43] A. Bamba, “Recent progress on X-ray study of supernova remnants as remnants of supernovae”, “X-ray Astronomy 2019”, Bologna, Italy, 2019 Sep. 8-13

[44] A. Bamba, “Gender equality activities in astronomical society of Japan”, “Astronomy for equality, diversity and inclusion”, Tokyo, Japan, 2019 Nov.12-15

[45] Y. Wada, K. Nakazawa, K. Makishima, T. Hayashi, M. Ishida, “X-ray Views of the Dwarf Nova GK Persei”, The Golden Age of Cataclysmic Variables and Related Objects – V, Mondello, Italy, September 2019 (talk)

(国内会議)

一般講演

[46] 會澤優輝, 春日知明, 小高裕和, 丹波翼, 鈴木寛大, 畠内康輔, 高嶋聡, 馬場彩, 早藤麻美, 玉川徹, 高橋忠幸, 長澤俊作, 成影典之, 朝倉一統, 林田清, 「CMOS イメージャを用いた X 線偏光撮像システムの開発 III」, 「日本物理学会 2019 年秋季大会」, 山形大学, 日本, 9 月 17 日-9 月 20 日 (口頭)

[47] 春日知明, 佐藤寿紀, 森浩二, 山口弘悦, 馬場彩, 「X 線ドップラー運動測定を用いた Ia 超新星残骸中における噴出物の運動状態の多様性: Kepler と Tycho の比較」, 「日本天文学会 2019 年秋季年会」, 熊本大学, 2019.09.11–2019.09.13 (口頭)

[48] 春日知明, 小高裕和, 馬場彩, 「硬 X 線帯域観測に向けたランダムパターン符号化開口の考察」, 「第 2 回 MeV ガンマ線天文学研究会」, 東京大学, 2019.09.26–2019.09.27 (ポスター)

[49] 春日知明, 會澤優輝, 畠内康輔, 「宇宙硬 X 線偏光撮像の開拓者 *cipher*」, 「第 27 回衛星設計コンテスト」, アスティとくしま, 2019.11.09 (口頭)

[50] 春日知明, 會澤優輝, 畠内康輔, 丹波翼, 高嶋聡, 鈴木寛大, 小高裕和, 鈴木寛大, 馬場彩, 周圓輝, 玉川徹, 長澤俊作, 峰海里, 高橋忠幸, 成影典之, 佐久間翔太郎, 朝倉一統, 林田清, 「CMOS イメージャを用いた X 線偏光撮像システムの開発 IV」, 「日本物理学会第 75 回年次大会」, 名古屋大学, 2020.03.16–2020.03.19 (口頭相当)

[51] Hiromasa Suzuki, Paul P. Plucinsky, Terrance Gaetz, Aya Bamba, "Analysis of the Chandra ACIS Particle Background and Generation of Model Spectra"、日本天文学会　春季年会、V310a、2020 年 3 月 (presentation file upload)

[52] Hiromasa Suzuki, Tsubasa Tamba, Hirokazu Odaka, Aya Bamba, Koichi Hagino, Ayaki Takeda, Koji Mori, Takahiro Hida, Masataka Yukumoto, Yusuke Nishioka, Takeshi G. Tsuru, "Development of the detector simulation framework for the Wide-band Hybrid X-ray Imager onboard FORCE", "高感度・広帯域 X 線天文衛星 FORCE で探る高エネルギー宇宙", 20-21 February, 2019, Kyoto university, Japan (poster)

[53] 丹波翼, 小高裕和, 馬場彩, 村上弘志, 森浩二, 林田清, XRISM MOPT グループ, 「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 CCD 検出器にむけたパイルアップシミュレーターの構築」, 日本天文学会 2019 年秋季年会, 熊本大学, 2019/9/11–13 (口頭)

[54] 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」, 第 2 回 MeV ガンマ線天文学研究会, 東京大学, 2019/9/26–27 (ポスター)

[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 の非熱的成分における短時間変動の検出」, 高エネルギー宇宙物理学 2019, 蔵王アストリアホテル, 2019/12/5–7 (ポスター)

[56] 丹波翼, 小高裕和, 馬場彩, 村上弘志, 森浩二, 林田清, XRISM MOPT グループ, 「X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 CCD 検出器のためのパイルアップの分析と補正アルゴリズムの開発」, 日本天文学会 2020 年春季年会, 筑波大学, 2020/3/16–19 (口頭)

[57] 畠内康輔, 春日知明, 鈴木寛大, 小高裕和, Paul Plucinsky, 馬場彩, 「Chandra 衛星を用いた X 線による重力崩壊型超新星残骸 N132D の時間進化の解析」, 「2019 年度　第 49 回　天文・天体物理若手夏の学校」, ロワジールホテル豊橋, 日本, 7/30 – 8/2 (口頭)

[58] 畠内康輔, 春日知明, 鈴木寛大, 小高裕和, Paul Plucinsky, 馬場彩, 「Chandra 衛星を用いた X 線による重力崩壊方超新星残骸 N132D の時間進化の解析」, 「日本天文学会　2019 年秋季年会」, 熊本大学, 日本, 9/11 – 9/13 (口頭)

[59] 畠内康輔, 會澤優輝, 春日知明, 丹波翼, 高嶋聡, 鈴木寛大, 小高裕和, 馬場彩, 「CMOS イメージセンサを用いた硬 X 線撮像偏光計の開発 II」, 「日本天文学会　2019 年春季年会」, 筑波大学, 日本, 3/16 – 3/19 (口頭)

[60] 「X 線衛星「すざく」を用いた Eddington 限界を超えた光度を持つ中性子星連星 SMC X-1 の観測」, 第 49 回天文・天体物理若手夏の学校, ロワジールホテル豊橋, 日本, 7/30-8/2(口頭)

[61] 高嶋聡, 小高裕和, 馬場彩, 窪田恵, 玉川徹, "降着中性子星 SMC X-1 の「すざく」衛星による X 線スペクトル解析", 日本天文学会 2019 年秋季大会, 熊本大学, 日本, 9/11-9/13(口頭)

[62] 高嶋聡, 小高裕和, 馬場彩, 窪田恵, 玉川徹, "「すざく」衛星による降着中性子星 SMC X-1 の広がった鉄輝線の解析とその 軌道・超軌道位相依存性", 日本天文学会 2019 年春季大会, 筑波大学, 日本,3/16-3/19(口頭)

[63] 小高裕和, "Improving the sensitivity of cosmic MeV gamma-ray observation by multiple scattering Compton cameras and their applications to nuclear medicine", Toward new frontiers: Encounter and synergy of state-of-the-art astronomical detectors and exotic quantum beams, Kavli IPMU, 2019 年 7 月 15-16 日

[64] 小高裕和, "CMOS イメージセンサを用いた硬 X 線撮像偏光計の開発", 日本天文学会, 2019 年 9 月 11–13 日, 熊本大学

[65] 小高裕和, "MeV ガンマ線天文学研究会：議論", 第 2 回 MeV ガンマ線天文学研究会, 2019 年 9 月 26–27 日, 東京大学

[66] 小高裕和, "X 線天文学と Geant4", Geant4 講習会, 2019 年 11 月 7 日, 京都大学

[67] 小高裕和, "半導体イメージセンサによる X 線偏光撮像・液体アルゴン TPC による MeV ガンマ線観測", 高宇連将来計画研究会, 2019 年 12 月 26 日, 東工大

[68] 小高裕和, "宇宙地球系物理概論 ガンマ線天文学 (2)", 2019 年 7 月 4 日, 立教大学

招待講演

[69] 馬場 彩、「多様性の源: 超新星残骸」、2019 年度第 49 回天文・天体物理夏の学校、静岡、日本、2019 年 7 月 30 日-8 月 2 日

[70] 馬場 彩、「SKA 超新星残骸観測で迫る超新星爆発多様性」、SKA Japan シンポジウム 2019「SKA Japan これまでの１０年とこれからの１０年」、国立天文台三鷹キャンパス、日本、2019 年 9 月 2-6 日

[71] 馬場 彩、「FORCE で見る超新星残骸での宇宙線加速」、「高感度・広帯域 X 線天文衛星 FORCE で探る高エネルギー宇宙」、京都大学益川ホール、2020 年 2 月 20-21 日

[72] 和田有希,「高エネルギー大気物理学における Geant4 -検出器応答から大気中における粒子輸送と光核反応まで-」, Geant4 初心者講習会・研究会, 京都大学, 2019 年 11 月

(セミナー)

[73] 「X 線で観る熱く激しい宇宙 - 星の爆発とその残骸 -」、2019 年度日本物理学会科学セミナー「宇宙を観る、聴く、計算する ― マルチメッセンジャー天文学の幕開け ―」、早稲田大学 (2019 年 8 月 24-25 日)

[74] 「X 線で観る熱く激しい宇宙」、サイエンスカフェオリオン講師、八王子市 (2019 年 10 月 27 日)

[75] 羽柴聡一朗, 春日知明,「東京大学理学部オープンキャンパス 2019 物理学専攻学生講演 物理学 3 分クッキング ～宇宙の作り方～」, 東京大学, 2019.08.07

[76] T. Kasuga, “X-ray Observations of Ejecta Motion in in Type Ia SNRs’’, RIKEN, Japan, 2019.09.20

[77] T. Kasuga, “X-ray Observations of Ejecta Motion in in Type Ia SNRs’’, SRON, the Netherlands, 2019.12.12

[78] T. Kasuga, “Semiconductor approach to Imaging Polarimetry in the Hard X-ray Band’’, SRON, the Netherlands, 2020.01.14

[79] Y. Wada, ”On-ground Observations of High-energy Phenomena during Winter Thunderstorms”, Nuclear Physics Institute of Czech Academy of Science, Prague, Czech Republic, 4th April 2019

## 6.7 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ークスルーとなる。

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 ～ 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、2021 年の観測開始へ向けた設計・開発を進めている。

### 6.7.1 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 [5]。さらに、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も進めて来たが、その相互相関を検出することに成功した [4]。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 [6]。加えて、Polarbear 実験が実現した高感度観測と高分解能を活用し、重力レンズ効果の除去 “delensing” のデモンストレーションを、偏光を用いたものとしては初めて実現した [8]。

Polarbear 実験は、2014 年からはインフレーション測定に特化したワイド観測を行って来た。特に BICEP2 が報告したテンソル・スカラー比 $r$ で $r = 0.20$ 相当のダスト前景放射検出を独立に検証するために、BICEP2 と全く同じ天域の観測を行って来た。データ解析の結果、BICEP2 と同じ大きさでのダスト前景放射の検出と、テンソル・スカラー比の上限 $r < 0.90$ (95% CL) を報告した [3]。

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。



図 6.7.1: 南米チリ・アタカマ高地で試験観測中の Simons Array 望遠鏡群 (手前)。写真は横浜国立大学の廣瀬開陽 氏撮影。

2019 年度には、前年度に引き続き、チリ・アタカマ高地に設置された 1 台目の望遠鏡のコミッショニングを行ってきた。特性のよく知られた天体や人工的な較正源を用いた試験観測のデータ取得とその解析によって観測装置の特性理解における進展があり、そのフィードバックにより望遠鏡制御や検出器読み出し雑音、検出器較正システムなど、様々な改良を進めた。また、2 台目の望遠鏡のための受信機も観測サイトへと到着し、近く望遠鏡へのインストールが開始される。2019 年度後半には観測サイトの悪天候に起因して電源系や冷却系等のトラブルに見舞われたが、復旧作業はほぼ完了し、2020 年度中に 2 台の望遠鏡による定常観測へと移行することを目指す。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・パイプラインを開発している。

### 6.7.2 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 [7]。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。2019 年度は、2018 年度に作製した光学鏡筒の検証とミリ波吸収体（黒体）の実装を行った。光学鏡筒が要求仕様である光学設計との誤差 0.6 mm 以内の精度でレンズを保持可能なことを確認した。レンズ間距離はおおよそ 600 mm 程度であることから、0.1%という高精度を実現した。光学鏡筒に要求される点として、光学系を理想的な位置関係に保持するという目的に加えて、予期しない光（迷光）を抑えることが求められる。これを実現するためにバッフル構造を作製するとともに、新しくピラミッド形状の表面構造を持つ黒体を開発してバッフルを含む鏡筒内のほぼすべてに黒体を実装し覆うことに成功した。観測時に光学鏡筒は黒体・レンズを含めて 1 K まで冷却する。冷却試験とその前後でレンズ保持機構間距離の測定を行い、黒体の変形・破損がないこと、冷却に伴う光学鏡筒の変形がないことを確認した。2020 年度にはレンズ、光学フィルタを実装したうえで共同研究を行っているカリフォルニア大学サンディエゴ校に輸送した上で、望遠鏡の真空層および冷却機構との統合試験を行う。

### 6.7.3 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。2019 年度は、TES および KIDs 素子を測定した。TES については超伝導転移温度や常伝導状態での抵抗値を、KIDs については共振器の品質因子や共振周波数といったそれぞれの検出器の基礎特性を評価した。[14] 加えて、実際の実験では大量の素子を同時読み出しする必要があるため、超伝導検出器を複数同時読み出しするための準備を行っている。そのために、希釈冷凍機のサンプルスペースの拡張、配線の導入準備を整えまた、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、Simons Observatory に採用され、1 台目の望遠鏡システムへの統合作業が進んでいる。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、チリ・アタカマでの観測開始を目前に控える。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] Frederick Matsuda, *et al.*, “The POLARBEAR Fourier Transform Spectrometer Calibrator and Spectroscopic Characterization of the POLARBEAR

Instrument," *Review of Scientific Instruments*, 90(11):115115 (2019)

[2] The POLARBEAR Collaboration, "Measurement of the Cosmic Microwave Background Polarization Lensing Power Spectrum from Two Years of POLARBEAR Data," arXiv:1911.10980 (Nov 2019)

[3] The POLARBEAR Collaboration, "A Measurement of the Degree Scale CMB $B$-mode Angular Power Spectrum with POLARBEAR," arXiv:1910.02608 (Oct 2019)

[4] The POLARBEAR Collaboration and Subaru HSC SPP Collaboration, T. Namikawa, *et al.*, "Evidence for the Cross-correlation between Cosmic Microwave Background Polarization Lensing from Polarbear and Cosmic Shear from Subaru Hyper Suprime-Cam," Astrophys. J., 882(1):62 (Sep 2019)

[5] The POLARBEAR Collaboration, "Cross-correlation of POLARBEAR CMB Polarization Lensing with High-z Sub-mm Herschel-ATLAS galaxies," Astrophys. J., 886(1):38 (Nov 2019)

[6] S. Takakura, *et al.*, "Measurements of Tropospheric Ice Clouds with a Ground-based CMB Polarization Experiment, POLARBEAR," Astrophys. J., **870**:102 (2019).

[7] Simons Observatory Collaboration, "The Simons Observatory: Science goals and forecasts," JCAP **1902** (2019) 056.

[8] The POLARBEAR Collaboration, "Internal delensing of cosmic microwave background polarization $B$-modes with the POLARBEAR experiment," *arXiv e-prints*, arXiv:1909.13832 (Sep 2019)

[9] Zack Li, *et al.*, "The cross correlation of the ABS and ACT maps," *arXiv e-prints*, arXiv:2002.05717 (Feb 2020)

(会議抄録)

[10] D. Kaneko, *et al.*, "Deployment of POLARBEAR-2A," J. Low. Temp. Phys. 1-11 (2020)

[11] Y. Chinone, *et al.*, "Results of gravitational lensing and primordial gravitational waves from the POLARBEAR experiment," *Journal of Physics: Conference Series*, 1468:012007 (Feb 2020)

[12] T. Elleflot, *et al.*, "Effect of Stray Impedance in Frequency-Division Multiplexed Readout of TES Sensors in POLARBEAR-2b," J. Low. Temp. Phys. (2020). https://doi.org/10.1007/s10909-020-02387-5

[13] Mayuri Sathyanarayana Rao, Maximiliano Silva-Feaver, *et al.*, "Simons Observatory Microwave SQUID Multiplexing Readout: Cryogenic RF Amplifier and Coaxial Chain Design," J. Low. Temp. Phys. (2020). https://doi.org/10.1007/s10909-020-02429-y

[14] K. Kiuchi, *et al.*, "Development of large array of Kinetic Inductance Detectors Using Commercial-Class External Foundries," J. Low. Temp. Phys. (2020)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[15] Yuji Chinone, "Constraints on primordial gravitational waves from POLARBEAR data and the cross-correlation of gravitational lensing with optical survey by the Subaru HSC," TeV Particle Astrophysics (TeVPA) 2019, Dec 2019, Sydney, Australia.

(国内会議)

一般講演

[16] 西野 玄記, 他 POLARBEAR コラボレーション, "POLARBEAR-2 実験の現状," 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月, 山形大学.

[17] 西ノ宮 ゆめ, 他 Simons Observatory コラボレーション, "CMB 偏光観測に用いる TES 性能評価における環境・手法の開発," 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月, 山形大学.

[18] 村田 雅彬, 他 Simons Observatory コラボレーション, "Simons Observatory 実験での CMB 偏光測定に向けたワイヤーグリッドを用いた偏光較正装置の開発," 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月, 山形大学.

[19] 木内 健司, 他 Simons Observatory コラボレーション, " 次世代 CMB 偏光観測実験 SimonsObservatory の研究開発状況," 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月, 山形大学.

[20] 茅根 裕司, "CMB データ解析—生データからパワースペクトル、宇宙論パラメータまで—," 京都大学高エネルギー物理学研究室セミナー, 2019 年 11 月, 京都大学.

[21] 茅根 裕司, "宇宙マイクロ波背景放射観測実験 POLARBEAR による重力レンズ起源及び原始重力波起源 B モード偏光観測の最新結果とブラインド解析," 国立天文台談話会, 2019 年 12 月, 国立天文台 三鷹キャンパス.

[22] 茅根 裕司, " POLARBEAR 実験: 重力レンズ起源及び原始重力波起源宇宙マイクロ波背景放射 B モード観測の最新結果と次の 10 年," 弘前大学宇宙グループセミナー, 2020 年 3 月, 弘前大学.

[23] 茅根 裕司, 他 POLARBEAR コラボレーション, "POLARBEAR 実験による最新 B モード偏光観測結果の総括," 日本物理学会第 75 回年次大会, 2020 年 3 月, 名古屋大学.

[24] 西野 玄記, 他 POLARBEAR コラボレーション, "POLARBEAR-2/Simons Array 実験の現状," 日本物理学会第 75 回年次大会, 2020 年 3 月, 名古屋大学.

[25] 村田 雅彬, 他 Simons Observatory コラボレーション, “Simons Observatory 実験における CMB 偏光測定に向けたスパースワイヤーを用いた偏光較正装置の製作と自動化機構の制御,” 日本物理学会第 75 回年次大会, 2020 年 3 月, 名古屋大学.

[26] 西ノ宮 ゆめ, 他, “CMB 偏光観測に用いる TES の熱的・電気的特性評価の進捗および光学評価の準備状況,” 日本物理学会第 75 回年次大会, 2020 年 3 月, 名古屋大学.

[27] 木内 健司, 他 Simons Observatory コラボレーション, “Simons Observatory 実験の小口径望遠鏡に用いる低温光学筒の開発,” 日本物理学会第 75 回年次大会, 2020 年 3 月, 名古屋大学.

招待講演

[28] 茅根 裕司, “宇宙マイクロ波背景放射観測の現在と未来: POLARBEAR 実験と次の十年,” 第 8 回観測的宇宙論ワークショップ, 2019 年 12 月, 東北大学青葉山キャンパス.

## 6.8 竹内研究室

自然界には、本質的に非平衡な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例が散見される。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、様々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を支配する物理法則の理解を目指し、液晶・粉体などのソフトマターや、バクテリアなどの微生物を用いた様々な実験課題を展開している。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。2019 年度は、以下のような課題に取り組んだ。

### 6.8.1 ソフトマター系の非平衡実験

#### 液晶乱流界面成長

ランダム界面成長などの非平衡ゆらぎを記述する Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 普遍クラスは、非線形非平衡な多体問題であるにも拘らず数多くの厳密な結果が導かれ、注目されている。我々は、液晶に電圧をかけて乱流状態を生成し、その成長過程を調べて、KPZ クラスに関する厳密解と直接比較可能な実験結果をあげてきた [9, 45, 51]。KPZ クラスの顕著な特徴の 1 つは、円形界面と平面界面で異なる普遍法則に従うことである。そこで我々は、レーザーホログラフィ技術を応用し、所与の半径の円環から液晶乱流を成長させて、ゆらぎの計測を行った。その結果、平面界面の普遍法則から円形界面の普遍法則へのクロスオーバーを見出し、その普遍スケーリング関数を実験的に決定することに成功した。さらに我々は、厳密解研究で使われている変分公式の数値的評価方法を提案し、それにより本クロスオーバー現象が定量的に再現できることを示した（図 6.8.1）[7, 22, 23, 47]。本成果は、変分公式が、厳密解研究だけでなく、任意形状の成長界面ゆらぎの予言や説明にも使える実用性があることを示すものであり、KPZ に関する様々な実験研究に有用だろうと期待される。

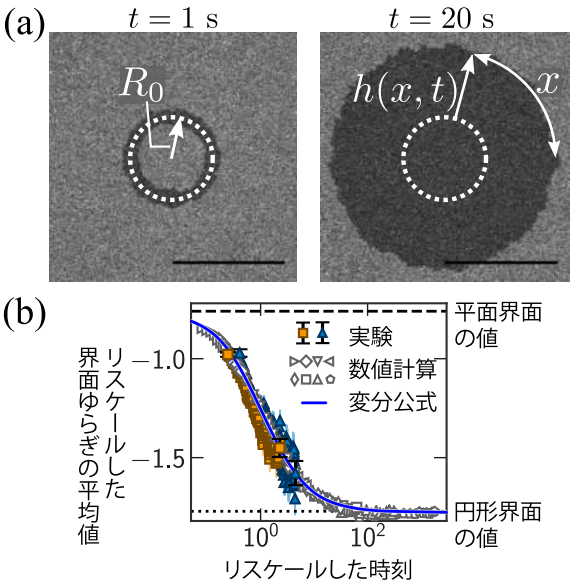



図 6.8.1: 円環状の界面成長 (a) と普遍ゆらぎ (b)[7]

#### 液晶乱流の電流計測による発熱ゆらぎの統計解析

液晶電気対流の乱流状態には、動的散乱モード (dynamic scattering mode, DSM) 1,2 と呼ばれる二種類の相があり、吸収状態転移という種別の非平衡相転移を示す実験系として注目されている。吸収状態は、ひとたび入れば他の状態には移れない、すなわち逆過程が起こらない、特別な状態のことを指す。一方で、非平衡統計力学で重要な「ゆらぎの定理」では、エントロピー生成に相当する量として順過程と逆過程の遷移確率の比が扱われるが、吸収状態が関わるプロセスで同様の量を評価すると発散してしまう。実験的には発熱の発散はあり得ないため、我々は電気対流系の電圧電流同時計測により Joule 熱を調べることで、この相違の理解と解決を目指している。特に、吸収状態転移である DSM1-DSM2 転移の

際にも発熱量の異常性は一切認められないこと、転移点近傍において DSM1・DSM2 が共存する場合は、発熱量ゆらぎの非 Gauss 性が顕著となることを見出した。

### 液晶トポロジカル欠陥の 3 次元動力学を可視化

トポロジカル欠陥は様々な物理分野で重要な役割を果たす、普遍的な概念である。欠陥研究において、液晶は、光学観察のし易さなどの理由から重要な役割を果たしてきたが、その 3 次元構造を時間発展も含めて観察することは困難だった。そこで我々は、蛍光色素が欠陥に吸着するという最近の報告を応用して、高速の共焦点観察法によって、液晶の線欠陥の直接観察に取り組んでいる。乱流からの緩和過程を本手法で観察し、再結合など、欠陥の特徴的な 3 次元動力学を、十分な時空間分解能で捉えることに成功した（図 6.8.2）[26, 27, 28, 33, 40, 47]。

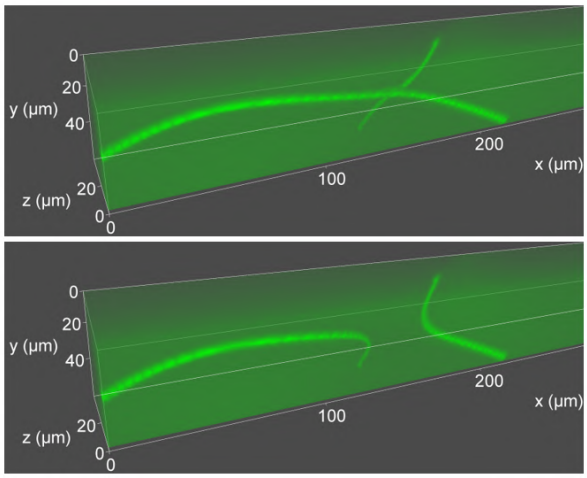



図 6.8.2: 液晶トポロジカル欠陥の再結合の様子

### 周期的せん断下の高密度粉体系の可逆不可逆転移

近年、周期的なせん断をかけた分散系において、せん断振幅によって粒子の運動が可逆的な運動から不可逆的な運動に変化する、可逆不可逆転移と呼ばれる非平衡相転移が報告されている。低密度系では相転移の性質が比較的よく理解されているが、高密度系については理論的理解がほぼなく、一方で降伏転移などレオロジーとの関連が指摘されるなど、大変興味深い現象である。我々は、光弾性材料で構成した粉体系（図 6.8.3）に周期的せん断をかけることで、運動と相互作用を同時観察し、高密度系の可逆不可逆転移の理解を目指している。これまでの研究で、可逆相と不可逆相では、相互作用ネットワークの時間変化に質的な違いが生じることを見出しており、運動の可逆性変化との関連を調べている [12, 21, 32]。

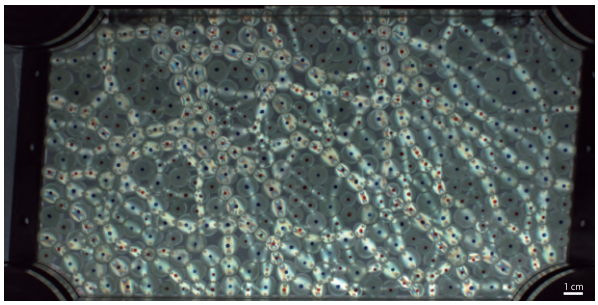



図 6.8.3: 周期的せん断下の光弾性粉体系

### 周期的に駆動される自走コロイドのダイナミクス

環境からエネルギーを取り込み運動に転化する、自己駆動粒子系は、近年アクティブマター分野で活発に研究されている。我々は、導電液体中の誘電体コロイド粒子に電場を印加することで粒子が自走する Quincke 現象に注目し、交流電場を使うことで時間依存の自己駆動力をもつ Quincke 粒子系を観察して、運動と相関の解析を行った。その結果、外場の周期変動より長い時間スケールの非自明な運動が出現すること、それに伴って平均二乗変位が異常な挙動を示すことや、複数粒子がクラスターを形成することなどを発見した [10, 20, 44]。

## 6.8.2 微生物系の非平衡実験

### 広域マイクロ灌流系の開発

近年、微小流体デバイスを用いた微生物観察実験が広く行われているが、高密度のバクテリア集団を一様な環境下で長時間計測することは困難だった。そこで我々は、多孔質メンブレンを介して液体培地を系全体に一様に供給することで、高密度バクテリア集団を長時間、制御した環境下で計測することが可能な新しい微小流体デバイス、「広域マイクロ灌流系」を開発した [1, 2, 17, 35, 36]。図 6.8.4 に示すように、メンブレンを多孔性 PET 膜で補強することで、従来のメンブレン型デバイスより遥かに広い領域でバクテリア集団を空間一様な条件下で培養・観察でき、送液切替により環境変化も扱うことができる。我々は広域マイクロ灌流系を用いて、バクテリア集団の様々な集団的現象を計測し、バクテリア集団の統計力学実験を精力的に推進している。

### 細胞サイズゆらぎのスケール不変性

一定の条件下で単一の細胞種を観察しても、細胞の大きさはまちまちだ。では、細胞サイズのゆらぎにはどのような統計的性質があるだろうか。単細胞の真核生物の場合、種ごとに細胞の体積分布は違うし、平均値も異なる。しかし、細胞体積を、その種の平均体積で規格化して分布を測ると、結果は種に依

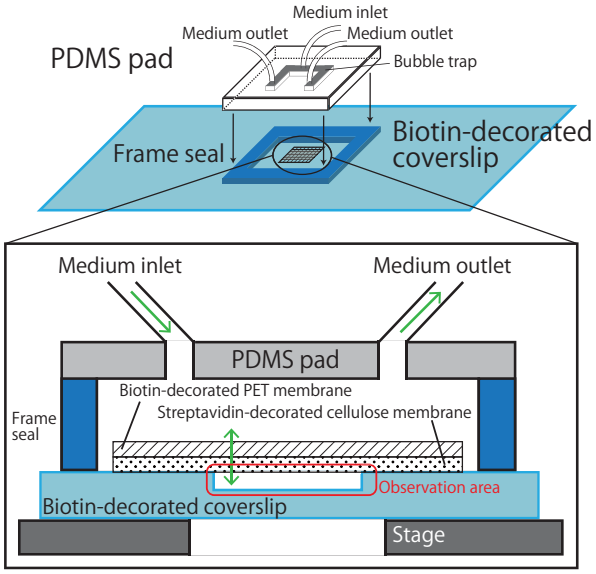



図 6.8.4: 広域マイクロ灌流系の構成概略

らないという報告があった。これはスケール不変性と呼ばれ、ある種のバクテリアでも、異なる培養条件に対してスケール不変性が報告されている。我々は、定常環境において知られていたスケール不変性が、変動する環境下でも頑健に成り立つのかを問い、検証を行った。大腸菌は、成長条件から飢餓条件に移り変わる際に、細胞サイズが小さくなることが知られている。我々は、広域マイクロ灌流系で培地切替をし、時間依存する体積分布を定量的に計測、解析したところ、各時刻の平均体積で規格化すればスケール不変性が成立することを発見した。さらに、細胞周期モデルの数値計算や、従来研究における他種細胞データとの比較から、細胞内の自己複製プロセスが細胞サイズ分布に決定的な影響を与えている可能性を指摘した [1, 2, 17, 19, 30, 34, 35, 36]。

### バクテリア集団の競合過程

複数種のバクテリア集団が増殖し、相互作用する競合過程は、生態系のモデル系としての意義に加え、マクロ非平衡系のパターン形成やスケーリング則の観点からも興味深い。我々は、開放系における二種バクテリア集団の競合過程の単純なモデルを提案し、それが voter モデルの普遍的スケーリング則を示すことを数値的・理論的に発見した [5, 14, 16]。

我々はまた、広域マイクロ灌流系を用いて、二種の大腸菌集団の競合過程を閉鎖系で実験的に実現し、観察を行った。結果、各種の占める領域は競合過程によってフラクタル化し、その形成にトポロジカル欠陥が重要な役割を果たしていることを見出した [11]。これは、active nematics 系の欠陥が担う新たな役割を示唆する興味深い結果である。

### 運動性バクテリア集団の混み合い

広域マイクロ灌流系を用いると、閉鎖空間でバクテリアを培養し続けることができ、従来の系では到達不可能な密度までバクテリア懸濁液の活性を維持し、タイムラプス観察が可能である。我々は、運動性大腸菌をこのような高密度条件下で観察することにより、混み合い現象の計測を行っている。増殖による高密度化によって自発的に混雑相への転移が起こり、転移点近傍では不均一な運動状態が自発的に形成される。我々は、菌の蛍光標識と画像解析、蛍光ビーズのトラッキング等により、その運動状態の定量的解析を進めている [3, 31, 38, 39]。

### バクテリア乱流の渦秩序形成

大腸菌や枯草菌などの遊泳する棒状バクテリアは、高密度で乱流のような状態を示す。このような乱流状態を、微細加工技術により作成した直径 20 $\mu$m 程度の微小な柱の格子構造中に流し込むと、隣同士の渦が逆回転する反強磁性渦格子秩序を自発的に形成する。我々はこの微小な柱がバクテリアの速度場のトポロジカル欠陥として振舞っていること、またその欠陥の巻き数が柱の直径とともに増加することを発見した。この性質を連続場記述において再現する新たな境界条件を実験的に見出し、数値計算および解析理論によりその妥当性を証明した。これにより、バクテリア集団運動における渦秩序発現条件の統一的理解を得ることができた。さらにこの理解に基づいて、適切な位置に周期的に柱を配置することで、例えば図 6.8.5 のカゴメ格子中での渦秩序のように、ミラー対称性が自発的に破れた渦秩序など新たな秩序状態が実現可能であることを理論・数値的に予言した。[4, 8, 24, 25, 37, 41, 42, 43, 48, 49, 50, 52, 54, 55]。

### 髄膜炎菌の IV 型線毛ダイナミクス

多くのバクテリアが共通して持つ運動機構である IV 型線毛は、宿主細胞への感染初期段階の接着などに用いられる。モデル生物として髄膜炎菌 *Neisseria meningitidis* を用いて、パスツール研究所の Duménil 研究室と共同研究を行なった。線毛が宿主細胞の細胞膜に接着する過程を詳細に理解するため、我々は、髄膜炎菌から精製した線毛を微小流路中で培養した宿主細胞上に撒いた。結果、線毛の先端のみが最初に細胞に付着し、その後、ある一定強度以上のせん断流を加えると線毛全体が細胞表面に不可逆的に接着することが明らかとなった。この実験結果を低レイノルズ数での流体力学と確率過程理論を組み合わせることで説明し、線毛の接着が先端から開始することを理論的に説明することにも成功した [6, 52, 55]。

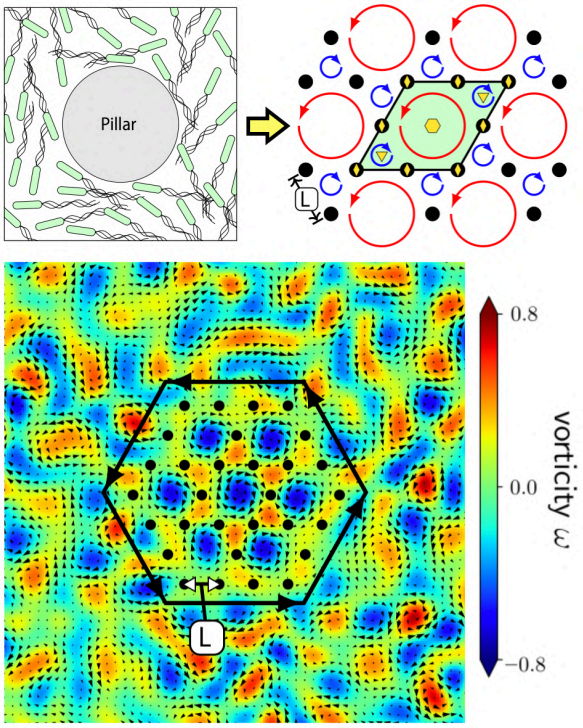



図 6.8.5: カゴメ格子での渦秩序形成（数値計算）[8]

### 6.8.3 非線形動力学によるアプローチ

#### 大自由度カオス系の不安定性計測手法の開発

カオスは摂動に対する不安定性から定義することが多く、不安定性の定量的な指標である Lyapunov 指数は最も重要な特徴量の 1 つである。実験的に Lyapunov 指数を測定する代表的な方法は、時系列の再帰解析であるが、大自由度系では十分な再帰頻度が得られず、Lyapunov 指数の計測は困難だった。我々は、対称性の高い大自由度系では、局所的な時間発展が少数変数で記述できる事実に注目し、それに対応する空間で再帰解析を行うことで、問題解決を目指している。大域結合系に対しては実際にその手法を実装し、写像系や微分方程式系の数値計算によって時系列解析からすべての Lyapunov 指数を正しく推定できることを実証した [15, 18, 29]。均一な隣接相互作用系においても同様の手法を適用し、検証を進めている。

＜受賞＞

[1] T. Shimaya, EBSA poster prize, The European Biophysical Societies' Association, JOINT 12th EBSA congress 10th ICBP – IUPAP congress, Jul. 24, 2019.

[2] 嶋屋拓朗, ポスターセッション優秀賞, 第 64 回物性若手夏の学校, 2019 年 8 月 8 日.

[3] 山本真大, ポスターセッショングッドデザイン賞, 第 64 回物性若手夏の学校, 2019 年 8 月 8 日.

[4] 西口大貴, 第 14 回 日本物理学会若手奨励賞（領域 11）, 2020 年 3 月 16 日.

＜報文＞

(原著論文)

[5] T. Shimaya and K. A. Takeuchi, Lane formation and critical coarsening in a model of bacterial competition. Phys. Rev. E **99**, 042403 (2019).

[6] P. Kennouche, A. Charles-Orszag, D. Nishiguchi, S. Goussard, A.-F. Imhaus, M. Dupré, J. Chmot-Rooke and G. Duménil, Deep mutational scanning of the *Neisseria meningitidis* major pilin reveals the importance of pilus tip-mediated adhesion. EMBO J. **38**, e102145 (2019).

[7] Y. T. Fukai and K. A. Takeuchi, Kardar-Parisi-Zhang Interfaces with Curved Initial Shapes and Variational Formula. Phys. Rev. Lett. **124**, 060601 (2020).

[8] H. Reinken, D. Nishiguchi, S. Heidenreich, A. Sokolov, M. Bär, S. H. L. Klapp and I. S. Aranson, Organizing bacterial vortex lattices by periodic obstacle arrays. Comm. Phys. *in press* (2020).

(会議抄録)

[9] 竹内一将, KPZ 普遍クラス – 厳密解と実験が奏でる非平衡のスケーリング則. 物性研究・電子版 **8**, 081205 (2020).

(国内雑誌)

(学位論文)

[10] Airi N. Kato, Non-equilibrium dynamics of periodically driven active colloids. PhD thesis (Univ. Tokyo), 2020.

[11] 井上皓平, 微小流体デバイスを用いた二種の大腸菌の集団競合の観測. 修士論文（東京工業大学）, 2020.

[12] 登坂遼一, 光弾性粒子を用いた可逆不可逆転移の実験. 修士論文（東京工業大学）, 2020.

(著書)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[13] R. A. L. Almeida and *K. A. Takeuchi, Revisiting Model-A dynamic scaling laws in twisted nematics: phase ordering and critical percolation. FSP2019: Frontiers of Statistical Physics, poster, Tokyo (Japan), Jun. 7, 2019.

[14] T.Shimaya and K. A. Takeuchi, Critical coarsening in a model of bacterial mixture inside a channel. FSP2019: Frontiers of Statistical Physics, poster, Tokyo (Japan), Jun. 7, 2019.

[15] T. P. Shimizu and K. A. Takeuchi, Measuring instability of large chaotic systems by time series analysis. FSP2019: Frontiers of Statistical Physics, poster, Tokyo (Japan), Jun. 7, 2019.

[16] T.Shimaya and K. A. Takeuchi, Critical coarsening in a model of bacterial competition inside a channel. StatPhys 27, talk, Buenos Aires (Argentina), Jul. 8, 2019.

[17] T.Shimaya, R. Okura, Y. Wakamoto and K. A. Takeuchi, Development of a new microfluidic device for observing dense bacterial populations in a controlled environment. JOINT 12th EBSA congress 10th ICBP - IUPAP congress , poster, Madrid (Spain), Jul. 21, 2019.

[18] T. P. Shimizu and K. A. Takeuchi, Measuring Lyapunov spectrum of large chaotic systems with global coupling by timeseries analysis. Dynamics Days Europe 2019, talk, Rostock (German), Sep. 5, 2019.

[19] T.Shimaya, R. Okura, Y. Wakamoto and K. A. Takeuchi, Scale invariance of bacterial body size fluctuation during starvation. Workshop on Physics of Soft, Active and Living Matter, poster, Chiba (Japan), Jan. 7, 2020.

[20] A. N. Kato, K. A. Takeuchi and Masaki Sano, A periodically driven active colloid and its dynamic clustering. Workshop on Physics of Soft, Active and Living Matter, poster, Chiba (Japan), Jan. 7, 2020.

[21] R. Tosaka and K. A. Takeuchi, Reversible-Irreversible transition in a densely packed photoelastic disk system, poster, Miyagi (Japan), Mar. 24, 2020. （新型コロナウイルスのため会議中止）

招待講演

[22] K. A. Takeuchi, Revisiting circular vs flat interfaces and application of variational principle. MECO44 (44th Conference of the Middle European Cooperation), invited talk, Seeon (Germany), May 3, 2019.

[23] K. A. Takeuchi, Disclination turbulence - from defect dynamics to macroscopic scaling laws -. 2019 Gordon Conference on Liquid Crystals, invited talk, New London (USA), July 10, 2019.

[24] D. Nishiguchi, Novel boundary conditions and topology of bacterial turbulence. Workshop on Physics of Soft, Active and Living Matter, invited talk, Tokyo (Japan), Mar. 9, 2020.

[25] D. Nishiguchi, Boundary conditions and flow topology of bacterial turbulence. Jammed matter and its non-Gaussian fluctuations, invited talk, Miyagi (Japan), Mar. 23, 2020.（新型コロナウイルスのため会議中止）

(国内会議)

一般講演

[26] 竹内 一将, 液晶トポロジカル欠陥の三次元ダイナミクス観察, さきがけ「トポロジー」領域 第 1 回領域全体会議, 講演, 静岡,2019 年 5 月 14 日.

[27] 竹内 一将,Observing dynamics of topological defects in liquid crystal: toward understanding their hierarchical structure, 新学術領域「クラスター階層」第二回クラスター階層領域研究会, 講演, 東京工業大学,2019 年 6 月 1 日.

[28] 図司陽平, 竹内一将, ネマティック液晶中における欠陥ダイナミクスの 3 次元計測. 第 64 回 物性若手夏の学校, ポスター・講演, 岐阜, 2019 年 8 月 6,7 日.

[29] 清水太朗, 竹内一将, 時系列解析で大自由度カオス系の不安定性を測定する. 第 64 回 物性若手夏の学校, ポスター, 岐阜, 2019 年 8 月 7 日.

[30] 嶋屋拓朗, 大倉玲子, 若本祐一, 竹内一将, 眠る大腸菌の過渡ダイナミクス〜 1 細胞形態から集団構造へ〜. 第 64 回 物性若手夏の学校, ポスター, 岐阜, 2019 年 8 月 7 日.

[31] 山本真大, 古田祐二朗, 竹内一将, 高密度バクテリア集団のガラス的ダイナミクス. 第 64 回 物性若手夏の学校, ポスター, 岐阜, 2019 年 8 月 7 日.

[32] 登坂遼一, 竹内一将, 光弾性粒子を用いた高密度粒子系における可逆不可逆転移の実験, 日本物理学会 2019 秋季大会, 講演, 岐阜大学,2019 年 9 月 12 日.

[33] 図司陽平, 竹内一将, ネマティック液晶中における欠陥ダイナミクスの 3 次元計測. 日本物理学会 2019 年秋季大会, 講演, 岐阜大学, 2019 年 9 月 12 日.

[34] 嶋屋 拓朗, 大倉 玲子, 若本 祐一, 竹内 一将, 飢餓状態における大腸菌集団の形態応答. 日本物理学会　2019 秋季大会, 講演, 岐阜大学, 2019 年 9 月 12 日.

[35] 嶋屋 拓朗, 大倉 玲子, 若本 祐一, 竹内 一将, Bundle structure and single-cell morphology in E. coli populations during transient to a starvation condition. 第 57 回日本生物物理学会年会, ポスター, シーガイアコンベンションセンター, 2019 年 9 月 25 日.

[36] 嶋屋 拓朗, 大倉 玲子, 若本 祐一, 竹内 一将, 広域マイクロ灌流系でみる細菌の Reductive division. 新学術領域研究「生命の情報物理学」第一回領域会議, 講演・ポスター, 沼津, 2019 年 10 月 2 日.

[37] 西口 大貴, Andrey Sokolov, Alexey Snezhko, Henning Reinken, Sebastian Heidenreich, Markus Bär, Sabine H.L. Klapp, Igor S. Aranson, アクティブマターのジオメトリーと渦秩序形成. 新学術領域研究「生命の情報物理学」第一回領域会議, 講演・ポスター, 沼津, 2019 年 10 月 2 日.

[38] 山本 真大, 古田 祐二朗, 竹内 一将, 大腸菌集団の active jamming / MIPS ?. 新学術領域研究「生命の情報物理学」第一回領域会議, 講演・ポスター, 沼津, 2019 年 10 月 2 日.

[39] 竹内 一将, マクロ非平衡系の揺らぎと秩序形成 & 生命現象との関わり. 新学術領域研究「生命の情報物理学」第一回領域会議, 講演・ポスター, 沼津, 2019 年 10 月 2-3 日.

[40] 竹内 一将, 液晶トポロジカル欠陥の三次元ダイナミクス観察, さきがけ「トポロジー」領域 第 2 回領域全体会議, 講演, 名古屋,2019 年 11 月 25 日.

[41] 西口 大貴, Andrey Sokolov, Henning Reinken, Sebastian Heidenreich, Markus Bär, Sabine H.L. Klapp, Igor S. Aranson, バクテリア乱流の反強磁性渦秩序とトポロジカル制御. 情報物理学でひもとく生命の秩序と設計原理 第 27 回 渦糸物理ワークショップ, 講演, 京都大学理学研究科セミナーハウス 京都, 2019 年 12 月 18 日.

[42] 西口 大貴, Andrey Sokolov, Henning Reinken, Sebastian Heidenreich, Markus Bär, Sabine H.L. Klapp, Igor S. Aranson, Novel boundary conditions and topological dynamics of bacterial turbulence. アクティブマター研究会 2020, 講演, 明治大学中野キャンパス東京, 2020 年 1 月 10 日.

[43] 西口大貴, Henning Reinken, Sebastian Heidenreich, Andrey Sokolov, Markus Bär, Sabine H.L. Klapp, Igor Aranson, バクテリア乱流の境界条件と流れ場のトポロジー. 日本物理学会　2020 年次大会, 講演, 名古屋大学, 2020 年 3 月 16 日.

[44] 加藤愛理, 竹内 一将, 佐野雅己, 周期的に駆動されるアクティブコロイドの非平衡ダイナミクス. 日本物理学会　2020 年次大会, 講演, 名古屋大学, 2020 年 3 月 17 日.

招待講演

[45] 竹内一将, KPZ 普遍クラス －厳密解と実験が奏でる非平衡のスケーリング則－. 第 64 回 物性若手夏の学校, 招待講義, 岐阜, 2019 年 8 月 6-8 日.

[46] 竹内一将, 乱流転移に現れる臨界現象、普遍性. 流体若手夏の学校 2019, 招待講義, 京都, 2019 年 8 月 20-21 日.

[47] K. A. Takeuchi, Dynamic scaling of liquid crystal defects: microscopic and macroscopic views. Quantized vortices and nonlinear waves, 招待講演, 大阪, 2020 年 3 月 4 日.（新型コロナウイルスのため会議中止）

[48] 西口大貴, アクティブマターの集団運動における秩序発現と普遍法則に関する実験. 日本物理学会　2020 年次大会, 第 14 回若手奨励賞（領域 11）受賞記念講演, 名古屋大学, 2020 年 3 月 16 日.

[49] 西口大貴, アクティブマターの集団運動における秩序・ゆらぎ・トポロジー. パリ異分野融合科学者の会 第 2 回研究会, 招待講演, 名古屋工業大学, 2020 年 3 月 17 日.（新型コロナウイルスのため会議中止）

(セミナー・集中講義)

[50] Daiki Nishiguchi, How to extract long-range order from chaotic bacterial collective motion. SFB 910 Seminar, Institut für Theoretische Physik, ベルリン工科大学, 2019 年 5 月 29 日.

[51] 竹内一将, 非平衡スケーリング則の物理学：基礎理論と実験的進展. 集中講義, 立教大学 理学研究科 物理学専攻, 2019 年 9 月 2-5 日.

(アウトリーチ)

[52] 西口大貴, バクテリアの運動力学と集団運動制御. パリ日本人研究者会, パスツール研究所, 2019 年 6 月 21 日.

[53] 監修：有賀暢迪, 佐野雅己, 企画構成：西口大貴, 谷田桜子, 国立科学博物館 企画展「物理はふしぎで美しい！ 磁石と水からひろがる相転移の世界」, 国立科学博物館 上野本館, 2020 年 1 月 28 日-2 月 9 日.

[54] 西口大貴, 相転移でひもとく生き物の群の物理，東京大学国際高等研究所東京カレッジ＋国立科学博物館共同イベント 「物理はふしぎで美しい！ 磁石と水からひろがる相転移の世界」講演会, 国立科学博物館 上野本館, 2020 年 1 月 31 日.

[55] 西口大貴, サマチャレから 10 年間、何をしてきたか？：アクティブマターとサイエンスコミュニケーション、そして研究者キャリア. KEK サマーチャレンジ世代間交流会 特別講演（招待講演）, 高エネルギー加速器研究機構 (KEK), 2020 年 2 月 22 日.

# 7　生物物理

## 7.1　能瀬研究室

脳・神経系は多数の神経細胞がシナプスという構造を介して連絡した複雑な回路である。このなかを神経インパルスが伝わることが、脳機能の基本であると考えられているが、その実体はほとんど謎のままである。一体、どのような回路の中を、どのようにインパルスが伝わることにより高度な情報処理が可能になるのか？　また、複雑な神経回路が正確に形成されるための設計図は私達の遺伝子にどのように記述されているのか？ 当研究室では、ショウジョウバエ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、バイオイメージングや遺伝子操作を用いて軸索やシナプスを可視化することにより、神経の配線が形成される仕組みを明らかにした。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だす。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。

#### ショウジョウバエ幼虫の腹部神経節の尾端の運動神経回路の解析（劉英涛、能瀬聡直、高坂洋史）

ショウジョウバエ幼虫の前進ぜん動運動は、尾端体節の筋収縮によって始まる。前進ぜん動運動は基本的に二つのステップで構成される。一つ目のステップでは、ほとんどの腹部の体節は動かないが、頭部が伸びて尾端が収縮する。この動きによって内臓が頭部方向に移動し、重心が前進する。二つ目のステップでは、尾側体節から頭側体節にかけて筋収縮が順に伝播し、各体節が前進方向に移動する。尾端の運動神経回路は、この前進ぜん動運動の二つ目のステップの最初の段階で重要な役割を担っている。この研究の目標は、尾端の運動制御に関わる介在ニューロンと前進運動の関連を解析すること、特に前進運動をトリガーするニューロンを探求することである。今年度は、まず、カルシウムイメージングを用いて少数の神経細胞をラベルする Gal4 系統の神経活動パターンに基づいたスクリーニングを遂行し、前進運動と関連する活動を持つ尾端介在ニューロンを標識する Gal4 系統を発見した。また、この尾端介在ニューロンの解析を行い、以下のことを明らかにした: 1．伝達物質として GABA を用いる抑制性ニューロンである。2．遺伝学的手法により下流ニューロンを同定した。3．カルシウムイメージングで前進運動における活動タイミングを解析し、A7 体節のモーターニューロン aCC の活動の後半段階から惹起されることを見出した。4．細胞形態の詳細な解析から、発見した介在神経細胞の細胞系譜は A31 であることを示した。今後は、詳細な機能解析によって、この尾端介在神経細胞の前進運動における役割を解明したい。

#### 複数の運動パターン生成を担う集団的神経活動の多シナプス活動イメージングによる解析（福益一司、能瀬聡直、高坂洋史）

一般に動物は様々な定型的行動を示す。これらの行動に対応する筋肉の収縮パターンは、中枢パターン生成器（Central Pattern Generator, CPG）と呼ばれる神経回路が各々の運動神経細胞の活動を調整することで生成される。この研究では、幼虫の異なる二種類の運動パターン（前進運動・後退運動）が CPG 内でどのようなダイナミクスで生成されているかを調べるため、カルシウムイメージングを用いて、神経系の CPG が存在すると思われる領域の全神経細胞の活動を同時観測した。一般に、このようにして得られる非常に高次元なデータを解析するのは困難である。そこで本研究では、蛍光強度変化の空間的なスケールを分析することによる画像の明瞭化や、統計力学的手法に基づくピクセルクラスタリングなどの画像処理を適用することで、各シナプスの活動

波形を抽出することに成功した。次に、それらシナプス間の相互作用を定量化するため、抽出された活動波形から、情報理論において定義される transfer entropy を計算し、シナプス間の情報の流れを表すネットワーク構造を構築した。さらに、得られた構造をグラフ理論に基づいて分析した。

解析の結果、幼虫の前進・後退運動に伴う神経系上の双方向の活動伝播において、それらに共通して局所的に情報の流れが集中するシナプスの集団が、神経系の節構造に沿って体軸方向に反復して存在することが分かった。また、これらのシナプス集団は、近傍のシナプスから情報を集めるとともに、前進運動と後退運動において別々の方向に情報を出力する様子が認められた。すなわち、前進・後退に応じて活動を出力する相手のシナプスを切り替えることで、これらのシナプス集団は神経活動の伝搬方向を決定づけるスイッチとして働くことが示唆された。

本研究を通じて、神経系全体を同時観測することで、あらかじめ特定の神経細胞に着目しなくとも、ある特殊な働きを持つシナプスレベルの構造を抽出することが可能であることを示した。また、同一の神経系が複数の活動パターンを示すメカニズムの解明という神経科学における一般的な命題に対して、初めて実際の生物における観測データから、活動パターンの切り替えに関わる神経系の構造を導くことができた。

#### 神経幹細胞系譜の可視化による運動制御ニューロンの網羅的三次元再構築（真中美穂、能瀬聡直、高坂洋史）

生物の多くの器官では、幹細胞と呼ばれる少数の細胞が分裂を繰り返すことで、組織を構成する細胞の生成や維持を担っている。神経系を構成する多様な細胞は、神経幹細胞の分裂によって生じ、各神経細胞がどの神経幹細胞に由来するかを記述したものを細胞系譜という。ショウジョウバエの中枢神経系では神経幹細胞 (Neuroblast、以下 NB) が発生過程において様々なニューロンを生成していくことが知られている。神経系は膨大な数の神経細胞によって構成されるため、その全体像を明らかにすることは容易ではないが、細胞系譜に則った全神経細胞の分類により、神経回路全体の配線構造に迫ることができると考えられる。ショウジョウバエ幼虫の中枢神経系のうち、運動制御を主に担う腹部神経節 (以下、VNC) は、長年にわたって神経系を細胞レベルで解析するモデルシステムとして使用されている。本研究では、GAL4-UAS システムと呼ばれる遺伝子操作を用いて、先行研究によって明らかになった特定の系統のショウジョウバエ幼虫 VNC を免疫染色することで、それぞれの Gal4 系統に対応する各 NB 由来のニューロンの位置、形態を確認した。また、10 系統を免疫染色し、得られた画像の VNC 内に一様に存在する軸索束の位置に基づいて非剛体非線形レジストレーションすることで二次元テンプレート画像を作成した。

今後はより正確で詳細な画像が得られるような遺伝子操作、実験手法を探りながら免疫染色を進めていくと共に、三次元データをレジストレーションする方法を開発し、解析を進めていく予定である。

### 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。

#### ショウジョウバエ幼虫行動の神経力学モデル構築とソフトロボットに基づくシミュレーション（孫喜洋、能瀬聡直、高坂洋史）

生物の運動は、多数の可動要素の複雑な制御が必要であるが、そのような生体力学の機構はまだ不明な点が多い。本研究では、ショウジョウバエ幼虫の運動をモデルとして用い、典型的な運動パターンについて数理的なモデルを構築すると共に、その運動を実現するソフトロボットを構成することで、動物の運動制御機構を構成的に明らかにすることを目指す。

幼虫の物理特性を明らかにするために、運動学的及び力学的測定を行なった。遺伝学的に体節境界に蛍光タンパク質を発現した系統を用いて、幼虫のぜん動運動の詳細な定量化を行なった。新領域創成科学研究科物質系専攻の伊藤耕三博士、眞弓皓一博士、劉暢博士との共同研究で、幼虫の体の物理特性を応力緩和法で計測し、弾性係数、減衰係数を求めた。更に、オプトジェネティクスと力学測定を組み合わせることによって、ショウジョウバエ幼虫の最大筋収縮力の計測に成功した。これらの力学特性を用いて標準線形モデルに基づいて幼虫の体の数理モデルを構築した。これに神経回路研究でこれまでに同定した神経細胞を組み込んだ神経回路モデルを構成し、神経回路と幼虫の身体を統合した神経力学モデルを構築した。このシミュレーションにより、適切な摩擦力下において、ショウジョウバエ幼虫がぜん動運動することを数理的に再現することに成功した。一方、空気圧チャンバーを高分子樹脂で構成し、動力源として真空ポンプを用い、Arduino で微小バルブを動的制御することで、幼虫の運動のソフトロボットにおける実現を試みた。今後、このシステムと数理シミュレーションを基に、動物の運動制御機構を明らかにしたいと考えている。

#### 画像物体認識と深層学習に基づいたショウジョウバエ幼虫運動の網羅的解析（張旭、能瀬聡直、高坂洋史）

動物は多彩な行動を示すが、これを定量的に解析するために従来は体の部分をマニュアルでラベル付けする必要があった。そのため、運動パターンを定量的に解析するためには多大な時間的コストがかかっていた。しかし、近年の機械学習アルゴリズムの開発により、動物の運動をより効率よく解析することが可能になってきた。本研究では、ショウジョウバエの遺伝学を用いて動物の体を蛍光タンパク質で標識し、深層学習を用いることで従来困難であった幼虫の運動パターンの網羅的定量化を行なった。これにより、運動パターン（前進運動、後進運動、屈曲運動、回転運動）、環境温度、動物種間（Drosophila melanogaster と Drosophila simulans）の違いによって、体節収縮のダイナミクスが異なることを定量的に明らかにすることができた。今後は、このデータセットを用いて、運動制御の調節メカニズムの運動学的機構を明らかにしたいと考えている。この研究は杏林大学の粟崎健博士との共同研究である。

### 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。

#### 複数の感覚情報を統合し後退運動を惹起する介在神経細胞の同定（宮本道人、平本篤紀、曽祥孫澤、高木優、能瀬聡直）

動物の行動を理解するためには、複数の感覚入力が脳内で統合し行動選択が行い、さらに運動を出力する神経回路機構を明らかにすることが重要である。本研究では、中枢神経系内で頭部への機械刺激や青色光による刺激を統合し後退ぜん動運動のトリガーへとつなげる後退トリガーニューロンτを同定した。光操作によりτニューロンを人為的に活性化すると後退運動が誘発された。逆に、τニューロンを含むR60F09-Gal4 標的ニューロンの活動抑制を行うと、機械刺激・青色光による後退ぜん動運動が減少した。したがって、τニューロンは後退運動の誘発に必要かつ十分なトリガーニューロンであることが示唆された。また頭部への触覚刺激を中枢に伝える胸部 T3 神経節の神経束に電流を流し刺激すると、τニューロンが活性化されることが、$Ca^{2+}$ イメージングによって観察された。このことから、τニューロンが後退ぜん動運動を起こすような感覚刺激に応じて活動することが確かめられた。また、sybGRASP を用いたシナプス間隙可視化法により、τニューロンの上流・下流に、それぞれ後退トリガーニューロンとして知られる Wave ニューロン、MDN ニューロンが存在することが分かった。 以上の結果はτニューロンが Wave ニューロンを介して受け取る触覚に関する情報、未同定のニューロンを介して受け取る視覚に関する情報を統合し、MDN ニューロンに伝えることで後退運動の制御をしていることを示唆している。今後、このような投射ニューロンの同定をさらに進めることで、行動選択過程における脳の複数領域を繋いだ制御の仕組みが明らかになると期待される。

#### ショウジョウバエ幼虫の行動制御回路の機能と形成（高木優、森瀬周、能瀬聡直）

動物は外部環境の変化や内的要請に応じて異なる定型的運動を実行する。我々は以前にショウジョウバエ幼虫の前進運動と後退運動の行動選択を担う介在神経細胞、Wave neuron を同定していた。Wave neuron は各神経節に繰り返し 1 対ずつ存在するが、前部神経節の Wave neuron が後退運動を誘発するのに対し、後部神経節の Wave neuron は前進運動を誘発することがわかっていた。また、Wave neuron は神経節によって軸索投射パターンが異なるため、この投射パターンが回路形成パターンを決め、結果的に異なる行動を制御していると考えられていた。

本研究では Wave neuron の回路形成およびその行動制御に対する寄与を解析している。昨年度までに Wave neuron の軸索誘導因子として DWnt4 を、またその受容体として Drosophila Frizzled 2(以後 DFz) 及び Drosophila Frizzled 4(以後 DFz4) を同定していた。今年度はまず Wave neuron の軸索投射における DFz2 および DFz4 の機能を詳しく解析するため、RNA 干渉法を用いて DFz2/DFz4 を Wave neuron 特異的にノックダウンして、一細胞レベルで Wave neuron を可視化するモザイク解析を行った。その結果、DFz2/DFz4 受容体がそれぞれ DWnt4 を忌避・誘引の対象として認識して Wave neuron の軸索投射パターンを神経節ごとに適切に制御している可能性が考えられた。

次に、Wave neuron の軸索投射に対する DWnt4 の機能を詳しく解析した。DWnt4 の生成を阻害するような変異を導入し、その上で、38 ℃の環境に一定時間幼虫を置くことで蛍光タンパク質を確率的に Wave neuron に発現させるモザイク解析を用いて、一細胞形態解析を試みた。その結果、前部神経節の Wave neuron の軸索を前方に誘導する仕組みには Wnt4 が関与していないことが明らかになった。

最後に、軸索投射パターンの異常が行動選択に与える影響について解析した。Wave neuron 特異的に DFz2 をノックダウンした個体を用意し、その頭部を Von Frey フィラメントで突いて反応を観察する、という実験を行った。結果として、対照群と比較して、突かれた際に後退する代わりに方向転換を行う幼虫

が多いという結果が得られ、軸索の誘導が阻害された結果、本来の後退を促進するという機能が失われたことが示唆された。今後は、軸索の誘導を阻害した際の機能の変化を更に調べるために、DFz2 ノックダウン時の一細胞オプトジェネティクスを試みたり、幼虫を背側から切開して中枢神経を露出させた状態での局所的な光照射によるオプトジェネティクスを試みたりする予定である。

### 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ミ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 ニューロンを同定した。Canon ニューロンは腹部神経節の各体節に左右対称に存在する上向性のニューロンである。Canon ニューロンの神経伝達物質を調べたところ、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により Canon ニューロンの神経回路上流と下流を同定した。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、下流に抑制性の運動前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 Canon ニューロンの活動を抑制すると、後退ぜん動運動時にのみ筋弛緩が起きにくくなることがわかった。また、Canon ニューロンは他の神経節に位置する Canon ニューロンと相互にシナプスを形成することでネットワークを形成していることも分かった。破傷風毒素を用いて Canon ニューロンの出力を抑制した結果、Canon ニューロンの活動パターンの生成が正常に行われなくなることが観察された。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。また、Canon ニューロンが Canon ニューロンの活動パターン生成に寄与していることが示唆された。本研究は、英国セントアンドリューズ大学の Stefan Pulver 博士、Julius Jonaitis 氏、米国ハワードヒューズ医学研究所ジャ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。

### ショウジョウバエ幼虫における前進運動を誘発する神経細胞 sDUM の同定 (稲葉晨介、曽祥孫澤、能瀬聡直)

動物は様々な定型的な運動（歩行、呼吸など）を行う。その中でも前進運動は多くの動物に共通した最も一般的な運動の一つである。本研究でモデル動物として用いたショウジョウバエ幼虫においても、前進運動は一般的な運動の一つである。しかし、ショウジョウバエ幼虫の前進運動を誘発するようなニューロンは知られていない。そこで、本研究では、前進運動誘発ニューロンの同定を試みた。ショウジョウバエ幼虫に存在する約 1 万個のニューロンから無作為に前進運動誘発ニューロンを探すのは難しい。そこで、先行研究によって前進運動への関与が示唆されていた、オクトパミン、チラミンを神経伝達物質として持つ神経細胞群（Tdc2 ニューロン群）に着目した。まず Tdc2 ニューロン全てを標的する GAL4 系統と optogenetics を用いて、Tdc2 ニューロン全てを活性化させる研究を行った。その結果、Tdc2 ニューロン群に前進運動誘発ニューロンが存在していることが分かった。さらに、いくつかの GAL80 系統やモザイク解析を用いることで、T1 神経分節に細胞体が存在しているニューロンを前進運動誘発ニューロンとして同定することに成功し、sDUM と名付けた。

### 前進運動の制御に関わる候補ニューロン A18f の解析（川崎賢人、稲葉晨介、高坂洋史、能瀬聡直)

当研究室の以前の研究により、A27h と GDL 介在ニューロンから構成される神経回路が、幼虫の前進運動において体節間の活動伝播を制御しているということが示されている。今回、コネクトミクス解析により、A27h, GDL や他の前進運動制御ニューロンの上流に存在するニューロンとして A18f を同定した。さらに、A18f ニューロンが前進運動の制御に関わるのかを調べるために以下の実験を行った。まず、免疫染色とオプトジェネティクスを組み合わせた実験を行った。A18f ニューロンを免疫染色した結果、頭側へ 2、3 体節分軸索を伸ばしていることが分かった。次に、オプトジェネティクスを用いた行動実験により、A18f ニューロンを短時間活性化させると、前進運動の頻度が増えることが分かった。さらに、免疫染色により A18f ニューロン群の神経伝達物質を調べると、アセチルコリン作動性であること、すなわち興奮性のニューロンであることが分かった。以上の結果より、A18f が興奮性の働きを通じて前進運動に関係していることが示唆された。今後は、カルシウムイメージング法を用いて A18f ニューロンが下流のニューロンに対してどのような活動を促すのか、そして A18f ニューロンがどのような回路メカニズムを介して前進運動を制御しているのかを解明していく。

### 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。

#### 感覚フィードバックによる運動回路の自己組織化（曽祥孫澤、川崎達平、能瀬聡直）

母親の体内で手足を動かすヒトの胎児のように、多くの動物はまだ子宮や卵の中にいる発生期から運動を開始する。このような自発的な活動の意義についてまだ明らかになっていない。本研究ではショウジョウバエの胚発生過程において自発的な活動パターンを生み出すために、元となった神経回路およびその活動によって活性化される感覚フィードバックが運動回路の発達に与える影響を探ることを目的とした。我々はこれまでに体性感覚を特異的に阻害する変異体を利用することで、感覚フィードバックが運動パターンの形成において重要な役割をもつことを示した。本年度は感覚フィードバックに影響を受ける下流神経細胞に着目し、運動回路の発達において特に重要であるM/A 27 h回路を同定した。M/A 27 h回路は腹部の各神経分節に存在するMとA 27 h二種類のニューロンから構成され、運動回路発生の初期から電気結合を介して同期活動していた。また、MニューロンはIP3 受容体を介して細胞自身の小胞体からカルシウムを放出することによって、上記の活動パターンを生成していることも分かった。これらの結果から、M ニューロンそれ自体が運動回路において自律的なリズムを生み出し、電気シナプスを介して運動神経細胞に活動を伝えることにより、筋肉を収縮させることが示唆された。実際に、IP3 受容体を特異的に阻害し、筋収縮への影響を調べた結果、野生型に比べると収縮の頻度が有意に減少した。さらに、筋収縮によって生成する感覚フィードバックを阻害すると、M/A 27 h回路内の電気結合が大きく損なわれることも分かった。以上の結果から、M/A27h回路は運動系の発生初期において自発的に筋肉を動かし、体性感覚のフィードバックを通じて自身の神経結合を制御することで、適切な運動回路を発達させることが明らかとなった。本研究は理化学研究所の風間北斗博士、稲田健吾博士との共同研究である。

#### 神経修飾物質による運動回路の機能発達 (李子源、曽祥孫澤、能瀬聡直)

歩行、遊泳、飛行のように、動物は様々な運動を行うことによって周囲の環境に適応しながら生息している。これらの運動パターンは中枢パターン生成回路 (CPG) によって生成されるが、CPG は個体発生の過程において段階的に形成されることが知られている。しかし、この発達過程を制御する要因については不明の点が多い。そこで、本研究はシナプスの伝達、可塑性、形成などと大きく関わっている神経修飾物質—特にモノアミン系伝達物質に着目し、その運動回路の発達における役割を調べることを目的とした。そのため、光遺伝学、RNA 干渉法などを用いて、セロトニン、ドーパミンを神経伝達物質として持つニューロン群の活動を亢進、抑制するなどの実験を行っている。今後、各神経修飾物質が運動パターンの形成において果たす役割を明らかにしていくとともに、カルシウムイメージング、コネクトミクスなどの手法を用いて、運動回路の形成に対して特に重要である細胞、回路を同定する予定である。神経伝達物質および個々の細胞が織りなす基本的な回路構造はヒトを含めた高等動物にも進化的に保存されているため、本研究によって動物の発達過程、回路の作動機構などへの理解に大きく貢献できると期待している。

＜受賞＞

[1] 孫喜洋、ポスター発表優秀賞、The 3rd Joint Symposium on Integrated Biosciences between Zhejiang University and the University of Tokyo、2019.11.25

[2] 平本篤紀、NEURO2019 国内 Travel Award、第 42 回日本神経科学大会、2019.7.25

[3] 福益一司、NEURO2019 国内 Travel Award、第 42 回日本神経科学大会、2019.7.25

＜報文＞

(原著論文)

[4] Yoon Y, Park J, Taniguchi A, Kohsaka H, Nakae K, Nonaka S, Ishii S, Nose A. System level analysis of motor-related neural activities in larval *Drosophila*. *Journal of Neurogenetics*. 7:1-11 (2019)

[5] Kohsaka H, Zwart MF, Fushiki A, Fetter RD, Truman JW, Cardona A, Nose A. Regulation of forward and backward locomotion through intersegmental feedback circuits in *Drosophila*. *Nature Communications*. 10(1):2654 (2019)

(総説)

[6] 高坂洋史、同一の神経回路網が相異なる運動出力を生み出すネットワーク機構、月刊細胞、51(14):31-33 (2019)

[7] Kohsaka H, Nose A. Interneurons for specific animal behavior. *Cytologia*. 85(1):1-2 (2020)

(学位論文)

[8] 宮本道人：Identification and functional analyses of the projection neurons regulating action selection in Drosophila larvae（博士論文）

[9] 平本篤紀：Identification and functional analyses of an interneuron regulating intersegmentally coordinated muscular relaxation in backward locomotion of Drosophila larvae（博士論文、新領域創成科学研究科）

[10] 福益一司：Analysis of populational neural activity generating distinct motor patterns by multisynapse functional imaging（修士論文）

[11] 稲葉晨介：ショウジョウバエ幼虫における前進運動を誘発する神経細胞の同定（修士論文、新領域創成科学研究科）

[12] 張旭：Comprehensive analysis of fly larval behaviors based on object detection and deep（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

[13] Zeng X, Inada K, Kazama H, Nose A. Adaptive Regulation of Electrically Coupled Motor Circuits by Sensory Feedback. Developing Neural Circuits Course 2019, 2019.7, Okinawa

[14] Takagi S, Nose A. Segment-specific axon guidance mediates divergent motor commands. 第 42 回日本神経科学大会, 2019.7, 新潟

[15] Hiramoto A, Jonaitis J, Niki S, Fetter R, Cardona A, Pulver S, Nose A. A neural circuit that orchestrates muscle relaxation in an escape behavior. 第 42 回日本神経科学大会, 2019.7, 新潟

[16] Fukumasu K, Nose A, Kohsaka H. Dynamic modules underlying multiple motor patterns in Drosophila CNS revealed by populational synapse imaging. 第 42 回日本神経科学大会, 2019.7, 新潟

[17] Kohsaka H, Zwart MF, Fushiki A, Fetter RD, Truman JW, Cardona A, Nose A. Regulation of forward and backward locomotion through intersegmental feedback circuits in Drosophila larvae. The 26th European Drosophila research conference EDRC 2019, 2019.9, Lausanne, Switzerland

[18] Takagi S, Nose A. Segment-specific axon guidance mediates divergent motor commands. The 26th European Drosophila research conference EDRC 2019, 2019.9, Lausanne, Switzerland

[19] Sun X, Kohsaka H, Nose A. A neuromechanical model for forward locomotion of Drosophila larva. The 3rd Joint Symposium on Integrated Biosciences between Zhejiang University and the University of Tokyo, 2019.11, Zhejiang, China.

招待講演

[20] Nose A. Functional connectomics of motor circuits in Drosophila larvae. Max Planck / HHMI Connectomics Conference Berlin 2019, 2019.4, Berlin, Germany

[21] Zeng X, Kawasaki T, Inada K, Kazama H, Nose A. Experience-driven development of motor circuits in Drosophila. 52th Annual Meeting of the Japanese Society of Developmental Biologists, 2019.5, Osaka

[22] Zeng X, Kawasaki T, Inada K, Kazama H, Nose A. Embryonic development of the motor circuits in Drosophila: emergence of coordinated neural activities and the role of sensory feedback. 第 42 回日本神経科学大会, 2019.7, 新潟

[23] Nose A. Optogenetic and connectomic analyses of motor circuits in the fruitfly Drosophila. The 3rd Joint Symposium on Integrated Biosciences between Zhejiang University and the University of Tokyo, 2019.11, Zhejiang, China

(国内会議)

一般講演

[24] Takagi S, Nose A. Segment-specific axon guidance mediates divergent motor commands. 第 19 回東京大学生命科学シンポジウム、2019.4、東京

[25] 稲葉晨介、能瀬聡直　ショウジョウバエ幼虫における前進運動を誘発する神経細胞の同定、第 42 回日本分子生物学会、2019.12、福岡

招待講演

[26] Zeng X, Kawasaki T, Inada K, Kazama H, Nose A. Experience–driven development of coordinated motor activities in Drosophila. 日本動物学会第 90 回大会, 2019.9, 大阪

[27] Nose A. Optogenetic and connectomic analyses of motor circuits in Drosophila. 異分野融合による次世代光生物学研究会, 2019.11, 岡崎

(講義・セミナー等)

[28] 能瀬聡直、運動を制御する神経回路のはたらきと起源、第 3 回学融合セミナー、2019.6.19、東京大学

[29] 高坂洋史、OIST Developmental Neural Circuits Course 2019 コースディレクター、2019.7.29〜8.1、沖縄科学技術大学院大学

[30] 能瀬聡直、運動パターンを制御する神経回路機構、京都大学大学院理学研究科生物科学専攻・生物多様性コロキウム、2020.1.24、京都大学

## 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

とをただせば分子の機能であるわけであるが、生体分子の多さや複雑さゆえに、分子機能から個体や細胞機能を直接導くことは困難であるのが現状である。我々研究室では、この溝を埋めるために、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 ウニ精子鞭毛ダイニン集団による力発生

本実験では、鞭毛の階層ごとに光ピンセットを用いてダイニン集団による力を測定することにより、ダイニン集団の力発生特性の軸糸構造への依存性を明らかにすることを目指した。ガラス面に結合している bundle 上またはダブレット上のダイニンに重合微小管を還流して結合させた後、光ピンセットで捕捉したビーズを微小管に結合させた。このように捕捉したビーズを重合微小管またはダブレットに結合させた後、溶液中の caged ATP を紫外線照射により分解して ATP を放出させ、ダイニンによる力発生を誘導した。微小管に結合したビーズの位置をナノメートル精度で検出して求めた微小管の動きからダイニンによる力を求めた。その結果、軸糸が出す力は軸糸の長さに比例し、16.0pN/$\mu$m であった。長さあたりの力は bundle でも差がなかった。一方、ダブレットでは力の大きさは長さにあまり依存せず、約 5pN の力が最も頻繁に測定された。ダイニン 1 分子の力は約 5pN、ダブレット上のダイニンは約 114 分子/m と報告されているため、16.0 pN はダイニン約 3 分子、つまり全体の約 3 %のダイニンによる力である可能性が示された。Gliding assay から、外腕 21S ダイニンの ATPase cycle1 周期中のフィラメントと結合している時間の割合は 6.9%となったことから、軸糸や bundle では極めて少数のダイニンしか同時に力を出さないことが示された。Duty ratio が低い原因を探るため、21S ダイニンの ATPase cycle における微小管へのアフィニティーを調べた。その結果、ADP、AMPPNP、caged ATP およびヌクレオチドなしの各条件ではダイニンの微小管へのアフィニティーは 1 mM ATP 存在下と比較して 2〜3 %にまで低下することが明らかになった。21S ダイニンの ATPase cycle における強結合を観察できなかったことは、ダイニンの duty ratio が低い原因の一つであることを示唆する。以上から、階層に関わらずダイニン滑り活性は低く抑えられていることが示唆された。ダブレット微小管での力測定で力の振動が観察された。10〜234 Hz の幅広い振動数の力が 22 例測定された。その内の 8 例で step finding algorithm により精度良くステップを検出できた。ステップの大きさの分布からステップサイズは約 7.5 nm であることが明らかになった。これはテトラヒメナ 22S ダイニンと同程度であった。さらに、dwell time を求めたところ、振動数が高いほど dwell time が短くなること、プラス方向とマイナス方向で dwell time が変化しないことが明らかになった。以上から、軸糸および bundle では同時に力を発生するダイニンは全体の約 3%と少なく、これはダイニンの duty ratio の低さによることが明らかになった。Duty ratio が低い要因として、ダイニン ATPase cycle 中に強結合が少ないことが示唆された。active なダイニンの割合は、Cryo-EM を用いて明らかになった生きた精子鞭毛内における割合よりも少ない。ダイニン分子自体に滑り活性を低く抑える制御機構が存在し、鞭毛の屈曲などのシグナルによってダイニン分子の抑制的制御が解除される可能性がある。また、ダイニン分子が出す力は振動し、その振動数は 10〜234 Hz と幅広い値を示すこと、ステップサイズはテトラヒメナ 22S ダイニンと同程度であることが明らかになった。Dwell time が順方向と逆方向で変わらない理由、力が振動する理由やその意義はさらなる研究を要する。

### 7.2.3 細胞集団運動の秩序化と働く力

紡錘状細胞は細長く、自発的に運動する能力をもつ。細胞に限らずこうした特徴を持つ物体はアクティブマターと呼ばれ、運動するメカニズムの詳細を無視した物理モデルによって、その運動が記述できるのではないかと期待されている。アクティブマターの集団運動を想定する力学モデルにおいては、個体の向きと運動とを結びつける式として、向きに応じた応力発生の項がしばしば導入される。この項の導入により、向きの空間的な歪みに比例した力が生じることが導かれ、この効果は集団運動の振る舞いの多くを説明する核となる知見とされている。しかし、この向きと力との関係を実験系において確認した研究は、現状では Nier らによるもののみである 1。加えて、Nier らは非常に弱い配向秩序を示す細胞種の集団においてこの確認を行っており、明瞭な配向秩序を示す系における向きと力との関係は、未だ明らかではない。こうした背景から、我々は明らかな配向秩序を示す細胞集団についてその力を測定し、向きとの関係を調べた。細胞の力測定には、牽引力顕微鏡 (Traction Force Microscopy) と呼ばれる手法がよく用いられる。これは柔らかいゲルの上で細胞を培養し、細胞がかけた力で生じるゲルの変形量を、ゲルに固定した蛍光ビーズの移動量として定量化することで、その力を推定する手法である。我々は昨年度までの研究で、牽引力顕微鏡により細胞集団の力を測定する手法を再現し、明瞭な配向秩序を示すと知られる神経幹細胞の集団について測定を行った。その結果、測定された力と配向歪みとの間に正の相関係数が存在することを明らかにしたが、力と配向歪みの定量的な関係を示すには至らなかった。我々はこの原因を、共焦点顕微鏡により取得した蛍光ビーズ像の不鮮明さに由来する、力推定の大きなノイズであると考え、そこで今年度はまず、観察に用いる光学系をより明るい落射蛍光顕微鏡に変更し、より鮮明な蛍光ビーズ像から力を推定することで、より高精度な力推定を試みた。牽引力顕微鏡実験用の落

射蛍光顕微鏡は、樋口研で過去に組まれた落射蛍光用の光学系を少々改造することで構成した。この光学系を用いて得られた鮮明な蛍光ビーズ像からサブミクロン精度でのゲル変形定量を行い、そこから推定された力と細胞の配向とを、まずは神経幹細胞集団において比較した。この結果、力と配向歪みが向きと大きさの 2 自由度について強い相関を示し、特に大きさについては線形関係を持つことが明らかとなった。この線形関係は、アクティブマター集団の力学モデルにおいて導入される最も簡単な応力発生項に合致する結果である。また、神経幹細胞とは大きく異なる生物学的性質を持つ平滑筋系の細胞種を用いて力と配向との比較を行ったところ、結果は神経幹細胞集団と定性的に一致しており、力と配向の関係が細胞の生物学的性質ではなく、形態学的特徴に起因していることが示唆された。そこで力と配向の関係の起源を探るため、単細胞における力測定を行い、そこから見積もった力と配向歪みの比例係数を、細胞集団で実測された値と比較した。結果、単細胞から見積もった値は実測値に比べて非常に小さいことが明らかとなった。この結果は、細胞集団の向きに応じた応力発生における、細胞の集団性の大きな寄与を示唆している。

### 7.2.4 心筋ミオシンの力発生メカニズム

心筋ミオシンは心臓内でフィラメントを形成しており、アクチンと相互作用し、自身の構造を変化 (パワーストローク) させることで心臓の収縮力を生み出している。３００を超えるミオシンの点変異体が肥大型心筋症の原因になっていることから、心筋ミオシンの性質は心臓の収縮を特徴付けていると考えられており、理学的および医学的視点から心筋ミオシン１分子の性質を調べる研究が多くなされている。しかし、これまでの１分子研究では、心筋ミオシン１分子の性質が心筋ミオシン多分子や心機能にどの様な寄与をしているのか不明であった。したがって、本研究では心筋ミオシンの固有の性質を解明し、その固有の性質が、心筋ミオシン多分子、また心機能にどの様な貢献をしているのか調べた。　本研究では心筋ミオシン多分子が発生する力を計測し骨格筋ミオシン多分子と比較すると、心筋ミオシンは骨格筋ミオシンに比べ低負荷でより頻繁に逆向きステップをしており、最大力も高いという固有の特徴が得られた。この心筋ミオシン多分子固有の性質の分子メカニズムを調べるために、負荷がかけられた時のミオシンの振る舞いを計測するミオシン１分子実験を行った。その結果、心筋ミオシンは３段階の安定な変位を前後にステップ状に変位していることが観測された。この結果は心筋ミオシンの２段階のパワーストロークとその逆反応 (リバーススストローク) を１分子レベルで直接観測できたことを意味する。１分子実験から、負荷に依存しないストロークサイズと負荷に依存する遷移率を見積もることができ、これらの結果は本研究における力計測の結果、および過去の研究とコンシステントであった。一方で、心筋ミオシンでは３段階の変位がみられたが、骨格筋ミオシンではパワーストローク後の状態に主に滞在しており、リバーススストロークをほとんど起こさなかった。この様な結果から、リバーススストロークは心筋ミオシンに特化した性質であることが解明された。

この心筋ミオシンに固有の性質であるリバーススストロークが多分子の力発生や心機能にどの様な影響を及ぼすのか調べるために、モンテカルロベースのシミュレーションを行った。その結果、多分子の力発生において、リバーススストロークの遷移率を高めるだけで、頻繁な逆向きステップと高い力発生の２つの性質を再現することができた。この結果は、リバーススストロークはミオシン多分子の力発生の性質を特徴付けていることを意味している。また、心機能への貢献を調べるシミュレーションを行ったところ、リバーススストロークは心拍における、①張力の維持、②急速な弛緩、③低い ATP 消費率に貢献していることが判明した。肥大型心筋症では弛緩障害や高い ATP 消費率が典型的な症例であるため、リバーススストロークが肥大型心筋症の本質的な原因である可能性がある。

### 7.2.5 細胞死における細胞の物性の変化

細胞は損傷した時、生き続ける能力、すなわち生存能 (viability) が低下する。これまでも同一種の細胞の生存能評価は度々行われてきたが、異なる生物種の様々な部位から得られた細胞種に共通した生存能評価は実現していない。生物種や細胞種に依存しない普遍的な量を用いて細胞生存能の定量を行うことは、細胞の損傷がどのように生存能に影響を与えるかを知る手掛かりとなる。さらに生と死及びその中間状態の普遍的な定量につながると期待できる。

細胞生存能評価の中で細胞種共通性の高い現象として細胞損傷時の細胞内運動の低下現象が挙げられるが、細胞種に依存しない普遍的な評価としては実現していなかった。しかし近年になって、細胞内運動に重要な因子である細胞内の粘性について、生細胞内の粘性と細胞質抽出物の粘性に関して細胞種に依存しない挙動を示すことが明らかとなった。それが細胞質の粘性の急上昇現象、すなわち細胞質のガラス化である。細胞質のガラス化は代謝の低下に伴って起こると考えられており、細胞内の粘性は細胞の生存能の低下に伴って上昇する可能性が高い。よって細胞質の粘性を指標にして細胞の生存能を定量することで、細胞種に依存しない普遍的評価が実現できると期待できる。　本研究の目的は細胞普遍的に細胞生存能を評価することである。その方法として細胞を損傷した後の細胞内粘性を経時的に測定し、その後の生死を判定することで細胞内粘性と細胞の生存能の関係を調べる。細胞への損傷について光活性分子が発生する活性酸素を用いることで安定的に行うことが既に可能となっている。さらに細胞の生死判定において多くのデータを得るための撮影システムのオート化にも成功した。今後は細胞内粘性測定に関して、蛍光分子の拡散を用いた方法に向けた光学系の改良を重ねる。さらに、代謝との関係性や膜破れの影響にも注目しつつ、粘性と生存能力のより正確な関係の解明に取り組んでいく。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Kohsuke Gonda, Hiroshi Negishi, Mayumi Takano-Kasuya, Narufumi Kitamura, Naoko Furusawa, Yasushi Nakano, Yoh Hamada, Masayuki Tokunaga, Hideo Higuchi, Hiroshi Tada, Takanori Ishida. Heterogeneous drug efficacy of an antibody-drug conjugate visualized using simultaneous imaging of its delivery and intracellular damage in living tumor tissues. Translational Oncology In press.

[2] Seohyun Lee and Hideo Higuchi. 3D rotational motion of an endocytic vesicle on a complex microtubule network in a living cell. Biomed. Opt. Exp. 10, 6611-6624 (2019.11.27)

[3] Naohiko Shimada, Hirotaka Kinoshita, Takuma Umegae, Satomi Azumai, Nozomi Kume, Takuro Ochiai, Tomoka Takenaka, Wakako Sakamoto, Takayoshi Yamada, Tadaomi Furuta, Tsukuru Masuda, Minoru Sakurai, Hideo Higuchi, and Atsushi Maruyama. Cationic Copolymer-Chaperoned 2D–3D Reversible Conversion of Lipid Membranes Advanced Materials 1904032, 1-7 (2019.9)

[4] (査読付き国際会議) Seohyun Lee, Hyuno Kim, Hideo Higuchi, and Masatoshi Ishikawa. Optical flow of vesicles: computer vision approach for endocytosis of Nano Particles in a living cell. SPIE Photonics West (2020.1)

[5] Takumi Washio, Seine A. Shintani, Hideo Higuchi, Seiryo Sugiura and Toshiaki Hisada. Effect of myofibril passive elastic properties on the mechanical communication between motor proteins on adjacent sarcomeres. Scientific Reports 9:9355 (2019.6).

(著書，総説，解説)

[6] H. Higuchi and C. Shingyoji. Measuring the Motile Properties of Single Dynein Molecules Chaper 5 In Handbook of dynein 2nd. Hirose and Amos ed. Pan Stanford Publishing

[7] 茅　元司　解説「骨格筋ミオシンにおける協同的な力発生機構」生物物理/59 巻 (2019) 5 号 241-247 (2019.9)

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[8] Hideo Higuchi and Kazuo Sasaki Universal walking model for processive motor proteins. Joint Workshop between NanoLSI (Kanazawa University) and Universal biology institute (The University of Tokyo). Kanazawa. Japan (2019.11.21)

[9] Motoshi Kaya, Yongtae Hwang and Hideo Higuchi. Reverse stroke of cardiac myosin revealed by single molecule microscopy is essential for heart function. 2nd Joint Symposium between mechanobaiology institute and Universal biology institute. Tokyo. Japan (2019. 9.19-20)

[10] Motoshi Kaya. Function of cardiac myosin essential for heart contraction. 2nd East Asian Symposium On Single-Molecule Biological Sciences. Seoul. Korea (2019. 7.25-27)

[11] Motoshi Kaya. Keynote lecture: Reverse stroke of cardiac myosin is essential for heart function: lessons from skeletal myosin. The 4th Rocky Mountain satellite Muscle Symposium. Canmore. Canada (2019.7.27-29)

一般講演

[12] Masahito Uwamichi, Kyogo Kawaguchi, Hideo Higuchi and Masaki Sano. Anisotropy of Cellular Traction Force Couples with the Cell Alignment Pattern, 64th Annual Meeting of the Biophysical Society, San Diego, (2020.02.19)

[13] Yongtae Hwang, Takumi Washio, Toshiaki Hisada, Hideo Higuchi and Motoshi Kaya,Difference in molecular properties between cardiac and skeletal myosins determines types of contraction required in heart and skeletal muscles,64th Annual Meeting of the Biophysical Society, San Diego, (2020.02.19)

[14] 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,12th European Biophysics Congress,Madrid Spain (2019.7.20)

(国内会議)

一般講演

[15] 佐伯喜美子、八幡和志、茅元司、樋口秀男、フォトダイオード、マイクロ分光器と高解像カメラを使った光学測定教材の開発，日本物理学会 2020 年年次大会，名古屋 (2020.3.19)

[16] 藤原貴史，真行寺千佳子，樋口秀男，ウニ精子鞭毛由来のダブレット微小管上のダイニン集団による力発生特性，生体運動研究合同班会議 2020，京都，(2020. 1.12)

[17] 黄 勇太，樋口秀男，茅 元司、骨格筋と異なる心筋ミオシン特有の特性が心機能の本質である, 第 7 回　骨格筋細胞若手の会, 京都 (2019.10.23)

[18] 上道 雅仁, 川口 喬吾, 佐野 雅己 集団運動する神経幹細胞の配向場歪みと力発生, 情報物理学でひもとく生命の秩序と設計原理, 第一回領域会議, 沼津, (2019.10.02)

[19] 黄 勇太, 鷲尾 巧, 樋口 秀男, 茅 元司 Reverse stroke of cardiac myosin revealed by single molecule microscopy is essential for heart function 第 57 回日本生物物理学会年会、宮崎 (2019.9.24)

[20] 藤原 貴史, 真行寺 千佳子, 樋口 秀男 Measurement of force generation by dynein ensemble on a doublet microtubule obtained from sperm flagella 第 57 回日本生物物理学会年会、宮崎 (2019.9.25)

[21] 上道 雅仁, 川口 喬吾, 佐野 雅己 Traction Force of Neural Stem Cells under Collective Migration was Modeled using the Orientation Field of Cell Alignment 第 57 回日本生物物理学会年会、宮崎 (2019.9.25)

[22] 太田 英暁, 樋口 秀男 Responses of cells to local heating in cells using a nanoparticle 第 57 回日本生物物理学会年会、宮崎 (2019.9.25)

[23] 上道 雅仁, 川口 喬吾, 佐野 雅己 集団運動する神経幹細胞で測定された細胞配向場の歪みと牽引力との線形関係, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学, (2019.9.13)

[24] 佐伯喜美子、八幡和志、茅元司、樋口秀男, フォトダイオードによる光学測定教材の開発, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜大学, (2019.9.13)

[25] 黄 勇太, 1 分子・多分子実験から迫る、心機能に適した心筋ミオシンの分子特性, 第 9 回分子モーター討論会, 国立遺伝学研究所,（2019.6.29）

[26] 藤原貴史，真行寺千佳子，樋口秀男，ウニ精子鞭毛の各階層におけるダブレット微小管上のダイニン活性, 第 9 回分子モーター討論会, 国立遺伝学研究所,（2019.6.29）

[27] 上道 雅仁, 川口 喬吾, 佐野 雅己 神経幹細胞の集団運動における力学と配向場歪み, 第 9 回分子モーター討論会, 国立遺伝学研究所,（2019.6.29）

[28] 藤原貴史，真行寺千佳子，樋口秀男, 精子鞭毛の屈曲運動のナノメートル分解能測定, ナノ学会第 17 回大会, 鹿児島,（2019.5.10）

[29] 太田英暁、樋口秀男, ナノ粒子を用いた細胞内局所加熱による細胞状態の変化, ナノ学会第 17 回大会, ナノ学会第 17 回大会, 鹿児島（2019.5.10）

＜受賞＞

[30] 黄 勇太「骨格筋と異なる心筋ミオシン特有の特性が心機能の本質である」第 7 回骨格筋細胞若手の会 若手奨励賞 (2019.10.23)

[31] 上道 雅仁 Traction Force of Neural Stem Cells under Collective Migration was Modeled using the Orientation Field of Cell Alignment 第 57 回生物物理学会年会 学生発表賞 (2019.9.26)

＜社会活動＞

[32] 樋口秀男 講義「がんを知り，がんを治す」 沼津西高校生 （東大）(2019.10.25)

## 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、その構造がオングストロームの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 超解像顕微鏡開発

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)[4]。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) 必要があり、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。私たちは、これまでに開発してきた、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 mactching) 法 [2] や、機械学習を利用した新しい画像処理法が有効であると考え、その開発・改良を進めている。

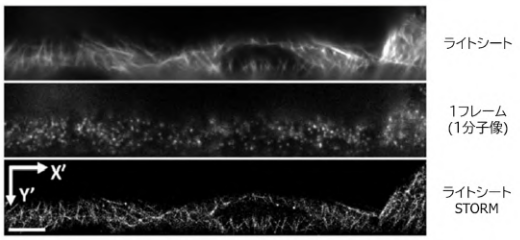



図 7.3.1: ライトシート超解像顕微鏡像。上から順に、通常のライトシート顕微鏡像、1 分子像、1 分子像から再構成した超解像画像。

### 7.3.2 超解像顕微鏡のための蛍光色素開発

上述の通り、photobleaching が超解像顕微鏡観察の妨げとなっている。従って、photobleaching が起こりにくい蛍光色素が開発されれば、既存の超解像顕微鏡でも生きた細胞の経時的観察が可能となる。

Photobleaching は、主に蛍光分子の励起三重項状態 (T1) と酸素の反応によって起こる。そのため、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。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。例えば、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 phospha-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ている [3]。

今回私たちは、このフォスフィンオキシド置換型の超耐光性蛍光色素のプロトタイプである C-Naphox が、水中で消光され疎水環境で蛍光が増強されることに注目して、細胞内の脂質膜構造の超解像イメージング用のプローブを開発した。

細胞内小器官の一つであるミトコンドリアは二重の脂質膜構造を持ち、その内側の膜 (内膜) では、酸化的リン酸化すなわち酸素呼吸によるエネルギー生産が行われる。文字通り細胞内のエネルギー生産工場であるミトコンドリア内膜は、襞状に折り畳まれた構造をとり面積を稼いでいる。これをクリステとよび、その形態は細胞のエネルギー生産状態を反映して動的に変化すると考えられているが、クリステの幅は数十 nm と可視光の波長の 1/5 以下であるため、通常の光学顕微鏡では観察することが出来ない。そのため、電子顕微鏡を用いた観察が行われてきたが、生きた細胞での観察が出来ないため、クリステ構造の動的変化を直接観察することは出来なかった。

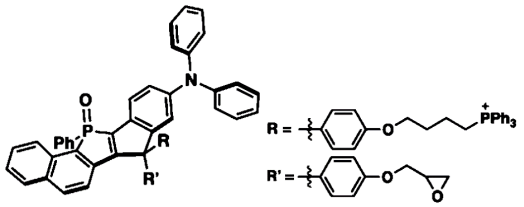



図 7.3.2: 超耐光性蛍光色素にミトコンドリア内膜局在化のための正電荷と固定化のためのエポキシ基を導入した。

私たちは、ミトコンドリア内膜は呼吸反応のために細胞の中で最も電位が低く保たれていることに注目した。これにより、プラスにチャージさせた脂溶性の蛍光色素はミトコンドリア内膜に集積する。これを利用することで、超耐光性蛍光色素をミトコンドリア内膜に集積させ、しかも脂質膜内に入った状態の蛍光色素のみが明るく光るという状態を実現できる。さらに、一度集積した色素がミトコンドリア内膜から逃げないように、色素にエポキシ基を導入し、ミトコンドリア内膜に入った後に周囲のタンパク質と共有結合して逃げられないようにした。こうしてデザインされた蛍光色素が MitoPB Yellow(図 7.3.2)[6] である。高い耐光性など超解像顕微鏡に適した蛍光色素の特性はそのままに、ミトコンドリア内膜に特異的に集積するため、MitoPB Yellow を用いることでミトコンドリア内膜の特徴的な襞状構造 (クリステ) を生きた細胞の中で観察することに世界で初めて成功した (図 7.3.3)。さらに細胞を飢餓状態にしてエネルギー生産状態を変化させると、それに応じてクリステの形態が変化する様子が観察された。

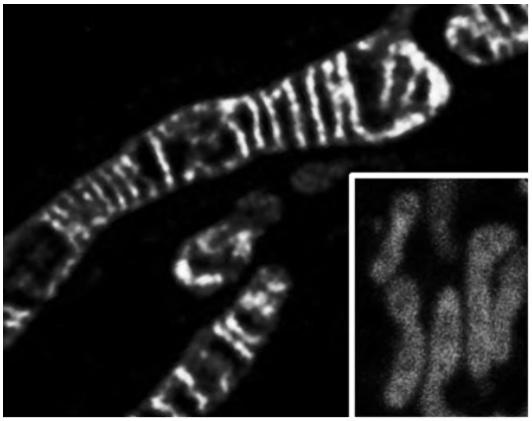


図 7.3.3: ミトコンドリア内膜クリステ構造の超解像ライブイメージング。インセットは通常の蛍光顕微鏡像 (回折限界像)。

### 7.3.3 細胞内動的構造の超解像/一分子イメージング

これらの技術開発と並行して、私たちは、超解像顕微鏡および一分子計測の技術の細胞生物学研究への応用も進めてきた。

理化学研究所・生命機能科学研究センターの松崎研究室との共同研究では、細胞の前後軸を決定するタンパク質である Par3 の局在を超解像顕微鏡で観察した。Par3 は細胞膜に集積して、細胞の前側を決めるタンパク質複合体の構成要素である。通常の光学顕微鏡では、Par3 は細胞膜に点々と島状に集積する (Par-islands) ように見えていたが、超解像顕微鏡を用いて観察すると、線状の構造物が集まったメッシュワークが基本構造で、これが集まって Par-islands を形成することが判った (図 7.3.4)[5]。

また、微生物化学研究所の野田研究室との共同研究では、細胞の飢餓応答として有名なオートファジーの初期過程が液液相分離によって駆動されていることを、細胞内での一分子計測によって証明した [7]。

### 7.3.4 機械学習を利用した顕微鏡画像解析

これまで、超解像顕微鏡を含め顕微鏡画像は、研究者が見て、何らかの仮説・知見に基づいて特徴量を定義し、定量化するという流れで解析されてきた。一方、ディープラーニングに代表される AI 技術を顕微鏡画像に応用すると、たとえば単純な明視野顕微鏡像から細胞の分化状態や遺伝子発現状態を正しく推定することが出来る。このことから、顕微鏡画像には細胞の状態を反映する多くの情報が隠されているが、これまで研究者が気付いていなかったと示唆される。しかし、従来の AI モデルは、全くのブラックボックスであり、どのような特徴量を用いて推定を行っているかを知ることが出来なかった。私たちは、

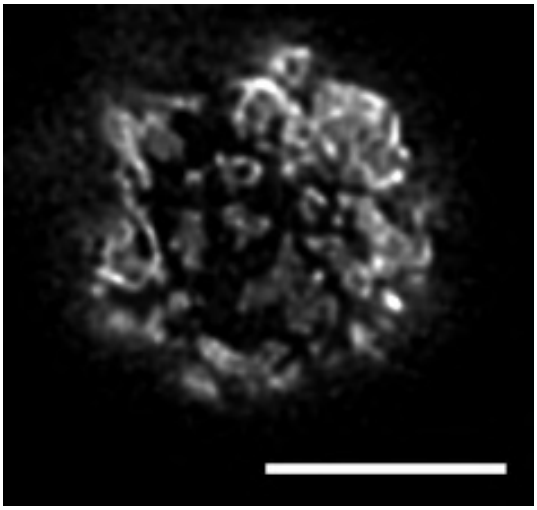


図 7.3.4: 超解像顕微鏡で見た Par-islands の微細構造。スケールバーは 0.5 $\mu$m。

畳み込みニューラルネットワークを用いたディープラーニングで顕微鏡画像から細胞周期を分類するというタスクを学習させ (図 7.3.5)、これを Grad-CAM 解析に供することで、AI が顕微鏡画像のどこに注目しているかを可視化した。その結果、AI は核とゴルジ体に注目して分類していることが判り、実際に核とゴルジ体の特徴量を用いて分類すると AI と同等の性能で分類することができた [8]。いわば、AI が発見した特徴量を研究者が検証したということになり、データ駆動型の生物学研究の一つの雛形になる。

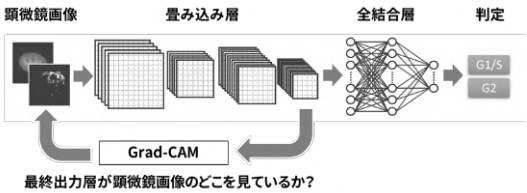



図 7.3.5: 顕微鏡画像解析の AI モデル

＜受賞＞

[1] 岡田康志、塚原仲晃記念賞、ブレインサイエンス振興財団、2020 年 3 月。

＜報文＞

(原著論文)

[2] 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)

[3] Gzrybowski M *et al.* A highly photostable near-infrared labeling agent based on a phosphaindole rhodamine for long-term and deep imaging. *Angew. Chem.* **57** 10137-10141 (2018)

[4] Lu CH, *et al.* Lightsheet localization microscopy enables fast, large-scale, and three-dimensional super-resolution imaging. *Commun Biol.* **2** 177 (2019)

[5] Kono K, *et al.* Reconstruction of Par-dependent polarity in apolar cells reveals a dynamic process of cortical polarization. *eLife* **8** e45559 (2019)

[6] Wang C, *et al.* A photostable fluorescent marker for the superresolution live imaging of the dynamic structure of the mitochondrial cristae. *Proc Natl Acad Sci U S A.* **116** 15817-15822 (2019)

[7] Fujioka Y, *et al.* Phase separation organizes the site of autophagosome formation., *Nature* **578** 301-305 (2020)

[8] Nagao Y, *et al.* Robust Classification of Cell Cycle Phase and Biological Feature Extraction by Image-Based Deep Learning. *Mol Biol Cell* in press (2020)

(国内雑誌)

[9] 岡田康志「蛍光イメージングによる網羅的シングルセル解析」実験医学 **37** 3527-3532 (2019)

[10] 岡田康志「超解像顕微鏡の原理と応用」病理と臨床 **37** 580-587 (2019)

(学位論文)

[11] 白井秀和 “Development of the two-photon microscope for single molecule imaging *in vivo*”, 修士論文 (2020)

(著書)

[12] 岡田康志「生きている系の統計力学」パリティ編集委員会編『物理科学, この 1 年 2020』丸善出版 (2020)

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[13] Yasushi Okada, Super-resolution live-cell imaging 2019: new optics, new dyes, and new algorithms. カナダ顕微鏡学会 (MSC-SMC annual meeting) 2019, ブリティッシュコロンビア大学、バンクーバー、カナダ, 2019 年 5 月 23 日

[14] Yasushi Okada, Dissecting molecular mechanisms by optical microscopy in living cells and in vitro. Cold Spring Harbor Conferences Asia, Cross-scale biological structure 2019. 蘇州、中国, 2019 年 9 月 4 日

[15] Yasushi Okada「Live cell imaging technologies for single-cell analysis」第 29 回ホットスプリングハーバー国際シンポジウム 2020 年 2 月 7 日

(国内会議)

招待講演

[16] 岡田康志「生細胞イメージングにおける超解像光学顕微鏡の現状と課題」ナノプローブテクノロジー第 167 委員会第 91 回研究会、産総研臨海副都心センター別館、2019 年 4 月 11 日

[17] Yasushi Okada, Dissecting molecular mechanisms by optical microscopy in living cells and in vitro. 第 71 回日本細胞生物学会年会 19 回日本蛋白質科学会年会合同年次大会シンポジウム、神戸国際会議場、2019 年 6 月 24 日

[18] Yasushi Okada, Toward imaging-based epigenome analysis in living cells. 4th Symposium for the Inter-University Research Network for Trans-Omics Medicine, 徳島大学、2019 年 11 月 1 日、

[19] Yasushi Okada, Conformational dynamics of microtubules. Joint UBI-Nano LSI workshop, 金沢大学、2019 年 11 月 20 日

[20] Yasushi Okada, Dissecting the Molecular Mechanisms of Axonal Transport through Imaging. The 7th Workshop on physics between Ecole Normale Superleure and University of Tokyo, 東京大学、2019 年 11 月 26 日

[21] 岡田康志「RNA を細胞内で見て、操作するための技術」第 42 回日本分子生物学会年会、福岡国際会議場、2019 年 12 月 5 日

[22] 岡田康志「超解像顕微鏡法とその限界」第 61 回日本顕微鏡学会九州支部総会・学術講演会、特別講演、九州工業大学、2019 年 12 月 14 日

[23] 岡田康志「小胞輸送の速度と揺らぎと温度」第 4 回バイオサーモロジーワークショップ 2019 年 12 月 26 日

(セミナー)

[24] 岡田康志「100 倍すごいイメージング」、第 30 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、2019 年 8 月 2 日

[25] 岡田康志「イメージングで細胞の生老病死は理解できるか」、第 1 回老化研究セミナー、神戸 BT センター、2019 年 8 月 14 日

[26] 岡田康志「イメージング技術で探る細胞の状態・細胞内環境」、名古屋大学理学系研究科研究セミナー、2019 年 10 月 17 日

[27] 岡田康志「超解像・一分子イメージングで探る軸索輸送の分子機構」Brain Club、慶応大学医学部 2020 年 1 月 24 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 大腸菌進化実験を用いた進化的拘束の定量解析

ラボオートメーションを用いた全自動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ている。その結果として得られた様々なストレス環境に対する耐性大腸菌について、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機械学習の手法を用い解析した。適切な次元圧縮の結果として、様々に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、ゲノム変異解析によって同定された変異を親株ゲノムに導入することにより、その耐性能への影響を解析したところ、同様にとり得る表現型がある程度限定されているという結果が得られた。さらに、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。

### 7.4.2 変動する環境下での進化軌跡の制御手法の開発

これまでに行ってきた大腸菌進化実験の結果は、進化過程において可能な表現型変化が低次元の空間に拘束されることを示している。この結果は、そうした低次元の特徴量を適切に抽出することにより、進化ダイナミクスの予測と制御が可能であることを示唆している。そこで、複数の薬剤に対する耐性能を表現型として、その表現型に応じて選択環境にフィードバック制御を加えることにより、任意のターゲット表現型へ向けた進化軌跡を実現する手法を構築した。その実験的な確認として、クロラムフェニコール（CP）とアミカシン（AMK）という相互に交差感受性を示す、つまりCPに対する耐性を獲得した大腸菌はAMKに対して感受性となり、その逆も成り立つという2つの薬剤ペアを用い、CP耐性能とAMK耐性能で張られた2次元空間において、目的の表現型への進化軌跡が構成できるかを検討した。結果として、CPのみに対して耐性を持ちAMK耐性は変化しない表現型など、CPあるいはAMKという単独薬剤を用いた進化実験では実現することができない進化軌跡の構成に成功した。この手法を用いて、さまざまなターゲット表現型への進化実験を行うことにより、進化可能性を定量的に評価することが可能となる。

### 7.4.3 フェイズフィールドモデルによる3Dアメーバ運動動態の解析

細胞は糸状仮足や葉状仮足といった様々な形の変形を示し、細胞遊走や外部環境のセンシングなどの機能を果たしている。これらの細胞変形はアクチン繊維の重合脱重合によって駆動されているが、さらにそのアクチン重合を時空間的に制御する多くのシグナル分子が関与している。また、飲作用・食作用といった細胞膜陥入を伴う大変形では、シグナル分子による三次元的な制御が行われていると考えられているが、どのような制御の結果、変形が自己組織されるかは未解明のままである。本研究では、アクチン依存的細胞膜陥入の一種であるマクロ飲作用（macropinocytosis）に注目し、三次元的な細胞膜変形がどのように自己組織化するかを数理モデリングにより明らかにした。

マクロ飲作用は、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現象である。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。

そこでこの研究では、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飲作用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。さらに、細胞と床面の基質との相互作用を考慮することで、細胞の運動が基質の凹凸にガイドされる現象の再現なども成功している。考案したモデルは細胞遊走と細胞

外部溶液の取り込みという異なる現象を統一的に理解する理論的基盤となる可能性がある。

### 7.4.4 機械学習を用いた生物形態の定量化

生物形態を定量的に解析することは、遺伝子発現との関連や発生・進化のダイナミクスを理解する上で重要な意味を持つ。形態を理解する手法として様々な形態計測手法が提案されたものの、計測手法の難しさに加え、適切な特徴抽出が恣意的に行われるなどの問題点が存在する。そこで本研究では、生物形態から適切な特徴量を抽出し、その発生や進化のダイナミクスを解析することを目的として、生成モデルと分類モデルを組み合わせた Classification associated Variational Auto Encoder (CVAE) というモデルを開発した。この手法を用い、哺乳動物の下顎骨の形態データを解析したところ、異なる生物学的分類の形態を適切に分類することが可能であることが示された。またこの手法は、生成モデルを用いているため、損傷を受けたサンプルでも復元することができるという利点を持つことが確認された。

### 7.4.5 変動する環境における進化ダイナミクスに関する理論研究

生物集団はしばしば、時間的に変化する環境において進化をするが、そうした変動環境下での進化が固定環境下でのそれと比較して適応的に有利であるかどうかは、適応度地形の ruggedness や適応度地形間の相関から決定される。このとき、その環境変動の時間スケールが、進化ダイナミクスに大きな影響を与えることが予想される。つまり、適応進化を構成する変異・選択・遺伝的浮動といった各素過程は、それぞれ固有の時間スケールを持っているが、それらの時間スケールと環境変動の時間スケールとの大小関係に依存して、適応度の振る舞いは変わるはずであるが、その詳細は明らかになっていない。そこで本研究では、異なる時間スケールで変動する環境下での適応進化ダイナミクスを、単純化した数理モデルの計算機シミュレーションによって解析した。その結果、環境変動の時間スケールに依存して、進化ダイナミクスの振る舞いは大きく変化することが確認され、さらに進化の定常状態における適応度を小さくするための、最適な環境間相関や、最適な環境変動の時間スケールが存在しうることが示された。このことは、微生物などの進化を制御するための重要な知見となると期待できる。

### 7.4.6 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とすることは、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、例え一定の環境であっても生体内分子の小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てこなかった。また、従来の解析では環境応答量は mRNA のコピー数で計測され、ゆらぎは protein のコピー数で計測されおり、相関の解釈自体が複雑化していた。本研究では、これらの課題を解決し、以下に示す適切な検証実験を行うことを目的とした。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フローサイトメーターで一細胞ずつ高速に計測できる実験系を開発した。現在までに、89 種の遺伝子について、27 培養条件でいずれも protein レベルのゆらぎと環境応答量のデータセットが得られており、これらを解析した結果、正の相関関係が実証された。また、生存に必須な遺伝子は、非必須な遺伝子に比べてゆらぎと環境応答量のどちらも低く抑えられていることがわかった。このことは、生物が環境応答量だけでなく、ゆらぎも機能に応じて最適化させてきたことを示唆している。今後は、反復実験を行い、これらの知見の信頼性を高めることを目指している。

### 7.4.7 シアノバクテリアをモデルとしたゲノム複製機構の進化解析

バクテリアの DNA 複製は DnaA という複製開始因子が必須であり、DnaA に依存した複製開始機構は現在同定されているほぼすべてのバクテリアに保存されている。しかし例外も存在し、シアノバクテリアは DnaA を必須とする種と、しない種の 2 種類が存在することがわかっている（Ohbayashi et al., 2016, ISME J.）。本年度は解析範囲を広げゲノム解読が完了している 50 種以上のシアノバクテリアにおいて、dnaA 遺伝子の保存性、ゲノム構造、さらに一部の種においてはその必須性を検証した。その結果、興味深いことにすでに dnaA 遺伝子を持たない Free-living のシアノバクテリアが存在することが明らかとなり、全 Free-living バクテリア（共生バクテリアは除く）において dnaA 遺伝子を持たない種を初めて報告した。また系統解析からシアノバクテリアの進化の中で複数回独立に“DnaA 依存から非依存への複製開始機構の進化”が起こったことを明らかにした。シアノバクテリアが真核細胞内に共生することによって誕生した葉緑体における DNA 複製も、葉緑体及び宿主の核ゲノムに dnaA が存在しないことから、DnaA 非依存的機構によると考えられ

る。シアノバクテリア（及び葉緑体）の系統関係を考慮すると、細胞内共生（葉緑体誕生）以前に葉緑体の祖先は DnaA 非依存の DNA 複製機構を獲得していたと考えられる。興味深いことに、細胞内共生しているシアノバクテリアや多くの共生バクテリアはその遺伝子をほとんど残しているものの、dnaA 遺伝子のみは共通して失っていることがゲノム解析から明らかになっている。しかし、なぜこのようなバクテリアで確立された複製機構から別の複製機構へと進化したのかは全く不明である。今後は DnaA に依存しない新たな複製機構の解明とともに、その環境的メリットなどを実験的に検証していく。

＜報文＞

(原著論文)

[1] T. Horinouchi, T. Maeda, H. Kotani, C. Furusawa: Suppression of antibiotic resistance evolution by single-gene deletion, Sci. Rep. **10**(1), 4178 (2020).

[2] J. F. Yamagichi, N. Saito, K. Kaneko: Advantage of Leakage of Essential Metabolites for Cells, Phys. Rev. Lett. **124**(4), 048101 (2020).

[3] R. Ohbayashi, S. HIrooka, R. Onuma, Y. Kanesaki, Y. Hirose, Y. Kobayashi, T. Fujiwara, C. Furusawa, S. Miyagishima: Evolutionary changes in DnaA-dependent chromosomal replication in cyanobacteria, Front. Microb., in press

[4] T. Maeda, T. Horinouchi, N. Sakata, A. Sakai, C. Furusawa: High-throughput identification of the sensitivities of an Escherichia coli ΔrecA mutant strain to various chemical compounds, Jour. Antibio. **72**(7), 566 (2019).

[5] T. Yamaguchi, S. Teraguchi, C. Furusawa, H Machiyama, T. M. Watanabe, H. Fujita, S. Sakaguchi, T. Yanagida: Theoretical modeling reveals that regulatory T cells increase T-cell interaction with antigen-presenting cells for stable immune tolerance, Int. Immunol. **31**(11), 743 (2019).

[6] A.Shibai, K. Satoh, M. Kawada, I. Narumi, C. Furuswa: Complete Genome Sequence of a Radioresistant Bacterial Strain, Deinococcus grandis ATCC 43672, Microb. Res. Announc. **8**(45), e01226 (2019).

[7] A.Shibai, T. Maeda, M. Kawada, H. Kotani, N. Sakata, C. Furusawa: Complete Genome Sequences of Three Star-Shaped Bacteria, Stella humosa, Stella vacuolata, and Stella Species ATCC 35155, Microb. Res. Announc. **8**(32), e00719 (2019).

(国内雑誌)

[8] 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 (2019).

[9] 古澤力, 堀之内貴明: 微生物進化実験の定量解析:予測・制御・細胞状態論へ向けて, 生物物理 **59**(5), 262 (2019).

(学位論文)

[10] 平中優圭:変動する環境における進化ダイナミクスの予測と制御（修士論文）

[11] 堤真人:機械学習を用いた生物形態の定量化とその応用（修士論文）

[12] 清水佑麿:Single-cell RNA Seq データを用いた *Xenopus Tropicalis* の神経堤発生に関わる遺伝子ネットワーク推定（修士論文）

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[13] C. Furusawa: Analysis of Evolutionary Constraints and Plasticity by Microbial Laboratory Evolution and Computational Models, From Molecular Basis to Predictability and Control of Evolution, Stockholm, 2019 年 7 月

[14] C. Furusawa: Analysis of Phenotypic Constraints and Plasticity by Microbial Laboratory Evolution, The 20th International Conference on Systems Biology, Okinawa, 2019 年 11 月

[15] J. Iwasawa, T. Maeda, T. Horinouchi, C. Furusawa: Combining interpretable machine learning with high dimensional multi-omics data from laboratory evolution, The 20th International Conference on Systems Biology, Okinawa, 2019 年 11 月

[16] T. Maeda, C. Furusawa: Identification of mutations conferring resistance to anti-tuberculosis drugs by laboratory evolution of non-pathogenic Mycobacterium on agar plate, The 20th International Conference on Systems Biology, Okinawa, 2019 年 11 月

[17] Yukitaka Isaka et al.: Inferring gene regulatory network and differentiation dynamics of human embryonic stem cell, The 20th International Conference on Systems Biology, Okinawa, 2019 年 11 月

[18] A. Shibai, C. Furusawa, Feedback control of evolutionary trajectory of bacterial cells on fitness landscape, The 20th International Conference on Systems Biology, Okinawa, 2019 年 11 月

[19] N. Saito and S. Sawai: Phase-field modeling for 3D dynamics in macropinocytosis, The 20th International Conference on Systems Biology, Okinawa, 2019 年 11 月

招待講演

[20] C. Furusawa: Analysis of Evolutionary Constraints and Plasticity by Microbial Laboratory Evolution and Computational Models, 2nd Joint Symposium between MBI and UBI, Tokyo, 2019 年 10 月

[21] N. Saito and S. Sawai: Phase-field modeling for 3D morphodynamics in macropinocytosis, 2nd Joint Symposium between MBI and UBI, Tokyo, 2019 年 10 月

[22] C. Furusawa: High-dimensional data acquisition for analysis of microbial evolution and ecology, The 1st Symposium of China-Japan Joint Laboratory for Natural Products and Chemical Biology–Trends in Gut Microbiome Research, China, 2019 年 12 月

[23] C. Furusawa: High-dimensional data acquisition for analysis of microbial evolution and ecology, The 29th Hot Spring Harbor International Symposium, 2020 年 2 月

(国内会議)

一般講演

[24] 芝井厚, 古澤力: 適応度地形の動的変化を通した細菌進化のフィードバック制御の試み, 日本進化学会第 21 回大会, 2019 年 8 月

[25] 金井雄樹, 津留三良, 古澤力: A genetic tool to tune gene-inactivating mutation rate and its application to experimental evolution, 日本進化学会第 21 回大会, 2019 年 8 月

[26] 堤真人: 骨を用いた動物形態の機械学習, 第 59 回生命科学夏の学校,2019 年 8 月

[27] 岩澤諄一郎, 前田智也, 堀之内貴明, 古澤力: Laboratory evolution of Escherichia coli reveals constrained evolutionary states for antibiotic resistance, 第 57 回日本生物物理学会, 2019 年 9 月

[28] Y. Kanai, S. Tsuru, C. Furusawa: Construction of a genetic tool for tuning gene-inactivating mutations and its application to experimental evolution of genome reduction, 第 57 回日本生物物理学会, 2019 年 9 月

[29] 堤真人, 古澤力, 澤井哲, 斉藤稔: Quantitation of cell shape by machine learning, 第 57 回日本生物物理学会, 2019 年 9 月

[30] 斉藤 稔, 澤井 哲: 3D phase field simulation for macropinocytosis of amoeboid cells, 第 57 回日本生物物理学会, 2019 年 9 月

[31] 井元 大輔, 斉藤 稔, 澤井 哲: Morphodynamic feature space of migrating cells, 第 57 回日本生物物理学会, 2019 年 9 月

[32] S. Tsuru, A. Shibai, C. Furusawa: 大腸菌を用いた実験室内進化におけるタンパク質の配列進化速度の制約, 第 57 回日本生物物理学会年会,2019 年 9 月

[33] 平中優圭, 斉藤稔, 古澤 力: Fitness landscape of antibiotic-resistance evolution, 第 57 回日本生物物理学会年会,2019 年 9 月

[34] 清家泰介, 阪田奈津枝, 下田親, 仁木宏典, 古澤力: 近縁種の作るフェロモンを使って、S. pombe を交配させる実験的試み, 酵母遺伝学フォーラム第 52 回研究報告会, 2019 年 9 月

[35] 芝井厚, 古澤力: 自動培養系を用いた細菌実験進化のフィードバック制御の試み, 第 11 回生命情報科学若手の会, 2019 年 10 月

[36] 前田智也: ピルビン酸デヒドロゲナーゼによるバクテリア細胞サイズの制御機構の解明, 第 13 回日本ゲノム微生物学会若手の会, 2019 年 10 月

[37] 芝井厚, 古澤力: ストレス条件と耐性獲得との関係に基づく細菌進化のフィードバック制御, 第 42 回日本分子生物学会年会, 第 42 回日本分子生物学会年会, 2019 年 12 月

[38] S. Tsuru, A. Shibai, C. Furusawa: A ubiquitous law in the rate of divergent evolution of protein sequence, 第 42 回日本分子生物学会年会, 2019 年 12 月

[39] 大町祐史, 斉藤稔, 古澤力: 遺伝暗号における適応度地形の解析, 日本物理学会第 75 回大会, 2020 年 3 月

[40] 堤真人, 斉藤稔, 古澤力: 機械学習を用いた生物形態の定量化, 日本物理学会第 75 回大会, 2020 年 3 月

[41] 斉藤 稔, 澤井 哲:フェイズフィールドモデルによる アメーバ細胞の一細胞変形動態シミュレーション, 日本物理学会第 75 回大会, 2020 年 3 月

[42] 大林龍胆, 廣岡俊亮, 大沼亮, 広瀬侑, 兼崎友, 古澤力, 宮城島進也:シアノバクテリアでは染色体複製における DnaA 非依存への進化は複数回独立に起きている, 第 14 回ゲノム微生物学会,2020 年 3 月

[43] 清家泰介, 小谷葉月, 古澤力: フェロモンが変化できる進化パスを実験的に探索する, 第 14 回日本ゲノム微生物学会, 2020 年 3 月

[44] 芝井厚, 佐藤勝也, 鳴海一成, 古澤力:デイノコッカス属細菌の放射線照射・修復後ゲノムの de novo アセンブル, 第 14 回日本ゲノム微生物学会, 2020 年 3 月

[45] 前田智也, 古澤力: 非病原性結核菌の抗結核剤に対する進化実験, 第 14 回日本ゲノム微生物学会, 2020 年 3 月

[46] 岩澤諄一郎, 前田智也, 堀之内貴明, 古澤力: 機械学習と大腸菌実験室進化データを用いた進化拘束の解析, 第 14 回日本ゲノム微生物学会, 愛知, 2020 年 3 月

招待講演

[47] 古澤力:自動化システムを用いた大腸菌進化実験:進化の予測と制御へ向けて, 第 92 回日本生化学会大会, 2019 年 9 月

[48] C. Furusawa: Analysis of Phenotypic Constraints and Plasticity by Microbial Laboratory Evolution, 第 57 回日本生物物理学会年会, 2019 年 9 月

[49] R. Ohbayashi, T. S. Hatakeyama: Impact of polyploidy on the evolutionary rate, 第 56 回日本生物物理学会年会,2019 年 9 月

[50] 古澤力:生物システムの安定性と可塑性の理解へ向けて:実験室進化と理論解析, CBI 学会 2019 年大会 2019 年 10 月

[51] 大林龍胆:複数コピー染色体において複製システムが及ぼす進化可能性, 第 13 回日本ゲノム微生物学会若手の会,2019 年 10 月

[52] 古澤力:数理モデルを用いた幹細胞分化ダイナミクスの解析–未分化さの理解へ向けて–, 第 5 回幹細胞研究会, 2019 年 11 月

[53] 大林龍胆:倍数ゲノムの複製, 遺伝様式から紐解くシアノバクテリアの進化可能性, 藍藻の分子生物学,2019 年 11 月

[54] 古澤力:Toward prediction and control of microbial evolution: Analysis of phenotypic constraints in laboratory evolution, 第 42 回日本分子生物学会年会, 2019 年 12 月

[55] 大林龍胆, 廣岡俊亮, 大沼亮, 広瀬侑, 兼崎友, 宮城島進也:シアノバクテリアの染色体複製における DnaA 依存性進化, 第 43 回日本分子生物学会年会,2019 年 12 月

[56] 古澤力:実験室進化手法を応用した大腸菌のストレス耐性機構の解明とその制御. 日本農芸化学会大会 2020, 2020 年 3 月

(セミナー)

[57] 古澤力: 生きている状態をどのように理解できるか〜理論と実験からのアプローチ〜, 第 64 回物性若手夏の学校, 2019 年 8 月

[58] 古澤力: 進化実験を用いた共生ダイナミクスの解析, ERATO 共生進化プロジェクト・キックオフミーティング, 2019 年 11 月

[59] C. Furusawa: Universal Biology, ENS-UT Special Lectures on Physics, 2019 年 11 月

[60] 古澤力: 多様な選択圧下での大腸菌進化実験による揺らぎ – 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, 2019 年 12 月

[61] 古澤力: 機械学習を用いた生物形態データの解析, 新学術領域:進化制約方向性領域会議, 2019 年 12 月

[62] C. Furusawa: Decoding gut microbiota using convolutional neural networks, RIKEN aging project seminar, 2020 年 1 月

(アウトリーチ)

[63] 岩澤諄一郎: 迷子の最適戦略, 第 92 回東京大学五月祭「10 分で伝えます! 東大研究最前線」, 2019 年 5 月

[64] 古澤力: 進化を予測し制御する –微生物進化実験の定量解析とその応用–, 第 71 回理研イブニングセミナー, 2019 年 9 月

[65] 岩澤諄一郎, 『進化』は予測可能？ , 第 70 回東京大学駒場祭「10 分で伝えます! 東大研究最前線」, 2019 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 (酒井教授、藤堂教授、安東准教授、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

2019 年４月から 2020 年３月までの実験装置試作室の主な利用状況は以下のとおりである。

- 内部製作（総図面枚数：631 枚、総個数：1341 個）
- 製作部品の設計上の助言
- 外注製作の発注代理
- 製作時間における学科別の割合（物理：55%、素粒子 C：17%、化学：8%、地殻化学：13%、地球惑星：3%、生物科学：2%、フォトン S：2%）
  主な依頼者（物理 · 安東研、素粒子 C· 浅井研、地殻化学 · 小松研、物理 · 日下研、物理 · 島野研、物理 · 五神 · 湯本研、物理 · 竹内研、化学 · 山内研）

## 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を行った。特に理 1 号館の異臭事故の対応を防災センターと協力して実施し、原因を明らかにした。また、新任者の安全教育、研究室の立ち上げサポートを行った。

今年度は、特に、新型コロナウイルスによる感染症の対応として、防疫作業の準備として、マニュアルの策定や消毒液容器やサーモグラフィといった資材の手配を進めた。

### 8.2.2 IT 関連 (南野)

物理学専攻のシステム、サーバについて、以下の開発、管理を行った。

- 海外出張登録システムを開発
- 論文審査システム、TA 管理システムのシステム解析と改修
- ウェブサーバ、メールサーバの管理、特にメールサーバは研究室のメールサーバの集約とセキュリティ強化のため、クラウドシステムへの移行を開始
- 教員登録システム、教室予約システム、大学院入試システムの保守

理学系研究科の情報システムチームの一員として、以下の業務を行った。

- メディアコンテンツ関係の業務として、ラーニングサイトの管理やイベント中継のサポート
- ネットワークインフラの管理として、専攻や研究室等の Virtual LAN の設定
- 理学系研究科アカウントのユーザ管理

また、新型コロナウイルス感染症による教職員の在宅勤務の立ち上げを行った。

### 8.2.3 学生実験

学部 3 年生向けの物理学実験 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)
- 物理学実験 II (A セメスタ)
  「生物物理学」の指導 [6, 8, 16, 19] (佐伯)
  「相転移」に LabVIEW-FPGA を導入 (八幡)
- 夏休みの自由実験 (八幡、佐伯)
  オペアンプを使ったヘッドフォンアンプの開発をテーマに 3 日間、大学院生 3 人の参加を得て実施した。
- 教材開発（佐伯、八幡）
  生物物理学生実験では、緑色蛍光タンパク質のフォールディングの実験を行っている。この実験の改良として、フォトダイオード、マイクロ分光器、高解像カメラを使った相補的な測定系の実験を開発した。フォトダイオードを使った蛍光強度の時間変化測定について、今年度の学生実験で試行的に導入した。[6, 8, 5, 16, 19]。

### 8.2.4 研究支援

- 要素技術開発（八幡、佐伯、南野）
  Society5.0 対応の教育と研究のための要素技術の開発を開始した。特に、AI 系の計算アルゴリズムに必要な多点、大量のデータ取得のための安価な測定系と、手軽に並列計算を行うための、GPGPU、TPU、FPGA の利用手法の開発である [6, 7, 8, 10, 5, 16, 17, 19, 21]。

- 寒剤管理（八幡）
  通常の理学系の CE タンクの管理と液体窒素の供給とともに、今年度は、特に、新型コロナウイルス感染症の拡大に対応し、低温科学研究センターと協力して、理学部内の少量ユーザーへの供給系統を二重化した。

- 実験技術指導（八幡）
  2013 年度から行っている、大学院生向けの 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 名であった [18]。
  また、最近、新たに低温実験を開始する研究室が増加しており、この技術指導を行った。

### 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 (委員長: 八幡、委員: 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)
- 理学系環境安全管理室 (八幡)
- 理学系技術部運営委員会 (南野)
- 理学系寒剤管理委員会 (八幡)

＜受賞＞

[1] 佐伯喜美子、生物学技術研究会功績賞 (岡崎コンファレンスセンター、2020 年 2 月).

＜報文＞

[2] 技術部報告集 2019 (東京大学大学院理学系研究科 · 理学部技術部、2020 年 2 月).

＜総説＞

[3] 八幡和志、まちがいだらけのセラミック・コンデンサ活用 Q & A 集、(アナログウェア、vol.10 、CQ 出版、2019 年 10 月).

＜学術講演＞

(国内会議)

[4] 八幡和志、ロードマップのフレームワーク、令和元年度技術職員シンポジウム (高エネルギー加速器研究機構 (つくばキャンパス)、2020 年 1 月).

[5] 佐伯喜美子、八幡和志 マイクロ分光器を使った蛍光タンパク質のスペクトル測定、第 31 回生物学技術研究会 (岡崎コンファレンスセンター、2020 年 2 月).

- **2019 年度 分子科学研究所 機器・分析技術研究会**, (岡崎コンファレンスセンター、2019 年 8 月)

[6] 佐伯喜美子、八幡和志、GFP の変性過程の蛍光強度変化の測定.

[7] 八幡和志、LabVIEW FPGA と MPPC-Array を用いた単光子観測系の開発.

- **日本物理学会 2019 年秋季大会**, (岐阜大学、2019 年 9 月)

[8] 佐伯喜美子、八幡和志、茅元司、樋口秀男 フォトダイオードによる光学測定教材の開発.

[9] 田中忠芳、館宜伸、八幡和志、他、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 II (初等中等教育段階の学びを再構築した教育コンテンツの研究開発).

[10] 八幡和志、FPGA を使った計算機教育の教材開発 (I).

[11] 青木悠樹、八幡和志、iPad のタッチパネルを用いた力学教材の開発、日本物理学会 2019 年秋季大会 (岐阜大学、2019 年 9 月).

- **第 3 回東京大学技術発表会**, (2020 年 3 月)
  （中止のため、報文提出による発表）

[12] 八幡和志、シンポジウム趣旨説明“技術経営とロードマップ”.

[13] 下澤東吾、シンポジウム“機械工作分野の技術ロードマップ”.

[14] 佐伯喜美子、藁谷英樹、技術交流会 “科学教育” 世話人.

[15] 下澤東吾、技術交流会 “機械工作.... 機械工作施設の現状の共有” 世話人.

[16] 佐伯喜美子、物理学科における生物物理学生実験の改良と新規実験の開発.

[17] 八幡和志、Society 5.0 に対応する実験教材開発.

[18] 八幡和志、科学教育の知見を取り入れた、デジタルエレクトロニクス技術講習.

- **日本物理学会 2020 年年次大会**, (名古屋大学、2020 年 3 月)（中止のため、講演概要提出による発表）

[19] 佐伯喜美子、八幡和志、茅元司、樋口秀男 フォトダイオード、マイクロ分光器と高解像カメラを使った光学測定教材の開発.

[20] 青木悠樹、八幡和志、iPad のタッチパネルを用いた力学教材の開発 (II).

[21] 八幡和志、南野真容子、FPGA を使った計算機教育の教材開発 (II).

[22] 田中忠芳、館宜伸、八幡和志、他、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 III (レディネスの多様性に対応可能なコンテンツの開発).

# II

# Summary of group activities in 2019

# 1 Theoretical Nuclear Physics (Fukushima) Group

**Research 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 2019 are summarized below:

1. Phenomenology
   - 1.1. Neutrino physics and flavor symmetry [1, 2, 3]
   - 1.2. Phenomenology of supersymmetric Standard Models [4, 5, 6, 7, 8]
   - 1.3. Future collider experiments [9, 10]
   - 1.4. Vacuum decay [11]
   - 1.5. Neutron stars [12, 13]
   - 1.6. Supersymmetric Grand Unified Theories [14, 15, 16, 17]
   - 1.7. Gravitational particle production [18, 19]
   - 1.8. Vector dark matter [20]
   - 1.9. Black hole superradiance [21]
   - 1.10. Axion detection [22]
   - 1.11. Dark matter and structure formation [23, 24]
2. Superstring theory and formal aspects of quantum field theories
   - 2.1. Lattice gauge theories [25]
   - 2.2. Mathematical study of duality in gauge/string theory [26, 27]
   - 2.3. Algebraic structure of string theories [28, 29]
   - 2.4. Operator product expansion in conformal field theory and its holographic description [30]
   - 2.5. Complexity and holographic in conformal field theory with boundary [31]

## References


[1] T. Araki, K. Asai, J. Sato and T. Shimomura, Phys. Rev. D **100**, no. 9, 095012 (2019) [arXiv:1909.08827 [hep-ph]].

[2] K. Asai, Eur. Phys. J. C **80**, no. 2, 76 (2020) [arXiv:1907.04042 [hep-ph]].

[3] S. Chigusa, S. Kasuya and K. Nakayama, Phys. Rev. D **100**, no. 1, 015030 (2019) [arXiv:1905.11517 [hep-ph]].

[4] S. Asai, S. Chigusa, T. Kaji, T. Moroi, M. Saito, R. Sawada, J. Tanaka, K. Terashi and K. Uno, JHEP **05** (2019), 179 [arXiv:1901.10389 [hep-ph]].

[5] S. Chigusa, Y. Hosomi, T. Moroi and M. Saito, Phys. Lett. B **803** (2020), 135260 [arXiv:1912.00592 [hep-ph]].

[6] H. Fukuda, N. Nagata, H. Oide, H. Otono and S. Shirai, Phys. Rev. Lett. **124**, no. 10, 101801 (2020) [arXiv:1910.08065 [hep-ph]].

[7] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto and T. Kitahara, [arXiv:2001.11025 [hep-ph]]. JHEP 発表予定.

[8] E. Kpatcha, I. Lara, D. E. López-Fogliani, C. Muñoz, N. Nagata, H. Otono and R. Ruiz De Austri, Eur. Phys. J. C **79**, no. 11, 934 (2019) [arXiv:1907.02092 [hep-ph]].

[9] T. Abe, S. Chigusa, Y. Ema and T. Moroi, Phys. Rev. D **100** (2019) no.5, 055018 [arXiv:1904.11162 [hep-ph]].

[10] D. Curtin *et al.*, Rept. Prog. Phys. **82**, no. 11, 116201 (2019).

[11] S. Chigusa, T. Moroi and Y. Shoji, Phys. Lett. B **800** (2020), 135115 [arXiv:1906.10829 [hep-ph]].

[12] K. Yanagi, N. Nagata and K. Hamaguchi, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **492**, no. 4, 5508 (2020) [arXiv:1904.04667 [astro-ph.HE]].

[13] K. Hamaguchi, N. Nagata and K. Yanagi, Phys. Lett. B **795**, 484 (2019) [arXiv:1905.02991 [hep-ph]].

[14] J. L. Evans, N. Nagata and K. A. Olive, Eur. Phys. J. C **79**, no. 6, 490 (2019) [arXiv:1902.09084 [hep-ph]].

[15] J. Ellis, J. L. Evans, N. Nagata, K. A. Olive and L. Velasco-Sevilla, arXiv:1912.04888 [hep-ph]; accepted for publication in EPJC.

[16] J. Ellis, M. A. G. Garcia, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, Phys. Lett. B **797**, 134864 (2019) [arXiv:1906.08483 [hep-ph]].

[17] J. Ellis, M. A. G. Garcia, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, JCAP **2001**, no. 01, 035 (2020) [arXiv:1910.11755 [hep-ph]].

[18] Y. Ema, K. Nakayama and Y. Tang, JHEP **1907**, 060 (2019) [arXiv:1903.10973 [hep-ph]].

[19] K. Nakayama, Phys. Lett. B **797**, 134857 (2019) [arXiv:1905.09143 [hep-ph]].

[20] K. Nakayama, JCAP **1910**, no. 10, 019 (2019) [arXiv:1907.06243 [hep-ph]].

[21] H. Fukuda and K. Nakayama, JHEP **2001**, 128 (2020) [arXiv:1910.06308 [hep-ph]].

[22] S. Chigusa, T. Moroi and K. Nakayama, Phys. Lett. B **803**, 135288 (2020) [arXiv:1911.09850 [astro-ph.CO]].

[23] K. J. Bae, R. Jinno, A. Kamada and K. Yanagi, "Fingerprint matching of beyond-WIMP dark matter: neural network approach," JCAP **03** (2020) no.03, 042 [arXiv:1906.09141 [astro-ph.CO]].

[24] A. Kamada and K. Yanagi, "Constraining FIMP from the structure formation of the Universe: analytic mapping from $m_{\rm WDM}$," JCAP **11** (2019), 029 [arXiv:1907.04558 [hep-ph]].

[25] T. Ago and Y. Kikukawa, JHEP **03** (2020) 044 [arXiv:1911.10925 [hep-lat]].

[26] S. Sasa, A. Watanabe and Y. Matsuo, "A note on S-dual basis in free fermion system," PTEP 2020 (2020) 2, 023B02.

[27] A. Watanabe and R.-D. Zhu, JHEP **02** (2020) 004 [arXiv:1909.04074 [hep-th]].

[28] M. Fukuda, Y. Ohkubo, and J. Shiraishi, "Generalized Macdonald Functions on Fock Tensor Spaces and Duality Formula for Changing Preferred Direction," arXiv:1903.05905 [math.QA].

[29] M. Fukuda, Y. Ohkubo, and J. Shiraishi, "Non-stationary Ruijsenaars functions for $\kappa = t^{-1/N}$ and intertwining operators of Ding-Iohara-Miki algebra," arXiv:2002.00243 [math.QA].

[30] H-Y. Chen, L-C, Chen, N. Kobayashi and T. Nishioka, "The gravity dual of Lorentzian OPE blocks," arXiv: 1912.04105, Accepted by JHEP.

[31] Y. Sato and K. Watanabe, "Does Boundary Distinguish Complexities?," JHEP **1911**, 132 (2019), [arXiv:1908.11094 [hep-th]].

# 3 Sakurai-Wimmer Group

**Research Subjects:** Structure and dynamics of exotic nuclei and exotic atoms

**Member:** Hiroyoshi Sakurai, Kathrin Wimmer 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.

**Missing mass spectroscopy of resonance states in light proton-rich nuclei**

In light unstable nuclei, specific correlations such as the cluster structure and halo are expected to appear. Experimental observables of light proton-rich nuclei are still limited comparing with those of neutron-rich nuclei and imporant as a basis of the study. The expriment are performed at GANIL in July 2018 to search for resonances of $^{8}$C, $^{7}$B and $^{6}$Be. The resonance states are populated via the one-neutron transfer $(p, d)$ reaction with radioactive beams and a liquid hydrogen target. The missing mass method was adopted by using MUST2 telescopes to reconstruct the resonance energy and the differential cross sections. The excitation energy spectra were successfully measured and new resonance states were observed.

**Muonic X-ray measurement on palladium isotopes**

The nuclear muon capture reaction, hereafter merely muon capture, is an analogous process to the electron capture reaction. The difference is the excination energy of the residual nucleus produced by the reaction, since the muon has larger mass by 200 times than the electron. Although the muon capture is an unique reaction with high Q-value and low angular-momentum transfer, the microscopic understanding has not been achieved yet. The experimantal data is also limited to several nuclides, and thus the experimental study is demanded. We conduct an experimental series aiming at measuring the neutrons and prompt/delayed $\gamma$ rays emitted following the muon capture of palladium isotopes. The experiments were performed at RCNP, Osaka University using the continuous muon beam and at J-PARC and RAL using the pulsed muon beam.

**High current beamline for transmutation accelerator**

High-current beam accelerator for transmutation of waste nuclear fuels from nuclear power plant is under development. A difficulity of a high beam current transportation is a larger beam diameter than conventional system, so that the accuracy of the paraxial approximation, adopted in the conventional beam optical calculation method, deteriorates. In addition, a beam halo is generated by multipole electromagnetic field excited by the beam and the solenoid magnet. We are developing methods to estimate a beam halo considering the effects of multipole electromagnetic fields and to cancel out the multipole electromagnetic field caused by the space charge effect by an appropriate placement and excitation of the solenoid coil.

**HiCARI project at RIBF**

HiCARI (High-Resolution Cluster Array at RIBF) aims at measuring high level density odd nuclei and the lifetimes of the excited states on unstable nuclei. This array consists of 12 germanium detectors gathered from all over the world. A series of experiments will be held at RIBF in 2020 with world-highest beam intensity of the unstable nuclei. Our proposed experiment to investigate the neutron shell evelution of titanium isotopes was approved by RIBF program advisary commitee.

**Systemtic mearuement of pion production cross section**

We are planning a measurement of pion production cross section at GSI for seveal beam nuclei, such as d, t, $^{4}$He and $^{6}$Li, on a carbon target. The pion production production cross section has been intensively measured in the past with a proton beam, while there is few measurement of the cross section with other heavy ion beams. Our systematic measurment of the pion production reactions will shed a light for understanding the reaction mechanism.

**Development of X-ray detector for non-destractive element analysis with muon beam**

Low-energy muonic X-ray spectrometer for eleemnt analysis (LeXSea) is under development for a measurement of low-energy X rays of muonic atoms of C, N and O, which have energies at 75, 102 and 135 keV, respectively. The detector consists of n-type or planer type high-purity germanium detector with BGO anti-Compton suppressor. First prototype detector was designed and developed this year as shwon in Fig. 2.1.5.

# 4 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 data from the KEK $B$-factory (KEKB), our group made many key measurements including the first observation of CP violation in B meson system. The quest for new physics continues 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, the physics data taking with the full Belle II detector has been started. We will search for new physics using Flavor Changing Neutral Current (FCNC) decays of B mesons.

**2. Study of neutrino oscillations and search for proton decay: Super-Kamiokande, T2K, and Hyper-Kamiokande experiments** We have been studying neutrino oscillations with the T2K long baseline neutrino experiment, in which intense neutrino and anti-neutrino beams produced using the J-PARC accelerator complex are measured with the SK detector, 295 km away. T2K is now searching for a new source of CP symmetry violation in neutrino oscillations that would manifest as a difference in the measured oscillation probability for neutrinos and antineutrinos. This year, we reported a new constraint on the CP violating phase to exclude almost half of the possible values at the $3\sigma$ confidence level.

We have been leading 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 neutrino-nucleus interaction cross sections. In addition, a major upgrade of T2K near neutrino detectors is planned in 2021. Our group proposed this upgrade and has been playing central roles in the project, now approved in the framework of CERN Neutrino Platform as NP07.

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. This year, the project was approved and the construction has been started.

**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 measured gravitational distortion of images of about 10 million galaxies obtained from a survey of 140 deg$^2$ of the sky (the area of 3000 full moons) over 90 nights. By analyzing the data, we obtained cosmological constraints on the fractional contribution of matter to the energy budget of the Universe, and the clumpiness of the matter distribution in the present Universe.

**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 (SOI) technology.

# 5 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.

# 6 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, thermoelectric materials with large response, organic conductors, and magnetic systems with frustration and/or spin-orbit interactions. The followings are the current topics in our group.

- Dirac electron systems in solids
  Quantum electrodynamics (QED) in solids: Dielectricity and diamagnetic current.
  Critical phenomena in Weyl semimetals due to impurities and scaling law in NMR relaxation rate.[1]
  Thermoelectric transport theory of a three-dimensional Dirac electron system in high magnetic field.[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]
  Chiral magnonic edge states in skyrmion crystals controlled by magnetic fields.[6]
  Universal quantization of orbital-Zeeman cross term in magnetic susceptibility.
- High-$T_c$ superconductivity
  Superconductivity in T′ electron-doped high-$T_c$ cuprates.
- Organic conductors

Low temperature thermal conductivity in a quantum spin liquid of $\kappa$-$H_3$(Cat-EDT-TTF)$_2$.
Photo-induced phase transition using Floquet theory.[7]

- Borophane-related materials.[8]
- Spin systems and spin-orbit interaction
  Anomalous temperature behavior of chiral spin helix in $CrNb_3S_6$.[9]
  Magnetization process and spin-liquid states in an interacting magnetic monopole system.[10]
  Detection theory of multipolar quantum spin ice in pyrochlore materials.[11]

[1] T. Hirosawa, H. Maebashi, and M. Ogata: Phys. Rev. B **101**, 155103 (2020). "Nuclear spin relaxation rate near the disorder-driven quantum critical point in Weyl fermion systems"

[2] V. Könye and M. Ogata: Phys. Rev. B **100**, 155430 (2019). "Thermoelectric transport coefficients of a Dirac electron gas in high magnetic field"

[3] M. Ogata and H. Fukuyama, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 074703 (2019). "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: J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 074601 (2019). "Effect of Phonon Drag on Seebeck Coefficient Based on Linear Response Theory: Application to $FeSb_2$"

[5] I. Tateishi: arXiv:2004.02160 (2020). "Mapping rules from Nodal Line Semimetal to Topological Crystalline Insulator in Face centered Cubic Lattice"

[6] S. A. Díaz, T. Hirosawa, J. Klinovaja and D. Loss: Phys. Rev. Research **2**, 013231 (2020). "Chiral magnonic edge states in ferromagnetic skyrmion crystals controlled by magnetic fields"

[7] K. Kitayama, M. Mochizuki "Predicted photoinduced topological phses in organic salt $\alpha$-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$"

[8] I. Tateishi, et al., Phys. Rev. Materials **3**, 024004 (2019). "Semi-metallicity of free-standing hydrogenated monolayer boron from $MgB_2$"

[9] Y. Togawa, et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 017204 (2019). "Anomalous Temperature Behavior of the Chiral Spin Helix in $CrNb_3S_6$ Thin Lamellae"

[10] K. Tokushuku, T. Mizoguchi and M. Udagawa: Phys. Rev. B **100**, 034415 (2019). "Trimer classical spin liquid from interacting fractional charges"

[11] A.S. Patri, M. Hosoi, S. Lee, and Y.B. Kim, arXiv: 1912.04291 (2019). "Probing multipolar quantum spin ice in pyrochlore materials"

# 7 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 tools are 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.

Major research topics in FY 2019 are as follows.

- Development of the data assimilation method for crystal structure exploration using incomplete diffraction data:
  In this fiscal year, in order to infer the unknown crystal structure with some atoms disorganized, we studied the efficient sampling of the average diffraction pattern of the disorganized system.

- Development of simulation methods for dealing with slow physical phenomena:
  We have developed a computational method to search for a path with a minimum energy barrier for shifting between locally stable atomic configurations without prior knowledge of the path direction and endpoints, and have released it as open source code.
- Development of new first-principles electronic state calculation methods that correctly consider electronic correlations based on the inverse Kohn-Sham method
- Development of the first-principles calculation method for superconducting transition temperatures taking account of the spin-fluctuation effect
- Definition of the ground state in an electron system driven by a periodic electric field (Floquet system)
- Origin of the strong electron-phonon interactions in the pressure-induced high-temperature superconductor $H_3S$
- Use of neural network potential in various structural simulations

# 8 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:** Synge Todo, Tsuyoshi Okubo, and Hidemaro Suwa

We are exploring novel methods in computational physics based on the stochastic process 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.

[1] S. Todo, H. Matsuo, H. 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).

[2] H. Watanabe, S. Morita, S. Todo, N. Kawashima, Fast algorithm for generating random bit strings and multispin coding for directed percolation, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 024004 (8pp) (2019).

[3] Daiki Adachi, Naoto Tsujimoto, Ryosuke Akashi, Synge Todo, Shinji Tsuneyuki, Search for Common Minima in Joint Optimization of Multiple Cost Functions, Comp. Phys. Comm. **241**, 92–97 (2019).

[4] 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).

[5] 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).

[6] Hyun-Yong Lee, Ryui Kaneko, Tsuyoshi Okubo, Naoki Kawashima, Gapless Kitaev Spin Liquid to Classical String Gas through Tensor Networks, Phys. Rev. Lett. **123**, 087203 (6pp) (2019).

[7] Ken M. Nakanishi, Kosuke Mitarai, Keisuke Fujii, Subspace-search variational quantum eigensolver for excited states, Phys. Rev. Research **1**, 033062 (7pp) (2019).

[8] Hayate Nakano, Seiji Miyashita, Characterization of localized effective spins in gapped quantum spin chains, Phys. Rev. B **100**, 195105 (11pp) (2019).

[9] Tokuro Shimokawa, Tsuyoshi Okubo, Hikaru Kawamura, Multiple-$q$ states of the $J_1$-$J_2$ classical honeycomb-lattice Heisenberg antiferromagnet under magnetic fields, Phys. Rev. B **100**, 224404 (15pp) (2019).

[10] Tatsuhiko Shirai, Synge Todo, Seiji Miyashita, Dynamical phase transition in Floquet optical bistable systems: An approach from finite-size quantum systems, Phys. Rev. A **101**, 013809 (7pp) (2020).

[11] Hyun-Yong Lee, Ryui Kaneko, Tsuyoshi Okubo, Naoki Kawashima, Abelian and Non-Abelian Chiral Spin Liquids in a Compact Tensor Network Representation, Phys. Rev. B **101**, 035140 (9pp) (2020).

[12] A. Miyata, H. Suwa, T. Nomura, L. Prodan, V. Felea, Y. Skourski, J. Deisenhofer, H.-A. Krug von Nidda, O. Portugall, S. Zherlitsyn, V. Tsurkan, J. Wosnitza, A. Loidl, Spin-lattice coupling in a ferrimagnetic spinel: Exotic $H - T$ phase diagram of $MnCr_2S_4$ up to 110 T, Phys. Rev. B **101**, 054432 (8pp) (2020).

[13] Hyun-Yong Lee, Ryui Kaneko, Li Ern Chern, Tsuyoshi Okubo, Youhei Yamaji, Naoki Kawashima, Yong Baek Kim, Magnetic field induced quantum phases in a tensor network study of Kitaev magnets, Nat. Comm. **11**, 1639 (7pp) (2020).

# 9 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 in and out of equilibrium, which would give rise to a variety of novel phases and dynamics. We study theoretically such systems, with the aim of predicting intriguing quantum phenomena that have no counterpart in weakly-interacting systems and cannot be understood within standard approaches. Our work involves a combination of analytical and numerical methods. We are currently interested in (i) topological phases of matter, (ii) low-dimensional correlated systems, (iii) dissipative quantum many-body systems, (iv) non-ergodic dynamics in non-integrable systems, and (v) 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 2019 are the following:

- Topological phases of matter
  - Three-dimensional topological magnon systems characterized by $\mathbf{Z}_2$ topological invariants [1]
- Low-dimensional correlated systems
  - Ferromagnetism in the SU($n$) Hubbard model with a nearly flat band [2]
  - Haldane phase in the spin-1 Bose-Hubbard model with a flat band [3]
- dissipative quantum many-body systems
  - Constructing neural stationary states in open quantum many-body systems [4]
  - Exact analysis of dissipative spin chains using a mapping to non-Hermitian models [5, 6]
- Mathematical and statistical physics
  - Constructing an infinite sequence of non-integrable models exhibiting perfect quantum many-body scars [8]

[1] Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura, Phys. Rev. B **100**, 144401 (2019) [Editors' Suggestion].

[2] Kensuke Tamura and Hosho Katsura, Phys. Rev. B **100**, 214423 (2019).

[3] Hong Yang, Hayate Nakano, and Hosho Katsura, Preprint, arXiv:2003.01705 (2020).

[4] Nobuyuki Yoshioka and Ryusuke Hamazaki, Phys. Rev. B **99**, 214306 (2019) [Featured in Physics, Editors' Suggestion].

[5] Naoyuki Shibata and Hosho Katsura, Phys. Rev. B **99**, 174303 (2019).

[6] Naoyuki Shibata and Hosho Katsura, Phys. Rev. B **99**, 224432 (2019).

[7] Shane Dooley, Graham Kells, Hosho Katsura, and Tony C. Dorlas, Phys. Rev. A **101**, 042302 (2020).

[8] Naoyuki Shibata, Nobuyuki Yoshioka, and Hosho Katsura, Phys. Rev. Lett. **124**, 180604 (2020) [Editors' Suggestion].

# 10 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] S. Ichinokura, Y. Nakata, K. Sugawara, Y. Endo, A. Takayama, T. Takahashi, and S. Hasegawa: *Vortex-induced quantum metallicity in mono-unit-layer superconductor $NbSe_2$*, Phys. Rev. B **99**, 220501(R) (Jun, 2019).

[2] N. V. Denisov, A. V. Matetskiy, A. N. Mihalyuk, S. V. Eremeev, S. Hasegawa, A. V. Zotov, and A. A. Saranin: *Superconductor-insulator transition in an anisotropic two-dimensional electron gas assisted by one-dimensional Friedel oscillations: (Tl, Au)/Si(100)-c*$(2 \times 2)$, Phys. Rev. B **100**, 155412 (Oct, 2019).

[3] Y. Endo, Y. Fukaya, I. Mochizuki, A. Takayama, T. Hyodo, S. Hasegawa: *Structure of Superconducting Ca-intercalated Bilayer Graphene/SiC studied using Total-Reflection High-Energy Positron Diffraction*, Carbon **157**, 857-862 (Jan, 2020).

[4] Y. Takeuchi, R. Hobara, R. Akiyama, A. Takayama, S. Ichinokura, R. Yukawa, I. Matsuda, S. Hasegawa: *Two-dimensional conducting layer on SrTiO3 surface induced by hydrogenation*, Phys. Rev. B **101**, 085422 (Feb, 2020).

[5] Di Fan , Rei Hobara, Ryota Akiyama , and Shuji Hasegawa: *Inverse Spin Hall Effect Induced by Asymmetric Illumination of Light on Topological Insulator $Bi_2Se_3$*, Physical Review Research **2**, 023055 (Apr, 2020).

[6] Y. C. Lau, R. Akiyama, H. Hirose, R. Nakanishi, T. Terashima, S. Uji, S. Hasegawa, M. Hayashi: *Concomitance of superconducting spin-orbit scattering length and normal state spin diffusion length in W on $(Bi,Sb)_2Te_3$*, Journal of Physics: Materials **3**, 034001 (May, 2020).

[7] H. Huang, H. Toyama, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, A. Takayama, R. Hobara, R. Akiyama, A. V. Zotov, A. A. Saranin, and S. Hasegawa: *Superconducting proximity effect in a Rashba-type surface state of Pb/Ge(111)*, Superconductor Science and Technology, accepted (cond-mat arXiv:1910.03760).

# 11 Fukuyama Group

**Research Subjects:** Low Temperature Physics (Experimental):
Novel quantum phases in fluids and solids of helium in two dimensions,
Novel electronic states in graphene.

**Member:** Hiroshi Fukuyama, Tomohiro Matsui

We are interested in (i) novel quantum phases with strong correlations of condensed phases of helium three ($^3$He) and helium four ($^4$He) in two dimensions (2D) and (ii) novel electronic properties of graphene, a monatomic sheet of carbon atoms, and their topological aspects. We are investigating those systems down to ultra-low temperatures of the order of 100 $\mu$K using various experimental techniques such as calorimetry, torsional oscillator, NMR, scanning tunneling microscopy and spectroscopy (STM/STS), and electronic transport measurement, *etc.*

1. **Search for Superfluid Liquid Crystal Phase in Monolayer of $^4$He:**

   In 2016, based on measurements of specific heat anomalies due to melting, we proposed the possible existence of a novel quantum phase, quantum liquid crystal (QLC), in the second layer of helium adsorbed on graphite. Next, we studied nuclear magnetism of monolayers of $^3$He where two novel quantum spin liquid phases were found to exist. Eventually, the magnetic properties of one of the phases are consistent with the large density fluctuations expected for QLC.

   We have started new experiments to seek for possible superfluidity in the possible QLC phase of $^4$He because, if the superfluidity can be confirmed in this 2D bosonic system, it would be a strong indication of finite fluidity that may indicate QLC. To avoid unexpectedly large uncertainties in the sample densities due to substrate heterogeneities, we developed a novel technique to make simultaneous torsional oscillator (TO) and specific heat measurements.

   The simultaneous measurements are now on going. So far, we have tentatively observed novel superfluidity both in the liquid and the possible QLC phases below 200 mK.

2. **Graphene Edge State:**

   One important property of graphene for its application to future electronic devices is the spin-polarized edge state on graphene nanoribbons of widths narrower than 20 nm with zigzag edges on both sides (z-GNRs). Due to the flat band nature of the edge state, even under weak on-site interactions, electron spins are theoretically predicted to ferromagnetically align along the same edge and antiferromagnetically on different edges.

   We developed the hydrogen(H)-plasma etching technique to synthesize many hexagonal nanopits of monatomic depth and several hundred nm size, that consist of high-density zigzag edges, on the surface of graphite. The size and density of nanopits can be controlled by tuning the temperature, the pressure of hydrogen, etc., and thus narrow z-GNRs can be created in between two nanopits. STS measurements across such z-GNRs revealed a clear double peak structure (spin gap) of the edge state, indicating successful observation of the spin-polarized edge state. In addition, the spin gap energy seems to be inversely proportional to the ribbon width.

To study the possible substrate effect on the above mentioned observation, we made STS measurements for z-GNRs synthesized in graphene epitaxially grown on an SiC($000\bar{1}$) substrate by H-plasma etching. Although doping is rather substantial ($-160 \sim +100$ mV) in this system, we were successful to observe clear local density of states (LDOS) peaks associated with the edge state. Nonetheless, even for sufficiently narrow z-GNRs, the double peak structure indicative of the spin-polarization was not observed here. This may be reasonable, as the Stoner criterion for ferromagnetism may not be fulfilled since the edge states sit usually farther away from the Fermi level.

# 12 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-adatom 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 $H_{\parallel} = 14$ 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 investigate exotic superconducting states in multilayer systems, we fabricated bilayer and trilayer films on a 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 space inversion symmetry. A sharp upturn was observed in the temperature dependence of the parallel upper critical magnetic field. Using numerical calculations with the Bogoliubov-de Gennes equations, we found that it corresponds to a transition from a complex-stripe phase to a helical phase. Moreover, we have studied nonreciprocal charge transport in superconducting ultrathin films. For ultrathin Pb and Al films, the antisymmetrized second harmonic magnetoresistance was observed, which suggests that the rectification effect occurs in superconducting metallic films grown on a GaAs (110) surface.

# 13 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∼4meV) frequency range where various quasi-particle excitations and various collective excitations exist. The research summary in this year is as follows.

1. **Superconducting fluctuation studied by Higgs mode responses in superconducting high-$T_c$ cuprates:** We investigated the superconducting fluctuation in high-$T_c$ cuprates through the measurement of Higgs mode. By using THz pump-optical probe measurements, we observed the Higgs mode response in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ in a wide range of hole doping. We elucidated that there are two onset temperatures for the pump-probe signal; $T_1^{\rm ons}$ which is located about 10 K above $T_c$, and $T_2^{\rm ons}$ which is located substantially higher(∼100 K) than $T_c$. By comparing with the onset temperature of the superfluid density extracted from the optical conducitivy spectrum, $T_1^{\rm ons}$ is attributed to the onset of Higgs mode response, and therefore to the onset of superconducting phase coherence. On the other hand, $T_2^{\rm ons}$ conicides with that of gap opening tempreture observed in the scanning tunneling spectroscopy, potentially suggesting the Cooper pair formation temperature. Higgs mode in high-$T_c$ cupreates were also investigated by THz-third harmonic generation(THG) measurements. In addition to the heavily damped Higgs mode, we observed a universal jump in the phase of THG signal, indicating other collective modes that couple to the Higgs mode. THG signal remains finite above $T_c$, suggesting a nonzero pairing amplitude above $T_c$.

2. **Realization of electron-hole BCS-like state in a photoexcited semiconductor:** We demonstrated that a new quantum degenerate state consisted of elctron-hole pairs, referred to as an electron-hole(e-h) BCS state, could be generated by irradiating a semiconductor with laser light. This has been predicted in theory for several decades but never demonstrated under experimental conditions. We took an unprecedented and unique approach and succeeded by utilizing the strong interaction between laser light and excitons. We tuned the wavelength of the laser beam and generated a new quantum state (i.e. an e-h BCS state) by directly aiming at excitons in GaAs cooled to 5 K. With increasing the light intensity, we show that the e-h systems truns from an emsemble of excitons to e-h BCS state. The realization of a new quantum state (i.e., an e-h BCS state) using this technique advances the understanding of the electronic state that occurs when a semiconductor is irradiated with light, and also provides deeper understanding of the new type of quantum condensation phenomena in variety of materials going forward.

### References


[1] Y. Murotani and R. Shimano: Nonlinear optical response of collective modes in multiband superconductors assisted by nonmagnetic impurities, Phys. Rev. B **99**, 224510 (2019).

[2] S. Nakamura, Y. Iida, Y. Murotani, R. Matsunaga, H. Terai, R. Shimano: Infrared Activation of the Higgs Mode by Supercurrent Injection in Superconducting NbN, Phys. Rev. Lett. **122**, 257001 (2019).

[3] N. Yoshikawa, M. Takayama, N. Shikama, T. Ishikawa, F. Nabeshima, A. Maeda, R. Shimano: Charge carrier dynamics of FeSe thin film investigated by terahertz magneto-optical spectroscopy, Phys. Rev. B **100**, 035110 (2019).

[4] H. Niwa, N. Yoshikawa, K. Tomari, R. Matsunaga, D. Song, H. Eisaki, R. Shimano: Light-induced nonequilibrium response of the superconducting cuprate $La_{2-x}Sr_xCuO_4$, Phys. Rev. B **100**, 104507 (2019). (Editors' suggestion)

[5] Y. Murotani, C. Kim, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, K. W. West, R. Shimano: Light-driven electron-hole Bardeen-Cooper-Schrieffer-like state in bulk GaAs, Phys. Rev. Lett. **123**, 194401 (2019). (Editors' suggestion)

[6] Hao Chu et al.,: Phase-resolved Higgs response in superconducting cuprates, Nature Communications, in press.

[7] R. Shimano and N Tsuji: Higgs mode in Superconductors, Annual Review of Condensed Matter Physics **11**, 103-124 (2020).


# 14 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 FY2019 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 spin liquid, where quantum spins fluctuates at abosolute zero, should be a milestone in the field of quantum spin physics. After a theoretical achievement of the exaclty solvable spin liquid state on a honeycomb lattice, by Alexei Kitaev, a materialization of this Kitaev Honeycomb Model (KHM) has been intensively pursuit. 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-dimensonal honeycomb iridate, $H_3LiIr_2O_6$, and discovered that $H_3LiIr_2O_6$ 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 in 2018–2019.

The key ingredient to realize KHM is bond-dependent anisotropic Ising-like interactions, and it was suggested that material engineering for spin-orbit coupled $J_{\rm eff} = 1/2$ quantum pesudo 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 exaclty 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 pursuit realization of "true" Kitaev material. This year, we are exploring a new route to Kitaev physics, by making Lanthanoid honeycomb mateirals. For example, $Na_2PrO_3$ is a newly suggested candidate for a platform of an antiferromagnetic Kitaev-type interaction. We have clarified $Na_2PrO_3$ is indeed located closed to the true Kitaev point in the theoretical phase diagram by determination of magnetic structure though $^{23}$-Na NMR experiment. We further explore $4f^{1,13}$ honeycomb systems in combination with highpressure-state survay using new highpressure magnetometry techniques.

We have demonstrated a realization of three-dimensional Dirac electrons in anti-perovskite oxide $Sr_3PbO$, which is evidenced by the quantum-limit characters in the magnetoresistance under high magnetic fields. In addition to this, we have carried out $^{207}$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. This year, we conducted very accurate angle-dependent magnetoresistance measurements to investigate chiral anomaly phenomenon which is peculiar to this quantum-limit physics. Newly developed small two-axis goniometric device was used. A current jetting effect was clearly observed as a negative resistance when an applied megnetic field directed one of elecrodes. Altough reproducibility needs to be examined further, we succeeded in separate the effects from chiral anomaly and current jetting effect.

# 15 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 tranport, 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
  - Observation of a giant acoustic planar Hall effect[2]
  - Highly efficient spin orbit torque in sythetic antiferromagnets[5]
  - Giant spin orbit torque found in systems with Dirac electrons[6]
- Chiral magnetism
  - DMI and spin orbit torque at the Ir/Co interface[1]
  - DMI modulation with current[3]
  - Giant perpendicular magnetic anisotropy in Ir/Co/Pt multilayers[4]

[1] Y. Ishikuro, M. Kawaguchi, N. Kato, Y.-C. Lau, M. Hayashi, Dzyaloshinskii-Moriya interaction and spin-orbit torque at the Ir/Co interface. Phys. Rev. B 99, 134421 (2019).

[2] T. Kawada, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Unidirectional planar Hall voltages induced by surface acoustic waves in ferromagnetic thin films. Phys. Rev. B 99, 184435 (2019).

[3] N. Kato, M. Kawaguchi, Y.-C. Lau, T. Kikuchi, Y. Nakatani, M. Hayashi, Current induced modulation of interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction. Phys. Rev. Lett. 122, 257205 (2019).

[4] Y.-C. Lau, Z. Chi, T. Taniguchi, M. Kawaguchi, G. Shibata, N. Kawamura, M. Suzuki, S. Fukami, A. Fujimori, H. Ohno, M. Hayashi, Giant perpendicular magnetic anisotropy in Ir/Co/Pt multilayers. Phys. Rev. Mater. 3, 104419 (2019).

[5] Y. Ishikuro, M. Kawaguchi, T. Taniguchi, M. Hayashi, Highly efficient spin-orbit torque in Pt/Co/Ir multilayers with antiferromagnetic interlayer exchange coupling. Phys. Rev. B 101, 014404 (2020).

[6] Z. Chi, Y.-C. Lau, X. Xu, T. Ohkubo, K. Hono, M. Hayashi, The spin Hall effect of Bi-Sb alloys driven by thermally excited Dirac-like electrons. Science Advances, 6, eaay2324 (2020).

# 16 Kobayashi Group

**Research Subjects:** mesoscopic physics, spintronics, noise & fluctuations, nonequilibrium phenomena

**Member:** Kensuke Kobayashi

By virtue of nano-fabrication technique we are able to investigate fascinating behaviors of "mesoscopic systems", namely, electronic devices that work in quantum regime. Since 1980's they have been serving as ideal test-beds to demonstrate various quantum effects in a controllable and thus transparent way, as the electron transport through a single quantum site can be precisely probed and tuned. Especially, the Landauer-Büttiker formalism embodies this advantage of mesoscopic physics as has been successfully applied to many nano-fabricated conductors (e.g. Aharonov-Bohm ring, quantum dot etc.), through which mesoscopic physics has been established.

We focus on various phenomena in mesoscopic systems, especially quantum many-body effects, non-equilibrium phenomena, and spin transport. High-precision measurement of conductance and current fluctuations enables us to quantitatively understand quantum transport, which has been difficult to achieve in the past. In addition, we are developing measurement techniques to discover new phenomena in mesoscopic systems.

In FY2019, we addressed the following research topics:

- Non-equilibrium transport and many-body correlations in Kondo effect
- Rashba-type spin-orbit interaction in a double-layer quantum point contact
- Magnetization metastable state controlled by spin current
- Development of low temperature amplifier for current noise measurement
- Electric detection of spin dynamics in spinglass
- Butterfly-shaped magnetoresistance in triangular-lattice antiferromagnet $Ag_2CrO_2$
- Magnetic transport measurements in atomic layer ferromagnet $Fe_5GeTe_2$

Published papers:

[1] M. Tokuda *et al., APEX* **12,** 053005 (2019).

[2] S. Iwakiri *et al., Appl. Phys. Lett.* **115,** 092407 (2019).

[3] M. Ferrier *et al., J. Low Temp. Phys.* (2019) [https://doi.org/10.1007/s10909-019-02232-4]

[4] A. Lahiri *et al., Phys. Rev.* B **101,** 041102(R) (2020).

[5] D. Terasawa *et al., Phys. Rev.* B **101,** 115401 (2020).

[6] H. Taniguchi *et al., Sci. Rep.* **10,** 2525 (2020).

[7] T. Ohta *et al., APEX* **13,** 043005 (2020).

# 17 Nakatsuji Group

**Research Subjects:** Condensed Matter Experiment

**Member:** Satoru Nakatsuji

Recent years have seen a plethora of exciting discoveries that rapidly expand the frontiers of quantum material research. The concept of topology begins to revolutionize our understanding of the emergent properties of matter such as magnetism and superconductivity – meanwhile, the novel topological materials may form the basis for conceptually new spintronics and thermoelectric applications. Moreover, emergent phenomena in quantum materials provide an excellent experimental platform to explore emergent quasiparticles that behave like the ever-elusive elementary particles, such as the magnetic monopole and the Weyl fermion, thereby boosting the development of the cosmology-driven condensed matter theory and quantum information technology. Our research activities focus on designing and synthesizing new materials with emergent quantum properties that have never been seen before, then exploring the physics behind such properties with our world-leading measurement facilities. We aim to lead the innovative quest for new quantum materials that bear a far-reaching impact not only on basic science but also on our everyday life in the future.

**Major research themes:**
1. Solid-state analogs of relativistic particles and new quantum phenomena
   - Weyl fermion and chiral anomaly
   - Quantum spin ice, magnetic monopole, and emergent photon
2. Room-temperature quantum transport phenomena in topological magnetic materials
   - Weyl antiferromagnets and their application to spintronic devices
   - Giant thermal and optical responses driven by the Berry curvature
3. Quantum phase transitions in strongly correlated materials
   - Anomalous metallic behavior and exotic superconductivity in multipolar Kondo materials

**Summary of research subjects in 2019**
1. Applications of Weyl antiferromagnets to spintronics
The Weyl antiferromagnet $Mn_3Sn$ displays a large anomalous Hall effect (AHE) at room temperature despite the negligible net magnetization. This experimental discovery is a remarkable advance in transferring the concepts of antiferromagnetic spintronics to a variety of real-life applications. In collaboration with Prof. Otani's group at ISSP, we performed room-temperature inverse spin Hall effect experiments using $Mn_3Sn$ nanowires, which yields an estimation of the spin Hall angle and spin diffusion length. Moreover, we observed the room-temperature THz AHE in $Mn_3Sn$ thin films using polarization-resolved spectroscopy in collaboration with the optical measurement groups at ISSP and John Hopkins University. This finding promises ultrafast readout for antiferromagnetic spintronic devices using $Mn_3Sn$.

2. Anomalous metallic behavior in multipolar Kondo materials:
The heavy fermion superconductor $PrV_2Al_{20}$ hosts a nonmagnetic crystal electric field (CEF) ground state that lacks dipolar moment but carries quadrupolar and octupolar moments, rendering an ideal ground for exploring orbital-driven anomalous metallic states. Under a [100] magnetic field, we found that, on entering the high-field phase at 12 T, the rearrangement of quadrupolar moments yields a sharp jump in the magnetoresistance, with a substantial AMR effect of about 30%. This feature signifies a Fermi surface reconstruction within the high-field quadrupolar ordered phase, owing to the strong hybridization between the local quadrupolar moment and the conduction electrons. Moreover, we observed a universal scaling behavior expected for the quadrupolar Kondo lattice via magnetoresistance, magnetization, and specific

heat measurements under a [110] magnetic field, which reveals the vital role of the quadrupolar Kondo effect in shaping the non-Fermi-liquid phase of $PrV_2Al_{20}$.

3. Magnetic Weyl semimetal state in epitaxial $Pr_2Ir_2O_7$ thin films:
Lattice strain or magnetic field tuning of the Luttinger semimetal $Pr_2Ir_2O_7$ may engender a rich topological phase diagram. Using strained $Pr_2Ir_2O_7$ thin films, we observed a zero-field Hall effect up to 50 K without detectable spontaneous magnetization, which indicates the breaking of time-reversal symmetry induced by the magnetic order of Ir 5d electrons. Moreover, we identified a negative contribution to the magnetoresistance specific to the chiral anomaly. This study provides firm experimental evidence for a strain-induced magnetic Weyl semimetal state in pyrochlore iridates thin films, paving a new avenue to explore topological phases in strongly correlated materials.

# 18 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;

2019

- Observational characterization of protoplanetary disks, exo-rings, and Earth-twins in exoplanetary systems
- Non-sphericities and alignments of clusters and central galaxies from cosmological hydrodynamical simulation: theoretical predictions and observational comparison
- Probing Cosmic Star-Formation History with Blind Millimetre Searches for Galaxy Emission Lines
- Photoevaporation process of giant planets
- Dilution of heavy elements in galaxies and its implications

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

# 19 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 and Jun-yi Wu (JSPS foreign postdoctoral fellow since Ocotober—, and 4 graduate students–Qingxiuxiong Dong (D2), Wataru Yokojima (M2), Atsuhi Okamoto (M1), and Leonie Karr (USTEP graduate student from Ludwig Maximilian University of Munich). Our projects engaged in the academic year of 2018 were the following:

- Higher-order quantum operations
  - Universal discrimination of unitary operations with dynamic ordering of black bxoes by A. Soeda and M. Murao
  - Characterization of higher-order quantum operations without definite causal order by W. Yokojima, M. T. Quintino, A. Soeda, and M. Murao
  - Formulation of controlled quantum operations and controlled higher-order quantum operations and applications of the formulation by Q. Dong, A. Soeda and M. Murao
  - Higher-order transformations of unitary operations by probabilistic, exact, and universal quantum circuit by M. T. Coelho Quintino, Q. Dong, A. Soeda, and M. Murao
- Controls for quantum dynamics
  - Numerical optimization of robust control of one-qubit gate in Hamiltonian dynamics system by A. Okamoto, A. Soeda, and M. Murao
  - Mathematical models based on quantum field theory for artificial quantum systems by A. Soeda
- Distributed quantum information processing
  - Distributed sampling, certification of quantum communication, and incompatibility of quantum measurements by M. T. Quintino with Dr. Leonardo Guerini at International Centre for Theoretical Physics - South American Institute for Fundamental Research and Instituto de Física Teórica and Dr. Leandro Aolita at Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro
  - Complementarity in multiphoton linear optical network by J. Wu and M. Murao
  - Difference between LOCC quantum state discrimination and LOCC quantum information extraction by L. Karr and M. Murao

# 20 Ueda Group

**Research Subjects:** Bose-Einstein condensation, fermionic superfluidity, topological phenomena, open quantum systems, information thermodynamics, quantum information, measurement theory, machine learning

**Member:** Masahito Ueda and Masaya Nakagawa

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 nonunitary dynamics of atomic gases subject to dissipation and/or measurement backaction, classification of phases of matter in nonequilibrium open systems, 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. Moreover, we have recently tackled an understanding of AI and machine learning from a viewpoint of physics. We list our main research subjects in FY2019 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms, nonequilibrium open systems
  - Quantum magnetism of the Hubbard model subject to dissipation [1]
  - Classification of topological phases in non-Hermitian systems [2, 3, 4]
  - Non-Hermitian many-body localization [5]
  - Random-matrix behavior of quantum nonintegrable systems with symmetries [6]
  - Classification of gapless topological phases in periodically driven quantum systems [7]
- Quantum information, quantum measurement, and foundation of statistical mechanics
  - Standard quantum limit and Heisenberg limit in function estimation [8]
  - Classification of nonequilibrium many-body topological phases with matrix-product unitaries [9]
  - Improvement of deep learning using portfolio theory [10]

[1] M. Nakagawa, N. Tsuji, N. Kawakami, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **124**, 147203 (2020).

[2] K. Kawabata, T. Bessho, and M. Sato, Phys. Rev. Lett. **123**, 066405 (2019).

[3] K. Kawabata, K. Shiozaki, M. Ueda, and M. Sato, Phys. Rev. X **9**, 041015 (2019).

[4] N. Okuma, K. Kawabata, K. Shiozaki, and M. Sato, Phys. Rev. Lett. **124**, 086801 (2020).

[5] R. Hamazaki, K. Kawabata, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **123**, 090603 (2019).

[6] R. Hamazaki and M. Ueda, Phys. Rev. E **99**, 042116 (2019).

[7] S. Higashikawa, M. Nakagawa, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **123**, 066403 (2019).

[8] N. Kura and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **124**, 010507 (2020).

[9] Z. Gong, C. Sünderhauf, N. Schuch, and J. I. Cirac, Phys. Rev. Lett. **124**, 100402 (2020).

[10] Z. Liu, Z. Wang, P. P. Liang, R. R. Salakhutdinov, L.-P. Morency and M. Ueda, Advances in Neural Information Processing Systems **2019**, 10622 (2019).

# 21 Yokoyama (J) Group

**Research Subjects:** Theoretical Cosmology and Gravitation

**Member:** 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 2019.

## Early Universe Cosmology

- Cosmology with heavy right-handed neutrinos generated by gravitational particle production
- Formation of primordial black holes
- Leptogenesis through the Standard Model Higgs relaxation
- Leptogenesis from the helical primordial gravitational waves
- Phase transition mediated by black holes
- Compactification of extra dimensions with generalized Galileon
- Magnetogenesis and baryogenesis through the chiral anomaly
- Mixed Higgs-$R^2$ inflation
- Quantum tunneling in the curved spacetime
- Particle production associated with the phase transition of the background fields

## Particle astrophysics

- Neutrino heating in supernova explosions

## Supergravity and modified gravity

- Effective action for the anti D-3 brane
- Supersymmetric Horndeski theory
- Stability condition of the perturbation in the angular direction in the static spherical spacetime for the generalized Galileon

## Gravitational wave analysis

- Removal of non-Gaussian noise of KAGRA data by independent component analysis

# 22 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 study magnetic confinement of a torus plasma to realize nuclear fusion energy. We perform basic tokamak plasma physics studies on the TST-2 device located at the university of Tokyo. We also collaborate with JT-60SA at QST, LHD at NIFS, LATE at Kyoto University, and QUEST at Kyushu University. TST-2 is a spherical tokamak with a major radius 0.36 m and a minor radius 0.23 m. The plasma current is <120 kA for inductive operation and <28 kA for RF driven operation. Spherical tokamaks are attractive since they can sustain plasmas with high $\beta$ (kinetic pressure over magnetic pressure). However, plasma current startup and sustainment is a challenge due to limited space for the central solenoid normally used for current drive. Our present focus on TST-2 is current drive through generation of fast electrons by lower-hybrid waves (LHW). On FY2019, the hard X-ray measurements, scrape-off-layer measurements, and bulk electron measurements was improved, as well as the wave measurements using magnetic probes. These lead to better understanding of fast electron dynamics and wave propagation and absorption. We have also performed experiments to study electron cyclotron wave assisted Ohmic plasma startup, and shaping experiments using a compact central solenoid.

The RF current drive experiments are performed using LH waves at 200 MHz. The LH waves are excited using two capacitively coupled combline antennas located at the outboard side and the top side of the plasma. Since LH waves drive current by generating fast electrons, measurements of X-ray radiations by those fast electrons are important. On FY2019, it was found that the X-ray energy was higher when the outboard gap between the plasma and the limiter was larger. This was qualitatively consistent with RF driven radial transport of fast electrons. Parametric decay instability was observed with magnetic probes. The spatial distribution of the side band depended strongly on the current drive scenario. Langmuir probes were fabricated and installed to investigate the scrape-off-layer conditions. The measured I-V characteristic showed electron energy distribution with two distinct temperatures at 8 eV and <1 keV. Discharges with central electron temperature two to three times higher than the typical LH discharges were found. The electron temperature scaled inversely proportional to the electron density, and strongly positively to the magnetic field strength. On the other hand, dependence on RF power and plasma current was weak.

The equilibrium magnetic field in a LH driven plasma is determined by the fast electrons which are highly non-thermal and have large orbit excursions. Such an equilibrium cannot be descried by the conventional magneto-hydro dynamics (MHD). On FY2019, we have developed an extended MHD model that assumes a two component plasma with bulk MHD and kinetic collisionless fast electrons. The equilibrium reconstruction based on the extended MHD model matched better the density profile measured by the Thomson scattering diagnostic than that based on the conventional MHD.

A compact central solenoid was used for plasma shaping of electron cyclotron (EC) wave driven plasma. Shaping effect on LH driven plasma was weak due to limited coil current.

Optimum poloidal field configuration for EC assisted Ohmic startup was investigated. It was demonstrated that the so called trapped-particle configuration that has been used for pure EC startup experiments was superior to the conventional field-null startup in the presence of EC assistance.

The ion doppler spectroscopy was performed to study the time evolution of flow during internal reconnection events (IRE). From CV measurements, it was found that the flow changes by <20 km/s during IRE. The flow started to change around the peak of the magnetic fluctuations. However, the flow change did not correlate with the magnitude of the magnetic fluctuations.

Several diagnostic developments were performed in FY2019. The Thomson scattering diagnostic was rearranged to measure the edge plasma. LYSO based hard X-ray imaging diagnostic was developed and measurements were performed.

As a collaboration, Thomson scattering diagnostic on QUEST is being developed. Thomson scattering measurement was performed for ECH driven discharges.

Soft X-ray imaging system is being developed as a collaboration with PPPL. In FY2019, the system was installed on MST. The measurement agreed well with the prediction. Optimization of X-ray imaging camera parameters for JT-60SA plasmas was also performed.

# 23 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 $C_2H$, $C_4H$, and $HC_5N$. 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 $CH_3OH$, $HCOOCH_3$, and $C_2H_5CN$. 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 $CH_3OH$ and $HCOOCH_3$ 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.

[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).

# 24 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) Recipe for preparing a molecular ensemble with macroscopic threefold symmetry [1]**

We propose how to prepare a molecular ensemble with macroscopic threefold symmetry. By utilizing the special laser electric field trajectory with threefold symmetry, which can be formed by superposing a counterrotating circularly polarized fundamental pulse and its second harmonic pulse, sample molecules with threefold symmetry such as $BX_3$ (X = F, Cl, Br, I) can be aligned with their three arms along (or in between) the laser electric fields with threefold symmetry depending on the sign of the hyperpolarizability of the sample molecule. We show that this method is feasible with practical experimental conditions as for the rotational temperature of the sample molecules and the intensities of the two wavelengths. This method will open up physics of symmetry concerning a molecular ensemble with macroscopic threefold symmetry.

**(2) Orientation of linear molecules in two-color laser fields with perpendicularly crossed polarizations [2]**

Molecular orientation methods based on nonresonant two-color laser pulses having parallel polarizations have been reported theoretically and experimentally. In this work, we demonstrate that perpendicularly polarized two-color laser fields can be used to achieve stronger molecular orientation when nanosecond laser pulses are used. The two-color fields align the molecules to the two-dimensional plane parallel to the field polarization; at the same time, they orient the molecules in the direction of the $2\omega$ polarization. We show that the interplay between the interactions due to the $\omega$- and $2\omega$-laser fields provides stronger molecular orientation than the parallel field configuration. This is due to temporally synchronized generations of alignment and orientation, which reduce the nonadiabatic effects.

**(3) Development of a plasma shutter applicable to 100-mJ-class, 10-ns laser pulses and the characterization of its performance [3]**

For the purpose of preparing a sample of aligned and oriented molecules in the laser-field-free condition, we developed a plasma shutter, which enables laser pulses with 100-mJ-class, 10-ns pulse durations to be rapidly turned off within ∼150 fs. In this work, the residual field intensity after the rapid turn off is carefully examined by applying the shaped laser pulse to OCS molecules in the rotational ground state. Based on the comparison between the observation of alignment revivals of the OCS molecules and the results of numerical simulations, we demonstrate that the residual field intensity is actually negligible (below 0.4% of the peak intensity) and, if any, does not influence the alignment and orientation dynamics at all.

[1] Hiroto Nakabayashi, Wataru Komatsubara, and Hirofumi Sakai, "Recipe for preparing a molecular ensemble with macroscopic threefold symmetry," Phys. Rev. A **99**, 043420 (2019) (5 pages).

[2] Je Hoi Mun, Hirofumi Sakai, and Rosario González-Férez, "Orientation of linear molecules in two-color laser fields with perpendicularly crossed polarizations," Phys. Rev. A **99**, 053424 (2019) (10 pages).

[3] Je Hoi Mun, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Development of a plasma shutter applicable to 100-mJ-class, 10-ns laser pulses and the characterization of its performance," Opt. Express **27**, 19130–19140 (2019) (11 pages).

# 25 Gonokami and Yumoto 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 and Junji Yumoto

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, and electrons in topological insulators. 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 excitions 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 teraherz-wave responses of artificial nanostructures fabricated by advanced technologies. Furthermore, we are now developing novel coherent light sources and spectroscopic methods. We achieved precision measurements of the refractive index of materials in an EUV region using techniques of higher-order harmonics generation. We also developed laser-based angle resolved photoemission spectroscopy using time-of-flight photoelectron analyzer.

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
2. Investigation for non-trivial optical responses and development of applications:
   2.1. Circularly polarized coherent VUV generation by photonics crystal nanomembrane
   2.2. Development of new technology to measure laser ablation thresholds
   2.3. Fabrication of Moth-Eye THz Anti-Reflection Structures by Femtosecond Laser Processing
   2.4. 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. EUV precision spectroscopy using higher-order harmonics
   3.2. Laser-based angle resolved photoemission spectroscopy
   3.3. Institute for Photon Science Technology

# 26 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] K. Komori et al.: Attonewton-meter torque sensing with a macroscopic optomechanical torsion pendulum, Phys. Rev. A 101, 011802(R) (2020).

[2] Y. Michimura et al.: DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, Journal of Physics: Conference Series 1468, 012032 (2020).

[3] KAGRA Collaboration: An arm length stabilization system for KAGRA and future gravitational-wave detectors, Classical and Quantum Gravity 37, 035004 (2020).

[4] H. Takeda et al.: Prospects for gravitational-wave polarization tests from compact binary mergers with future ground-based detectors, Phys. Rev. D 100, 042001 (2019).

[5] K. Nagano et al.: Axion Dark Matter Search with Interferometric Gravitational Wave Detectors, Phys. Rev. Lett. 123, 111301 (2019).

[6] KAGRA Collaboration: KAGRA: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector, Nature Astronomy 3, 35-40 (2019).

[7] M. Kimura et al.: Earthquake-induced prompt gravity signals identified in dense array data in Japan, Earth, Planets and Space 71, 27 (2019).

[8] T. Shimoda, and M. Ando: Nonlinear vibration transfer in torsion pendulums, Class. Quantum Grav. 36 12 (2019).

[9] KAGRA Collaboration: Vibration isolation system with a compact damping system for power recycling mirrors of KAGRA, Class. Quantum Grav. 36, 095015 (2019).

[10] S. Kawamura et al.: Space gravitational-wave antennas DECIGO and B-DECIGO, Int. J. Mod. Phy. D 28, 1845001 (2019).

[11] KAGRA Collaboration: First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory KAGRA, Classical and Quantum Gravity 36, 165008 (2019).

[12] K. Yamamoto et al.: Design and experimental demonstration of a laser modulation system for future gravitational-wave detectors, Classical and Quantum Gravity 36, 205009 (2019).

[13] K. Somiya, E. Hirose, and Y. Michimura: Influence of non-uniformity in sapphire substrates for a gravitational wave telescope, Phys. Rev. D 100, 082005 (2019).

# 27 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

Our target is understanding high energy phenomena in the universe, such as supernova remnants, neutron stars, and black holes. We observe them with X-ray satellites. From the supernova remnant expansion measurements, we found that the uniformity of expansion has variety among samples. We also showed that accelerated particles on the shocks of supernova remnants escape into the space as the shocks age. Black holes distort the time-space by general relativity, which makes complicated effect to their emission. This year we succeeded to include the general relativity into the Monte-Carlo simulation tool called MONACO and enable to make realistic emission models for the accreted matter onto black holes. For the next-generation observations, we develope a new generation X-ray satellite called XRISM, planned to launch on Japanese fiscal year of 2021, and charges the science magegement of galactic diffuse sources and softwares. We also study on future missions to measure the X-ray polarimetory, using CMOS sensors and coded apertures, named as “cipher”. The design concept got the grand prix on the 27th satellite design contest.

[1] 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 Galac tic Ia supernova remnant G306.3-0.9" , PASJ, 71, 61 (2019)

[2] E. Watanabe, S. Shibata, T. Sakamoto, A. Bamba, "A high-magn etic-field radio pulsar survey with Swift/XRT " , MNRAS, 486, 5323-5334 (2019)

[3] H. Watanabe, A. Bamba, S. Shibata, E. Watanabe, "XMM-Newton Spectrum of the magnetar CXOU J171405.7-381031" , PASJ, 71, 8 4 (2019)

[4] Y. Wada, T. Enoto, Y. Nakamura, T. Morimoto, M. Sato, T. Ushio, K. Nakazawa, T. Yuasa, D. Yonetoku, T. Sawano, M. Kamogawa, H. Sakai, Y. Furuta, K. Makishima, H. Tsuchiya, "High Peak-Current Lightning Discharges associated with Downward Terrestrial Gamma-ray Flashes" , Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125, e2019JD031730 (2020)

[5] Y. Wada, T. Enoto, K. Nakazawa, Y. Furuta, T. Yuasa, Y. Nakamura, T. Morimoto, T. Matsumoto, K. Makishima, H. Tsuchiya, "Downward Terrestrial Gamma-Ray Flash Observed in a Winter Thunderstorm" , Physical Review Letters, 123, 061103 (2019)

[6] Y. Wada, T. Enoto, Y. Nakamura, Y. Furuta, T. Yuasa, K. Nakazawa, T. Morimoto, M. Sato, T. Matsumoto, D. Yonetoku, T. Sawano, H. Sakai, M. Kamogawa, T. Ushio, K. Makishima, H. Tsuchiya, "Gamma-ray glow preceding downward terrestrial gamma-ray flash" , Communications Physics, 2, 67 (2019)

[7] Tsubasa Tamba, Aya Bamba, Hirokazu Odaka, and Teruaki Enoto, "Temporal and spectral X-ray properties of magnetar SGR 1900+14 derived from observations with NuSTAR and XMM-Newton" , PASJ, 71, 90–102, 2019

[8] Hiromasa Suzuki, Aya Bamba, Rei Enokiya, Hiroya Yamaguchi, Paul P. Plucinsky, Hirokazu Odaka, "Uniform distribution of the extremely overionized plasma associated with the supernova remnant G359.1-0.5", ApJ, 2020, in press

[9] Mizumoto, M., Ebisawa, K., Tsujimoto, M., Done, C., Hagino, K., Odaka, H., "X-ray reverberation lags of the Fe-K line due to AGN disc winds", MNRAS, 482, 5316, 2019

[10] Tanimoto, A., Ueda, Y., Odaka, H., Kawaguchi, T., Fukazawa, Y., Kawamuro, T., "XCLUMPY: X-Ray Spectral Model from Clumpy Torus and Its Application to the Circinus Galaxy", ApJ, 877, 95, 2019

[11] H.E.S.S. Collaboration including Odaka, H. as one of the corresponding authors, "H.E.S.S. and Suzaku observations of the Vela X pulsar wind nebula", A&A, 627, A100, 2019

[12] Ohno, M. and 28 co-authors including Odaka, H., "Event-selection technique for the multi-layer Si -CdTe Compton camera onboard Hitomi", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 924, 327, 2019

[13] Torigoe, K. and 18 co-authors including Odaka, H., "Performance study of a large CsI(Tl) scintillator with an MPPC readout for nanosatellites used to localize gamma-ray bursts", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 924, 316, 2019

[14] Tomaru, R., Done, C., Ohsuga, K., Odaka, H., Takahashi, T., "The thermal-radiative wind in low mass X-ray binary H 1743-322: II. iron line predictions from Monte Carlo radiation transfer", MNRAS, in press.

# 28 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.

# 29 Takeuchi Group

**Research Subjects:** Experimental statistical physics for non-equilibrium systems

**Members:** Kazumasa A. Takeuchi and Daiki Nishiguchi

We aim to explore statistical physics of out-of-equilibrium phenomena experimentally. Using soft and living matter, such as liquid crystal, colloids, and granular materials, as well as bacteria, we carry out experiments that we design to capture underlying physical principles, in addition to the understanding of specific phenomena we observe. As a result, we deal with diverse subjects in the group, sometimes enjoying interesting connections in between. More specifically, we carried out the following projects among others in the scholar year 2019:

**(1) Non-equilibrium phenomena in soft matter systems**
(1-1) Growing interface fluctuations in liquid crystal turbulence [3]
(1-2) Statistical analysis of heat fluctuations in liquid crystal turbulence
(1-3) Visualization of three-dimensional dynamics of liquid crystalline topological defects
(1-4) Reversible-irreversible transition in a densely packed granular system under periodic shear
(1-5) Dynamics of self-propelled colloids under periodic driving

**(2) Non-equilibrium phenomena in living systems**
(2-1) Development of an extensive micro-perfusion system
(2-2) Scale invariance in cell size fluctuations
(2-3) Competition process of bacterial populations [1]
(2-4) Heterogeneous dynamics of dense suspensions of motile bacteria
(2-5) Vortex order formation in bacterial turbulence [4]
(2-6) Dynamics of type-IV pili of *Neisseria meningitidis* [2]

**(3) Approaches based on nonlinear science**
(3-1) Estimation of instability of large chaotic systems by time series analysis

### References

[1] T. Shimaya and K. A. Takeuchi, Lane formation and critical coarsening in a model of bacterial competition. Phys. Rev. E **99**, 042403 (2019).

[2] P. Kennouche, A. Charles-Orszag, D. Nishiguchi, S. Goussard, A.-F. Imhaus, M. Dupré, J. Chmot-Rooke and G. Duménil, Deep mutational scanning of the *Neisseria meningitidis* major pilin reveals the importance of pilus tip-mediated adhesion. EMBO J. **38**, e102145 (2019).

[3] Y. T. Fukai and K. A. Takeuchi, Kardar-Parisi-Zhang Interfaces with Curved Initial Shapes and Variational Formula. Phys. Rev. Lett. **124**, 060601 (2020).

[4] H. Reinken, D. Nishiguchi, S. Heidenreich, A. Sokolov, M. Bär, S. H. L. Klapp and I. S. Aranson, Organizing bacterial vortex lattices by periodic obstacle arrays. Comm. Phys. *in press* (2020).

# 30 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 fruity, *Drosophila*. A part of our recent research activity is summarized below.

## 1. System level analysis of motor-related neural activities in larval Drosophila.

The way in which the central nervous system (CNS) governs animal movement is complex and difficult to solve solely by the analyses of muscle movement patterns. We tackle this problem by observing the activity of a large population of neurons in the CNS of larval Drosophila. We focused on two major behaviors of the larvae - forward and backward locomotion - and analyzed the neuronal activity related to these behaviors during the fictive locomotion that occurs spontaneously in the isolated CNS. We expressed a genetically-encoded calcium indicator, GCaMP and a nuclear marker in all neurons and then used digitally scanned light-sheet microscopy to record (at a fast frame rate) neural activities in the entire ventral nerve cord (VNC). We developed image processing tools that automatically detected the cell position based on the nuclear staining and allocate the activity signals to each detected cell. We also applied a machine learning-based method that we recently developed to assign motor status in each time frame. Our experimental procedures and computational pipeline enabled systematic identification of neurons that showed characteristic motor activities in larval Drosophila. We found cells whose activity was biased toward forward locomotion and others biased toward backward locomotion. In particular, we identified neurons near the boundary of the subesophageal zone (SEZ) and thoracic neuromeres, which were strongly active during an early phase of backward but not forward fictive locomotion.

## 2. Regulation of forward and backward locomotion through intersegmental feedback circuits in Drosophila larvae

Animal locomotion requires spatiotemporally coordinated contraction of muscles throughout the body. Here, we investigate how contractions of antagonistic groups of muscles are intersegmentally coordinated during bidirectional crawling of Drosophila larvae. We identify two pairs of higher-order premotor excitatory interneurons present in each abdominal neuromere that intersegmentally provide feedback to the adjacent neuromere during motor propagation. The two feedback neuron pairs are differentially active during either forward or backward locomotion but commonly target a group of premotor interneurons that together provide excitatory inputs to transverse muscles and inhibitory inputs to the antagonistic longitudinal muscles. Inhibition of either feedback neuron pair compromises contraction of transverse muscles in a direction-specific manner. Our results suggest that the intersegmental feedback neurons coordinate contraction of synergistic muscles by acting as delay circuits representing the phase lag between segments. The identified circuit architecture also shows how bidirectional motor networks could be economically embedded in the nervous system.

### References

[1] Yoon Y, Park J, Taniguchi A, Kohsaka H, Nakae K, Nonaka S, Ishii S and Nose A. System level analysis of motor-related neural activities in larval *Drosophila*. *Journal of Neurogenetics*. 7:1-11 (2019)

[2] Kohsaka H, Zwart MF, Fushiki A, Fetter RD, Truman JW, Cardona A and Nose A. Regulation of forward and backward locomotion through intersegmental feedback circuits in *Drosophila*. *Nature Communications*. 10(1):2654 (2019)

## 31 Higuchi Group

**Research Subjects:** Protein dymamics in vitro, cells and mice

**Member:** Hideo Higuchi and Motoshi Kaya

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 by single molecule technology. Then we investigate the function of molecules or organelle in cells by the single and imaging method. Finally, we imaged the molecules in mouse auricle to understand the function of molecule in vivo. Here we showed the works on multiple molecules and, single and multiple cells.

### Molecular work: Contractile mechanism of cardiac myosin filament

Muscle contractions are driven by cyclic interaction of myosins with actin filaments in heart and skeletal muscles. In heart, contractions followed by relaxation are periodically modulated, while in skeletal muscles, speeds and forces of contraction are dynamically modulated to satisfy external demands. Thus, we have focused on how molecular properties of cardiac and skeletal myosins are tuned to satisfy their functional demands. Previously, we showed that characteristics of force outputs generated by synthetic cardiac myosin filaments are distinctively different from those generated by synthetic skeletal myosin filaments. Our simulation model predicted that their different collective behaviors are attributed to the difference in the frequency of reversal action of power stroke (reverse stroke) in response to loads. To test this idea, we performed single molecule experiments to evaluate displacements of myosin heads against loads in ADP and inorganic phosphate solution. The results showed three discrete positions of cardiac myosin heads, which populations change in a load-dependent manner, suggesting that strongly-bound cardiac myosins transit between three conformational states, the pre-power stroke, post-first power stroke and post-second power stroke states by executing power/reverse stroke. In contrast, skeletal myosins primarily showed one conformational position, the post-second power stroke state. The rate of reverse stroke was found to be highly load-dependent for cardiac myosins, but not for skeletal myosins. Therefore, collective force generation by cardiac myosins is characterized by an execution of reverse stroke. Finally, our simulation model computed for force generation in sarcomere indicated that an execution of reverse stroke is a key to enhancing the force output of cardiac myosin ensembles and facilitating efficient heart contractions such as a stable systolic pressure followed by a rapid relaxation of end-systolic pressure in heart, while skeletal myosins hardly execute reverse stroke to achieve high force and high speed of shortening.

### Cell work:Anisotropy of Cellular Traction Force Couples with the Cell Alignment Pattern

Spindle-shaped cells often show collective migration with the alignment of cell bodies, such as rostral migratory stream and cancer invasion after the epithelial-mesenchymal transition. In vitro cultures have mimicked the aligned collective migration and revealed that the acquisition of the cell body alignment can be understood from the steric interaction between cells and that the pattern of alignment was similar to that in a type of active matter system. Further, the dynamics of the change in the alignment pattern also matched the predictions from the active matter theorem. However, the active force generation coupled

with the alignment, from which the characteristic dynamics of active matter originate, have not sufficiently been checked in experiments. To elucidate the relationship between the force and the alignment of cells under the aligned collective migration, we applied traction force microscopy to spindle-shaped cell culture systems. We observed the orientation field and measured the traction force in the adhesive culture system of neural progenitor cells or SK-LMS-1 cells. The qualitative comparison between the traction force and the orientation field, at first, showed that the force aligned with the spatial gradient of the orientation field, which indicates the coupling between the cellular force and the cell alignment. Further, we quantitatively compared the amplitude of the force and the spatial heterogeneity of alignment direction and found linear proportionality whose slope determined the strength of cellular anisotropic force generation, which is considered to control the dynamics of alignment pattern change.

### Cell work: Responses of Cells to Local Heating in Cells Using a Nanoparticle

Cell function and motility depend much on temperature. Here, to understand relation between cells and high temperature localized in cells, we imaged the response of the intracellular motility under phase contrast microscope at the local temperature jump. Temperature was jumped up locally to about 57 °C by irradiating magnet nanoparticle (300 nm in diameter) in the cell with focusing infrared laser (wavelength of 1064 nm). By the temperature jump, (1) the most of vesicle transport in the cell stopped suddenly, (2) black circles at pseudopodia emerged and (3) the cell shrunk toward a heated nanoparticle. Result (1) and (2) often appeared together, so there is a deep relation between the two responses.

## 32 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 FY2019, we have published several papers on the development of super-resolution imaging technologies and their biological applications. For example, we have developed a super-resolution light-sheet microscope that enables high resolution 3-dimensional imaging of large samples [1]. We also developed a new fluorescent probe for the super-resolution live imaging of the inner membrane structure of mitochondria [3]. Super-resolution imaging was applied to examine the fine structure of the Par-island, a protein complex structure that determines the anterior side of the cell [2]. We have also applied a novel single-molecule measurement technology for the initial process of autophagy, and demonstrated that it is triggered by the liquid-liquid phase separation [4].

[1] Lu CH, *et al.* Lightsheet localization microscopy enables fast, large-scale, and three-dimensional super-resolution imaging. *Commun Biol.* **2** 177 (2019)

[2] Kono K, *et al.* Reconstruction of Par-dependent polarity in apolar cells reveals a dynamic process of cortical polarization. *eLife* **8** e45559 (2019)

[3] Wang C, *et al.* A photostable fluorescent marker for the superresolution live imaging of the dynamic structure of the mitochondrial cristae. *Proc Natl Acad Sci U S A.* **116** 15817-15822 (2019)

[4] Fujioka Y, *et al.* Phase separation organizes the site of autophagosome formation., *Nature* **578** 301-305 (2020)

# 33 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. Laboratory evolution of bacterial cells to analyze dynamics of phenotype-genotype mappings
2. Construction of macroscopic state theory describing adaptation and evolution of biological systems
3. Theoretical analysis of evolutionary process under dynamically changing environments
4. Computational analysis of amoeba morphogenesis using phase-field models
5. Effects of phenotypic fluctuation on evolutionary dynamics
6. Development of a method to characterize animal morphology using machine learning

## References

[1] T. Horinouchi, T. Maeda, H. Kotani, C. Furusawa: Suppression of antibiotic resistance evolution by single-gene deletion, Sci. Rep. **10**(1), 4178 (2020).

[2] J. F. Yamagichi, N. Saito, K. Kaneko: Advantage of Leakage of Essential Metabolites for Cells, Phys. Rev. Lett. **124**(4), 048101 (2020).

[3] R. Ohbayashi, S. HIrooka, R. Onuma, Y. Kanesaki, Y. Hirose, Y. Kobayashi, T. Fujiwara, C. Furusawa, S. Miyagishima: Evolutionary changes in DnaA-dependent chromosomal replication in cyanobacteria, Front. Microb., in press

[4] T. Maeda, T. Horinouchi, N. Sakata, A. Sakai, C. Furusawa: High-throughput identification of the sensitivities of an Escherichia coli ΔrecA mutant strain to various chemical compounds, Jour. Antibio. **72**(7), 566 (2019).

[5] T. Yamaguchi, S. Teraguchi, C. Furusawa, H Machiyama, T. M. Watanabe, H. Fujita, S. Sakaguchi, T. Yanagida: Theoretical modeling reveals that regulatory T cells increase T-cell interaction with antigen-presenting cells for stable immune tolerance, Int. Immunol. **31**(11), 743 (2019).

[6] A.Shibai, K. Satoh, M. Kawada, I. Narumi, C. Furuswa: Complete Genome Sequence of a Radioresistant Bacterial Strain, Deinococcus grandis ATCC 43672, Microb. Res. Announc. **8**(45), e01226 (2019).

[7] A.Shibai, T. Maeda, M. Kawada, H. Kotani, N. Sakata, C. Furusawa: Complete Genome Sequences of Three Star-Shaped Bacteria, Stella humosa, Stella vacuolata, and Stella Species ATCC 35155, Microb. Res. Announc. **8**(32), e00719 (2019).

# III

# 2019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**

**1.1** 相対性原理

**1.2** ローレンツ変換

**1.3** 速度の変換

**1.4** 時空間の幾何学と時空のダイアグラム

**1.5** 固有時間と時間の遅れ

**1.6** ローレンツ収縮

**1.7** 相対論的エネルギーと運動量

**1.8** 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**

**2.1** スカラー・ベクトル・テンソル

**2.2** 4 元ベクトル

**2.3** 連続の方程式と 4 元電流

**2.4** 4 元ポテンシャルとローレンツゲージ

**2.5** 一定速度で運動する点電荷がつくる電磁場

**2.6** 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**

**3.1** 場の中の粒子の運動方程式

**3.2** 一様な静電場中の運動

**3.3** 一様な静磁場中の運動

**3.4** 一様な静電磁場中の運動

**3.5** 電磁場のラグランジアン

**3.6** エネルギーと運動量の保存則

**3.7** 点電荷の自己エネルギー

### 1.1.2　解析力学：相原 博昭

**1. ラグランジアン（Lagrangian）力学**

**1.1** 仮想仕事とダランベール（d'Alembert）の定理

**1.2** 一般化速度と一般化力

**1.3** 一般化座標と一般化速度の関数としての運動エネルギー

**1.4** ラグランジアン

**1.5** ハミルトニアン（Hamiltonian）

**1.6** 正準共役運動量

**1.7** 例題

**1.8** 物理的に等価なラグランジアン

**1.9** ポテンシャルが速度に依存する場合（ローレンツ力）

**1.10** 連続体のラグランジアン

**2. 変分原理とラグランジアン力学**

**2.1** オイラー（Euler）方程式

**2.2** ハミルトンの原理

**2.3** 連続体のオイラー・ラグランジュ方程式

**2.4** 場のオイラー・ラグランジュ方程式

**2.5** ラグランジュの未定係数法（Lagrange Multipliers）

**2.6** ホロノミック（Holonomic）な束縛条件を未定係数法で解く

**2.7** 非ホロノミックな束縛条件への応用

**3. ネーター（Noether）の定理とハミルトニアン力学**

**3.1** 角運動量と回転対称性
**3.2** ネーターの定理
**3.3** 場の理論のネーターの定理
**3.4** ハミルトン力学とルジャンドル(Legendre)変換
**3.5** 位相空間とリュービル（Liouville）の定理
**4. 正準変換**
**4.1** 正準変換
**4.2** ポアソン（Poisson）括弧
**5. ハミルトン・ヤコビ（Jacobi）方程式**
**5.1** ハミルトン・ヤコビ方程式
**5.2** 作用変数と角変数
**5.3** 断熱不変量
**5.4** 量子仮説

### 1.1.3 量子力学 I：諸井 健夫

**1. イントロダクション**
**1.1** 粒子と波
**1.2** 古典描像から量子描像へ
**2. シュレディンガー方程式**
**2.1** シュレディンガー方程式と波動関数
**2.2** 確率解釈と物理量の期待値
**2.3** 不確定性関係
**3. １次元の束縛状態**
**3.1** １次元の箱に閉じ込められた粒子
**3.2** 井戸型ポテンシャル
**4. １次元の散乱**
**4.1** 自由粒子の波動関数：平面波
**4.2** 散乱問題のいくつかの例
**5. 量子力学の体系**
**5.1** エルミート演算子と物理量
**5.2** 波動関数の空間
**5.3** ディラックの記法と演算子を用いた定式化
**5.4** 正準量子化
**6. 調和振動子**
**6.1** 調和振動子の量子論的扱い：演算子法
**6.2** 調和振動子の量子論的扱い：波動関数
**6.3** 応用：弦の量子化

### 1.1.4 物理実験学： 酒井 広文, 中辻 知

**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

**1. 複素関数論**
**1.1** 無限和と収束性
**1.2** 複素関数
**1.3** 正則関数の基本的な性質

**1.4** 多価関数とリーマン面
**1.5** 複素積分：応用例
**1.6** デルタ関数
**1.7** 部分分数展開、無限積表示
**1.8** ガンマ関数・ベータ関数・ゼータ関数、解析接続
**1.9** 漸近展開と最急降下法
**1.10** 等角写像
**2. 常微分方程式論**
**2.1** 解の存在と一意性
**2.2** 積分により可解な微分方程式の例
**2.3** 線形微分方程式
**2.4** 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.** Television テレビ； 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.** Batteries 電池； 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.** Fluorescent Lights 蛍光灯； 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.** Edison vs. Tesla エジソン対テスラ；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.** Radar レーダー；並列構造で書く； 読みやすい英語（論文）を書く、論文用英文の組み立て
**6.** Refrigerator 冷蔵庫； 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.** Heat 熱； 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.** X-rays X線； 冠詞；否定形をやめて、肯定形で書く、あいまいな表現をさけ、きっぱりと書く
**9.** Color 色； 短い簡潔な文を書く；辞書の使い方、参考文献
**10.** Lens, light, and colors レンズ、光、色； 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.** 30-second Self Introduction；連結語を使う；通じる英語のしゃべり方 2
**12.** Airplane 飛行機；不必要な単語は省く；通じる英語のしゃべり方 3
**13.** Rust さび；元素記号の発音の仕方；英語口頭発表での注意点
**14.** Scientific Fraud; 実験ノート（研究ノート）の書き方；英語のしゃべり方 4 補遺

## 1.2 3年生 Sセメスター

### 1.2.1 電磁気学 II：湯本 潤司

**1. 静電場**
**1.1** 基本法則

**1.2** 静止物体中での Maxwell の方程式
**1.3** 電荷分布と静電場
**1.4** 物質があるときの静電場
**1.5** 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
**4.4** 導体中の電磁波

### 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**
**2. 角運動量**
**3. スピン**
**4. 対称性と保存則**
**5. 摂動論**
**6. 準古典近似**
**7. 観測過程**
**8. EPR のパラドックス**

### 1.2.3 現代実験物理学 I : 樋口 秀男, 北川 健太郎

**1. 極限環境技術**
真空技術、極低温技術、低温物理、超高圧発生、強磁場
**2. 固体中の電子構造観測**
量子振動、光電子分光、走査型電子顕微鏡
**3. 磁気共鳴を用いた実験**
核磁気共鳴、ミューオンスピン回転
**4. X 線を用いた実験**
X 線の発生、構造解析、元素分析、放射光、X 線自由電子レーザー
**5. レーザー物理学**
レーザー光学, 画像処理, 光学顕微鏡
**6. 非平衡系物理学**
ブラウン運動, 生物の運動、生体分子の X 線構造解析

### 1.2.4 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・数値微分・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** 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** 最小二乗法による回帰分析

講義資料は `https://exa.phys.s.u-tokyo.ac.jp/ja/lectures` で公開。

### 1.2.5 統計力学 I：竹内 一将

**1. 統計力学とは何か？**

**1.1** ミクロとマクロ

**1.2** 統計力学の分類

**1.3** 熱力学の復習

**1.4** 統計力学の基本精神

**2. 準備１：確率論**

**2.1** 基本事項

**2.2** 独立な部分からなる系

**2.3** ゆらぎと大数の法則

**2.4** 連続変数の場合

**3. 準備２：量子論**

**3.1** 量子力学の復習・確率的な系との対応

**3.2** 状態数

**4. 平衡統計力学の基礎**

**4.1** 平衡状態とは？

**4.2** 等重率の原理とミクロカノニカル分布

**4.3** 古典系のミクロカノニカル分布

**4.4** カノニカル分布（導出）

**4.5** カノニカル分布の性質

**5. カノニカル分布の応用**

**5.1** 理想気体

**5.2** 相互作用する気体（古典系）

**5.3** 調和振動子

**5.4** 常磁性とスピン系

**6. 結晶の比熱**

**6.1** 古典論

**6.2** Einstein モデル

**6.3** Debye モデル

**7. 黒体放射**

**7.1** 実験事実

**7.2** 空洞放射

**8. グランドカノニカル分布**

**8.1** 設定と導出

**8.2** 性質

**8.3** 応用

**9. 量子理想気体**

**9.1** 多粒子系の量子力学

**9.2** 量子理想気体の平衡状態

**9.3** 状態密度

**9.4** 理想 Fermi 気体

**9.5** 理想 Bose 気体

### 1.2.6 流体力学：江尻 晶

**1. 様々な流体**

**2. 流体の基礎方程式**

**2.1** 流体を特徴づける量

**2.2** 連続の式

**2.3** 力と運動方程式

**2.4** エネルギー方程式

**2.5** 粒子の方程式から流体の方程式へ

**2.6** 渦度と渦度方程式

**3.** 関数による流れの表現
**3.1** ポテンシャル流
**3.2** 複素速度ポテンシャル
**3.3** 揚力
**4.** 粘性流
**4.1** Reynolds 数
**4.2** ストークス近似
**4.3** 一様等方乱流と Kolmogorov 則
**4.4** フラクタルによる乱流の表現
**5.** 水波
**5.1** 長い波
**5.2** 表面波
**6.** 不安定性

## 1.3 3年生 A セメスター

### 1.3.1 光学：井手口 拓郎

**1.** 光学の歴史と現代光科学
**2.** 幾何光学
**3.** 波動光学
**4.** フーリエ光学
**5.** 偏光光学
**6.** ビーム光学
**7.** 共振器光学
**8.** レーザー

### 1.3.2 物理数学 III：桂 法称

**1.** 群と対称操作
**1.1** 群の定義と例
**1.2** 点群と空間群
**2.** 群論の基本概念
**2.1** 部分群
**2.2** 共役類
**2.3** 不変部分群と因子群
**2.4** 準同型と同型
**3.** 有限群の表現
**3.1** 表現とは何か？
**3.2** 既約表現と指標
**4.** 量子力学と群論
**5.** 対称群
**5.1** 対称群と交代群
**5.2** 対称群の共役類
**5.3** 対称群の既約表現
**6.** リー群
**7.** リー代数
**7.1** リー代数の生成子
**7.2** 半単純リー代数とカルタンの標準形
**7.3** 半単純リー代数の分類
**8.** SU($n$) Hubbard 模型

### 1.3.3 量子力学 III：常行 真司

**1.** 電磁場中の荷電粒子
**1.1** 電磁場中の古典荷電粒子
**1.2** ニュートン力学とガリレイ変換
**1.3** 一様な磁場中の荷電粒子
**1.4** Aharonov-Bohm 効果
**1.5** スピンを持つ粒子と磁場の相互作用
**2.** 散乱問題
**2.1** ２粒子の散乱
**2.2** 散乱断面積
**2.3** 散乱断面積の計算

**2.4** 散乱状態の波動関数が満たす積分方程式

**2.5** Born 近似

**2.6** 部分波と位相のずれ

**2.7** 共鳴散乱

**2.8** 同種粒子の散乱

**2.9** Lippmann-Schwinger 方程式（散乱理論の形式論）

**2.10** 固体中の電子散乱と擬ポテンシャル

**3.** 多体系の量子力学的扱い

**3.1** ヘリウム原子

**3.2** 多電子原子

**3.3** ボルン-オッペンハイマー近似（断熱近似）

**3.4** 水素分子

**3.5** ハートリー-フォック近似

**4.** 第二量子化

**4.1** 数表示

**4.2** フェルミオン系

**4.3** ボソン系

**4.4** 場の演算子

**4.5** 第二量子化におけるハートリー-フォック近似

### 1.3.4 生物物理学 : 樋口 秀男, 能瀬 聡直

**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.** 神経細胞膜の電気的性質 **1.** 平衡電位と静止電位
**10.** 神経細胞膜の電気的性質 **2.** 活動電位と **H-H** 方程式
**11.** シナプス伝達
**12.** 神経ネットワークによる情報処理
**13.** 脳の可塑性と記憶
**14.** 遺伝子組み替え技術、神経イメージング、光による神経活動操作
**15.** 脳理論

### 1.3.5 固体物理学 I : 岡本 徹

**1.** 自由電子フェルミ気体（復習）

**1.1** 電子密度とフェルミエネルギー

**1.2** 状態密度

**2.** １次元周期ポテンシャル中の電子

**2.1** ポテンシャルが小さい場合の近似

**2.2** ブロッホの定理

**2.3** エネルギーと波数の関係の表示形式

**2.4** １本のバンド中の状態数

**2.5** 金属と絶縁体

**2.6** クローニッヒ・ペニーのモデル

**3.** 結晶構造

**3.1** 空間格子と単位胞

**3.2** 空間格子の分類

**3.3** 代表的な結晶構造

**3.4** 結晶中の方位や面の表記法

**3.5** 結晶の成り立ち

**4.** 逆格子

**4.1** 逆格子とは

**4.2** 回折による結晶構造解析

**5.** 結晶中の電子状態

**5.1** ブロッホの定理とブリルアン・ゾーン

**5.2** ポテンシャルが小さい場合

**5.3** 束縛が強い場合の近似

**5.4** グラフェンの電子状態

**5.5** カーボンナノチューブの電子状態

**6.** 格子振動

**6.1** 格子振動とは

**6.2** 同種原子の１次元格子モデル
**6.3** ２種類の原子からなる１次元格子モデル
**6.4** ３次元格子の振動
**6.5** フォノンと量子数の熱平均値
**6.6** 格子比熱と Debye の近似
**7. 電子の運動**
**7.1** 電子の速度
**7.2** 運動方程式
**7.3** 有効質量
**7.4** 磁場中の運動
**8. 金属中の伝導電子**
**8.1** 比熱
**8.2** 交流電場と伝導電子
**8.3** 電気伝導と散乱機構
**8.4** ボルツマン方程式と輸送現象
**9. 半導体**
**9.1** 電子と正孔
**9.2** 不純物ドーピング
**9.3** p-n 接合
**9.4** 電界効果トランジスタ
**9.5** ヘテロ接合

### 1.3.6 現代実験物理学 II：馬場 彩, 日下 暁人

**1. 粒子と物質の相互作用**
**2. 粒子検出器と粒子加速器**
**3. 統計の基礎・実験データの解析と誤差評価**
**4. 相対論的運動学**
**5. 宇宙物理学概要**
**6. 宇宙物理実験で使われる光子検出原理**
**7. 宇宙物理実験で使われる光子以外の手段**

### 1.3.7 電磁気学 III：浅井 祥仁

**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-ヴィーヒェ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**

### 1.3.8 統計力学 II：小形 正男

**1. 相転移**
**1.1** 秩序パラメータと対称性の破れ
**1.2** 二次相転移
**1.3** 平均場近似
**1.4** Landau 理論
**1.5** 相転移における臨界指数と空間次元
**1.6** スケーリング理論とくりこみ群のアイデア
**2. 線形応答理論**
**2.1** 時間に依存しないときの線形応答
**2.2** 時間に依存するときの線形応答
**2.3** 具体例：帯磁率、電気伝導度
**2.4** 輸送現象

### 1.3.9 計算機実験 II：藤堂 眞治

**1. 対角化と量子力学**
- **1.1** 二重井戸ポテンシャル
- **1.2** シューティング
- **1.3** 対角化による解法
- **1.4** 変分法
- **1.5** 解析計算による次元削減

**2. モンテカルロと統計力学**
- **2.1** 多体系の統計力学
- **2.2** 乱択アルゴリズム
- **2.3** 物理過程のシミュレーション
- **2.4** 疑似乱数
- **2.5** ヒストグラム
- **2.6** モンテカルロ積分
- **2.7** マルコフ連鎖モンテカルロ

**3. 転送行列・分子動力学**
- **3.1** 数え上げ
- **3.2** 転送行列法
- **3.3** 分子動力学法

**4. 最適化**
- **4.1** 最適化問題
- **4.2** 囲い込み法
- **4.3** 最急降下法・勾配降下法・共役勾配法
- **4.4** Nelder-Mead の滑降シンプレックス法
- **4.5** シミュレーテッド・アニーリング

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 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

### 1.4.2 サブアトミック物理学 : 横山 将志

**1. Introduction**
**2. Interactions and kinematics**
**3. Particle scattering and form factors**
**4. Dirac equation and anti-particles**
**5. Accelerators**
**6. Weak interaction**
**7. Strangeness and CP violation**
**8. Neutrinos**

### 1.4.3 計算科学概論 : 大久保 毅 ほか6名

**1.** 高性能計算機のアーキテクチャ
**2.** スーパーコンピュータと並列プログラミング
**3.** 大規模疎行列固有値問題と量子多体問題
**4.** 大規模疎行列ソルバー入門
**5.** 高性能プログラミングと性能測定
**6.1** 連続体の並列有限要素法解析入門
**6.2** 構造解析アプリケーションによる CAE 実践
**7.** 格子スピン模型の計算科学

### 1.4.4 統計力学特論 : 川島 直輝

**1. Introduction — Phase Transitions, Critical Phenomena and Universality**
**2. Meanfield Approximation, Variational Principle and Landau Expansion**
**3. $\phi^4$ Theory and Ornstein-Zernike Form**
**4. Introduction to Renormalization Group**
**5. Tensor-Network Renormalization Group**
**6. General Framework of Renormalization Group — Fixed Points and Scaling Operators**
**7. Consequences of Renormalization Group**
**8. Operator Product Expansion**
**9. Perturbative Renormalization**
**10. $\epsilon$-expansion and Wilson-Fisher Fixed Point**
**11. Magnetic Anisotropies**
**12. Berezinskii-Kosterlitz-Thouless Transition**

### 1.4.5 現代物理学入門 : 中辻 知, 安東 正樹

**1.** 物質内の宇宙の素粒子とそれが創る量子物性
**1.1** 授業紹介：トポロジーと量子物性
**1.2** 運動量空間におけるベリー位相
**1.3** ベリー曲率と量子ホール効果
**1.4** 固体中のワイル粒子
**1.5** トポロジーと電子物性
**1.6** スピンアイスと磁気モノポール
**1.7** 量子スピン液体と将来展望
**2.** 重力波宇宙物理学
**2.1** 重力波とその発生源

**2.2** 重力波の観測方法
**2.3** データ解析手法
**2.4** 連星ブラックホール合体の観測
**2.5** 連星中性子星合体の観測
**2.6** 将来の見通し

### 1.4.6 場の量子論 I : 濱口 幸一

**1. Introduction**

**1.0** About this lecture (Language, Web page, Schedule, Grades,...)
**1.1** Course objective and Plan
**1.2** Quantum Mechanics and Quantum Field Theory
**1.3** Notation and convention
**1.4** Hilbert space and Hamiltonian of (infinitely) many particles

**2. Scalar (spin 0) Field**

**2.1** Lagrangian and Canonical Quantization of Scalar Field
**2.3** Equation of motion (EOM)
**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

### 1.4.7 系外惑星 : 生駒 大洋, 相川 祐理

**1. 系外惑星科学概観**

**1.1** 系外惑星発見までの歴史
**1.2** 太陽系外惑星検出方法のまとめ
**1.3** 太陽系外惑星発見の歴史
**1.4** 主星

**2. 系外惑星の検出**

**2.1** 観測対象としての系外惑星
**2.2** 視線速度法
**2.3** トランジット法
**2.4** 重力マイクロレンズ法

**2.5** 直接撮像法
**3. 惑星の内部構造と進化**
**3.1** 太陽系内惑星の内部
**3.2** 惑星内部構造と熱進化の基礎
**3.3** 低密度短周期巨大ガス惑星
**3.4** 高密度短周期巨大ガス惑星
**3.5** 長周期巨大ガス惑星
**3.6** 小規模惑星(スーパーアース、サブネプチューン)
**4. 惑星系の形成過程と多様性**
**4.1** 原始惑星系円盤の構造
**4.2** 原始惑星系円盤の観測
**4.3** ダストの沈殿と成長
**4.4** 微惑星形成と集積
**4.5** 固体惑星の形成
**4.6** ガス惑星の形成
**4.7** 系外惑星系の多様性
**5. 系外惑星の大気**
**5.1** 大気構造の基礎
**5.2** 透過光から探る系外惑星大気
**5.3** 放射光から探る系外惑星大気
**5.4** ハビタブル惑星の条件
**5.5** 今後の展望

### 1.4.8 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

### 1.4.9 固体物理学 II : 林 将光

**1. ディラック方程式**
**1.1** 確率流密度
**2. バンド理論**
**2.1** 強束縛近似
**2.2** グラフェン
**2.3** クラインパラドックス
**2.4** 半導体
**3. 低次元系**
**3.1** 量子閉じ込め効果
**3.2** 量子化コンダクタンス

**4. 磁場中電子の運動**

**4.1** ホール効果

**4.2** ランダウ準位

**4.3** 整数量子ホール効果

**4.4** 相対論的量子ホール効果

**5. 磁性**

**5.1** 交換相互作用

**5.2** ハバードモデル

**5.3** ストーナー強磁性

**6. 超伝導**

**6.1** クーパー対

**6.2** 電子-格子相互作用

**6.3** BCS 超伝導

### 1.4.10 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

### 1.4.11 宇宙物理学 : 馬場 彩, 須藤 靖

**1. 物理法則と基礎物理定数**

**1.1** 質量と長さ

**1.2** 温度と長さ

**1.3** 電磁相互作用と微細構造定数

**1.4** 重力と重力微細構造定数

**1.5** プランクスケール

**1.6** 原子の大きさ

**1.7** 分子の大きさ

**1.8** 電磁波の窓

**2. 自然界の階層**

**2.1** 自然界の特徴的スケール

**2.2** 宇宙の階層構造

**2.3** 宇宙の年表

**2.4** 天体形成史

**3. ミクロな世界と宇宙をつなぐ**

**3.1** 物理法則と初期条件

**3.2** 木星型（ガス）惑星

**3.3** 地球型（岩石）惑星

**3.4** 恒星（主系列星）

**3.5** 白色矮星

**3.6** 中性子星

**3.7** 宇宙の階層と基本物理定数

**4. 宇宙史概観**

**4.1** 時空と物質

**4.2** 一般相対論的一様等方宇宙モデル

**4.3** 宇宙の状態方程式

**4.4** アインシュタイン・ドジッター宇宙モデル
**4.5** フリードマン・ルメートル方程式
**4.6** 宇宙の組成
**4.7** 宇宙のインフレーション
**4.8** ビッグバン元素合成
**5.** 星の物理学
**5.1** 星の誕生
**5.2** 運動方程式と状態方程式
**5.3** 星の物理量
**5.4** 星のパラメータ・スケーリング
**5.5** 星内部の核融合
**6.** 星の進化と終末
**6.1** 星の進化
**6.2** 星の終末
**6.3** 電子縮退した星
**6.4** 中性子星
**6.5** ブラックホール
**6.6** 超新星残骸
**7.** 宇宙の高エネルギー現象
**7.1** 宇宙線
**7.2** 銀河団

### 1.4.12 生物物理学特論 II：岡田 康志, 古澤 力, 新井 宗仁

**1.** 細胞
**1.1** 細胞と数
**1.2** 分子機械とゆらぎ
**1.3** 散逸と構造
**1.4** 情報とノイズ
**1.5** 位置と方向
**2.** 生命システム
**2.1** 生命の起源に関する理論と実験
**2.2** 生態系の安定性に関する理論と実験
**2.3** 進化プロセスに関する理論と実験
**2.4** 免疫システムに関する理論と実験
**3.** タンパク質
**3.1** タンパク質の構造と物性
**3.2** タンパク質のフォールディング機構
**3.3** タンパク質のダイナミクスと機能
**3.4** タンパク質の分子進化とデザイン

## 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
**2.** 分子の形と対称性
**3.** 分子の電子状態
**4.** 分子分光学
**5.** 分子間力
**6.** 化学反応
**7.** トピックス

### 1.5.2 素粒子物理学：大谷 航, 田中 純一

**1. Introduction**
**2. Basic Concepts**
**3. Experimental Tools**
**4. Decay and Cross Sections**
**5. Dirac Equation**
**6. Quantum Electrodyamics (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： 今井 伸明

**1. Introduction**
**1.1** General properties of nuclei
**2. Nuclear force**
**2.1** Binding energy
**2.2** Size of a nucleus
**2.3** Wavefunction of deuteron
**3. Bulk Properties of Nuclei**
**3.1** Scattering theory
**3.2** Phase shift and nuclear potential
**3.3** Equation of state of the nuclear matter
**3.4** Alpha decay
**4. Microscopic Models of Nuclear Structure**
**4.1** Hartree-Fock single particle Hamiltonian
**4.2** Deformed single particle state
**4.3** Spherical Shell model
**5. Nuclear reaction**
**5.1** Compound nuclear reaction
**5.2** Direct reaction
**5.3** Optical model
**6. Recent Topics with radioactive nuclear beams**
**6.1** Nuclear astrophysics
**6.2** Super heavy element

### 1.5.5 電子回路論： 安東 正樹

**1.** 電磁場と電気回路
**2.** 線形システムと回路網
**3.** 伝達関数と過渡応答
**4.** 増幅回路とフィードバック制御
**5.** 分布定数回路と信号伝送
**6.** 雑音と信号
**7.** 離散信号とデジタル信号
**8.** ディジタル回路とディジタル信号処理

### 1.5.6 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

### 1.5.7 非平衡科学 : 伊藤 創祐

**1.** 平衡と非平衡
確率のダイナミクス、確率の流れ、平衡状態/非平衡状態、定常状態/非定常状態、定常分布

**2.** 確率過程
Markov 連鎖、Chapman-Kolmogorov 方程式、master 方程式、Fokker-Planck 方程式、Onsager-Machlup 関数、Langevin 方程式

**3.** 確率的な熱力学
流れと力、熱力学第二法則、サイクル基底、Kirchhoff の法則、線形不可逆熱力学、Onsager 相反関係

**4.** 情報量とエントロピー生成
Shannon エントロピー、Kullback-Leibler ダイバージェンス、相互情報量、エントロピー生成、揺らぎの定理、熱力学第二法則とメモリ

**5.** 確率過程とパラメータの力学系
力学系、キュムラント、定常状態と固定点、安定性、化学反応とレート方程式

**6.** 力学系と非線形性
非線形性と分岐、サドルノード分岐、トランスクリティカル分岐、ピッチフォーク分岐、ホップ分岐

**7.** 非平衡科学における様々なトピック
大偏差理論、Fisher 情報行列/情報幾何、拡散反応方程式、カオス、生物物理

### 1.5.8 物性物理学特論 : 長谷川 修司, 小森 文夫

**1.** 概論
表面科学とは、歴史、表面科学とナノテクノロジー

**2.** 表面構造
表面超構造と相転移、回折法、顕微鏡法、動的過程

**3.** 表面電子状態
表面状態・トポロジカル表面状態、バンド分散・原子結合状態測定手法 ((逆) 光電子分光法、トンネル分光法、電子エネルギー損失分光)、電子ダイナミクス

**4.** 走査プローブ顕微鏡
原理, 表面構造観察、局所電子状態・表面バンドの観測, 表面電子定在波、原子マニピュレーション

**5.** 表面電子輸送
表面空間電荷層の２次元電子系、表面電子バンドの２、１次元電子系、表面スピン輸送、表面超伝導

**6.** 表面超薄膜磁性
磁気モーメントと相転移、強磁性超薄膜、表面ナノ強磁性体、スピンダイナミクス

### 1.5.9 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

**1.1** 基本的性質： 多様性、活動性、ロバストネス、可塑性

**1.2** 階層整合性： 定常成長系の普遍法則

**2.** 化学反応から複製細胞へ
生命における「非平衡性」、少数性制御、区画

化、成長のマクロ法則と相（付録：人工複製系構築実験について）

3. 細胞の適応
揺らぐ成長系の帰結、ノイズによる環境依存アトラクター選択
4. 細胞ホメオスタシスと適応
触媒量制御、多自由度適応系
5. 細胞の記憶： 動的記憶とガラス
6. 細胞分化と発生過程の不可逆性
マクロ現象論、分化多能性の表現、相互作用による内部状態の分岐、分化能の喪失とリプログラミング
7. 表現型の進化 (I)
進化揺動応答関係、ノイズによる分散と遺伝分散の関係、安定性の進化
8. 表現型の進化 (II)
適応進化におけるルシャトリエ原理
9. 発生—進化対応
10. 多様性の進化
表現型変化の遺伝的固定, 共生、種分化、多様性の進化
11. まとめと展望： 生物普遍性の現象論へ

### 1.5.10 重力波物理学 : Kipp Cannon, Raffaele Flaminio

1. **Review of general relativity and gravitational waves**
2. **Astrophysical sources of gravitational waves**
3. **Signal identification and interpretation**
4. **Gravitational-wave detectors**
5. **Gravitational wave astronomy: recent results**

### 1.5.11 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、プレセ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　岡田康志 教授

— 第 34 回塚原仲晃記念賞 —

岡田康志教授が、「超解像顕微鏡による神経細胞軸索輸送の研究」に対して、公益財団法人ブレインサイエンス振興財団より第 34 回塚原仲晃記念賞を与えられました。岡田教授は、生きた細胞の中で動く構造や分子を高い分解能でみるために高速の超解像顕微鏡を開発し、これを用いて神経細胞の軸索輸送の機構について独創的な研究を行ってきました。また、岡田教授が開発した顕微鏡は国内外で市販され、広く利用されています。こうした業績が評価され、受賞に至りました。

## 2.2　小林研介 教授

— 第 37 回（2019 年度）大阪科学賞 —

小林研介教授が「固体素子におけるゆらぎと非平衡機能に関する実験的研究」により大阪科学賞を受賞しました。本賞は、大阪府・大阪市および一般財団法人大阪科学技術センターの三者が大阪 21 世紀計画のスタートにあわせ、昭和 58 年（1983 年）度に創設したものです。創造的科学技術の振興を図り、21 世紀の新たな発展と明日の人類社会に貢献することを目的として、科学技術の研究・開発に貢献した若手研究者に贈呈されます。小林氏は、微細加工技術で作製された固体素子におけるゆらぎと非平衡の役割に注目することによって、電子伝導ダイナミクスの研究に新局面を切り拓いてきました。主な成果は、(1) 量子多体系における「ゆらぎの定理」の検証、(2) 量子液体における非平衡ゆらぎの解明、(3) シリコンにおける非平衡巨大磁気抵抗効果の発見です。これらの成果が、固体素子を用いた物理学の更なる発展と次世代素子の開拓につながるものとして評価され、受賞に至りました。

## 2.3　酒井広文 教授

— 第 23 回 (令和元年度) 松尾財団宅間宏記念学術賞 —

酒井広文教授が、研究題目「気体分子の配列・配向制御技術に関する先駆的研究とその応用」により第 23 回 (令和元年度) 松尾財団宅間宏記念学術賞を受賞しました。同賞は、原子分子物理学と量子エレクトロニクスの研究で特に業績の顕著な研究者を対象とし、年に 1 研究者に贈呈されます。通常ランダムな向きを向いている気体分子の向きを揃えることができれば、超短パルスレーザー光と分子との相互作用で発現する様々な超高速物理現象における配列・配向依存性 (立体ダイナミクス) を明らかにすることができます。このため、気体分子の配列・配向制御技術は、最近約 20 年にわたり分子科学研究者にその重要性が広く認められています。酒井教授は、静電場とレーザー電場を併用する手法による配向制御の原理実証に成功して以来、最近の同手法による「完成形」の実現に至るまで、一貫して世界をリードする研究を推進しました。また、酒井教授は配列・配向した分子試料を用いた超高速光応答や配列した分子試料を用いた分子内量子過程の最適制御に関する研究でも顕著な業績をあげました。これら一連の業績が高く評価されました。

## 2.4　藤堂眞治 教授

— 平成 31 年度文部科学大臣表彰 科学技術賞 (科学技術振興部門) —

藤堂眞治教授ほか 4 名が「計算物質科学ソフトウェアの開発技術の振興」に対して、平成 31 年度文部科学大臣表彰科学技術賞 (科学技術振興部門) を受賞しました。現代科学技術の基礎である物質科学の研究にはシミュレーションが不可欠であり、そのためのアプリケーションソフトウェアが数多く開発されています。藤堂教授らは、平成 25 年より計算物質科学シミュレーションのポータルサイト MateriApps と統合パッケージ MateriApps LIVE!の開発を続けてきました。MateriApps には 250 以上のアプリの情報が日本語と英語により収録されており、物質科学シミュレーションのポータルサイトとして、世界的に見ても最大規模のものとなっています。また、MateriApps LIVE!では、ユーザがインストール作業なしにすぐにアプリを試すことができ、講習会や講義などでも広く活用されています。これら一連の MateriApps 活動が、国内で開発された計算物質科学ソフトウェアの存在感の向上に貢献しているだけでなく、革新的な物質科学シミュレーションを行う人材の育成にも寄与してることが高く評価され、今回の受賞に至りました。

## 2.5 馬場彩 准教授

— 第 1 回 (2020 年) 米沢富美子記念賞 —

馬場彩准教授が、第 1 回（2020 年）日本物理学会 米沢富美子記念賞を受賞されました。本賞は、日本物理学会が女性会員の研究業績，物理学教育活動，本会活動への貢献などに対して，これを表彰し讃えるため，設立したものです。馬場氏は、宇宙線の起源とその加速機構について精力的な研究を行い、X 線天文衛星や TeV ガンマ線望遠鏡による超新星残骸の観測的研究を中心に多くの成果をあげ、特に超新星残骸を中心とした天体での宇宙線加速効率を求めるなど、高エネルギー天文学および宇宙線物理学の発展に大きく貢献してきた点を評価され、米沢富美子記念賞にふさわしいと評価されました。

## 2.6 赤城裕 助教

— 第 25 回日本物理学会論文賞 —

桂研究室助教の赤城裕氏と物理工学専攻の求幸年教授の共著論文 “Spin Chirality Ordering and Anomalous Hall Effect in the Ferromagnetic Kondo Lattice Model on a Triangular Lattice [J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 083711 (2010).]” に対して日本物理学会第 25 回論文賞が贈られました。この賞は、独創的な論文の発表により、物理学の進歩に重要な貢献をした研究者の功績を称えるために設立されたものです。

赤城氏らは、三角格子上の伝導電子と局在スピンの結合を記述する強磁性近藤格子模型に対して、網羅的な変分計算と摂動計算を組み合わせた手法により、電子密度・フント結合の大きさに対する基底状態相図を明らかにしました。その結果、非従来型の（トポロジカルな）異常ホール効果を伴うスピンスカラーカイラル状態 (multiple-q state) が安定化するパラメタ領域を世界で初めて示しました。さらに赤城氏らは、このような状態の発現に、4 次摂動のフェルミ面効果による、正の双二次相互作用を含む非自明な 4 体相互作用が有効であることを見出しました。その後、この 4 体相互作用が本質的な役割を果たしている実験結果も次々と報告されました。一例として、スカーミオン結晶等の文脈で注目を集めている multiple-q state の $Y_3Co_8Sn_4$ における観測が挙げられます [R. Takagi et al., Sci. Adv. **4**, 3402 (2018).]。本論文は、出版以降、理論・実験問わず引用され続けています。また、冷却原子系などの異なる分野の論文にも引用されており、現在ではカイラリティ秩序相/multiple-q state 探索のスタンダードを築いた基本的文献として認知されています。

## 2.7 小高裕和 助教

— 第 14 回（2020 年）日本物理学会若手奨励賞 —

馬場研助教の小高裕和氏が、第 14 回日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。小高氏は、ブラックホールなど高エネルギー天体の降着円盤やアウトフローなど複雑な幾何構造と運動を考慮し、必要な基礎物理過程を精密にとりこんだ、光子追跡を行う天体 X 線放射計算コード「MONACO (Monte Carlo simulation for Astrophysics and Cosmology)」を立ち上げました。そして、我々の銀河中心に存在する超巨大ブラックホール「いて座 A スター」からの X 線フレアが、周辺分子雲に到達し通りぬけていく様を、分子雲の密度分布と共にモデル化し、鉄輝線や硬 X 線の放射がどのように変化するかを描きだす事に成功しました。これは、モンテカルロシミュレータをベースとした新たな解析フレームワークの開発という独自のアプローチで、今ではブラックホールアウトフローや中性子星降着流の解析にも適用されています。この研究は、X 線の観測デー

タから具体的な物理量を正確に引き出す仕組みを新しく構築した素晴らしい成果です。今後の更なる活躍が期待されています。

## 2.8 中川大也 助教

— 第 14 回（2020 年）日本物理学会若手奨励賞 —

中川大也氏が、第 14 回日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。中川氏は、強く相互作用する冷却原子気体における近藤効果を記述する理論を構築し、強相関量子多体系に発現する非平衡現象の開拓に大きな貢献をしました。具体的には、最新の実験結果に基づき、冷却原子気体にレーザーを照射することで光誘起近藤効果が生じることを予言しました。さらに、原子間の非弾性散乱を開放量子系として記述することで、くりこみ群フローの逆流という非エルミート系特有の現象を見出しました。この発見は、強相関量子多体系の雛形である近藤効果の新たな側面を明らかにするのみならず、近年注目を集めている開放量子系の非平衡物理について、その多体効果を解明する先駆的な成果となることが期待されます。

## 2.9 西口大貴 助教

— 第 14 回（2020 年）日本物理学会若手奨励賞 —

竹内研助教の西口大貴氏が、日本物理学会（領域 11）若手奨励賞を受賞されました。西口氏は、統計物理学、ソフトマター、生物物理学などの境界領域で発展著しいアクティブマター分野において、顕著な実験業績を挙げています。アクティブマターとは、自発的に運動する粒子、いわゆる自己駆動粒子に代表されるように、外部からエネルギーを取り込むことで運動等をする粒子からなる系のことで、生物や細胞の集団、分子モーター、非対称コロイドなど、様々な非平衡系を跨ぐ枠組みの１つとして注目されています。西口氏は、微細加工技術により障害物を配置することで、バクテリア乱流に渦秩序構造を生成できることを発見し、境界条件によるアクティブマター制御の１つの重要な知見を打ち立てました。また、バクテリアの集団運動を観察し、大数の法則と異なる異常密度ゆらぎの実験証拠を確立したほか、非対称コロイドの実験では鞭打ち運動を見出し、運動周波数と駆動力のスケーリング則を実証しました。以上のように、西口氏は、様々な実験系・実験手法を駆使して、アクティブマターの非自明な統計物理法則の実験的探求に主要な貢献を果たしており、今後の更なる活躍が期待されています。

## 2.10 肥後友也 特任助教

— 第 14 回（2020 年）日本物理学会若手奨励賞 —

肥後友也氏が日本物理学会若手奨励賞 (領域 3) を受賞しました。対象業績は「非共線・非共面スピン構造を持つ反強磁性体における新奇機能物性の開拓」です。多様なスピン構造を示す反強磁性体は、基礎物性の立場から盛んに研究されてきました。また最近では、反強磁性体の磁化を持たない、スピン共鳴周波数が THz と強磁性体 (GHz) に比べて高いという特徴も注目され、磁気デバイス材料の可能性に期待が集まっています。しかし、磁化を持たない特性上、反強磁性体ではデバイス機能として必要とされる「スピン構造由来の巨大な応答の検出やその制御」が困難という課題がありました。これに対し、肥後氏らは非共線・非共面スピン構造を持つ反強磁性体を開発し、一般的な反強磁性体では通常は全く期待できない磁気光学カー効果等の巨大な新奇電気磁気物性を発見したことが高く評価されました。

## 2.11 吉川尚孝 助教

— 第 36 回井上研究奨励賞 —

吉川尚孝氏が、高強度中赤外レーザー光を用いた単原子層物質からの高次高調波発生の研究に対して、第 36 回井上研究奨励賞を受賞しました。吉川氏は、単層グラフェンからの高次高調波の観測に初めて成功し、その詳細な偏光依存性から固体の高次高調波発生のメカニズムにおいてバンドギャップエネルギーと励起光強

度の関係が重要であることを示しました。また、複数の単層遷移金属ダイカルコゲナイドにおいて高次高調波がバンド間遷移に共鳴して増大することを見出し、バンド間の非線形分極が固体の高次高調波発生において本質的な役割を担っていることを示しました。以上の成果は固体からの高次高調波発生の原理解明に貢献するものとして高く評価されており、今後の一層の活躍が期待されます。

## 2.12 佐伯喜美子 技術専門員

— 生物学技術研究会功績賞 —

佐伯喜美子氏は、生物学技術研究会第 1 回（1990 年）以来、若林研や桑島研で行った研究について発表を行い、技術室着任後（2008 年以降）は、学部生実験科目である「物理学実験 II」の生物物理実験における装置や実験法の改良に関して発表を行いました。特に、最近は蛍光タンパク質 GFP の生物学的実験と装置に関して教育効果を高める取り組みを行いました。一例をあげると、蛍光分光器の原理を学生に理解させるために、光学系がわかりやすい手作りの蛍光分光装置を作り、この装置を用いて GFP が変性して蛍光が消失する過程及び再び機能を回復して蛍光を出す過程を測定できるようにしました。このような長年の研究および教育への貢献が認められ、このたび生物学技術研究会功績賞を受賞されました。

## 2.13 春日知明 氏、會澤優輝 氏、畠内康輔 氏（馬場研）

— 第 27 回衛星設計コンテスト　文部科学大臣賞・アイデア大賞 —

春日知明さん、會澤優輝さん、畠内康輔さんのチームの作品「宇宙硬 X 線偏光撮像の開拓者 cipher」が、第 27 回衛星設計コンテストで大賞にあたる文部科学大臣賞とアイデア大賞を受賞しました。このコンテストは、全国の大学院、大学、高等専門学校、専門学校、高等学校の学生・生徒を対象としており、宇宙に係わる基礎・応用研究を積極化する機会を提供し、併せて我が国の宇宙開発のすそ野の拡大に寄与しようとするものです。春日さん等が助教の小高裕和さんとともに考案した超小型衛星 cipher は、硬 X 線帯域で世界初の偏光撮像を実現し、かに星雲の磁場構造を探るという計画で、その野心的な取り組みが高く評価されました。

## 2.14 龔宗平（ゴン ゾンピン）氏（上田研）

— 第 10 回（令和元年度）日本学術振興会育志賞 —

龔 宗平（ゴン ゾンピン）氏が第 10 回（令和元年度）日本学術振興会育志賞を受賞されました。龔氏は平衡系の物理が非平衡状態でどう変更・拡張されるかを明らかにするという挑戦的課題に取り組み、数多くの斬新かつ本質的な成果を挙げてきました。同氏の研究スタイルの特筆すべき特徴は、最先端の課題に取り組みながらも流行に流されず、膨大な最先端成果を詳細に把握した上で真にオリジナルな未解決問題を同定し、それを高度な理論と実験に関する深い造詣をフル活用することでエレガントに解決する点にあります。龔氏は当該分野の世界的権威である Ignacio Cirac 氏と共同研究をするなど国際的にも活躍しています。龔氏の卓越した研究能力は研究者の間でも知られており、その謙虚な人柄も相まって後輩や同年代の研究者からも大きな尊敬を集めています。この意味でも、龔氏は育志賞にふさわしく、心からお祝いを申し上げます。

## 2.15 吉岡信行 氏（桂研）

— 第 14 回（2020 年）日本物理学会若手奨励賞 —

桂研究室所属の大学院生・吉岡信行氏が、ニューラルネットワークによる物理状態の分類と表現に関する理論的研究で、第 14 回日本物理学会若手奨励賞 (領域 11) を受賞しました。この賞は、領域ごとの若手研究者を激励するために設立されたものです。吉岡氏は、情報科学の分野で考案された関数であるニューラルネットワークが、乱れたトポロジカル系の相分類や多体系の状態表現に適用可能であることを示しました。前者では、乱れのある自由フェルミオン系における準粒子の実空間配置が、統計平均をとることで実効的に並進対称性を回復することを用いた相図の外挿手法を提案しています。また、後者では、熱平衡状態のボルツマ

ン分布や、量子開放系における非平衡定常状態に関して、ボルツマン機械による表現を用いることで計算コストを大幅に削減できることを示しました。従来の物性物理および統計力学の知識と、情報科学の有機的な結びつきによる、新規手法の提案は、現在大きな注目を集めています。また、これらの業績により、吉岡氏は理学系研究科研究奨励賞（博士課程）も受賞しています。

## 2.16 令和元年度 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、令和元年度 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）　猪又敬介 氏、濱崎立資 氏、室谷悠太 氏、吉岡信行 氏、和田有希 氏
- 理学系研究科 研究奨励賞（修士課程）　小野清志郎 氏、川田拓弥 氏、永井瞭 氏、廣瀬葉菜 氏
- 理学部 学修奨励賞　青木匠 氏、高橋拓豊 氏、増木亮太 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]

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 中川 大也 | 助教（上田研） | H31/4/1 | 採用 | 理化学研究所 |
| 佐藤 龍平 | 特任研究員（常行研） | H31/4/1 | 採用 | 日本学術振興会特別研究員 |
| 福田 朝 | 特任研究員（諸井研） | H31/4/1 | 採用 | 本専攻博士課程 |
| 木暮 志保 | 専攻事務係長 | H31/4/1 | 配置換え | 本学経済学研究科等 |
| 西口 大貴 | 助教（竹内研） | H31/4/16 | 採用 | パスツール研究所 |
| WEISE Wolfram Siegfried | GSGC 客員教授 | H31/4/22 | 採用 | ミュンヘン工科大学 |
| 小林 研介 | 教授（知の物理） | R1/5/1 | 採用 | 大阪大学 |
| 中辻 知 | 教授 | R1/6/1 | 配置換え | 本学物性研究所 |
| SVIRKO Yury | GSGC 客員教授 | R1/9/1 | 採用 | University of Eastern Finland |
| 浅田 純子 | 学術支援職員（岡田研） | R1/9/1 | 採用 | 理化学研究所 |
| 古屋 朋子 | 学術支援職員（岡田研） | R1/9/16 | 採用 | 本学工学系研究科 |
| 木村 有香 | 事務補佐員（知の物理） | R2/1/1 | 採用 | |

[物理学教室から移られた方々]

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| WIMMER Kathrin | 講師 | R1/5/31 | 辞職 | Instituto de Estructura de la Materia |
| WEISE Wolfram Siegfried | GSGC 客員教授 | R1/5/31 | 辞職 | ミュンヘン工科大学 |
| TANG Yong | 特任研究員（諸井研） | R1/7/31 | 辞職 | 中国科学院大学 |
| ZHENG Jiaming | 特任研究員（諸井研） | R1/8/31 | 辞職 | Tsung-Dao Lee Institute |
| 福田 朝 | 特任研究員（諸井研） | R1/8/31 | 辞職 | Lawrence Berkeley National Laboratory |
| SVIRKO Yury | GSGC 客員教授 | R1/10/15 | 辞職 | University of Eastern Finland |
| 福山 寛 | 教授 | R2/3/31 | 定年退職 | 本学低温科学研究センター |
| 松井 朋裕 | 助教（福山研） | R2/3/31 | 辞職 | アンリツ株式会社 |
| 佐伯 喜美子 | 技術専門員 | R2/3/31 | 定年退職 | 本研究科再雇用 |
| NAGORNOV Iurii | 特任研究員（常行研） | R2/3/31 | 辞職 | 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 |
| COELHO QUINTINO Marco Túlio | 特任研究員（村尾研） | R2/3/31 | 辞職 | University of Vienna |
| 奥澤 浩未 | 学術支援職員（常行研） | R2/3/31 | 辞職 | 本学物性研究所 |
| 白石 絵理 | 事務補佐員（村尾研） | R2/3/31 | 辞職 | |

# 4　役務分担

| 役務 | 担当教員 | 技術職員・事務職員 |
|---|---|---|
| 専攻長・学科長 | 山本 | 木暮、野澤、藤田 |
| 幹事 | 樋口、小形 | |
| 専攻主任 | 櫻井 | 物理教務 |
| 専攻副主任 | 浅井 | 物理教務 |
| 常置委員 | 髙木、須藤 | 物理教務 |
| 教務 | 濱口 (理)、馬場 (大学院), 竹内（ガイダンス）<br>北川（学生相談） | |
| 学生実験 | 安東、岡本、横山 (将) | 佐伯、八幡 |
| 卓越大学院 | 浅井、吉田、相原、横山 (将) | 物理教務、物理事務 |
| 外国人学生・留学 | | |
| 優先配置 | 濱口 | 物理教務 |
| 海外学部生インターンシップ受入 | 髙木、島野 | 物理教務 |
| GSGC | 吉田、横山 (順) | 物理教務 |
| 留学 | 安東 | 物理教務 |
| 駒場生進学 | | |
| 進振委員 | 諸井 | 物理教務 |
| 進学指導/推薦入試アドバイザー | 濱口、村尾 | 物理教務 |
| 駒場対策 | 濱口, 馬場、桂、林、竹内 | 物理教務 |
| 奨学金・支援 | | |
| 奨学金 | 長谷川 | 物理教務 |
| 博士課程学生支援制度 | 岡本 | 渡辺、藤田 |
| 就職 | 湯本、櫻井 | 仁井田、野澤 |
| 部屋割 | 林 | 木暮 |
| 安全衛生 | 酒井 | 八幡 |
| 放射線 | 横山 (将) | 物理事務 |
| 管理技術室 | 酒井 (統括、試作室) | 下澤 |
| (技術室会議メンバー) | 安東 (学生実験) | 佐伯、八幡 |
| | 酒井、岡本 (安全衛生・低温) | 八幡 |
| | 藤堂 (IT 関連) | 南野 |
| 図書 | 村尾（理)、岡本、北川 | 水落 |
| コロキウム | 上田、横山（順)、島野 | 物理事務 |
| 年次報告 | 日下、竹内 | 仁井田、八幡 |
| 記録係 | 北川、日下、竹内 | 物理事務 |
| 理交会 | 藤堂 | 木暮 |
| 親睦会 | 日下 | 物理事務 |
| ホームページ、IT | 藤堂、吉田 | 南野 |
| オープンキャンパス | 桂 | 物理事務 |

# 5　教室談話会

- 2019 年 4 月 24 日（水）17 時 00 分〜18 時 30 分
  池田思朗 氏（統計数理研究所）
  「スパースモデリングと Event Horizon Telescope によるブラックホール撮像」
- 2019 年 7 月 12 日（金）17 時 00 分〜18 時 30 分
  岡本佳比古 氏（名古屋大学）
  「特徴的な結晶構造・電子構造に着目した遷移金属化合物の物質開拓」
- 2019 年 12 月 6 日（金）17 時 00 分〜18 時 30 分
  Pertti Hakonen 氏（Aalto University）
  “Suspended Nanocarbon Devices in Creation and Sensing of Condensed Matter States”
- 2019 年 12 月 11 日（水）17 時 00 分〜18 時 30 分
  「宇宙進化と太陽系外惑星が切り拓いた新たな世界観：2019 年ノーベル物理学賞紹介」
- 2019 年 12 月 13 日（金）15 時 00 分〜16 時 30 分
  Chao-Yang Lu 氏（University of Science and Technology of China）
  “Scalable photonic quantum technologies”
- 2020 年 3 月 11 日（火）16 時 00 分〜17 時 30 分 延期
  福山寛 教授（最終講義）
  「ヘリウムとグラファイトの狭間で」

# 6　物理学教室コロキウム

- 2019 年 5 月 17 日（金）17:00-18:30
  大栗博司 氏（東京大学, California Institute of Technology）
  “Constraints on Quantum Gravity”
- 2019 年 5 月 31 日（金）17:00-18:30
  山口弘悦 氏（宇宙科学研究所）
  「Blast from the past - 超新星残骸から探る星の進化と終焉-」
- 2019 年 6 月 14 日（金）17:00-18:30
  中辻知 氏（東京大学）
  「ワイル粒子物理学：巨大ベリー曲率と室温トポロジカル物性」
- 2019 年 6 月 28 日（金）17:00-18:30
  小林研介 氏（東京大学）
  「ゆらぎは語る – 人工原子における非平衡量子液体」
- 2019 年 10 月 4 日（金）17:00-18:30
  Paul P. Plucinsky 氏（Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics）
  “The Launch of the Chandra X-ray Observatory and Twenty Years of Observations”
- 2019 年 11 月 8 日（金）17:00-18:30
  須田利美 氏（東北大学電子光理学研究センター）
  「陽子のサイズがおかしい？」
- 2019 年 11 月 15 日（金）17:00-18:30
  Takao Hensch 氏（東京大学ニューロインテリジェンス国際研究機構）
  “Neuroplasticity”
- 2019 年 12 月 13 日（金）17:00-18:30
  越野幹人 氏（大阪大学）
  「ファンデルワールス２次元物質の物理学：モアレ模様の生み出す量子現象」

# 7　金曜ランチトーク

- 2019 年 4 月 26 日（金）中川 大也（上田研究室）

  “Non-Hermitian quantum many-body physics in ultracold atomic gases”

- 2019 年 6 月 14 日（金）小林 研介

  “Precise Condensed Matter Physics - The noise will tell -”

- 2019 年 7 月 12 日（金）中辻 知

  “Topological Spintronics”

- 2019 年 9 月 6 日（金）西口 大貴（竹内研究室）

  “Emergent vortex order in bacterial turbulence: from a topological perspective”

# 年次研究報告　2019年度

2020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　　常行真司
編　集　　小林研介
　　竹内一将
　　八幡和志