ISSN 0910-0709

Department of Physics

School of Science

The University of Tokyo

Annual Report

2020

令和２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

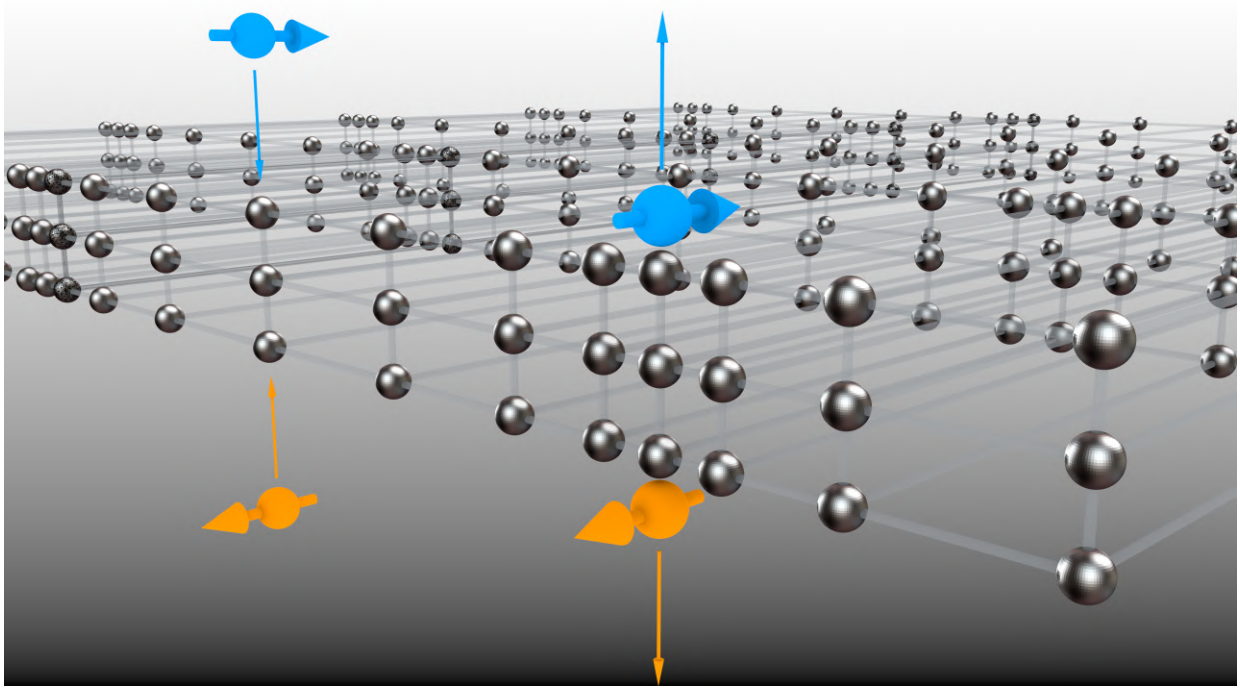
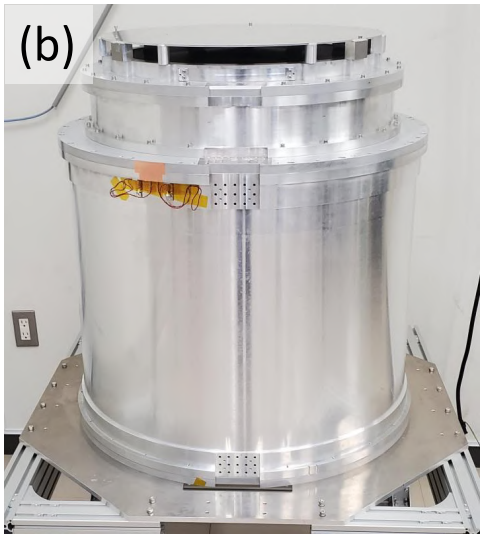


図 1:　原子振動により、スピンが流れる現象のイメージ図：電子が動くと電流が発生するが、電子がそのスピンの向きを揃えて動くと「スピン流」なる角運動量の流れが生じる。図は、「スピン軌道相互作用」が大きい物質において、原子振動によってスピン流が発生する様子を表す概念図。色付きの球とそれを貫く矢印が電子とそのスピンの向きを表す。黒球は結晶を構成する原子。原子振動により、原子の位置は平衡状態からずれている。実際には多数の電子が色付きの球と同様の動きをすることで、スピン流が生成される。（林研究室）

Illustration of lattice vibration induced spin current. In materials with large spin orbit interaction lattice vibration can cause spin current. Colored spheres represent electrons, and the arrows that penetrate them indicate their spin. (Hayashi Group)



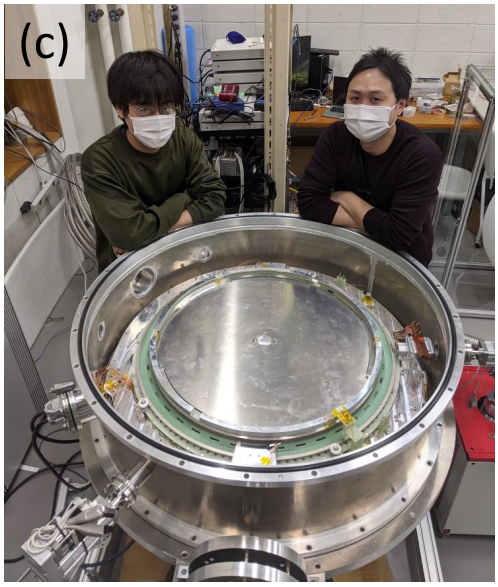


図 2:　(a) 南米チリ・アタカマ砂漠、標高 5,200m に設置されている CMB 望遠鏡群（写真提供：横浜国立大学廣瀬氏）。手前の 3 台が Simons Array 望遠鏡で、うち中央の一台は POLARBEAR 望遠鏡として使用されたもの。現在は、中央部に Simons Observatory を建設中である。(b) Simons Observatory 小口径望遠鏡の光学筒。2020　年度に一台目を完成させ、米国にて望遠鏡クライオスタットとの統合試験中。(c)　Simons Observatory 用低温連続回転式半波長板システム。Kavli IPMU との共同研究により開発した内径 55cm の大口径超伝導浮遊式ベアリングを採用する。（日下研究室）

(a) Array of CMB telescopes at the Atacama desert, northern Chile, at an altitude of 5,200 m (photo credit: Haruaki Hirose, Yokohama National University). Three telescopes in the front are the Simons Array telescopes. The Simons Observatory is currently under construction in the central area of the photo. (b) An optics tube for the small aperture telescope of Simons Observatory. We completed fabrication of the first tube in 2020, and it is under integration test with a receiver cryostat in the U.S. (c) The cryogenic half-wave plate rotation mechanism for Simons Observatory. It employs a large superconducting mag-lev bearing with an inner diameter of 55 cm, which we developed in collaboration with Kavli IPMU. (Kusaka Group)

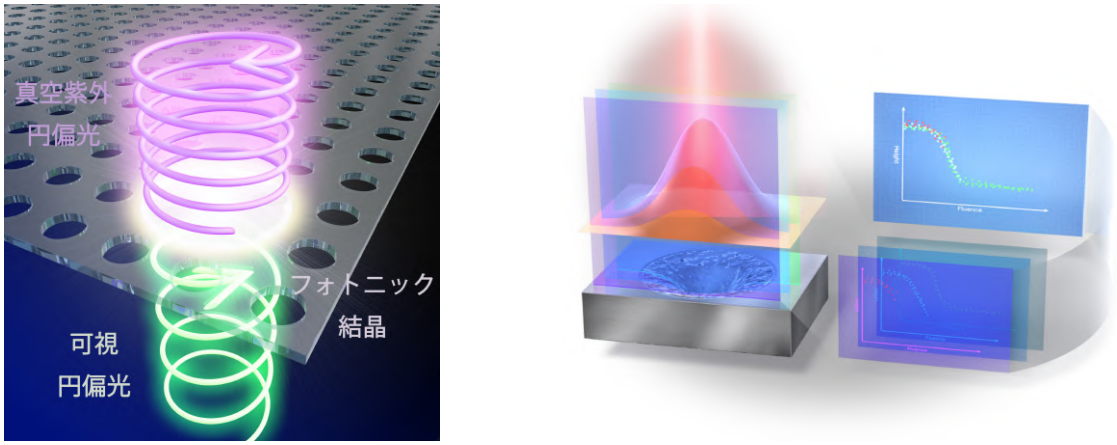


図 3: (左) 開発した真空紫外コヒーレント円偏光発生法の概念図。正方格子状に周期的な穴の開いた自立誘電体ナノ薄膜 (フォトニック結晶ナノメンブレン) に可視光の円偏光フェムト秒レーザーを照射すると、真空紫外領域の円偏光に波長変換される。これまでの真空紫外光発生の方法に比べて非常に簡便で、実験室のテーブルトップで実現可能である。本手法は今後、円偏光レーザー光電子分光や生体分子円二色性イメージング用の真空紫外コヒーレント光源として、活用される可能性がある。
(右) 今回開発した、レーザー光で破壊された物質の穴形状と入射されたレーザー光の強度の関係について、たった 1 つの加工穴から数十万点におよぶ大量のデータを取得できる手法 (フルーエンスマップ法) の概念図。本手法によって、レーザー加工技術の進歩に必要となる基礎データを、大量かつ高い精度で取得することが可能になり、レーザー加工の原理解明や光を用いたものづくり技術の発展への貢献が期待できる。(五神・湯本研究室)

(Left) Direct generation of circularly polarized vacuum ultraviolet (VUV) coherent light by third-harmonic generation in a dielectric square lattice photonic crystal nanomembrane. Our method paves the way toward the development of new tabletop coherent VUV light source for practical applications, such as laser-based angle-resolved photoemission spectroscopy and circular dichroism spectroscopy of biomolecules.
(Right) Overview of the developed method (Fluence Mapping), by which a laser ablated crater local height is directly correlated to the local fluence of laser. This method makes it possible to extract hundreds of thousands of data points from a single ablated crater. Such efficient and accurate extraction of morphology data should be important for fundamental studies regarding laser induced breakdown, which is key to furthering laser processing applications in industry. (Gonokami-Yumoto group)

序

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・理学部物理学科の令和 2 年度（2020 年 4 月–2021 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、樺島祥介氏（情報統計力学：東京工業大学より）、准教授として、Haozhao Liang 氏（Nuclear Theory：理化学研究所より）、辻直人氏（物性理論：理化学研究所より）、蘆田祐人氏（量子物性/光学理論：工学系研究科より）、講師として、酒井明人氏（物性実験 (強相関・量子磁性体)：物性研究所より）、助教として、佐々木健人氏（小林研）、中桐洸太氏（横山将志研）、高橋昂氏（樺島研）、姫岡優介氏（古澤研）が着任されました。また、齋藤稔助教（古澤研）が自然科学研究機構生命創成探究センター特任准教授として、西岡辰磨助教（松尾研）が京都大学基礎物理学研究所特定准教授として、転出されました。また、相原博昭教授、高瀬雄一教授、湯本潤司教授が本年度定年を迎えられました。また、鈴木隆敏助教が退職されました。

本年度も教室関係者の活発な研究・教育活動の結果、多くの方が受賞されています。堀田凱樹名誉教授が 2020 年度の文化功労者に選ばれました。また、酒井広文教授が 2020 年度日本分光学会賞（学会賞）を、髙木英典教授が Eugen and Ilse Seibold-Prize 2020 を、横山順一教授が令和 2 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰を、福嶋健二教授が第 14 回湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞を、林将光准教授が第 17 回日本学術振興会賞を、竹内一将准教授が米国物理学会 Outstanding Referees of the Physical Review Journals を、阿部智広氏（濱口研、現 名古屋大学）が素粒子奨学会第 15 回中村誠太郎賞を、大栗真宗助教（須藤研）、金川和弘氏（須藤研、現 茨城大学）が 2020 年度（第 25 回）日本天文学会欧文研究報告論文賞を受賞されました。さらに、明石遼介助教（常行研）、川畑幸平氏（上田研）、江間陽平氏（諸井研、現 ドイツ電子シンクロトロン研究所）、齊藤真彦氏（浅井研、現 素粒子物理国際研究センター）、榎本雄太郎氏（安東研、現 大学院工学系研究科）、和田有希氏（馬場研、現 理化学研究所）、濱崎立資氏（上田研、現 理化学研究所）、平岩徹也氏（佐野研、現 シンガポール国立大学）が第 15 回（2021 年）日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。さらに、八幡和志氏（技術専門職員）が ICTSS 2020 Best Paper Award を受賞されました。また、学生では野口亮氏（近藤研）が東京大学総長賞を、野口亮氏、勝見亮太氏、竹中彰氏、廣澤智紀氏、玉光未侑氏、岩澤諄一郎氏が令和 2 年度理学系研究科研究奨励賞（博士課程）を、北山圭亮氏、田中宏明氏、長澤俊作氏、奥山義隆氏が同研究奨励賞（修士課程）を、吉田智治氏、大賀成朗氏、洪木子氏が令和 2 年度理学部学修奨励賞を受賞しました。

令和 2 年度は新型コロナウイルスの影響により、大学での活動にもいろいろな制約がありました。学部や大学院の通常講義はすべてオンラインで実施しました。少人数の班に分かれて行う学部 3 年生の物理学実験は、コロナ第 1 波のおさまった 7 月下旬に開始し、夏休みも使って S セメスター分を終えたのが 11 月、A セメスター分は 12 月から 2 月下旬までという、いずれも変則的な実施となりました。4 年生の特別実験・理論演習でも、輪講や計算機実験はオンライン実施になりました。各研究室では、居室や実験室に入る人数を制限し、出張も極力行わないようにするなど、感染予防を重視して研究活動を行いました。学生主体の行事では、毎年物理学科の学生が五月祭で行っている企画 PhysicsLab が、秋にオンラインでの実施となりました。また学生同士あるいは学生と教員の交流の場として 12 月に開催されてきたニュートン祭は中止になり、代わりに少人数の学生を対象として教員が行う研究セミナー『ニュートンカフェ』を開催しました。

このように制約が多いなかでも、物理学教室と産業界の連携に関しては大きな動きがありました。まず令和 2 年 4 月に、JSR 株式会社と包括連携に合意し、共同研究の基盤活動を開始しました。この包括連携により、物理学専攻は社会に深く浸透した様々な材料の学理探究を通して普遍的真理と新たな学問領域を見出し、JSR はサイエンスに基づく新たな高機能材料の開発を推進します。これに合わせて、物理学専攻の博士課程学生を対象とした給付型フェローシップである、「JSR フェローシップ」も創設しました。9 月には、協創オフィス「JSR・東京大学協創拠点 CURIE」が、理学部 1 号館中央棟 3 階にオープンしました。また令和 3 年 1 月には日東電工株式会社と連携し、理学系研究科に社会連携講座「磁気界面物性講座」が設置されました。ここではデバイス材料となるトポロジカル磁性体の基礎物性の研究を行う予定で、そのために特任准教授が着任しました。

物理学教室は、今後も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まいります。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。

この年次研究報告は、小林研介教授、辻直人准教授、八幡和志氏、仁井田和子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。

2021 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 2020 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 原子核理論 (Liang) 研究室 . . . 5
1.3 素粒子論研究室 . . . 7
1.3.1 現象論 . . . 7
1.3.2 弦理論，場の理論全般 . . . 9
1.3.3 行列模型 . . . 9
1.3.4 数理物理学 . . . 10

2 原子核・素粒子実験 **13**
2.1 原子核実験グループ（櫻井研究室） . . . 13
2.1.1 パラジウム同位体のミューオン捕獲反応の研究 . . . 13
2.1.2 ミューオン原子 X 線による原子核の荷電半径・荷電分布測定 . . . 13
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) . . . 14
2.1.5 パイオン生成過程の研究 . . . 15
2.1.6 ミューオン X 線を使った元素分析装置 μLeXSea の開発 . . . 15
2.1.7 重イオン衝突による高密度中性子物質の状態方程式の研究 . . . 16
2.2 相原・横山研究室 . . . 17
2.2.1 スーパー B ファクトリー実験 . . . 17
2.2.2 加速器による長基線ニュートリノ振動実験 . . . 18
2.2.3 陽子崩壊の探索 . . . 19
2.2.4 次世代大型水チェレンコフ検出器・ハイパーカミオカンデ . . . 19
2.2.5 HSC 暗黒エネルギー研究 . . . 20
2.3 浅井研究室 . . . 22
2.3.1 LHC・ATLAS 実験での研究 . . . 22
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 . . . 23

3 物性理論 **29**
3.1 小形研究室 . . . 29
3.1.1 ディラック電子系 . . . 29
3.1.2 熱応答・熱電応答の理論 . . . 29
3.1.3 トポロジカル物質の理論 . . . 30
3.1.4 軌道磁場効果 . . . 32
3.1.5 有機伝導体 . . . 32
3.1.6 スピン系およびスピン軌道相互作用 . . . 32
3.2 常行研究室 . . . 35
3.2.1 データ同化結晶構造探索手法の開発 . . . 35
3.2.2 圧力誘起高温超伝導体 YH_6 の電子状態 . . . 35
3.2.3 電子フォノン結合定数の Wannier 解析 . . . 36

3.2.4 第一原理計算に向けた Floquet 理論の再検討 . . . 36
3.2.5 スピンゆらぎ効果を考慮した超伝導密度汎関数理論 . . . 36
3.2.6 $LiCB_9H_{10}$ 超イオン伝導体の Li 伝導機構 . . . 36
3.2.7 相対論的密度汎関数理論の構築と超重元素の電子状態 . . . 36
3.2.8 電子系における密度汎関数の, 原子核密度汎関数理論への応用 . . . 37
3.2.9 汎関数くりこみ群を用いた相関密度汎関数の構成 . . . 37
3.2.10 電子温度に依存する原子間ポテンシャルの機械学習による構築 . . . 37
3.2.11 電子格子強結合極限における第一原理計算手法の開発 . . . 37
3.3 藤堂研究室 . . . 40
3.3.1 強相関系のシミュレーション手法 . . . 40
3.3.2 統計的機械学習による物質科学 . . . 41
3.3.3 量子コンピュータ基礎理論 . . . 41
3.3.4 強相関多体系における新奇な状態・相転移現象 . . . 42
3.3.5 動的協調現象・非平衡ダイナミクス . . . 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 . . . 42
3.4 桂研究室 . . . 44
3.4.1 強相関系 . . . 44
3.4.2 トポロジカル系 . . . 45
3.4.3 散逸のある量子多体系 . . . 47
3.4.4 数理物理学・統計力学 . . . 47
3.5 樺島研究室 . . . 50
3.5.1 スパース推定 . . . 50
3.5.2 安定性選択 . . . 51
3.5.3 神経回路網解析 . . . 52
3.6 辻研究室 . . . 54
3.6.1 超伝導体のダイナミクス . . . 54
3.6.2 散逸のある非平衡量子開放系 . . . 55
3.6.3 量子情報 scrambling . . . 55
3.7 蘆田研究室 . . . 57
3.7.1 開放系の物理 . . . 57
3.7.2 統計物理・機械学習 . . . 58

4 物性実験 60
4.1 長谷川研究室 . . . 60
4.1.1 表面/界面での電子・スピン輸送 . . . 60
4.1.2 表面・原子層ナノ構造 . . . 61
4.1.3 新しい装置・手法の開発 . . . 62
4.2 岡本研究室 . . . 65
4.2.1 劈開表面に形成された２次元電子系 . . . 65
4.2.2 金属超薄膜の超伝導 . . . 65
4.2.3 ビスマス超薄膜の電気伝導 . . . 67
4.3 島野研究室 . . . 68
4.3.1 超伝導体 . . . 69
4.3.2 二次元層状物質 . . . 69
4.3.3 トポロジカル非線形光学 . . . 70
4.3.4 光パラメトリック増幅器を用いた高強度中赤外光源の開発 . . . 72
4.4 高木・北川研究室 . . . 73
4.4.1 スピン軌道相互作用を利用した擬スピン量子相 . . . 73
4.4.2 3 次元ディラック電子の巨大な軌道反磁性 . . . 74
4.5 林研究室 . . . 77

4.5.1 スピン流物性 . . . 77
4.5.2 非線形光学効果 . . . 78
4.5.3 機械学習と物性 . . . 79
4.6 小林研究室 . . . 80
4.6.1 量子センサによる精密物性計測 . . . 80
4.6.2 量子液体のダイナミクス . . . 81
4.6.3 非線形非平衡現象 . . . 82
4.6.4 スピン依存伝導 . . . 83
4.6.5 原子層物質 . . . 83
4.7 中辻・酒井研究室 . . . 86
4.7.1 トポロジカル反強磁性体におけるベリー位相効果 . . . 86
4.7.2 トポロジカル磁性体における巨大横熱電係数 . . . 87

5 一般物理理論 91
5.1 宇宙理論研究室 (須藤・吉田) . . . 91
5.1.1 観測的宇宙論 . . . 91
5.1.2 ニュートリノ . . . 92
5.1.3 星・ブラックホール形成 . . . 92
5.1.4 円盤進化と系外惑星 . . . 92
5.1.5 銀河の化学進化 . . . 93
5.1.6 高エネルギー天体現象の研究 . . . 93
5.2 村尾研究室 . . . 97
5.2.1 高階量子演算 . . . 98
5.2.2 量子系のダイナミクスの制御 . . . 99
5.2.3 分散型量子情報処理 . . . 99
5.3 上田研究室 . . . 100
5.3.1 冷却原子気体・非平衡開放系 . . . 101
5.3.2 量子論・統計力学と情報理論・人工知能の融合 . . . 102
5.4 横山 (順) 研究室 . . . 105
5.4.1 初期宇宙論 . . . 105
5.4.2 重力波検出器 KAGRA のデータ解析 . . . 107

6 一般物理実験 110
6.1 高瀬研究室 . . . 110
6.1.1 TST-2 実験の概要 . . . 110
6.1.2 高周波実験 . . . 110
6.1.3 OH 実験 . . . 111
6.1.4 計測器の開発 . . . 111
6.1.5 共同研究 . . . 112
6.2 山本研究室 . . . 115
6.2.1 はじめに . . . 115
6.2.2 星・惑星系形成 . . . 115
6.2.3 観測成果 . . . 116
6.2.4 機械学習による観測データ解析 . . . 117
6.3 酒井広文研究室 . . . 120
6.3.1 レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展 . . . 120
6.3.2 マクロな 3 回対称性をもつ分子アンサンブルの生成 . . . 121
6.3.3 PAL-XFEL 施設の軟 X 線自由電子レーザーを用いた光電子計測 . . . 122
6.3.4 その他 . . . 123
6.4 五神-湯本 研究室 . . . 124
6.4.1 物質系の巨視的量子現象の探索 . . . 124

6.4.2 非自明な光学現象の探索とその応用 . . . 125
6.4.3 新規コヒーレント光源開発と新しい分光手法開拓 . . . 126
6.4.4 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 . . . 131
6.5.2 宇宙空間重力波望遠鏡 . . . 131
6.5.3 ねじれ型重力波検出器 TOBA . . . 132
6.5.4 ダークマター探査 . . . 133
6.5.5 相対論・量子光学実験 . . . 133
6.6 馬場研究室 . . . 137
6.6.1 天体観測に関する研究 . . . 137
6.6.2 将来宇宙計画に関する開発 . . . 138
6.7 日下研究室 . . . 142
6.7.1 POLARBEAR 実験 . . . 142
6.7.2 Simons Array 実験 . . . 143
6.7.3 Simons Observatory 実験 . . . 143
6.7.4 次世代 CMB 実験用 装置開発 . . . 144
6.8 竹内研究室 . . . 146
6.8.1 ソフトマター系の非平衡実験 . . . 146
6.8.2 微生物系の非平衡実験 . . . 147
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と構造の数理統計解析 . . . 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 . . . 153
7.2 樋口研究室 . . . 155
7.2.1 はじめに . . . 155
7.2.2 心臓と骨格筋の収縮機能を決める心筋，骨格筋ミオシンの分子特性 . . . 155
7.2.3 温度や pH 変性による準安定状態でのキネシンの運動測定 . . . 155
7.2.4 細胞損傷度の定量化に向けた細胞内拡散係数と細胞の光ゆらぎ値の解析 . . . 156
7.2.5 ウニ精子鞭毛ダブレット微小管上のダイニン集団の力発生 . . . 156
7.2.6 ウニ精子鞭毛ダイニンの Duty ratio . . . 157
7.3 岡田研究室 . . . 157
7.3.1 顕微鏡と機械学習 . . . 158
7.3.2 その他の一分子イメージング関連技術の開発 . . . 159
7.4 古澤研究室 . . . 160
7.4.1 複数薬剤に対する耐性能の定量に基づく適応度地形の推定 . . . 160
7.4.2 マルチカノニカル法を用いた遺伝暗号の適応度地形解析 . . . 160
7.4.3 変形可能なアクティブ粒子集団の数理モデルの解析 . . . 161
7.4.4 機械学習を用いた生物形態の定量化 . . . 161
7.4.5 代謝モデルを用いた成長ダイナミクスと休眠ダイナミクスの研究 . . . 161
7.4.6 最適なラグタイム分布の理論的導出 . . . 161
7.4.7 ゲノムの構造変異を高頻度に観察できる進化実験の構築 . . . 162
7.4.8 遺伝子発現調節領域における変異に対する頑強性の定量 . . . 162

8 技術部門 165
8.1 実験装置試作室 . . . 165
8.1.1 利用状況 . . . 165

8.1.2 設計・加工の自動化の推進 . . . 165
8.2 技術室 . . . 165
8.2.1 安全衛生 . . . 165
8.2.2 IT 関連 . . . 165
8.2.3 学生実験 . . . 166
8.2.4 研究支援 . . . 166
8.2.5 各種委員会 . . . 166

II Summary of group activities in 2020 169
1 Theoretical Nuclear Physics (Fukushima) Group . . . 170
2 Liang Group . . . 170
3 High Energy Physics Theory Group . . . 170
4 Sakurai Group . . . 172
5 Aihara-Yokoyama Group . . . 173
6 Asai group . . . 174
7 Ogata Group . . . 175
8 Tsuneyuki Group . . . 176
9 Todo Group . . . 176
10 Katsura Group . . . 177
11 Kabashima Group . . . 179
12 Tsuji Group . . . 179
13 Ashida Group . . . 180
14 Hasegawa Group . . . 181
15 Okamoto Group . . . 182
16 Shimano Group . . . 182
17 Takagi-Kitagawa Group . . . 183
18 Hayashi Group . . . 184
19 Kobayashi Group . . . 185
20 Nakatsuji-Sakai Group . . . 186
21 Theoretical Astrophysics Group . . . 188
22 Murao Group . . . 190
23 Ueda Group . . . 191
24 J. Yokoyama Group . . . 192
25 Takase Group . . . 192
26 Yamamoto Group . . . 193
27 Sakai (Hirofumi) Group . . . 194
28 Gonokami and Yumoto Group . . . 195
29 Ando Group . . . 196
30 Bamba Group . . . 197
31 Kusaka Group . . . 198
32 Takeuchi Group . . . 198
33 Nose Group . . . 199
34 Higuchi Group . . . 200
35 Okada Group . . . 201
36 Furusawa Group . . . 202

III 2020 年度 物理学教室全般に関する報告 205

1 学部講義概要 206

1.1 2 年生 A セメスター 206
1.1.1 電磁気学 I : 櫻井 博儀 206
1.1.2 解析力学 : 相原 博昭 206
1.1.3 量子力学 I : 諸井 健夫 207
1.1.4 物理実験学 : 山本 智, 北川 健太郎 207
1.1.5 物理数学 I : 濱口 幸一 208
1.1.6 物理数学 II : 吉田 直紀 208
1.1.7 物理学のための科学英語基礎 : 小野 義正 208
1.2 3 年生 S セメスター 208
1.2.1 電磁気学 II : 島野 亮 209
1.2.2 量子力学 II : 福嶋 健二 209
1.2.3 現代実験物理学 I : 樋口 秀男, 北川 健太郎 209
1.2.4 計算機実験 I : 藤堂 眞治 210
1.2.5 統計力学 I : 竹内 一将 210
1.2.6 流体力学 : 江尻 晶 211
1.2.7 物質科学基礎 : 高木 英典, Ali Alavi, Jochen Mannhart, Bernhard Keimer 211
1.3 3 年生 A セメスター 212
1.3.1 光学 : 井手口 拓郎 212
1.3.2 物理数学 III : 桂 法称 212
1.3.3 量子力学 III : 常行 真司 212
1.3.4 生物物理学 : 能瀬 聡直, 岡田 康志 213
1.3.5 固体物理学 I : 岡本 徹 213
1.3.6 現代実験物理学 II : 馬場 彩, 日下 暁人 214
1.3.7 電磁気学 III : 浅井 祥仁 214
1.3.8 統計力学 II : 小形 正男 214
1.3.9 計算機実験 II : 藤堂 眞治 215
1.4 4 年生 S セメスター 215
1.4.1 一般相対論 : 須藤 靖 215
1.4.2 サブアトミック物理学 : 横山 将志 216
1.4.3 計算科学概論 : 大久保 毅 ほか 6 名 216
1.4.4 統計力学特論 : 常次 宏一 216
1.4.5 現代物理学入門 : 小林 研介, 樺島 祥介 217
1.4.6 場の量子論 I : 松尾 泰 217
1.4.7 系外惑星 : 須藤 靖 217
1.4.8 量子光学 : 酒井 広文 218
1.4.9 固体物理学 II : 中辻 知 219
1.4.10 プラズマ物理学 : 高瀬 雄一 219
1.4.11 宇宙物理学 : 横山 順一 219
1.4.12 生物物理学特論 II : 樋口 秀男, 新井 宗仁, 野口 博司 220
1.5 4 年生 A セメスター 220
1.5.1 素粒子物理学 : 大谷 航, 田中 純一 220
1.5.2 場の量子論 II : 渡利 泰山 220
1.5.3 原子核物理学 : 今井 伸明 221
1.5.4 電子回路論 : 安東 正樹 221
1.5.5 固体物理学 III : 林 将光 221
1.5.6 非平衡科学 : 伊藤 創祐 222
1.5.7 普遍性生物学 : 金子 邦彦, 古澤 力 222
1.5.8 重力波物理学 : Kipp Cannon, 都丸 隆行 222
1.5.9 物理学のための科学英語特論 : 小野 義正 223

2 各賞受賞者紹介 224
2.1 堀田 凱樹 名誉教授 . . . 224
2.2 酒井 広文 教授 . . . 224
2.3 髙木 英典 教授 . . . 224
2.4 横山 順一 教授 . . . 225
2.5 福嶋 健二 教授 . . . 225
2.6 林 将光 准教授 . . . 225
2.7 竹内 一将 准教授 . . . 225
2.8 明石 遼介 助教（常行研） . . . 226
2.9 大栗 真宗 助教（須藤研） . . . 226
2.10 江間 陽平 氏（諸井研、現 ドイツ電子シンクロトロン研究所） . . . 226
2.11 齊藤 真彦 氏（浅井研、現 素粒子物理国際研究センター） . . . 226
2.12 榎本 雄太郎 氏（安東研、現 大学院工学系研究科） . . . 227
2.13 和田 有希 氏（馬場研、現 理化学研究所） . . . 227
2.14 濱崎 立資 氏（上田研、現 理化学研究所） . . . 227
2.15 平岩 徹也 氏（佐野研、現 シンガポール国立大学） . . . 227
2.16 金川 和弘 氏（須藤研、現 茨城大学） . . . 228
2.17 阿部 智広 氏（濱口研、現 名古屋大学） . . . 228
2.18 八幡 和志 技術専門職員 . . . 228
2.19 川畑 幸平 氏（上田研） . . . 228
2.20 東京大学総長賞・理学系研究科研究奨励賞・理学部学修奨励賞 . . . 228

3 人事異動 230

4 役務分担 231

5 教室談話会 232

6 物理学教室コロキウム 233

7 金曜ランチトーク 234

8 ニュートン・カフェ 235

I

研究室別 2020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。

量子コンピュータを用いた格子ゲージ理論の実時間シミュレーション

格子ゲージ理論は、場の量子論における第一原理計算であるが、実時間発展を扱うことができないという欠点を持っている。この問題は、実時間シミュレーションに必要な計算能力が古典コンピュータの限界を超えていることに起因しており、将来的には量子コンピュータの発展によって解決されると期待されている。山本は、格子ゲージ理論の実時間シミュレーションの定式化の 1 つを提案し、IBM 量子コンピュータを用いてテスト計算を実行した [12, 43]。

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。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 [15, 38, 40, 44]。

中性子超流動物質と 2 フレーバークォーク物質の連続性

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まで連続的に転化していることを示し、クォークの新奇相の存在を発見した [1, 5, 16, 27, 38]。

2 フレーバー高密度クォーク物質でのアリスストリング

藤本らは、2 フレーバークォーク物質の新奇相で現れる渦糸について議論した。現れる渦糸はゲージ群の非可換性が重要な役割を果たすことがわかり、高エネルギー物理の別の文脈で従来議論されてきたアリスストリングと等価なものであることが明らかになった [13, 29]。

再和摂動論による高密度 QCD 物質状態方程式の計算

藤本と福嶋は、場の量子論の複雑な再和計算を慎重に行い、高密度 QCD 物質の状態方程式の計算を行うことに成功した。これらの成果は arXiv に公表した他、藤本が学会発表ならびにウェビナー発表を行った [31, 33, 44, 45]。

高速回転する高温・高密度物質の非閉じ込め転移の解析

高温・高密度物質が実現する重イオン衝突では、磁場の効果と並んで回転の効果が大きく影響すると考えられている。藤本、福嶋らは、ハドロン共鳴気体模型を回転系の表式に拡張し、この模型を使って非閉じ込め転移への回転の影響を調べた。回転によって非閉じ込めがより低温に押し下げられることがわかり、また、現象論的指標としての慣性モーメントの解析も行った [14]。

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 [4]。

Chiral torsional effect with finite temperature, density and curvature

Succeeding to the well known chiral magnetic effect and chiral vortical effect, another noval chiral transport phenomenon driven by spacetime torsion, known as the chiral torsional effect (CTE), comes into the sight of high energy phenomenologists. Imaki and Qiu delved into the torsion-induced chiral currents with finite temperature, density, and curvature in the most general torsional gravity theory. The conclusion complemented the previous calculation of the CTE by incorporating the interplay between curvature and torsion. They further substantiated the relation between the CTE and the Nieh-Yan anomaly via quantifying the anomalous charge in terms of torsion. Also analyzed was the response of chiral torsional current to external electromagnetic fields. The result is a topological current analogous to that in the axion electrodynamics. It indicated torsion thereby can play the role of either the chiral chemical potential or the spatial separation of Weyl nodes [6].

Mode decomposed chiral magnetic effect and rotating fermions

福嶋、島崎らは、角運動量モード展開を用いて、磁場下または回転しているフェルミオンが示す非平衡現象を研究した。まずカイラリティ密度とカレントを直接結びつける簡潔な表式、角運動量モード展開されたカイラル磁気効果を見出した。そして磁場と回転が引き起こす粒子生成について直感的な描像を与えることにも成功した。 [8, 30]

't Hooft surface in lattice gauge theory

't Hooft surface は渦の世界面であり、低エネルギー有効理論に現れる位相的な自由度である。島崎と山本は、その期待値を直接数値計算するために、't Hooft surface を格子ゲージ理論で定式化した。実際に期待値を計算し渦の間のポテンシャルを導出し、その性質を議論した。 [10, 28, 35]

The interplay between confinement and θ-angle via CP-symmetry physics

The CP physics at $\theta = \pi$ significantly reveals the interference in confinement from the topological θ-angle. Analysis based on the 't Hooft anomaly matching prohibits the manifestation of CP symmetry in the confining phase. Calculation through a softly-broken super Yang-Mills theory shows CP restoration during the deconfinement phase transition for most gauge groups. However, for SU(2), a deconfining but CP-breaking phase is observed [7, 17, 19, 22, 39, 42].

＜受賞＞

[1] 藤本悠輝, ポスター賞, KEK 理論センター研究会「熱場の量子論とその応用 2020」, 2020 年 8 月 26 日.

[2] 島崎拓哉, ポスター賞, Exact Renormalization Group 2020, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 2020 年 11 月 6 日.

[3] 福嶋健二, 第 14 回湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞, 2021 年 1 月 20 日.

＜報文＞

(原著論文)

[4] S. Imaki, "Chiral magnetic effect in the hadronic phase", Phys. Rev. D **101**, 074024 (2020).

[5] Y. Fujimoto, K. Fukushima and W. Weise, "Continuity from neutron matter to two-flavor quark matter with $^1S_0$ and $^3P_2$ superfluidity", Phys. Rev. D **101**, 094009 (2020).

[6] S. Imaki and Z. Qiu, "Chiral torsional effect with finite temperature, density and curvature", Phys. Rev. D **102**, 016001 (2020).

[7] S. Chen, K. Fukushima, H. Nishimura and Y. Tanizaki, "Deconfinement and CP breaking at $\theta = \pi$ in Yang-Mills theories and a novel phase for SU(2)", Phys. Rev. D **102**, 034020 (2020).

[8] K. Fukushima, T. Shimazaki, and L. Wang, "Mode decomposed chiral magnetic effect and rotating fermions", Phys. Rev. D **102**, 014045 (2020).

[9] K. Fukushima, T. Kojo and W. Weise, "Hard-core deconfinement and soft-surface delocalization from nuclear to quark matter", Phys. Rev. D **102**, 096017 (2020).

[10] T. Shimazaki and A. Yamamoto, "' t Hooft surface in lattice gauge theory", Phys. Rev. D **102**, 034517 (2020).

[11] K. Fukushima, B. Mohanty and N. Xu, "Little-Bang and Femto-Nova in Nucleus-Nucleus Collisions", AAPPS Bull. **31**, 1 (2021).

[12] A. Yamamoto, "Real-time simulation of (2+1)-dimensional lattice gauge theory on qubits", PTEP **2021**, 013B06 (2021).

[13] Y. Fujimoto and M. Nitta,"Non-Abelian Alice strings in two-flavor dense QCD", Phys. Rev. D **103**, 054002 (2021).

[14] Y. Fujimoto, K. Fukushima, Y. Hidaka, "Deconfining Phase Boundary of Rapidly Rotating Hot and Dense Matter and Analysis of Moment of Inertia", Phys. Lett. B **816**, 136184 (2021).

[15] Y. Fujimoto, K. Fukushima, K. Murase, "Extensive studies of the neutron star equation of state from the deep learning inference with the observational data augmentation", JHEP **03**, 273 (2021).

(会議抄録)

[16] Y. Fujimoto, "Continuity from neutron matter to color-superconducting quark matter with $^3P_2$ superfluidity", Nucl. Phys. A **1005**, 121757 (2021).

(学位論文)

[17] S. Chen, "Studies on deconfinement and CP-breaking at $\theta = \pi$ in a softly broken supersymmetric Yang-Mills theory", 修士論文.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[18] T. Shimazaki, "Lefschetz thimble application to the Schwinger mechanism", Potential Toolkit to Attack Nonperturbative Aspects of QFT, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, Sep. 7-25, 2020.

[19] S. Chen, "Deconfinement and CP-breaking at $\theta = \pi$ in a softly-broken $\mathcal{N} = 1$ SYM", Potential Toolkit to Attack Nonperturbative Aspects of QFT, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, Sep. 7-25, 2020.

[20] T. Shimazaki, "'t Hooft anomaly in functional renormalization group", Exact Renormalization Group 2020, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, Nov. 2-6, 2020.

招待講演

[21] K. Fukushima, "Extreme matter in electromagnetic fields and under rotation", Spin and hydrodynamics in relativistic nuclear collisions, ETC*, Trento, Italy, Oct. 14, 2020.

[22] S. Chen, "Deconfinement and CP-breaking at $\theta = \pi$ in a softly-broken $\mathcal{N} = 1$ SYM", Probing the physics of high-density and low-temperature matter with ab initio calculations in 2-color QCD, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, Nov. 3-6, 2020.

[23] A. Yamamoto, "Rotation on lattices", XXXII International Workshop on High Energy Physics "Hot problems of Strong Interactions", Logunov Institute for High Energy Physics of National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow, Russia, Nov. 9-13, 2020.

[24] K. Fukushima, "Rotating Relativistic Matter and Angular Momenta", XXXII International Workshop on High Energy Physics "Hot problems of Strong Interactions", Logunov Institute for High Energy Physics of National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow, Russia, Nov. 12, 2020.

[25] K. Fukushima, "Magnetic Fields and Thermal QCD", Polarisation measurements in ee, ep, pp and heavy-ion collisions, Orsay, France, Dec. 17, 2020.

[26] K. Fukushima, "Particle Pair Production and Quantum Anomaly", The Schwinger Effect and Strong-Field Physics, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, Jan. 29, 2021.

(国内会議)

一般講演

[27] 藤本悠輝, "Continuity from neutron matter to two-flavor quark matter with $^3P_2$ superfluidity", KEK 理論センター研究会「熱場の量子論とその応用 2020」, 2020 年 8 月 24-26 日.

[28] 島崎拓哉, "'t Hooft surface in lattice gauge theory", KEK 理論センター研究会「熱場の量子論とその応用 2020」, 2020 年 8 月 24-26 日.

[29] 藤本悠輝, 新田宗土, 安井繁宏, "Non-Abelian Alice strings in 2-flavor dense QCD 1", 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月 14-17 日.

[30] 福嶋健二, 島崎拓哉, L. Wang, "Mode decomposed chiral magnetic effect and rotating fermions", 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月 14-17 日.

[31] 藤本悠輝, 福嶋健二, "Equation of state of cold and dense QCD matter in resummed perturbation theory", 日本物理学会 第 76 回年次大会, 2021 年 3 月 12-15 日.

[32] 福嶋健二, 島崎拓哉, 谷崎佑弥, "'t Hooft anomaly in functional renomralization group", 日本物理学会 第 76 回年次大会, 2021 年 3 月 12-15 日.

[33] 藤本悠輝, "Equation of state of cold dense QCD matter in resummed perturbation theory", KEK 素核宇・物性 連携研究会, 2021 年 3 月 29-31 日.

招待講演

[34] 福嶋健二, "Chiral and Vortical Matter in the Relativistic Heay-Ion Collision", 日本物理学会 2020 年秋季大会シンポジウム「JPS Nuclear Physics and Physical Review C」, 2020 年 9 月 16 日

[35] 山本新, "Loop and surface operators in lattice gauge theory", 原子核・ハドロン物理 2020, 高エネルギー加速器研究機構, 2020 年 10 月 2 日.

[36] 福嶋健二, "原子核衝突でみる回転とスピンとカイラリティ", 日本物理学会 第 76 回年次大会シンポジウム「カイラル物質科学の新展開 - カイラリティの本質に迫る」, 2021 年 3 月 12 日

(セミナー)

[37] 福嶋健二, "物理学における観測と機械学習 - 中性子星の事例 -", ディープラーニングと物理学, 2020 年 6 月 25 日.

[38] 藤本悠輝, "Dense matter in neutron stars–quark-hadron continuity & neural network approach–", University of Science and Technology of China, China, 2020 年 7 月 3 日.

[39] S. Chen, "Deconfinement and CP-breaking at $\theta = \pi$ in a softly-broken $\mathcal{N} = 1$ SYM", QCD theory Seminars, 2020 年 7 月 27 日.

[40] 藤本悠輝, "Machine learning approach to the neutron star equation of state", Tsinghua University, China, 2020 年 7 月 22 日.

[41] 島崎拓哉, "Lefschetz-thimble inspired analysis of the Dykhne–Davis–Pechukas method and an application for the Schwinger Mechanism", 理化学研究所, 2020 年 8 月 21 日.

[42] S. Chen, "Deconfinement and CP-breaking at $\theta = \pi$ in a softly-broken $\mathcal{N} = 1$ SYM", 東京大学駒場素粒子論研究室, 2020 年 11 月 5 日.

[43] 山本新, "Real-time simulation of Z2 lattice gauge theory on qubits", 高エネルギー加速器研究機構, 2020 年 11 月 10 日.

[44] 藤本悠輝, "Toward QCD- and observation-based neutron star equation of state", Stavanger University, Norway, 2021 年 2 月 23 日.

[45] 藤本悠輝, "Equation of state of cold dense QCD matter: pushing the limits of perturbation theory with resummation", 慶應義塾大学, 2021 年 3 月 4 日.

1.2 原子核理論 (Liang) 研究室

In our group, we study the properties of atomic nuclei and neutron stars based on various nuclear many-body theories. In particular, one of the main research themes is nuclear density functional theory (DFT), which aims at understanding both ground-state and excited-state properties of thousands of nuclei in a consistent and predictive way. Our research interests also include the microscopic foundation of nuclear DFT, the interdisciplinary applications in nuclear astrophysics, particle physics, condensed matter physics, etc., and the relevant studies in general quantum many-body problems.

Nucleon finite-size effects on nuclear properties

It is known that the nuclear interaction is much stronger than the Coulomb interaction, and thus the main contribution to the nuclear properties comes from the nuclear interaction. Nevertheless, the study of the Coulomb effects on the properties is also important, since the Coulomb interaction and the isospin symmetry breaking (ISB) terms of the nuclear interaction are entangled to each other in some particular nuclear properties. To study such properties or ISB terms of the nuclear interaction, the accurate treatment of the Coulomb interaction is indispensable, since the Coulomb interaction is known exactly, in contrast to the nuclear interaction in medium.

To achieve more accurate treatment of the Coulomb interaction, Naito, Liang, and collaborators considered the finite-size effects of the nucleons, vacuum polarization, and the electromagnetic spin-orbit interaction in the nuclear DFT [2, 4, 11]. It is found that the neutron charge density distribution contributes nuclear binding energy non-negligibly, as well as the proton charge density distribution. The vacuum polarization is also non-negligible.

Non-relativistic expansion of the Dirac equation

During past few decades, the density functional theory (DFT) in both the non-relativistic and relativistic frameworks has achieved great successes, however, the connection between these two frameworks remains unclear. The non-relativistic expansion is regarded to be the potential bridge. Guo and Liang worked out the analytic expression of the higher orders in the conventional similarity renormalization group (SRG) method and achieved the convergence of this method. As a step further, the reconstituted SRG method and the reconstituted Foldy-Wouthuysen transformation with a much faster convergence were proposed by using the resummation technique [1, 10]. These methods pave a promising way for the connection between the relativistic and non-relativistic DFTs.

Effects of tensor force on nuclear spin-isospin resonances

Naito, Liang, and collaborators extended the framework of the random-phase approximation (RPA) based on the relativistic Hartree-Fock (RHF) theory to achieve a self-consistent calculation with the ρ-meson tensor coupling [3]. The model self-consistency is verified by the check of the isobaric analog state, and it is found that the ρ-tensor and ρ-vector-tensor couplings play significant roles in maintaining the self-consistency. The properties of the Gamow-Teller resonances are also investigated, in which the roles played by the particle-hole residual interaction of various meson-nucleon couplings are clarified in details. It is found that the tensor forces play the role mainly via the RHF mean field rather than via the RPA residual interaction in determining the GTR, moreover, the tensor-force effects are not as strong as those indicated by the Skyrme Hartree-Fock calculations.

Relativistic DFT for superheavy elements

The ionization energy of the lawrencium atom was measured at JAEA tandem accelerator. The measured value does not follow the tendency of the other $5f$-block elements, which is common to the ionization energy of lutetium among the $4f$-block elements. In addition, compared with the vertically neighboring elements in the $4f$ and $5f$ blocks, the first ionization energy of lawrencium is smaller than that of lutetium, whereas those of the other $5f$-block elements are larger than those of the corresponding $4f$-block elements, respectively. By using the wave-function theory, it was found that the outermost electron of lawrencium is p-wave, while that of lutetium is d-wave, due to the relativistic effect.

To reproduce this in DFT, Naito, Akashi, Liang, and Tsuneyuki developed the new relativistic density functional theory [6]. In this scheme, the finite-light-speed correction for the Coulomb interaction is also considered, as well as the effect due to the Dirac equation. Using this method, it is found that the possible outer-most electron of lawrencium atom is the p orbital instead of the d orbital.

Sine-square deformation in two-dimensional Lorentzian conformal field theory

Liu and his collaborator have reexamined two-dimensional Lorentzian conformal field theory using the formalism previously developed in a study of sine-square deformation of Euclidean conformal field theory, which is a deformation of the Hamiltonian that leads to a continuum spectrum. They constructed three types of Virasoro algebra: one of them reproduces the result by Lüscher and Mack, while another type exhibits divergence in the central charge term, and the third leads to a continuous spectrum and contains no closed time-like curve in the system [5].

Lipkin model with quantum computation

There have been several applications of variational quantum eigensolver (VQE) of quantum computation in nuclear physics, however, it is nontrivial at all what kind of ansatz should be used for a given Hamiltonian. In general, ansatz on quantum circuits requires compactness, a small number of parameters, wide expressibility, and fast convergence due to quantum advantage. Therefore, in an ongoing study, Chikaoka benchmarked two ansatze using the Lipkin model, which is a famous model in nuclear physics and has the known exact solutions. He applied two types of ansatze, unitary coupled-cluster and structure learning ansatz, to the Lipkin model and succeeded in obtaining the ground-state energy for each interaction strength.

＜受賞＞

[1] Y. Guo, A3F-CNS Summer School Young Scientist Award, by Center for Nuclear Study, The University of Tokyo, August 21, 2020.

[2] T. Naito, A3F-CNS Summer School Young Scientist Award, by Center for Nuclear Study, The University of Tokyo, August 21, 2020.

＜報文＞

(原著論文)

[3] Z.H. Wang, T. Naito, H.Z. Liang, and W.H. Long, "Self-consistent random-phase approximation based on the relativistic Hartree-Fock theory: Role of -tensor coupling", Phys. Rev. C **101**, 064306 (2020).

[4] T. Naito, X. Roca-Maza, G. Colò, and H.Z. Liang, "Effects of finite nucleon size, vacuum polarization, and electromagnetic spin-orbit interaction on nuclear binding energies and radii in spherical nuclei", Phys. Rev. C **101**, 064311 (2020).

[5] X. Liu and T. Tada, "Analysis for Lorentzian conformal field theories through sine-square deformation", Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 061B01 (2020).

[6] T. Naito, R. Akashi, H.Z. Liang, and S. Tsuneyuki, "Relativistic density functional theory with finite-light-speed correction for the Coulomb interaction: A non-relativistic reduction based approach", J. Phys. B **53**, 215002 (2020).

(会議抄録)

[7] H.Z. Liang, "Nuclear density functional theory: From fundamentals to frontiers", 原子核研究 **64**(S1), 5 (2020). Proceedings of YONUPA summer school 2019 (Takashima, Shiga, Japan)

[8] T. Naito, D. Ohashi, and H.Z. Liang, "How to Improve Functionals in Density Functional Theory? —Formalism and Benchmark Calculation—", J. Phys. Conf. Ser. **1643**, 012149 (2020). Proceedings of International Nuclear Physics Conference 2019 (Glasgow, United Kingdom)

(学位論文)

[9] X. Liu, "Studies on 2-dimensional conformal field theory through sine-square deformation", 修士論文

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[10] Y. Guo, “Non-relativistic expansion: A potential bridge to connect the relativistic and non-relativistic density functional theories”, A3F-CNS Summer School 2020, The University of Tokyo (online), August 17–21, 2020.

[11] T. Naito, G. Colò, H. Liang, and X. Roca-Maza, “Effects of nucleon electric form factors to nuclear binding energy”, A3F-CNS Summer School 2020, The University of Tokyo (online), August 17–21, 2020.

[12] H.Z. Liang, “Towards systematic and consistent nuclear data inputs for astrophysical *r*-process with Bayesian approaches”, Workshop on Frontiers of Nuclear Structure and Nuclear Astrophysics, Peking University, China (online), October 14–16, 2020.

招待講演

[13] H.Z. Liang, “The colorful world of atomic nuclei—physics frontiers and large-scale scientific facilities”, 2020 International School Program of Zhengzhou University, Zhengzhou University, China (online), June 15, 2020.

[14] H.Z. Liang, “DFT and Functional Renormalization Group”, Lectures on Covariant Density Functional Theory in Nuclear Physics, online, July 20–29, 2020.

[15] H.Z. Liang, “Towards systematic and consistent nuclear data inputs for astrophysical *r*-process with Bayesian approaches”, Workshop on *r*-process 2020: from Stellar Alchemy to Galactic Archeology, Mitaka (online), October 26–29, 2020.

(国内会議)

一般講演

[16] 内藤智也, G. Colò, H.Z. Liang, and X. Roca-Maza：「核子の電荷形状因子の原子核束縛エネルギーに対する影響」, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (素核宇), オンライン, 2020 年 09 月 15 日.

招待講演

[17] 内藤智也：「核子形状因子と原子核構造」, ELPH 研究会 C028 “電子散乱による原子核研究 —原子核の電荷密度・陽子・中性子の分布と半径—”, 東北大学電子光理学研究センター（オンライン）, 2021 年 03 月 19 日.

(セミナー)

[18] H.Z. Liang, “Effects of tensor force in nuclear relativistic DFT”, Tohoku University (online), June 25 and July 15, 2020.

[19] 内藤智也：「How Much Nucleon Form Factors Affect Nuclear Binding Energy?」, 酒見グループセミナー, 東京大学 大学院理学系研究科 附属原子核科学研究センター （オンライン）, 2020 年 06 月 26 日.

[20] H.Z. Liang, “Towards *ab initio* nuclear DFT”, Institute of Modern Physics, CAS, China (online), September 17, 2020.

1.3 素粒子論研究室

1.3.1 現象論

暗黒物質の現象論

最近、XENON1T 実験が電子反跳事象の超過を報告した。中山と Tang（UCAS）はこの超過信号が Hidden Photon 暗黒物質と電子との反応として解釈できること、さらに重力的粒子生成の効果として Hidden Photon 暗黒物質の残存量を説明できることを示した [1]。

Marsh (ゲッティンゲン大) と殷は、1Hz 付近のアクシオン暗黒物質の現象論を調べた [2]。殷は、高橋（東北大)、山田（東北大）と共に、XENON1T excess を説明する暗黒物質模型を提案し、宇宙論的天文学的帰結を指摘し [3], その暗黒物質はインフラトンであることと無矛盾であることも彼らと共に指摘した [4]。殷は、QCD アクシオンのスケールと精度の問題を同時に説明する機構と模型を見つけた [5]。高橋（東北大）と殷は軽いアクシオンによる domain wall で宇宙背景放射の光が複屈折し、観測値を説明することを指摘した [6]。Azatov (SISSA) と Vanvlasselaer (SISSA) と殷は強い一次相転移で重い暗黒物質が生成できることを指摘した [7]。

ベクトル場のコヒーレント振動が暗黒物質として振る舞う場合があることが従来より指摘されてきた。中山は、これらの模型が全てゴースト不安定性という理論的問題、もしくは宇宙背景放射の非等方性に対する等曲率揺らぎと統計的非等方性の影響からくる観測的制限により全て排除されることを示した [8]。

強磁性体中では基底状態で電子スピンが一方向に揃っており、スピン揺らぎの集団励起モードはマグノンと呼ばれる。千草、諸井、中山はアクシオンや Hidden Photon などの軽い暗黒物質が存在すると磁性体中のマグノンを励起すること、それを利用して暗黒物質を検出できる可能性があることを示した [9]。

天体由来のアクシオン検出

濱口, 金澤, 永田は, S. Ge (TDLI, 上海交通大学), 市村（東北大, Kavli IPMU), 石徹白（東北大), 岸本（東北大, Kavli IPMU), J. Zheng (TDLI, 上海交通大学) と共に, 将来のアクシオン・ヘリオスコープ検出器を用いた超新星アクシオン検出の可能性を議論し, $\mathcal{O}(100)$ pc 以内の近傍超新星由来のアクシオンを検出しうることを明らかにした [10]。

阿部, 濱口, 永田は, アクシオン・原子の逆 Primakoff 散乱過程の理論計算を再検討した [11]。従来の計算では, 原子内の静電場として湯川型ポテンシャルが仮定されていたが, 相対論的ハートリー・フォック法に基づく原子内電子分布を用いて同過程を再計算した結果, $\mathcal{O}(1)$ keV のエネルギーを持つアクシオンについて従来よりも一桁以上小さい断面積が得られることが明らかになった。

ミニマルなフレーバー模型

素粒子標準模型に右巻きニュートリノを加えた模型は、$U(1)_{B-L}$ 対称性を導入することができ、ニュートリノ質量やレプトン数生成を説明する模型として古くから調べられている。通常、右巻きニュートリノの $B-L$ 電荷は $(-1,-1,-1)$ が仮定されるが、代替の可能性として $(-4,-4,5)$ がある。この代替模型ではニュートリノ質量を説明するために複雑なヒッグスセクターを導入する必要があると考えられていたが、浅井、中山、Tseng は最小限のヒッグスセクターでニュートリノ質量を説明する模型の構築に成功し、さらにこのミニマル模型において２つの右巻きニュートリノの質量が縮退するなどの特徴的な予言を明らかにした [12]。

最小 $U(1)_{\mu-\tau}$ ゲージ模型は，$U(1)_{\mu-\tau}$ ゲージ対称性によってレプトン・セクターに強い制限が課されるため，非常に高い予言能力を持つ。浅井，濱口，永田，Tseng は，この模型において，$U(1)_{\mu-\tau}$ ゲージ対称性を自発的に破るスカラー場がインフラトンとなっているシナリオを考察し，インフラトンが右巻きニュートリノへ非熱的崩壊する過程に伴い生成されるバリオン数を計算した [13]。その結果，ニュートリノ振動実験の観測値を説明するパラメーター領域において，バリオン数の観測値をも同時に説明することができることを明らかにした。

超対称標準模型の現象論

ミューオン異常磁気モーメントの標準模型予言値と実験値との間にずれがあることは長年にわたり問題となっている。永田は，E. Kpatcha (UAM; IFT), I. Lara (ワルシャワ大), D. E. López-Fogliani (Universidad de Buenos Aires), C. Muñoz (UAM; IFT) とともに，$\mu\nu$SSM においてこの量を計算し，現在までの LHC 実験の制限を逃れつつ上述のずれをこの模型で説明可能であることを明らかにした [14]。

超対称大統一模型の現象論

平尾､諸井は右巻きニュートリノを含む超対称 SU(5) 大統一模型において超対称粒子の質量項についての CMSSM 型境界条件の元レプトンセクターの CP やフレーバーの破れを研究した [15]。どの様な右巻きニュートリノ質量を仮定してもヒッグズ質量やニュートリノ振動実験の観測と矛盾しないパラメータ領域において電子の電気双極子モーメントと $\mu \to e\gamma$ 崩壊が将来的に実験で観測され得ることを示した。

永田は，J. Ellis (CERN, King's College London), M. A. G. Garcia (IFT), D. V. Nanopoulos (Texas A&M, HARC, Academy of Athens), K. A. Olive (ミネソタ大) とともに，flipped SU(5) 大統一理論において陽子崩壊の分岐比を種々の崩壊モードについて計算し，これらの予言が通常の SU(5) 大統一理論のものと大きく異なること，またニュートリノ質量階層性に依存して予言が変化すること，をそれぞれ示した [16]。

濱口，Hor, 永田は，R 対称性を伴う flipped SU(5) 大統一模型を構築し，この模型において二重項・三重項分離問題が自然に解決されることを示した [17]。加えて，この模型における陽子崩壊の寿命を種々の崩壊モードについて計算し，$p \to K^0\mu^+$ および $p \to \pi^0\mu^+$ の崩壊過程を探ることでこの模型を検証しうることを明らかにした。

永田は，J. Ellis (CERN, King's College London), J. Evans (TDLI), K. A. Olive (ミネソタ大), L. Velasco-Sevilla (Bergen 大, KIAS) と共に，no-scale 超重力理論に基づく最小 SU(5) 大統一模型における陽子崩壊率，電子の電気双極子モーメントの大きさ，および $\mu \to e\gamma$ 崩壊分岐比を計算し，これらの物理量に関する将来実験が模型の検証において担う役割について議論した [18]。

インフレーション模型

永田は，J. Ellis (CERN, King's College London), M. A. G. Garcia (IFT), D. V. Nanopoulos (Texas A&M, HARC, Academy of Athens), K. A. Olive (ミネソタ大), S. Verner とともに，no-scale 超重力理論に基づくインフレーション模型について現時点までの研究成果をレビューとしてまとめた [19]。

インフレーション起源の高周波背景重力波

初期宇宙のインフレーション期に量子的に長波長の重力波が生成され、現在の宇宙に背景重力波として存在することが知られている。中山は、江間、神野（DESY）とともに、インフレーション後の再加熱期においても重力子が生成され、それが高周波の背景重力波成分に寄与することを示した [20]。

再加熱期の物理

淺賀（新潟大)、石田（KEK）と殷は再加熱時のクォークが熱化するまでのクォーク振動でバリオン数ができることを指摘した [21]。Jaeckel (ハイデルベルグ大) と殷は再加熱が地上実験で探索できる可能性を指摘した [22]。諸井と殷は再加熱期の軽い暗黒物質が生成できることを指摘し [23]、また、暗黒物質生成率の精密計算方法を見つけ、従来の方法に誤りがあることを見つけた [24]。

Migdal 効果

中野は中村、身内（神戸大)、風間（名古屋大)、庄司（Hebrew 大)、伊部（東大 ICRR）と共に、原子核反跳による Migdal 効果の初観測に向けて、中性子ビームの気体ターゲットによる散乱実験のシミュ

レーションを行い、予測されるシグナルの評価を行った [25]。原子核反跳による Migdal 効果は軽い暗黒物質の直接探査実験において有効であると期待されている。

Oscillon

中野は川崎、中塚、園元（東大 ICRR）と共に、Axion-like particle によって形成される non-topological soliton である oscillon について、形成時の質量分布やパワースペクトラムの評価を行った [26]。ここで用いたタイプの oscillon は暗黒物質の残存量を説明することが可能である。

また上述の結果を用いて、中野は川崎、中塚、園元（東大 ICRR）と共にこの oscillon が 21cm 線に観測可能な影響を与え得ることを明らかにした [27]。

ILC における beam dump 実験

上田は坂木 (KEK) と共に、国際リニアコライダーの main beam dump で生成される光子やミューオンを利用した軽い粒子を探索する実験を提案した。アクシオンや軽いスカラー粒子を例に、提案した実験の感度の評価を行い、どちらの模型に対しても他の beam dump を利用した実験の感度を一桁程度超えうることを明らかにした [28]。

$b \to s\ell\ell$ 遷移

$b \to s\ell\ell$ 遷移では、測定値と標準理論における予言値にズレを伴う観測量が複数報告されている。上田は遠藤 (KEK) 三島 (KEK) と共に、標準理論有効場の理論の一般の演算子に対して、$b \to s\ell\ell$ 遷移に寄与する電弱スケールの粒子の量子補正を on-shell 条件を課して R_ξ ゲージで初めて計算した。その結果、標準理論有効場の理論に基づいて $b \to s\ell\ell$ 遷移の観測量を one-loop level で計算する手法を確立した [29]。

1.3.2 弦理論，場の理論全般

界面演算子入り共形場理論のエンタングルメントエントロピー

西岡は後藤（理研）、奥田、永野（東大駒場）とともに 4 次元 $\mathcal{N} = 2$ 超共形場理論におけるヤヌス型の界面演算子が与えるエンタングルメントエントロピーへの寄与を調べた [30]。この場合のエンタングルメントエントロピーは 4 次元 $\mathcal{N} = 2$ 超共形場理論の結合定数を座標とする多様体上の距離と同じであるという予想が以前から後藤と奥田によりなされていた。この研究では物理的に妥当な仮定の下でこの予想の正しさを裏付けた。

共形場理論の演算子積展開と光錐演算子

奥山、小林、西岡は Minkowski 時空上の共形場理論において、二つの演算子が Regge 極限と呼ばれる光錐上に近づきながら十分離れる極限における演算子積展開を調べた [31]。演算子展開は通常二つの演算子が近い場合に良い展開を与えるが、この研究では OPE block と呼ばれる非摂動的な情報を含んだ表式を用いることで Regge 極限で演算子展開から光錐演算子と呼ばれる Euclid 時空上の共形場理論には現れない非局所演算子が得られることを示した。

ブラックホールのホーキング輻射とエンタングルメント比熱

奥山、川畑、西岡、渡邊はホーキング輻射するブラックホールをモデル化した模型においてエンタングルメント比熱と呼ばれる量子情報量を調べた [32]。ホーキング輻射するブラックホールのエンタングルメントエントロピーはブラックホールの時間発展がユニタリであれば Page 曲線と呼ばれる形になることが知られている。この曲線は近年の研究でレプリカワームホールと呼ばれる重力解を考慮することで再現できることが分かってきた。この研究では最も寄与の大きな重力解が通常のブラックホール解からレプリカワームホール解へと変化する際にエンタングルメント比熱が鋭いピークを持つことを示し、エンタングルメント比熱が重力解の相転移の良い指標となりうることを提唱した。

境界を持つ時空上の $O(N)$ ベクトル模型

小林は Herzog (King's College London) とともに境界を持つ 3 次元時空上の $O(N)$ ベクトル模型のラージ N 極限の研究を行った [33]。この理論はスカラー場の境界条件に依存して複数の相を持つことを示し、これらの相の安定性を議論した。また境界上に現れる共形アノマリーを決定し、それらの共形対称性を保つマージナル変形への依存性を調べた。

1.3.3 行列模型

商空間 G/H を生成する無限次元代数の構築

行列模型はストリング理論の定式化の一つで行列により時空を表現する。これまでの研究では表現できる空間は平坦な時空に限定されていた。原田・松尾・渡辺は台湾大学の Pei-Ming Ho とともに任意の商空間 G/H を記述する代数を提案し、行列模型から出発して商空間上のゲージ理論の作用を導いた。[34].

1.3.4 数理物理学

corner 頂点代数の q-変形と三浦変換

原田・野下・松尾・渡辺は最近 Gaiotto と Rapcak により提案された corner 頂点代数の量子変形を定義した。さらに、量子群の交換関係に相当する双二次形式を計算し、量子トロイダル代数との関係を明らかにした [35]。

副正則 W 代数の量子変形と AGT 対応

原田は, Feigin と Semikhatov によって与えられた A 型副正則 W 代数の自由場表示の量子変形及び AGT 対応との関連に関する研究を行なった [36]。

＜受賞＞

[1] 阿部智広、第 15 回中村誠太郎賞、素粒子奨学会、2020 年 10 月 5 日。

[2] 奥山義隆, 理学系研究科奨励賞（修士課程）, 東京大学理学系研究科 2021 年 3 月 21 日。

[3] 殷　文、泉萩会奨励賞、泉萩会、2020 年 10 月。

＜報文＞

(原著論文)

[4] K. Nakayama and Y. Tang, Phys. Lett. B **811**, 135977 (2020) [arXiv:2006.13159 [hep-ph]].

[5] D. J. E. Marsh and W. Yin, JHEP **01**, 169 (2021) [arXiv:1912.08188 [hep-ph]].

[6] F. Takahashi, M. Yamada and W. Yin, Phys. Rev. Lett. **125**, no.16, 161801 (2020) [arXiv:2006.10035 [hep-ph]].

[7] F. Takahashi, M. Yamada and W. Yin, JHEP **01** (2021), 152 [arXiv:2007.10311 [hep-ph]].

[8] W. Yin, JHEP **10**, 032 (2020) [arXiv:2007.13320 [hep-ph]].

[9] F. Takahashi and W. Yin, [arXiv:2012.11576 [hep-ph]]. To appear in JCAP.

[10] A. Azatov, M. Vanvlasselaer and W. Yin, [arXiv:2101.05721 [hep-ph]]. To appear in JCAP

[11] K. Nakayama, JCAP **08**, 033 (2020) [arXiv:2004.10036 [hep-ph]].

[12] S. Chigusa, T. Moroi and K. Nakayama, Phys. Rev. D **101**, no.9, 096013 (2020) [arXiv:2001.10666 [hep-ph]].

[13] S. F. Ge, K. Hamaguchi, K. Ichimura, K. Ishidoshiro, Y. Kanazawa, Y. Kishimoto, N. Nagata and J. Zheng, JCAP **11**, 059 (2020) [arXiv:2008.03924 [hep-ph]].

[14] T. Abe, K. Hamaguchi, N. Nagata, Phys. Lett. **B815**, 136174 (2021).

[15] K. Asai, K. Nakayama and S. Y. Tseng, Phys. Lett. B **814**, 136106 (2021) [arXiv:2011.10365 [hep-ph]].

[16] K. Asai, K. Hamaguchi, N. Nagata and S. Y. Tseng, JCAP **11**, 013 (2020) [arXiv:2005.01039 [hep-ph]].

[17] E. Kpatcha, I. Lara, D. E. López-Fogliani, C. Muñoz and N. Nagata, Eur. Phys. J. C **81**, no.2, 154 (2021) [arXiv:1912.04163 [hep-ph]].

[18] K. Hirao and T. Moroi, [arXiv:2102.04070 [hep-ph]]. PRD 発表予定.

[19] J. Ellis, M. A. G. Garcia, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, JHEP **05**, 021 (2020) [arXiv:2003.03285 [hep-ph]].

[20] K. Hamaguchi, S. Hor and N. Nagata, JHEP **11**, 140 (2020) [arXiv:2008.08940 [hep-ph]].

[21] J. Ellis, J. L. Evans, N. Nagata, K. A. Olive and L. Velasco-Sevilla, Eur. Phys. J. C **81**, no.2, 120 (2021) [arXiv:2011.03554 [hep-ph]].

[22] J. Ellis, M. A. G. Garcia, N. Nagata, N. D. V., K. A. Olive and S. Verner, Int. J. Mod. Phys. D **29**, no.16, 2030011 (2020) [arXiv:2009.01709 [hep-ph]].

[23] Y. Ema, R. Jinno and K. Nakayama, JCAP **09**, 015 (2020) [arXiv:2006.09972 [astro-ph.CO]].

[24] T. Asaka, H. Ishida and W. Yin, JHEP **07**, 174 (2020) [arXiv:1912.08797 [hep-ph]].

[25] J. Jaeckel and W. Yin, JCAP **02**, 044 (2021) [arXiv:2007.15006 [hep-ph]].

[26] T. Moroi and W. Yin, [arXiv:2011.09475 [hep-ph]]. To appear in JHEP

[27] T. Moroi and W. Yin, [arXiv:2011.12285 [hep-ph]]. To appear in JHEP

[28] K. Nakamura, K. Miuchi, S. Kazama, Y. Shoji, M. Ibe and W. Nakano, PTEP 2021 (2021) 1, 013C01 [arXiv:2009.05939 [physics.ins-det]].

[29] M. Kawasaki, W. Nakano, H. Nakatsuka and E. Sonomoto, JCAP 01 (2021) 061 [arXiv:2010.09311 [astro-ph.CO]].

[30] M. Kawasaki, W. Nakano, H. Nakatsuka and E. Sonomoto, [arXiv:2010.13504 [astro-ph.CO]]. JCAP accepted.

[31] Y. Sakaki and D. Ueda, Phys. Rev. D **103** (2021) no.3, 035024 [arXiv:2009.13790 [hep-ph]].

[32] M. Endo, S. Mishima and D. Ueda, [arXiv:2012.06197 [hep-ph]].

[33] K. Goto, L. Nagano, T. Nishioka and T. Okuda, "Janus interface entropy and Calabi's diastasis in four-dimensional $\mathcal{N} = 2$ superconformal field theories," JHEP **08**, no.08, 048 (2020) [arXiv:2005.10833 [hep-th]].

[34] N. Kobayashi, T. Nishioka and Y. Okuyama, "Regge OPE blocks and light-ray operators," JHEP **11**, 040 (2020) [arXiv:2005.06343 [hep-th]].

[35] K. Kawabata, T. Nishioka, Y. Okuyama and K. Watanabe, "Probing Hawking radiation through capacity of entanglement," [arXiv:2102.02425 [hep-th]]. Submitted to JHEP.

[36] C. P. Herzog and N. Kobayashi, "The $O(N)$ model with ϕ^6 potential in $R^2 \times R^+$," JHEP **09**, 126 (2020) [arXiv:2005.07863 [hep-th]].

[37] K. Harada, P. M. Ho, Y. Matsuo and A. Watanabe, "Dimensional oxidization on coset space," JHEP **10** (2020), 198 [arXiv:2005.13936 [hep-th]].

[38] K. Harada, Y. Matsuo, G. Noshita and A. Watanabe, "q-Deformation of Corner Vertex Operator Algebras by Miura Transformation," [arXiv:2101.03953 [hep-th]], accepted for publication, JHEP.

[39] K.Harada, "Quantum deformation of Feigin-Semikhatov's W-algebras and 5d AGT correspondence with a simple surface operator", arXiv:2005.14174.

(会議抄録)

(国内雑誌)

(学位論文)

[40] 博士論文: 吾郷太一, " Study of the sign problem based on the generalized Lefschetz thimble method using gradient flows without blow-up (ブローアップのないグラディエントフローを用いた一般化レフシェッツシンブル法による符号問題の研究)."

[41] 博士論文：N. Kobayashi, "Some Aspects of Boundary and Defect Conformal Field Theories."

[42] 博士論文：K. Harada, "Combinatorial Realization of Minimal Models for Gaiotto-Rapcak's W-algebras"

[43] 修士論文：Y. Okuyama, "Studies of Conformal Field Theory in Lorentzian signature."

(著書)

[44] 中山和則（一部執筆)、『相対論と宇宙の事典』、朝倉書店

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[45] T. Abe "Early kinetic decoupling and Higgs invisible decay in simple dark matter models", HPNP2021, Osaka, Japan, March 27, 2021

[46] S. Hor, "R-symmetric flipped SU(5)", Beyond Standard Model: From Theory to Experiment-2021, online, April 1, 2021.

[47] N. Nagata, "Axion Supernova-scope", KEK-PH + KEK-Cosmo Joint Lectures and Workshop on "Dark Matter", online, Oct 13, 2020.

[48] D. Ueda, "Revisiting electroweak radiative corrections to $b \to s\ell\ell$ in SMEFT", The annual Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2021), KEK, 2021 年 3 月 24 日.

[49] A. Watanabe, "Dimensional oxidization on coset space",Strings and Fields 2020, workshop "Strings and Fields 2020", YITP, Kyoto University, online, November 16-20, 2020.

招待講演

[50] 松尾 泰 "Nambu-bracket and M-theory", October 1, 2020, workshop "Space-time topology behind formation of micro-macro magneto-vortical structure manifested by Nambu mechanics", Osaka City University.

[51] 松尾 泰" "q-Deformation of Corner Vertex Operator Algebras by Miura Transformation", 2021/03/24 workshop RIRT in QFT, 2021.

[52] T. Moroi, "Bounce from Gradient Flow," ICNAAM 2020 (17 – 23, September, 2020), vertual conference.

[53] K. Nakayama, "Production of Hidden Photon Dark matter: Recent Developments", Dark Matter as a Probe to New Physics, APCTP, Korea (2021/2/2).

(国内会議)

一般講演

[54] 原田浩一, "Quantum deformation of Feigin-Semikhatov's W-algebras and 5d AGT correspondence with a simple surface operator", 日本物理学会 第 76 回年次大会, 2021 年 3 月 15 日.

[55] 平尾魁梧, "右巻きニュートリノを含む SU(5) 大統一理論における CP とフレーバーの破れ", 日本物理学会春季大会, 東京大学, 2021 年 3 月 12 日.

[56] 川畑洸貴, "キャパシティで探るアイランド," 日本物理学会第 76 回年次大会, オンライン開催, 2021 年 3 月 13 日.

[57] 小林望, "The O(N) model with ϕ^6 in $R^2 \times R^+$," 日本物理学会 2020 年秋季大会, 筑波大学 (オンライン), 2020 年 9 月 15 日.

[58] N. Nagata, "Axion Supernovascope", 7th Supernova Neutrino Workshop, online, Jan 7, 2021.

[59] N. Nagata, "Notes on Inverse Primakoff Scattering of Axions", Migdal observation investigative workshop 2020, Kobe University, Hyogo, Japan, Dec 9, 2020.

[60] 中野湧天, "dark photon mediator 模型での Migdal 効果と electron scattering の比較", ミグダル観測検討会２０２０, 神戸大学, 2020/12/9.

[61] 中山和則、"Constraint on vector coherent oscillation dark matter", 日本物理学会 第 76 回年次大会 (2021/3/13).

[62] 中山和則、"マグノンを用いた軽い暗黒物質検出", 日本物理学会 2020 年秋季大会 (2020/9/15).

[63] 仁木敦也, "次世代 100TeV 陽子陽子衝突型加速器を用いたグルイーノ崩壊分岐比の推定", 日本物理学会第 76 回年次大会, オンライン開催, 2021 年 3 月 15 日

[64] 野下　剛, “q 変形 Y 代数の DIM による構成,” 日本物理学会第 76 回年次大会, オンライン, 2021 年 3 月.

[65] 奥山義隆, “Regge OPE blocks and light-ray operators,” 日本物理学会 2020 年秋季大会, 筑波大学（オンライン）, 2020 年 9 月 15 日.

[66] 奥山義隆, “ローレンツ型の計量を持つ共形場理論の研究,” 日本物理学会第 76 回年次大会, オンライン開催, 2021 年 3 月 15 日.

[67] S.Y. Tseng, ”Alternative Minimal U(1)$_{B-L}$”, 日本物理学会 第 76 回年次大会, 2021/03/13

[68] D. Ueda, “熱力学エントロピーによる有効場の理論への制限”, 熱場の量子論とその応用, KEK, 2020 年 8 月 26 日.

[69] 渡辺彬生, “量子 Miura 変換を用いたコーナー頂点代数の q 変形”, 日本物理学会第 76 回年次大会, online, 2021 年 3 月.

招待講演

[70] 濱口幸一「チュートリアル：アクシオンとその周辺」新学術「地下宇宙」E01-E02 合同勉強会, 2020.5.27.

[71] 濱口幸一「標準模型を超える物理と中性子星」素粒子若手オンライン研究会, 2020.8.28.

[72] 濱口幸一「チュートリアル：レプトジェネシス（とニュートリノレス二重ベータ崩壊)」オンライン研究会「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊とその周辺」2021.2.12.

[73] 永田夏海, “SK/HK での BSM 理論レビュー”, CRC 将来計画タウンミーティング, オンライン, 2020 年 9 月 29 日.

[74] 永田夏海, “中性子星の温度観測を用いた暗黒物質探索”, 日本物理学会 2020 年秋季大会, オンライン, 2020 年 9 月 15 日.

[75] 中山和則、“軽い暗黒物質検出のための固体物理入門”, 素粒子物理学の進展 2020、京都大学 (2020/9/3).

(セミナー)

[76] T. Abe, “素粒子物理の現状と展望”, 岡山大学, November 26, 2020

[77] T. Abe, “Early kinetic decoupling and Higgs invisible decay in simple dark matter models”, 東京大学, October 5, 2020

[78] 濱口幸一（一般講演）「宇宙誕生最初の 1 秒の謎と、素粒子の標準模型を超える物理」第 214 回 STF セミナー、2020.9.22.

[79] K. Harada, ”Quantum deformation of Feigin-Semikhatov’s W-algebras from quantum toroidal gl(1)”, 京都大学 (2020/7/16).

[80] S. Hor, “R-symmetric flipped SU(5)”, National Tsing Hua University, Taiwan, Jan. 25, 2021.

[81] S. Hor, “R-symmetric flipped SU(5)”, National Taiwan Normal University, Taiwan, Feb. 1, 2021.

[82] S. Hor, “R-symmetric flipped SU(5)”, National Taiwan University, Taiwan, Feb. 22, 2021.

[83] 松尾　泰 “Dimensional oxidization on coset space”, 高エネルギー研究所, 2020 年 12 月 22 日

[84] 松尾　泰” “q-Deformation of Corner Vertex Operator Algebras by Miura Transformation”, Fudan University (2021/02/03)

[85] N. Nagata, “On the WIMP dark matter signature in old neutron stars,” TDLI & INPAC Joint Seminar, online, Nov 3, 2020.

[86] 西岡辰磨, “Entanglement, free energy and C-theorem in DCFT,” 東北大学, 2020 年 10 月 22 日.

[87] 西岡辰磨, “欠損演算子入り共形場理論とくりこみ群,” 東京工業大学, 2020 年 11 月 27 日.

[88] S.Y. Tseng, ”Minimal gauged U(1)$_{L_\mu - L_\tau}$ model, leptogenesis and the sign of cosmological baryon asymmetry”, NTNU, Taiwan, 2020/09/15

[89] S.Y. Tseng, ”Alternative Minimal U(1)$_{B-L}$”, KEK, 2021/02/16

[90] 殷 文 “QCD axion dark matter and Low-scale inflation” 東京大学, 2020 年 5 月 11 日

[91] 殷 文 “XENON1T anomaly from anomaly-free ALP dark matter and its implications for stellar cooling anomaly” Newton 1665, 2020 年 6 月 29 日

[92] 殷 文 “The XENON1T excess and ALP DM” Florida State University 2020 年 7 月 1 日

[93] 殷 文 “What if ALP DM for the XENON1T excess is the inflaton” Virtual axion institute, 2020 年 8 月 5 日

[94] 殷 文 “Consistency of Boltzmann equation and light DM from inflaton decay” KAIST 2020 年 12 月 10 日

[95] 殷 文 “Light DM from inflaton decays” SISSA-ICTP 2020 年 12 月 9 日

[96] 殷 文 “Messengers of reheating phase and their spectra” KEK 2021 年 2 月 17 日

2 原子核・素粒子実験

2.1 原子核実験グループ (櫻井研究室)

原子核実験グループ（櫻井研究室）は、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。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) の分光研究などを行なっている。大阪大学の核物理研究センター (RCNP) ではミューオン (μ) 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) と放射線医学研究所 HIMAC 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。また、実験で使用する検出器や加速器の開発も並行して行っている。

2.1.1 パラジウム同位体のミューオン捕獲反応の研究

負電荷を持つミューオンは電子捕獲の類似反応により原子核に吸収される。これをミューオン捕獲反応と呼ぶ。ミューオン捕獲反応により、原子核は数から数十 MeV 程度の励起状態に遷移し、中性子や荷電粒子、ガンマ線などを放出して基底準位まで崩壊する。ミューオン捕獲反応とその後の崩壊過程は実験的測定・理論的取り扱いが共に難しく、現在に至るまで統一的な描像は得られていない。

我々は、ミューオン捕獲反応に伴う放出中性子のエネルギーおよびその放出多重度に着目した実験を行った。中性子のエネルギーは励起状態の微視的構造を、放出多重度は励起エネルギーをそれぞれ反映するため、これらの物理量の測定によりミューオン捕獲反応後の原子核の励起準位構造や反応メカニズムを間接的に観測することができる。実験は 2017 年度までに核物理研究センター (RCNP) の MuSIC-M1 ビームラインで行った。標的核として同位体濃縮したパラジウム (^{104,105,106,108,110}Pd) を用いた。これまでに実験で得られたデータの解析を行い、中性子のエネルギー分布および放出多重度を導出した。現在は同時測定したガンマ線と中性子の相関についての解析を進めている。

2.1.2 ミューオン原子 X 線による原子核の荷電半径・荷電分布測定

原子核の大きさ、すなわち半径は原子核の最も基礎的な物理量である。原子核は陽子および中性子の２種類の核子から構成されるため、陽子分布に対応する荷電半径と陽子・中性子両方の分布に対応する物質半径の 2 種類の半径が定義できる。荷電半径と物質半径の違いは中性子ハローやスキンとして知られ、2 種類の半径の独立した測定が必要である。また近年では半径にとどまらず密度分布が強い相互作用の影響を受けていることが指摘され、荷電密度分布や物質密度分布が活発な実験的測定および理論的研究の対象となっている。

荷電半径の測定には、電子散乱やレーザー分光による電子の同位体シフトの測定と並んで、ミューオン原子 X 線の測定が用いられている。我々は荷電半径の決定において従来使われていたミューオン原子の K 線に加えて高次 X 線を併用することで、従来手法に比べてモデル依存性の少ない荷電半径の決定手法を開発した。また、ミューオン原子 X 線による荷電半径測定を荷電密度分布の測定に拡張する手法を提案し、現在実験データを用いた精度の評価を行っている。

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 1 A 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、ϕ600 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、多重極電磁場と空間電荷効果の影響を考慮した多粒子解析に基づいてハロー生成のメカニズムの解明に取り組んでいる。解析の一例として、ビームの初期分布をガウシアンとした場合と空間的に一様な KV 分布とした場合の結果を図 2.1.1 に示す。ガウ

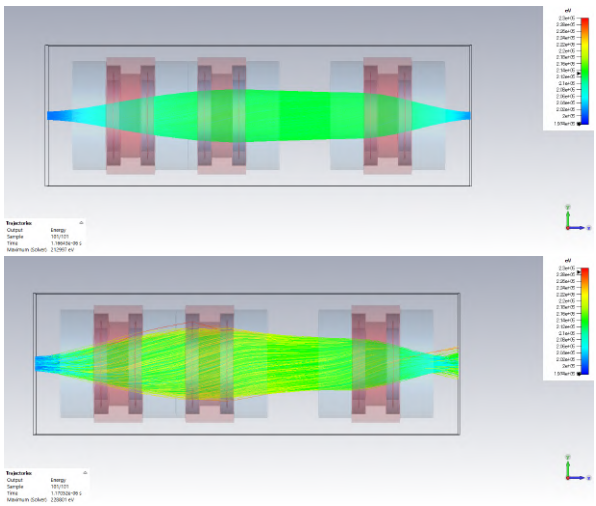


図 2.1.1: 多粒子解析の結果。上図は初期分布として KV 分布を与えた場合，下図は初期分布としてガウシアンビームを与えた場合である。ビームはいずれも左から右へ輸送される。輸送中の個々のイオンの運動エネルギーをカラースケールで示している。明らかにガウシアンビームのほうが，輸送中のビーム広がりやエネルギー広がりが大きいことがわかる。

シアンビームでは KV 分布では観測されないエミッタンス増大やハロー生成が観測されている。

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

我々はこれまで、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はより詳細な核構造を理解するために重要であるが、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 年度からゲルマニウム検出器を用いた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。

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、

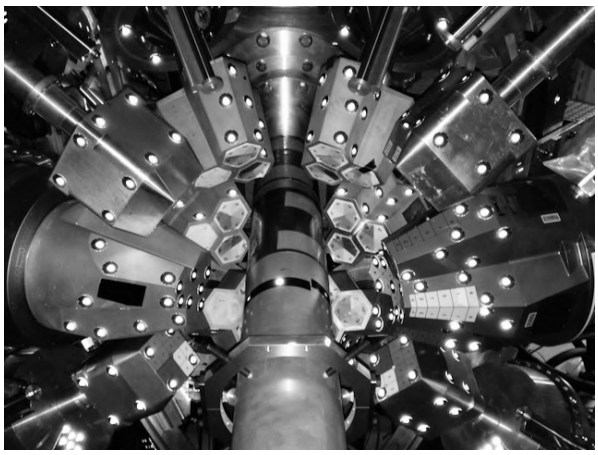


図 2.1.2: HiCARI ガンマ線検出器アレイ。

図 2.1.3: HiCARI 建設チームの集合写真。コロナ禍で海外の共同研究者が参加できない中、櫻井研からは Wimmer、小岩井が参加し建設チームでは中心的な役割を果たした。

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 や中国 IMP 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速のおよそ 50%程度の速度で飛行する原子核から放出されるため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。我々のグループは、検出器アレイ建設チームの中心メンバーとして、検

出器の設置、データ収集システムの開発、データ解析ソフト開発などを担当した。

HiCARI プロジェクトでは、2020 年度に 7 つの実験課題を実施した。我々のグループは、特に中性子過剰なチタン同位体の核分光実験を提案した。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、その新しい魔法数は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。そこで、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、この領域の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、2020 年 12 月におよそ 4 日間かけてデータを取得した。オンライン解析の段階で、先行研究にて知られている遷移の他にも未知の遷移によるものと思われるガンマ線エネルギーピークが観測されており、今後この質量領域における殻構造進化の機構についての解明が期待される。

2.1.5 パイオン生成過程の研究

加速器を用いてパイオン (π) を生成するためには、一般的に核子衝突反応を用いる。例えば、陽子-陽子衝突によって中性パイオン (π^0) を生成する過程は、

$$p + p \rightarrow p + p + \pi^0 \qquad (1.5.1)$$

と表され、静止した陽子標的に陽子ビームを照射する場合は、その生成に必要な最低ビームエネルギー (閾値エネルギー) は 280 MeV 程度である。一方で、複数の核子から構成される原子核 (重イオン) 同士の核反応では、核子あたりのビームエネルギーが閾値よりも低い場合でもパイオンが生成される。この準閾値パイオン生成 (sub-threshold pion production) は、核内での核子のフェルミ運動が作用する過程、複数の核子が集団的にパイオン生成する過程、原子核が複合核を形成し脱励起する際にパイオン生成する過程などによって起こると考えられる。特にこの内、複数の核子が集団的にパイオン生成する過程を利用して原子核内のクラスター構造などを観測できる可能性がある。そこで、^{48}Ca のコアに 4 つの中性子が付いた構造を持っていると考えられる ^{52}Ca による閾値エネルギー近傍での π^0 生成実験を行った。

実験は RIBF で行った。二次ビーム生成分離装置 BigRIPS で ^{52}Ca を生成し、炭素標的に照射した。反応に関与しなかった出射原子核を大立体角スペクトロメーター SAMURAI で粒子識別することで、反応に関与した核子を同定する。反応によって生成した中性パイオンは、直後に二つのガンマ線に崩壊する ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$)。二つのガンマ線は π^0 静止系で反対方向に、それぞれおよそ 70 MeV のエネルギーで放出される。この二つのガンマ線を大型の CsI シンチレーターで構成されるガンマ線検出器アレイ CATANA で測定することで、π^0 の生成を同定した。

反応に寄与した中性子数とパイオン生成の関係を見るため、反応に寄与した中性子数ごとに π^0 の生成量を求め、相対生成断面積を導出した (図 2.1.4)。相対生成断面積は反応に関与する中性子数が 3 つまでの場合は中性子数と比例関係にあるが、4 つ以上の場合では中性子数との比例関係を超えて相対生成断面積が増加することがわかった。この観測結果が ^{52}Ca の構造に由来するのかどうかを結論づけるためには、今後、理論的な考察が必要となる。

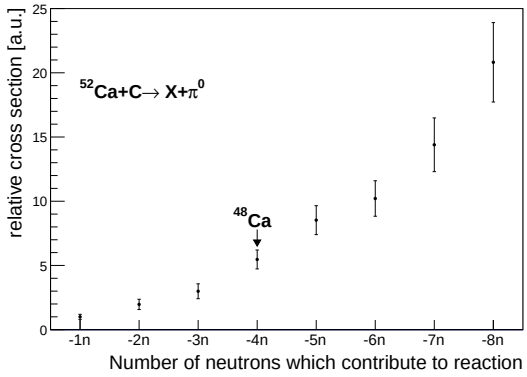


図 2.1.4: 反応に寄与した中性子数ごとの相対生成断面積。

2.1.6 ミューオン X 線を使った元素分析装置 μLeXSea 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、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、特に軽元素ではミューオン 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%程度が検出限界となっていた。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 μLeXSea (Low-energy muonic X-ray spectrometer for element analysis) の開発を行っている。μLeXSea 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。2020 年度には μLeXSea の製作を行い、照準線

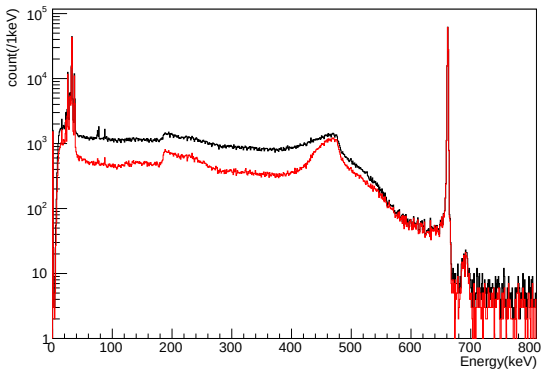


図 2.1.5: ^{137}Cs 線源を用いた LeXSea の性能評価テスト。上実線：Ge 検出器のみのスペクトル、下実線：BGO による削減を行ったスペクトル。662 keV のピーク数は変わらずにコンプトン成分のみ削減できていることがわかる。

源を用いたオフラインの性能評価を行った。BGO シンチレーターによるコンプトン抑制の結果、特に低エネルギー領域において約 6 割のコンプトン散乱由来のバックグラウンドを削減することができることが確認できた (図 2.1.5)。また設計の最適化を行うためにモンテカルロシミュレーションを用いたスペクトルの再現を行った。今後シミュレーションを用いた設計を進め、2021 年には全部で 4,5 台の検出器アレイを完成させる計画である。

2.1.7 重イオン衝突による高密度中性子物質の状態方程式の研究

強い相互作用が働く多体系 (核物質) でも状態方程式を考えることができる。特に高密度な中性子核物質の状態方程式は、中性子星の内部構造の理解や超新星爆発の理論的な再現にも重要であるが、理論的に大きな不定性を持つため実験的な制限が必要である。

我々は、重イオン衝突で生じる陽子と中性子の集団放出現象 (collective directed flow) の差異が核物質の状態方程式に感度を持つと期待されることに注目し、放射線医学総合研究所の重イオン加速器 HIMAC にて ^{132}Xe (400 MeV/u)+CsI による重イオン衝突実験 (H355) を行った。この実験ではターゲット周辺に、波形弁別法によって中性子を同定することもできるプラスチックシンチレータ (EJ299-33) を使用した検出器アレイ (NiGIRI) を導入し、薄いプラスチックの veto 検出器と組み合わせることで陽子と中性子を同時に検出した。下流側には軸対称なアクセプタンスを持つ検出器アレイ (Kyoto array) を配置し、粒子放出の非対称性から重イオン衝突の反応平面を決定した。解析の結果、標的ラピディティ付近において陽子と中性子の集団的放出現象を初めて確認した。将来的に、この集団的放出現象の系統的測定から高密度の中性子物質の状態方程式に実験的な制限をつけられると期待される。

一方で、反応平面決定のために使用された Kyoto array の MPPC の読み出しの過程において特定のチャンネル間にクロストークが確認されたことにより、反応平面の分解能を決定することができず、集団的放出現象の強度の絶対値を求めるにはいたらなかった。現在、光電子増倍管を用いてクロストークを抑制した新たな検出器アレイを制作中であり、陽子と中性子の集団的放出現象強度の絶対値を求める新規実験を計画中している。

＜報文＞

(原著論文)

[1] J. Ha *et al.*, “Shape evolution of neutron-rich Mo-106, Mo-108, Mo-110 isotopes in the triaxial degree of freedom”, Phys. Rev. C **101**, 044311 (2020).

[2] J. Wu *et al.*, “beta-decay half-lives of 55 neutron-rich isotopes beyond the N=82 shell gap”, Phys. Rev. C **101**, 042801(R) (2020).

[3] J. W. Lee *et al.*, “Charged particle track reconstruction with SπRIT Time Projection Chamber”, Nucl. Instrum. Method **A965**, 163840 (2020).

[4] C. Lizarazo *et al.*, “Metastable States of Se-92, Se-94: Identification of an Oblate K Isomer of Se-94 and the Ground-State Shape Transition between N=58 and 60”, Phys. Rev. Lett. **124**, 222501 (2020).

[5] K. Wimmer *et al.*, “Shape coexistence revealed in the N = Z isotope Kr-72 through inelastic scattering”, Euro. Phys. J. A56, **159** (2020).

[6] S. Bagchi *et al.*, “Two-Neutron Halo is Unveiled in F-29”, Phys. Rev. Lett. **124**, 222504 (2020).

[7] X. H. Sun *et al.*, “Spallation and fragmentation cross sections for 168 MeV/nucleon Xe-136 ions on proton, deuteron, and carbon targets”, Phys. Rev. C **101**, 064623 (2020).

[8] A. Frotscher *et al.*, “Sequential Nature of (p,3p) Two-Proton Knockout from Neutron-Rich Nuclei”, Phys. Rev. Lett. **125**, 012501 (2020).

[9] J. Park *et al.*, “Spectroscopy of Cd-99 and In-101 from beta decays of In-99 and Sn-101”, Phys. Rev. C **102**, 014304 (2020).

[10] A. Gattardo *et al.*, “Transition strengths in the neutron-rich Ni-73, Ni-74, Ni-75 isotopes”, Phys. Rev. C **102**, 014323 (2020).

[11] J. J. Liu *et al.*, “Isomeric and beta-decay spectroscopy of Ho-173, Ho-174”, Phys. Rev. C **102**, 024301 (2020).

[12] F. L. Bello Garrote *et al.*, “beta decay of Ni-75 and the systematics of the low-lying level structure of neutron-rich odd-A Cu isotopes”, Phys. Rev. C **102**, 034314 (2020).

[13] A. Jungclaus *et al.*, "Evolution of proton single-particle states in neutron-rich Sb isotopes beyond N=82", Phys. Rev. C **102**, 034324 (2020).

[14] M. L. Cortés *et al.*, "N=32 shell closure below calcium: Low-lying structure of Ar-50", Phys. Rev. C **102**, 064320 (2020).

[15] T. Sumikama *et al.*, "Energy-control and novel particle-identification methods combined with range in a multi-sampling ionization chamber for experiments using slowed-down RI beams", Nucl. Instrum. Method **A986**, 164687 (2020).

[16] T. Mahara *et al.*, "Irradiation Test of 65-nm Bulk SRAMs With DC Muon Beam at RCNP-MuSIC Facility", IEEE Trans. Nucl. Sci. **67**, 1555 (2020).

[17] T. Sumikama *et al.*, "Observation of new neutron-rich isotopes in the vicinity of Zr-110", Phys. Rev. C **103**, 014614 (2021).

[18] S. E. A. Orrigo *et al.*, "beta decay of the very neutron-deficient Ge-60 and Ge-62 nuclei", Phys. Rev. C **103**, 014324 (2021).

[19] G. Jhang *et al.*, "Symmetry energy investigation with pion production from Sn plus Sn systems", Phys. Lett. **B813**, 136016 (2021).

[20] K. Wimmer *et al.*, "Shape Changes in the Mirror Nuclei Kr-70 and Se-70", Phys. Rev. Lett. **126**, 072501 (2021).

[21] Y. L. Sun *et al.*, "Three-body breakup of He-6 and its halo structure", Phys. Lett. **B814**, 136072 (2021).

[22] M. M. Juász *et al.*, "First spectroscopic study of Ar-51 by the (p,2p) reaction", Phys. Lett. **B814**, 136108 (2021).

(学位論文)

[23] 小山俊平, 'Spectroscopy of resonance states in light proton-rich nuclei via missing mass method", 博士論文, 2020 年 4 月.

[24] 國分英, "閾値エネルギー近傍での不安定核反応におけるパイオン生成の研究", 修士論文, 2021 年 3 月.

(国内会議)

一般講演

[25] 山村周,「非等方的集団運動から探る高密度物質の状態方程式の研究」, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月, Online.

[26] 國分英,「中性子過剰 Ca 内部構造探索に向けた,Ca+C 反応における中性パイオンの測定」, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月,Online.

招待講演

[27] 齋藤岳志,「ミューオン原子 X 線分光による原子核の荷電分布・荷電半径測定」, ELPH 研究会 C028,「電子散乱による原子核研究 —原子核の電荷密度・陽子・中性子の分布と半径」, 2021 年 3 月, Online.

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, さらに, 将来の研究計画に向けた装置開発, 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, 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ために, アップグレードされ生まれ変わった装置がスーパー B ファクトリー（SuperKEKB 加速器と Belle II 測定器）である。

SuperKEKB は, KEKB の約 50 倍の積分ルミノシティ（$\propto$ 生成粒子数）を蓄積すべく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シリコン崩壊点検出器（SVD 検出器）の開発・量産を主導した (図 2.2.2)。

スーパー B ファクトリーは 2019 年に本格的な運転・データ収集を開始し, 2021 年 3 月までに, およそ 1 億個の B 中間子-反 B 中間子ペアに相当する約 100 fb^{-1} のデータを収集した。

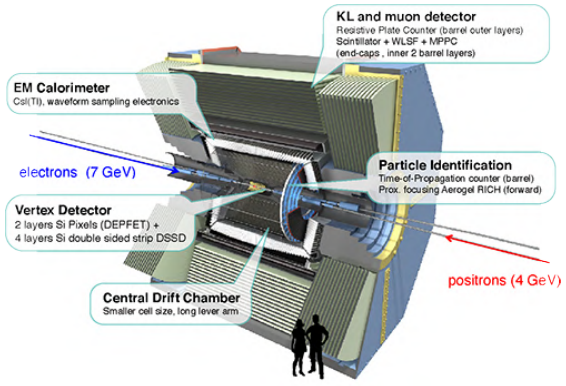


図 2.2.1: Belle II 検出器。

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

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 ϕ_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。

$B \to K l^+ l^-$ 崩壊事象の測定　近年, FCNC 過程の一つである $B \to K^{(*)} \ell^+ \ell^-$（$\ell^\pm$ 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。そこで，Belle II 実験の最初期のデータを用いて $B \to K \ell^+ \ell^-$ 崩壊事象を測定した。Boosted Decision Tree を用いた新たな事象選択手法を開発し，約 1,100 万個の B 中間子–反 B 中間子ペアを含むデータを解析した結果，各崩壊モードの分岐比の上限値について 90%信頼度で，$\mathcal{B}(B^+ \to K^+ e^+ e^-) < 3.5 \times 10^{-6}$, $\mathcal{B}(B^+ \to K^+ \mu^+ \mu^-) < 9.9 \times 10^{-7}$, $\mathcal{B}(B^0 \to K^0 e^+ e^-) < 2.3 \times 10^{-6}$, $\mathcal{B}(B^0 \to K^0 \mu^+ \mu^-) < 3.2 \times 10^{-6}$, という結果を得た。この崩壊モードの Belle II 実験では初めての測定であり，今後データを蓄積し解析を改善することで標準模型の検証が可能となることを示した（Alejandro Mora 博士論文 [39]。）

CP 対称性の破れパラメータ ϕ_1 の測定　標準模型の枠組みにおける CP 対称性の破れのパラメータ ϕ_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，ϕ_1 の測定に必要な，B 中間子の崩壊時間に依存した物理量の測定手法を開発している。本年度は，事象ごとの測定精度の違いを考慮した形で崩壊時間の分解能を表す確率分布関数を求める手法を，Belle II 実験において確立した。さらに，Belle II 実験の初期データを用いた B 中間子の寿命測定に適用し，その妥当性を実データで確認した（Tingyu Zhang 修士論文 [41]）。我々が開発した手法は，Belle II 実験での最初の $B \to J/\psi K_S$ 崩壊による ϕ_1 の測定に用いられた。並行して，新しい SVD 検出器の性能を生かした K_S の再構成法を開発し，FCNC 過程である $B \to K_S K_S K_S$ 崩壊の測定を進めている。

2.2.2 加速器による長基線ニュートリノ振動実験

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。

これ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 δ_{CP} に対する制限を求めた。世界で初めて，3 σ 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 [20]）。

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，2022 年度のインストールに向けて国際共同プロジェクトを主導している。中でも特に，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，SuperFGD の開発を進めている。

本年度は，SuperFGD に使用する約 6 万個の半導体光検出器 MPPC の特性検査を行うための大量試験システムを構築した。512 個の MPPC を同時に測定し，自動的に印加電圧を変えながらゲインや光検出効率，ダークノイズレート等を確認するシステムを設計し，その性能が要求を満たすことを確認した（鞠谷温士 修士論文 [43]）。

CP 対称性の破れの測定には，電子ニュートリノの反応断面積の測定が重要である。しかし，これまでの前置検出器では，最も重要な運動量 500 MeV/c 以

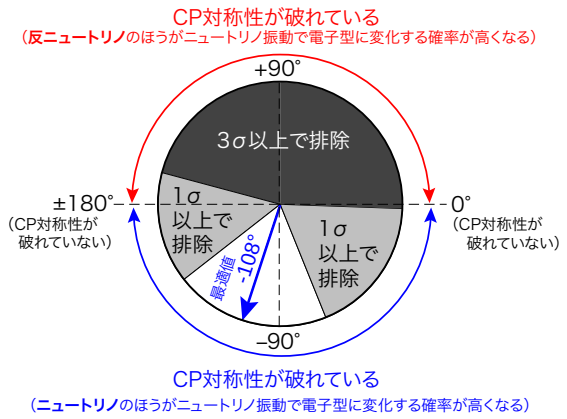


図 2.2.3: T2K 実験による，観測結果と最も良く合う CP 位相角の値（矢印）と各信頼度で排除された範囲（灰色部分）。理論的に取り得る値の範囲の半分近くを 3σ 以上の信頼度で排除した [38]。

下の領域で，$\gamma(\to e^+e^-)$ による電子・陽電子がバックグラウンドとなり測定が難しかった。そこで，細分化された SuperFGD の構造を利用し，電子と γ の識別を行うアルゴリズムを開発し，期待される感度を見積もった（江口碧 修士論文 [42]）。また，SuperFGD の構造を生かし，ニュートリノ反応で生成された中性子を測定することにより，ニュートリノエネルギーの測定精度を向上させる提案をした [22]。

2.2.3　陽子崩壊の探索

素粒子の標準模型を超えた物理の理論として有力なものとして，「大統一理論」がある。大統一理論では，4 つの基本的な相互作用のうち，標準模型で統一された電磁相互作用と弱い相互作用に加え，10^{16}GeV 程度の超高エネルギーで，さらに強い力も統一される。また，クォークとレプトンも統一される一方で，陽子の崩壊が予言される。陽子崩壊の探索は，大統一理論の唯一の直接的検証法である。

我々の研究室では，スーパーカミオカンデのデータを用い，陽子崩壊を世界最高の感度で探索している。陽子が反荷電レプトンと η 中間子に崩壊するモードに着目し，η 中間子の原子核内での散乱断面積を見積もり直すことで感度を改善した。これまで解析に使われていなかった最新のデータも使用して探索を行ったが，残念ながら候補は見つからなかった（図 2.2.4）。陽子が陽電子と η 中間子（μ^+ と η 中間子）に崩壊するモードに対し，90%信頼度で 1.33×10^{34}（6.1×10^{33}）年という，このモードの部分寿命に対する世界で最も厳しい下限値を得た（小川夏実 修士論文 [44]）。

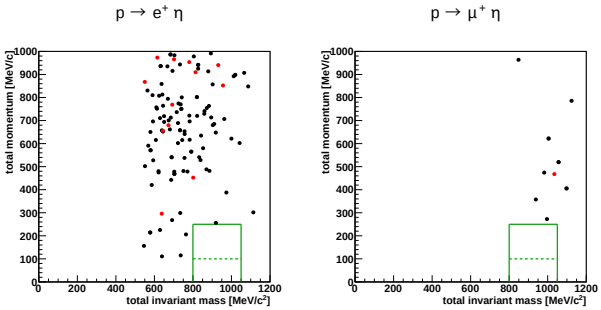


図 2.2.4: 陽子の陽電子と η 中間子（左），あるいは μ^+ と η 中間子（右）への崩壊の探索結果。横軸は不変質量，縦軸は総運動量で，四角が信号領域。

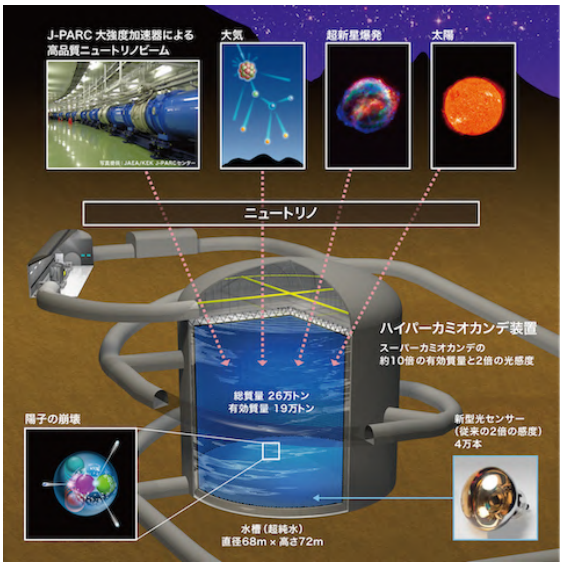


図 2.2.5: ハイパーカミオカンデ検出器の概念図。

2.2.4　次世代大型水チェレンコフ検出器・ハイパーカミオカンデ

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 25 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，検出器建設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。

図 2.2.6: 納入されたハイパーカミオカンデ用光電子増倍管 R12860。(東京大学宇宙線研究所)

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。本年度は，浜松ホトニクス製光電子増倍管 R12860 の採用を正式に決定し，最初の 300 本が納入された（図 2.2.6)。今後 5 年以上にわたって製造される大量の光電子増倍管の品質を管理するため, 受け入れ時の検査手順の確立やデータベースの整備を行なった。

2.2.5 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。

本年度は, HSC で撮影された画像を用いて, クェーサーのペアを探索した。34,476 個の既知のクェーサーを調べ，400 個以上の二重クェーサー候補を特定した。それらをさらに光学分光観測することで，二重クェーサーを 7 つ発見した（図 2.2.7)。さらに，詳細な解析により，ブラックホール質量や光度などの情報も求めた（Shenli Tang 修士論文 [40])。今後，さらに観測・解析が進展することにより，銀河の合体や進化，超大質量ブラックホールの成長過程などの研究につながると期待される。

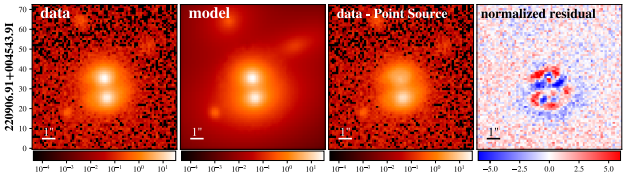


図 2.2.7: HSC の i バンドで撮影された二重クェーサー候補 SDSS J220906.91+004543.9。左から，元画像，再構成されたモデル（点源とホスト銀河)，ホスト銀河（データ – 点源)，規格化された残差 [40]。

＜報文＞

(原著論文)

B ファクトリー関連

[1] 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).

[2] G. Caria *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of $\mathcal{R}(D)$ and $\mathcal{R}(D^*)$ with a semileptonic tagging method," Phys. Rev. Lett. **124**, no.16, 161803 (2020).

[3] K. Chilikin *et al.* [Belle Collaboration], "First search for the $\eta_{c2}(1D)$ in B decays at Belle," JHEP **05**, 034 (2020).

[4] R. Seidl *et al.* [Belle Collaboration], "Update of inclusive cross sections of single and pairs of identified light charged hadrons," Phys. Rev. D **101**, no.9, 092004 (2020).

[5] H. Tanigawa *et al.* [Belle-II SVD Group], "Performance of the Belle II Silicon Vertex Detector," Nucl. Instrum. Meth. A **972**, 164129 (2020).

[6] Y. Q. Chen *et al.* [Belle Collaboration], "Dalitz analysis of $D^0 \to K^-\pi^+\eta$ decays at Belle," Phys. Rev. D **102**, no.1, 012002 (2020).

[7] Y. Ku *et al.* [Belle Collaboration], "Search for B^0 decays to invisible final states ($+\gamma$) at Belle," Phys. Rev. D **102**, no.1, 012003 (2020).

[8] H. Tanigawa *et al.* [Belle-II SVD Group], "Beam background study for the Belle II Silicon Vertex Detector," Nucl. Instrum. Meth. A **982**, 164580 (2020).

[9] F. Abudinén *et al.* [Belle-II Collaboration], "Search for Axionlike Particles Produced in e^+e^- Collisions at Belle II," Phys. Rev. Lett. **125**, no.16, 161806 (2020).

[10] M. Nayak *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the charm-mixing parameter y_{CP} in $D^0 \to K^0_S\omega$ decays at Belle," Phys. Rev. D **102**, no.7, 071102 (2020).

[11] J. Yelton *et al.* [Belle Collaboration], "Study of electromagnetic decays of orbitally excited Ξ_c baryons," Phys. Rev. D **102**, no.7, 071103 (2020).

[12] P. Oskin *et al.* [Belle Collaboration], "Search for transitions from $\Upsilon(4S)$ and $\Upsilon(5S)$ to $\eta_b(1S)$ and $\eta_b(2S)$ with emission of an ω meson," Phys. Rev. D **102**, no.9, 092011 (2020).

[13] Y. Li *et al.* [Belle Collaboration], "Search for a doubly-charged DDK bound state in $\Upsilon(1S, 2S)$ inclusive decays and via direct production in e^+e^- collisions at $\sqrt{s}$ = 10.520, 10.580, and 10.867 GeV," Phys. Rev. D **102**, no.11, 112001 (2020).

[14] D. Sahoo *et al.* [Belle Collaboration], "Search for lepton-number- and baryon-number-violating tau decays at Belle," Phys. Rev. D **102**, 111101 (2020).

[15] K. H. Kang *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of time-dependent CP violation parameters in $B^0 \to K^0_S K^0_S K^0_S$ decays at Belle," Phys. Rev. D **103**, no.3, 032003 (2021).

[16] A. Abdesselam *et al.* [Belle Collaboration], "Test of lepton flavor universality and search for lepton flavor violation in $B \to K\ell\ell$ decays," JHEP **03**, 105 (2021).

[17] J. Y. Lee *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of branching fractions of $\Lambda_c^+ \to \eta\Lambda\pi^+$, $\eta\Sigma^0\pi^+$, $\Lambda(1670)\pi^+$, and $\eta\Sigma(1385)^+$," Phys. Rev. D **103**, no.5, 052005 (2021).

[18] Y. Teramoto *et al.* [Belle], "Evidence for $X(3872) \to J/\psi\pi^+\pi^-$ produced in single-tag two-photon interactions," Phys. Rev. Lett. **126**, no.12, 122001 (2021).

[19] S. Mohanty *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of Branching Fraction and Search for CP Violation in $B \to \phi\phi K$," Phys. Rev. D **103**, no.5, 052013 (2021).

ニュートリノ実験関連

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

[21] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Search for Electron Antineutrino Appearance in a Long-baseline Muon Antineutrino Beam," Phys. Rev. Lett. **124**, no.16, 161802 (2020).

[22] L. Munteanu, S. Suvorov, S. Dolan, D. Sgalaberna, S. Bolognesi, S. Manly, G. Yang, C. Giganti, K. Iwamoto and C. Jesús-Valls, "New method for an improved antineutrino energy reconstruction with charged-current interactions in next-generation detectors," Phys. Rev. D **101**, no.9, 092003 (2020).

[23] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "First combined measurement of the muon neutrino and antineutrino charged-current cross section without pions in the final state at T2K," Phys. Rev. D **101**, no.11, 112001 (2020).

[24] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Simultaneous measurement of the muon neutrino charged-current cross section on oxygen and carbon without pions in the final state at T2K," Phys. Rev. D **101**, no.11, 112004 (2020).

[25] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Indirect search for dark matter from the Galactic Center and halo with the Super-Kamiokande detector," Phys. Rev. D **102**, no.7, 072002 (2020).

[26] A. Hiramoto *et al.* [NINJA Collaboration], "First measurement of $\overline{\nu}_\mu$ and ν_μ charged-current inclusive interactions on water using a nuclear emulsion detector," Phys. Rev. D **102**, no.7, 072006 (2020).

[27] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Measurement of the charged-current electron (anti-)neutrino inclusive cross-sections at the T2K off-axis near detector ND280," JHEP **10**, 114 (2020).

[28] A. Blondel, M. Bogomilov, S. Bordoni, F. Cadoux, D. Douqa, K. Dugas, T. Ekelof, Y. Favre, S. Fedotov and K. Fransson, *et al.* "The SuperFGD Prototype Charged Particle Beam Tests," JINST **15**, no.12, P12003 (2020).

[29] A. Takenaka *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Search for proton decay via $p \to e^+\pi^0$ and $p \to \mu^+\pi^0$ with an enlarged fiducial volume in Super-Kamiokande I-IV," Phys. Rev. D **102**, no.11, 112011 (2020).

[30] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using 3.13×10^{21} protons on target," Phys. Rev. D **103**, no.1, L011101 (2021).

[31] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Neutron-antineutron oscillation search using a 0.37 megaton-years exposure of Super-Kamiokande," Phys. Rev. D **103**, no.1, 012008 (2021).

[32] H. Oshima *et al.* [NINJA Collaboration], "First measurement using a nuclear emulsion detector of the ν_μ charged-current cross section on iron around the 1 GeV energy region," PTEP **2021** 033C01 (2021).

HSC 関連

[33] J. D. Silverman, S. Tang, K.-G. Lee *et al.*, "Dual Supermassive Black Holes at Close Separation Revealed by the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program," The Astrophysical Journal, **899**, 154 (2020).

その他

[34] P. A. Zyla *et al.* [Particle Data Group], "Review of Particle Physics," PTEP **2020**, no.8, 083C01 (2020).

[35] N. Shimizu *et al.* [KOTO Collaboration], "First search for $K_L \to \pi^0\gamma$," Phys. Rev. D **102**, no.5, 051103 (2020).

[36] Y. Sugiyama, *et al.* "Pulse shape discrimination of photons and neutrons in the energy range of 0.1 – 2 GeV with the KOTO un-doped CsI calorimeter," Nucl. Instrum. Meth. A **987**, 164825 (2021).

[37] J. K. Ahn *et al.* [KOTO Collaboration], "Study of the $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ decay at the J-PARC KOTO experiment," Phys. Rev. Lett. **126**, 121801 (2021).

(国内雑誌)

[38] 横山将志,「T2K 実験，ニュートリノ振動で物質-反物質の非対称性の謎に迫る」，日本物理学会誌 **76**, 34 (2021).

(学位論文)

博士論文

[39] Alejandro Mora Grimaldo Jonny, "Measurement of the Flavor Changing Neutral Current Decays $B \to K\ell^+\ell^-$ at the Belle II Experiment," Sep. 2020.

修士論文

[40] Shenli Tang, "A spectroscopic study of dual quasars with the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Survey," Sep. 2020.

[41] Tingyu Zhang, "Development of proper-time resolution function for improved measurement of time evolution of B mesons at the Belle II experiment," Sep. 2020.

[42] Aoi Eguchi, "Development of Selection Algorithms for Electron Neutrino Interaction Events with New T2K Near Detectors," Mar. 2021.

[43] Haruto Kikutani, "Development of performance test system of mass-produced Multi-Pixel Photon Counters for a new neutrino detector," Mar. 2021.

[44] Natsumi Ogawa, "Search for proton decay into charged antilepton and η meson in Super-Kamiokande," Mar. 2021.

(著書)

[45] Kota Nakagiri, "Search for the Decay $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ at the J-PARC KOTO Experiment," Springer Theses Series, Springer, Singapore, August 2020.

[46] Hiroaki Aihara, "Particle-Antiparticle Asymmetry in the B Meson System," IOP Publishing, Bristol, UK, October 2020.

[47] 相原博昭, 奥原正明,「文系・理系対談 日本のタコ壺社会」， 日本経済新聞出版，2020 年 11 月.

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[48] Masashi Yokoyama, "Hyper-Kamiokande," 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics, October 5–9, 2020, Moscow (Online)

(国内会議)

招待講演

[49] 中桐洸太,「J-PARC KOTO 実験 2015 年データを用いた $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊探索」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月 14–17 日, オンライン

[50] 横山将志,「Hyper-Kamiokande」, ILC 夏の合宿 2020, 2020 年 9 月 23–25 日, オンライン

[51] 相原博昭,「量子イノベーションイニシアティブ協議会（量子コンピュータ利活用拠点：東京大学ー企業連合)」，量子技術イノベーション拠点シンポジウム，2021 年 2 月 26 日

一般講演

[52] 江口碧,「T2K 新型前置検出器 SuperFGD における電子ニュートリノ反応事象とガンマ線反応事象の識別効率の評価」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月 14–17 日, オンライン

[53] 小川夏実,「SK での陽子崩壊探索における η 中間子への崩壊の研究 (1) — η の核内反応の影響評価手法の開発—」, 同上

(セミナー，その他)

[54] Masashi Yokoyama, "Unlocking the secrets of the Universe — by observing tiny, elusive neutrinos ," The School of Science Cafè 2021 Online, February 7, 2021, Online

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、本研究室は、素粒子物理国際研究センターと共同でヒッグス粒子の発見につづいて、ヒッグス粒子の研究や超対称性粒子探索を行っている。

図 2.3.2 に示す様に、ヒッグス粒子がボトムクォーク対に崩壊することが今回発見された。この研究は、東京大学が中心となって行った研究である。ボトムクォーク対はバックグラウンドが多く、これまで LHC

図 2.3.1: LHC 加速器。

では発見は難しいと思われていたが、深層学習を取り込んでバックグラウンドをのぞき発見に至った。結合の強さは、図 2.3.3 に示す様に 15%程度の不定性が残るが標準理論の予言と一致しており、物質（クォーク、荷電レプトン）、ゲージ粒子のすべての質量の起源ヒッグス粒子であることが分かった。

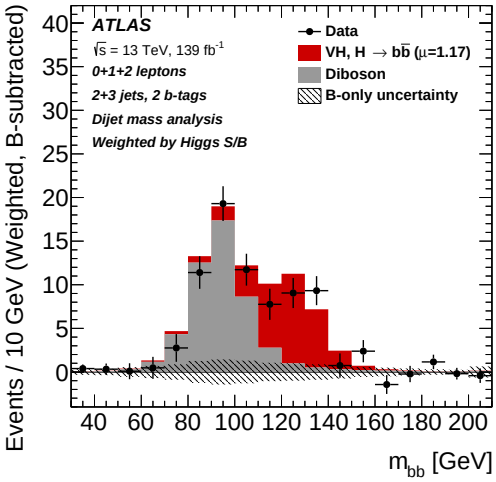


図 2.3.2: ボトムクォーク対の質量分布。赤いヒストグラムがヒッグス粒子の崩壊と期待されている。

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・ヒグシーノモデルに対する厳しい制限を与えてきた。更に、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、暗黒物質の可

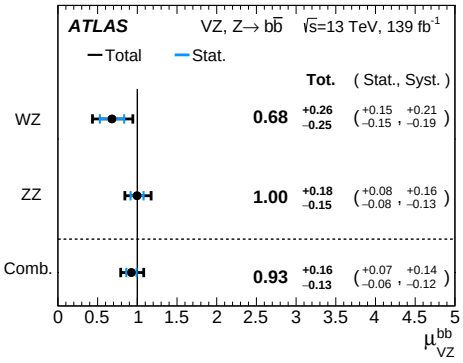


図 2.3.3: ヒッグス粒子とボトムクォークとの結合強度。標準理論の予想値で規格化。

能性あるウィーノ・ヒグシーノを確実に発見できることを示した。

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。2020 年度は Ps レーザー冷却原理実証実験に取り組むとともに、陽電子輝度増強システムのための陽電子ビーム集束レンズ開発および Ps-BEC 実現のための Ps 生成・濃縮・冷却材開発を行った。

プロトタイプ磁気集束レンズを用いた陽電子ビーム集束実験のセットアップを図 2.3.4 に示す。この実

験によりプロトタイプ磁気集束レンズを用いてビーム径を 12 mm から 2.6 mm に集束し、フラックスを 160 e^+/pulse/mm^2 から 680 e^+/pulse/mm^2 へと 4.3 倍高めることに成功した (図 2.3.5)。これにより、ナノ細孔中における Ps レーザー冷却実験を行うのに必要な陽電子強度に対する比で 2 桁改善された。まだ 1 桁足りないが、陽電子輸送効率の改善、ビームエネルギーの増大、陽電子トラップによるレーザーとの同期の改善によって陽電子フラックスをさらに 70 倍にし、要求性能を満たす予定である。

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、プロトタイプ冷却レーザーを完成させ、KEK-SPF に移設して Ps レーザー冷却実験に挑戦している。このほか、産総研、九州大学、KEK、原研と協力して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。

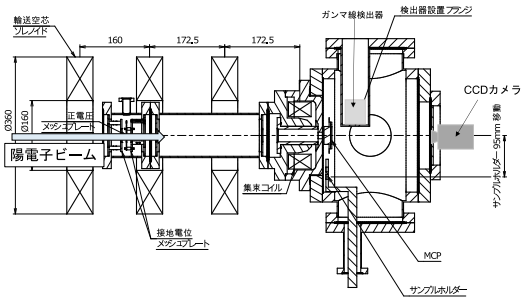


図 2.3.4: KEK-SPF における陽電子集束実験セットアップ (鉛直上から見た断面図) [79]。ソレノイドコイルで輸送した KEK-SPF 陽電子ビームを、引き出しコイルで径を広げた後に磁気集束レンズで集束し、MCP/Phosphor screen に入射した。Phosphor screen の像を CCD カメラで撮影してビーム径を測定するとともに、ガンマ線検出器信号と組み合わせてビーム強度を測定した。

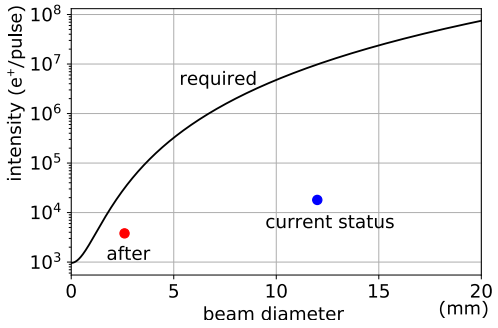


図 2.3.5: KEK-SPF における陽電子集束実験結果 [79]。実線はナノ細孔中における Ps レーザー冷却実験を行うのに必要な陽電子強度を陽電子ビーム径の関数として示したもので、本実験で測定した陽電子ビームは集束によって右側の丸点から左側の丸点になった。

高フィネス共振器とパルス磁石を用いた真空複屈折の探索 (OVAL 実験)

QED で予言されている強場下の物理として、真空の複屈折が挙げられる。真空に強い磁場を掛けると、真空偏極によってそこを通った光の偏光状態が変化すると予想される。本研究室では強磁場かつ高速繰り返しのパルス磁石と赤外レーザーを用いて真空複屈折を探索しており、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た (Observing VAcuum with Laser (OVAL) 実験)。

図 2.3.6 に実験セットアップを示す。2020 年度は距離にして $10^{-19}\,\mathrm{m}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ の安定した光学システムを確立するとともに磁石起因の擾乱への対策を行い、同様の実験における発生磁場として世界一の強度である 8.3 T/ − 4.5 T において、パルス磁石を用いた真空複屈折探索として過去の 100 倍以上の統計となる 24,000 発のパルスを発生して真空複屈折探索を行った。

測定の結果、真空複屈折は観測されなかったものの、真空複屈折のパラメータ k_{CM} に対し、95%信頼区間で $|k_{\mathrm{CM}}| < 1.8\times10^{-20}\,\mathrm{T}^{-2}$ という制限を得た。図 2.3.7 に、この結果を過去の実験値 (BMV (A. Cadène *et al.*, Eur. Phys. J. D **68** (2014) 16) および PVLAS (A. Ejlli *et al.*, Phys. Rep. **871** (2020) 1)) と比較して示す。この真空複屈折の制限によって未知粒子の一つである Axion-Like-Particles (ALPs) のパラメータ領域に制限をつけることができる (図 2.3.8)。本実験の ALPs に対する制限は PVLAS 実験による制限より緩いものの、ALPs 質量 0.01–0.1 eV においてその他の実験よりも厳しいものとなった。将来的にはさらなる強磁場化や磁場長の延長により $|k_{\mathrm{CM}}|$ に対する感度を 46 倍向上させることが可能である。

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 (VD) 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 (XFEL) 施設 SACLA を用いる。

2019 年に SACLA の BL3 で行った実験セットアップを図 2.3.9 に示す。0.6 TW のレーザー (パルス幅 48 fs) を 1.9 μm に集光し、22.0 μm × 14.8 μm の XFEL (8.4 keV, パルス幅 17 fs) 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を

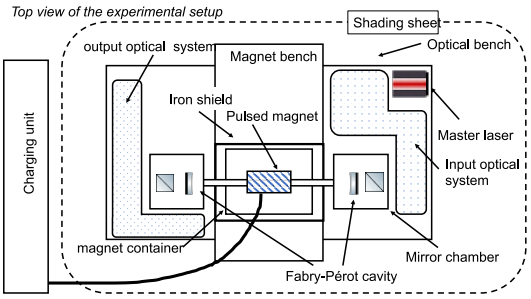


図 2.3.6: OVAL 実験セットアップ [78]。2.4 m の光学定盤で実験し、偏光子とミラーは真空中に封入、1.4 m の共振器の中央に磁石を 1 個設置している。磁石からの擾乱への対策が実験の鍵。

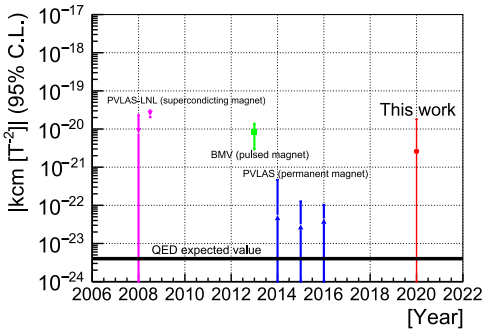


図 2.3.7: OVAL 実験で得られた $|k_{\mathrm{CM}}|$ に対する制限と過去の実験との比較 [78]。

スキャンして真空回折信号を探索した。測定結果を図 2.3.10 に示す。真空回折の有意な信号は観測されなかったものの、真空偏極に対する、真空回折探索による世界で初めての制限として、測定された X 線光子数 ($n_{\mathrm{xrays,sum}}$) の QED 理論値 ($n_{\mathrm{QED,sum}}$) に対する比 $n_{\mathrm{xrays,sum}}/n_{\mathrm{QED,sum}} < 2.3 \times 10^{18}$ (90%信頼区間) を得ることができた。この制限を過去の異なる手法による制限とともに図 2.3.11 に示す。将来的には偏光子を開発するとともに 500 TW レーザーを用い、さらに XFEL およびレーザーのサイズを絞ることで感度を 21 桁向上させ、真空回折を観測することを検討している。

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パラフォトンが挙げられる。これは電磁場と混ざり合うので、もしパラフォトンが暗黒物質であれば、銀河に暗黒物質として存在するパラフォトンが導体表面に入射した際、表面

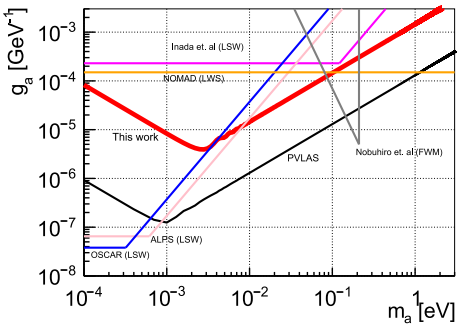


図 2.3.8: OVAL 実験で得られた ALPs に対する制限と過去の実験との比較 [78]。m_a は ALPs 質量で、g_a は ALPs と光子の結合定数。

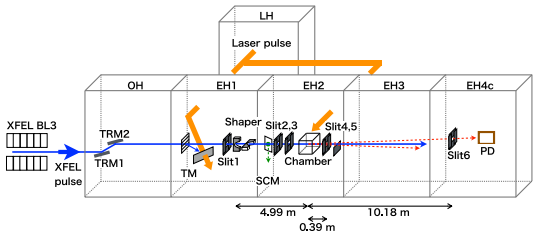


図 2.3.9: 真空回折探索実験セットアップ [77]。

からほぼ垂直に転換光 (電磁波) を放出すると予想される。この電磁波を超伝導 SIS 検出器で検出することで、ミリ波領域 (パラフォトン質量 0.91–1.08 meV, 転換光周波数 220–260 GHz) におけるパラフォトン暗黒物質探索を行っている。

実験セットアップ模式図を図 2.3.12 に示す。2020 年度は転換光 (平面波) をより多く受信させ変換金属プレートの有効面積を最大化するための光学系を設計し、測定準備を進めている。図 2.3.13 に示す直径 580 mm、焦点距離 1085 mm の超高分子量ポリエチレン (屈折率 1.53) レンズ (製作中) を導入することでプレート有効面積を最大化させ、約 3 時間の積分時間の測定により kinetic mixing parameter $\chi = 1.1 \times 10^{-9}$ までの世界最高感度で探索可能である。

超冷中性子を使った弱い等価原理の検証

慣性質量 m_i と重力質量 m_g が等しい $(m_g/m_i = 1)$ という弱い等価原理 (WEP) は重力理論の基本原理の一つであり、古典的な運動方程式においては実験的に 10^{-13} の精度で検証されている。一方、「重力場中の Schrödinger 方程式で $m_g/m_i = 1$ が成り立つか」という「量子論における WEP」の検証精度は 10^{-3} 程度であり、また過去の検証では m_i の値とし

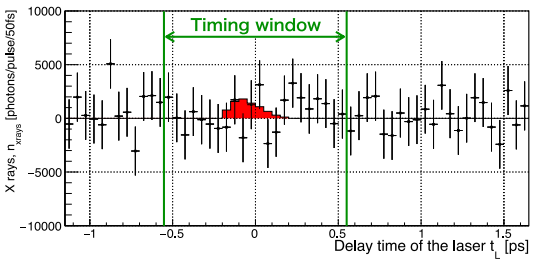


図 2.3.10: 真空回折探索結果 [77]。誤差棒つきのデータは、レーザーと XFEL を衝突させた場合と XFEL のみの場合との検出 X 線光子数の差 (n_{xrays}) を、レーザー照射タイミングと XFEL の時間差 (t_{L}) に対してプロットしたもの。信号領域は $|t_{\mathrm{L}}| < 0.55\,\mathrm{ps}$ の Timing window で設定した。ヒストグラムは QED で期待される信号を 2.0×10^{17} 倍したもの。

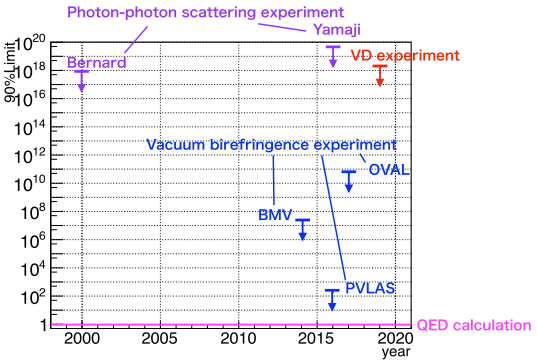


図 2.3.11: 真空偏極に対する制限 [77]。QED 理論値に対する比として示した。

て重力以外の測定で得られた値を仮定している。そこで m_i の値を仮定せず、同一実験内で m_i と m_g を同時に測定して量子論における WEP を 10^{-3} の精度で検証するため、地球重力場中に束縛された超冷中性子 (UCN) の空間・時間的分布を世界で初めて同時測定する実験を計画している。

実験セットアップ概念図を図 2.3.14 に示す。UCN の経路上に設けた段差によって瞬間的な摂動を与えて UCN 波動関数を時間変化させ、空間・時間的分布の同時測定を実現する。段差前で基底状態のみ存在していると仮定し、検出器の空間・時間分解能を考慮したうえで検出器で観測される UCN 信号分布をシミュレーションした結果を図 2.3.15 に示す。シミュレーション結果を最尤法を用いてフィットすることで、10^5 個の UCN 測定により m_g/m_i について 10^{-3} の精度で議論できるような系であることがわかった。現在、より詳細な設計を進めている。

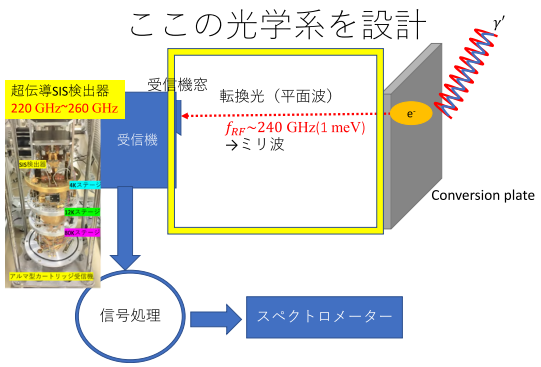


図 2.3.12: パラフォトン探索実験セットアップ模式図 [87]。転換光（ミリ波）を受信機に入れてパワースペクトルを得る。

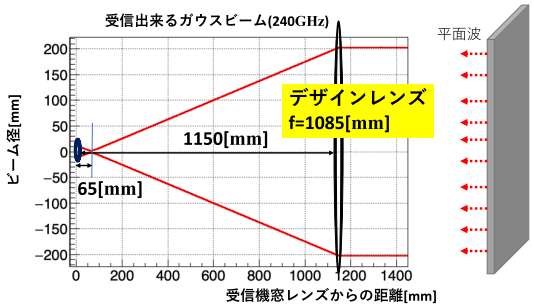


図 2.3.13: 設計したレンズにより受信できるガウスビーム [87]。

＜報文＞

(原著論文)

[1] H. Higaki, K. Michishio, K. Hashidate, A. Ishida and N. Oshima, “Accumulation of LINAC based low energy positrons in a buffer gas trap”, Appl. Phys. Express **13** (2020) 066003.

[2] 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”, Prog. Theor. Exp. Phys. **2020** (2020) 073C02.

The ATLAS Collaboration

[3] Phys. Rev. Lett. **125** (2020) no.26, 261801

[4] JHEP **10** (2020), 062

[5] Phys. Rev. Lett. **125** (2020), 251802

[6] Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.8, 691

[7] Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.11, 1085

[8] JHEP **11** (2020), 163

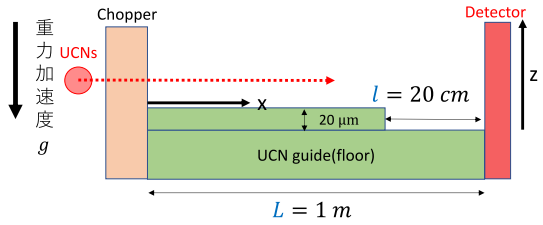


図 2.3.14: UCN を用いた WEP 検証実験セットアップ概念図 [85]。シミュレーションに用いた寸法を記載している。

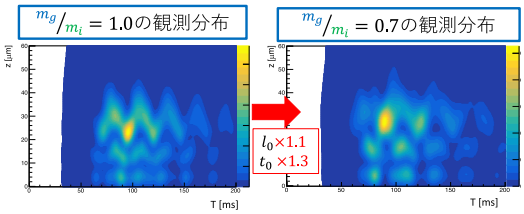


図 2.3.15: UCN 観測シミュレーション結果 [85]。UCN 波動関数の振動の様子が m_g/m_i に依存して変化する。$l_0 \propto (m_g/m_i)^{-1/3}$, $t_0 \propto (m_g/m_i)^{-2/3}$ はそれぞれ距離、時間のスケールを示すパラメータ。

[9] JINST **15** (2020) no.10, P10004
[10] Phys. Rev. D **102** (2020) no.11, 112008
[11] Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.12, 1194
[12] JHEP **09** (2020), 049
[13] Phys. Lett. B **810** (2020), 135797
[14] JHEP **11** (2020), 005
[15] Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.11, 1080
[16] JHEP **10** (2020), 112
[17] Phys. Rev. D **102** (2020), 112006
[18] JHEP **08** (2020), 080
[19] Phys. Lett. B **809** (2020), 135754
[20] JHEP **10** (2020), 061
[21] JINST **15** (2020) no.11, P11016
[22] JHEP **08** (2020) no.08, 051
[23] Phys. Rev. Lett. **125** (2020) no.13, 131801
[24] Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.12, 1165
[25] Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.8, 737
[26] JINST **15** (2020) no.09, P09015
[27] JHEP **10** (2020), 005
[28] Phys. Rev. Lett. **125** (2020) no.6, 061802
[29] Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.10, 942
[30] Phys. Rev. Lett. **124** (2020) no.22, 222002
[31] Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.10, 957
[32] Phys. Rev. Lett. **125** (2020) no.22, 221802
[33] Phys. Rev. D **102** (2020) no.3, 032006
[34] JHEP **07** (2020), 044
[35] Phys. Lett. B **807** (2020), 135595
[36] Phys. Rev. Lett. **125** (2020) no.5, 051801
[37] JHEP **06** (2020), 151
[38] JHEP **07** (2020), 124
[39] Phys. Lett. B **805** (2020), 135426
[40] JHEP **07** (2020), 108
[41] Phys. Rev. D **101** (2020) no.5, 052007
[42] JHEP **03** (2020), 179
[43] Phys. Rev. D **101** (2020) no.7, 072001
[44] Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.7, 616
[45] Phys. Rev. D **101** (2020) no.5, 052013
[46] Phys. Rev. D **101** (2020) no.5, 052005
[47] Phys. Rev. D **101** (2020) no.3, 032009
[48] Phys. Rev. C **101** (2020) no.2, 024906
[49] JHEP **03** (2020), 054
[50] JINST **15** (2020) no.04, P04003
[51] JHEP **02** (2020), 042
[52] Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.1, 73
[53] Phys. Lett. B **802** (2020), 135262
[54] Phys. Lett. B **803** (2020), 135341
[55] Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.6, 528
[56] JHEP **03** (2020), 145
[57] Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.12, 1104
[58] JHEP **01** (2020), 095
[59] Phys. Lett. B **801** (2020), 135148
[60] JHEP **06** (2020), 046
[61] Phys. Rev. D **101** (2020) no.1, 012002
[62] Phys. Rev. Lett. **124** (2020) no.8, 082301
[63] Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.5, 450
[64] Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.1, 47
[65] Phys. Lett. B **800** (2020), 135082
[66] Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.2, 123
[67] Phys. Lett. B **801** (2020), 135145
[68] Phys. Lett. B **801** (2020), 135114
[69] Phys. Lett. B **800** (2020), 135069
[70] Phys. Rev. D **102** (2020) no.3, 032004
[71] Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.1, 64
[72] Phys. Lett. B **800** (2020), 135103
[73] Phys. Rev. Lett. **124** (2020) no.3, 031802
[74] JHEP **01** (2020), 051
[75] Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.8, 754

(国内雑誌)

[76] 石田明, “ポジトロニウムのレーザー冷却”, Photon Factory Activity Report 2019 **37** (2020) 201.

(学位論文)

[77] 清野結大, “Search For the Vacuum Polarization using a high-field laser and an XFEL”, 博士論文 (2020).

[78] 上岡修星, “Search For Vacuum Magnetic Birefringence with a high repetitive pulsed magnet”, 博士論文 (2020).

[79] 橋立佳央理, “ポジトロニウムのレーザー冷却を目指した高密度陽電子源の開発”, 修士論文 (2021).

＜学術講演＞

(国内会議)

一般講演

[80] 石田明, “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 (1)”, 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」、2020 年 12 月 11 日、オンライン開催.

日本物理学会秋季大会:オンライン開催:2020 年 9 月

[81] 石田明, “ボース・アインシュタイン凝縮を目指した高密度ポジトロニウム生成材料の開発”.

[82] 並木飛鳥, “超伝導検出器を用いたミリ波領域におけるパラフォトン探索”.

[83] 石田明, “ボース・アインシュタイン凝縮を目指した高密度ポジトロニウム冷却 I”.

[84] 橋立佳央理, “ボース・アインシュタイン凝縮を目指した高密度ポジトロニウム冷却 II”.

[85] 水原慎一, “超冷中性子を用いた弱い等価原理の検証実験のためのシミュレーション”.

日本物理学会:第 76 回年次大会:オンライン開催:2021 年 3 月

[86] 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”.

[87] 並木飛鳥, “超伝導検出器を用いたミリ波領域におけるパラフォトン探索”.

[88] 石田明, “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”.

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

二次元ディラック電子系の大きな反磁性と電磁双対性

量子電磁力学との類似性を用いて、ディラック電子系には時空の対称性を反映した電磁双対性が現れることを示し、電気伝導度（電気応答）と軌道磁化率（磁気応答）の間に成り立つ次元によらない関係式を導いた。特に二次元の場合はコンダクタンスが量子化されるため、電磁双対性で結ばれる軌道反磁性は質量ギャップまたは温度に反比例することになる。実際、二次元有機ディラック電子系 α-$(BETS)_2I_3$ のスピン磁化率と軌道磁化率の実験値が理論値と定量的に一致することを示し、軌道磁化率と電気伝導度の間にこの電磁双対性に対応した強い相関があることを見出した（図 3.1.1）。[5, 39, 49, 54]

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。[21]

有機伝導体における２次元ディラック電子系の異常伝導度

α-$(BEDT\text{-}TTF)_2I_3$ の２次元ディラック電子系の電気伝導度を、不純物と電子格子相互作用を考慮して調べた。温度領域によって、ディラックコーンの傾き (tilting) の効果の現れ方が異なり、電気伝導度の異方性が温度変化するという特異な現象を見出した。[7]

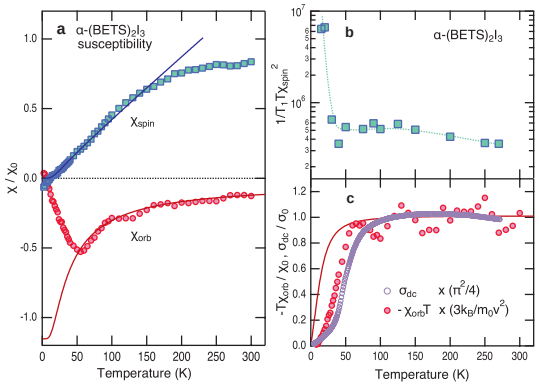


図 3.1.1: (a) α-$(BETS)_2I_3$ のスピン磁化率（$\chi_{\rm spin}$）と軌道磁化率（$\chi_{\rm orb}$）。実線は理論値。(b) $1/T_1T\chi^2_{\rm spin}$ の温度（T）依存性。T_1 はスピン–格子緩和時間。(c) α-$(BETS)_2I_3$ における電磁双対性。電気伝導度（$\sigma_{\rm dc}$）と $-\chi_{\rm orb}T$ は広い温度領域でスケールされる。

3.1.2　熱応答・熱電応答の理論

Sommerfeld-Bethe 関係式の成立範囲とフォノンドラッグの理論

温度差により電圧が生じる現象としてゼーベック効果が知られている。これについてはボルツマン方程式による Sommerfeld-Bethe 関係式が知られているが、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 種類あり、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。[27, 28] このことを利用して、低温で非常に大きなゼーベック効果を示す近藤絶縁体 $FeSb_2$ を解析した。$FeSb_2$ では、不純物バンドが重要な役割を果たしていると考えられるが、この効果はボルツマン方程式では捉えることができない。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、フォノンドラッグを記述できる線形応答理論を用いて微視的にゼーベック係数を解析し、実験でみられる巨大なゼーベック効果が理解できることを示した。[27, 37]

強磁性ホイスラー合金 $Fe_2V_{0.8}W_{0.2}Al$ での巨大熱応答効果:マグノンドラッグ機構

強磁性ホイスラー合金 $Fe_2V_{0.8}W_{0.2}Al$ は、大きなパワーファクターに由来した巨大熱応答効果 (無次元性能指数 “ZT”~5) を示す。しかし、この熱応答効果の起源は十分に理解されていない。そこで、不

純物バンドとフォノンドラッグの協奏により巨大熱応答を示す $FeSb_2$ との類似性に着目し、タングステン由来の不純物バンドとマグノンドラッグの協奏による熱応答効果を線形応答理論を用いた微視的熱応答理論により調べた。その結果、実験で観測された巨大なパワーファクターはこの協奏により理解できることを明らかにした。[4]

$MoTe_2$ でのゼーベック係数の符号反転の理論:極性フォノンドラッグ機構

極性金属として近年注目されている $MoTe_2$ は、低温でゼーベック係数の符号反転が現れる。これまでモット公式を用いた理論研究等によりゼーベック係数が議論されてきたが、この符号反転の起源は明らかにされていなかった。そこで本研究では、$MoTe_2$ の低エネルギーに存在する極性フォノンと電子との相互作用によるフォノンドラッグ機構「極性フォノンドラッグ機構」をザイマンの変分法を用いて構築し、その機構によるゼーベック効果を研究した。その結果, 極性フォノンドラッグ機構のウムクラッププロセスによりゼーベック係数の符号反転が理解できることを明らかにした。[48]

ゼーベック係数に関するパラマグノンドラッグの理論

最近、ホイスラー合金などの強磁性転移温度付近でゼーベック係数が特異な振る舞いを示す現象が報告されている。これはスピンゆらぎ、いわゆるパラマグノンによる効果と考えられているが、その効果の微視的な理論からの定量的評価はいままでなされていなかった。そこで、線形応答理論によりパラマグノンドラッグに対応するゼーベック係数の振る舞いを調べ、その振る舞いがバンド構造によって大きく変化することを示し、大きなゼーベック係数を得るバンド構造の一般的条件を導いた。[52]

エキシトニック絶縁体の熱伝導

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絶縁体と呼ばれる。エキシトンは電荷をもたないがエネルギーを持つため、電流には寄与しないが熱流には寄与する。このため従来の理論とは異なる熱応答を示す可能性がある。実際、エキシトニック絶縁体の候補物質である $TmSe_{0.45}Te_{0.55}$ において、低温での熱伝導率の特異な振る舞いが報告されている。我々はこのエキシトニック絶縁体の熱伝導率について理論的に計算した。Sommerfeld-Bethe 関係式が成立すると特異な振る舞いは現れないが、相互作用を正しく取り入れた熱流演算子を用いることによって Sommerfeld-Bethe 関係式を破る寄与が現れることが分かった。これは、エキシトニック絶縁体特有の寄与である。[17, 44]

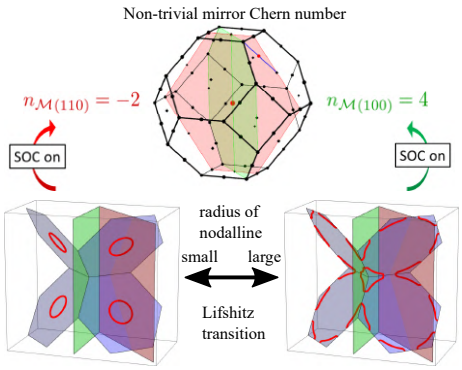


図 3.1.2: ノーダルラインの経路とミラーチャーン数の関係

3.1.3 トポロジカル物質の理論

ディラックノーダルラインとトポロジカル結晶絶縁体

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、Z_4 指数や、より一般の結晶対称操作について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、従来の手法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) [10, 11, 31, 33]

バルクの物理量に現れるノーダルライン物質の特徴

ノーダルライン物質は「ドラムヘッド表面状態」と呼ばれる特徴的な表面状態を持つが、この表面状態が出現するか否かは表面の詳細に依存する。そのため、バルクの物理量を用いてノーダルライン物質の特徴を捉えることが必要である。我々は、新たな視点として、軌道磁化率とホール伝導度に着目して計算を行った。その結果、この 2 つの物理量にはノーダルライン物質特有の特異的な化学ポテンシャル依存性が現れることを明らかにした。また、この特異的振る舞いは波数空間内でのノーダルラインの配置に対応して強い磁場角度依存性を示すことも明らかにした。この結果は、実験によるノーダルラインの有無の判定、およびその波数空間内での配置の決定を可能にする (図 3.1.3)。[12, 50, 56, 8]

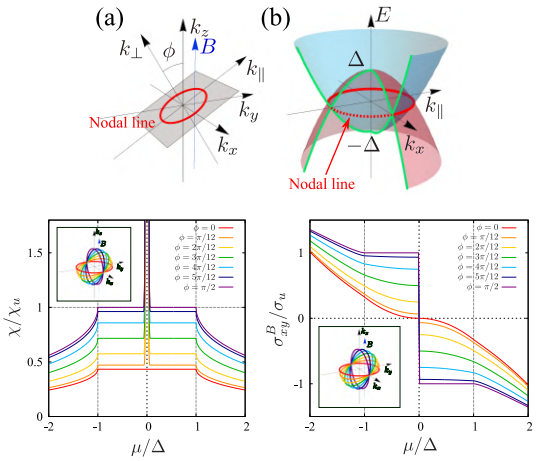


図 3.1.3: 上) ノーダルラインの概形と磁場に対する配置。下) 軌道磁化率 (左) とホール伝導度 (右) の化学ポテンシャル・磁場角度依存性。ノーダルラインが磁場に平行なとき、軌道磁化率にはデルタ関数的、ホール伝導度には階段関数的な振舞いが見られる。

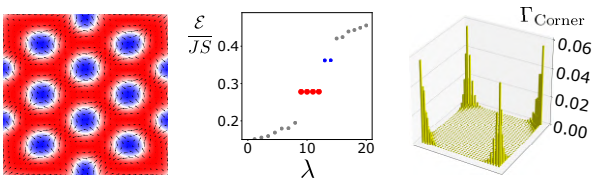


図 3.1.4: 左) 有限系におけるアンチスカーミオン結晶の古典スピン基底状態。半月型の分数スカーミオンが端で安定化している。中央) マグノンのエネルギースペクトル。バルクモード (灰色) から離れたギャップ間にコーナー状態 (赤色) とエッジ状態 (青) が現れる。右) コーナー状態の波動関数の実空間確率分布。

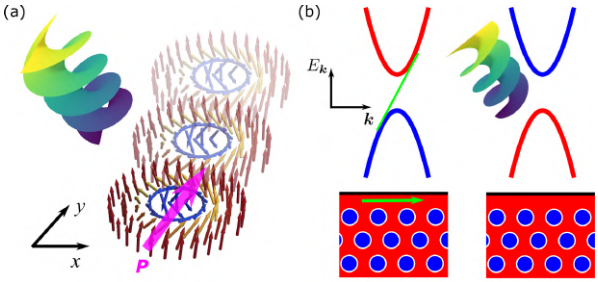


図 3.1.5: 左) 電気磁気効果により円偏光レーザー下で駆動されるスカーミオン。P は電気分極を意味する。右) 円偏光レーザーによって起きるフロケマグノンのトポロジカル相転移。

アンチスカーミオン結晶におけるマグノン高次トポロジカル絶縁体

反転対称性を持たない磁性体では強磁性的な交換相互作用とジャロシンスキー守谷相互作用の競合により、整数のトポロジカル電荷で特徴づけられる磁性スカーミオンが安定となる。磁性スカーミオンは六回回転対称性を持つ周期的な構造を形成する。このような複雑なスピン構造は磁気励起モード (マグノン) に対して創発磁場を与えるため、磁性スカーミオン結晶はマグノンのバンド構造においてトポロジカルに非自明な性質をもたらす。我々はマグノンの四重極モーメントを導入することで、マグノンのトポロジカル相をより高次のトポロジーへと拡張した。とくに磁性スカーミオン結晶が非自明なマグノンの四重極モーメントにより特徴づけられることを発見し、そのバルク・境界対応としてトポロジカルに保護されたコーナー状態が現れることを明らかにした。さらに、このコーナー状態を得るためには、端に局在する分数アンチスカーミオンが低磁場で安定下することが重要であると示した (図 3.1.4)。[1, 9, 30, 41]

テラヘルツレーザーによるスカーミオンの駆動とトポロジカル相転移

円偏光のテラヘルツレーザーを照射した場合のスカーミオン結晶の古典スピンダイナミクスを議論した。電気磁気効果を含めるためにマルチフェロイクス絶縁体に着目した。実際のマルチフェロイクス物質に基づいたモデルを用いて、面内に電気分極を持つスカーミオンがレーザーによって駆動されることを明らかにした。また、円偏光のレーザーが作る有効磁場によってマグノンのトポロジカル相転移が起きることを示した (図 3.1.5)。同時に、非平衡定常状態からの励起としてフロケマグノンを新たに定式化し、そのバンド構造を計算することで古典スピン系の結果と良く一致していることを確認した。[1, 30]

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 (図 3.1.6)。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。[15]

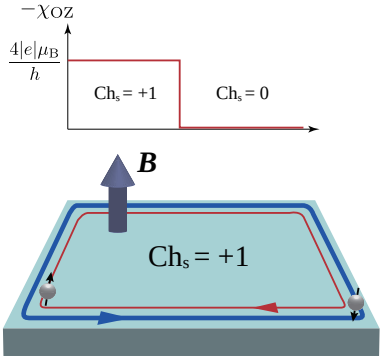


図 3.1.6: 上) トポロジカル秩序と軌道ゼーマン交差項の関係。トポロジカル相転移に伴うジャンプの大きさは普遍的な物理定数により決まる。下) 磁場下でのエッジ電流。上向きスピンと下向きスピンの電流が異なり、スピンと電流が絡んだ磁気応答が起こる。

3.1.4 軌道磁場効果

磁場下の電気伝導度

グリーン関数の方法を用いて磁場下の電気伝導度の一般公式を求め、不純物散乱の効果が弱い領域で評価した。縦伝導度（磁気抵抗）やホール係数の最低次は古典的なボルツマン方程式の結果を再現するが、より高次の寄与において、ベリー曲率や軌道磁気モーメントの効果が現れることを明らかにした。さらに、この結果を用いて傾いたワイル半金属の伝導度を議論した。[6, 38, 40, 47]

擬一次元系における軌道帯磁率

2 次元および 3 次元系における軌道磁性は長年にわたって研究されてきたが、軌道磁性はラダー系などの擬一次元系でも起こる。しかし、このことはこれまであまり注目されてこなかった。理由の一つは福山公式とよばれる帯磁率公式が、並進対称性が破れた系ではそのままの形で適用できなかったことにある。そこで我々は 1 方向のみに並進対称性がある系において磁場を導入し、摂動計算を行うことで、擬一次元系にも適用できる帯磁率公式を導出した。この結果は Peierls 位相による簡易的な手法による結果に比べて、反磁性成分が大きく出る傾向があることがわかった。これは原子内のラーモア反磁性を正しく取り入れているためと考えられる。[43]

3.1.5 有機伝導体

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 α-$(BEDT\text{-}TTF)_2I_3$ における傾いた Dirac cone に対して光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、円偏光レーザーを照射したときは Chern 絶縁体への相転移が起こることを予言した。また直線偏光を照射した場合は、2 つの Dirac 点が近づき、さらに強度の増大に伴い対消滅することを予言した。この対消滅現象は光照射によりトランスファー積分の繰り込みが起こることに起因する。[2, 18, 19, 32, 35, 45, 51]

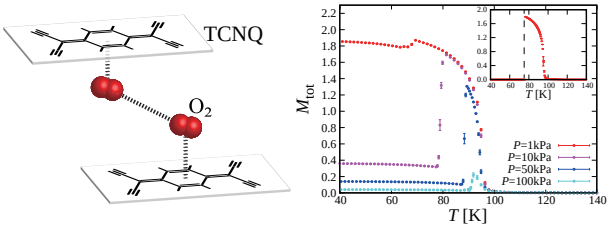


図 3.1.7: (左) 酸素分子を介した TCNQ スピン間に磁気的相互作用、(右)$[Ru_2]_2$-TCNQ の磁化の温度変化

金属有機構造体における気体吸着に伴う磁気制御

Ru 錯体と TCNQ 誘導体から成る金属有機構造体 $[\{Ru_2(3,5\text{-}F_2PhCO_2)_4\}_2\{TCNQ(MeO)_2\}]$ に酸素を吸着させることで磁気制御が可能であるという報告がある。我々は通常のスピンモデルに酸素吸着の効果を取り入れた有効模型を構築することで、実験で観測される特徴的な磁化過程を再現し、酸素雰囲気下での二度の相転移の温度スケールと、その微視的な起源を明らかにした (図 3.1.7)。本研究のモデルは、その簡単さ故、吸着と磁性の融合分野の基礎的なモデルとなることが期待される。[3, 20, 36, 46, 53]

3.1.6 スピン系およびスピン軌道相互作用

Pr 系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が、確固たる証拠を見出すことは難しい。我々は「磁歪」がスピン液体相の新たな検出プローブとして有用であることを理論的に提案した。Pr の系では結晶場基底状態が non-Kramers 二重項で記述され、双極子自由度のほかに四極子自由度が活性化する。このため、パイロクロア上の一般のスピンモデルでは、U(1) 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見出される。我々は、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示すことを見出した。[13]

Dipolar/Octupolar 系でのスピン液体の判別

Dipolar/Octupolar 二重項は特異な Kramers 二重項であり、Ce や Nd の系で発現する。この系では、通常のスピンに対応する双極子に加えて、高次の多極子である八極子も活性となる。この時、spin ice の配置を担うモーメントとして双極子と八極子の二通りが考えられ、量子効果を取り入れると双極子スピン液体と八極子スピン液体の可能性がある。これまでの手法ではこの両者を区別するのは困難であったが、我々は、磁歪の理論を拡張し、両スピン液体では磁歪の応答が大きく異なることを示した。これによって区別が可能である。[14, 34]

＜受賞＞

[1] 廣澤智紀、理学系研究科研究奨励賞。理学系研究科、2021 年 3 月 19 日。

[2] 北山圭亮、理学系研究科研究奨励賞。理学系研究科、2021 年 3 月 19 日。

[3] 加藤将貴、宇田川将文、徳宿邦夫、松浦弘泰、小形正男：日本物理学会（秋季大会）、オンライン開催 学生優秀発表賞

＜報文＞

(原著論文)

[4] H. Matsuura, M. Ogata, E. Bauer, and T. Mori: in preparation. “Theory of huge thermoelectric effect based on magnon drag mechanism: Application to thin-film Heusler alloy”

[5] S. Fujiyama, H. Maebashi, N. Tajima, T. Tsumuraya, H.-B. Cui, M. Ogata, and R. Kato: preprint. “Large diamagnetism and electromagnetic duality in two-dimensional Dirac electron system”

[6] V. Könye and M. Ogata: arXiv:2006.15882 (2020). “Microscopic theory of magnetoconductivity at low magnetic fields in terms of Berry curvature and orbital magnetic moment”

[7] Y. Suzumura and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 044709 (2021). “Anomalous conductivity of two-dimensional Dirac electrons in organic conductor under pressure”

[8] Y. Suzumura, R. Kato, and M. Ogata: Crystals **10**, 862 (2020). “Electric transport of nodal line semimetals in single-component molecular conductors”

[9] T. Hirosawa, S. A. Díaz, J. Klinovaja, and D. Loss: Phys. Rev. Lett. **125**, 207204 (2020). “Magnonic quadrupole topological insulator in antiskyrmion crystals”

[10] I. Tateishi: Phys. Rev. Research **2**, 043112 (2020). “Mapping rules from nodal line semimetal to topological crystalline insulator in face centered cubic lattice”

[11] I. Tateishi: Phys. Rev. B **102**, 155111 (2020). “Nodal lines and mapping to mirror Chern numbers in Ca_2As family”

[12] I. Tateishi, V. Könye, H. Matsuura, and M. Ogata: arXiv: 2103.05591 (2021). “Characteristic singular behaviors of nodal line materials emerging in orbital magnetic susceptibility and Hall conductivity”

[13] A. S. Patri, M. Hosoi, S. Lee, and Y. B. Kim: Phys. Rev. Research **2**, 033015 (2020). “Theory of magnetostriction for multipolar quantum spin ice in pyrochlore materials”

[14] A. S. Patri, M. Hosoi, and Y. B. Kim: Phys. Rev. Research **2**, 023253 (2020). “Distinguishing dipolar and octupolar quantum spin ices using contrasting magnetostriction signatures”

[15] S. Ozaki, and M. Ogata: Phys. Rev. Research **3**, 013058 (2021). “Universal quantization of the magnetic susceptibility jump at a topological phase transition”

[16] S. Ozaki, and H. Nakazato: arXiv:2103:08257 (2021). “Analytic approach to dynamics of the resonant and off-resonant Jaynes-Cummings systems with cavity losses”

[17] S. Takarada, M. Ogata, and H. Matsuura: arXiv:2104.03604 (2021). “Theory of thermal conductivity on excitonic insulator”

[18] K. Kitayama, and M. Mochizuki: Phys. Rev. Research **2**, 023229 (2020). “Predicted photo-induced topological phases in organic salt α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$”

[19] K. Kitayama, M. Mochizuki, Y. Tanaka, and M. Ogata: in preparation. “Predicted photoinduced pair annihilation of emergent antiparallel magnetic fluxes in organic salt α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$”

[20] M. Kato, K. Tokushuku, H. Matsuura, M. Udagawa, and M. Ogata: arXiv:2104.04166 (2021). “Magnetic switching by oxygen adsorption in metal-organic framework systems”

[21] 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”

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

[23] N. T. Cuong, I. Tateishi, M. Cameau, M. Niibe, N. Umezawa, B. Slater, K. Yubuta, T. Kondo, M. Ogata, S. Okada, and I. Matsuda: Phys. Rev. B **101**, 195412 (2020). “Topological Dirac nodal loops in nonsymmorphic hydrogenated monolayer boron”

[24] M. Hosoi, T. Mizoguchi, T. Hinokihara, H. Matsuura, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **89**,

074702 (2020). “Dzyaloshinskii-Moriya Interaction between Multipolar Moments in $5d^1$ Systems”

(会議抄録)

[25] 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”

[26] H. Yokoyama, K. Kobayashi, T. Watanabe, M. Ogata: J. Phys. Conf. Ser. **1590**, 012016 (2020). “Insulator-to-superconductor transition by exciting half-filled d-wave pairing state beyond Mott gap”

(国内雑誌)

[27] 松浦弘泰、前橋英明、小形正男、福山秀敏：固体物理 **55**, 325 (2020). “フォノンドラッグによるゼーベック効果-Boltzmann 理論を超えて-”

[28] 山本貴博、小形正男、福山秀敏：日本物理学会誌 **76**, 202 (2021). “熱電応答理論の最近の発展とその応用”

(学位論文)

[29] Viktor Könye：“Microscopic Theory of Thermoelectric Transport in Magnetic Fields: Application to Dirac Systems” （東京大学大学院理学系研究科・博士論文）

[30] 廣澤智紀：“Topological properties of magnon excitation in magnetic skyrmion systems” (磁性スカーミオン系のマグノン励起とそのトポロジカルな性質) （東京大学大学院理学系研究科・博士論文）

[31] 立石幾真：“Study of diagnostic methods of nodal line semimetals and an intrinsic link to topological crystalline insulators” (ノーダルライン半金属の判別手法とトポロジカル結晶絶縁体への接続に関する研究) （東京大学大学院理学系研究科・博士論文）

[32] 北山圭亮：“Floquet theory of photo-induced topological phase transitions in organic conductors” (フロケ理論を用いた有機導体における光誘起トポロジカル相転移の理論研究) （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

[33] I. Tateishi: APS March Meeting (online, March 15-19, 2021). “Mapping rules from nodal line semimetal to topological crystalline insulator in face centered cubic lattice”

[34] A. S. Patri, M. Hosoi, and Y. B. Kim: APS March Meeting (online). ”Distinguishing dipolar and octupolar quantum spin ices”

[35] K. Kitayama, Y. Tanaka, M. Ogata, and M. Mochizuki: APS March Meeting (online). “Predicted pair annihilation of emergent antiparallel magnetic fluxes in an organic conductor”

[36] M. Kato, M. Udagawa, H. Matsuura, K. Tokushuku, and M. Ogata, APS March Meeting (online). “Control of magnetism by oxygen adsorption in magnetic sponge materials”

招待講演

[37] M. Ogata: 2021 TMS Annual Meeting & Exhibition (Orlando, Florida, USA, on-line, March 14–18, 2021). “Effect of Phonon Drag on Seebeck Coefficient Based on Linear Response Theory”

(国内会議)

一般講演

[38] 小形正男、V. Könye：日本物理学会、熊本大学予定（Online） 2020, 9.8–9.11 (秋季大会) “弱磁場磁気抵抗：一般論とディラック系への応用”

[39] 藤山茂樹, 前橋英明, 崔亨波, 圓谷貴夫, 小形正男, 加藤礼三：日本物理学会 (秋季大会 online). “常圧二次元ディラク電子系 α-$(BETS)_2I_3$ の軌道磁性”

[40] V. Könye and M. Ogata: 日本物理学会 (秋季大会 online). “Microscopic theory of magnetoconductivity at low magnetic fields in terms of Berry curvature and orbital magnetic moment ”

[41] 廣澤智紀, Sebastián A. Díaz, Jelena Klinovaja, and Daniel Loss：日本物理学会 (秋季大会 online). “アンチスカーミオン結晶におけるマグノン高次トポロジカル絶縁体”

[42] 立石幾真、Benjamin J. Wieder：日本物理学会 (秋季大会 online). “面心立方格子におけるノーダルライン半金属とトポロジカル結晶絶縁体”

[43] 尾崎壮駿、小形正男：日本物理学会 (秋季大会 online). “擬一次元系における軌道磁性”

[44] 寶田真太、小形正男、松浦弘泰：日本物理学会 (秋季大会 online). “励起子絶縁体の熱伝導率に関する理論的研究 II”

[45] 北山圭亮、望月維人：日本物理学会 (秋季大会 online). “有機導体 α-$(BEDT\text{-}TTF)_2I_3$ の光誘起トポロジカル相転移の理論研究”

[46] 加藤将貴、宇田川将文、徳宿邦夫、松浦弘泰、小形正男：日本物理学会 (秋季大会 online). “金属有機錯体表面における酸素吸着に誘起された磁気競合効果と 2 次元古典スピン液体形成” (学生優秀発表賞)

[47] V. Könye、小形正男：日本物理学会、東京大学予定（Online） 2021, 3.12–3.15 (年次大会) “ベリー曲率と軌道磁気モーメントに関連した低磁場極限での磁気抵抗”

[48] 松浦弘泰、高橋英史、小形正男：日本物理学会 (年次大会 online). “$MoTe_2$ における熱電効果の理論的研究”

[49] 前橋英明、藤山茂樹、小形正男：日本物理学会 (年次大会 online). “二次元ディラック電子系の電磁双対性：大きな軌道反磁性と量子化されたコンダクタンスを結ぶ関係”

[50] 立石幾真, Viktor Könye, 松浦弘泰, 小形正男：日本物理学会 (年次大会 online). “ノーダルライン半金属におけるホール伝導度と磁場角度依存性”

[51] 北山圭亮、田中康寛、小形正男、望月維人：日本物理学会 (年次大会 online). “有機導体における創発的反平行磁束量子ペアの光誘起対消滅の理論予言”

[52] 遠藤純矢、松浦弘泰、小形正男：日本物理学会 (年次大会 online). “熱電現象におけるパラマグノンドラッグの理論”

[53] 加藤将貴、宇田川将文、松浦弘泰、徳宿邦夫、小形正男：日本物理学会 (年次大会 online). “金属有機構造体の酸素吸着による磁気制御”

招待講演

[54] 前橋英明：科研費合同研究会「分子性導体でみられる異常軌道磁化率の研究会」(東京大学 2020, 7.29, online) “常圧二次元ディラック電子系 α-$(BETS)_2I_3$ の軌道磁性：理論の立場から”

[55] 立石幾真：日本表面真空学会関東支部講演大会 (2021.4.3, online) “二次元系におけるトポロジカル物質と結晶群対称性:単層ホウ素シートの理論的研究”

(セミナー)

[56] I. Tateishi, V. Könye, H. Matsuura and M. Ogata: ITF seminar (Dresden, November 17, 2020). “Nodal Line Semimetals in Magnetic Fields”

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。

3.2.1 データ同化結晶構造探索手法の開発

化学組成から計算機シミュレーションにより安定な結晶構造を予測することは、計算物質科学の重要な課題の一つである。これまでに徐玲法、ランダムサンプリング、遺伝的アルゴリズム (GA)、粒子群最適化法 (PSO) など、さまざまな手法が提案されており、とくに GA と PSO は、超高圧下での水素を含む高温超伝導体の予測などで近年目覚ましい成果を挙げている。ただしこれらの手法が使えるのは、ユニットセルに含まれる原子が比較的少数で、構造の自由度が少ない場合である。

そこで我々は、より原子数が多い系でも効率的に構造探索が可能な手法を目指して、X 線や中性子の回折実験データを利用したデータ同化構造探索手法の開発を進めている。たとえばダイヤモンドアンビルセルを用いた超高圧実験のように、観測できる X 線回折ピークの角度範囲が限られていたり、試料の質や量の問題でノイズが大きく明確に観測できるピークが限定されたりといった理由で、回折実験だけでは結晶構造が決定できない場合に、実験で得られた回折データを用いてベイズの定理により計算機シミュレーションによる探索に拘束を加え、構造探索を加速する手法である。これまで回折ピークの角度範囲が限定される場合について、手法開発とその有効性の確認を行ってきた。

今年度は、ノイズが非常に大きい場合にも適用できるよう手法を改良し、その有効性を示した。またデータ同化における実験データの重みに相当するハイパーパラメータの最適値について検討し、未知物質に応用するための指針を得た（図 3.2.1)。X 線をほとんど散乱しない水素原子を多く含む系でも、手法の有効性を確認した。またデータ同化手法を用いて、量研機構、東北大学らが高圧合成に成功した、新しい金属水素化物の構造探索を行なった [15] 。

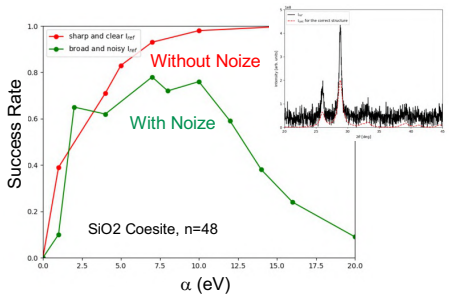


図 3.2.1: ノイズあり X 線回折実験データ（挿図）を用いた SiO_2 (Coesite、原子数 48 個）のデータ同化構造探索の成功率。データ同化の重みに相当するパラメータ（α）を変えてノイズの有無による成功率を調べると、適正な α を用いれば、ノイズありの場合も十分高い成功率になることがわかる。

3.2.2 圧力誘起高温超伝導体 YH_6 の電子状態

2015 年に発見された硫化水素の高圧超伝導相 (H_3S) を皮切りとし、水素化合物における高温超伝導の探索が近年急速に進んでいる。その中でイットリウムと水素が圧力下で形成する水素化物相が転移温度 K の超伝導を示すことが発見された。明石はこのイットリウム水素化物における電子状態の解析を行った。観測された結晶構造から理論的に想定される超伝導 Tc を密度汎関数理論により見積もり、実験値と比較した（図 3.2.2)。結果、実験値は理論に見積もられた値より 60K ほど高く出ていることが示され、従来のフォノン機構理論では説明出来ない超伝導機構が関与している可能性が示唆された。本研究は論文として出版された [11]。

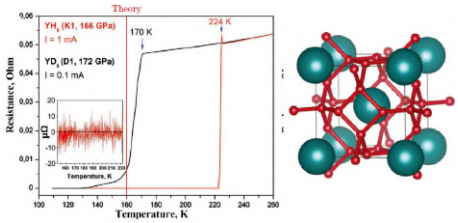


図 3.2.2: (左) イットリウム水素化物高圧相における抵抗測定。黒線は同位体についてのもの。縦線で理論値を示した。(右) 特定された結晶構造。大きな球と小さな球は各々イットリウム原子と水素原子を示す。

3.2.3 電子フォノン結合定数の Wannier 解析

フォノン媒介ペアリング機構に起因する超伝導の転移温度を決定するのは電子-フォノン相互作用の強さである。これを特徴付ける量として電子-フォノン結合スペクトルがあるが、従来この量は同一のエネルギーを持つ全ての電子軌道・フォノンの寄与を積分したものとして定義される。ペアリング機構をより詳しく解析する手法として、明石は結合スペクトルのうち、特定の電子の局在軌道および原子振動に起因する寄与を分解する方法を考案し、イットリウム化合物超伝導体 $Y_2X_2C_2$ (X=ハロゲン) に適用した（図 3.2.3)。この物質の転移温度はハロゲン原子種の置換により大きく変化する。新手法により、ハロゲン置換は超伝導電子が存在する領域の結晶構造を微妙に変化させ、これが Tc 上昇をもたらすという機構が解明された。

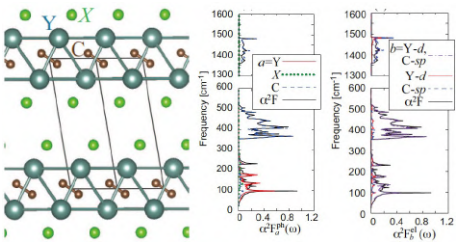


図 3.2.3: (左) $Y_2X_2C_2$ の結晶構造。C_2 を内包した Y の 2 次元構造が超伝導を示す。(中・右) 電子-フォノン結合スペクトル関数の軌道・振動分解。ハロゲン原子の振動の寄与 (中、ドット線) はほとんどゼロであり、またそのほとんどはハロゲン以外の原子軌道による寄与 (右、ドット点線) であることがわかる。

3.2.4 第一原理計算に向けた Floquet 理論の再検討

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が、Floquet 系の固有状態のもつエネルギー（擬エネルギー）は変分原理に従わないことや、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る。本研究で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「平均エネルギー」を導入し、それ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 [2]。以上の結果は、今後 Floquet 理論を第一原理計算に拡張する際の基盤となる成果である。

3.2.5 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)。我々はこの手法を遷移金属単体 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 [4]。

3.2.6 $LiCB_9H_{10}$ 超イオン伝導体の Li 伝導機構

$LiCB_9H_{10}$ は全固体型 Li イオン電池の電解質の有力な候補材料である。この材料系は CB_9H_{10} 錯体の無秩序化 (回転運動) により高い Li イオン伝導度を示していると実験的に考えられているが、具体的な関係性は明らかでない。そこで、第一原理分子動力学計算及びニューラルネットポテンシャル分子動力学計算によりこの関係性について議論した。第一原理分子動力学計算より、Li は錯体の回転に応じて輸送されていることが明らかになった。また、ニューラルネットポテンシャル分子動力学計算で得られる Li 拡散係数と錯体の回転の緩和時間には強い相関があり、回転頻度の 2 桁程度の上昇に対して Li 拡散係数が 3 桁程度と飛躍的に上昇する様子が確認された。すなわち、錯体の無秩序化のようなエントロピーの変化のみで実験に見られるような Li 伝導の飛躍的上昇を説明可能であることが明らかになった。

3.2.7 相対論的密度汎関数理論の構築と超重元素の電子状態

近年, 原子力研究開発機構のタンデム加速器において、アクチノイドの最後の元素であるローレンシ

ウムのイオン化エネルギーが測定され, 他のアクチノイド元素に比べて非常に小さいことがわかった。また, 他のランタノイド・アクチノイド元素は, アクチノイド元素のほうがイオン化エネルギーが大きいが、ローレンシウムのイオン化エネルギーは、ランタノイドの最後の元素であるルテチウムよりも小さな値であることがわかった。このローレンシウムのイオン化エネルギーの特異的なふるまいは、相対論効果によって引き起こされていると説明されている。このように, 超重元素や, それに近い領域の原子の電子状態は, 相対論効果が無視できないことが知られている。

本研究では、これらの原子の電子構造を理解するため、相対論的密度汎関数理論を開発した。Dirac 方程式から生じる相対論効果だけでなく、光速が有限であることに起因する Coulomb 力に対する補正項 (Breit 補正) を電子間相互作用に取り込むことで、すべての $O\left(1/c^2\right)$ の相対論補正を密度汎関数理論に取り込むことに成功した [8]。本手法を用いてルテチウムとローレンシウムの電子構造を計算したところ、非相対論的な計算では, 双方とも最外殻電子が d 軌道である一方、本手法の計算結果では、ルテチウム、ローレンシウムの最外殻電子がそれぞれ d, p 軌道であることがわかり、波動関数理論で確認されていた最外殻電子軌道の差異を、密度汎関数理論でも再現することが可能となった。

3.2.8 電子系における密度汎関数の, 原子核密度汎関数理論への応用

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

密度汎関数理論は、電子系のみならず原子核構造研究にも広く使われているが、原子核密度汎関数理論では, 電磁気力の交換項は局所密度近似 (LDA) で取り扱われていた。本研究では、更に陽子・中性子が有限電荷分布を持つことによる効果や、原子の計算で広く使われている真空偏極の効果を取り込んで計算を行った [6]。その結果、核子の有限電荷分布や真空偏極の効果は、求める計算精度よりも大きな寄与を与えることがわかり、無視できないことがわかった。

3.2.9 汎関数くりこみ群を用いた相関密度汎関数の構成

密度汎関数理論の計算精度は, 交換相関密度汎関数の精度に依存することが知られている。最も簡単なレベルの近似である局所密度近似 (LDA) でも多くの密度汎関数計算の成功が報告されているものの、相関密度汎関数は、解析的な表式が得られていない。今までの相関密度汎関数は、量子モンテカルロ計算によって計算された一様電子ガスの相関エネルギーを再現するように、何らかの関数の係数を決定していた。これに対して近年、場の量子論で広く使われる汎関数くりこみ群の手法を密度汎関数理論に援用する手法 (FRG-DFT) が提唱された。

本研究 [12] では、FRG-DFT を次元一様電子ガスに適用し、相関エネルギーを高精度計算することに成功した。本研究が、FRG-DFT の 3 次元系への初めての適用である。FRG-DFT は量子モンテカルロ計算に比べ、計算コストが非常に低いため、多くの密度 (Wigner-Seitz 半径) に対して相関エネルギーが計算できる。結果として、何らかの関数にフィッティングした相関エネルギーを用いること無く、数表を参照することで密度汎関数計算を実行することが可能となった。

3.2.10 電子温度に依存する原子間ポテンシャルの機械学習による構築

レーザによる金属加工は、医療器具・電子デバイスの加工をはじめとする幅広い用途に使用されている。近年、熱的損傷を伴わない非熱的レーザー加工が注目されている。我々は第一原理計算の結果に基づき、金属の非熱的レーザー加工においては、非平衡条件で励起された電子のエントロピーの寄与が支配的な役割を担っているとする「電子エントロピー誘起機構」を提案してきた。またこの機構の正当性を議論し、金属微細加工の物理現象を原子スケールから理解するために、電子温度に対する連続体モデルと原子の古典分子動力学計算を組み合わせた、マルチスケールシミュレーション手法を開発してきた。このシミュレーションで必要な電子温度に依存した原子間相互作用ポテンシャルモデルは、金属系でよく使われるモデルポテンシャルのパラーメータに電子温度依存性を持たせたものを用いてきたが、パラメータや関数系に任意性があり手間がかかる点が、今後様々な物質に応用する上での問題であった。そこで今年度は、近年広く使われ始めたニューラルネットワークを用いた原子間力ポテンシャルモデル (NNP) に電子温度依存性をとりいれる手法を開発した。得られた電子温度依存 NNP は広い範囲の電子温度で利用可能で、テスト計算により、電子エントロピー誘起機構による原子脱離をシミュレーションできることが示された [16]。

3.2.11 電子格子強結合極限における第一原理計算手法の開発

電子フォノン結合系の強結合領域での超伝導機構として, バイポーラロン超伝導が知られている。強結合系では電子がまわりのイオン雲をまといながら動くポーラロンが実現する。このポーラロン二つがペアを組む (バイポーラロン) ことで超伝導が発現するという、バイポーラロン超伝導機構が提案されている。バイポーラロン超伝導は、典型的な弱結合超伝導

とは逆の極限においてのみ適用可能な理論によって議論されてきたが、弱結領域からの移り変わりを統一的に記述する試みとして 那須奎一郎氏の理論 (Phys. Rev. B 37, 5075 (1988)) が知られている。この理論はホルシュタインモデルを経路積分形式で扱うことで、弱結合領域の BCS 型の超伝導と強結合領域のバイポーラロン超伝導を内挿する理論である。我々はその第一原理計算への拡張を考え、この理論で超伝導転移温度を導出するために扱う自己無撞着方程式の数値的な振る舞いを詳しく調べてきた。その結果、先行研究では言及されなかった複数の数値的不安定性を見出した [17]。

＜受賞＞

[1] 内藤智也、A3F-CNSSS20 Young Scientist Award、東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター (19th A3F-CNS Summer School)、2020 年 8 月 21 日.

＜報文＞

(原著論文)

[2] C. M. Le, R. Akashi, and S. Tsuneyuki "Defining a well-ordered Floquet basis by the average energy" Phys. Rev. A 102, 042212 (2020)

[3] M.Kawamura, Y. Hizume, T. Ozaki, Benchmark of density functional theory for superconductors in elemental materials Phys. Rev. B 101, 134511 (2020).

[4] K.Tsutsumi, Y. Hizume, M.Kawamura, R. Akashi, S. Tsuneyuki, Effect of spin fluctuations on superconductivity in V and Nb: A first-principles study Phys. Rev. B 102, 214515 (2020).

[5] Z. Wang, T. Naito, H. Liang, and W. H. Long. Self-consistent random-phase approximation based on the relativistic Hartree-Fock theory: Role of ρ-tensor coupling. Phys. Rev. C 101, 064306 (2020).

[6] T. Naito, X. Roca-Maza, G. Colò, and H. Liang. Effects of finite nucleon size, vacuum polarization, and electromagnetic spin-orbit interaction on nuclear binding energies and radii in spherical nuclei. Phys. Rev. C 101, 064311 (2020).

[7] M. Ciccarelli, F. Minato, and T. Naito. Theoretical study of Nb isotope productions by muon capture reaction on ^{100}Mo. Phys. Rev. C 102, 034306 (2020).

[8] T. Naito, R. Akashi, H. Liang, and S. Tsuneyuki. Relativistic density functional theory with finite-light-speed correction for the Coulomb interaction: a non-relativistic-reduction-based approach. J. Phys. B 53, 215002 (2020).

[9] Y. Tanabe, Y. Ito, K. Sugawara, M. Koshino, S. Kimura, T. Naito, I. Johnson, T. Takahashi, and M. Chen. Dirac Fermion Kinetics in 3D Curved Graphene. Adv. Mater. 32, 2005838 (2020).

[10] T. Naito, D. Ohashi, and H. Liang. How to Improve Functionals in Density Functional Theory? —Formalism and Benchmark Calculation—. J. Phys. Conf. Ser. 1643, 012149 (2020).

[11] Ivan A. Troyan, Dmitrii V. Semenok, Alexander G. Kvashnin, Andrey V. Sadakov, Oleg A. Sobolevskiy, Vladimir M. Pudalov, Anna G. Ivanova, Vitali B. Prakapenka, Eran Greenberg, Alexander G. Gavriliuk, Igor S. Lyubutin, Viktor V. Struzhkin, Aitor Bergara, Ion Errea, Raffaello Bianco, Matteo Calandra, Francesco Mauri, Lorenzo Monacelli, Ryosuke Akashi, Artem R. Oganov "Anomalous High‐Temperature Superconductivity in YH6" Adv. Mater. 2006831 (2021)

[12] T. Yokota and T. Naito. *Ab initio* construction of the energy density functional for electron systems with the functional-renormalization-group-aided density functional theory. Phys. Rev. Research 3, L012015 (2021).

(国内雑誌)

[13] 濱田幾太郎、常行真司「実験とシミュレーションのデータ同化に基づく効率的結晶構造決定」, セラミックス 第 56 巻 2 月号, 100 (2021).

[14] 常行真司「水素の先端計算による水素機能の高精度解析」, まてりあ 第 60 巻 第 3 号, 176 (2021).

(学位論文)

[15] 吉川誠司, A Noise-Robust Data Assimilation Method for Crystal Structure Prediction Using Powder Diffraction Intensity （結晶構造予測のための粉末回折強度を用いたノイズロバストデータ同化法）（東京大学、2021 年 3 月 博士（理学））

[16] 水口敦喜, Machine Learning Construction of Electron-Temperature-Dependent Interatomic Potential（電子温度に依存する原子間ポテンシャルの機械学習による構築）（東京大学、2021 年 3 月 修士）

[17] 天野智仁, On the Solutions of the Holstein Model with the Coherent Potential Approximation（ホルシュタインモデルにおける コヒーレントポテンシャル近似解法の検討） (東京大学、2021 年 3 月 修士)

(著書)

[18] 常行真司 「不完全な粉末回折実験データを用いたデータ同化結晶構造探索」 (「マテリアルズ・インフォマティクス開発事例最前線」第 3 編第 1 章第 2 節, pp.101-109)(エヌ・ティー・エス, 2021)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[19] T. Naito, G. Colò, H. Liang, and X. Roca-Maza. Effects of nucleon electric form factors to nuclear binding energy, The 19th A3F-CNS Summer School, Online (Center for Nuclear Study, The University of Tokyo), Aug. 20, 2020.

招待講演

[20] S. Tsuneyuki, Crystal structure prediction by assimilating incomplete powder diffraction data, Conference on a Fair Data Infrastructure for Materials Genomics (2-5 June, 2020, online).

[21] S. Tsuneyuki, First-principles material simulation and beyond, MANA International Symposium 2021 Jointly with ICYS (Keynote Lecture) (NIMS, Tsukuba, 2 Mar. 2021, online).

(国内会議)

一般講演

[22] 佐藤 龍平, 佐藤 豊人, 吉川 誠司, 本田 孝志, 大友 季哉, 折茂 慎一, 常行 真司: Li(CB9H10) 系の Li 輸送機構に関する分子動力学計算, 第 3 回ハイドロジェノミクス研究会, 2020 年 8 月 20-21 日

[23] 内藤智也, G. Colò, H. Liang, and X. Roca-Maza：「核子の電荷形状因子の原子核束縛エネルギーに対する影響」, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (素核宇), オンライン, 2020 年 09 月 15 日.

[24] 内藤智也：「r-process と量子多体問題と机上の空論と」, 星の錬金術から銀河考古学へ, オンライン (国立天文台), 2020 年 10 月 29 日.

[25] 内藤智也：「Second and Fourth Moments of Charge-density Distribution」, 76th DFT Meeting, オンライン (東京大学), 2021 年 02 月 22 日.

[26] 田邉洋一, 伊藤良一, 菅原克明, 越野幹人, 木村尚次郎, 内藤智也, イサック ジョンソン, 高橋隆, 陳明偉：「3 次元グラフェン構造体の電子物性」, 日本物理学会 2021 年 (第 76 回) 年次大会, オンライン, 2021 年 03 月 15 日.

[27] 横田猛, 内藤智也：「汎関数繰り込み群による電子系の相関エネルギー密度汎関数の構築」, 日本物理学会 2021 年 (第 76 回) 年次大会, オンライン, 2021 年 03 月 15 日.

[28] 内藤智也：「汎関数くりこみ群に基づいた密度汎関数理論による三次元電子ガス計算に基づく局所密度近似相関汎関数の 第一原理的構築」, 熱場の量子論とその応用 2020, オンライン (高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 理論センター), 2020 年 08 月 24 日.

[29] 横田猛, 内藤智也：「汎関数繰り込み群に基づいた密度汎関数理論による電子系の相関エネルギー密度汎関数の構築」, 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 2020」, オンライン (東京大学 物性研究所), 2020 年 12 月 21 日.

[30] R. Akashi, R. Arita, C. Zhang, K. Tanaka, and J. S. Tse: "Chemical Physics of Superconductivity in Layered Yttrium Carbide Halides From First Principles" 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 2020」 2020/12/21

[31] 日詰湧真、堤建太朗、河村光晶、明石遼介、常行真司：「遷移金属 V, Nb の超伝導におけるスピン揺らぎ効果の第一原理計算」, 物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会「計算物質科学の新展開 2020」, オンライン, 2020 年 12 月 21 日.

[32] 佐藤 龍平, 佐藤 豊人, 吉川 誠司, 本田 孝志, 大友 季哉, 折茂 慎一, 常行 真司: LiCB9H10 の Li 伝導機構に関する分子動力学計算, 日本物理学会 第 76 回年次大会 (2021), 2021 年 3 月 12-15 日

[33] 日詰湧真、明石遼介：「断熱接続公式に基づく超伝導密度汎関数理論」, 日本物理学会第 76 回年次大会, オンライン, 2021 年 3 月 15 日.

[34] Cm M. Le, R. Akashi, and S. Tsuneyuki: "Revisiting the Floquet Hartree-Fock method" 日本物理学会 第 76 回年次大会 2021/03/12-15.

[35] 水口敦喜, 明石遼介, 常行真司: 「レーザー誘起電子強励起状態での原子ダイナミクスを記述するニューラルネットワークポテンシャル」, 日本物理学会 第 76 回年次大会 2021/03/12-15.

招待講演

[36] 明石遼介: 「第一原理計算に基づく高圧下における水素化物超伝導体の研究」Online CMT seminars 2020 年 6 月 22 日

[37] 常行真司: 「不完全な粉末回折実験データを用いたデータ同化結晶構造探索」, 787th ASRC Seminar, 2020 年 7 月 14 日（JAEA 先端基礎研究センター, オンライン）.

[38] 内藤智也：「3D Graphene の電子状態—Tight-binding による理解—」, グラフェンの物理と数学 I, オンライン (新学術領域研究 "次世代物質探索のための離散幾何学"), 2020 年 07 月 18 日.

[39] 常行真司: 「計測とシミュレーションの水素データ同化」, 日本物理学会 2020 年秋季大会シンポジウム, 2020 年 9 月 10 日（オンライン）.

[40] 常行真司: 「マテリアルズインフォマティクスの近況について」、物性研究所研究会「物性科学におけるデータ科学の今と未来」, 2021 年 2 月 22 日（オンライン）

[41] 内藤智也：「密度汎関数理論を用いた原子・原子核の研究」, 原子物理と原子核物理をつなぐ勉強会, オンライン (東北大学 理学部天文学教室), 2021 年 02 月 25 日.

[42] 常行真司: 「計測とシミュレーションの水素データ同化」, 日本化学会第 101 春季年会シンポジウム, 2021 年 3 月 19 日（オンライン）.

[43] 内藤智也：「核子形状因子と原子核構造」, ELPH 研究会 C028 "電子散乱による原子核研究 —原子核の電荷密度・陽子・中性子の分布と半径—", オンライン (東北大学 電子光理学研究センター), 2021 年 03 月 19 日.

(セミナー)

[44] 内藤智也：「How Much Nucleon Form Factors Affect Nuclear Binding Energy?」, 酒見グループセミナー, オンライン (東京大学 大学院理学系研究科 附属原子核科学研究センター), 2020 年 06 月 26 日

[45] 内藤智也：「Coulomb 力と核力のアイソスピン対称性の破れ」, 核多体セミナー, オンライン (京都大学 理学部 物理学教室), 2020 年 11 月 06 日.

[46] 内藤智也:「Are Atoms Spherical?」, 酒見グループセミナー, オンライン (東京大学 大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター), 2020 年 11 月 09 日.

[47] 内藤智也:「Electronic Structure of 3D Graphene」, 中間子科学研究室セミナー, オンライン (理化学研究所 仁科加速器科学研究センター 中間子科学研究室), 2020 年 11 月 24 日.

[48] 内藤智也:「密度汎関数理論入門」, 第 49 回 核物理 × 物性セミナー, オンライン (千葉工業大学), 2020 年 12 月 12 日.

[49] 内藤智也:「Electronic Structure of 3D Graphene」, 加藤研セミナー, オンライン (理化学研究所 開拓研究本部 加藤ナノ量子フォトニクス研究室), 2021 年 01 月 26 日.

[50] 内藤智也:「密度汎関数理論入門」, 酒見グループセミナー, オンライン (東京大学 大学院理学系研究科 附属原子核科学研究センター), 2021 年 02 月 19 日.

[51] 内藤智也:「物性理論は原子核理論の夢を見るか? —原子核理論と物性理論のクロスオーバー—」, 第 39 回オンライン物性理論セミナー, オンライン (埼玉大学), 2021 年 02 月 22 日.

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、多体のシュレーディンガー方程式を完全に解くことはできない。そこで、対称性や量子相関など、もとの方程式の中に含まれてい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、モンテカルロ法などのサンプリング手法、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、量子スピン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、ダイナミクスの解明を目指している。さらに、量子コンピュータの基礎理論や量子機械学習アルゴリズムの研究、次世代大規模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。我々の提案した 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、テンソルネットワークをテンソルを頂点上だけでなく頂点を結ぶ線上にも置いた形に拡張することで、実空間くりこみ法の精度を、既存の同程度の計算時間を要する数値計算手法に比べて 100 倍程度高めることに成功した。この手法は一般のテンソルネットワークに対して適用可能である。また、ランダム系やフラストレート古典スピン系へのテンソルネットワークの応用についても研究を進めている [5]。

幾何学的割り当て法によるワームアルゴリズムの改良

モンテカルロ法において、和をとるべき「状態」に制約があり、制約を満たしながらサンプリングすることが難しい場合がある (例として、充足可能性問題)。そのような状況においても、状態空間を拡張することで効率的にサンプリングする手法のひとつがワームアルゴリズム (worm algorithm) である。ワームとは制約を破るキンク (点) のことで、ワームアルゴリズムのアイデアは「制約を常に満たすのは難しいので、いったん制約を破ってしまって後でつじつまを合わせよう」というものである。このモンテカルロ法では制約を破るワーム (キンク) を導入して、ワームを確率的に動かすことでサンプリングを行う。従来のワームアルゴリズムでは、ワームをほぼ完全にランダムに動かしていたが、我々は効率の良い計算をするためのワームの動かし方に関する指針—できるだけ前へ進めという指針—を提案した。これを可能にするには、ワームが動く確率を最適化する必要があるが、以前我々が開発した確率最適化アルゴリズム Phys. Rev. Lett. 105, 120603 (2010) を使うと簡単に実装することができる。このようにして最適化したワームアルゴリズムを制約つき問題に書き直したイジングモデルに応用し、従来のワームアルゴリズムと比較して計算効率が 25 倍改善することを確認した。これはイジングモデルに対して最も効率的だと信じられているクラスターアップデートと比較しても、さらに効率的である [8, 30]。

量子ダイマー模型に対する量子モンテカルロ法

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。我々は確率級数展開 (SSE) に基づく効率的なクラスター更新法を、ダイマーとモノマーの両方、およびそれらの

間の多体相互作用を含む、より一般的なクラスの模型に拡張した。これにより、有限温度の相転移の下でモノマーの脱閉じ込め転移の検出が可能となった。さらに、ダイマーと 2 つのモノマー間の非対角項を持つ模型に対するクラスター更新法と交換モンテカルロ法を組み合わせることで、巻き付き数を固定しないシミュレーションが可能となった [16]。

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

エンタングルメントエントロピーは、量子多体系における量子相関を表す指標のひとつであり、特に基底状態におけるエンタングルメントエントロピーを秩序変数とみなすことで量子相転移を特徴付けることができる。一方、量子多体系を解析する上で強力な計算手法として虚時間経路積分に基づく有限温度量子モンテカルロ法が従来より用いられてきたが、相関長が有限の場合においては絶対零度 (基底状態) を直接サンプリングすることも可能である。この基底状態をサンプリングする量子モンテカルロ法とレプリカ法を組み合わせることで基底状態の Rényi エントロピーを直接計算する手法を開発した [24]。

3.3.2 統計的機械学習による物質科学

ニューラルネットを用いた古典可積分系の構成

可積分系は物理と数学において豊富な知見を提供してきた。特に古典可積分系は古くから研究されながらも、今なお多くの新たな発見が報告されている。これまで、古典可積分系は、偶然あるいはひらめきによって、あるいはある種の仮設の範囲でのみ発見・構成されてきた。我々はこれに対し、深層学習を用いることで、これまでにない新たな構成法を提案した。具体的には、「作用角変数」と呼ばれる特殊な正準座標で与えられたハミルトニアンを与え、それに対する自然なハミルトニアンを深層学習によって発見する。この手法では特に、(i) ニューラルネットで全単射な座標変換を表現できる。(ii) 時間発展の自動微分を随伴法により効率化できる点に着目した。実際に古典可積分系の代表である戸田格子に対して我々の手法を適用し、戸田格子のポテンシャルを見つけ出すことができることを示した [17]。

イジングモデルの機械学習臨界温度

イジングモデルの臨界温度決定問題について、これまで近似を用いる手法や計算機で数値的に解く手法が主流であった。我々は、異なるアプローチとして、ニューラルネットワークを用いる手法を提案した。格子の特徴量として格子グリーン関数を用いることで、異なる構造の格子に対して共通のニューラルネットワークを用いて臨界温度を予測することが可能となる。4 種類の格子を用いテストを行った結果、学習データに含めた格子については高い精度で臨界温度予測に成功した。また学習データに含めていない格子についても、部分的ではあるが、臨界温度の予測が可能であることを示した [18]。

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

結晶構造推定は典型的な逆問題の一つであり、これまで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示した [14]。

3.3.3 量子コンピュータ基礎理論

変分量子回路パラメータ最適化のための逐次最小問題最適化法

近年、量子コンピュータによる量子状態計算と古典計算機による最適化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。量子古典ハイブリッドアルゴリズムの応用先は、量子化学計算や組合せ最適化、量子機械学習など多岐にわたる。これらのアルゴリズムでは、変分量子回路を用いて計算されたコスト関数が最小になるように変分量子回路のパラメータを最適化する。我々は、変分量子回路のパラメータ最適化のための手法として、逐次最小問題最適化法を提案した。変分量子回路の最適化問題は、解析的に最小値を求められる部分問題に分割できる。具体的には、変分量子回路のパラメータの中から 1 つを選択し、それ以外のパラメータを固定すると、コスト関数は周期 2π の三角関数となっているので、そのパラメータに関して最小値を厳密に求めることができる。この部分問題を繰り返し解くことにより、コスト関数を最小化するように変分量子回路を最適化できる。提案手法を既存の最適化アルゴリズムと比較した結果、提案手法は既存のアルゴリズムよりもはるかに収束が速く、統計誤差に対して頑健であることが明らかとなった。また、提案手法はハイパーパラメータを持たないという点でも利用しやすいアルゴリズムとなっている。提案手法はあらゆる量子古典ハイブリッドアルゴリズムの高速化の目的で容易に導入することが可能であり、量子コンピュータの利用において重要なツールとなると期待される [6]。

3.3.4 強相関多体系における新奇な状態・相転移現象

スピン軌道絶縁体における励起子ボーズ・アインシュタイン凝縮

近年注目を浴びている 5d 軌道の電子系においては、電子間相互作用とスピン軌道相互作用の両方が重要である。我々は、スピンと軌道が強く相互作用する場合には、電子間のクーロン相互作用が励起子 (電子と正孔の結合状態) を安定化させボーズ・アインシュタイン凝縮を引き起こすことを示した。励起子のボーズ・アインシュタイン凝縮により生じる絶縁体相は励起子絶縁体と呼ばれ、現実の物質ではこれまでほとんど見つかっていなかった。我々は、今回提案した理論を 5d 軌道の電子系であるイリジウム酸化物に適用し、2 層系が長い間探されてきた励起子絶縁体であることを予言した。またこの 2 層系の物質は、励起子がボーズ・アインシュタイン凝縮を起こす量子相転移のすぐ近くにあることを理論的に見出した。相対論の効果でスピンと軌道が強く相互作用する 5d 電子系では、電子間のクーロン相互作用と電子の運動エネルギーが同程度であることが本質的に重要となることを示した [10]。

ランダム系における多体局在現象

孤立量子系の研究において、ランダムネスによって励起状態の性質が転移することが注目されている。ランダムネスの弱いときは非局在状態、強いときは局在状態が現れ、多体局在現象 (many-body localization) と呼ばれている。我々は、その転移点を求めるため、ハミルトニアンの疎性を用いて任意のターゲット付近の固有ベクトルを高速に求める SI Lanczos 法を、ランダム磁場ハイゼンベルグ模型に適用し、少数の粒子系で完全対角化と同じ結果を再現できることを確かめた。また、連立一次方程式の求解に LU 分解ではなく Krylov 部分空間法を用いることで、ヒルベルト空間の次元のオーダーの空間計算量で固有ベクトルを求めることができるようになった。

3.3.5 動的協調現象・非平衡ダイナミクス

開放量子多体系の熱平衡化

非平衡環境下における開放量子多体系の熱平衡化現象について、テンソルネットワークに基づくアルゴリズムを用いた研究を行なった。孤立量子多体系の熱平衡化は固有状態熱化仮説 (ETH) によって理解することができる。近年、リンドブラッド型の量子マスター方程式で記述される開放量子多体系についても、ETH に基づく議論によって熱平衡化が議論できることが明らかになった。しかし、この議論には熱力学極限と弱結合極限の交換に関する問題を含んでおり、大規模数値計算と有限サイズスケーリングに基づく検証が必要だった。テンソルネットワークによる数値計算では、並進対称性を仮定することで熱力学極限における状態を直接表現することが可能である。我々は、行列積演算子を用いて熱力学極限におけるリンドブラッド方程式の数値計算を行った。これによって、弱結合極限において系の初期状態がギブス状態であるとき、非平衡定常状態に至るまでの緩和過程の全てにおいて状態はギブス状態と区別できないことを示した [2, 11, 23]。

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 (https://ma.issp.u-tokyo.ac.jp/)。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、MateriApps アプリケーションがプレインストールされた仮想 Linux システム「MateriApps LIVE!」、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 [13, 32]。

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・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 [33]。

行列演算ライブラリー BLIS

BLIS は米国テキサス大 SHPC 研が開発している柔軟かつ高速的な行列演算ライブラリーである。標準の BLAS との互換性を保っており、AMD の公式

BLAS として採用されている。BLIS は最小限のコーディングから最大性能を引き出すことで知られており、様々なプラットフォームにおいて公式の BLAS を凌ぐ性能を発揮する。BLIS は C で書かれたフレーム部分とそれぞれの CPU アーキテクチャに特化したアセンブラカーネルから構成され、そのアセンブラ部分こそが BLIS 高速化の鍵となっている。我々は、ドイツの Jülich 研と共同で、「富岳」の A64FX プロセッサに最適化した BLIS のアセンブラカーネルを開発した。現在、富岳の 1 ノードにおいて、BLIS の性能は理論ピークの 75%を実現しており、これは ArmPL や富士通 SSL2(2021 年 2 月版) をも凌いでいる。今後、90%以上のピーク性能を目指し、さらにチューニングを進める予定である。

多変数変分モンテカルロ法 mVMC の高度化

多変数変分モンテカルロ法 mVMC は、日本の物性理論コミュニティーにおいて広く使われ、これまで、強相関電子系の基底状態状態における様々な性質 (磁性、超伝導など) を解き明かしてきた。しかし、mVMC における演算のホットスポットは、反対称逆行列 X^{-1} の Rank-1 更新であるため、現代のプロセッサーにおいては、性能を発揮することは難しい。「富岳」の新プロセッサ A64FX において mVMC の性能を充分に発揮するため、我々は、Woodbury 公式を使って更新式を書き直し、Rank-1 更新を Rank-k 更新に置き換えた。これにより「富岳」における mVMC の性能を大幅に向上することができた。

＜報文＞

(原著論文)

[1] 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).

[2] Tatsuhiko Shirai, Takashi Mori, Thermalization in Open Many-Body Systems Based on Eigenstate Thermalization Hypothesis, Phys. Rev. E **101**, 042116 (11pp) (2020).

[3] Shohei Hayashida, Hajime Ishikawa, Yoshihiko Okamoto, Tsuyoshi Okubo, Zenji Hiroi, Gøran J. Nilsen, Hannu Mutka, Takatsugu Masuda, Zero-energy excitation in the classical kagome antiferromagnet $NaBa_2Mn_3F_{11}$, Phys. Rev. B **101**, 214409 (6pp) (2020).

[4] Takeo Hoshi, Mitsuaki Kawamura, Kazuyoshi Yoshimi, Yuichi Motoyama, Takahiro Misawa, Youhei Yamaji, Synge Todo, Naoki Kawashima, Tomohiro Sogabe, Kω – Open-source library for the shifted Krylov subspace method of the form $(zI - H)x = b$, Comp. Phys. Comm. **258**, 107536 (10pp) (2021).

[5] Daiki Adachi, Tsuyoshi Okubo, Synge Todo, Anisotropic tensor renormalization group, Phys. Rev. B **102**, 054432 (7pp) (2020).

[6] Ken M. Nakanishi, Keisuke Fujii, Synge Todo, Sequential minimal optimization for quantum-classical hybrid algorithms, Phys. Rev. Research **2**, 043158 (10pp) (2020).

[7] Botao Li, Synge Todo, A. C. Maggs, Werner Krauth, Multithreaded event-chain Monte Carlo with local times, Comp. Phys. Comm. **261**, 107702 (10pp) (2021).

[8] Hidemaro Suwa, Geometric allocation approach to accelerating directed worm algorithm, Phys. Rev. E **103**, 013308 (14pp) (2021).

[9] Sh. Yamamoto, H. Suwa, T. Kihara, T. Nomura, Y. Kotani, T. Nakamura, Y. Skourski, S. Zherlitsyn, L. Prodan, V. Tsurkan, H. Nojiri, A. Loidl, J. Wosnitza, Element-specific field-induced spin reorientation and tetracritical point in $MnCr_2S_4$, Phys. Rev. B **103**, L020408 (6pp) (2021).

[10] Hidemaro Suwa, Shang-Shun Zhang, Cristian D. Batista, Exciton condensation in bilayer spin-orbit insulator, Phys. Rev. Research **3**, 013224 (11pp) (2021).

[11] Hayate Nakano, Tatsuhiko Shirai, Takashi Mori, Tensor-network approach to thermalization in open quantum many-body systems, Phys. Rev. E **103**, L040102 (6pp) (2021).

[12] Xinliang Lyu, RuQing G. Xu, Naoki Kawashima, Scaling dimensions from linearized tensor renormalization group transformations, to appear in Phys. Rev. Research.

(国内雑誌)

[13] 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).

[14] 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).

[15] 藤堂眞治, Google Colab x Python! 科学シミュレータ製作, トラ技ジュニア **42**, 6–17 (2020).

(学位論文)

[16] Cao Ruixiao, Numerical study of two-dimensional quantum dimer model (修士論文)

[17] Fumihiro Ishikawa, Exploration of Classical Integrable Systems Assisted by Neural Networks (博士論文)

[18] Tomoyuki Morishita, Machine learning critical temperature of Ising model (修士論文)

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

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

[20] Tsuyoshi Okubo, “Tensor Network study of honeycomb lattice Kitaev model,” Recent progress in theoretical physics based on quantum information theory, March 2021, Kyoto.

[21] Tsuyoshi Okubo, “Large spin fluctuation in the magnetization process of frustrated square lattice Heisenberg magnets,” The International Workshop on Quantum Magnets in Extreme Conditions, March 2021, ISSP.

(国内会議)

一般講演

[22] 大久保毅, 「密度行列のテンソルネットワーク表現による有限温度キタエフ模型の解析」, 物性研究所短期研究会 「量子多体計算と第一原理計算の新展開」, 2020 年 7 月, 物性研.

[23] 中野颯, 「非平衡環境下における非可積分量子多体系の熱平衡化現象」, 物性研究所短期研究会 「量子多体計算と第一原理計算の新展開」, 2020 年 7 月, 物性研.

[24] 近藤千尋, 「Replica Exchange 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」, 物性研究所短期研究会 「量子多体計算と第一原理計算の新展開」, 2020 年 7 月, 物性研.

[25] 諏訪秀麿, 「相関電子系の有限温度スピンダイナミクス」, 物性研究所短期研究会 「量子多体計算と第一原理計算の新展開」, 2020 年 7 月, 物性研.

[26] 諏訪秀麿, 宮田敦彦, 野村肇宏, S.Zherlitsyn, J. Wosnitza, V.Tsurkan, A.Loidl, 「スピネル型フェリ磁性体 MnCr2S4 の磁場温度相図」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.

[27] 大久保毅, 川島直輝, 「エンタングルメントエントロピーを用いたテンソルリング分解の最適化」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.

[28] 大久保毅, 「テンソルネットワーク法による拡張キタエフ模型の有限温度物性の解析」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.

[29] 諏訪秀麿, Shang-Shun Zhang, Gia-Wei Chern, Kipton Barros, Cristian D. Batista, 「有限温度自己無撞着スピンダイナミクスによる動的スピン構造因子計算」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.

[30] 諏訪秀麿, 「幾何学的割り当て法によるワームアルゴリズムの改良」, 日本物理学会 第 76 回年次大会, 2021 年 3 月, 東大.

[31] 大久保毅, 那須譲治, 三澤貴宏, 求幸年, 「キタエフ量子スピン液体の熱ホール伝導度に対する非対角相互作用の効果」, 日本物理学会 第 76 回年次大会, 2021 年 3 月, 東大.

招待講演

[32] 藤堂眞治, 「MateriApps LIVE!による物質科学シミュレーション」, 第 7 回東北大学知のフォーラム 実験家のためのデータ駆動科学オンラインセミナー「計算材料科学＆マテリアルズ・インフォマティクス入門」, 2020 年 9 月, 東北大学.

[33] 大久保毅, 「テンソルネットワーク法による量子スピン模型の基底状態計算」, 物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会「計算物質科学の新展開 2020」, 2020 年 12 月, 物性研.

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

ほぼ平坦なバンドを持つ d 次元 $SU(n)$Hubbard 模型における強磁性

近年、冷却原子系において n 成分の内部自由度を持ち $SU(n)$ 対称性を持つフェルミオン系の実現が報告されている。このような系は強相関電子系を記述する模型である $SU(2)$ Hubbard 模型の一般化である $SU(n)$ Hubbard 模型で記述される。この模型は理論的な興味を集める一方、$SU(2)$ Hubbard 模型と比べて厳密に確立された結果は少ない。知られている厳密な結果の中に平坦バンド強磁性の $SU(n)$ への拡張がある。平坦バンド強磁性とは一体のエネルギー準位の巨視的な縮退に由来して多体系の基底状態が強磁性を示すことである。$SU(2)$ の場合、さらに摂動を加えバンド構造が分散を持つ場合の強磁性に関する厳密な結果も任意の次元に対して得られている。一方で摂動を加えた場合の結果の $SU(n)$ への拡張は 1 次元に限られ、高次元における結果は得られていなかった。

田村と桂は、任意の次元 d (≥ 2) において、最低バンドがわずかに分散を持つような $SU(n)$ Hubbard 模型の強磁性に関して厳密に成り立つ結果を確立した。我々はまず完全に平坦なバンドを持つ場合の強磁性に関する定理を証明した。そしてそこに摂動項を加えた模型を議論した。この時、バンドギャップと相互作用が十分大きくホッピング項のパラメータが n および d に依存した閾値より小さい状況で強磁性を示すことを証明した。これらの結果は、国際会議等 [22, 33] で発表されたほか、原著論文 [13] にまとめられた。

量子スピン鎖における非線形 Drude 重み

輸送現象は凝縮系物理学における最も重要なテーマの１つとして、これまで精力的に研究されてきた。一方で、これまでの理論的なアプローチは線形応答理論に基づくものや自由粒子系に対するものが主で、強い外場下における強相関系の非線形輸送現象については、いまだに体系的な理解は得られていない。しかし最近、[H. Watanabe and M. Oshikawa, Phys. Rev. B **102**, 165137 (2020)] において非線形輸送に関する「非線形 Drude 重み」という量が新たに導入された。この量は、伝導性の指標として重要な役割を果たしてきた線形 Drude 重みの自然な拡張であり、非線形輸送特性に関して有益な情報をもたらすものとして期待されている。

谷川・桂と高三（UC Berkeley）は、典型的な相互作用系であるスピン 1/2 XXZ 鎖の絶対零度における非線形 Drude 重みを厳密に解析し、熱力学的極限で発散するパラメター領域の存在を明らかにした。これは線形 Drude 重みには見られない興味深い特徴である。また、Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用や外部磁場が及ぼす影響についても調べた。さらに、この発散の起源が基底状態エネルギーに対する非解析的な有限サイズ補正であることを解明し、それに基づいて発散を伴うパラメター領域と発散の強さを特定することにも成功した。これらの結果は、国内会議 [40] で発表されたほか、プレプリント [17] にまとめられた。

3.4.2 トポロジカル系

スピン自由度をもつ遍歴ボゾン系における対称性に守られたトポロジカル相

スピン自由度をもつ遍歴ボゾン系の対称性に守られたトポロジカル相 (SPT 相) に関する研究を行った。SPT 相に関する研究は、先行研究では電子系や量子スピン系に関するものが主で、遍歴ボゾン系に関するものはあまりない。これは、ボゾンのスピン自由度と「電荷」自由度の両方を同時に取り扱うことが理論的には難しいためである。一方で、冷却原子系においては、むしろそのような状況が標準的である。このギャップを埋めるべく、Yang・中野（東大理物・藤堂研）・桂は、Bose-Hubbard 模型の範囲内で、種々のボゾンの SPT 相を実現できることを理論的に提案した。鍵となるのは、一粒子ハミルトニアンが平坦バンドと呼ばれる縮退した基底状態をもつ点である。この性質を用いて様々な数学的に厳密な結果を導出した。また１次元系については、可解な場合から少しずれた状況についても、摂動論や数値計算により解析し、SPT 相の安定性を議論した。

これらの結果は、国際会議等 [23, 32] で発表されたほか、プレプリント [6] にまとめられた。

マグノン Bogoliubov-de Gennes 系の非エルミート・トポロジカル相

近年、物質中の電子の波動関数のトポロジーに基づいた物質相の提案や分類が盛んにおこなわれている。特に重要なものはトポロジカル絶縁体と呼ばれるものであり、それらの物質においては、スピン軌道相互作用などによって電子の波動関数がヒルベルト空間の中で非自明なトポロジーを生じ、それによって時間反転対称性によって保護された頑強な金属的状態が表面のみに現れる。このような新しい物質相の研究は、電子系のみならずフォトンやフォノン、マグノンといったボース粒子系にも波及している。

近藤・赤城・桂は、ボゾン Bogoliubov-de Gennes (BdG) 系における非エルミート性に着目してマグノンのトポロジカル相の研究をレビューした [10]。このレビューでは、電子系における量子ホール効果から量子スピンホール効果、それに続く 3 次元トポロジカル絶縁体の研究に触れた後、対応するマグノン系の研究をまとめた。マグノン系においては、Kramers 縮退を生じるようなフェルミオン的な対称性（擬時間反転対称性）を導入することで 2 次元及び 3 次元トポロジカル絶縁体の対応物を構築し、その対称性の議論について詳しく述べた。これらのマグノン系は粒子数の保存しないペアリング項を含んだ BdG ハミルトニアンによって記述されるが、このような系はフェルミオン系にはなかった数学的構造（非エルミート性）を有する。レビューでは非エルミート系におけるトポロジカル相の分類の研究についても触れ、上記のマグノン系がどの分類に属するのかや、具体的にどのようなトポロジカル数で特徴づけられるのかなどもまとめた。

結晶対称性に保護されたマグノンの表面状態

電子の波動関数のトポロジーに由来して、時間反転などの対称性に保護された表面状態が現れるトポロジカル物質はさまざまな種類のものが提案されている。一方、マグノンなどのボゾン系では、時間反転対称性が Kramers 対の存在を保証しないため、この対称性に保護された表面状態は期待できない。フェルミオン的な擬時間反転対称性を満たすようにしてマグノンの表面状態を有する磁性体のモデルが提案されているが、そのようなモデルを実現する候補物質は未だ見つかっていない。

近藤と赤城は、時間反転と単位胞の半分の空間並進を組み合わせた対称性は波数空間上のある面において Kramers 対を生じることに着目して、その対称性に保護されたマグノンの表面状態を有する磁性体のモデルを提案した。さらに、提案したモデルが磁性体 CrI_3 で実現される可能性があることを明らかにした。また、この磁性体に電場を加えることで表面状態の分布に不均衡が生じ、結果として電場でマグノン流を駆動することができることを明らかにした。これらの結果は、国際会議 [20] で発表されたほか、プレプリント [12] にまとめられた。

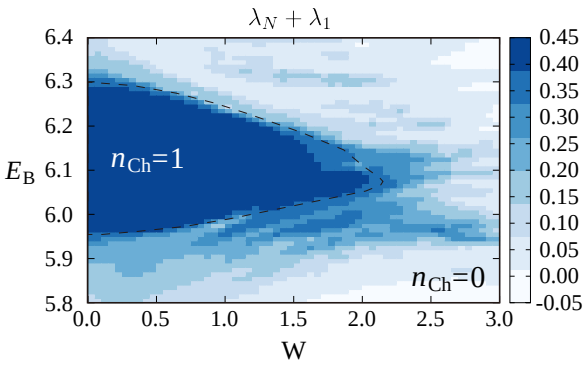


図 3.4.1: 人工的スピンアイス模型における仮想的フェルミレベル E_B、乱れの強さ W に対する $\lambda_N + \lambda_1$ とトポロジカル不変量 n_{Ch}。ここで、λ_N (λ_1) は、2 つの射影演算子の差で定義される演算子 A の最大 (最小) 固有値を表す。点線領域の内側は $\lambda_N > 0.995$ の領域である。

乱れのある Bosonic Bogoliubov–de Gennes 系における非可換指数

大きな成功を収めたフェルミオン自由度に起因したトポロジカル物性の研究はボゾン系にも波及している。特に最近、磁性体におけるボーズ準粒子であるマグノンに関するトポロジカル物性の研究が急激に増加している。一方、ペアリング項を持つような BdG 型のボゾン系には、その統計性に由来した非エルミート性があるため、エルミート系におけるトポロジカル相の分類/特徴付けを直接適用することは出来ない。また、トポロジカル相は乱れに強いとされているが、系に乱れがあると波数が定義できないため、相を特徴付けるトポロジカル不変量を定めることは自明ではない。

そこで赤城は、非可換幾何の手法を用いることで、乱れのあるマグノンホール系における Chern 数に対応する非可換指数を定義した。ここでは、ボゾン系における “フェルミ”射影演算子を導入することで上記の手法を拡張した。また、この定義の妥当性を確かめるため、乱れのあるマグノンホール系を記述する人工的スピンアイス模型における非可換指数を数値的に調べた。結果として、図 3.4.1 に示すように、clean limit で Chern 数が +1 となるような場合に乱れを導入しても、非可換指数は $n_{Ch} = +1$ となり、実際に乱れのあるマグノンホール系を特徴付けられることを明らかにした。本手法は、擬時間反転対称性に守られた Z_2 トポロジカル相などの他のクラスへの拡張も可能であり、いくつか例も示した。これらの結果は、原著論文 [11] にまとめられたほか、Anderson 局在に関する国際研究会 Localisation 2020 での招待講演 [27] をはじめとして、APS March Meeting[26] やセミナー [49, 50] でも発表された。

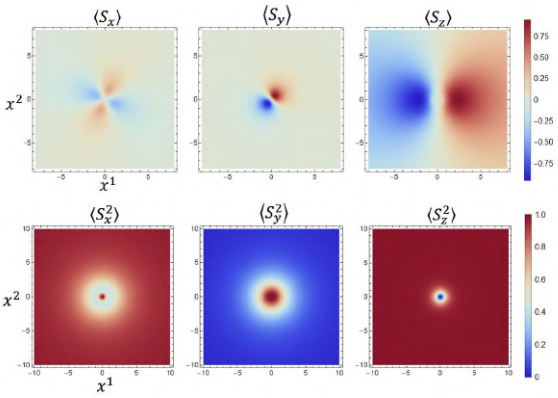


図 3.4.2: 得られた解析解を用いて計算した $S = 1$ スピン演算子の期待値。スキルミオンは、原点を中心として、等方的に広がっている。

Dzyaloshinskii-Moriya 型相互作用によって安定化した CP^2 スキルミオン

近年、様々な系において 2 次元スキルミオンの研究が盛んに行われており、実際にカイラル磁性体、フラストレート磁性体などで実験的に観測されている。一方、$SU(N > 2)$ 対称性をもつ磁性体中の 2 次元スキルミオンに関する理論的研究も数多くなされている。例えば、$SU(N)$ 強磁性 Heisenberg 模型は連続極限において CP^{N-1} 非線型シグマ模型となり、この模型における 2 次元スキルミオン解は古くから知られている [V. Golo and A. Perelomov, Phys. Lett. B **79**, 112 (1978)]。しかし、この解は模型のスケール不変性に起因する不安定性をもつ。

赤城と甘利 (JINR)・澤渡 (東京理科大)・Shnir (JINR) は、CP^2 非線型シグマ模型のスケール不変性を、Dzyaloshinskii-Moriya 型の相互作用項を加えることによって破り、安定な 2 次元スキルミオン解を解析的・数値的に構成した。また、得られた孤立スキルミオン解のエネルギーが、一様な真空解 (スピンネマティック状態) のエネルギーよりも低いパラメター領域を見出した。これは、得られたスキルミオン (または、それらで構成されたスキルミオン格子) が系の基底状態として現れうることを示唆している。さらに、$SU(3)$ スピン演算子と $S = 1$ スピン演算子の対応関係を用いて、得られた孤立スキルミオンの持つ磁化ベクトルなどを計算した。図 3.4.2 に示すように、無限遠方では磁気秩序が存在しないにも関わらず、スピン空間の回転対称性が破れており、スピンネマティック状態となっている。一方で、スキルミオンの周りには磁気双極子が現れている。これは、スキルミオンが磁気双極子を誘起することを意味しており、時間反転対称なために観測が難しいスピンネマティック相の (間接的な) 観測の可能性を期待させる結果である。これらの成果は、論文 [16] にまとめられた。

3.4.3 散逸のある量子多体系

散逸のある強相関系のトポロジカルな特徴づけ

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、開放量子系と呼ばれ Lindblad 方程式などのマスター方程式により記述される。近年の開放量子系のエンジニアリングの実験的進展に刺激され、このような散逸のある量子系の理論的研究も進展している。特に、そのような系の有効ハミルトニアンと見なせる、非エルミートなハミルトニアンにより記述される系のトポロジカル相の分類に関する研究が急速に進展している。一方で、Lindblad 方程式の枠組み内での非平衡状態のトポロジカルな特徴づけはあまり議論されてこなかった。

桂と吉田・工藤・初貝（筑波大）は、系の時間発展の生成演算子 (リウビリアン) の固有演算子に対して、そのトポロジカル不変量を定義する方法を提案した。具体的には、この固有演算子を二重ヒルベルト空間における状態ベクトルとみなし、それに対して擬スピン Chern 数と呼ばれる量を定義した。この量は量子化した値を取るトポロジカル不変量であり、また、散逸がロスのみあるいはゲインのみの場合には、対応する非エルミートなハミルトニアンに対して定義されるトポロジカル不変量に帰着する。このことは、従来の非エルミートな有効ハミルトニアンによるトポロジカルな性質の議論に正当性を与えている。さらに、この新しく導入された不変量の有用性を、二体の粒子ロスのある分数量子ホール系に適用して数値的に実証した。これらの結果は、原著論文 [9] にまとめられた。論文では、他にも位相緩和のある Su-Schrieffer-Heeger 模型のトポロジカルな性質の、Berry 位相を用いた特徴づけについても議論している。

端に散逸のある量子 Ising 鎖

近年､開放量子系は物性物理のみならず量子情報/量子計算などの幅広い分野で関心を集めている。Lindblad 方程式は、開放量子系の有効的なダイナミクスを記述する。この方程式はかつては少数系に用いられることが多かったが、近年の量子技術の発展に伴い、Lindblad 方程式を多体系へも適用しようという動きが加速している。一方、可解模型は、複雑な量子多体系を理解する試金石として重要な役割を果たす。近年、開放量子多体系でありながら厳密に解ける模型がいくつか報告されている。

柴田と桂は、新たに可解な開放量子多体系の模型を考案した。これは量子 Ising 鎖の両端に位相緩和と呼ばれる散逸が働く模型であり、適切なマッピングにより、両端に複素ポテンシャルのあるタイト・バインディング模型の問題に帰着する。このマッピングにより、緩和時間の逆数に対応するリウビリアンギャップと呼ばれる量を詳細に調べることができる。その結果、リウビリアンギャップがサイト数 N の逆 3 乗でスケールすることを数値的/解析的に明らかにした。この結果は原著論文 [8] にまとめられた。

3.4.4 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 (現・東大物工)・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。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 [3] にまとめられたほか、国内外の研究会での招待講演 [28, 44] をはじめとして、多くの研究会 [21, 31] やセミナー [46, 47, 48, 51] でも発表された。

束縛のある量子系における誤差上限の評価

十分大きなエネルギーギャップが開いている量子系の物理は、低エネルギー理論により有効的に記述できると期待される。例えば、Rydberg 原子系の低エネルギー有効理論として PXP 模型が知られている。このような有効理論によるダイナミクスと実際のダイナミクスを比較すると、近似の誤差は時間とともに大きくなっていくと予想されるが、それがどのように増加していくのかは知られていなかった。

上田研の Gong(現･Max-Planck-Institut für Quantenoptik)・濱崎 (現・理研)・桂研の吉岡 (現・東大物工)・柴田は、近似の誤差についての普遍的かつ厳密な上限を得た。少数系では、この上限は線形に増加していくほか、上限がある意味でタイトなものであることを示した。また、この手法を応用し、量子多体系や開放量子系での束縛のあるダイナミクスについても厳密な誤差上限を得た。この結果は、原著論文 [4, 5] にまとめられた。

Nicolai 模型の古典的な基底状態と保存量

Nicolai により 1970 年代に提案された 1 次元格子上のフェルミオン模型（Nicolai 模型）は、超対称性量子力学の意味での超対称性をもつ模型で、そのハミルトニアンは超電荷 Q, $Q^\dagger$ の反交換子で与えられる。また、基底状態の個数は系のサイズとともに指数関数的に増大することが知られている。このような基底状態は、単純な直積状態で書ける状態（以下、古典的な基底状態）を数多く含む。

桂と守屋（金沢大）・中山（立教大）は、これらの古典的な基底状態は、Nicolai 模型に存在する隠れた超対称性の破れによって特徴づけられることを見出した。この新たな対称性は、Q とも $Q^\dagger$ とも反交換するフェルミオン的局所演算子で記述される。また、これらの局所的演算子を用いて、ハミルトニアンと交換するボゾン的演算子を構成することもできることを明らかにした。さらに、特定の境界条件のもとでの有限系では、古典的な基底状態は Fock 真空状態に、上述のフェルミオン的局所演算子を次々と作用させることにより構成できることを証明した。これらの結果は、原著論文 [7] にまとめられた。

$SU(N)$ 引力 Hubbard 模型におけるマヨラナ鏡映正値性

$SU(N)$ Hubbard 模型は、N 成分の内部自由度を持つ粒子が強く相互し合う系である (図 3.4.3)。これは、スピン 1/2 の電子を記述する通常の $SU(2)$ Hubbard 模型の内部自由度に関する拡張になっている。近年、本模型は冷却原子気体による実現 [S. Taie, R. Yamazaki, S. Sugawa, and Y. Takahashi, Nat. Phys. **8**, 825 (2012)] により注目を集めている。しかし、$SU(N)$ $(N > 2)$ Hubbard 模型の解析は $SU(2)$ の場合よりも困難であり、厳密な結果はほとんど知られていない。$SU(2)$ Hubbard 模型の基底状態を解析するための強力な数理手法としては、スピン鏡映正値性 [E. H. Lieb, Phys. Rev. Lett. **62**, 10 (1989)] の手法がある。しかし、これは上向きスピンと下向きスピンの間の対称性を用いるため、$SU(N)$ Hubbard 模型にそのまま適用することはできない。

そこで吉田と桂は、$SU(N)$ 引力 Hubbard 模型の基底状態を、近年提案されたマヨラナ鏡映正値性 [A. Jaffe and F. L. Pedrocchi, Ann. Henri Poincaré **16**, 189 (2015)] の手法を応用して厳密に解析した。その結果、二部格子上の $SU(N)$ 引力 Hubbard 模型の基底状態の縮退度や粒子数などを明らかにした。また、2 つの部分格子のサイト数がマクロに異なるとき、系が電荷密度波的な秩序を示すことも明らかにした。これらの結果は国内会議 [41] で発表されたほか、原著論文 [14] にまとめられた。

＜受賞＞

[1] 桂 法称, オンライン授業等におけるグッドプラクティス総長表彰, 東京大学, 2021 年 3 月 22 日.

＜報文＞

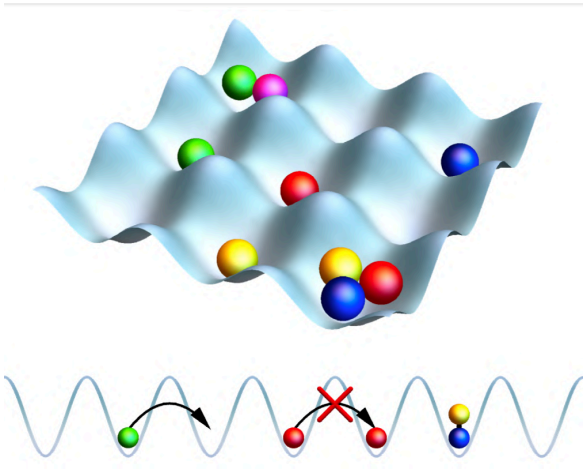


図 3.4.3: $SU(N)$ 引力 Hubbard 模型の模式図。複数の色の自由度を持つ粒子が谷 (サイト) と谷の間を飛び移りながら運動し、同じサイトにある粒子の間には引力相互作用が働く。

(原著論文)

[2] 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).

[3] Naoyuki Shibata, Nobuyuki Yoshioka, and Hosho Katsura: Onsager's Scars in Disordered Spin Chains, Phys. Rev. Lett. **124**, 180604 (2020) [Selected as Editors' Suggestion].

[4] Zongping Gong, Nobuyuki Yoshioka, Naoyuki Shibata, and Ryusuke Hamazaki: Universal Error Bound for Constrained Quantum Dynamics, Phys. Rev. Lett. **124**, 210606 (2020).

[5] Zongping Gong, Nobuyuki Yoshioka, Naoyuki Shibata, and Ryusuke Hamazaki: Error bounds for constrained dynamics in gapped quantum systems: Rigorous results and generalizations, Phys. Rev. A **101**, 052122 (2020).

[6] Hong Yang, Hayate Nakano, and Hosho Katsura: Symmetry-protected Topological Phases in Spinful Bosons with a Flat Band, Preprint (2020). arXiv:2003.01705

[7] Hosho Katsura, Hajime Moriya, and Yu Nakayama: Characterization of degenerate supersymmetric ground states of the Nicolai supersymmetric fermion lattice model by symmetry breakdown, J. Phys. A: Math. Theor. **53**, 385003 (2020).

[8] Naoyuki Shibata and Hosho Katsura: Quantum Ising chain with boundary dephasing, Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 12A108 (2020).

[9] Tsuneya Yoshida, Koji Kudo, Hosho Katsura, and Yasuhiro Hatsugai: Fate of fractional quantum

Hall states in open quantum systems: characterization of correlated topological states for the full Liouvillian, Phys. Rev. Research **2**, 033428 (2020).

[10] Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura: Non-Hermiticity and topological invariants of magnon Bogoliubov-de Gennes systems, Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 12A104 (2020).

[11] Yutaka Akagi: Topological Invariant for Bosonic Bogoliubov-de Gennes Systems with Disorder, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 123601 (2020).

[12] Hiroki Kondo and Yutaka Akagi: Dirac surface states in magnetic analogs of topological crystalline insulators, Preprint (2020). arXiv:2012.02034

[13] Kensuke Tamura and Hosho Katsura: Ferromagnetism in d-Dimensional $SU(n)$ Hubbard Models with Nearly Flat Bands, J. Stat. Phys. **182**, 16 (2021).

[14] Hironobu Yoshida and Hosho Katsura: Rigorous Results on the Ground State of the Attractive $SU(N)$ Hubbard Model, Phys. Rev. Lett. **126**, 100201 (2021) [Selected as Editors' Suggestion].

[15] Hosho Katsura: Unraveling the Nature of Exotic Phase Transitions in Quantum Spin Chains, JPSJ News Comments **18**, 04 (2021).

[16] Yutaka Akagi, Yuki Amari, Nobuyuki Sawado, and Yakov Shnir: Isolated Skyrmions in the CP^2 nonlinear sigma-model with a Dzyaloshinskii-Moriya type interaction, Phys. Rev. D **103**, 065008 (2021).

[17] Y. Tanikawa, K. Takasan, and H. Katsura: Exact results for nonlinear Drude weights in the spin-1/2 XXZ chain, Preprint (2021). arXiv:2103.05838

(学位論文)

[18] 真田兼行: Exact results for the degeneracy of energy eigenstates in inhomogeneous quantum spin systems (修士論文).

[19] 坪田祥一: Analysis of spectral and topological properties of electronic systems on the Thue-Morse lattice (修士論文).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[20] Hiroki Kondo (Yutaka Akagi): Dirac surface states in topological crystalline magnon insulators, *APS March Meeting 2021*, online, Mar. 2021.

[21] Naoyuki Shibata (Nobuyuki Yoshioka, Hosho Katsura): Onsager's scars in disordered spin chains, *APS March Meeting 2021*, online, Mar. 2021.

[22] Kensuke Tamura (Hosho Katsura): Ferromagnetism in d-dimensional $SU(n)$ Hubbard models with nearly flat bands, *APS March Meeting 2021*, online, Mar. 2021.

[23] Hong Yang (Hayate Nakano, Hosho Katsura): Symmetry-protected Topological Phases in Spinful Bosons with a Flat Band, *APS March Meeting 2021*, online, Mar. 2021.

[24] Tsuneya Yoshida (Koji Kudo, Hosho Katsura, Yasuhiro Hatsugai): Non-Hermitian fractional quantum Hall states in open quantum systems, *APS March Meeting 2021*, online, Mar. 2021.

[25] Kimberly Remund (Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhanyi, Nic Shannon): Equations of motions for spin-1 magnets − a $u(3)$ formalism, suitable to investigate dynamical and thermodynamical properties, *APS March Meeting 2021*, online, Mar. 2021.

[26] Yutaka Akagi: Topological Invariant for Bosonic Bogoliubov-de Gennes Systems with Disorder, *APS March Meeting 2021*, online, Mar. 2021.

招待講演

[27] Yutaka Akagi: Noncommutative indices for disordered topological phases, *Localisation 2020*, online, Japan, August 2020.

[28] Hosho Katsura: Onsager's scars in non-integrable spin chains, *Rigorous Statistical Mechanics and Related Topics II*, online, Japan, November 2020.

[29] Hosho Katsura: Integrable dissipative spin chains, *Non-Hermitian Physics*, online, India, March 2021.

(国内会議)

一般講演

[30] 赤城裕: 量子スピン液晶におけるトポロジカル励起と創発現象, 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」C01 班公募研究キックオフミーティング, 2020 年 7 月, オンライン.

[31] 柴田直行, 吉岡信行, 桂法称: Onsager 代数を用いた乱れのあるスピン鎖における量子多体傷跡状態の構成, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.

[32] Hong Yang, Hayate Nakano, Hosho Katsura: Symmetry-protected Topological Phases in Spinful Bosons with a Flat Band, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.

[33] 田村健祐, 桂法称: ほぼ平坦なバンドを持つ d 次元 $SU(n)$ ハバード模型における強磁性, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.

[34] 坪田祥一, 赤城裕, 桂法称: Thue-Morse 格子上の電子系の Z_2 Berry phase を用いたトポロジカルな特徴付け, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.

[35] 真田兼行、桂法称: 非一様な変形パラメターをもつ量子スピン鎖の厳密に縮退したエネルギー準位, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.

[36] 吉田恒也, 工藤耕司, 桂法称, 初貝安弘: 量子開放系での分数量子ホール状態の特徴付け, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.

[37] Remund Kimberly, Pohle Rico, Akagi Yutaka, Shannon Nic: Analytical Derivation of Equations of Motion for Spin-1 Magnets II, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.

[38] Pohle Rico, Akagi Yutaka, Remund Kimberly, Shannon Nic: Numerical Integration of Equations of Motion for Spin-1 Magnets, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月, オンライン.

[39] 赤城裕: 量子スピン液晶におけるトポロジカル励起とダイナミクス, 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会, 2020 年 12 月, オンライン.

[40] 谷川悠飛, 高三和晃, 桂法称: スピン 1/2 XXZ 鎖における非線形スピン Drude weight の厳密な解析, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月, オンライン.

[41] 吉田博信, 桂法称: $SU(N)$ 引力ハバード模型におけるマヨラナ鏡映正値性, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月, オンライン.

[42] Hosho Katsura, Hal Tasaki: Mott-insulating Bose-Einstein condensation in a tight-binding system of interacting bosons with a flat band, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月, オンライン.

[43] 小野淳, 赤城裕: 三角格子遍歴磁性体における光誘起スピンスカラーカイラル状態, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月, オンライン.

招待講演

[44] 桂法称: 量子多体傷跡状態の代数的構成法, 量子多体系の熱力学–数理の発展と展望, 2020 年 9 月, オンライン.

(セミナー)

[45] 桂法称: Integrable dissipative spin chains, 統計力学 seminar, 2020 年 5 月, オンライン.

[46] 柴田直幸: Onsager's scars in disordered spin chains, 東大物工・渡辺研セミナー, 2020 年 6 月, オンライン.

[47] 柴田直幸: Onsager's scars in disordered spin chains, 阪大・藤本・水島研セミナー, 2020 年 6 月, オンライン.

[48] 桂法称: Onsager's scars in non-integrable spin chains, Theory Seminar at APCTP/POSTECH (Korea), 2020 年 8 月, オンライン.

[49] 赤城裕: Noncommutative indices for disordered topological phases, 統計力学 seminar, 2020 年 11 月, オンライン.

[50] 赤城裕: Noncommutative indices for disordered topological phases, 求研究室セミナー, 2020 年 12 月, オンライン.

[51] 桂法称: Onsager's Scars in Non-Integrable Spin Chains, Condensed Matter/Materials & Biological Physics Seminar at Washington University in St. Louis (US), 2021 年 3 月, オンライン.

3.5 樺島研究室

樺島の理学研究科附属知の物理学研究センターへの着任に伴い物理学教室に新たに加わった研究室である。2020 年度は樺島の他、Xiangming Meng 特任研究員、樺島が前年度まで勤務していた東工大からの特別研究学生 8 名（D3：2 名、D1：1 名、M2：5 名）の体制で始まり、11 月には高橋昂助教が着任した。専門分野は不規則系の統計力学の情報科学全般への応用である。信号処理、組み合わせ最適化問題、データ解析、機械学習などの問題に対して主にスピングラス理論をもちいた性能分析や近似的推論／分析アルゴリズムの開発を行なっている。以下、2020 年度に得られた主な研究成果の概要を記す。

3.5.1 スパース推定

偽尤度法をもちいたネットワーク推定の性能分析

イジングモデルから生成される複数のスナップショットデータにもとづいて、スピン間相互作用を求める問題はボルツマンマシン学習あるいはイジング逆問題と呼ばれる。最尤推定にしたがう限りこの問題は計算量的に困難であり、長らく実用的なデータ解析法とはみなされてこなかった。しかしながら、近年、相互作用の対称性を無視し、相互作用係数の推定を回帰問題に帰着させる偽尤度法（図 3.5.1）が導入されたことにより、タンパク質相互作用や遺伝子発現の分析などかなり大規模な問題にまで利用されるようになってきた。

こうした状況をふまえて、我々は偽尤度法により素に結合したイジングモデルのネットワーク形状が推定できるか、という問題を考察した。適当な格子上で定義されたスピン数 N のイジングモデルを考える。このモデルの平衡状態から独立に取り出した M 個のイジングスピンのスナップショットデータ $\{S_i^\mu\}$ $(i = 1, 2, \ldots, N;\ \mu = 1, 2, \ldots, M)$ にもとづいてイジングモデルの結合 $\{J_{ij}\}$ を推定する。最尤推定によって結合定数を推定する際、満足すべき条件は標本平均 $M^{-1}\sum_{\mu=1}^{M} S_i^\mu S_j^\mu$ と熱平均 $\langle S_i S_j \rangle_{\{J_{ij}\}}$ が一致することである。熱平均の評価には N に関し指数関数的に増大する計算量が必要であるためこの方法による結合の推定は一般に困難である。

これに対し、偽尤度法では各ノード i 毎に、ボルツマン分布から導かれる条件付き分布にもとづく尤度（偽尤度）の最大化を行う。偽尤度は標本平均と $M^{-1}\sum_{\mu=1}^{M} S_i^\mu \tanh\left(\sum_{j\neq i} J_{ij} S_j^\mu\right)$ が一致するときに最大化される。この評価には計算量的困難は生じない。ただし、素朴な偽尤度法では $J_{ij} = J_{ji}$ の対称性は保たれないため、推定値を得た後に対称化を行うなどにより事後的に対処する。

我々は、次数 $c(\geq 3)$ の正則ランダムグラフ上で定義されたランダム結合イジングモデルの常磁性相におけるスピンスナップショットデータに対し、偽尤度法を適用した際の典型的な性能をレプリカ法によ

り分析した。その結果、データ数 M がスピン数 N に対して 2 倍以上あれば偽尤度法によりネットワークの形状を結合の符号も含めて正確に同定できることが分かった [1, 12, 15]。

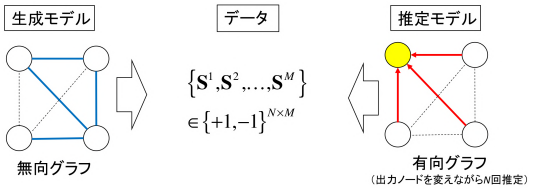


図 3.5.1: イジング逆問題と偽尤度法

SCAD 正則化による圧縮センシングの信号復元

計測対象となる信号のスパース性（統計的に成分の多くがゼロである性質）にもとづいて少数の計測結果からの信号復元を可能にする枠組みは圧縮センシングとよばれる。N 次元のスパースな信号を $\vec{x}^0$ とし、計測過程を表す行列を $M \times N$ 行列 A、計測結果を M 次元ベクトル $\vec{y} = A\vec{x}^0$ とする。圧縮センシングでは、計測結果により与えられる条件式 $A\vec{x} = \vec{y}$ を制約とした下でスパースな解を導くコスト関数 $J(\vec{x})$ を最小化することにより信号復元を行う。

従来、スパースな解を導く性質を備え、かつ、凸最適化として定式化されるため求解が容易であるという理由から、ℓ_1 ノルム $J_{\ell_1}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^{N} |x_i|$ をコスト関数として用いる方法が広く利用され、また、その信号復元性能が盛んに研究されてきた。一方で、近年の研究から、非凸関数を用いることで ℓ_1 ノルムを利用した場合を超える信号復元性能が得られることが報告されている。ただし、非凸関数の最適化は自明でなく、効率的な求解法の探索とその性能の分析が必要である。

我々は、ランダム問題に対し、SCAD とよばれる非凸なコスト関数に凸最適化に関する効率的な求解法として知られている ADMM 法、および、凸最適化を内部ループとして用いる DC 法とよばれる局所最適化法を適用し網羅的な数値実験を行なった。その結果、いずれの求解法もレプリカ法により予想される復元限界に肉薄する性能が得られることが判明した [13, 16]。

貪欲的モンテカルロ探索による ℓ_0 信号復元

ℓ_1 ノルム $J_{\ell_0}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^{N} |x_i|$ による信号復元が広く利用されている一方で、圧縮センシングの信号復元性能は ℓ_0 ノルム $J_{\ell_0}(\vec{x}) =$「$\vec{x}$ における非ゼロ要素数」をコスト関数とした場合に最良であることが知られている。ただし、ℓ_0 ノルムの最小化は組み合わせ最適化問題となり厳密な求解に必要な計算量は信号長に対して指数関数的に増大する。そのため、従来実際的に利用できる信号復元法とはみなされてこなかった。

この復元法に対し、我々は非ゼロ要素の個数を与えた上で、非ゼロ要素の集合とゼロ要素の集合の要素をランダムに 1 つずつ入れ替え、貪欲的な最小化を図る貪欲的モンテカルロ法の信号復元性能を網羅的な数値実験とランダム問題に対して得られる理論予想との比較により調べた。その結果、貪欲的モンテカルロ探索では信号長 N に対して $O(N^5)$ 程度の計算量が必要になるものの ℓ_1 ノルムの最小化（必要計算量は $O(N^3)$）を凌ぐ復元性能が得られることが分かった [4]。

3.5.2 安定性選択

半解析的ブートストラップ法にもどづく近似的安定性選択アルゴリズムの開発

従来の統計学はパラメータ数 p に対してデータ数 n が十分に大きな漸近領域の理論を中心に発展してきた。一方、機械学習を用いる場面ではしばしば p と n が同程度あるいは p の方が n よりも大きな状況でデータ分析が行われる。こうした状況を想定した統計学は高次元統計とよばれ、近年、理論の整備が急速に進んでいる。

least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) は高次元統計における有力な分析法である。$n \times p$ 行列で与えられる計画行列と n 次元ベクトルで表現される応答変数 $\vec{y} = (y_\mu)$ を線形回帰により分析することを考える。線形回帰では p 次元のパラメータベクトル $\vec{\beta}$ を用いて $\vec{y} \simeq X\vec{\beta}$ とモデル化する。標準的には自乗誤差 $||\vec{y} - X\vec{\beta}||_2^2$ の最小化によりパラメータの最適値 $\hat{\vec{\beta}}$ を定める。ただし、$n < p$ となる劣決定の状況ではこの最適化問題の解はユニークに決まらない。この問題に対して、従来の統計学では解析的な取り扱いが容易な ℓ_2 ノルム $||\vec{\beta}||_2^2 = \sum_{i=1}^{p} \beta_i^2$ による罰則項を導入した最小化によってパラメータを定めることが広く行われてきた。これに対し、LASSO では ℓ_2 ノルムに代わり ℓ_1 ノルム $\left(||\vec{\beta}||_1 = \sum_{i=1}^{p} |\beta_i|\right)$ を罰則項とした最小化によりパラメータ $\vec{\beta}$ を決定する。

LASSO を用いることの最大の利点は、ℓ_1 ノルムの原点における特異性に起因して、応答変数に関与しない冗長な説明変数に対応するパラメータベクトルの成分が最適化の結果ゼロに設定される効果を生むことにある。実際的なデータ解析では、応答変数がどの変数の影響を受けて値が定まっているのかあらかじめ分からないことも多い。そうした状況では分析に際して計画行列を構成する変数を何らかの手段により選び出す「変数選択」が必要になる。変数選択は複数の変数の候補の中から計画行列の要素となる変数の集合を選ぶ組み合わせ最適化問題であり厳密な解探索は一般に組み合わせ爆発を引き起こす。ところが、LASSO を用いれば、ℓ_1 ノルムの効果により、不要な変数に対応するパラメータがゼロに刈

り込まれるため回帰と同時に変数選択まで行うことができると期待される。実際、このことは計画行列の要素間の相関が十分弱い状況では数学的に厳密に示されている。

残念ながら、現実的なデータにおいては、LASSOによる変数選択の結果は罰則強度に対して不安定な挙動を示すうえ、罰則強度の適切な選択指針は解明されていない。「安定性選択」はこうした問題の解決を目的として提案された計算統計学的手法である。この手法では、与えられたデータ $D = (X, \vec{y})$ に対して LASSO を一度だけ適用して変数を選択するのではなく、D からのリサンプリングによって得られる要素数 n_{B} の $B(\gg 1)$ 組のブートストラップサンプルに対する LASSO の結果を利用する。具体的には、パラメータベクトルの各要素 β_i について、B 組のブートストラップサンプルに対して LASSO により非ゼロ解が得られた割合 Π_i を安定性指標として評価し、Π_i が（適当に定めた）しきい値 Π_{th} を上回る場合にのみ、対応する i 番目の変数が有意であるとみなして選択する。この方法にしたがうと、Π_i は罰則強度に対して安定的に振る舞い、かつ、応答変数に関与していないにも関わらず選択される “偽陽性” の個数 V のブートストラップサンプルの生成に関する期待値の上界を Π_{th} により制御できることも示される。一方で、Π_i を正確に評価するためにはブートストラップ回数 B を十分大きく取ることが必要である。LASSO 解の求解は数値的手法に頼らざるを得ないことから、この方法の計算量的負荷は高い。

我々はこの計算量的負荷の軽減を目的として、レプリカ法と期待値伝搬法とよばれる平均場近似の方法にもとづいて安定性指標 Π_i を近似的に評価する方法を開発した [2, 9]。我々の方法を用いれば、リサンプリングを実際に行うことなく、無限個のブートストラップサンプルに関して得られるべき Π_i を低計算量で近似的に求めることができる。その有用性は人工データおよび乳がんに対する公開データで検証されている。

安定性選択の性能分析

安定性選択の有用性は偽陽性の期待値に関する上界評価、および、さまざまなデータへの適用によって経験的に示されているが、その振る舞いは未だ十分に検討されているとは言い難い。たとえば、しきい値 Π_{th} を 1 以上に定めれば自明に偽陽性をなくすことができる一方、同時に真陽性まで刈り込んでしまう危険性がある。

こうした問題に関する知見を得るためには、解析的な取り扱いが可能なモデル的状況を想定し、詳細に分析してみることが有用である。我々は、$\vec{\beta}$ の各成分が確率 ρ で平均ゼロの正規分布にしたがい確率 $1-\rho$ でゼロとなるモデルシステムに対して、安定性選択による変数選択を適用した際の真陽性率、偽陽性率をレプリカ法をもちいて評価した。その結果、安定性選択により，（1）偽陽性を排除して非ゼロ要素の位置（サポート）を部分的に復元することが可能であること、また、（2）観測ノイズがない状況では、$\alpha = n/p$, ρ, および, $\gamma = n_{\mathrm{B}}/n$ が適当な条件を満たせば偽陽性を排除してサポートの完全復元が可能になることが分かった [17]。

3.5.3 神経回路網解析

神経細胞集団から得られるスパイクデータからの結合推定

神経細胞はスパイクとよばれる電位変化を互いに伝えあうことで情報伝達を行っていると考えられている。近年の計測技術の発達により、多数の神経細胞に関するスパイクデータを同時計測することが可能になってきた。こうした状況を反映し神経細胞集団に対するスパイク列の同時計測データから神経細胞間の結合を逆問題的に推定する方法への関心が高まっている。単一神経細胞のスパイク生成はホジキン・ハクスレ－モデルとよばれる非線形微分方程式によって記述できることが知られている。しかしながら、このモデルは複雑度が高く、その結合系を直接もちいた推定は困難である。

そこで、我々はスパイクの発火・非発火状態を+1, -1 の 2 状態で表現し、離散時間のダイナミクスとして記述するマカロック・ピッツモデルを用いることを試みた。ただし、そのためには（1）連続時間・連続状態として記述されるスパイクデータをどのような規準で離散時間・離散状態のデータに変換するか、（2）推定された結果から統計的に有意なものをどのように選択するか、という問題を解決しなければならない。これら（1）、（2）の問題に対し、我々は情報理論、および、計算統計学にもとづく対処法を開発した。また、人工データ、ならびに、培養された神経ネットワークから計測されたデータへの適用によりそれらの対処法の有用性を確認した [3, 20]。

ランダムに結合した再帰的ニューラルネットに保持できる短期記憶の研究

大規模で再帰的な構造を持つニューラルネットワークのダイナミクスを計算に利用する枠組みはリザーバーコンピューティング（Reservoir Computing: RC）と呼ばれ、ネットワークのダイナミクスを情報処理に利用する様式であることから、人間の脳神経回路に近い表現系とされ研究されている。また、対象となるデータがある表現空間ではスパースであると仮定し、同定すべき変数の数よりも少ない観測データから対象を復元する手法として、圧縮センシング（Compressed Sensing: CS）が信号処理の新しい技術として注目を集めている。

RC に関して、スパースな時系列を入力信号、ネットワークの状態履歴を観測行列とすることで、ネットワークの状態を CS の枠組みで分析するという試みがなされている。先行研究では、観測結果が実数値として得られる通常の CS に対応した状況を想定した上で、ニューロン数に比例する程度の時間まで遡っ

た過去の入力をネットワークの状態履歴から復元できることを示している。一方、信号処理においてはサンプリングレートから測定あたりのビット数に着目する場合が多く、符号のみを観測し信号の再構築を行う 1 ビット CS が提案されている。そこで、我々は観測できるネットワークの状態が 1 ビットであるとした際に、1 ビット CS の枠組みでランダムに結合した再帰的ニューラルネットワークに備わる時系列の記憶能力を分析した。レプリカ法をもちいた解析、ならびに、数値実験の結果、ネットワークは実数値が観測される場合と同様にニューロン数に比例する程度の時間まで過去に遡ったの入力の復元を可能とすることが分かった [19]。

＜報文＞

(原著論文)

[1] A. Abbara, Y. Kabashima, T. Obuchi and Y. Xu, “Learning performance in inverse Ising problems with sparse teacher couplings”, J. Stat. Mech. (2020), pp. 073402-1–073402-33

[2] T. Takahashi and Y. Kabashima, “Semi-analytic approximate stability selection for correlated data in generalized linear models”, J. Stat. Mech. (2020), pp. 093402-1 – 093402-36

[3] Y. Terada, T. Obuchi, T. Isomura and Y. Kabashima, “Inferring Neuronal Couplings From Spiking Data Using a Systematic Procedure With a Statistical Criterion”, Neural Comput. 32, pp. 2187 – 2211 (2020)

[4] K. Hayashi, T. Obuchi and Y. Kabashima, “Reconstructing Sparse Signals via Greedy Monte-Carlo Search”, J. Phys. Soc. Jpn. 89, pp. 124802-1 – 124802-6 (2020)

(会議抄録)

[5] T. Takanashi and Y. Kabashima, “Macroscopic Analysis of Vector Approximate Message Passing in a Model Mismatch Setting”, Proc. 2020 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT2020), pp. 1403–1409 (2020)

(国内雑誌)

[6] 小渕智之、樺島祥介、スパースモデリングと情報統計力学、日本物理学会誌 76, pp. 140–149 (2021)

(学位論文)

[7] 高橋昂、“A Statistical Mechanics Approach to High-dimensional Statistics （高次元統計学の統計力学的研究）”、2020 年 9 月、東京工業大学 博士論文

[8] 野口千尋、“Statistical mechanics analysis of low-rank matrix factorization for sparse matrices（スパース行列に対する行列分解の統計力学的解析）”、2020 年 12 月、東京工業大学 博士論文

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[9] T. Takanashi and Y. Kabashima, “Macroscopic Analysis of Vector Approximate Message Passing in a Model Mismatch Setting”, 2020 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), online, Jun 21–26 (2020)

(国内会議)

一般講演

[10] 今泉拓也、小渕智之、吉澤亮、佐甲靖志、樺島祥介、“細胞内生化学反応に関する伝達情報量の解析”、日本物理学会 2020 年秋季大会, online, 9 月 8 日 (2020)

[11] 樺島祥介、“回転不変スピングラスモデルにおけるレプリカ法と確率伝搬法との対応関係について”、日本物理学会 2020 年秋季大会, online, 9 月 9 日 (2020)

[12] Alia Abbara、 樺島祥介、 小渕智之、 許インイン、“教師の結合が疎な場合における逆イジング問題のレプリカ解析と仮説検定”、日本物理学会 2020 年秋季大会, online, 9 月 9 日 (2020)

[13] 石井智、小渕智之、樺島祥介、“SCAD 正則化による圧縮センシングの信号復元”、日本物理学会 2020 年秋季大会, online, 9 月 9 日 (2020)

[14] 髙橋昂、 樺島祥介、“モデル不整合時の一般化線形モデルの解析とリサンプリングへの応用”, online, 9 月 9 日 (2020)

[15] Alia Abbara、 樺島祥介、 小渕智之、 許インイン、“逆イジング問題のレプリカ法による性能解析：教師の結合が疎な場合”、第２３回情報論的学習理論ワークショップ（IBIS2020）, online, 11 月 25 日 (2020)

[16] 石井智、小渕智之, 樺島祥介、“SCAD 正則化を用いた圧縮センシングに関する信号復元性能の分析”、日本物理学会第 76 回年次大会, online, 3 月 13 日 (2021)

[17] 高橋昂、“安定性選択法の典型性能評価”、日本物理学会第 76 回年次大会, online, 3 月 13 日 (2021)

[18] 坂田綾香、 樺島祥介、“クエリを用いた能動学習のアルゴリズムと性能解析”、日本物理学会第 76 回年次大会, online, 3 月 13 日 (2021)

[19] 杉崎嵐、寺田裕、小渕智之、樺島祥介、“ニューラルネットにおける短期記憶の 1 ビット圧縮センシングによる想起”、日本物理学会第 76 回年次大会, online, 3 月 15 日 (2021)

招待講演

[20] 樺島祥介、“神経細胞集団のスパイクデータからの結合推定”、第３３回　回路とシステムワークショップ、online, 8 月 20 日 (2020)

[21] 樺島祥介、“スパース線形回帰に対する半解析的ブートストラップ法”、ディープラーニングと物理学 2020　オンライン, online, 10 月 1 日 (2020)

[22] 樺島祥介、“回転不変スピングラスモデルとレプリカ法”、研究会「ランダム行列と自由確率と機械学習」, online, 10 月 27 日 (2020)

[23] 高橋昂、“高次元統計学におけるリサンプリング法に対する統計力学的アプローチ”、研究会「ランダム行列と自由確率と機械学習」, online, 10 月 29 日 (2020)

[24] 樺島祥介、“スパース推定と統計力学”、明治大学 MIMS 共同研究集会「幾何学・連続体力学・情報科学の交差領域の探索」, online, 12 月 4 日 (2020)

[25] 樺島祥介、“リサンプリング法による統計的信頼性評価”、スマートサンプリング講演会, online, 2 月 12 日 (2021)

(セミナー)

[26] 樺島祥介、“線形回帰にもとづくネットワーク推定”、東北大学情報数物研究会、2021 年 2 月 18 日（2021）

3.6 辻研究室

当研究室では、量子多体系における非平衡現象や非平衡物性、統計力学に興味をもって物性物理の理論研究を行っている。量子多体系の舞台として、固体中で相互作用する電子の集団 (固体電子系)、レーザーによってトラップされて極低温まで冷却された原子の集団 (冷却原子系) などがある。それらの系で、平衡状態では実現できないような秩序や物性が非平衡状態で発現する現象を追究している。

2020 年度は主に、超伝導体のヒッグスモードを含む非平衡ダイナミクス、散逸のある非平衡量子開放系、量子情報 scrambling などの研究テーマに取り組んだ。

3.6.1 超伝導体のダイナミクス

超伝導体のヒッグスモード

超伝導体には、超伝導秩序パラメーターの振幅 (すなわち超流動密度) が集団的に振動する集団励起モードが存在し、素粒子のヒッグス粒子との類似から近年ではヒッグスモードと呼ばれている。ヒッグスモードは電気的・磁気的に中性のため光と (線形で) 結合せず、近年まで電荷密度波と超伝導が共存する系を除いて観測するのが困難であった。ところが非線形応答まで考えるとヒッグスモードと光を相互作用させることができ、実際に高強度のテラヘルツ波を用いた実験により NbN 超伝導体において三次高調波の共鳴が観測され、ヒッグスモード由来と整合する結果が得られている。一方で、ヒッグスモードのエネルギーが準粒子の個別励起に必要なエネルギー (超伝導ギャップ 2Δ) に等しく、準粒子励起の寄与も考える必要がある。

最近の研究により、フォノンの遅延効果や不純物散乱の効果が重要であることがわかってきている。また、NbN 超伝導体は多バンド系であり、多バンド効果も考慮する必要がある。そこで辻は野村 (理研) とともに、NbN 超伝導体に対して第一原理計算によりバンド内・バンド間の電子格子相互作用を評価した [1]。この結果に基づき、NbN における三次高調波の偏光角度依存性を理論解析した。バンド内とバンド間の不純物散乱率の大きさに依存するが、一般に dirty limit に近づくにつれてヒッグスモードの寄与は等方的になり、準粒子の寄与は角度依存性を残す。偏光角度依存性の実験結果と比較することで、ヒッグスモードの寄与が準粒子に比べて優勢であることがわかった。

辻は島野 (島野研) とともに、最近の超伝導ヒッグスモードの研究の進展を総説として招待論文にまとめた [4]。

非従来型超伝導体のヒッグスモード

非従来型超伝導体である銅酸化物高温超伝導体において、ヒッグスモードの寄与がポンプ・プローブ分光や三次高調波によって観測されている。そこで辻は Schwarz, Fauseweh, Manske (Max Planck) らとともに、非従来型超伝導体におけるヒッグスモードの一般的な分類と特徴づけを行った [3]。光励起によって誘起されるクエンチの対称性と偏光角度依存性から、ヒッグスモードをポンプ・プローブ分光で観測することで超伝導ギャップの対称性を逆算的に同定することができることを明らかにした。

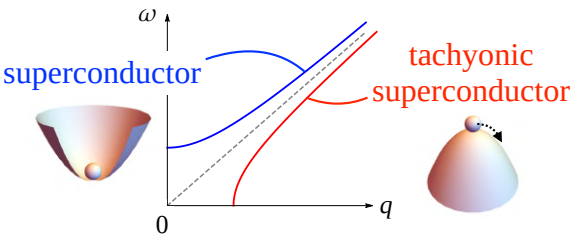


図 3.6.1: 超伝導体とタキオニック超伝導体中の電磁場の分散関係の概念図。

η ペアリング状態の動的不安定性

η ペアリング状態は格子上で重心運動量 $\mathbf{Q} = (\pi, \cdots, \pi)$ をもったクーパー対が凝縮した状態であり、ハバード模型の厳密な固有状態として知られている。そのエネルギーは基底状態のエネルギーより十分大きいにも関わらず、任意の次元で非対角長距離秩序 (すなわち超伝導秩序) を示すという際立った特徴を持つ。近年、電子系に光を照射することなどによって η ペアリング状態を誘起できることが理論的に指摘されており興味を持たれている。

辻は中川・上田 (上田研) とともに、η ペアリング状態と結合した電磁場のダイナミクスを解析し、電磁場と結合した η ペアリング状態が特異な動的不安定性を示すことを明らかにした [9]。電子間相互作用

が引力の場合は電磁場の 2 乗質量が負になり、電磁場が指数関数的に増大する「タキオン不安定性」があることがわかった (図 3.6.1)。一方、斥力の場合は、電磁場の 2 乗質量の実部は正になるが、同時に有限の虚部をもつ。これは、電磁場が振動しながら指数関数的に増大する「プラズマ不安定性」があることを意味する。これらの不安定性によって、η ペアリング状態の寿命は一般にフェムト秒のオーダー程度に非常に短くなる。斥力の場合は、η ペアリング状態がプラズマ不安定性によって崩壊する過程で、電子間相互作用の大きさからシフトした周波数を持つ光が放出されることが期待される。

マルチバンド超伝導体における集団励起モード

マルチバンド超伝導体においては、ギャップ関数の振幅の振動に対応するヒッグスモードだけでなく、異なるバンドのギャップ関数の相対位相の振動に対応するレゲットモードが存在することが知られている。辻は鎌谷・北村・森本 (東大物工) とともに、空間反転対称性の破れた超伝導体において、ヒッグスモードおよびレゲットモードが三次高調波だけでなく線形応答の光学伝導度スペクトルに現れることを明らかにした [7, 10, 13]。さらに、空間反転対称性が破れていなくてもレゲットモードが光学伝導度に現れる場合があることがわかった。

電場によって駆動された超伝導ゆらぎ

超伝導臨界温度以上では、超伝導秩序は存在しないものの、超伝導秩序パラメーターのゆらぎは存在する。辻は岩崎・星野 (埼玉大) とともに時間依存ギンツブルグ・ランダウ方程式を用いて、時間的に周期的なパルス電場によって駆動された時の超伝導ゆらぎのダイナミクスを解析した [5]。その結果、パルス電場で駆動されると超伝導ゆらぎが周期的に抑制される一方、誘起される電流は時間的に反周期的に振動することがわかった。

3.6.2 散逸のある非平衡量子開放系

粒子散逸が誘起する量子磁性

光格子中にトラップされた冷却原子気体は高精度でハバード模型を実装できるが、励起状態の原子や分子を用いた場合には原子間の非弾性散乱による 2 体ロスが発生する。辻は中川・上田 (上田研)、川上 (京大) とともに、2 体ロスによる粒子散逸を持つハバード模型のダイナミクスを量子マスター方程式に基づいて解析した [2]。フェルミ粒子系の場合は散逸がないときは粒子交換による反強磁性的なスピン相互作用を示すが、散逸を導入するとスピン間に有効的に強磁性相互作用が働く。これは 2 体ロスに対してエネルギーの高いスピン状態が長い寿命を持ち、長時間極限で高スピン状態が安定化するためである。ボース粒子系の場合は、強磁性的なスピン相互作用が散逸によって反強磁性的になる。このような動的なスピン相関の反転は、冷却原子系において二重井戸型光格子や量子気体顕微鏡を用いることで観測できることを議論した。

光の自然放出が誘起する η ペアリング超流動

光の自然放出は原子系において普遍的に存在する散逸の一つであり、原子系の様々な制御に応用されている。辻は中川・上田 (上田研)、川上 (京大) とともに、スピンの内部状態間で光の自然放出による緩和が起きるハバード模型を考察した [11]。その結果、自然放出による散逸下の定常状態において η ペアリング超流動状態が実現することがわかった。これは、η ペアリング状態においてパウリの排他律によって自然放出が抑制されることと、干渉効果によってダブロンの崩壊が抑制されることによる。特に、無限温度の初期状態から出発しても η ペアリング相関が発達するという著しい特徴を持つ。このような非平衡量子開放系特有の超流動ペアリング機構を光格子中の冷却原子系で実験的に実現する方法を提案した。

粒子散逸が誘起する超流動の集団励起と相転移

冷却フェルミ原子系において、粒子ロスによる散逸が存在する下で超流動の集団励起がどのように振る舞うかは未解明であった。辻は山本・川上 (京大)、中川・上田 (上田研) とともに、粒子ロスが系に印加された後のフェルミ超流動の集団励起を量子マスター方程式の枠組みで理論的に解析した [6, 12]。粒子散逸が存在するときは U(1) 位相が回転し、角速度が時間とともに速くなっていくことがわかった。散逸が一方にだけ入ったジョセフソン接合系を導入すると、散逸が弱いとき U(1) 位相の違いに起因した ac + dc 型のジョセフソン電流が流れ、レゲットモードが誘起されることを見出した。一方散逸が強くなると、ジョセフソン電流の dc 成分が 0 になることで特徴付けられる非平衡相転移が起こることがわかった。

3.6.3 量子情報 scrambling

ゆらぎの定理と量子干渉

孤立量子系に対する揺らぎの定理の標準的なアプローチは、エネルギーを時間発展の最初と最後に射影測定してその差から系の外からした仕事を求める二点測定形式に基づくものである。射影測定を行うために、系が時間発展をしてたどり着いた量子状態の一部の情報、つまり最終時刻におけるハミルトニアンの固有状態を基底にとって量子状態を密度行列で表現したときにその対角成分の一要素の情報しか得られない。密度行列の非対角成分は量子状態のもってい

る量子コヒーレンスを特徴づけるが、それは Hong-Ou-Mandel (HOM) 型の干渉実験によって観測することができる。

辻は、二つの同一な系の間の HOM 干渉実験によって得られる量子コヒーレンスの分布を全系がした仕事の関数としてみたときに、順過程と逆過程の間で揺らぎの定理型の厳密な関係式が成り立つことを示した [14, 16]。通常の仕事の揺らぎの定理と異なり、始状態と終状態の間の自由エネルギー差だけでなく Rényi エントロピー差とも関係する。この関係式は任意の N 個の同一な系の間の HOM 干渉実験の問題に拡張することができる。このような関係式を平衡状態近傍に適用すると、非線形応答係数と量子情報 scrambling を結びつける非時間順序型の揺動散逸定理が導かれる。また、量子コヒーレンスの揺らぎが、量子系の非可積分性と関係することを議論した。

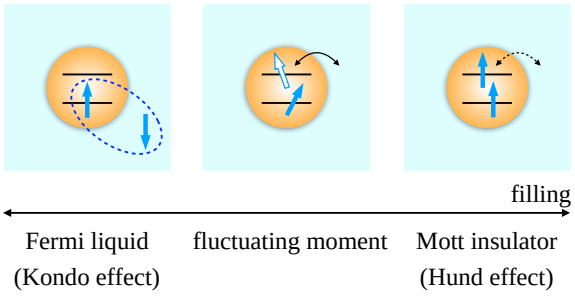


図 3.6.2: 多軌道系における spin freezing crossover の概念図。

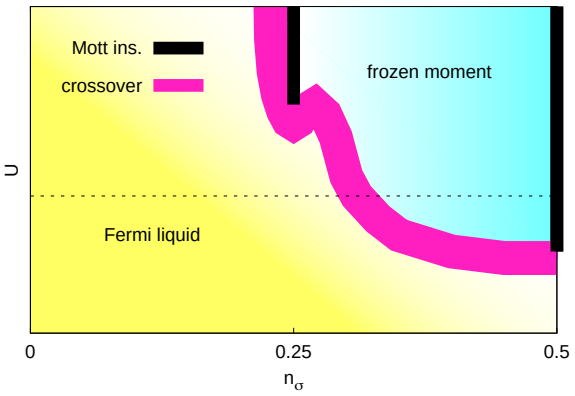


図 3.6.3: 2 軌道ハバード模型の相図。U は相互作用の強さ、n_σ は軌道、スピン当たりの平均粒子数を表す。

SYK 異常金属と多軌道系

フント結合をもった多軌道ハバード模型は非フェルミ流体の性質をもった異常金属相 (フント金属) を示すことが知られている。多軌道系においては、近藤効果による磁気モーメントの遮蔽とフント結合による局所磁気モーメントの形成が競合しており (図 3.6.2)、両者の効果がせめぎ合う境目で磁気モーメントが揺らいでいる領域 (spin freezing crossover) が現れる (図 3.6.3)。そこでは、自己エネルギーの周波数依存性が $\Sigma(\omega) \sim \omega^{1/2}$ と振る舞うなどの異常を示す。これは、準粒子励起をもたない非フェルミ流体的な異常金属相を記述する Sachdev-Ye-Kitaev 模型 (SYK 模型) と類似する。SYK 模型は非時間順序相関関数で特徴づけられる最大カオス性を示すことが知られており、ブラックホールと双対の関係にあることが期待されている。

辻は Werner (Fribourg 大) とともに、ハバード模型の非時間順序相関関数を動的平均場理論と量子モンテカルロ法を使って評価した。その結果、2 軌道模型の spin freezing crossover 領域において、スピンに関係した非時間順序相関関数が短時間で振動することなく急激に減衰し、その後の長時間においてべき的な遅い緩和を示すことがわかった。これは、SYK 模型における非時間順序相関関数の振る舞いと非常によく一致する。自己エネルギーや動的スピン相関の一致と合わせて、多軌道系の spin freezing crossover が SYK 異常金属と見なせることを議論した [8]。また、辻は多軌道系に対する量子モンテカルロ法について、推定モデルを使った最適展開基底の推定や機械学習の応用を行った [15]。

＜報文＞

(原著論文)

[1] N. Tsuji and Y. Nomura, “Higgs-mode resonance in third harmonic generation in NbN superconductors: Multiband electron-phonon coupling, impurity scattering, and polarization-angle dependence”, Phys. Rev. Research **2**, 043029 (2020).

[2] 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).

[3] L. Schwarz, B. Fauseweh, N. Tsuji, N. Cheng, N. Bittner, H. Krull, M. Berciu, G. S. Uhrig, A. P. Schnyder, S. Kaiser, and D. Manske, “Classification and characterization of nonequilibrium Higgs modes in unconventional superconductors”, Nat. Commun. **11**, 287 (2020).

[4] R. Shimano and N. Tsuji, “Higgs mode in superconductors”, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. **11**, 103 (2020).

(会議抄録)

[5] R. Iwazaki, N. Tsuji, and S. Hoshino, “Effects of periodic drive on superconductors above the transition temperature”, JPS Conf. Proc. **30**, 011047

(2020). [Proceedings of International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2019)]

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[6] K. Yamamoto, M. Nakagawa, N. Tsuji, M. Ueda, and N. Kawakami, “Dissipation-induced collective excitations and nonequilibrium phase transition in fermionic superfluids”, APS March Meeting 2021, online, March 2021.

[7] T. Kamatani, N. Tsuji, S. Kitamura, and T. Morimoto, “Optical responses of Higgs and Leggett modes in multiband superconductors”, APS March Meeting 2021, online, March 2021.

招待講演

[8] N. Tsuji, “Spin freezing crossover in multi-orbital systems and SYK strange metal”, CEMS Topical Meeting Online, ‘Quantum Technology meets Quantum Matter’, online, September 2020.

(国内会議)

一般講演

[9] 辻直人, 中川大也, 上田正仁, “η ペアリング状態の異常な電磁場応答”, 日本物理学会年次大会, オンライン, 2021 年 3 月.

[10] 鎌谷拓実, 北村想太, 辻直人, 森本高裕, “マルチバンド超伝導体におけるレゲットモード”, 日本物理学会年次大会, オンライン, 2021 年 3 月.

[11] 中川大也, 辻直人, 川上則雄, 上田正仁, “光を自然放出する Fermi 原子系における散逸誘起 η ペアリング超流動”, 日本物理学会秋季大会, オンライン, 2020 年 9 月.

[12] 山本和樹, 中川大也, 辻直人, 上田正仁, 川上則雄, “フェルミ超流動における散逸が誘起する集団励起の理論”, 日本物理学会秋季大会, オンライン, 2020 年 9 月.

[13] 鎌谷拓実, 北村想太, 辻直人, 森本高裕, “空間反転対称性の破れた超伝導体におけるヒッグスモード”, 日本物理学会秋季大会, オンライン, 2020 年 9 月.

招待講演

[14] 辻直人, “量子干渉と揺らぎの定理”, オンライン研究会「量子多体系の熱力学 – 数理の発展と展望」, オンライン, 2020 年 9 月.

[15] 辻直人, “機械学習・推定モデルを用いた量子モンテカルロ法と多軌道系への応用”, 物性研究所短期研究会「量子多体計算と第一原理計算の新展開」(FQCS2020), オンライン, 2020 年 7 月.

(セミナー)

[16] N. Tsuji, “Quantum interference fluctuation theorem”, 統計力学セミナー (東大本郷), オンライン, 2020 年 10 月.

3.7 蘆田研究室

量子力学の世界では、系のミクロな情報を得ることの代償として、ハイゼンベルグの不確定性関係に起因する測定の反作用が量子ダイナミクスに本質的な影響を及ぼす。近年の原子・分子・光物理分野における革新的な実験技術の進歩により、大自由度の量子系 - 量子多体系 - を単一量子レベルで観測/制御することが可能となった。一方で、観測/制御下における量子系の研究は、これまで量子光学の分野で主として少数自由度系を対象に精力的にされてきた。本研究室では、これら二つの分野 - 量子多体物理と量子光学 - の境界領域における理論研究を行っている。特に、摂動及び非摂動領域の開放系について、量子測定理論・変分法・繰り込み群・場の理論・厳密対角化なども援用しながら研究を行ってきている。

3.7.1 開放系の物理

非エルミート物理・散逸系

外界環境や観測者の影響下の物理系は「非平衡開放系」として記述される。これまで我々は開放系のうち特に非エルミート系などに着目し、量子臨界現象やトポロジカル物性などの枠組みを拡張することで、エルミート系に類のない新たな物理現象を探求してきた。

これらの研究は量子系にとどまらず、近年では古典系にも広がりを見せている。研究 [6] では、非平衡古典系を念頭に置き、バルクのトポロジーとは独立に生じる非エルミート系の新たな端状態を発見した。非エルミート系に特有な例外点と呼ばれる特異点に守られていることから「例外端状態」と名付け、アクティブマターや古典電気回路における実験実現も提案した。分類表など既存の枠組みでは予言が行えない非エルミート系特有の現象であり、今後のさらなる展開が期待される（東大物工沙川研との共同研究)。

研究 [3] では京都大学高橋研らと協力し、冷却原子気体において空間的に変調された光で誘起された一体原子ロスを導入し PT 対称な非エルミート多粒子系を実験的に実現した。研究 [4] では東大物工中村研らと協力し、ジョセフソン接合を結合した実験系において熱散逸とフラストレーションが共存する状態での BKT 転移を観測した。研究 [5] では、方向性を有した散逸を導入することで、着目系自身は一様であっても非相反な応答が生じることを摂動的な散逸系の枠組みで理論的に示した（京都大学川上研との共同研究)。研究 [8] では可解模型を用い、非エルミート系では量子相転移がギャップの消失を必ずしも伴わないことを例証した（上田研との共同研究)。また、当該分野においてこれまで行ってきた一連の成果に関連する概説論文 [11] を執筆した。

観測誘起量子相転移

測定過程がロスを引き起こす系では、定常状態は一般に自明な真空状態となる。一方で、粒子数を保存する測定過程の場合は、非自明な定常状態が実現し得る。しかし冷却原子気体などで典型的な例として挙げられる、位置測定に伴うディフェージングなどにおいては、マスター方程式のレベルでは熱化に伴い無限温度状態が定常状態となってしまい、興味深い量子的な性質がむしろ消失してしまうことが知られていた。これに対し研究 [1] では、量子測定の測定結果に条件づけられた量子軌道と呼ばれる純粋状態の時間発展を考え、その定常領域に着目し、密度行列とは対称的に量子相転移などの豊かな現象が生じることを数値的に明らかにした。特に、エンタングルメントエントロピーのスケーリング解析から、量子臨界点が存在することを示唆する結果が得られた。数値的に得られた臨界指数は、既存の普遍クラスのいずれにも属していないことを示唆しており、新たな臨界現象が実現しているのか今後のさらなる研究が期待される（東大物工藤氏との共同研究）。

量子電磁場環境と量子多体系

近年、古典電磁場を周期外場として物質を駆動しその過渡的な物性変化を探る可能性が精力的に調べられてきた。一方で、量子電磁場環境により量子多体物性を制御する可能性は多くが未解明である。研究 [7] では、共振器中の真空電磁場揺らぎと物質中のフォノン励起を強く結合することで、強誘電転移が生じ得ることを論証した。これは量子光学の文脈では超放射転移とも解釈できる。本研究では、既存の研究とは異なり、曖昧さの残る近似や仮定に頼らず量子電磁場誘起相転移の可能性を初めて明確に示した（ハーバード大学、スイス連邦工科大学、マックスプランク研究所、オックスフォード大学との共同研究）。研究 [10] ではより一般に、物質と量子電磁場の相互作用が非常に強くなり従来のクーロンゲージでは強束縛模型などの有効記述が破綻する状況を考え、この困難を解決するための新たなユニタリ変換を構築した。光物質相互作用が強い極限で光と物質の量子もつれを漸近的に完全に解ける変換であり、これにより任意の相互作用強度で適用可能な非摂動的枠組みを構築した（ハーバード大学、スイス連邦工科大学との共同研究）。

3.7.2 統計物理・機械学習

揺らぎが重要となる微視的な物理系の熱力学 - 確率的熱力学 - は、これまで主に粒子間相互作用が重要でない領域において精力的に研究がなされてきた。これに対し研究 [9] では、ナノ熱電材料を念頭に置き、相互作用がある微小熱力学系のパワー効率トレードオフ関係の限界を数値的に同定した。これには膨大な探索空間中の最適化問題が含まれるが、差分進化と呼ばれる大域的探索アルゴリズムを応用することで従来の困難を解決した（東大物工沙川研との共同研究）。研究 [2] では、強化学習の代表的課題である倒立振り子の問題を、観測・フィードバック下の開放量子系に拡張し、深層強化学習を用いることで、既存の制御理論を上回る精度で量子系の制御が可能であることを数値的に示した（上田研との共同研究）。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Y. Fuji and Y. Ashida, Measurement-induced quantum criticality under continuous monitoring, Physical Review B **102**, 054302 (2020).

[2] Z. T. Wang, Y. Ashida, and M. Ueda, Deep Reinforcement Learning Control of Quantum Cartpoles, Physical Review Letters **125**, 100401 (2020).

[3] Y. Takasu, T. Yagami, Y. Ashida, R. Hamazaki, Y. Kuno and Y. Takahashi, PT-symmetric non-Hermitian quantum many-body system using ultracold atoms in an optical lattice with controlled dissipation, Prog. Theor. Exp. Phys. ptaa094 (2020).

[4] R. Cosmic, K. Kawabata, Y. Ashida, H. Ikegami, S. Furukawa, P. Patil, J. M. Taylor and Y. Nakamura, Probing XY phase transitions in a Josephson junction array with tunable frustration, Physical Review B **102**, 094509 (2020).

[5] K. Yamamoto, Y. Ashida and N. Kawakami, Rectification in Nonequilibrium Steady States of Open Many-Body Systems, Physical Review Research **2**, 043343 (2020).

[6] K. Sone, Y. Ashida and T. Sagawa, Exceptional non-Hermitian topological edge mode and its application to active matter, Nature Communications **11**, 5745 (2020).

[7] Y. Ashida, A. Imamoglu, J. Faist, D. Jaksch, A. Cavalleri and E. Demler, Quantum Electrodynamic Control of Matter: Cavity-Enhanced Ferroelectric Phase Transition, Physical Review X **10**, 041027 (2020).

[8] N. Matsumoto, K. Kawabata, Y. Ashida, S. Furukawa and M. Ueda, Continuous phase transition without gap closing in non-Hermitian quantum many-body systems, Physical Review Letters **125**, 260601 (2020).

[9] Y. Ashida and T. Sagawa, Learning the best nanoscale heat engines through evolving network topology, Communications Physics **4**, 45 (2021).

[10] Y. Ashida, A. Imamoglu and E. Demler, Cavity Quantum Electrodynamics at Arbitrary Light-Matter Coupling Strengths, Physical Review Letters, in press.

[11] Y. Ashida, Z. Gong and M. Ueda, Non-Hermitian Physics, Advances in Physics, in press.

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[12] Y. Ashida, Shedding quantum light on quantum many-body systems, Theoretical studies of topological phases of matter, Kyoto-Zoom hybrid meeting, December 17-18, 2020.

(国内会議)

一般講演

[13] 蘆田祐人, Atac Imamoglu, Jerome Faist, Dieter Jaksch, Andrea Cavalleri, Eugene Demler, 量子的な光を用いた物質制御：真空電磁場に誘起された強誘電転移, 日本物理学会 2020 年秋季大会, オンライン, 2020 年 9 月 8 日-11 日.

[14] 蘆田祐人, 沙川貴大, 差分進化を用いた最適なナノ熱電熱機関の探索, 日本物理学会 2020 年秋季大会, オンライン, 2020 年 9 月 8 日-11 日.

招待講演

[15] 蘆田祐人, 非平衡開放系の物理, KEK 連携研究会, オンライン, 2021 年 3 月 29 日-31 日.

(セミナー)

[16] Y. Ashida, Quantum Rydberg central spin problem: remnant of integrability, Correlated electron virtual international seminars, Online, July 20, 2020.

[17] 蘆田祐人, 非平衡開放系の量子多体物理, 東工大セミナー, オンライン, 2020 年 10 月 7 日.

4　物性実験

4.1　長谷川研究室

4 月から修士課程 1 年生として佐藤瞬亮と谷内息吹が新しくメンバーに加わった。9 月には FAN Di が博士課程を、3 月末には樋渡功太が修士課程を修了して就職した。

当研究室では、表面物性、特に「表面輸送」をキーワードにして実験的研究を行っている。おもに半導体や金属、トポロジカル絶縁体結晶表面上に形成される種々の表面超構造や原子層、多層膜 (超格子) 構造、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) 絶縁体結晶の表面電子状態、超伝導グラフェン、ラシュバ超伝導、原子層超伝導、偏光誘起非相反光伝導などである。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/界面での電子・スピン輸送

強磁性トポロジカル絶縁体のサンドイッチ構造におけるスキルミオンによるトポロジカルホール効果

強磁性 (FM) が付与されたトポロジカル絶縁体 (TI) (強磁性トポロジカル絶縁体: FMTI) の表面ではトポロジカルに非自明なカイラルスピン電子状態が実現されるが、この表面状態と磁化が coupling することによりスキルミオンと呼ばれる FM 秩序とは異なった渦状磁気構造が形成される。FMTI でのスキルミオンの報告例は、多くは磁性元素を TI 内部にドープさせた系であるが、デバイス応用の観点では結晶性を崩さずに TI 内部に規則的に磁化が配列した系でのスキルミオン観測が求められる。本研究では、非磁性 TI である $(Bi,Sb)_2Te_3$(BST) と磁性原子が規則的に配列した FMTI である $Mn(Bi,Sb)_2Te_4$(MnBST) のサンドイッチ構造 MnBST/BST/MnBST を分子線エピタキシー法により作製し、Bi/Sb 組成比によってフェルミ準位を適切に制御することによりスキルミオン由来のホール抵抗の増大 (トポロジカルホール効果) を PPMS による *ex situ* 電気伝導測定によって観測した。さらに物質材料研究機構との共同研究によりサンドイッチ構造の非磁性 TI の膜厚依存性を評価することで、スキルミオン安定化には特定の膜厚、つまり上下の FMTI 間の距離が重要であることが分かった。本結果は、規則的に磁性原子が配列した FMTI 系でのスキルミオンの存在を初めて系統的に明らかにした結果である。(物質材料研究機構との共同研究)

Bi_2Se_3 における非対称光照射による非相反電流

トポロジカル絶縁体におけるヘリカルスピン構造を用いて、スピン流と電流の非相反流を作り出す研究が近年盛んに行われている。その多くが円偏光ガルバニック効果 (CPGE) を用いたものである。我々は、トポロジカル絶縁体である Bi_2Se_3 に対して円偏光の遠赤外光 (波長 1550nm) を照射して生じる光電流の偏光依存性を観測した。すると垂直入射でも円偏光依存電流が観測され、これは CPGE では説明できないことが明らかとなった。また試料端への光照射でその現象が顕著に増大することが分かった。これは試料端において生じるスピンの励起と逆スピンホール効果によって生じる渦電流の非対称性に起因すると考えられ、試料端だけではなく構造が非対称であっても生じうる普遍的な非相反電流である。本研究は光を照射して円偏光を変化させるだけで逆スピンホール効果を生じうることを明らかにし、将来のフォトニクススピンデバイスへの応用可能性を示した。

超伝導/トポロジカル結晶絶縁体ヘテロ構造の伝導

トポロジカル結晶絶縁体の表面状態を超伝導にすると発生すると期待されるマヨラナ準粒子のゼロエネルギー状態 (マヨラナゼロモード) を探索するため、s 波超伝導体である Sn とトポロジカル結晶結晶絶縁体である SnTe のヘテロ構造を分子線エピタキシー法で作成し、伝導特性を PPMS 装置で *ex situ* 測定した。RHEED 観察によって、SnTe(111) 表面上では Sn は 7 原子層厚まで α-Sn の形で成長し、超伝導転移を示さないが、それより厚くなると β-Sn となり、2 K 程度で超伝導転移を起こした。今後、この超伝導特性を明らかにするため、4 端子プローブによるトンネル分光測定を行い、さらに SnTe を $Pb_{1-x}Sn_xTe$ に拡張して Pb/Sn 組成比を変えると起こるトポロジカル転移の影響を明らかにする。

$SnSe_2$ での弱反局在

非遷移金属のダイカルコゲナイドである $SnSe_2$ は、バルク結晶ではトリビアルな結晶であるが、原子層の極薄膜では基板の影響や対称性の破れのため、超

伝導転移や CDW 転移など興味深い相転移を示すことが知られている。本研究では、Si(111) 基板表面上に約 10 ユニット層厚の $SnSe_2$ を成長させ、Al_2O_3 キャップ層を付けて PPMS 装置による *ex situ* 伝導測定を行った結果、弱反局在を示すことを見出した。これは、この物質のバルク結晶では顕著でなかったスピン軌道相互作用が原子層薄膜で増強されることに起因すると考えられる。

Cu-ドープ $SnSe_2$ 超薄膜の磁性と伝導

$SnSe_2$ の原子層超薄膜は超伝導転移を起こし、それに 4% 程度の Cu をドープすると反強磁性を示すことが理論的に示されている。反強磁性は高温超伝導に関係が深いいので、本研究では $Sn_{1-x}Cu_xSe_2$ の原子層を Si(111) 基板上に作成して、その伝導特性を調べている。分子線エピタキシー法によって成長させるとユニット層ごとに層状成長することが RHEED 観察から明らかとなった。また、伝導測定からトポロジカルホール効果とみられる現象を見出した。さらに、液体イオンゲート法を利用してフェルミ準位を調整しながら PPMS 装置で *ex situ* で伝導特性を測定した結果、4 K 近傍から超伝導らしき抵抗の急激な減少を示した。今後、ドーピングレベルと転移温度の関連を系統的に調べる計画である。

Cu_2Si 単ユニット原子層での弱反局在

電子波の量子干渉効果である弱反局在効果（WAL）は、3 次元トポロジカル絶縁体やディラック半金属、ワイル半金属などで観測される興味深い物理現象である。Cu_2Si 単ユニット層は 2 次元ディラックノーダルライン（DNL）物質であることが理論計算および ARPES 観測から示されていることから、WAL の観測が期待されている。本研究では半導体 Si(111) 基板上に Cu_2Si 単原子層を作製し、超高真空中でその場 (*in situ*) 電気伝導測定した結果、面直磁場の増加に伴って伝導度が減少するという WAL に特有の振る舞いが観測された。温度 15 K 以下では WAL の理論式によるフィッティングが可能であり、伝導チャネル数や電子コヒーレンス長が昇温により減少することが示された。また、DNL が消失したと思われる試料では WAL が観測されなかったことからも、DNL 由来の WAL である可能性が示唆された。今後は理論計算により DNL の電気伝導への寄与を明らかにし、WAL 発現のメカニズムを解明したい。

SiC 上グラフェンにおける Ca インターカレート誘起超伝導

炭素原子による 2 次元物質グラフェンが 2 層重なる場合、その層間に原子や分子を挿入（インターカレート）することで超伝導を誘起させることができる。これまで Ca インターカレート 2 層グラフェンではインターレイヤーバンドによる超伝導とされていたが、他の電子構造由来の可能性を排除できていなかった。さらに積層構造についても新たな事実が明らかになり、正確な積層構造モデルに基づいた超伝導の議論が求められている。本研究では、試料作成過程での積層構造・電子状態・電気伝導特性を系統的に調査した。作製過程で SiC 基板と強く結合しているバッファー C 層が遊離されて擬フリースタンディンググラフェン層となること、それによって単層グラフェンが 2 層となり、その層間にインターカレート誘起超伝導が発現することが示された。Ca がグラフェン表面に吸着しているだけでは超伝導にならないこと、Li 原子のインターカレートでも超伝導にはならないことを明らかにし、超伝導の起源となる電子状態についても考察を深めた。今後は超伝導エネルギーギャップの直接観測や、理論計算による構造モデルの検証および超伝導発現機構の解明に取り組む。（東京大学物性研究所、東京工業大学との共同研究）

Yb-インターカレート・グラフェンにおける強磁性の発現

d,f 電子軌道を持つ金属原子をグラフェン層間に挿入すると、金属原子とグラフェンのπ-軌道との相互作用が生じ、強磁性が発現されることが理論的に示唆されている。昨年、本研究室では 4f 電子軌道をもつ常磁性の Yb を 6H-SiC(0001) 基板を Ar 大気中で通電加熱して得られるグラフェン/SiC 上に蒸着・加熱処理すると明瞭な異常ホール効果を観測することに成功した。本研究では、Yb による強磁性を確かめるため、Yb を SiC 上グラフェンにインターカレートさせた試料を系統的に作製し、それらの電気伝導・ホール測定・SQUID での磁化測定を行った。その結果、Yb インターカレート SiC 上グラフェンのほぼすべての試料において保磁力をもつヒステリシスループが再現され、最高で 101 K の Tc が確認された。これは金属原子をインターカレートさせたグラフェンにおいて強磁性を観測した初の成果である。一方、グラフェンを作成しない SiC 結晶表面上に Yb を蒸着した試料の SQUID 測定結果では強磁性のヒステリシスが観測されなかった。よって、グラフェンのキャリアが強磁性の発現に寄与している可能性が確認された。

4.1.2 表面・原子層ナノ構造

トポロジカル結晶絶縁体 $Pb_{1-x}Sn_xTe$:Sb のバンド構造

トポロジカル結晶絶縁体である $Pb_{1-x}Sn_xTe$ は、特に $x > 0.4$ の場合 p 型となり ARPES によるバンド構造の観測が困難であると知られている。そこで我々は Sb を 1 %ドープすることで電子を注入しフェルミ準位を調整し表面バンドが観測できるように試みた。$\overline{\Gamma}$ と $\overline{M}$ 点においてディラックコーンが存在

すると予想されているが、前者では表面状態が現れず、後者では明瞭に観測された。$\bar{\Gamma}$ 点で消失した理由としては、Sb ドープによる表面電位によって対称性が破れ、表面状態が変調を受けてディラック点にギャップが開いたことによると考えられる。また $\bar{\Gamma}$ 点では代わりに価電子帯の顕著なラシュバ分裂が観測され、興味深いことに Sn/Pb 組成比を増大させるに従ってラシュバパラメーターが増加することを見出し、SnTe:Sb は PbTe:Sb に比べ 2 倍以上の値となった。これは有効質量の変化に起因すると考えられる。

SiC 表面上での Cu_2Si 単ユニット層の成長

Si(111) 表面上に成長した Cu_2Si 単ユニット層は 2 次元ディラックノーダルライン（DNL）物質であるが、その DNL はフェルミ準位（E_F）より 0.5 eV 程度上に位置する。一方、バルクの Cu(111) 単結晶表面上に成長した Cu_2Si 単ユニット層の DNL は E_F より 0.5 eV 程度下に位置する。そこで DNL のエネルギー位置を制御するために、Cu(111) 超薄膜を SiC(0001) 基板結晶表面上に成長させ、その上に Si を蒸着して Cu_2Si 単ユニット層を作成することを試みた。SiC(0001)-3×3 表面構造上でもっとも平坦な Cu(111) 膜が成長すること、その上に Si を蒸着すると Cu_2Si 単ユニット層に対応する $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 構造が形成されること、さらに Si を蒸着すると 3×3 表面構造になることを RHEED および STM 観測によって明らかにした。しかし、今のところ平坦な Cu(111) 連続膜は 15 原子層厚程度以上で形成されるので、Cu 膜の電気伝導が支配的となり Cu_2Si 単ユニット層の伝導特性を検出するまでに至っていない。（上海交通大学との共同研究）

テラヘルツ光を用いたサイクロトロン共鳴による Bi 結晶の物性研究

ビスマス Bi はキャリ濃度が極めて低い半金属であり、スピン軌道相互作用も極めて強く、様々な量子現象を示すために、研究の歴史が長いにもかかわらず今なお興味の尽きない物質である。Bi 薄膜は量子井戸状態となるため、膜厚によりバンド構造が半金属的-半導体的に転移することが報告されており、それぞれのバンド構造での輸送特性の違いなど詳細に解明すべき点はある。そこで、Si(111) 面に成長した Bi(111) 結晶薄膜でのテラヘルツ光・強磁場を用いたサイクロトロン共鳴により、各バンド構造でのキャリアの有効質量の膜厚依存性を明らかにする実験を行っている。また、Bi は Sb ドープによりトポロジカル物質への転移やフェルミ面の調整が可能なので、今後は Sb ドープ系での有効質量やキャリアの変化などを明らかにしていく。(物質・材料研究機構との共同研究))

4.1.3 新しい装置・手法の開発

超高真空中 in situ 電気伝導・エネルギー分光同時測定装置の開発

超伝導の非従来性を検証する際、超伝導ギャップの大きさやその対称性といった情報が得られるトンネル分光は有力な方法である。当研究室では超高真空 *in situ* 4 端子電気伝導測定を行って超伝導試料に関する研究を進めてきたが、同時に超伝導ギャップの形状などを調べることは出来なかった。また、電気伝導と別にトンネル分光測定が行われることは多くあったが、同一試料・同一箇所において測定が行われた例は報告されていない。そこで、*in situ* での電気伝導測定と同時にトンネル分光測定もできるようにすることを目指し、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。これが実現すれば大気暴露や試料間の差異の影響を完全に除いた上で多角的に超伝導試料の物性を調べることができるようになり、確度の高い情報が得られると期待される。本年度は回路の改良および測定用プログラムの作製を行い、ノイズを軽減するために装置への配線を見直す作業を進めてきた。今後は In/SnTe 接合系などトポロジカル超伝導体の候補物質の測定を行い、その非従来性の検証を行っていきたい。

超高真空中 in situ 偏光制御中赤外線照射装置の開発

電子スピンを利用するスピントロニクスでは光と物質の相互作用を利用する。円偏光は物質中の電子をスピン選択的に励起することができるので、トポロジカル物質でのスピン運動量ロッキングにために、円偏光を用いた非相反伝導現象の研究が近年注目されている。本研究室では超高真空装置内で試料を作成し、その場（*in situ*）測定する手法を取っているが、光を真空装置内に注入する際のビューポートにより円偏光は僅かに歪んでしまう。そこで円偏光生成機構をビューポートを介さず真空装置へと接続するためのチャンバーと光学系を設計し、製作に取り掛かっている。また、トポロジカルエッジ状態への高効率なスピン注入には高輝度 (高エテンデュ) 光源が必要であり、中赤外から赤色のレーザーが最適であることが判明した。必要な部品を揃え、各々の動作確認と微調整を行っている。この設計では $2\sim18$ μm と広い波長範囲での中赤外光に対応した円偏光・直線偏光が生成できるので、様々な励起エネルギーに応じた円偏光誘起電流・スピン流が測定できると期待できる。

Lateral-ToF 法による移動度の評価方法の開発

半導体デバイスの高密度化・高速度化に伴い、表面・界面を伴う微細構造における移動度の向上は重要な課題となっている。とくに、フラッシュメモリ等の高度に集積されるデバイスでチャンネル材料と

して用いられる多結晶シリコンは代替が利かない素材であるにも関わらず移動度が低く、デバイス開発においてボトルネックとなっている。多結晶シリコンの移動度向上のために、パルスレーザーを用いた面内方向飛行時間 (Lateral-ToF) 型の移動度測定手法の開発と検証を行っている。本年度には測定システムの製作と検証を行い、ToF 移動度と FET 移動度のある程度の一致を確認した。今後は各種試料について測定を行い、薄膜多結晶シリコンの移動度低下の要因を探りたい。

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 科研費 基盤研究 (A)「強いスピン軌道相互作用物質表面でのエッジを利用した非相反伝導現象の研究」(代表 長谷川修司)
・日本学術振興会 科研費 基盤研究 (B)「トポロジカル絶縁体・強磁性体接合の磁性機構解明と、高温量子異常ホール効果への展開」(代表 秋山了太)
・日本学術振興会 科研費 挑戦的研究 (萌芽)「水素修飾で実現する高転移温度を持つ原子層超伝導体」(代表 秋山了太)
・日本学術振興会 科研費 挑戦的研究 (萌芽)「スピン輸送現象の実空間その場観察手法の開発」(代表 保原麗)

＜受賞＞

[1] 遠山晴子：“フリースタンディング *2* 層グラフェンにおける *Ca* インターカレート誘起超伝導”、東京大学低温科学研究センター第 12 回研究交流会 ベスト・ポスター・アワード, 2021 年 3 月 11 日.

＜報文＞

(原著論文)

[2] 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).

[3] 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 (Apr, 2020).

[4] 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 **33**, 075007(8pp) (Jun, 2020).

[5] N. Fukui, R. Hobara, A. Takayama, R. Akiyama, T. Hirahara, S. Hasegawa: *Scattering of topological surface-state carriers at steps on surfaces*, Physical Review **B** 102, 115418 (Sep, 2020),

(国内雑誌)

[6] 遠藤由大、高山あかり、長谷川修司：全反射高速陽電子回折法を用いたグラフェン超伝導材料の原子配列解析, Isotope News (日本アイソトープ協会) No. 771, pp. 15-18 (Oct, 2020).

[7] 遠藤由大, 深谷有喜, 望月出海, 高山あかり, 兵頭俊夫, 長谷川修司: 全反射高速陽電子回折（*TRHEPD*）による *Ca* 挿入 *2* 層グラフェン超伝導材料の原子配列解明, 陽電子科学 **16**,23-29 (Jan, 2021)（日本陽電子科学会）

(著書)

[8] 長谷川修司: トポロジカル物質とは何か —最新・物質科学入門—, 講談社ブルーバックス (Jan, 2021)

(その他)

[9] 長谷川修司：公益社団法人の発足にあたり, 公益社団法物理オリンピック日本委員会ホームページ (Apr, 2020) (http://www.jpho.jp/jpho/20200401-ChairRemarkatKoekiShadan.pdf)

[10] 長谷川修司：考える実験 — 国際物理オリンピック *2006* の実験問題, 日本物理学会誌 **75** (9), 576-579 (Sep, 2020).

[11] 長谷川修司、東辻浩夫：ヨーロッパ物理オリンピック *2020* オンライン大会に参加, 大学の物理教育 **26** (3), 128-132 (Nov, 2020).

[12] 長谷川修司: 長谷川修司: 巻頭言：男女共同△、ダイバーシティ、コロナ禍, 表面と真空 **64**(3), 109 (Mar, 2021).

(学位論文)

[13] FAN Di: *Helicity dependent photocurrent in strong spin-orbit coupling materials* (博士論文).

[14] 樋渡功太:表面界物質の作成と物性 (修士論文).

[15] 鄭 帝洪：*SiC* 上 *Yb* 修飾エピタキシャルグラフェンにおける強磁性の発現とその特性（修士論文）.

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[16] R. Akiyama: *Emergence of correlated surface states in topological Hall effect in the self-assembling magnetic sandwich topological insulator structure*, The 5th Joint Symposium 2020 between Tsinghua University and The University of Tokyo ”Trans-scale Materials Science”, 2020 年 12 月 22 日, Online.

一般講演

[17] Haruko Toyama, Ryota Akiyama, Rei Hobara, Kota Hiwatari, Shunsuke Sato, Ibuki Taniuchi, Shengpeng Liu, Kentaro Nomura, Shuji Hasegawa: *Observation of weak antilocalization in $Cu_2Si/Si(111)$ by in-situ transport measurement*, Summer School ”Design and Synthesis of Quantum Materials” of the IMPRS & MPI-UBS-UTokyo Center, 2020 年 9 月 28 日, Online.

[18] Takuya Takashiro, R. Akiyama, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, H. Toyama, R. Nakanishi, K. Hiwatari, T. Hirahara, T. Fukasawa, A. V. Zotov, A. A. Saranin, and S. Hasegawa: *Electrical observation of magnetic skyrmions in ferromagnetic topological insulator* $Mn(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4/(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3/Mn(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4$, Summer School "Design and Synthesis of Quantum Materials" of the IMPRS & MPI-UBS-UTokyo Center, 2020 年 9 月 28 日, Online.

(国内会議)

招待講演

[19] 長谷川 修司：空間反転対称性の破れた原子層超伝導の実験的研究, NANOSPEC2021 (SPring-8 ユーザー協同体 顕微ナノ材料科学研究会 日本表面真空学会合同シンポジウム), 2021 年 3 月 11 日, オンライン.

[20] 長谷川修司：コロナ禍における国際物理オリンピック派遣のための日本代表選手の選抜および育成, (シンポジウム新型コロナ禍中の物理教育・人材育成), 応用物理学会春季学術講演会, 2021 年 3 月 19 日, オンライン.

一般講演

[21] 高城 拓也, 秋山了太, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, 中西亮介, 佐藤瞬亮, 平原徹, 深澤拓朗, 佐々木泰祐, 宝野和博, 遠山晴子, 樋渡功太, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川 修司：自己形成型強磁性トポロジカル絶縁体を含むサンドイッチ構造におけるスキルミオンの電気的観測, 第 12 回低温科学研究センター研究交流会, 2021 年 3 月 11 日, オンライン.

[22] 遠山 晴子, 秋山了太, 佐藤瞬亮, 遠藤由大, 保原麗, 堀井健太郎, 橋爪瑞葵, 一ノ倉聖, 平原徹, 飯盛拓嗣, 小森文夫, 長谷川 修司：フリースタンディング *2* 層グラフェンにおける *Ca* インターカレート誘起超伝導 (ベスト・ポスター・アワード) , 第 12 回低温科学研究センター研究交流会, 2021 年 3 月 11 日, オンライン.

[23] Liu Shengpeng, 保原麗, 秋山了太, 長谷川修司, W. X. Zhang, J. Z. Zhang, C. Liu：*Cu/SiC(0001)* 上に成長したディラックノーダルライン物質 *Cu2Si* の結晶成長とその評価, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月 14 日, オンライン.

[24] 町田理, 吉村優輝, 中村友謙, 花栗哲郎, 長谷川幸雄, 長谷川修司, 高山あかり: 超低温走査トンネル分光による *Rashba* 系表面超構造の超伝導状態観察, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月 15 日, オンライン.

[25] 高城拓也, 秋山了太, I. A. Kibrev, A. V. Matetskiy, 遠山晴子, 中西亮介, 樋渡功太, 平原徹, 深澤拓朗, V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司：磁性／非磁性／磁性トポロジカル絶縁体サンドイッチ構造における磁気スキルミオンの電気的観測, 2020 年日本表面真空学会学術講演会, 2020 年 11 月 20 日, オンライン.

[26] 長谷川修司、岸澤眞一、佐藤誠、植田毅、一宮彪彦、味野道信、物理チャレンジ 実行委員会各部会：大きく変わった物理チャレンジ２０２０, 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, 2020 年 9 月 10 日, オンライン.

[27] 松本 益明、中屋敷 勉、東辻 浩夫、栗原 進、上杉 智子、大原 仁、岡部 豊、興治 文子、金子 朋史、杉山 忠男、田中 忠芳、波田野 彰、吉岡 大二郎、真梶 克彦、安藤 靜敏、毛塚 博史、近藤 泰洋、呉屋 博、佐藤 誠、鈴木 功、並木 雅俊、長谷川 修司、☒橋 拓豊、福澤 昂汰、吉田 智治、小宮山 智浩、中江 優介、渡辺 明大、石井 敬直、氏野 道統、大倉 拓真、岸本 竜太、喜田 輪、永☒ 壮真、西 幸太郎、松下 謙太郎、吉見 光祐、北原 和夫：第 *51* 回国際物理オリンピック *(IPhO)2020* および第 *4* 回ヨーロッパ物理オリンピック *(EuPhO)2020* に向けた研修報告, 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, 2020 年 9 月 10 日, オンライン.

• **日本物理学会 2020 秋季大会**, 2020 年 9 月 8 日-11 日 (オンライン)

[28] 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, 平原徹, 深澤拓朗, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 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 $Mn(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4/(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3/Mn(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4/Si(111)$ のフェルミ準位制御による電気伝導特性変調, 9 月 9 日 (9aD1-3).

[29] 秋山了太, 渡邉和己, 嶋野武, 友弘雄太, 渡邉拓斗, 石川諒, 阿久津和宏, 飯田一樹, 黒田眞司, 長谷川修司: *EuS/SnTe* ヘテロ接合における近接高温強磁性トポロジカル結晶絶縁体界面状態, 9 月 9 日 (9aD1-4).

[30] 鄭帝洪, 秋山了太, V. Jort, 遠藤由大, 渡邉和己, 遠山晴子, 高城拓也, 保原麗, 長谷川修司: *Yb* インターカレートグラフェン*/SiC* の磁気特性, 9 月 11 日 (11pD1-11).

[31] 樋渡功太, 秋山了太, 谷内息吹, 宮内恵太, 保原麗, 長谷川修司: *Ca,Li* 修飾された原子層青リンの電気伝導特性, 9 月 11 日 (PSJ-1).

[32] Yuxiao Guo, 秋山了太, 長谷川修司: *Exploring the structure and transport properties at Sn/SnTe(111) structure*, 9 月 11 日 (PSJ-7).

[33] 遠山晴子, 秋山了太, 保原麗, 樋渡功太, 佐藤瞬亮, 谷内息吹, Shengpeng Liu, 長谷川修司: その場電気伝導測定による *Si(111)* 表面上 Cu_2Si 単原子層における弱反局在の観測, 9 月 11 日 (PSJ-11).

[34] 中屋敷勉, 東辻浩夫, 栗原進, 上杉智子, 大原仁, 岡部豊, 興治文子, 金子朋史, 杉山忠男, 田中忠芳, 波田野彰, 吉岡大二郎, 松本益明, 真梶克彦, 安藤靜敏, 毛塚博史, 近藤泰洋, 呉屋博, 佐藤誠, 鈴木功, 並木雅俊, 長谷川修司, ☒橋拓豊, 福澤昂汰, 吉田智治, 小宮山智浩, 中江優介, 渡辺明大, 石井敬直, 氏野道統, 大倉拓真, 岸本竜太, 喜田輪, 永☒壮真, 西幸太郎, 松下謙太郎, 吉見光祐, 北原和夫: 第 *51* 回国際物理オリンピック *2020* に向けての研修報告, 9 月 11 日 (11pN1-4).

(セミナー)

[35] 長谷川修司：（公社）日本表面科学会と（一社）日本真空学会の合併により（公社）日本表面真空学会を設立するまで, (公社) 日本工学会 第５回事務研究会, 2020 年９月１５日, オンライン.

(講義等)

[36] 長谷川修司: 初年次ゼミナール「歴史を変えた (る) 物理」(学部 1 年生), 2020 年度夏学期 (オンライン).

[37] 長谷川修司, 秋山了太, 高城拓也 (TA), 佐藤瞬亮 (TA), 谷内息吹 (TA) : 物理学実験 II (学部 3 年生) 電子回折, 2020 年度冬学期 (本郷).

(アウトリーチ)

[38] 北原和夫、長谷川修司、西口大貴、村下湧音: 公開講座「東京理科大学　坊ちゃん講座」　科学オリンピックに参加しよう : 物理オリンピックに始まる大飛躍！, 2020 年 9 月 19 日, 東京理科大学 (オンライン講座).

[39] 長谷川修司、増子寛: 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2020 年 11 月 7 日, 花園中学・高等学校 (京都).

[40] 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,2021 年 2 月 27 日, 栃木県立宇都宮女子高等学校 (栃木): 2021 年 3 月 20 日, 栃木県立大田原高等学校 (栃木).

4.2 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。

4.2.1 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。

4.2.2 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))。

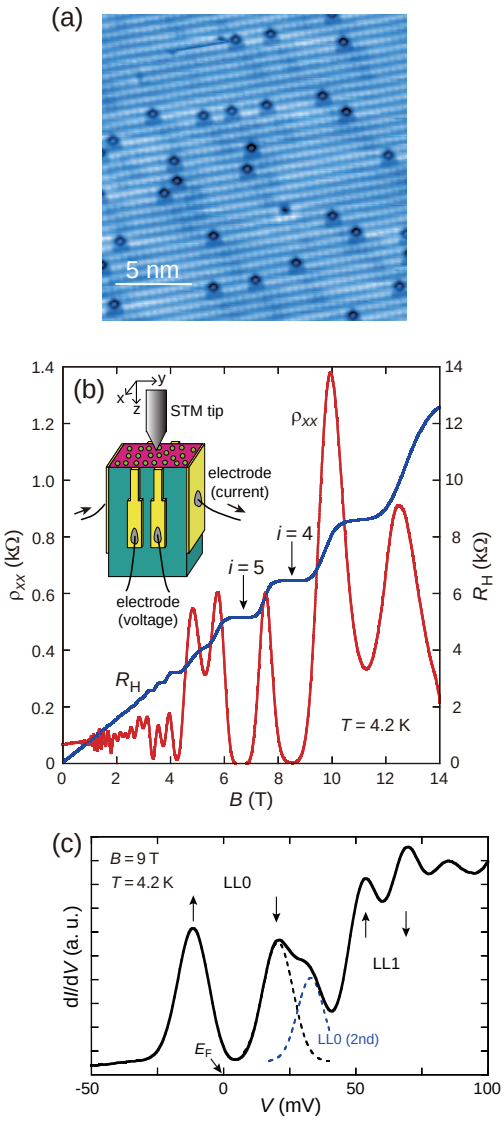


図 4.2.1: (a) InSb 劈開表面に鉄を 0.01 ML つけた場合の STM 像 (20×20 nm^2)。黒い輪郭を持った丸が Fe であり、明るい縞模様が Sb の格子である。(b) 4.2 K における縦抵抗率とホール抵抗の磁場依存性。明瞭な整数量子ホール効果が観測されている。(c) 走査トンネル分光の測定例。微分コンダクタンスから２次元電子系の状態密度を調べることができる。ここでは、スピン分裂したランダウ準位が観測されている。

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 4.2.2 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

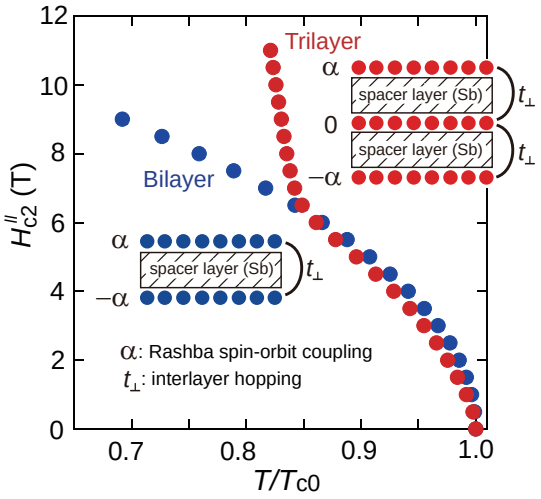


図 4.2.2: 2.0 nm の Sb をスペーサー層として、Pb 単原子膜を二層あるいは三層重ねた試料における臨界磁場の温度依存性。磁場は膜面に平行に印加しており、横軸はゼロ磁場における超伝導転移温度 T_{c0} を用いて規格化している。三層系試料において、複素ストライプ相からヘリカル相へのクロスオーバーに起因すると考えられる急激な立ち上がりが、高磁場・低温領域で観測された。

部臨界磁場の温度依存性を図 4.2.2 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 4.2.2 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 4.2.2 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。

GaAs 劈開表面上に形成された超伝導薄膜における非相反伝導に関する研究

空間反転対称性と時間反転対称性が破れた系では電流－電圧特性が電流の向きに依存する非相反伝導が期待される。通常、この効果は比較的小さな補正

項であるが、超伝導物質を用いた場合、非常に大きな非相反伝導が観測されることが知られている。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。

昨年度までの研究では、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 4.2.3)。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。

本年度はさらにこの非相反伝導が生じている要因を調べるため、原子間力顕微鏡、電子線顕微鏡、レーザー顕微鏡による GaAs 劈開表面の観測を行った。図 4.2.4(a) に電子線顕微鏡によるは劈開面全体の観測結果を示す。特徴的な構造は観測されず、また、原子間力顕微鏡を用いた中央部分の測定においても構造は観測されなかった。このことから中央部分は非常に平坦な表面が実現していると考えられる。次に、上部試料端の観測結果を示す（図 4.2.4(b))。この測定においても異常は観測されなかった。一方、下部試料端の観測結果においては特徴的な構造が観測された（図 4.2.4(c))。これは試料劈開時、劈開方向によって試料端の一方に欠けが生じているためだと考えられる。さらに、このことが電子輸送特性に影響していることを検証するために、劈開方向を逆にした試料において図 4.2.3 と同様の条件で電気伝導測定を行った。その結果、図 4.2.3 に対して逆の磁場依存性が観測された。現時点においては、試料端より渦糸が侵入する際、試料端の形状により異なるポテンシャルエネルギーを感じるため、侵入方向に依存したボルテックスラチェット効果による非相反伝導が生じていると考えている。

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。昨年度より、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を行っている。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。本年度は、強磁性体層として Ni や Co を用いた試料を作製して、超伝導転移温度の平行磁場依存性等を調べた。

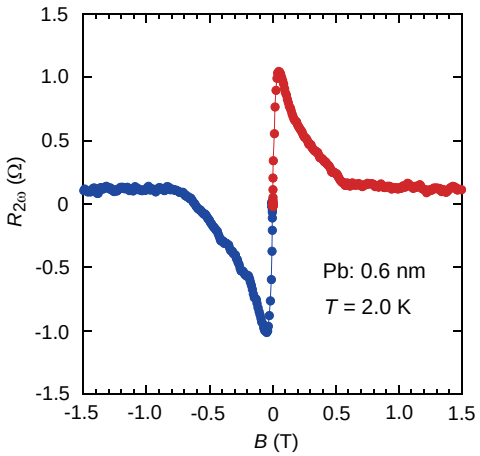


図 4.2.3: Pb 超薄膜における第二高調波から得られる電気抵抗。磁場の正負に対して反対称になっている。

4.2.3 ビスマス超薄膜の電気伝導

昨年度より 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ている。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。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、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 4.2.5(a))。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

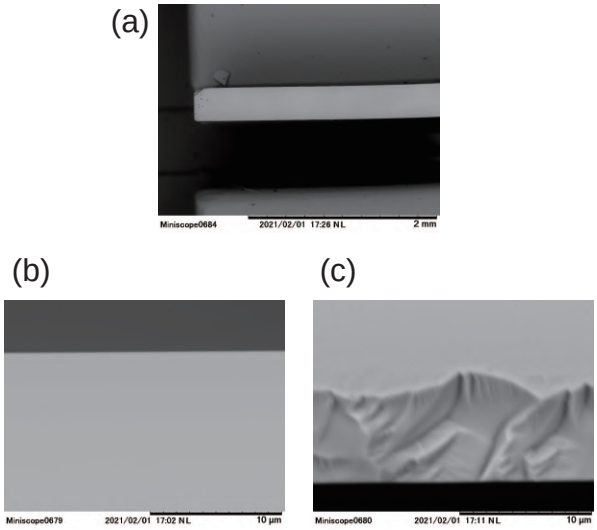


図 4.2.4: GaAs 劈開表面の電子顕微鏡による観察結果。(a) 試料全体。試料幅（図で縦方向）は 0.35 mm。(b) 上部試料端。(c) 下部試料端。下部試料端から 10 μm 程度の範囲で平坦性が損なわれている。

験結果を良く再現することができた（図 4.2.5(a) 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。

我々と同様に GaAs(110) 上で急冷蒸着した後に室温での熱処理を行った Bi 超薄膜が、擬立方晶 (110) 配向をもつことが STM を用いた先行研究によって明らかにされている。我々は、擬立方晶 (110) bilayer に対して tight-binding 近似を用いたバンド計算を行った（図 4.2.5(b)。その結果、適当にパラメーターを選んだ場合において、フェルミエネルギーの位置で Dirac cone が形成されることが示された。

＜受賞＞

[1] 岡本徹：東京大学オンライン授業・ハイブリッド授業のグッドプラクティス総長表彰、2021 年 3 月 22 日.

＜報文＞

(原著論文)

[2] R. Masutomi, T. Okamoto, Y. Yanase: Unconventional superconducting phases in multilayer films with layer-dependent Rashba spin-orbit interactions, Phys. Rev. B **101**, 184502 (2020).

(学位論文)

[3] 周晨昊：「Nonreciprocal Charge Transport of Superconducting Ultrathin Metal Films Grown on Cleaved GaAs(110) Surfaces」（修士論文）

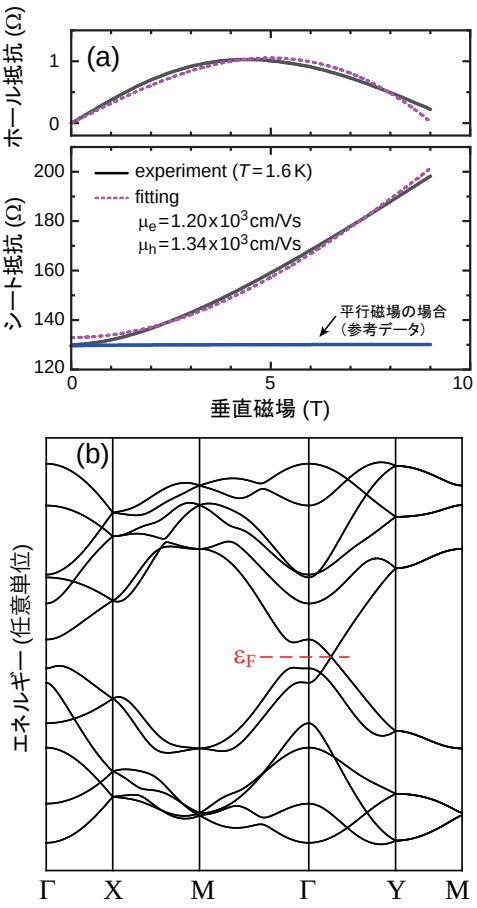


図 4.2.5: (a) 熱処理後の磁気抵抗効果と Hall 抵抗、およびパドル・モデルによるフィッティング。(b) 擬立方晶 (110) bilayer に対する tight-binding 近似を用いたバンド計算の例。

4.3 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。

4.3.1 超伝導体

銅酸化物高温超伝導体の光励起非平衡状態

ヒッグスモードは超伝導秩序変数の振幅の振動に対応する集団励起であり、その観測は超伝導秩序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超伝導と競合する秩序相の存在が明らかとなってきており、ヒッグスモードは超伝導とそれら多重秩序相の関係を調べるプローブとなりうる。さらに、近年では多重秩序相などの光制御による超伝導コヒーレンスの発現や増強が模索されており、ヒッグスモードの観測はこれら非平衡超伝導を解明する大きな手がかりになることが期待されている。

我々は、銅酸化物高温超伝導体 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ (Bi2212) を対象にヒッグスモードの研究を行ってきた。Bi2212 に対してテラヘルツ (THz) ポンプ・近赤外光プローブ分光を行い、超伝導秩序変数の振幅の集団励起であるヒッグスモードの観測に成功した。さらに、ヒッグスモードの振幅のオンセット温度が超伝導転移温度 T_c よりもはるか高温の局所的クーパー対形成温度と関連していることを示唆する結果が得られ、これを論文にまとめた。

今年度はヒッグスモードが超伝導秩序の超高速のプローブとなることを利用して、ヒッグスモードを用いた非平衡超伝導の解明を目指した。近年、銅酸化物高温超伝導体 $YBa_2Cu_3O_y$ (YBCO) に対して高強度の光を照射すると、T_c 以上で THz 周波数帯の c 軸光学伝導度の虚部 $\sigma_2(\omega)$ が過渡的に増大する様子が観測され、光誘起超伝導と解釈された。しかし、$\sigma_2(\omega)$ の増大は超伝導成分か準粒子励起によるドルーデ成分なのかを区別することができず、その解釈は定まっていない。さらに、過渡的な $\sigma_2(\omega)$ の増大は数ピコ秒程度で緩和してしまうことから、抵抗測定や磁化率測定といった手法では観測することができないという実験上の課題があった。今回我々は、不足ドープ YBCO に対し高強度の近赤外光を照射し、誘起された非平衡ダイナミクスを THz 周波数帯の c 軸反射率変化を通して測定した。T_c 以上において、THz 周波数帯の光学伝導度の虚部 $\sigma_2(\omega)$ の過渡的な増大を観測し、先行研究と整合する実験結果を得た。しかし、この T_c 以上の光励起非平衡状態において、高強度 THz 波パルスによって駆動されるヒッグスモードやジョセフソン電流に起因する非線形光学応答は観測されなかったことから、過渡的な $\sigma_2(\omega)$ の増大を示す光励起非平衡状態は平衡状態の超伝導とは異なると考えられると結論した。光励起による過渡反射率変化は擬ギャップ温度付近以下で発達することから、YBCO における光励起非平衡状態が擬ギャップと関連している可能性を示唆しており、現在その解明を進めている。

鉄系超伝導体 $FeSe_{1-x}Te_x$ の光誘起超伝導増強

鉄系超伝導体 $FeSe_{1-x}Te_x$ はキャリアドープや圧力印加等の外的要因によって超伝導転移温度 T_c が 5 倍以上に大きく変化することが知られている。これまでの研究により超伝導転移温度とフェルミ面の大きさと相関していることも明らかにされてきたが、超伝導発現の機構は依然未解明である。我々はこのような外部刺激によって超伝導転移温度が大きく変化する鉄系超伝導体に注目し、光による超伝導の制御、光誘起超伝導の発現を調べてきた。特に、光励起下での超伝導秩序変数のダイナミクスをピコ秒の時間分解能で捉える手法として、超伝導秩序変数の振幅モードであるヒッグスモードに注目した。これまでの研究により超伝導体では、ヒッグスモードが媒介して高効率のテラヘルツ波第三高調波 (THz-THG) が発生することを明らかにしており、この性質を利用して非平衡超伝導を調べることとした。まず、光励起を行わない平衡状態の鉄系超伝導体 $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ に対して、確かに転移温度以下で THz-THG が発生することを確認し、その強度が超流動密度を反映していることを明らかにした。次に、近赤外光パルスを照射すると、THz-THG の強度が過渡的に増大し、超伝導秩序変数が増強することを示唆する振る舞いを観測した。一方、光パルスを照射した後の非平衡状態の複素光学伝導度をテラヘルツ時間領域分光法により測定したところ、光学伝導度虚部に超流動密度の増加を示唆するスペクトル構造が現れることを見出した。この光学伝導度虚部のダイナミクスは THz-THG 測定の結果と非常によく一致したことから、光励起によって超伝導が増強したと結論した。 光学伝導度スペクトルを詳細に検討した結果、光照射によって, 電子バンドと正孔バンド間のバンド間相互作用が増強し、超伝導増強現象が起こった可能性が高いことが明らかになった。電子-正孔バンド間のバンド間相互作用は鉄系超伝導体の超伝導発現機構において重要な役割を果たしていることが指摘されている。今後は光励起が超伝導増強をもたらす微視的機構の解明を目指し系統的な測定を行っていく予定である。

4.3.2 二次元層状物質

二次元層状物質の光による集団モード励起と電子相制御

対称性の破れた量子相においてある物理パラメータを瞬時に変化させることを「量子クエンチ」という。我々は、特に多重の秩序が絡み合う強相関物質系において、量子クエンチによる電子相制御、新物質相の探索を進めてきた。特に、近年の超短パルス光源技術の発展によって低エネルギー・高強度の光源が得られるようになり、これを用いてフォノンや集団励起モードを大振幅駆動することによる量子クエンチの実現に注目した。本年度は、二次元層状物質を対象に高強度テラヘルツ波 (光子エネルギー ~ 4 meV) を用いて電荷密度波 (CDW) の秩序変数の振幅モー

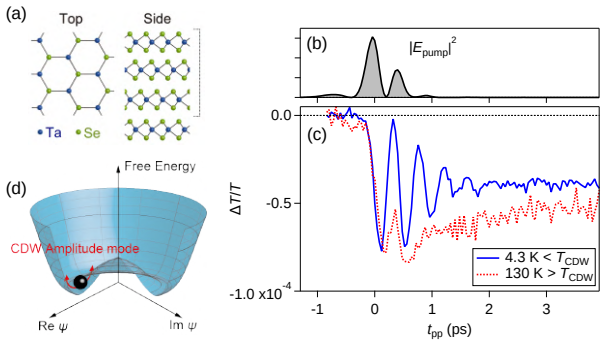


図 4.3.1: (a) 3R-$Ta_{1+x}Se_2$ の結晶構造。(b) 高強度テラヘルツ電場の 2 乗波形。(c) (b) のテラヘルツ波励起による近赤外光の透過率変化：青実線は 4.3 K(CDW 転移温度以下)、赤点線は 130 K(CDW 転移温度以上) の結果。(d) CDW の秩序変数 Ψ に対する自由エネルギーの概念図。両矢印は秩序変数の振幅方向の振動である CDW 振幅モードを表す。

ドを励起することによる電子相制御を目指して実験を行った。

層状遷移金属ダイカルコゲナイド 3R-$Ta_{1+x}Se_2$ (図 4.3.1 (a)) は超伝導および CDW 相を示すことが知られている。図 4.3.1 (b) に示す電場 2 乗波形を持つ高強度テラヘルツ波を CDW 相の 3R-$Ta_{1+x}Se_2$ に照射した際の近赤外光の透過率変化のダイナミクスを調べたところ、図 4.3.1 (c) に示すように、テラヘルツパルス励起後の透過率変化に振動数 2.3 THz の明瞭な振動構造が観測された。この振動モードは温度上昇に伴ってソフトニングを示すこと、CDW 転移温度以上では消失することから、図 4.3.1 (d) の矢印で示すような 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）に相当することが明らかになった。その強度依存性から、この結果はテラヘルツ波パルスにより CDW 振幅モードの二光子励起が起きていることを突き止めた。さらに、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、光学伝導度スペクトルにギャップ構造が現れることがわかった。失われたスペクトルウェイトは高周波へ移動することから、THz 波励起によって平衡状態では到達できない、新たな絶縁体的な状態に相転移したと考えられる。ギャップ形成のダイナミクスを詳細に調べると CDW 振幅モードと同期した振動が観測され、新たな絶縁体状態と平衡状態の CDW 秩序との結合が存在することを示すことに成功した。

4.3.3 トポロジカル非線形光学

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スピンベリー曲率によって高効率なスピン流・電流変換の性質を持つ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注目を集めている。

最近、本物理学教室の林研究室から、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輸送測定から確認され報告された。この光電流は励起光のヘリシティを反転に伴い符号が反転する性質を持つ。この円偏光によって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符号が反転するようなテラヘルツ波放射の観測に成功した。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。特に、励起光パルスの Bi 薄膜に対する侵入長より膜厚を大きくしても放射テラヘルツ波が増強することから、過渡的な光電流は光誘起逆スピンホール効果によるものであると結論付けた。これは光誘起スピン流と Bi のスピン流・電流変換（逆スピンホール効果）の組み合わせによって光電流が生じる現象で、Bi において高速なスピン流を光で生成できる可能性を示唆している点で重要である。さらに温度依存性を測定したところ、膜厚によって光電流の大きさ、緩和頻度の振る舞いがいずれも大きく異なるなど、複雑な温度依存性がみられた。この温度依存性の振る舞いの原因について、今後光誘起スピン流の起源、バンドパラメータの温度依存性との関連性を含めて明らかにしていく予定である。

スピントロニックエミッターを用いたテラヘルツシリンドリカルビーム発生

近年、典型的なガウシアンビームとは異なる伝播モードの光が応用されるようになってきている。中でも図 4.3.3 (a,b) に示すラジアルビームとアジマスビームの二つによって特徴付けられるシリンドリカルベクトルビーム（CVB）は、その分光やイメージングなど様々な応用が期待されている。これらのビームは中心部に偏光特異点を持つ偏光渦を有することからトポロジカルな光波の一種としてみなされ、さらに集光部で縦電場・縦磁場成分が現れるという特徴

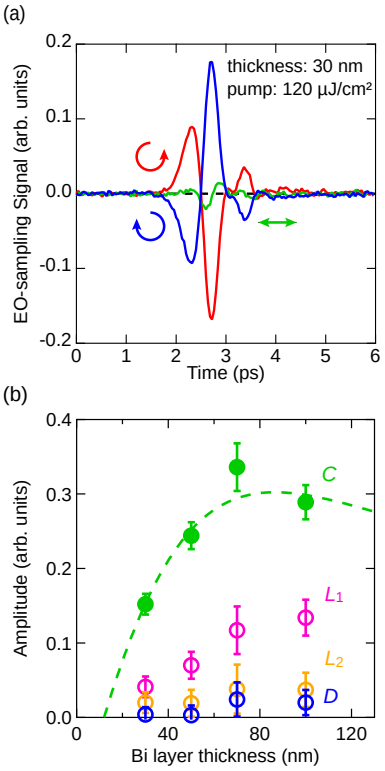


図 4.3.2: (a) 観測されたテラヘルツ波の時間波形。右円偏光 (青) と左円偏光 (赤) で符号が反転したテラヘルツ波が観測された。(b) 放射テラヘルツ波の膜厚依存性。励起光のヘリシティに依存する成分 (緑) は励起光の侵入長 (∼ 15 nm) より膜厚を大きくしても膜厚に依存し増強する傾向にあることが分かる。

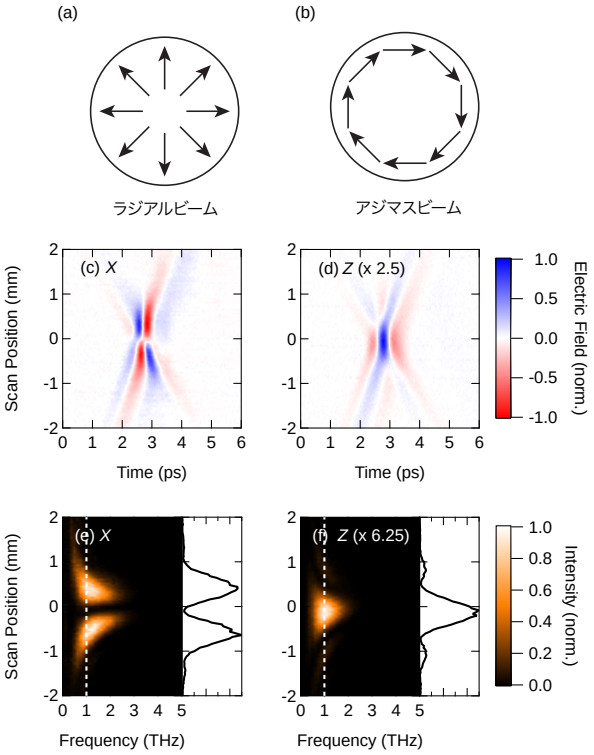


図 4.3.3: テラヘルツシリンドリカルベクトルビーム発生。(a) ラジアル偏光と (b) アジマス偏光の時の偏光のビーム内空間分布。(c,d) スピントロニック素子を用いてラジアル偏光を発生させた際の集光部における (c) 横電場成分と (d) 縦電場成分の時間波形の空間マッピングと、(e,f) それを時間領域でフーリエ変換することにより得られる (e) 横電場成分と (f) 縦電場成分の周波数成分。見やすさのため縦電場成分に関しては括弧内に示す値でスケールしている。

を持つ。テラヘルツ領域においても様々な CVB の発生手法が提案されてきているが、今回我々はスピントロニックエミッターと呼ばれる近年登場したテラヘルツ発生素子を用いて、テラヘルツ領域において簡便に CVB 発生させる新規手法を考案した。

スピントロニックエミッターは非磁性金属・強磁性金属薄膜の二層ヘテロ構造からなり、逆スピンホール効果を利用することで、光励起により素子内で発生した過渡的なスピン流を電流へと変換することでテラヘルツ波が発生する。ここで、流れる電流の向きが強磁性層の磁化方向に依存するという性質に着目すると、素子に印加する外部磁場により放射される偏光パターン制御が可能であることがわかる。同じ極の磁石を向かい合わせて素子を挟み込むような配置にすることにより、四重極的なビームパターンが得られることを利用し、得られたビームをさらに、y-方向の偏光成分の位相を π 変化させる半波長変換を施すと、図 4.3.3 (a,b) に示すような CVB 発生が可能となる。

本研究ではまず、スピントロニックエミッターから出る偏光パターンと集光時の電場分布を数値計算により求め、集光部において縦電場・磁場成分が発生することを確認した。これらの結果を踏まえた上で、実際にスピントロニックエミッターを用意し実証実験を行った。サンプルは本物理学教室林研究室にご協力をいただき、CoFeB/Pt の薄膜ヘテロ構造を用意した。半波長変換はシリコン製の三角プリズムを用意し、プリズム内で光が 2 回全反射した際に s と p 偏光成分間で π 位相シフトが生じることを適用した。実際にラジアル偏光を発生させた際の実験結果を図 4.3.3 (c-f) に示す。空間的に電場成分を走査した際に、横電場成分（図 4.3.3 (c,e)）は、軸中心を境に電場成分の符号が反転するラジアルビームの特徴を示している。同条件における縦電場成分を測定すると（図 4.3.3 (d,f)）、横電場成分が消失する中心部分に縦電場成分が現れることが確認でき、数値計算によって得られる集光部での偏光パターンとよい一致を示している。この発生手法では素子の中心を軸として磁石ペアを回転させることによって連続

的にラジアルビームからアジマスビームへと変換することが可能であり、かつ複雑な光学系を必要としないため、テラヘルツ領域における CVB をより利用しやすいものとし様々な応用の発展へ寄与するものと期待される。

4.3.4 光パラメトリック増幅器を用いた高強度中赤外光源の開発

波長 3–50 μm 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強度かつ安定な超短パルス光源を得ることが難しかったが、近年の光源技術の発達に伴い、中赤外光で励起された固体の性質を調べることが可能になってきた。中赤外領域には固体の光学フォノンが存在するため、これらが駆動されることによる非平衡特有の現象が期待されるほか、近年注目集めている固体の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である。さらにパルスの包絡線に対する搬送波の位相（キャリア–エンベロープ位相）が揃っている場合、電場に追随したコヒーレントな現象の観測が可能となる。このような新奇な量子現象の観測を目的とし、キャリア–エンベロープ位相の固定された中赤外光を得ることを目的として光源開発を進めている。

通常の中赤外光を得る上では、1 台の光パラメトリック増幅器から出射される 2 つの光を用いて差周波発生を行えばよい。一方でキャリア–エンベロープ位相の固定された中赤外パルスを得るためには、2 台の光パラメトリック増幅器の位相を同期させ、これらの出力光の差周波発生を行う必要がある。そこで本年度はまず 2 台の光パラメトリック増幅器を用いて高強度な中赤外光パルスを発生させることを目指した。差周波発生過程における群速度遅延の条件からそれぞれの光パラメトリック増幅器の出力波長として最適な値を計算し、その値をもとに調整を進めた結果、中心波長 7 μm の際に 10 μJ 以上の強度を得ることに成功した。今後は 2 つの光パラメトリック増幅器の同期に向け、中赤外光パルスの位相検出システムや光路長のフィードバック制御の開発に取り組む計画である。

＜受賞＞

[1] 勝見恒太：「銅酸化物高温超伝導体 $YBa_2Cu_3O_y$ の光励起非平衡状態」、第 12 回低温科学研究センター研究交流会　ベスト・ポスター・アワード、2021 年 3 月

＜報文＞

(原著論文)

[2] Ryo Shimano and Naoto Tsuji: Higgs mode in Superconductors, Annual Review of Condensed Matter Physics **11**, 103-124 (2020).

[3] 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, **11**, 1793 (2020).

[4] Kota Katsumi, Zhi Zhong Li, Hélène Raffy, Yann Gallais, Ryo Shimano: Superconducting fluctuations probed by the Higgs mode in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ thin films, Physical Review B **102**, 054510 (2020).

[5] Sachiko Nakamura, Kota Katsumi, Hirotaka Terai, and Ryo Shimano: Nonreciprocal Terahertz Second-Harmonic Generation in Superconducting NbN under Supercurrent Injection, Physical Review Letters **125**, 097004 (2020).

[6] Yoshua Hirai, Naotaka Yoshikawa, Hana Hirose, Masashi Kawaguchi, Masamitsu Hayashi, and Ryo Shimano: Terahertz Emission from Bismuth Thin Films Induced by Excitation with Circularly Polarized Light, Physical Review Applied **14**, 064015 (2020). Editor’ suggestion.

[7] Hiroaki Niwa, Naotaka Yoshikawa, Masashi Kawaguchi, Masamitsu Hayashi, and Ryo Shimano: Switchable generation of azimuthally- and radially-polarized terahertz beams from spintronic terahertz emitter, Optics Express, in press.

(国内雑誌)

(学位論文)

[8] 勝見恒太：Terahertz nonlinear optical responses in high-temperature cuprate superconductors（博士論文）

[9] 澤野拓也：黒リンの高密度光励起電子正孔系の研究（修士論文）

[10] 西田森彦：電荷・スピンストライプ秩序を持つ銅酸化物高温超伝導体 $La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO_4$ の光励起非平衡状態の研究（修士論文）

[11] 平井誉主在：光励起したディラック電子系ビスマスにおける電荷・スピンダイナミクスの研究（修士論文）

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[12] Morihiko Nishida, Kota Katsumi, Ryo Shimano: MIR pumping of Stripe-Ordered Phase in $La_{1.5}Nd_{0.4}Sr_{0.1}CuO_4$ (poster presentation), Summer School “Design and Synthesis of Quantum Materials”, オンライン開催, 2020 年 9 月

招待講演

[13] Ryo Shimano: Superconducting precursor above T_c studied through the ultrafast spectroscopy of collective modes in Bi2212 and YBCO, Superstripes, オンライン開催, 2020 年 6 月 8 日

[14] Ryo Shimano: Higgs mode as a probe of superconducting order above T_c in high-Tc cuprate superconductors, Max Planck-UBC-UTokyo Center for Quantum Materials Workshop 2020, オンライン開催, 2021 年 3 月 2 日

(国内会議)

一般講演

- **日本物理学会 2020 年秋季大会（2020 年 9 月 8–11 日、オンライン開催）**

[15] 中村祥子, 勝見恒太, 寺井弘高, 島野亮：テラヘルツ第 2 高調波発生から見る超伝導 NbN における磁束量子ダイナミクス

[16] 平井誉主在, 吉川尚孝, 廣瀬葉菜, 河口真志, 林将光, 島野亮：Bi 薄膜の光誘起逆スピンホール効果によるテラヘルツ波放射

[17] 礒山和基, 吉川尚孝, 勝見恒太, Wong Jeremy, 色摩直樹, 崎下雄稀, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮：鉄系超伝導体 $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ における光誘起超伝導増強

[18] 勝見恒太, 西田森彦, 宮坂茂樹, 田島節子, 島野亮：銅酸化物超伝導体 $YBa_2Cu_3O_y$ における光励起非平衡ダイナミクス

[19] 吉川尚孝, 菅沼大貴, 松岡秀樹, 田中勇貴, 中野匡規, 岩佐義宏, 島野亮：高強度テラヘルツ波による 3R-$Ta_{1+x}Se_2$ 電荷密度波相の振幅モード励起と動的相転移

- **第 12 回低温科学研究センター研究交流会（2021 年 3 月 11 日、東京大学）**

[20] 勝見恒太, 西田森彦, 宮坂茂樹, 田島節子, 島野亮：銅酸化物高温超伝導体 $YBa_2Cu_3O_y$ の光励起非平衡状態

[21] 西田森彦, 勝見恒太, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮：中赤外励起されたストライプ系銅酸化物超伝導体 $La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO_4$ のテラヘルツ分光

[22] 吉川尚孝, 菅沼大貴, 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 3R-$Ta_{1+x}Se_2$ 電荷密度波相の非平衡ダイナミクス

[23] 礒山和基, 吉川尚孝, 勝見恒太, Jeremy Wong, 色摩直樹, 崎下雄稀, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮：鉄系超伝導体 $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ における超伝導秩序の光励起ダイナミクス

[24] 平井誉主在, 吉川尚孝, 廣瀬葉菜, 河口真志, 林将光, 島野亮：Bi 薄膜からの励起ヘリシティ依存するテラヘルツ波放射

[25] 中村祥子, 勝見恒太, 寺井弘高, 島野亮：非相反テラヘルツ第 2 高調波発生から見る超伝導 NbN における磁束量子ダイナミクス

- **日本物理学会 第 76 回年次大会（2021 年 3 月 12–15 日、オンライン開催）**

[26] 勝見恒太, 西田森彦, 宮坂茂樹, 田島節子, 島野亮：テラヘルツ非線形光学応答による銅酸化物高温超伝導体 $YBa_2Cu_3O_y$ の光励起非平衡ダイナミクス

[27] 西田森彦, 勝見恒太, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮：銅酸化物超伝導体 $La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO_4$ の電荷・スピンストライプ秩序相における中赤外光ポンプ-テラヘルツプローブ分光

招待講演

[28] 島野亮：超伝導及び電荷密度波系における ヒッグスモードと相転移ダイナミクス, KEK 素核宇・物性 連携研究会, オンライン開催, 2021 年 3 月 29 日

[29] 吉川尚孝：強相関物質のテラヘルツ光による研究, 2020 年度第 1 回光機能研究会, オンライン開催, 2020 年 5 月 1 日

4.4 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２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トポロジカル電子相、特にキタエフ量子スピン液体関連物質、エキシトニック磁性などのボーズアインシュタイン凝縮相、3 次元ディラック電子の創成に注力した。

4.4.1 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化合物群がある。これまで、$4f^1$ の Pr^{4+} 化合物 Na_2PrO_3 の磁性状態を明らかにしてきた。^{23}Na-NMR 測定とその解析から、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。また、強磁場下でキタエフスピン液体になっている可能性を示唆する磁化課程が見られた。今後は、新しく開発した超高圧磁化測定装置により、高圧下でのキタエフ量子スピン液体の実現を目指す。

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。本年度までの特別実験等により、他の $4f$ 電子ハニカム化合物を網羅的に結晶合成し、物性評価を進めている。さらに、第一原理計算データーベースを利用して計算機上で安定解としられる物質の合成を試み、実際に新ハニカム化合物の合成に成功した。今後も、この新しい物質開発手法を用いてキタエフ量子スピン液体の実現を目指す。

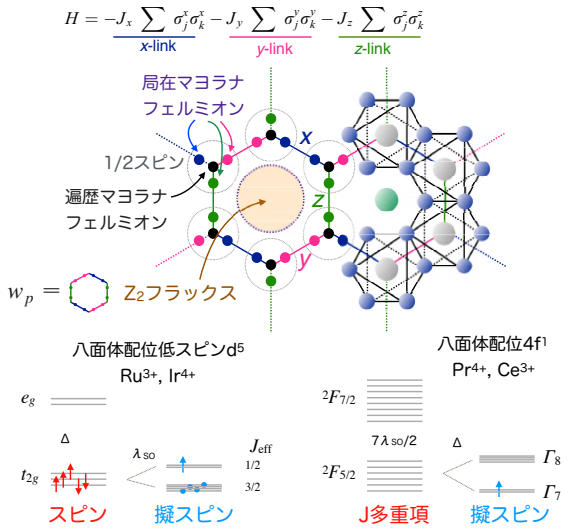


図 4.4.1: ハニカム格子・ハイパーハニカム格子系における量子スピン液体 (左) Kitaev Honeycomb 模型ハミルトニアンのスピンとマヨラナフェルミオンの関係。(右) 異方的相互作用を持つ擬スピン 1/2 での八面体配位結晶場分裂 Δ とスピン－軌道相互作用 λ_{SO} の関係。(左) 現在まで Mott 転移、主要なキタエフ候補物質の研究対象とされてきた代表的な $4d^5, 5d^5$ 電子。(右) 最近キタエフ型相互作用の実現が提唱された $4f^1$ 電子。

傾角反強磁性のハードコアボゾン近似によるボーズアインシュタイン凝縮

前項では $4f$ 電子ランタノイド化合物に着目し新しいキタエフ系物質開発を推進していたが、$4f$ 電子の磁性には、まだまだバリエーション豊かな物性が眠っている。$4f$ 電子研究は長い歴史があるが、スピンと軌道が結合した基底二重項の擬スピン 1/2 の特徴を生かした量子物性の創発は古くて新しい。正孔が一つの $4f^{13}$ のハニカム化合物 $YbCl_3$ では、理想的なハニカム格子ハイゼンベルグ模型が実現するが、理想からのわずかなずれにより非常に低温で長距離反強磁性秩序を示す。この秩序は外部磁場により磁場誘起強磁性状態に相転移するが、この近傍の傾角反強磁性状態はボゾンのボーズアインシュタイン凝縮相と等価とみなすことができる。極低温の核磁気共鳴測定により、ボーズアインシュタイン凝縮相の実証とその詳細を研究している。

$4d^4$ 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。令和２年度は、高圧印加により励起子磁性の発現を目指したが、6 GPa まででは圧力が足りずたどり着けなかった。今後は、結晶歪も導入して励起子磁性の発現を目指す。

4.4.2 3 次元ディラック電子の巨大な軌道反磁性

アンチペロブスカイト型酸化物

ポロジカル半金属中の相対論的ディラック電子はカイラル異常や異常な位相をもつランダウ量子化のような種々の非従来型電気伝導を示すことから、新奇なトポロジカル輸送物性の舞台として世界的な物質開発競争となっている一方、ディラック電子に起因する異常な磁性現象としては、巨大な軌道反磁性が知られている。巨大な反磁性は１７７８年に Anton Brugmans がビスマス単体で最初に見出した。負の磁化率―反磁性―は、磁石を近づけると反発する一見奇妙な現象だが、決して珍しくはなく小さな反磁性は多くの物質で普遍的に見られる。しかし、ビスマスの反磁性はあまりに巨大なため長きに渡って固体物理学の謎とされてきた。理論的には 50 年も前に物理学科の福山秀敏（当時大学院生）と久保亮五教授の研究によって、ディラック電子系でのバンド間の混成効果が巨大な軌道反磁性を与えることが示

されてきたが、近年のディラック半金属研究では実際にいくつかの物質で巨大な反磁性が観測されてき。しかし、これまでの実験では、古くから研究されてきたビスマス単体においてさえ、「ディラック電子」の「軌道磁性」を抜き出して観測することが出来ていなかったため、「ディラック電子」と「巨大な反磁性」の関連性は分かっていたものの「巨大な軌道反磁性」であることは証明できていなかった。三次元ディラック電子系である Sr_3PbO に着目し、磁化率測定と核磁気共鳴法を巧みに組み合わせることによりまさに軌道反磁性だけを抜き出して測定することに成功した。ディラック電子系においては、軌道から来る磁性とスピンから来る磁性それぞれが試料のドープ濃度や温度によって複雑に変化する。これらが複数の磁性測定手段に与える寄与を計算することによりスピン成分と軌道成分を分離した。まさに実験から得られた軌道成分が理論計算による値と一致することが分かり、ディラック電子の巨大な反磁性が軌道の混成効果から生じていることを証明することが出来た。これにより、２００年以上前に発見された固体物理学上の基礎的な現象に完全な説明を与えることになった。

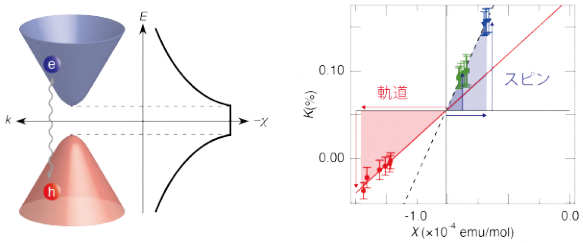


図 4.4.2: （左）質量のあるディラック電子のバンドとエネルギー分散関係、軌道磁化率のイメージ図。波線は正孔（ホール）と励起された電子のバンド間磁場効果を表している。フェルミ準位、すなわち試料のドープ濃度の変化による軌道磁化率が右側に表示されている。（右）三種類の正孔ドープ濃度を持つ試料と様々な温度に対して測定された核磁気共鳴法のナイトシフト K と磁化率の対応関係をプロットしたもの。赤で示された軌道成分と青のスピン成分の分離に成功した。

＜報文＞

(原著論文)

[1] H. Nakamura, A. Mohammed, P. Rosenzweig, K. Matsuda, K. Nowakowski, K. Küster, P. Wochner, S. Ibrahimkutty, U. Wedig, H. Hussain, J. Rawle, C. Nicklin, B. Stuhlhofer, G. Cristiani, G. Logvenov, H. Takagi, and U. Starke: Spin splitting and strain in epitaxial monolayer WSe_2 on graphene Physical Review B **101**, 165103 (2020).

[2] K. Geirhos, P. Lunkenheimer, M. Blankenhorn, R. Claus, Y. Matsumoto, K. Kitagawa, T. Takayama, H. Takagi, I. Kézsmárki, and A. Loidl: Quantum paraelectricity in the Kitaev quantum spin liquid candidates $H_3LiIr_2O_6$ and $D_3LiIr_2O_6$ Physical Review B, **101**, 184410 (2020).

[3] D. Ootsuki, K. Sawada, H. Goto, D. Hirai, D. Shibata, M. Kawamoto, A. Yasui, E. Ikenaga, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, T. Toriyama, T. Konishi, Y. Ohta, N. L. Saini, T. Yoshida, T. Mizokawa, and H. Takagi: Observation of metal to nonmagnetic insulator transition in polycrystalline RuP by photoemission spectroscopy Physical Review B. **101**, 165113 (2020).

[4] M.-J. Kim, A. Schulz, T. Takayama, M. Isobe, H. Takagi, and S. Kaiser: Phononic soft mode behavior and a strong electronic background across the structural phase transition in the excitonic insulator Ta_2NiSe_5 Physical Review Research **2**, 042039(R) (2020).

[5] T. Mitsuoka, T. Suzuki, H. Takagi, N. Katayama, H. Sawa, M. Nohara, M. Watanabe, J. Xu, Q. Ren, M. Fujisawa, T. Kanai, J. Itatani, S. Shin, K. Okazaki, and T. Mizokawa: Photoinduced phase transition from excitonic insulator to semimetal-like state in $Ta_2Ni_{1-x}Co_xSe_5$ ($x = 0.10$) J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 124703 (2020).

[6] T. Suzuki, Y. Shinohara, Y. Lu, M. Watanabe, J. Xu, K. L. Ishikawa, H. Takagi, M. Nohara, N. Katayama, H. Sawa, M. Fujisawa, T. Kanai, J. Itatani, T. Mizokawa, S. Shin, and K. Okazaki: Detecting electron-phonon coupling during photoinduced phase transition Physical Review B **103**, L121105 (2021).

[7] S. Suetsugu, K. Kitagawa, T. Kariyado, A. W. Rost, J. Nuss, C. Mühle, M. Ogata, H. Takagi: Giant orbital diamagnetism of three-dimensional Dirac electrons in Sr_3PbO antiperovskite Physical Review B **103**, 115117 (2021), selected as "Editors' Suggestion".

[8] D. Huang, H. Nakamura, and H. Takagi: Planar Hall effect with sixfold oscillations in a Dirac antiperovskite Physical Review Research **3**, 013268 (2021).

[9] H. Jin, A. Narduzzo, M. Nohara, H. Takagi, N. E. Hussey, and K. Behnia: Positive Seebeck Coefficient in Highly Doped $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ ($x = 0.33$); Its Origin and Implication J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 053702 (2021).

(会議抄録)

[10] Shogo Yoshida, Haruhiko Yamada, Takehide Koyama, Yusuke Nakai, Koichi Ueda, Takeshi Mito, Kentaro Kitagawa, Yoshinori Haga: Pressure-induced Nonmagnetic–Magnetic Transition in SmS Observed by ^{33}S-NMR Journal of the Physical Society Conference Proceedings, **29**,

in Proceedings of J-Physics 2019: International Conference on Multipole Physics and Related Phenomena, 012008 (2020).

[11] Hiroto Arima, Yasushi Naito, Kazuki Kudo, Naoyuki Katayama, Hiroshi Sawa, Minoru Nohara, Yangfan Lu, Kentaro Kitagawa, Hidenori Takagi, Yoshiya Uwatoko, and Kazuyuki Matsubayashi: High-Pressure Hall Effect Measurement on Ta_2NiSe_5 as a Candidate for Excitonic Insulator Journal of the Physical Society Conference Proceedings, **30**, in Proceedings of J-Physics 2019: International Conference on Multipole Physics and Related Phenomena, 011031 (2020).

[12] H. Arima, Y. Naito, K. Kudo, N. Katayama, H. Sawa, M. Nohara, Y.F. Lu, K. Kitagawa, H. Takagi, Y. Uwatoko, K. Matsubayashi: Resistive anisotropy of candidate excitonic insulator Ta_2NiSe_5 under pressure Journal of Physics: Conference Series, **1609(1)**, in proceedings of 27th AIRAPT International Conference on High Pressure Science and Technology; Rio de Janeiro, 012001 (2020).

(学位論文)

(修士論文)

[13] 岡良輔: Electron correlations and spin-orbit coupling in cubic d^4 electron systems (立方晶 d^4 電子系における電子相関とスピン軌道相互作用)

(博士論文)

[14] 根岸真通: Dirac-node semimetal to magnetic insulator transition in perovskite-related iridium oxides (ペロブスカイト関連イリジウム酸化物における ディラックノード半金属から磁性絶縁体への転移)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[15] 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).

[16] 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

[17] H. Takagi: Exotic spin-orbital entangled states in 5d5 and 4d4 honeycomb oxides UK-Japan workshop and TEMM2020, online, 06/07/2020

[18] H. Takagi: Electron correlations and spin-orbit coupling Condesed matter physics in all cities 2020, Online, 16/06/2020

[19] H. Takagi: Qunatum spin liquids I and II”. Summer school on “Emergent Electronic States Confined at Interface”Ecole de Physique, France, online 20-21/07/2020

[20] H. Takagi: Recent experiments on iridium and ruthenium honeycomb compounds KITP workshop on “A New Spin on Quantum Magnets”, online, 12/11/2020

[21] H. Takagi: Almost zero-gap gap semiconductor/semimetal to insulator transition in layered chalcogenide Ta_2NiSe_5 APS March Meeting 2021, online, USA, 17/03/2021.

[22] K. Kitagawa: Quantum magnetisms in pseudospin-1/2 honeycomb lanthanoids, (UBC – MPG - UTokyo PI-Meeting, online, 03/03/2021).

(国内会議)

一般講演

[23] 平岡奈緒香, 北川健太郎, 林義之, Kelton Whiteaker, Marian Blankenhorn, 高木英典 : SQUID 磁気計用対向アンビル型高圧セルの装置および測定方法改良, 日本物理学会２０２０年秋季大会, オンライン開催, ポスター, 2020 年 9 月 8 日.

[24] 山本洸凪, 元山史都, 曾我部尚希, 磯前貴央, 酒井明人, 中辻知, 北川健太郎, 上床美也, 松林和幸: 高圧力下における $PrTi_2Al_{20}$ の重い電子超伝導, 日本物理学会２０２０年秋季大会, オンライン開催, ポスター, 2020 年 9 月 8 日.

[25] 久我健太郎, 濱本諭, 中谷泰博, 金井惟奈, 藤原秀紀, 青山雄一, 関山明, 東谷篤志, 門野利治, 今田真, 山崎篤志, 田中新, 大浦正樹, 玉作賢治, 矢橋牧名, 石川哲也, 北川健太郎, 木須孝幸: 放射光光電子分光による量子臨界物質 $YbCo_2Ge_4$ の $4f$ 基底状態軌道対称性と混成効果の研究, 日本物理学会２０２０年秋季大会, オンライン開催, 2020 年 9 月 8 日.

[26] 露木裕太, 北川健太郎, Kelton Whiteaker, Marian Blankenhorn, 高木英典, 松田康, 周旭光, 徳永将史, 三宅厚志: f 電子系キタエフ候補物質 Na_2PrO_3 の磁気特性, 日本物理学会２０２０年秋季大会, オンライン開催, 2020 年 9 月 10 日.

[27] 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: ^{33}S-NMR 測定による SmS の圧力誘起磁気秩序構造の同定, 日本物理学会２０２０年秋季大会, オンライン開催, 2020 年 9 月 10 日.

[28] 高橋拓豊, 鈴木博人, J. Bertinshaw, K. S. Rabinovich, S. Bette, J. Nuss, A. V. Boris, H. Gretarsson, 高山知弘, 高木英典, B, D, B. Keimer: K_2RuCl_6 におけるスピン軌道 J 多重項の共鳴非弾性 X 線散乱による観測, 日本物理学会２０２０年秋季大会, オンライン開催, 2020 年 9 月 11 日.

[29] 岡良輔, 北川健太郎, 高木英典: A_2TMCl_6(A=K, Rb, Cs; TM=Ru, Os) の NQR と高圧磁化測定による excitonic 磁性の探索, 日本物理学会２０２０年秋季大会, オンライン開催, 2020 年 9 月 11 日.

[30] 北川健太郎, 平岡奈緒香, WHITEAKER Kelton, 露木裕太, 岡良輔, 林義之, 高木英典対向アンビル型セルを用いた磁化測定による擬スピン 1/2 量子磁性, 第６１回高圧討論会, オンライン開催, 2020 年 12 月 2 日.

[31] 松井勇太, 三木克哲, 溝川貴司, 魯楊帆, 片山尚幸, 野原実, 高木英典, 森脇太郎, 池本夕佳, 岡村英一: 励起子絶縁体関連物質 $Ta_2Ni(Se_{1-x}S_x)_5$ の高圧赤外分光, 日本物理学会第７６回年次大会, オンライン開催, ポスター, 2021 年 3 月 12–15 日.

[32] 吉田章吾, 遠藤宏太, 久米貴之, 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 の価数揺動、磁気秩序状態の研究, 日本物理学会第７６回年次大会, オンライン開催, ポスター, 2021 年 3 月 12–15 日.

[33] 藤原賢二, 田中志和, 本山岳, 三好清貴, 北川健太郎, 小林達生, 平田倫啓, 佐々木孝彦, S. Seiro, C. Geibel, F. Steglich, 西郡至誠: 臨界圧力近傍における $CeCu_2Si_2$ の Ce 価数状態の研究, 日本物理学会第７６回年次大会, オンライン開催, ポスター, 2021 年 3 月 12–15 日.

[34] 安井勇気, 岡崎尚太, 宮坂茂樹, 花栗哲郎, 笹川崇男, 高木英典: バンド幅制御モット絶縁体 $NiS_{2-x}Se_x$ の分光イメージング STM, 日本物理学会第７６回年次大会, オンライン開催, 2021 年 3 月 12 日.

[35] 山本洸凪, 元山史都, 曾我部尚希, 磯前貴央, 酒井明人, 中辻知, 北川健太郎, 上床美也, 松林和幸: $PrTi_2Al_{20}$ の強四極子秩序が消失した高圧域での非フェルミ液体的挙動, 日本物理学会第７６回年次大会, オンライン開催, 2021 年 3 月 12 日.

[36] 今田絵理阿, 松本洋介, Simon Schnierer, Jan Bruin, 北川健太郎, 高木英典: NMR が解き明かす擬スピン 1/2 ハニカム格子 $YbCl_3$ の量子磁性, 日本物理学会第７６回年次大会, オンライン開催, 2021 年 3 月 15 日.

招待講演

[37] 北川健太郎: キタエフ系と幾何学的フラストレーション系物質の NMR・高圧磁性研究, ISSP ワークショップ「量子物質研究の最近の進展と今後の展望」、オンライン、2020 年 9 月 28 日.

4.5 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。

光子もまた電子と同様、スピン角運動量をもっています。光子のスピン角運動量の大きさは電子のそれと比較して 2 倍大きく、ただ光子の質量がゼロであるために、許される量子状態の数は電子のスピンと同じく 2 つになります。例えて言うと、電子のスピンの向きは「上」か「下」の 2 状態に、光子は「右回り」と「左回り」の円偏光の 2 状態に量子化されています。物質に光を照射した際、光がスピン角運動量を持つために様々な現象が発現し、今日の研究の対象となっています。

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。

4.5.1 スピン流物性

電子はスピンを有しているため、電子が動くことで「スピン流」と呼ばれる電子の流れが生じることが最近研究でわかってきました。スピン流とは、逆向きのスピンを持つ電子がそれぞれ逆方向に向かう流れです。たとえば上向きスピンを持つ電子は右方向に、下向きのスピンを持つ電子は左方向に移動した場合、右から左にスピン流が生じたということになります。電流が電荷を運ぶのに対し、スピン流は角運動量を運搬します。

スピントロニクスではスピン流に関する研究が活発化しています。スピン流を磁石に注入すると、磁石を動かすことなく、N 極と S 極を反転できることが明らかになってます。また、特定の物質にスピン流を流すと電流が発生することもわかってきました。これらの現象がどのようにして起きるのか、スピントロニクスはその背後にある物理を解明する基礎科学だけでなく、情報記憶技術や環境発電技術にも応用できるとして工学的観点からも注目されています。

音響スピンホール効果の発見

スピン流を生成する新たな機構として、物質中の原子の高速振動がスピン流を誘起することを発見しました。原子を 1 秒間に 1 億回以上という非常に速い速度で振動・回転させる表面弾性波を用いて、物質中で発生するスピン流を調べました。その結果、スピン軌道相互作用が大きい物質（たとえばタングステンや白金など）において原子の高速振動によるスピン流生成を観測しました。（スピン軌道相互作用とは電子の運動方向とスピンの向きを結びつける相互作用であり、基本的に重い元素ほど、その作用は大きくなることが知られています。）さらに、生成され

たスピン流から電流が生じることもわかり、スピン流を介した一種の振動発電を見出しました。

実験では、圧電基板上に作製した 1 対の櫛形電極の間に非磁性体と強磁性体からなる厚みが数 nm の薄膜ヘテロ構造を製膜し、表面弾性波を伝搬させた際に発生する直流起電力を調べました。磁場によって強磁性層の磁化の向きを変えながら起電力の測定を行った結果、表面弾性波の伝搬時に磁場の向きや大きさに依存する直流起電力が発生することを見出しました。この起電力はスピン軌道相互作用が大きいタングステンや白金などを非磁性層として用いると観測され、スピン軌道相互作用が小さい銅では観測されませんでした。この結果は、表面弾性波がスピン軌道相互作用を介して非磁性体中でスピン流を生成したこと、および非磁性/強磁性ヘテロ構造を利用して表面弾性波由来のスピン変化を電気的に検出できたことを意味します。得られた実験結果は、原子振動がスピン軌道相互作用を介して電子スピンと結合する新規な相互作用を仮定することで説明できることがわかりました。

電子のスピンと回転運動が結合することは古くから知られていましたが、スピン軌道相互作用を介して原子の高速振動からスピン流が生成されることは全く予測されておらず、本研究結果は力学的運動とスピンの間に新たな相互作用が存在することを示唆しています。

本研究は名古屋大河野研との共同研究の成果です。(参考文献 [4])。

強磁性体におけるスピンホール効果

スピンホール効果はこれまで、スピン軌道相互作用が大きい非磁性金属において研究されてきました。一方、有限な自発磁化を有する強磁性体ではどのようなスピン流が生成されるのか、磁化の向きと生成されるスピン流に相関があるのか、など未解明でした。実験ではスピンホール効果によるスピン流を強磁性体で観測するのは困難です。強磁性体に電流を流すと、異常ホール効果により、磁化と電流に直交する方向にホール電圧が発生します。異常ホール効果による電子の流れは、スピンホール効果によるスピンの流れと対称性が同じであり、実験的に 2 つを識別するのが難しいことが知られています。

そこで本研究では、第一原理計算とモデル計算を使って、代表的な強磁性体である bcc-Fe と fcc-Ni のスピンホール伝導度を計算しました。その結果、スピンホール伝導度は磁化の向きに依存して変化することがわかりました。bcc-Fe と fcc-Ni の場合、電子のスピンが磁化の向きと直交する時の方が平行の時よりスピンホール伝導度が大きく、磁化による対称性の破れからスピン流に異方性が生じることが明らかになりました。強磁性におけるスピンホール効果を利用すれば、スピン流の大きさを磁化 (外部磁場) の向きで制御できるため、今後の展開が期待されます。

本研究は三重大中村研との共同研究の成果です。(参考文献 [2, 5])。

トポロジカル絶縁体上のタングステン薄膜の超伝導特性

トポロジカル絶縁体と超伝導体を組み合わせた系は、マヨラナ粒子が生成される舞台として近年研究開発が活発化しています。本研究では、トポロジカル絶縁体上に超伝導薄膜を作製し、トポロジカル絶縁体の電子構造が超伝導特性にどのような影響を与えるかを調査しました。トポロジカル絶縁体 $(Bi,Sb)_2Te_3$ 上に、超伝導転移温度が 2 K 程度のタングステン薄膜を作製しました。超伝導転移温度はこれまでに報告されているタングステン薄膜のそれと同程度でした。一方、超伝導が破壊される磁場 (臨界磁場) を調べた結果、パウリリミットの 2.5 倍もの大きな臨界磁場を観測しました。これらの結果は、スピン軌道相互作用が大きい系におけるクーパー対の散乱機構を用いて説明することができますが、トポロジカル絶縁体の電子構造による影響の定量評価にまでは至らなかったため、その解明が今後の課題です。

本研究は東大長谷川研、NIMS 宇治グループとの共同研究の成果です。(参考文献 [1])。

4.5.2 非線形光学効果

光を物質に照射すると、光が持つスピン角運動量を物質に転写することができます。例えば右回りの円偏光を GaAs 等の半導体に照射すると、角運動量の保存則から特定の方向を向いたスピンを持つ電子を価電子帯から伝導帯に励起できます。一方、スピン軌道相互作用が大きい物質を含む界面・表面などに円偏光を斜めから照射すると、光の入射方向と直交する方向に電流が流れることが知られています。これはフォトガルバニック効果と呼ばれ、一見太陽電池のように見えますが、pn 接合などがなくても電流が流れるなど、その性質は大きく異なります。最近ではトポロジカル絶縁体や 2 次元層状物質などでもフォトガルバニック効果が観測されており、物質の特異な電子状態を検出する手法としても有効であるとされています。

光誘起スピン流によるテラヘルツ波放射

フォトガルバニック効果は連続光の照射によって直流電流が発生する現象です。本研究では、フェムト秒円偏光パルスを物質に照射して、発生する THz 波の観測を試みました。光を照射する試料はスピン軌道相互作用が大きいビスマスを用いました。これまでの研究から、ビスマス薄膜に円偏光を照射すると、薄膜内でスピン流が発生し、逆スピンホール効果によって直流電流が発生することがわかっています。同様の系にフェムト秒円偏光パルスを照射したところ、THz 波が発生することがわかりました。観測された THz 波は、光誘起スピン流と逆スピンホール効果による超高速電流に起因するものと考えられます。これらの結果は、ビスマス薄膜を利用した簡

易且つ、制御可能な THz 波光源のポテンシャルを示すものです。

本研究は東大島野研との共同研究の成果です。(参考文献 [3])。

4.5.3 機械学習と物性

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。

機械学習を用いた界面ジャロシンスキー守谷相互作用の推定

ジャロシンスキー守谷相互作用の評価はこれまで、強磁性体の磁化ダイナミクスを利用することがほとんどでした。磁化の動的過程を観測し、その過程をモデル化してジャロシンスキー守谷相互作用を求める手法は複雑であり、多くの系を早く評価することが困難です。そこで本研究では、近年急速に発展している機械学習を利用して、この課題の解決に挑みました。

機械学習は、計算機科学の進歩と共に飛躍的に発展し、現代社会に必須の技術となりつつあります。自動車の自動運転、翻訳、画像認識、囲碁将棋ソフトの開発など、その適用範囲は年々拡大しています。特に画像認識の分野では畳み込みニューラルネットワーク (CNN) の開発によって、高精度な認識が実現しており、人間の眼では気付かないわずかな特徴を捉えることができます。本研究では CNN 技術を利用して磁気情報を含む画像を解析し、ジャロシンスキー守谷相互作用など磁気パラメータを取得することを試みました。

磁石の中には「磁区」と呼ばれる、それぞれの領域内でN極の向きが揃った区画が整然と並んでいます。磁区の大きさや形などの磁区模様にはその材料の磁気パラメータが反映されています。本研究では画像認識を用いて磁区模様を分析し、磁気パラメータを推定できるプログラム (人工知能) を作成しました。人工知能が学習するための教師データには大量のデータが必要となるため、実験によって取得することが困難です。そこで本研究では、マイクロマグネティックシミュレーションを利用して、教師データとなる磁区画像を作成し、テストデータには実験から取得した磁区画像を用いて、ジャロシンスキー守谷相互作用の大きさ (D 値) を推定できるか調べました。

実験に用いた素子構造は白金とコバルトからなる多層膜で、白金とコバルトの界面には大きなジャロシンスキー守谷相互作用が存在することが知られています。磁区模様は小型の磁気センサーを搭載した顕微鏡を用いて観察しました。取得した画像を解析した結果、実験から計測された D 値と人工知能が推定した D 値が一致することが明らかになりました。また、推定できる磁気パラメータを増やしても、推定値の精度が変化しないことがわかりました。これらの結果は、機械学習と画像認識を用いることで、評価が難しい複数の磁気パラメータを磁区画像から取得できることを実証するものです。今後、マイクロマグネティックシミュレーションを用いて種々の磁気パラメータの組み合わせに対応する磁区模様の教師データを生成した上で、機械学習によって人工知能を上手く学習させることが実現できれば、その情報をデータベース化することで、調査したい材料、構造の磁区画像を入力するだけですべての磁気パラメータを手に入れることが可能となります。

本研究は電通大仲谷研、豊田工大、岐阜大との共同研究の成果です。(参考文献 [6])。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Y.-C. Lau, R. Akiyama, H. T. 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 $(Bi,Sb)_2Te_3$. J. Phys. Mater. 3, 034001 (2020).

[2] G. Qu, K. Nakamura, M. Hayashi, Magnetization direction dependent spin Hall effect in ferromagnets. Phys. Rev. B 102, 144440 (2020).

[3] Y. Hirai, N. Yoshikawa, H. Hirose, M. Kawaguchi, M. Hayashi, R. Shimano, Terahertz emission from thin films induced by excitation with circularly polarized light. Phys. Rev. Appl. 14, 064015 (2020).

[4] T. Kawada, M. Kawaguchi, T. Funato, H. Kohno, M. Hayashi, Acoustic spin Hall effect in strong spin-orbit metals. Science Advances 7, eabd9697 (2021).

[5] G. Qu, K. Nakamura, M. Hayashi, First Principles Investigation of Anomalous Hall and Spin Hall Effects in Ferromagnetic CoPt. J. Phys. Soc. Jpn. 90, 024707 (2021).

[6] M. Kawaguchi, K. Tanabe, K. Yamada, T. Sawa, S. Hasegawa, M Hayashi, Y. Nakatani, Determination of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction using pattern recognition and machine learning. npj Comp. Mater. 7, 1 (2021).

(学位論文)

[7] Qu Guanxiong, Spin Hall Effect in Ferromagnets. 博士論文.

[8] Chi Zhendong, Current-spin conversion in Dirac semimetal thin film heterostructures. 博士論文.

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[9] M. Hayashi, Spin orbit torque and chiral magnetism in spin orbit materials. Online Spintronics Seminar Series, 5/26/2020, Online.

(国内会議)

一般講演

[10] 川田 拓弥, 河口 真志, 林 将光, 音響電流を用いた金属二次元伝導の研究. 日本物理学会 第 76 回年次大会, 3/11/2021, オンライン開催.

[11] 池震棟, Yong-Chang Lau, 河口 真志, 高梨 弘毅, 林 将光, キャリアドープビスマス薄膜における電流-スピン流変換. 日本物理学会 第 76 回年次大会, 3/13/2021, オンライン開催.

[12] 河口 真志, 廣瀬 葉菜, 池 震棟, Yong-Chang Lau, 林 将光, Bi 合金における円偏光起電力. 日本物理学会 第 76 回年次大会, 3/13/2021, オンライン開催.

[13] 田辺 賢士, 河口 真志, 山田 啓介, 澤 拓哉, 長谷川 隼, 林 将光, 仲谷 栄伸, 機械学習を利用した磁気パラメータの推定. 日本物理学会 第 76 回年次大会, 3/13/2021, オンライン開催.

[14] 塚本萌太, 小河 健介, 河口 真志, 林 将光, 小澤 勇斗, 岩崎 孝之, 波多野 睦子, 佐々木 健人, 小林 研介, ダイヤモンド量子センサを用いた磁区構造イメージング. 日本物理学会 第 76 回年次大会, 3/15/2021, オンライン開催.

[15] M. Kawaguchi, K. Tanabe, K. Yamada, T. Sawa, S. Hasegawa, M. Hayashi, Y. Nakatani, Determination of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction from a single magnetic domain image using image recognition. 第 68 回応用物理学会春季学術講演会, 3/16/2021, オンライン開催.

招待講演

[16] 林 将光, ディラック電子系のスピン流物性. PASPS-25, 11/17/2020, オンライン開催.

[17] 林　将光, スピン流材料開発の進展. 第 68 回応用物理学会春季学術講演会, 3/18/2021, オンライン開催.

4.6 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など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、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・非平衡現象に注目して研究を行っている。高精度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を行っている。現在、特に量子センサによる超精密物性計測に注力している。

小林研究室は 2019 年 5 月に発足した。今年度は、小林研介教授、2020 年 4 月に着任した佐々木健人助教、修士課程大学院生の小河健介氏、塚本萌太氏のメンバーで研究を行った。小林教授はクロスアポイントメント教授として大阪大学大学院理学研究科教授も務めながら研究を進めた。

4.6.1 量子センサによる精密物性計測

ダイヤモンド NV センタ

ダイヤモンドには 100 種類以上の発光欠陥が知られている。NV センタ（Nitrogen-Vacancy center）はその一つであるが、光励起後の過程に電子スピンに依存する独特の経路を持つ。この性質を利用すれば、単一の NV センタの電子スピン状態を光学的に読み出し可能であることが 1997 年に示された。この手法を光検出磁気共鳴（optically detected magnetic resonance, ODMR）と呼ぶ。さらに、2008 年、ODMR を利用した局所磁場観察の手法が提案された。我々のねらいは、この手法を基盤として単一量子スピン顕微鏡を開発し、様々な物性計測、とくにメゾスコピック系の研究に展開していくことである。後述するように、この手法は幅広い温度領域・磁場領域で適用可能であり、サブミクロンスケールで磁場や温度の分布を定量的にイメージングできる。物性物理学にはこれまでに存在しなかった手法であり、高い将来性を持つ。

NV センタの性質について簡単に説明する。図 4.6.1 に、ダイヤモンドのギャップ内に形成される NV センタのエネルギー準位を示す。ともに $S = 1$ スピン三重項状態である基底状態と励起状態のエネルギー差は 1.945 eV (637 nm) であり、光学遷移が可能である。波長 520 nm 程度のレーザーによって励起した場合、励起後の $m_s = 0$ 状態はほぼ基底 $m_s = 0$ 状態へ遷移する。一方、励起 $m_s = \pm 1$ 状態については、基底 $m_s = \pm 1$ 状態への遷移とは別に、高い確率で、中間状態を経て基底 $m_s = 0$ に至る無輻射の遅い過程を持つ。

このように特殊な電子スピン依存光学遷移を持つため、NV センタはユニークな特徴を有する。まず、光励起過程が繰り返されることによって、基底 $m_s = 0$ 状態に状態が偏極していく。また、中間状態を介した遷移は無輻射であるため、蛍光強度の差から、NV センタのスピン状態を検出することができる。さらに、$m_s = 0$ と $m_s = \pm 1$ 状態間にはゼロ磁場分裂（~ 2.87 GHz）が存在しており、ESR 共鳴によって引き起こされた NV センタの電子スピン状態の変化を、蛍光強度の変化として測定可能である。ODMR

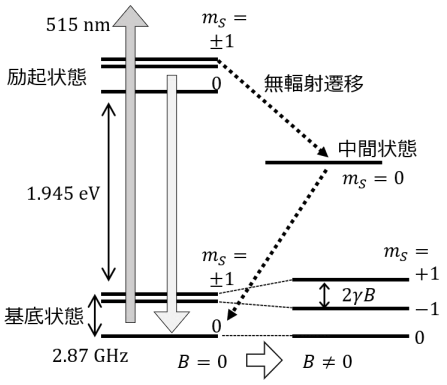


図 4.6.1: NV センタ内のエネルギー準位。

とは、このような蛍光強度の変化によって ESR を観測することである。ESR や NMR は確立した磁気共鳴手法であるが、NV センタにおける ODMR を用いることによって、単一のサイトに対して同じことが可能になることが大きな魅力である。

実際、$m_s = 0$ や $m_s = \pm 1$ の準位は、温度や磁場によって影響を受けるため、ESR スペクトルの分析によって、単一の NV センタが感じる温度や磁場を検出することが可能になる。すなわち、NV センタは原子スケールの量子センサとして動作する。我々は以上の事実を利用して単一量子スピン顕微鏡を開発している。

微小領域の磁場イメージング

我々は、NV センタを用いて磁性体における磁区構造をイメージングする技術を開発した。まず、磁性体を微細加工したパターンからの漏れ磁場を測定することによって、NV センタにより磁性体の漏れ磁場が定量的に観測できることを確認した。さらに、実際に様々なスケールの磁区構造を観測し、感度と精度を評価した。現時点で 10 μm 程度の空間分解能で 10 μT 程度の漏れ磁場の観測に成功している。今後は、空間分解能や磁場精度の向上などを行い、スピントロニクスや磁性材料の開発に適用する [18, 39]。

なお、本研究では東工大波多野研究室で作製されたダイヤモンド試料を用いた。これは、(111) ダイヤモンド基板表面に、化学気相成長（CVD）を用いて、NV センタの対称軸がすべて [111] 方向に揃った高濃度 NV アンサンブル膜を形成したものである。また、微小磁性体については物理学教室林研究室に提供いただいた。

微小領域の温度イメージング

ダイヤモンド格子が温度の影響を受けるため、NV センタ内のエネルギー準位も温度に依存する。我々はこのことを利用して、NV センタを用いた局所熱測定手法も開発している。測定には NV センタを含むナノダイヤモンドを用いている。試料表面にナノダイヤモンドを薄く塗布し ODMR 測定を行うことにより、試料の局所的な温度を測定できる。ナノダイヤモンド自体のサイズが小さいため、従来の熱電対等の巨視的な温度計を用いた温度測定よりも接触による侵襲性が小さいことが利点である。現在、この手法を用いた熱測定の原理実証実験を行っている [19, 40]。

単一陽子スピン検出と量子操作

上記は NV センタの物性計測への応用であるが、NV センタそのものも魅力的な研究対象であり、1990 年代後半から数多くの研究が行われてきた。佐々木は、大学院生時代より NV センタの研究を行い、本年度、本学に着任後も一部の研究を継続している。

NV センタを利用した核スピン検出のための量子制御プロトコルに注目して研究を行い、室温ダイヤモンド中の単一陽子スピンの検出と量子制御に成功した。陽子スピンは水素の核スピンであり、NMR や MRI における主要な測定対象である。NV センタの重ね合わせ状態をマイクロ波パルス列で精密に制御し、従来法では達成不可能な単一核スピン感度の NMR 測定を実施した。CVD ダイヤモンド薄膜中の複数の単一 NV センタにおいて単一核スピン信号を探索し、報告例が極めて少なかった室温の単一陽子スピンを曖昧さ無く発見した。さらに、NV センタを利用した動的核磁気分極によって核スピン状態の初期化、読み出しを行い、単一陽子スピンのラビ振動を世界で初めて観測した。本研究結果は、NV センタを利用した量子情報処理やダイヤモンド中格子欠陥発見につながる [7, 20, 24, 36, 41, 50]。

4.6.2 量子液体のダイナミクス

近藤効果は、固体中の局在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。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、強い電子相関に支配される量子液体を研究することと等価である。

我々は、カーボンナノチューブ量子ドットにおいて近藤効果の研究を行ってきた。この系を用いると、単一の近藤状態を対象に、電子数・スピン・軌道・近藤温度・平衡–非平衡など、あらゆるパラメータを制御しながら精密な測定を行うことができる [15, 21, 47, 48]。

3 体相関の検出

我々は、量子液体を構成する粒子間に存在する「三体相関」を実験的に検出した。まず、「二体相関」は通常のスピン感受率に対応し、平衡状態における系の線

形応答を規定する量である。それに対し、三体相関は系の非線形非平衡応答において重要となる。我々は、磁場中における量子ドットの非線形微分伝導度を精密に解析し、近藤効果に特有の三体相関を検出した。得られた結果は、近年の非平衡領域におけるフェルミ液体論とよく整合する。また、我々の結果によって、量子ドットにおいて 20 年来の謎であった近藤ピークの磁場中分裂の問題が解決された [49]。

近藤効果における対称性クロスオーバーの解明

通常の近藤効果（SU(2) 近藤効果）は、電子の持つスピン自由度（上/下）の量子力学的なゆらぎによって生じる。しかし、カーボンナノチューブ中の電子は、スピンの他に軌道自由度（右回り/左回り）を持ち、SU(4) 近藤効果が起こる。我々は、量子ドットに加えるゲート電圧を制御することによって、ユニタリ極限に近い理想的な SU(4) 近藤状態を実現した。この状態に磁場を加えていくと、スピン縮退が解け、SU(2) 近藤状態に変化する。これは近藤状態の内部構造の対称性を制御したことに相当する。我々は、数値くりこみ群 (NRG) を用いて、この磁場誘起対称性クロスオーバーを精密に調べた。磁場変化・温度変化について詳細な計算を行い、理論が定量的に実験結果を説明できることを示した。スピンと軌道が複雑に絡み合った近藤効果の振る舞いを定量的に理解できるという事実は、今後の量子多体現象の研究の発展につながる大切な知見である [9]。

4.6.3 非線形非平衡現象

非線形輸送に現れるマグノン支援トンネル効果

電子輸送における電流-電圧特性は、相互作用に関する系の微視的な情報を反映する。外場が十分に弱い領域は線形応答理論によって記述でき、輸送測定による物性評価の基礎となっている。一方で、電流と電圧の比例関係が破れた非線形輸送において、その微視的な機構を定量的に理解することは、いまなお挑戦的な問題である。

我々は CoFeB/MgO/CoFeB 磁気トンネル接合を作製し、電流-電圧特性の面内磁場および MgO 絶縁膜厚を変化させた場合の非線形性を測定した。その結果、絶縁膜厚や測定温度によらず、線形伝導度と非線形伝導度との間に普遍的な相関があることを発見した。この関係は、マグノン支援トンネルを取りいれた現象論的なモデルによって定性的に説明できることを見出した [22, 28, 33, 35]。

単電子ポンプの開発

決まったタイミングで電子を一粒ずつ流すことのできる固体素子を、単電子ポンプ（単電子源）と呼ぶ。単電子ポンプを研究する大きな動機は、電気素量 e と周波数 f を持つ量子電流標準を確立することにある。2019 年に実施された国際単位系 (SI) の改定において、電流の単位アンペアの定義が電気素量と周波数に基づくものに置き換えられた。したがって、単電子ポンプは今後の電流標準の維持と発展において中心的な役割を果たすと期待される。また、単電子ポンプは、電子を用いたフェルミオン量子光学実験においても重要である。

GaAs/AlGaAs 二次元電子系上に単電子ポンプを作製するためには、サブマイクロメートルの量子細線をエッチングで作製する必要がある。我々は、フォトリソグラフィと電子線リソグラフィを組み合わせて、微細構造と大面積構造を同時にエッチングできる技術を確立した。作製した単電子ポンプが、一周期あたり決まった個数の電子を高周波で送出できることを実証した [4]。

トンネル効果における非平衡電流ゆらぎ

固体中における電子のトンネル効果は代表的な電気伝導現象の一つであり、1950 年代の江崎ダイオード以来、長年研究されてきた。また、ダイオード、ハードディスクの読み取りヘッド、フラッシュメモリなどの工学応用もされており、その伝導の詳細を理解することは重要である。

トンネル障壁を横切る電子輸送は、界面の条件、材料の特性、デバイス形状などの様々な原因に支配されている。我々は、非平衡電流ゆらぎ（ショット雑音）を測定することにより、(Ga,Mn)As/GaAs スピン江崎ダイオード接合における電子輸送を調べた。単一の素子においてバイアス電圧を連続的に変化させることで、従来型の直接トンネリング、中間ギャップ局所状態を介した過剰電流伝導、熱励起電流伝導という複数の伝導領域を観測した。測定の結果、直接トンネリングでは、ファノ因子（雑音の大きさを表す無次元量）は 1 であるのに対し、過剰電流領域ではファノ因子が顕著に減少することを見出した [3]。

高精度ゆらぎ測定用増幅器の開発

固体素子を流れる電流に含まれる「ゆらぎ（電流雑音）」から様々な情報が得られる。我々は、これまでに、近藤状態における電子散乱やスピンショット雑音など、微視的な電子伝導メカニズムに関する研究を行ってきた。このような測定には、高精度雑音測定技術が必須となる。我々は、自作の GaAs 高電子移動度トランジスタ（HEMT）を用いた極低温増幅器を自作した。熱雑音を用いた測定を行い、作製した増幅器が希釈冷凍機温度（0.1 K 以下）でのメゾスコピック素子の電流雑音測定に適していることを示した。我々の増幅器は、これまで用いられてきた市販の HEMT を使用して作られた増幅器よりも高精度・高効率な電流雑音測定を可能とする [13, 27]。

4.6.4 スピン依存伝導

非線形領域にあるスピントルク発振器

磁気トンネル接合（MTJ）へスピン流を注入すると、磁化が自励発振することが知られている。このような磁化の自励発振は、典型的な非平衡非線形現象であり、様々な研究が行われてきた。MTJ では、励起強度や磁気異方性さらには外部共振器との相互作用など、様々なパラメータを制御することで、多彩な発振モードが実現される可能性がある。その点で、MTJ は制御された状態で振動子の非線形ダイナミクスを研究できる格好の舞台と言える。

我々は、CoFeB/MgO/CoFeB を基本構造とする MTJ を用いて、発振現象を研究した。この構造では、下地にある Ta 層におけるスピンホール効果によって生成されたスピン流が、接合の下部 CoFeB 層にスピントルクを与えることによって、磁化発振を励起することができる。スピン流が増加するにつれて、単一発振モードが低周波側にシフトしつつ等間隔のマルチモードへと分岐することを観測した。マイクロマグネティクスによる数値計算から、複数の軸まわりでの歳差運動および共振器モードとの相互作用によってモード変化が引き起こされていることを実証した。この成果は、スピントルクを用いた非線形発振素子の小型化に寄与する可能性を持つ [1, 2]。

スピングラスに中間相 = スピン蜜状態

スピングラス物質 CuMnBi 合金を微細加工して得られた細線を用いてスピン輸送測定を行った。磁気モーメントがゆらいでいる高温状態では、スピンホール角は温度に依存しない。ところが、温度を下げていくと、スピンホール角がある温度 T^* で減少し始め、低温では完全に消失する。この消失温度は、スピングラスのスピン凍結温度 T_f に対応する。T_f 以下では伝導電子のスピンの方向は局在モーメントとの交換結合によってランダムになっている（スピングラス状態）。

我々は、T_f と T^* の間に、スピングラス相でもなければ常磁性相でもない、性質の異なるスピン状態が存在することを明らかにした。この時のスピン状態は、多数のスピンが絡まり合いながらゆっくりゆらいでいる状況であり「スピン蜜 (spin treacle)」状態と呼ぶことができる。さらに、伝導電子のスピン緩和時間から、スピングラス内の局所磁気モーメントのゆらぎの時間スケールを定量的に評価した [8]。

4.6.5 原子層物質

ファンデルワールス強磁性体の磁気抵抗効果

ファンデルワールス強磁性体 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た。磁場中で電気抵抗測定を行ったところ、10%に及ぶ大きな磁気抵抗比を持つバタフライ型（蝶の羽の形）の磁気抵抗効果を見出した。このような特殊な磁気抵抗効果は、Fe サイトにおける磁気ゆらぎに起因する可能性がある [12, 16, 23, 25]。

層状化合物 $CeTe_3$ における量子振動

$CeTe_3$ は希土類トリテルライド RTe_3（R = 希土類元素）の一種で、Ce と Te のユニットからなる層と、Te のシート 2 枚から構成される層が交互に積層した層状化合物である。我々は $CeTe_3$ 薄膜素子を作製し、磁気抵抗測定を行い、シュブニコフ–ド・ハース振動について調べた。約 3 K の磁気転移温度以下で、振動の振幅の振る舞いがリフシッツ–コセヴィッチ式から外れていることを見出した。この結果は、磁気秩序と伝導電子の相互作用によって有効サイクロトロン質量が増大する可能性があることを示している [5, 10, 17]。

非平衡超伝導体における負の抵抗状態

我々は超伝導体に表面弾性波を印加した際に生じる輸送現象を調べた。素子は超伝導体 $NbSe_2$ 原子層薄膜を圧電基板 $LiNbO_3$ に転写して作製した。基板上の櫛型電極に高周波電場をかけることによって表面弾性波を原子層超伝導体に照射した。我々は、超伝導転移温度以下で、素子の抵抗が負になる現象（負抵抗状態）を見出した。この負抵抗は、低温になるにつれて、また表面弾性波のパワーを強くするにつれて増大する。半導体で観測される微分抵抗に現れる負性抵抗と異なり、本現象は抵抗の値そのものが負になる新現象である。本研究はフロッケ・エンジニアリングへの適用や新しい超伝導デバイスにつながることが期待される [6]（プレスリリース [51]）。

＜報文＞

(原著論文)

[1] S. Iwakiri, S. Sugimoto, Y. Niimi, K. Kobayashi, Y. Kozuka, Y. K. Takahashi, and S. Kasai, “Generation of multipeak spectrum of spin torque oscillator in non-linear regime”, *Applied Physics Letters* **117,** 022406 (2020).

[2] S. Sugimoto, S. Iwakiri, Y. Kozuka, Y. Takahashi, Y. Niimi, K. Kobayashi, and S. Kasai, “Multiple modes of a single spin torque oscillator under the non-linear region”, *AIP Advances* **10,** 075115 (2020).

[3] T. Arakawa, J. Shiogai, M. Maeda, M. Ciorga, M. Utz, D. Schuh, Y. Niimi, M. Kohda, J. Nitta, D. Bougeard, D. Weiss, and K. Kobayashi, “Tunneling mechanism in a (Ga,Mn)As/GaAs-based spin Esaki diode investigated by bias-dependent shot noise measurements”, *Physical Review* B **102,** 045308 (2020).

[4] S. Norimoto, S. Iwakiri, M. Yokoi, T. Arakawa, Y. Niimi, and K. Kobayashi, "Etching process of narrow wire and application to tunable-barrier electron pump", *Review of Scientific Instruments* **91,** 085110 (2020).

[5] M. Watanabe, S. Lee, T. Asano, T. Ibe, M. Tokuda, H. Taniguchi, D. Ueta, Y. Okada, K. Kobayashi, and Y. Niimi, "Quantum oscillations with magnetic hysteresis observed in $CeTe_3$ thin films", *Applied Physics Letters* **117,** 072403 (2020).

[6] M. Yokoi, S. Fujiwara, T. Kawamura, T. Arakawa, K. Aoyama, H. Fukuyama, K. Kobayashi, and Y. Niimi, "Negative resistance state in superconducting $NbSe_2$ induced by surface acoustic waves", *Science Advances* **6,** eaba1377 (2020).

[7] K. Sasaki, H. Watanabe, H. Sumiya, K. M. Itoh, and E. Abe, "Detection and control of single proton spins in a thin layer of diamond grown by chemical vapor deposition", *Applied Physics Letters* **117,** 114002 (2020).

[8] H. Taniguchi, M. Watanabe, T. Ibe, M. Tokuda, T. Arakawa, T. Taniguchi, B. Gu, T. Ziman, S. Maekawa, K. Kobayashi, and Y. Niimi, "Spin treacle in a frustrated magnet observed with spin current", *Physical Review* B **102,** 094405 (2020).

[9] Y. Teratani, R. Sakano, T. Hata, T. Arakawa, M. Ferrier, K. Kobayashi, and A. Oguri, "Field-induced SU(4) to SU(2) Kondo crossover in a half-filling nanotube dot: Spectral and finite-temperature properties", *Physical Review* B **102,** 165106 (2020).

[10] M. Watanabe, R. Nakamura, S. Lee, T. Asano, T. Ibe, M. Tokuda, H. Taniguchi, D. Ueta, Y. Okada, K. Kobayashi, and Y. Niimi, "Shubnikov-de-Haas oscillation and possible modification of effective mass in $CeTe_3$ thin films", *AIP Advances* **11,** 015005 (2021).

[11] D. Terasawa, S. Norimoto, T. Arakawa, M. Ferrier, A. Fukuda, K. Kobayashi, and Y. Hirayama, "Large Zeeman Splitting in Out-of-Plane Magnetic Field in a Double-Layer Quantum Point Contact", *Journal of the Physical Society of Japan* **90,** 024709 (2021).

[12] T. Ohta, M. Tokuda, S. Iwakiri, K. Sakai, B. Driesen, Y. Okada, K. Kobayashi, and Y. Niimi, "Butterfly-shaped magnetoresistance in van der Waals ferromagnet Fe_5GeTe_2", *AIP Advances* **11,** 025014 (2021).

[13] S. Lee, M. Hashisaka, T. Akiho, K. Kobayashi, and K. Muraki, "Cryogenic GaAs high-electron-mobility-transistor amplifier for current noise measurements", *Review of Scientific Instruments* **92,** 023910 (2021).

(国内雑誌)

[14] 長谷川剛、小林研介、村上修一、「令和元年度科学研究費助成事業（科研費，基盤研究等）審査結果報告」、日本物理学会誌 **75,** 228 (2020).

[15] 小林研介、「近藤効果と量子ドットと私」、Annual Report 2019 低温科学研究センター年報 第 11 号 p.11 (2021).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[16] T. Ohta, K. Sakai, H. Taniguchi, B. Driesen, Y. Okada, K. Kobayashi, and Y. Niimi, "Enhancement of coercive field in van der Waals ferromagnet Fe_5GeTe_2", The 65th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2020) (Online, Nov. 2–6, 2020) [poster].

[17] M. Watanabe, S.-H. Lee, T. Asano, T. Ibe, M. Tokuda, H. Taniguchi, D. Ueta, Y. Okada, K. Kobayashi, and Y. Niimi, "Coexistance of quantum oscillation and magnetic hysteresis in $CeTe_3$ thin films", The 65th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2020) (Online, Nov. 2–6, 2020) [poster].

[18] M. Tsukamoto, K. Ogawa, M. Kawaguchi, M. Hayashi, H. Ozawa, T. Iwasaki, M. Hatano, K. Sasaki, and K. Kobayashi, "Magnetic domain structure imaging using diamond quantum sensor", 10th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (Online, Dec. 17–18, 2020) [oral].

[19] K. Ogawa, M. Tsukamoto, K. Sasaki, and K. Kobayashi, "Development of temperature imaging technique using diamond quantum sensor", 10th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (Online, Dec. 17–18, 2020) [oral].

[20] K. Sasaki, H. Watanabe, H. Sumiya, K. M. Itoh, and E. Abe, "Detection and control of single proton spins in a diamond", 10th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (Online, Dec. 17–18, 2020) [oral].

招待講演

[21] K. Kobayashi, "Non-equilibrium Fluctuations in Correlated Quantum Liquid", APW-RIKEN-Tsinghua-Kavli workshop on "Highlights on condensed matter physics" (Online, Feb. 2–4, 2020).

(国内会議)

一般講演

[22] 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非線形輸送」、スピントロニクス・オンライン発表会（オンライン、2020 年 6 月 3–4 日）（口頭）

[23] 太田 智陽、坂井 康介、谷口 祐紀、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金属 Fe_5GeTe_2 における垂直磁気異方性の評価」、スピントロニクス・オンライン発表会（オンライン、2020 年 6 月 3–4 日）（口頭）

[24] 佐々木健人、渡邊幸志、角谷均、伊藤公平、阿部英介、「ダイヤモンド量子センサーによる単一核スピンの三次元位置決定法の開発」、スピントロニクス・オンライン発表会（オンライン、2020 年 6 月 3–4 日）（口頭）

[25] 太田智陽、坂井康介、谷口祐紀、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金属 Fe_5GeTe_2 における垂直磁気異方性の評価」、日本物理学会 2020 年秋季大会（オンライン、2020 年 9 月 8–11 日）（口頭）

[26] 佐々木壱晟、太田智陽、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 $CrNb_3S_6$ 薄膜における逆スピンホール効果の観測」、日本物理学会 2020 年秋季大会（オンライン、2020 年 9 月 8–11 日）（口頭）

[27] Lee Sanghyun、橋坂昌幸、秋保貴史、小林研介、村木康二、「寄生容量を考慮した電子回路モデルによるノイズ測定用低温 HEMT 増幅器の評価」、日本物理学会 2020 年秋季大会（オンライン、2020 年 9 月 8–11 日）（口頭）

[28] 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非線形輸送」、日本物理学会 2020 年秋季大会（オンライン、2020 年 9 月 8–11 日）（口頭）【学生優秀発表賞 受賞】

[29] 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スライディング特性」、日本物理学会 2020 年秋季大会（オンライン、2020 年 9 月 8–11 日）（口頭）

[30] 花田尚輝、岩切秀一、浅野拓也、松井朋裕、福山寛、小林研介、新見康洋、「エッチンググラフェンのおける弱局在効果の増幅」、日本物理学会 2020 年秋季大会（オンライン、2020 年 9 月 8–11 日）（口頭）

[31] 徳田将志、中尾舞、岩切秀一、Yue Di、Jin Xiao-Feng、小林研介、新見康洋、「Bi/Ni 超伝導薄膜のパラ伝導度の解析」、日本物理学会 2020 年秋季大会（オンライン、2020 年 9 月 8–11 日）（ポスター）

[32] 中尾舞、徳田将志、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の解析」、日本物理学会 2020 年秋季大会（オンライン、2020 年 9 月 8–11 日）（ポスター）

[33] 岩切秀一、杉本聡志、新見康洋、小塚裕介、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現象の観測」、第 25 回半導体におけるスピン工学の基礎と応用（オンライン開催、2020 年 11 月 17–19 日）（口頭）

[34] 花田尚輝、岩切秀一、浅野拓也、松井朋裕、福山寛、小林研介、新見康洋、「エッチンググラフェンにおける弱局在効果の増幅」、第 25 回半導体におけるスピン工学の基礎と応用（オンライン開催、2020 年 11 月 17–19 日）（ポスター）

[35] S. Iwakiri, S. Sugimoto, Y. Niimi, Y. Kozuka, Y. K. Takahashi, S. Kasai, and K. Kobayashi, “Nonlinear Electron Transport Mediated by Electron-Magnon Interactions in Magnetic Tunnel Junction”, 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会（オンライン、2020 年 12 月 21–25 日）（口頭）

[36] 佐々木健人、渡邊幸志、角谷均、伊藤公平、阿部英介、「ダイヤモンド中の窒素空孔中心を用いた単一プロトンスピンの検出と制御」、スピントロニクス連携ネットワーク年次報告会（オンライン、2021 年 3 月 9 日）（口頭）

[37] 鈴木将太、佐々木壱晟、太田智陽、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 $CrNb_3S_6$ におけるスピン輸送測定」、日本物理学会 第 76 回年次大会（オンライン、2021 年 3 月 12–15 日）（口頭）

[38] 太田智陽、藤原浩司、大星和毅、山神光平、岡田佳憲、小林研介、新見康洋、「原子層強磁性体/超伝導体ヘテロ接合における輸送特性」、日本物理学会 第 76 回年次大会（オンライン、2021 年 3 月 12–15 日）（口頭）

[39] 塚本萌太、小河健介、河口真志、林将光、小澤勇斗、岩崎孝之、波多野睦子、佐々木健人、小林研介、「ダイヤモンド量子センサを用いた磁区構造イメージング」、日本物理学会 第 76 回年次大会（オンライン、2021 年 3 月 12–15 日）（口頭）

[40] 小河健介、塚本萌太、佐々木健人、小林研介、「ダイヤモンド量子センサを用いた温度イメージング測定」、日本物理学会 第 76 回年次大会（オンライン、2021 年 3 月 12–15 日）（口頭）

[41] 佐々木健人、渡邊幸志、角谷均、伊藤公平、阿部英介、「ダイヤモンド中量子センサによる単一プロトンスピンの検出と制御」、日本物理学会 第 76 回年次大会（オンライン、2021 年 3 月 12–15 日）（口頭）

[42] 大星和毅、花田尚輝、岩切秀一、松井朋裕、福山寛、小林研介、新見康洋、「グラフェンアンチドット格子における弱局在効果の変調」、日本物理学会 第 76 回年次大会（オンライン、2021 年 3 月 12–15 日）（ポスター）

[43] 勝村亮太、太田智陽、坂井康介、鈴木将太、小林研介、新見康洋、「磁性トポロジカル絶縁体 $MnSb_2Te_4$ 薄膜における輸送特性」、日本物理学会 第 76 回年次大会（オンライン、2021 年 3 月 12–15 日）（ポスター）

[44] 岩切秀一、杉本聡志、新見康洋、葛西伸哉、小林研介、「金属超薄膜における電場侵入効果」、日本物理学会 第 76 回年次大会（オンライン、2021 年 3 月 12–15 日）（口頭）

[45] 中村瞭弥、渡邉杜、徳田将志、坂井康介、中島正道、小林研介、新見康洋、「$FeTe_{0.6}Se_{0.4}$ 薄膜素子の輸送特性」、日本物理学会 第 76 回年次大会（オンライン、2021 年 3 月 12–15 日）（口頭）

[46] 徳田将志、中尾舞、渡邉杜、Lee Sanghyun、中村瞭弥、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 2」、日本物理学会 第 76 回年次大会（オンライン、2021 年 3 月 12–15 日）（ポスター）

招待講演

[47] K. Kobayashi, “Strongly Correlated Quantum Liquids Probed by Non-equilibrium Fluctuations”, RIKEN CEMS Colloquium （理化学研究所創発物性科学研究センター、2020 年 9 月 23 日）

[48] 小林研介、「メゾスコピック系における非平衡ゆらぎ」、日本物理学会北海道支部講演会（北海道大学、2020 年 11 月 10 日）

[49] 小林研介、「量子液体における三体相関の実験的検出」、シンポジウム「近藤効果研究の新展開 – 現代の近藤効果 –」、日本物理学会 第 76 回年次大会（オンライン、2021 年 3 月 12–15 日）

(セミナー)

[50] 佐々木健人、「ダイヤモンド中窒素空孔中心による交流信号/核スピンの検出」、東京工業大学波多野・岩崎研究室セミナー（オンライン、2020 年 11 月 6 日）

(プレスリリース)

[51] 「原子層超伝導体に振動外場を加えて負の抵抗が実現！」（大阪大学、東京大学大学院理学系研究科／附属知の物理学研究センター、2020 年 8 月 22 日）

(アウトリーチ)

[52] 小林研介、「研究をするということ」、洛星高校進路講演会（オンライン、2020 年 10 月 31 日）

4.7 中辻・酒井研究室

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

4.7.1 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。

スピン軌道トルクを用いたワイル反強磁性体 Mn_3Sn における磁化反転

ワイル反強磁性体の巨大なベリー曲率効果は強磁性体と同等のスピントロニクス機能の発現を期待させるものの、必ずしも自明ではない。そこで、反強磁性体を用いた磁気メモリ実現への第一歩として、スピン軌道トルク磁化反転がワイル反強磁性体 Mn_3Sn においても適用可能かの検証実験を行った。具体的には、ワイル反強磁性体 Mn_3Sn と非磁性金属 Pt や W、Cu との多層膜からなるホール抵抗測定用の素子をシリコン基板上に作製し、外部電流によるホール電圧の変化を室温で測定した。その結果、Mn_3Sn と Pt もしくは W を積層させた素子において、非磁性金属層に 10^{10-11} A/m^2 の電流を流すことで Mn_3Sn 層由来のホール電圧が反転可能であることを発見した [5]。

図 4.7.1a のように、(1)Pt と W を用いた素子では外部電流によりホール電圧の反転が起きること、(2)Pt と W を用いた素子では電圧の反転が逆符号であること、(3)Cu を用いた素子では反転が起きないことから、ホール電圧の反転は非磁性金属層で生じたスピン流に由来するものだと分かった。また本素子では、書き込み電流の大きさを変えることで、反転するホール電圧の大きさをアナログ的に制御可能であるが（図 4.7.1b)、これはワイル反強磁性体 Mn_3Sn が多結晶膜であるということに起因している。

本成果は、ノンコリニアな反強磁性秩序を持つ Mn_3Sn における磁気構造の電気的制制御手法を理論的に解

明しかつ実験的に初めて可能にした所に大きな意義がある。また今回観測した異常ホール効果の反転は、ワイル点対の反転にも対応しており、ワイル反強磁性状態・ワイル点の電気的制御に成功したと言い換えることもできる (図 4.7.1c)。トポロジカルな電子構造の電気的制御が必要となる次世代デバイス開発において、極めて重要な発見である。

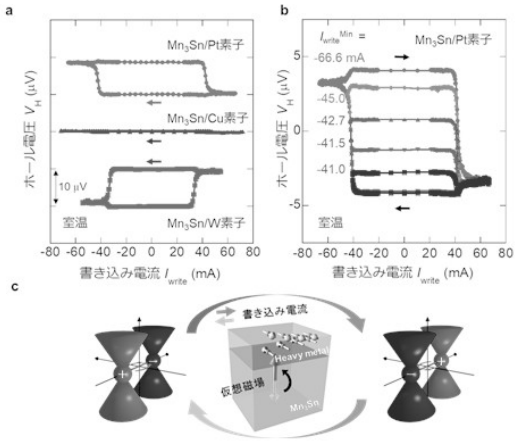


図 4.7.1: a. Mn_3Sn と Pt、Cu、W との積層膜を用いたホール素子における、ホール電圧の書き込み電流依存性。b. 多値記憶の実証実験。書き込み電流の下限 $I_{\mathrm{write}}^{\mathrm{Min}}$ を変えることで、ホール電圧が多値化していることが分かる。磁気八極子の向きによる偏光回転角スペクトル。c. Mn_3Sn でのスピン軌道トルク磁化反転の概要図。

トポロジカル反強磁性体における巨大電気特性の全方向性制御

これまでの薄膜を用いたデバイス開発では、形状磁気異方性が常に課題となっていた。本研究では、ワイル反強磁性体 Mn_3Sn において、形状磁気異方性の影響を受けずに、全方向へ指向可能な巨大磁気応答を得られるという特性を見出した [1]。また開発に有用な新たな多値記憶機能の実証や、外部磁場擾乱に強くデバイス形状の自由度が高い異常ネルンスト熱流センサーの開発に成功した。

カイラル反強磁性体 $\mathbf{Mn_3}X$ $(X = \mathbf{Sn, Ge})$ におけるワイルフェルミオンの検証

本研究ではこれまで報告していた Mn_3X 系の巨大異常ホール効果および異常ネルンスト効果の結果に最新の研究結果を新たに加え、包括的なワイルフェルミオンの物理を確立した [2]。特に、Mn_3Ge は 0.3 K までカイラル磁気秩序状態を保つため、磁気揺らぎが抑えられた十分低温の領域においてワイルフェルミオンに由来する物理を研究することが可能である。Mn_3Ge におけるカイラル異常や Mn_3Sn におけるプラナーホール効果等の磁気輸送特性の発見はこれらの物質中でワイルフェルミオンが存在することを示している。

$\mathbf{Mn_3Sn}$ におけるカイラル反強磁性相の歪チューニング

Mn_3Sn は室温ではカイラル反強磁性相であり、巨大異常ホール効果を伴うワイル磁性体であるが、$T_{\mathrm{N}} \sim 270$ K 以下のスパイラル相ではこれらのトポロジカル輸送特性は消失する。この転移温度が調節できればトポロジカル状態の機構解明、制御に役立つと考えらえる。本研究ではマックスプランク研究所の C. Hicks グループと共同で一軸応力下で熱膨張を測定する手法を開発し、それにより Mn_3Sn の磁性相の制御を行い、T_{N} を 50 K 抑制することに成功した [3]。Mn 置換効果に比べ歪による T_{N} の減少は弱く、格子歪は転移の抑制に大きく寄与しないことが分かった。また本研究で開発された一軸圧装置は中性子回折を始め、様々な実験・物質に適用可能である。

4.7.2 トポロジカル磁性体における巨大横熱電係数

ワイル磁性体やトポロジカル磁性体は波数空間に特徴的なバンド交差を持ち、交差点（線）近傍の巨大ベリー曲率により横方向の熱・電気・光気応答が大きくなる。特に横方向の熱起電力は横熱電係数 α_{yx} はモットの式 $\alpha_{yx} \approx \frac{\pi^2}{3}\frac{k_B^2 T}{|e|}\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial E_{\mathrm{F}}} = \frac{\pi^2}{3}\frac{k_B^2 T}{|e|}\frac{e^2}{h}\sum_{n,\vec{k}}\Omega_{n,z}(\vec{k})\delta(E-\varepsilon_{n,\vec{k}})$, により示される通り、ベリー曲率 $\Omega_{n,z}$ と状態密度を同時に大きくすることで増大する。横熱電係数は異常ネルンスト効果 $S_{yx} = \alpha_{yx}\rho_{yy} - \sigma_{yx}\rho_{yy}S_{xx}$ として物性に現れる。これまでの研究で、ホイスラー強磁性体 Co_2MnGa が通常の強磁性体より 10 倍以上大きな異常ネルンスト効果を室温で示し、その起源としてワイル点の type-I から type-II への量子リフシッツ転移による状態密度の状態が重要であることを明らかにした。この発見は物理的に興味深いだけでなく、応用上も大変重要である。すなわち従来のゼーベック効果を用いた熱電技術が不得手であった薄膜化・フレキシブル化・大面積化に利があり、効率的な熱電変換を可能にするポテンシャルを秘めている。しかし、このような応用研究開発を進めるためにはさらなる物質探索を進めていく必要がある。

東北大学の是常グループと東京大学工学系研究科の有田グループはこれまで困難であった 2 粒子関数を含む、第一原理計算の高速自動化（ハイスループット計算）を可能にする新しいコードを開発し、これ

を用いて約 1400 の強磁性体について α_{yx} の計算を行った。中辻・酒井研究室では、デバイス応用への観点から、安価で地球上にも多く存在する鉄系、かつ作成も容易な 2 元系材料に着目して実験を行うことで、$Fe_3X(X = Ga, Al)$ 系を見出した（図 4.7.2a, 文献 [4]）。室温で過去最大値に匹敵する巨大異常ネルンスト効果を示し、また 100 ℃の高温から-100 ℃の低温まで高い性能を維持する（図 4.7.2b)。さらに、厚さ数十ナノメートルの Fe_3Al, Fe_3Ga の薄膜作製にも成功し、ゼロ磁場で世界最高の異常ネルンスト係数を示すことを示した。第一原理計算との比較から、本研究で発見された巨大な異常ネルンスト効果は、ノーダルウェブ（複数のフラットな分散を持つノーダルラインが交差した構造、図 4.7.2c）というトポロジカルなバンド構造に由来していることが明らかになった。異常ネルンスト効果の増強にはベリー曲率と状態密度を同時に大きくすることが重要であり、ノーダルウェブはまさにそのような条件を満たしている。

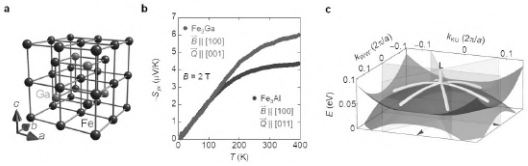


図 4.7.2: Fe_3X $(X = Ga, Al)$ における a. 結晶構造。b. 異常ネルンスト効果の温度依存性。c. ノーダルウェブ構造。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Y.C. Otani, T. Higo “Domain structure and domain wall dynamics in topological chiral antiferromagnets from the viewpoint of magnetic octupole”, Appl. Phys. Lett. **18**, 040501 (2021).

[2] H. Tsai, T. Higo, K. Kondou, S. Sakamoto, A. Kobayashi, T. Matsuo, S. Miwa, Y. Otani, S. Nakatsuji “Large Hall Signal due to Electrical Switching of an Antiferromagnetic Weyl Semimetal State”, Small Sci. 2000025 (2021).

[3] S. Miwa, S. Iihama, T. Nomoto, T. Tomita, T. Higo, M. Ikhlas, S. Sakamoto, Y. Otani, S. Mizukami, R. Arita, S. Nakatsuji, “Giant effective damping of octupole oscillation in an antiferromagnetic Weyl semimetal”, Small Sci. 2000062 (2021).

[4] H. Tsai, T. Higo, K. Kondou, A. Kobayashi, T. Nakano, K. Yakushiji, S. Miwa, Y. Otani, and S. Nakatsuji, “Spin–orbit torque switching of the antiferromagnetic state in polycrystalline Mn3Sn/Cu/heavy metal heterostructures”, AIP Advance **11**, 045110 (2021).

[5] M. Kavai. J. Fridman, K. Sherman, M. Gong, I. Giannakis, S. Hajinazar, H. Hu, S. E. Grefe, J. Leshen, Q. Yang, S. Nakatsuji, A. N. Kolmogorov, Q. Si, M. Lawler, and P. Anynajian, “Inhomogeneous Kondo-lattice in geometrically frustrated Pr2Ir2O7”, Nat. Commun. **12**, 1377 (2021).

[6] T. Higo, Y. Li, K Kondou, D. Qu, M. Ikhlas, R. Uesugi, D. Nishio-Hamane, C. L. Chien, Y. Otani, and S. Nakatsuji, “Omnidirectional Control of Large Electrical Output in a Topological Antiferromagnet”, Adv. Funct. Mater. 2008971 (2021).

[7] T. Chen, T. Tomita, S. Minami, M. Fu, T. Koretsune, M. Kitatani, I. Muhammad, D. Nishio-Hamane, R. Ishii, F. Ishii, R. Arita, and S. Nakatsuji, “Anomalous transport due to Weyl fermions in the chiral antiferromagnets Mn3X, X=Sn, Ge”, Nat. Commun. **12**, 572 (2021).

[8] J. Jatmika, H. Maruyama, M.S. Rahman, A. Sakai, S. Nakatsuji, A. Iyo, T. Ebihara, “Superconducting properties of the ternary boride YRh4B4”, Supercond. Sci. Technol. **33**, 125006 (2020).

[9] S. Kittaka, T. Taniguchi, K. Hattori, S. Nakamura, T. Sakakibara, M. Takigawa, M. Tsujimoto, A. Sakai, Y. Matsumoto, S. Nakatsuji, “Field-Orientation Effect on Ferro-Quadrupole Order in PrTi2Al20”, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 043701 (2020).

[10] M. Ikhlas, K R. Shirer, P-Y Yang, A P. Mackenzie, S. Nakatsuji, and C W. Hicks, “A tunable stress dilatometer and measurement of the thermal expansion under uniaxial stress of Mn3Sn”, Appl. Phys. Lett. **117**, 233502 (2020).

[11] Satoshi Sugimoto, Yoshinobu Nakatani, Yuta Yamane, Muhammad Ikhlas, Kouta Kondou, Motoi Kimata, Takahiro Tomita, Satoru Nakatsuji, and YoshiChika Otani, “Electrical nucleation, displacement, and detection of antiferromagnetic domain walls in the chiral antiferromagnet Mn3Sn”, Commun Phys. **3**, 111 (2020)

[12] Michael E. Valentine, Tomoya Higo, Yusuke Nambu, Dipanjan Chaudhuri, Jiajia Wen, Collin Broholm, Satoru Nakatsuji, and Natalia Drichko, “Impact of the Lattice on Magnetic Properties and Possible Spin Nematicity in the S=1 Triangular Antiferromagnet NiGa2S4”, Phys. Rev. Lett. **125**, 197201 (2020)

[13] Zheng Zhu, Tomoya Higo, Satoru Nakatsuji, and YoshiChika Otani, “Magnetic and transport properties of amorphous, B2, and L21 Co2MnGa thin films”, AIP Advances. **10**, 085020 (2020)

[14] K. Wang, B. Xu, C. W. Rischau, N. bBachar, B. Michon, J. Teyssier, Y. Qiu, T. Ohtsuki, Bing Cheng, N. P. Arimtage, S. Nakatsuji, and D. van der Marel, “Unconventional free charge in the correlated semimetal Nd2Ir2O7”, Nat. Phys. **16**, 1194 (2020)

[15] Liangcai Xu, Xiaokang Li, Linchao Ding, Taishi Chen, Akito Sakai, Benoit Fauque, Satoru Nakatsuji, Zengwei Zhu, and Kamran Behnia, "Anomalous transverse response of Co2MnGa and universality of the room-temperature ratio $\alpha_{ij}^{A}/\sigma_{ij}^{A}$ ratio across topological magnets", Phys. Rev. B. **101**, 1804040 (2020)

[16] T. Ohtsuki, Zhaoming Tian, Akira Endo, Mario Halim, Shingo Katsumoto, Yoshimitsu Kohama, Koichi Kindo, Mikk Lippmaa, and Satoru Nakatsuji, "Sample quality Dependence of the Magnetic Properties in Non-Collinear Antiferromagnet Mn3Sn", JPS. Conf. Proc. **30**, 011177 (2020)

[17] Akito Sakai, Susumu Minami, Takashi Koretsune, Taishi Chen, Tomoya Higo, Yangming Wang, Takuya Nomoto, Motoaki Hirayama, Shinji Miwa, Daisuke Nishio-Hamane, Fumiyuki Ishii, Ryotaro Arita, and Satoru Nakatsuji, "Iron-based binary ferromagnets for transverse thermoelectric conversion", Nature. **581**, 53 (2020)

[18] Hanshen Tsai, Tomoya Higo, Kouta Kondou, Takuya Nomoto, Akito Sakai, Ayuko Kobayashi, Takafumi Nakano, Kay Yakushiji, Ryotaro Arita, Shinji Miwa, Yoshichika Otani, and Satoru Nakatsuji, "Electrical manipulation of a topological antiferromagnetic state", Nature. **580**, 608 (2020)

(国内雑誌)

[19] 酒井明人, "新しい垂直熱電変換技術「磁気熱電効果」とそれを利用した熱電モジュール", 技術情報会「次世代自動車の熱マネジメント」 (2020).

[20] 肥後友也, 大谷義近, "磁気八極子の観点から見たカイラル反強磁性体 Mn3X(X=Sn,Ge) 中の磁区構造と磁壁ダイナミクス ", 固体物理 2020 年 11 月号.

(学位論文)

[21] 上杉 良太, "ワイル強磁性体 Co2MnGa 薄膜における磁気輸送特性及び磁気熱電効果の研究"（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）(2021).

[22] Yangming Wang, "Giant anomalous Nernst effect in iron-based binary ferromagnets"（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）(2021).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[23] N Tang "Multipolar Degree of Freedom and Metamagnetism of the Quantum Spin Ice Candidate Pr2Zr2O7" MMM conference 2020 Online

[24] Mingxuan Fu, "Non-Fermi Liquid Phenomena and Novel Quantum Criticality in the Multipolar Kondo System PrV2Al20" APS March Meeting 2021 Online

[25] A. Sakai, "Giant Anomalous Nernst Effect in Nodal Web Ferromagnets Fe3X (X = Ga, Al)" APS March Meeting 2021 Online

招待講演

[26] S. Nakatsuji, "Electrical manipulation of a topological Weyl antiferromagnet" Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference 2020 (November 2-6, 2020)

[27] Akito Sakai, "Giant Anomalous Nernst Effect in Topological Magnets" MMM2020 Conference online (November 2-6, 2020)

[28] S. Nakatsuji, "Electrical manipulation of a Weyl semimetallic state" APS March Meeting 2021 Online (March 15, 2021)

[29] T. Higo, "Large magneto-optical effect in the topological chiral antiferromagnet Mn3Sn" APS March Meeting 2021 Online (March 15, 2021).

(国内会議)

一般講演

[30] LI Qifang, "Monte Carlo Simulation of Magnetic Behaviors of Ferromagnet with Long-range Interaction" 第 81 回応用物理学会 秋季学術講演会 Online 2020/9/11

[31] 上杉 良太, " ワイル強磁性体 Co2MnGa 薄膜の面内/面直熱流下での異常ネルンスト効果 " 第 81 回応用物理学会 秋季学術講演会 Online 2020/9/8

[32] Yangming Wang, " Topologically enhanced anomalous Nernst effect in Fe3Ga1-xAlx and Fe3Al1-xSix " 第 81 回応用物理学会 秋季学術講演会 Online 2020/9/8

[33] Mayukh Kumar Ray " Room temperature large anomalous Nernst effect in ferromagnetic Fe3Ge " 2020 年日本物理学会秋季大会 Online 2020/9/8

[34] 酒井明人, "Fe_3X (X = Ga, Al) における室温巨大異常ネルンスト効果 " 2020 年日本物理学会秋季大会 オンライン 2020/9/8

[35] 見波 将, " Fe3X(X=Ga, Al) における異常ネルンスト効果の第一原理計算 " 2020 年日本物理学会秋季大会 オンライン 2020/9/8

[36] Tsai Hanshen, " Spin-orbit torque switching in a topological antiferromagnet Mn3Sn at room temperature " 第 81 回応用物理学会 秋季学術講演会 Online 2020/9/8

[37] Wang Cong, " Synthesis and characterization of the canted antiferromagnetic " 2020 年日本物理学会秋季大会 Online 2020/9/10

[38] Hiroto Nakamura, " Investigation of topological state from thermal transport phenomena and first-principles calculation in CoMnSb " 2020 年日本物理学会秋季大会 Online 2020/9/10

[39] Nan Tang, " Metamagnetism and multipole degrees of freedom of quantum spin ice Pr2Zr2O7 " 2020 年日本物理学会秋季大会 Online 2020/9/10

[40] Tomoya Higo, “Electrical manipulation of an anomalous Hall effect in the Weyl antiferromagnet Mn3Sn” ” 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会 Online 2020/9/10

[41] Isomae Takachika, “ The study of switching of the multipolar order parameters in PrTi2Al20 investigated by electric transport measurements under the magnetic field ” 2020 年日本物理学会秋季大会 Online 2020/9/11

[42] Zili Feng, “ Anomalous Nernst Effect in Dope Fe3Ga ” 2020 年日本物理学会秋季大会 Online 2020/9/11

[43] Muhammad Ikhlas, “ Measurement of the thermal expansion of non-collinear antiferromagnet Mn3Sn under uniaxial stress using a new stress-dilatometer ” 2020 年日本物理学会秋季大会 Online 2020/9/11

[44] Mingxuan Fu, “ Evidence for the quadrupolar Kondo effect in the heavy fermion superconductor PrV2Al20 ” 2020 年日本物理学会秋季大会 Online 2020/9/11

[45] Takahiro Tomita, “ Charateristics and Evaluation of Thermoelectric Module using Anomalous Nernst Effect” , 2020 年日本物理学会秋季大会 Online 2020/9/10

招待講演

[46] 中辻知, “量子効果で実現した巨大磁気熱電効果” 2020 年度日本冷凍空調学会 年次大会 (9 月 11 日 Zoom-C)

[47] Tomoya Higo, “Large spontaneous response and its manipulation in non-collinear and non-coplanar antiferromagnets” 2020 年日本物理学会秋季大会 Online 2020/9/9

[48] Tomoya Higo, “Large time-reversal-odd responses in the Weyl antiferromagnet Mn_3Sn bulk & thin film” The Magnetic Society of Japan, 76th Technical Meeting for Spintronics Online 2020/9/25

[49] 肥後友也, “トポロジーが可能にする磁性体の革新的電子機能” 東京大学国際オープンイノベーションシンポジウム「トポロジカル磁性体が発現する新奇な物理とスマートデバイス」 AP 東京丸の内 2021/3/15

[50] 酒井明人, “巨大磁気熱電効果：カーボンニュートラルへ向けた新たな可能性” 東京大学国際オープンイノベーションシンポジウム「トポロジカル磁性体が発現する新奇な物理とスマートデバイス」 AP 東京丸の内 2021/3/15

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

重力波伝搬の波動効果を用いた小スケールダークマター分布探査の新手法

重力波が宇宙の非一様な密度場の中を伝搬する際にフレネルスケール (1 Hz の重力波でおよそ 1 pc) でのダークマター分布のゆらぎによって重力波の振幅と位相が周波数する摂動を受けることを示した。またダークマターの小スケール分布を解析モデルを用いて調べ、非常に小質量のダークマターハローの存在量や太陽質量程度の原始ブラックホールをこの手法により厳しく制限できうることを示した。[41]

銀河団外縁半径の検出と銀河団選択効果の調査

すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam サーベイの銀河団サンプルを使うことで、初めて $z = 1$ の遠方まで銀河団の外縁半径 (splashback 半径) を検出することができた。これまでの研究では、検出された外縁半径が理論期待よりも小さい観測結果が得られていたが、今回の研究ではそのような理論との違いは見られなかった。模擬銀河カタログを用いた詳細な調査により、従来の研究で得られていた小さな外縁半径は redMaPPer アルゴリズムを用いた可視銀河団サンプル構築の選択効果に起因することを突き止めた。[18]

すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam サーベイにおける強い重力レンズ探査

独自のアルゴリズムと目視を組み合わせることで Hyper Suprime-Cam サーベイから銀河スケールから銀河団スケールに渡って多数の強い重力レンズを発見した。[7, 3, 33, 48] また市民の協力を仰ぐ市民プロジェクトによってもさらに多くの重力レンズが発見され、その有用性を示した。[43]

遠方銀河計数による原始パワースペクトルの制限

原始パワースペクトルが単純な冪則からずれた場合、ダークマターハローの数が影響を受け、期待される遠方銀河の観測数も変化する。この効果を用いて、Hubble Frontier Field 銀河計数の観測から初めて原始パワースペクトルの制限を得た。現在の観測により $k \sim 10 - 10^3$ Mpc^{-1} のスケールの原始パワースペクトルを制限できることを示した。[42]

機械学習を用いた輝線強度マップからの情報分離

次世代望遠鏡による輝線強度マッピング観測では、銀河などからの輝線放射の空間的なゆらぎを捉えることで宇宙大規模構造を探る。我々は、この観測に

おいて問題となる輝線の混在問題を解決するために畳み込みニューラルネットワークを用いた手法を提案した。宇宙論シミュレーションを用いて生成した模擬観測マップを用いて学習を行なったところ、複数の輝線シグナルや観測ノイズを適切に分離でき、パワースペクトルなどの統計量も再現できることがわかった。[16, 47]

深層学習を用いた重力レンズマップのノイズ除去

重力レンズ効果によって背景銀河の形は歪んで観測される。弱重力レンズ効果による収束場や歪み場を解析することで宇宙の物質分布が得られ、宇宙論パラメータやダークマター分布を知る上で有用な情報となる。しかし、元々の背景銀河の歪みと重力レンズ効果による歪みを区別する必要がある。そこで、条件付き敵対的生成モデル (cGAN) と呼ばれる画像認識をする深層学習モデルを用いて、弱重力レンズ効果による歪みを取り出す試みが行われた。それの再現を行うとともに、より精度の向上を目指し、cGAN 内のパラメータ依存性や CycleGAN と呼ばれる他の深層学習モデルを試した。

Fuzzy Dark Matter ハローのパワースペクトル

Fuzzy Dark Matter (FDM) は質量が 10^{-22}eV 程度のスカラー粒子で、ダークマターの１つの候補とされている。これは小スケール問題を解決する可能性があり近年注目されている。FDM モデルによる構造形成シミュレーションによると、ドブロイ波長程度の大きさの多数の粒状の構造ができることが分かっている。そこで我々は、この粒状の構造体を考慮した FDM ハローのモデルを構築し、密度ゆらぎによるパワースペクトルを計算した。パワースペクトルは FDM の質量に大きく応答するので、観測データとの比較により FDM の質量に有意な制限がかけられる可能性が示唆されている。

5.1.2 ニュートリノ

残存ニュートリノの大域的分布

無衝突ボルツマン方程式を直接積分し、宇宙の残存ニュートリノの６次元相空間内での分布を再現し、物質分布パワースペクトルにおよぼす影響を定量的に調べた。ニュートリノの非線型クラスタリングの強度を明らかにし、局所的な物質密度とニュートリノ密度を求め、ニュートリノエネルギー分布の実効的温度の空間揺らぎを明らかにした。計 3 世代のニュートリノ粒子の総質量を 0-0.4 電子ボルトの範囲で変えたシミュレーションを実行し、物質分布パワースペクトルの減衰効果を正確に求めた [45]。

5.1.3 星・ブラックホール形成

視線速度法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。その結果、視線速度の短周期変動、あるいは軌道傾斜角の歳差運動・古在機構に伴う視線速度の長周期変動を通じての探査が有効であることがわかった。[23, 99]

パルサータイミングを用いた連星ブラックホール探査

視線速度法の場合、連星ブラックホールの探査可能距離が強く制限される。本研究では、パルサーを含む三体系を考え、より遠方まで観測が可能なパルサータイミング法を用いた探査法の提案・検証を行なった。その結果、摂動による短周期遅れに加え、シャピロ遅れの検出が可能な場合、縮退ない軌道決定が可能であることがわかった。また、高精度パルサータイミング法について、将来の衛星重力波検出器との相補性が示唆された。[49, 110]

5.1.4 円盤進化と系外惑星

原始惑星系円盤光蒸発の中心星質量依存性

原始惑星系円盤は数 Myr の寿命で消失し、円盤寿命は中心星質量依存性を持つことが観測から示唆されている。星の光度は星質量に依存することから光蒸発に着目し、中心星質量をパラメータとして光蒸発の輻射流体計算を行った。その結果、光蒸発による質量損失は中心星質量の 2 乗に比例して増加することを明らかにした [57]。

原始惑星系円盤での惑星進化

惑星は原始惑星系円盤と呼ばれる中心星周囲のガス円盤で生まれ、周囲のガス円盤と相互作用しながらその質量、軌道長半径を変えていく。円盤内の惑星進化は最終的にどのような惑星系ができるのかを決定する重要な過程である。先行研究では浅いギャップをもつ２つの惑星が軌道進化する場合、一方の惑星が立てる密度波が他方の惑星の軌道進化に影響を与えると可能性が指摘されていた。そこで、数値流体シミュレーションを用いて海王星サイズの浅いギャップを持つ２つの惑星の軌道進化を調べた。その結果、一方の惑星の密度波が他方の惑星の軌道進化に与える影響をわずかであり、２惑星の場合も我々が１惑星の場合に求めた軌道速度が使えることが分かった [11]。

また、惑星の内側移動が早い場合、惑星が作るギャップの最も深い部分（ギャップ中心）と惑星位置にはずれが生じる。流体シミュレーションで様々な惑星質量、円盤パラメータでのずれを計測し、その経験式を求めた [4, 74, 93, 97]。このようなギャップ中心と惑星位置のずれが観測された場合、それは外側から惑星が高速で内側に移動している観測的証拠である。TW Hya 円盤でこのような惑星とギャップ中心のずれを示唆する観測結果が報告されており、議論を進めている。

円盤進化を考慮した惑星系の長時間進化

ALMA によって惑星起源だと思われるギャップやリングを持った原始惑星系円盤が多数観測されている [15, 56, 93, 107]。円盤ギャップ構造から示唆される惑星質量、惑星位置を初期条件に惑星と周囲のガス円盤との相互作用および円盤進化を考慮した重力多体シミュレーションを行うことで、どのようなどのような惑星系が形成可能か調べることが本研究の目的である [95]。本年度は、ギャップ幅の同定および惑星質量の見積もりを 35 個の原始惑星系円盤の 55 のギャップについて行い、重力多体シミュレーションの初期条件を決定した。来年度は重力多体計算を行い、惑星系の力学的安定性や惑星質量分布、我々の先行研究で得られた HL Tau 円盤の場合との違いを議論する予定である。

ホットジュピターの惑星大気散逸における恒星風の影響

主星から近くに位置する惑星は主星からの強い UV 輻射によって大気が加熱され、散逸することが知られている。散逸した大気は真空に放出されるわけではなく主星からの恒星風にぶつかる。恒星風が強い場合は散逸大気が押し込まれることで散逸率やトランジット半径が小さくなる。UV 輻射輸送を取り入れた 2 次元流体シミュレーションを行い、これらに対する恒星風の影響を調べた。散逸率は恒星風にほぼ依存しない一方でトランジット半径は強く依存することがわかった。また、恒星風が太陽の 1000 倍程度になると UV 加熱によって散逸が駆動される領域まで押し込まれることで大気散逸率がちいさくなる。[76, 112]

5.1.5 銀河の化学進化

我々の周りにはたくさんの元素がある。ビッグバンでは重い原子核を作ることができない。ではどこで作られたのか？ 鉄より重い元素では、中性子捕獲過程が重要であることが知られている。中性子捕獲過程には s 過程と r 過程があり、s 過程は中小質量星が主な起源だとわかっているが、r 過程の起源は定まっていない。

超低光度矮小銀河

超低光度矮小銀河 (UFD) は星年齢が古く、宇宙誕生から 10 億年程度の宇宙の元素組成を調べるのに有効である。宇宙論的銀河形成シミュレーションを用いて UFD の r 過程及び s 過程元素合成をモデリングした。r 過程元素を多く含む UFD について、中性子星連星合体などの r 過程元素生成イベントがあれば r 過程元素の分布を説明できることがわかった [13]。r 過程元素が観測されない UFD について、バリウムやストロンチウムなど s 過程元素の量は中小質量星からの寄与のみでは説明できず、回転星などの寄与が重要であることが明らかとなった [40]。

天体への応用

天の川にある金属量の低い星を見ると、r 過程元素量は金属量とともに 増加することがわかった。ここから、r 過程元素は星形成から遅れて起きることが示唆される。中性子星連星合体が有力となった [50]。初代星の性質が観測量に与える影響を調べるため、準解析的モデルシミュレーションコードを作成している [25]。現在パラメーターの較正中である。

5.1.6 高エネルギー天体現象の研究

ブラックホールや白色矮星、中性子星など、恒星がその一生を終えた後に形成されるコンパクト天体は、超新星爆発やガンマ線バーストなどの高エネルギー天体現象を起こす。これらは極限的環境における物理過程を探る実験室であり、かつ宇宙進化の様々な局面で重要な役割を果たす。我々は最新の観測によって発見された高エネルギー天体現象のメカニズムを解明し、次世代観測を駆動する理論予言を与えるべく研究に取り組んでいる。

コンパクト天体形成と突発天体

大質量星の重力崩壊で形成されるコンパクト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 [24]。特に、大質量星の重力崩壊に伴って形成されるブラックホールに着目。青色巨星やウォルフライエ星などのブラックホールの親星が重力崩壊の数年前に放出した外層と、ブラックホール形成時に放出されるエジェクタの衝突からの電磁波放射を計算、その性質が近年の広視野可視光突発天体サーベイで検出されている Intermediate Luminosity Red Transient(ILRT) と呼ばれる天体と一致することを示した。

ブラックホールによる白色矮星の潮汐破壊現象

ブラックホール近傍を星が通過すると、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として、破壊・圧縮される白色矮星が核爆発を起こしうる点がある。この際にはIa型超新星爆発に似た現象として観測される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。特に白色矮星の質量をパラメータとして変化させることで観測兆候の多様性を明らかにした。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し、その発生頻度を元に示唆される中間質量ブラックホールの個数密度を求めた。

＜受賞＞

[1] 日影千秋 (須藤研出身)incl. 大栗真宗, 欧文研究報告論文賞, 日本天文学会, 2021 年 3 月 18 日

[2] 金川和弘, 欧文研究報告論文賞, 日本天文学会, 2021 年 3 月 18 日

＜報文＞

(原著論文)

[3] Jaelani A. T., *et al.* (incl. Oguri M.), 2020, MNRAS, **494**, 3156

[4] Kanagawa K. D., Nomura H., Tsukagoshi T., Muto T., Kawabe R., 2020, ApJ, **892**, 83

[5] Kikuchihara S., *et al.* (incl. Oguri M.), 2020, ApJ, **893**, 60

[6] Jaelani A. T., More A., Oguri M., *et al.*, 2020, MNRAS, **495**, 1291

[7] Chan J. H. H., *et al.* (incl. Oguri M.), 2020, A&A, **636**, A87

[8] Chiu I.-N., *et al.* (incl. Oguri M.), 2020, MNRAS, **495**, 428

[9] Tampo, Y., Tanaka, M., Maeda, K., *et al.* (incl. Kawana K.) 2020, ApJ, **894**, 27

[10] Bakx T., *et al.* (incl. Yoshida N.), 2020, MN, **493**, 4294

[11] Kanagawa K. D., Szuszkiewicz E., 2020, ApJ, **894**, 59

[12] Steinhardt C. L., *et al.* (incl. Oguri M.), 2020, ApJ, **894**, 125

[13] Tarumi Y., Yoshida N., and Inoue S., 2020, MNRAS. **494**, 120

[14] Shirasaki M., Macias O., Ando S., Horiuchi S., Yoshida N., 2020, ApJ, **101**, 3022

[15] Jiaqing Bi *et al.* (incl. Kanagawa K. D.), 2020, ApJL, **895**, L18

[16] Moriwaki K., *et al.*, 2020, MNRAS, **496**, L54

[17] Akahori T., *et al.* (incl. Oguri M.), 2020, PASJ, **72**, 62

[18] Murata R., Sunayama T., Oguri M., *et al.*, 2020, PASJ, **72**, 64

[19] Sunayama T., *et al.* (incl. Oguri M.), 2020, MNRAS, **496**, 4468

[20] Harikane Y., *et al.* (incl. Moriwaki K.), 2020, ApJ, **896**, 93

[21] Whalen D. J., Mezcua M, Meiksin A., Hartwig T., Latif, M. A., 2020, ApJ, **896**, 45

[22] Okabe T., Oguri M., Peirani S., Suto Y., Dubois Y., Pichon C., Kitayama T., Sasaki S. and Nishimichi T., 2020, MNRAS, **496**, 2591

[23] Hayashi T. and Suto Y., 2020, ApJ, **897**, 29

[24] Tsuna D., Ishii A., Kuriyama N., Kashiyama K., Shigeyama T., The Astrophysical Journal Letters, **897**, 2, id.L44

[25] Tarumi Y., Hartwig T., Magg M., 2020, ApJ, **897**, 58

[26] Fukushima H., Hosokawa T., Chiaki G., Omukai K., Yoshida N., Kuiper R., 2020, MN, **497**, 829

[27] Acebron A., *et al.* (incl. Oguri M.), 2020, ApJ, **898**, 6

[28] Chen M. C., *et al.* (incl. Oguri M.), 2020, ApJ, **898**, 81

[29] Nakagawa Y., Kodama T., Ishiwatari M., Kawahara H., Suto Y., Takahashi Y.O., Hashimoto G.L., Kuramoto K., Nakajima K., Takehiro S. and Hayashi Y., 2020, ApJ, **898**, 95

[30] Seto N., Kashiyama K., 2020, International Journal of Astrobiology, **19**, 4, pp. 308-313

[31] KAGRA Collaboration(incl. Kashiyama K.), Progress of Theoretical and Experimental Physics, ptaa120,

[32] Aizawa M., Suto Y., Oya Y., Ikeda S. and Nakazato T., 2020, ApJ, **899**, 55

[33] Chao D. C.-Y., *et al.* (incl. Oguri M.), 2020, A&A, **640**, 88

[34] Chiu I.-N., Okumura T., Oguri M., *et al.*, 2020, MNRAS, **498**, 2030

[35] Silverman J. *et al.* (incl. Hartwig T.), 2020, ApJ, **899**, 154

[36] Park H., Ahn K., Yoshida N., Hirano S., 2020, ApJ, **900**, 30

[37] Takahashi I., Suzuki N., Yasuda N., Tanaka M., Kimura A., Ueda N., Tominaga N., Yoshida N., 2020, PASJ, **72**, 89

[38] Okabe N., *et al.* (incl. Oguri M.), 2021, MNRAS, **501**, 1701

[39] Inoue S.,Yoshida N.,Yajima H., MN, **498**, 5960

[40] Tarumi Y. *et al.*, 2020, arXiv. 2009.10096

[41] Oguri M., Takahashi R., 2020, ApJ, **901**, 58

[42] Yoshiura S., Oguri M., Takahashi K., Takahashi T., 2020, Phys. Rev. D, **102**, 083515

[43] Sonnenfeld A., *et al.* (incl. Oguri M.), 2020, A&A, **642**, A148

[44] Li X., Oguri M., *et al.*, 2020, ApJS, **251**, 19

[45] Yoshikawa K., Tanaka S., Yoshida N., Saito S., 2020, ApJ, **905**, 159

[46] Rasmussen K. C. *et al.* (incl. Hartwig T.), 2020, ApJ, **905**, 20

[47] Moriwaki K., Shirasaki M., Yoshida N., 2021, ApJL, **906**, L1

[48] Jaelani A. T., *et al.* (incl. Oguri M.), 2021, MNRAS, **502**, 1487

[49] Hayashi T. and Suto Y., 2021, ApJ, **907**, 48

[50] Tarumi Y., Hotokezaka K., and Beniamini P., 2021, arXiv. 2102.03368

[51] Hilton M., *et al.* (incl. Oguri M.), 2021, ApJS, **253**, 3

[52] Park H., Shapiro P., Ahn K., Yoshida N., Hirano S., 2020, ApJ, **908**, 96

[53] Pierel J. D. R., *et al.* (incl. Oguri M.), 2021, ApJ, **908**, 190

[54] Ghirardini V., *et al.* (incl. Oguri M.), 2021, A&A, **647**, A4

[55] Moriya, T. J., Jiang, J., Yasuda, N., *et al.* (incl. Kawana K.), 2021, ApJ, **908**, 249

[56] Kanagawa K. D. *et al.*, 2021, ApJ, **909**, 212

[57] Komaki A., Nakatani R., Yoshida N., ApJ, **910**, 51

(会議抄録)

[58] Kohno K. *et al.* (incl. Moriwaki K., Yoshida N.), 2020, SPIE Conference Series, 11453, p114530N

(国内雑誌)

[59] 須藤 靖, “注文の多い雑文 その五十: コロナ後の世界へ向けて”, 東京大学出版会 UP **572**(2020)6 月号, pp.13–19.

[60] 須藤 靖, “天文学と物理学”, 大学の物理教育 **26**(2020) pp.55–58.

[61] 須藤 靖, “注文の多い雑文 その五十一:中国と三体世界”, 東京大学出版会 UP **575**(2020)9 月号, pp.25–34.

[62] 須藤 靖, 小柴さん追悼 “ノーベル賞受賞でＮＨＫリポーターを絶句させた小柴先生のひとこと”, 週刊エコノミストオンライン、2020 年 11 月 15 日

[63] 須藤 靖, “向陽の空ノムコウ”, 筆山の麓 土佐中高 100 年人物伝 (高知新聞出版、2020 年 10 月), pp.283–285

[64] 須藤 靖, “注文の多い雑文 その五十ニ: 日本学術会議のカイラリティー”, 東京大学出版会 UP **578**(2020)12 月号, pp.11–17.

[65] 樫山和己：” 突発天体とコンパクト天体形成の最前線へ”, 天文月報 2020 年 12 月号

[66] 須藤 靖, “注文の多い雑文 その五十三: 基礎科学とヘッジファンド”, 東京大学出版会 UP **581**(2021)3 月号, pp.32–39.

[67] 大栗真宗, “特集：宇宙論にほころび”, 日経サイエンス, 2021 年 4 月号

(学位論文)

[68] Kojiro Kawana: “Observational signatures from tidal disruption events of white dwarfs” (博士論文)

[69] Conor Omand: “Multiwavelength Signals From Pulsar-Driven Supernovae” (博士論文)

[70] Yuting Lu: “Measuring stellar rotation periods and stellar inclinations of kepler solar-type stars” (修士論文)

(著書)

[71] 須藤 靖, “ものの大きさ – 自然の階層・宇宙の階層 – (第 2 版)”, 東京大学出版会 (2021 年 2 月刊行、224 ページ)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[72] Yoshida N., “Spiral Arm Instability in Primordial Protostellar Disks”, UT Joint Workshop on Protoplanetary Disks and Planets, Online(May 5, 2020)

[73] Komaki A., Nakatani R., Yoshida N., ”Photoevaporation from Protoplanetary Disk(Hydrodynamical simulation): Dependence on Central Star Spectrum”, UT Joint Workshop on Protoplanetary Disks and Planets, Online(May 5, 2020)

[74] Kazuhiro D, Kanagawa, ”A fast inward migration of a planet within a protoplanetary disk: Observational signatures from gas morphology”, Exoplanet III, Online(July 20, 2020)

[75] Kana Moriwaki, ”Component extraction from line intensity maps with conditional GAN”, RESCEU Summer School, Online(August 17, 2020)

[76] Mitani H.,”Stellar wind effect on the atmospheric escape of hot Jupiters”, AGU Fall Meeting, Online(December 8, 2020)

[77] Kana Moriwaki, ”[OIII] line emitters as a probe of galaxy-21 cm cross-correlation signals from the early stage of reionization”, SAZERAC The 21-cm Signal from Cosmic Dawn and the Epoch of Reionization, Online(January 29, 2021)

[78] Oguri M., “Summary”, Time-domain Cosmology with strong gravitational lensing, Online (January 25–February 2, 2021)

[79] Kazumi Kashiyama, ”Can repeating fast radio bursts still be rotation powered?”, YITP International Molecule-type Workshop : Fast Radio Bursts: A Mystery Being Solved?, Online(February 8–19,2021)

[80] Oguri M., “Wide Imaging with Subaru HSC of the Euclid Sky (WISHES)”, Subaru Users Meeting FY2020, Online (March 3–5, 2021)

招待講演

[81] Yoshida N., "Zooming in onto the origin of heavy elements", First Light Reunion, Online(May 29, 2020)

[82] Suto, Y., "Unveiling spin-orbit architectures of exoplanetary systems", Astronomy Colloquium, Shanghai Jiao Tong University (September 28, 2020)

[83] Hartwig T., "The First Stars", SAZERAC, Online (October 22, 2020)

[84] Suto, Y., "Unveiling the presence of an inner binary black-hole from the tertiary orbiting star", The 9th KIAS workshop on Cosmology and Structure Formation, Korean Institute of Advanced Study (November 2, 2020)

[85] Yoshida N., "Distribution of the Cosmic Relic Neutrinos", KIAS Cosmology Conference, Online(November 5, 2020)

[86] Kana Moriwaki, "Deep learning application for line intensity mapping", The 9th KIAS Workshop on Cosmology and Structure Formation, Seoul(November 3, 2020)

[87] Kazumi Kashiyama, "Fast Radio Bursts and their possible counterparts", Probing the Extragalactic Universe with High Energy and Very High Energy Sources, Online(December7–10, 2020)

[88] Kazumi Kashiyama, "Fast Radio Bursts: A Mystery Being Solved?", Connecting high-energy astroparticle physics for origins of cosmic rays and future perspectives, Online(December9–11, 2020)

[89] Yoshida N., "Statistical Computational Cosmology with Big Astronomical Data", ERCIM Symposium on Data Science, Online(February 19, 2021)

[90] Yoshida N., "The First Generation of Stars and Blackholes in the Universe", Higgs Colloquium, University of Edinburgh, Edinburgh(February 26, 2021)

[91] Yoshida N., "Cosmic Relic Neutrinos and Large-Scale Structure: Nonlinear Clustering and the Neutrino Mass", CfA Colloquium, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge(March 5, 2021)

[92] Oguri M., "Introduction to WISHES", UNIONS Collaboration Meeting 2021, Online (March 9–10, 2021)

(国内会議)

一般講演

[93] Kazuhiro D. Kanagawa, Jun Hashimoto, Takayuki Muto, "Structure of Protoplanetary disk around WW Chameleon", JpGU meeting 2020, オンライン (2020 年 7 月 15 日)

[94] Kazuhiro Kanagawa, Hideko Nomura, Takashi Tsukagoshi, Takayuki Muto, Ryohei Kawabe, "Model of a gap formed by a planet with fast inward migration", JpGU meeting 2020, オンライン (2020 年 7 月 16 日)

[95] Shijie Wang, " Evolution of the multiplanetary systems deduced from six ALMA disks", RESCEU Summer School, オンライン (2020 年 8 月 17 日)

[96] Tilman Hartwig, "Public Release of A-SLOTH: Ancient Stars and Local Observables by Tracing Haloes", 日本天文学会 2020 年秋季年会, オンライン (2020 年 9 月 8 日–10 日)

[97] 金川和弘, 野村英子, 塚越崇, 武藤恭之, 川邊良平, "惑星移動がギャップ構造に及ぼす影響", 日本天文学会 2020 年秋季年会, オンライン (2020 年 9 月 8 日–10 日)

[98] 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 2020 年秋季年会, オンライン (2020 年 9/8 日–10 日)

[99] 林利憲, 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 II", 日本天文学会 2020 年秋季年会, オンライン (2020 年 9 月 8 日–10 日)

[100] 森脇可奈, "GAN を用いた輝線強度マップのシグナル分離", 日本天文学会 2020 年秋季年会, オンライン (2020 年 9 月 8 日–10 日)

[101] 駒木彩乃, 仲谷崚平, 吉田直紀, "原始惑星系円盤光蒸発の輻射流体計算:中心星質量・光度依存性", 日本天文学会 2020 年秋季年会, オンライン (2020 年 9 月 8 日–10 日)

[102] 大栗真宗, "北天撮像サーベイ WISHES と Euclid 衛星計画への参加", 2020 年度光赤天連シンポジウム, オンライン (2020 年 9 月 14 日–17 日)

[103] 森脇可奈, "深層学習を用いた広領域輝線マッピングデータの新しい解析手法", 第 9 回観測的宇宙論ワークショップ, オンライン (2020 年 11 月 12 日)

[104] 川名 好史朗, "白色矮星の潮汐破壊現象からの観測兆候", 第 33 回 理論懇シンポジウム, オンライン (2020 年 12 月 23 日–25 日)

[105] 樫山和己, Conor Omand, 村瀬孔大, 浅野勝晃, "Synchrotron Boilers in Embryonic Neutron-Star Wind Nebulae", 日本天文学会 2021 年春季年会, オンライン (2021 年 3 月 16 日–19 日)

[106] 高棹真介, 樫山和己, "Magnetically Arrested Disk の発現条件に関する理論研究", 日本天文学会 2021 年春季年会, オンライン (2021 年 3 月 16 日–19 日)

[107] 金川和弘 *et al.*, "WW Cha に付随する原始惑星系円盤の ALMA 観測", 日本天文学会 2021 年春季年会, オンライン (2021 年 3 月 16 日–19 日)

[108] 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と、中間質量ブラックホールへの制限", 日本天文学会 2021 年春季年会, オンライン (2021 年 3 月 16 日–19 日)

[109] 津名大地, 樫山和己, 茂山俊和, "星周物質との衝突で光る超新星のスペクトルエネルギー分布", 日本天文学会 2021 年春季年会, オンライン (2021 年 3 月 16 日–19 日)

[110] 林利憲, 須藤靖, “パルサータイミング法を用いた長周期連星ブラックホール探査の提案”, 日本天文学会 2021 年春季年会, オンライン (2021 年 3 月 16 日–19 日)

[111] 森脇可奈, ”cGAN を用いた輝線強度マップからのシグナル抽出”, 日本天文学会 2021 年春季年会, オンライン (2021 年 3 月 16 日–19 日)

[112] 三谷 啓人, 仲谷 崚平, 吉田 直紀, ”ホットジュピターの大気蒸発過程における恒星風の影響”, 日本天文学会 2021 年春季年会, オンライン (2021 年 3 月 16 日–19 日)

[113] Yici Zhong, 樫山和己, 茂山俊和, 高棹真介, ”How much SNR fallback can invade newborn pulsar wind and magnetosphere?”, 日本天文学会 2021 年春季年会, オンライン (2021 年 3 月 16 日–19 日)

[114] 駒木彩乃, 仲谷崚平, 吉田直紀, “原始惑星系円盤光蒸発の輻射流体計算:円盤の熱化学進化”, 日本天文学会 2021 年春季年会, オンライン (2021 年 3 月 16 日–19 日)

招待講演

[115] 大栗真宗, “物理的宇宙論と重力レンズ”, 日本物理学会 2020 年秋季年会, オンライン (2020 年 9 月 14 日–17 日)

[116] 須藤靖, “宇宙の構造形成と暗黒成分：過去、現在、そして未来”, 日本物理学会秋季年会シンポジウム「観測的宇宙論の進展」(2020 年 9 月 17 日)

[117] 大栗真宗, “宇宙観測と素粒子物理”, 高エネルギー研究者会議第 4 回勉強会, オンライン (2020 年 9 月 30 日)

[118] 樫山和己, ”X-raying the missing links in compact object astrophysics”, 多波長・時間軸天文学の時代の FORCE〜広帯域 X 線で迫るコンパクト天体の世界〜, オンライン (2021 年 3 月 4–5 日)

[119] 須藤靖, “安全保障と学問の自由に関する天文学会声明と世代間ギャップ”, 日本物理学会第 76 回年次大会 物理と社会 シンポジウム「軍事研究と物理と社会ー研究の自由を考える」(2021 年 3 月 13 日)

(セミナー)

[120] 吉田 直紀, “宇宙の探究”, 東進ゼミナール トップリーダーと学ぶワークショップ, 東京都新宿区 (2020 年 5 月 17 日)

[121] 樫山和己, ”Fast Radio Bursts”, オンライン集中講義：早稲田大学高エネルギー天体物理学研究室, オンライン (2020 年 8 月 23–24 日)

[122] Kazumi Kashiyama, ”Fast Radio Bursts and related phenomena”, High energy astrophysics seminar, Penn State University, Online(August 30, 2020)

[123] Oguri M., “Introduction to weak gravitational lensing”, Lectures at online summer school “Deciphering Dark Matter: From Galaxies to the Universe”, Institut Teknologi Bandung (ITB), Bandung, West Java, Indonesia (September 14–25, 2020)

[124] Oguri M., “Wave effect in weak gravitational lensing of gravitational waves”, Seminar at online seminar series, Gravitational Wave Physics and Astrophysics: Genesis (October 8, 2020)

[125] Suto, Y., “Searching for an inner binary blackhole in a triple system”, Physics Department Colloquium, Kyoto University (October 29, 2020)

[126] 須藤靖, “ビッグバンモデルを正しく理解する”, ひの市民大学 (2020 年 12 月 5 日)

[127] 森脇可奈, ”深層学習を用いた輝線マッピングデータからのシグナル抽出”, つくば宇宙フォーラム, 筑波大学 (2020 年 12 月 9 日)

[128] 吉田 直紀, “宇宙の探究”, 灘高校講演会 立志相伝, オンライン (2020 年 12 月 19 日)

[129] 森脇可奈, ”Signal De-confusion in Line Intensity Map with Deep Learning”, Cosmology X Data Science group, CCA, Flatiron Institute(January 22, 2021)

[130] Suto, Y., “Different cultures, Same Science”, Orientation for new fellows of the Japan Society for Promotion of Science (March 11, 2021)

[131] 吉田 直紀, “スーパーコンピュータと AI で探る宇宙の歴史と進化”, 世田谷区天文講座, 世田谷区立教育センタープラネタリウム (2021 年 3 月 13 日)

[132] 須藤靖, “もう一つの地球が見つかる日”, ヒルズ×金沢大学　宇宙航空人材育成プログラム「宇宙への夢を現実へと紡ぐ」(2021 年 3 月 21 日)

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、量子学習、量子精密操作などに役立てる、という応用科学的なアプローチの相乗効果によって発展させている。

今年度は、村尾美緒教授、添田彬仁助教、日本学術振興会外国人研究員の Jun-Yi Wu 博士、博士課程大

学院生の董青秀雄氏、横島亘氏、および修士課程大学院生の岡本惇志氏、橋本豊氏、松井浩介氏、USTEP 大学院生 (チューリッヒ工科大学大学からの交換留学生) の Anian Altherr 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・匿名性に関する解析、量子学習への応用を進めた。

量子学習：量子テスターによる同一性判定問題

量子テスターとは、量子状態や量子ダイナミクスを古典情報処理を経ずに量子コンピュータで処理することで、量子系の性質を特徴付ける古典情報を出力する高階の量子測定過程であり、量子コンピュータを用いて量子系の性質を効率的に理解することを目指す量子学習の手段である。本研究では量子テスターを用いて、二種類の未知のユニタリ量子ゲートが等しいか異なるかを判定するタスクである同一性判定問題を考察した。半正定値計画問題による数値計算手法と表現論による解析的手法によって、異なると判定しながらも実際は等しいという誤り確率は 0 にすることができること、ユニタリゲートの呼び出し回数を増やしても判定成功確率が変わらない場合があることを示した。[担当：橋本、添田、村尾]

高階量子演算の量子メモリーへの保存と読み出し

あらゆるユニタリ演算を量子メモリーに保存し読み出すようなタスクを考える。No-programming theorem により、このタスクを決定論的に達成するのは不可能であることが知られているが、確率的にであれば達成でき、最適な成功確率とそれを実現するプロトコルが先行研究により明らかとなっている。次の課題として、保存読み出し対象の演算の集合を変更することでどう成功確率が変わるか、という問題が残っていた。本研究では、高階量子演算を保存読み出し対象にしたときについて解析した。まず高階量子演算の保存時には、SWAP という 2 つの量子状態を入れ替える量子変換を高階量子演算に差し込めば良いということを証明した。このことは保存時において、高階量子演算にある量子演算を差し込むための入力ポートと出力ポートとの間でのコミュニケーションは考えなくてよい、ということを意味する。またこの結果により、高階量子演算の保存読み出しという問題を、ある特定の構造をもったユニタリ演算の集合の保存読み出しという問題に落とし込むことが出来た。次に、純粋量子コムという、ユニタリ演算が連なった形の高階量子演算を保存読み出し対象にしたとき、保存時に純粋量子コムを 1 回のみ使う場合には、最適な成功確率はユニタリ演算の時と等しいことを証明した。[担当：横島、添田、村尾]

成功・引分け型の高階量子変換

一般に確率的な高階量子変換を用いたとき、失敗した場合には入力の量子状態が失われる。そのため、入力の量子操作を複数回用いたとしても、確率的な高階量子変換の成功確率を上げることはできない。本研究ではこのような確率的な高階量子変換において、失敗した場合にも入力の量子状態が保存する構造として、成功・引分け型の高階量子変換を提案し、定式化した。特に入力をユニタリ操作とする確率的な高階量子変換があった場合に、入力のユニタリ操作を複数回用いることによって、成功・引分け型にすることが可能であることを証明した。成功・引分け型の高階量子変換では、引分け（失敗）となった場合には入力の量子状態が保存されるため、成功するまで同じ高階量子変換を実行することが可能となり、成功確率が 1 に指数関数的に近づく。また成功・引分け型の高階量子変換では、同一の構造を繰り返すことによって成功確率を上げられるため、比較的単純な量子回路による実現が可能であることが期待される。本研究は、オーストリアの量子光学量子情報研究所所属の Marco Túlio Coelho Quintino 博士との共同研究である。[担当：董、添田、村尾]

量子スイッチの定義の一意性

量子スイッチは高階量子変換の一種であり、2 つのユニタリ操作 U_1 と U_2 が入力として与えられた場合に、これを制御量子ビットの状態に応じて U_2U_1 もしくは U_1U_2 またはそれらの重ね合わせを実行するユニタリ操作に変換する高階量子変換である。量子スイッチのユニタリ操作に対する作用は、異なる順序による実行の重ね合わせを生成するという意味で、物理的に自然な定義になっているが、量子スイッチをユニタリ操作以外へと拡張した場合には、同様の物理的な解釈かならずしも可能ではない。本研究では、量子スイッチのユニタリ操作以外に対する定義を、ユニタリ操作に対する定義から導き、特にそれが一般に使われている定義に一意的に定まることを証明した。具体的には、量子スイッチのユニタリ操作に対する定義以外に、入力に対する線形性と、高階量子変換が物理的に実現可能な必要条件である完全 CP 保存性を仮定し、それらの仮定のもとで量子ス

イッチの定義が一意的に定まることを証明した。本研究は、オーストリアの量子光学量子情報研究所所属の Marco Túlio Coelho Quintino 博士との共同研究である。[担当：董、添田、村尾]

量子通信路判別問題における並列、直列、非因果的順序の各戦略の包含階層性

最小誤り通信路判別問題は、候補となる量子通信路のアンサンブル集合が与えられている状況下で、未知の量子通信路を N 回用いて、候補の通信路のうちのいずれかであるかを判別誤りを最小とする量子測定により判別する量子タスクである。このような判別問題は、量子プロセス推定や作成した量子回路の保証とも関連し、量子情報処理の基盤となる重要なタスクである。先行研究により、通信路が一様分布のユニタリ変換に限られている場合には、通信路を並列で使っても直列で使っても判別成功確率の最大値は変わらないことが知られていたが、より一般的な通信路について知見は十分得られておらず、順序戦略への依存性も特別な状況以外では発見されていなかった。本研究では、量子ビットの一般的な通信路に対して、通信路が $N = 2$ 回使える場合について順序戦略を変えることで判別成功確率の最大値が変わりうるのかを考察した。順序戦略として、並列、直列の各戦略に加えて、非因果的順序と呼ばれる戦略を考察し、2 つの新しい非因果的順序戦略 (セパラブル戦略と一般戦略) を定義して、量子テスターおよび量子プロセスによる定式化を行った。その結果、振幅減衰通信路とビット反転通信路に関して、成功確率が、並列 < 直列 < セパラブル < 一般のような包含階層性を持ちうることを証明した。この証明には半正定置計画法 (Semidefinite Programming) を用いたが、新たなコンピュータ援用証明法を開発することで、不動点丸め誤差による精度の問題を解決し、数値計算によって厳密な証明を与えた。また、ランダムな通信路における成功確率の数値計算によって、包含階層性を持つ量子通信路はジェネリックに存在することを示した。この研究は、本研究は、オーストリアの量子光学量子情報研究所所属の Jessica Bavaresco 氏と同所属の Marco Túlio Coelho Quintino 博士との共同研究である。[担当：村尾]

5.2.2 量子系のダイナミクスの制御

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

より高度な量子情報処理を実現すべく、量子情報処理に用いる量子系を支配するダイナミクスの正確な数理モデルの構築を目標としている。本研究では、量子情報処理系として、実際の開発実験では物質と光の相互作用の利用が前提されている場合が多いため、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を検討した。特に、電磁場の量子化が散乱過程に適した形でなされているため、束縛状態を主に扱う量子情報処理に適する形式に再定式化することを試みた。[担当：添田]

5.2.3 分散型量子情報処理

ノード間にまたがるユニタリ演算のエンタングルメント援用 LOCC による分散実装

エンタングルメントを共有した 2 つのノード間で、LOCC（各ノード内での局所量子操作およびノード間の古典通信）のみを用いて、ノード間にまたがるユニタリ演算を実装することを考えた。ここではエンタングルメントを資源とみなし、必要なエンタングルメント量がなるべく少なくなるような実装を目指した。ユニタリ演算の Choi 状態から必要なエンタングルメント量の下界を求めたのちその下界を実際に達成する実装方法を探すことで、実装のための必要十分なエンタングルメント量を求めることができる。特に、制御ユニタリ演算のうち複数の制御ビットをもつ場合について、単に量子テレポーテーションを適用するよりも、必要なエンタングルメント量が少ない実装方法を発見した。これを量子フーリエ変換や量子位相推定などの量子アルゴリズムに適用することで必要なエンタングルメント量を削減することができた。[担当：松井、Wu、添田、村尾]

線形光学ネットワークにおける二者間で分散共有された多光子状態のエンタングルメント検知

ボソンサンプリングのための線形光学ネットワークにおいて、パウリ測定を用いた多光子状態の相補的性質に注目し、この相補的性質の評価方法に関する理論を確立した。この理論を用いると、線形光学ネットワークにおける多光子状態のとりうる集合全体からなる凸集合の境界を特徴づけることができる。そのため、二者間で分散共有している線形光学ネットワークで生成される多光子状態の二体間エンタングルメントを、その相補的相関を評価することにより直接検知することが可能となった。[担当: Wu、村尾]

二者間エンタングル状態の分散型忠実度推定

二者間で共有されたエンタングル状態に対して、量子状態検証 (quantum state verification) の方法を利用することにより、量子状態の忠実度 (fidelity) の推定を行う分散型プロトコルを提案した。このプロトコルは、計算基底での測定で得られた統計性についての事前知識をもとにして忠実度を求めることができるものであり、量子状態の忠実度についてよりタイトな限界値を与えるものである。[担当: Wu、村尾]

＜報文＞

(原著論文)

[1] J-Y. Wu and M. Murao, Complementary properties of multiphoton quantum states in linear optics networks, New J. Phys. 22 103054 (2020)

[2] J-Y. Wu, Adaptive State Fidelity Estimation for Higher Dimensional Bipartite Entanglement, Entropy, 22, 886 (2020)

[3] Y. Nakata and M. Murao, Generic Entanglement Entropy for Quantum States, Entropy 22, 284 (2020)

[4] Q. Dong, M.T. Quintino, A. Soeda and M. Murao, Success-or-draw: A strategy allowing repeat-until-success in quantum computation, to appear in Phys. Rev. Lett.

(学位論文)

[5] 董青秀雄、"Quantum algorithms for higher-order quantum transformations of universal unitary operations"、博士論文

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[6] W. Yokojima, M. T. Quintino, A. Soeda, and M. Murao, "Consequences of preserving reversibility in quantum superchannels", *Young Researchers Forum on Quantum Information Science 2020*, Hsinchu, Taiwan, Aug. 2020 (talk)

[7] W. Yokojima, M. T. Quintino, A. Soeda, and M. Murao, "Consequences of preserving reversibility in quantum superchannels", *Q-Turn 2020*, online, Nov. 2020 (talk)

[8] W. Yokojima, M. T. Quintino, A. Soeda, and M. Murao, "Consequences of preserving reversibility in quantum superchannels", *The 20th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2020)*, online, Dec. 2020 (talk)

[9] W. Yokojima, M. T. Quintino, A. Soeda, and M. Murao, "Consequences of preserving reversibility in quantum superchannels", *The 24th Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2020)*, online, Feb. 2021 (poster)

[10] Qingxiuxiong Dong, Marco Túlio Quintino, Akihito Soeda, and Mio Murao, "Success-or-draw: A strategy allowing repeat-until-success in quantum computation", *The 24th Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2020)*, online, Jan. 2021 (poster)

[11] Jun-Yi Wu and Mio Murao, "Complementary properties of multiphoton quantum states in linear optics networks", *The 20th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2020)*, online, Dec. 2020 (talk)

[12] Jun-Yi Wu and Mio Murao, "Complementary properties of multiphoton quantum states in linear optics networks", *The 24th Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2020)*, online, Jan. 2021 (poster)

招待講演

[13] Jun-Yi Wu, "Fidelity estimation for multiphoton states in linear optics networks", *Workshop on quantum information science 2020*, Taitung (Taiwan), Aug. 2020

[14] Mio Murao, "Trial and error, finding a path to a quantum physicist/programmer", *Women in Quantum Summit II*, online, Oct. 2020

[15] Mio Murao, "Higher-order quantum operations of blackbox unitaries", *Q-Turn 2020*, online, Nov. 2020

[16] 添田彬仁、「学際領域としての量子情報」、豊田中央研究所東京キャンパス、2020 年 11 月 12 日

(セミナー)

[17] Mio Murao, "Higher order quantum operations of blackbox unitaries", *Quantum Hub Group Meeting*, Nanyang Tech University, Singapore (online), Oct. 2020

[18] Mio Murao, "Controlled quantum operations and combs, and their applications to universal controllization of divisible unitary operations", *HKU-Oxford Joint Meeting*, Hong Kong and Oxford (online) Mar. 2021

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・非平衡開放系の研究、および、量子論・統計力学と情報論・人工知能の融合である。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 1 次元 Hubbard 模型の厳密解

冷却原子気体においては、原子間の非弾性散乱などに起因する散逸が広く存在する。このような散逸が存在する開放量子系のダイナミクスは、ハミルトニアンではなくリュウビリアンと呼ばれる非エルミートな超演算子によって生成される。1 次元 Hubbard 模型などの重要な量子多体系の一部のクラスには Bethe 仮設法による厳密解が知られているが、これはハミルトニアンの対角化問題の解であり平衡系または孤立系にしか適用できない。我々は、冷却原子気体で実現されている散逸下の 1 次元 Hubbard 模型について、Bethe 仮設法を非エルミート領域に拡張することでリュウビリアンの対角化問題の厳密解を導いた。この解によって非平衡定常状態とその周りの励起状態の分散関係を厳密に求め、さらに相互作用と散逸の競合によってリュウビリアンが対角化不可能となる例外点転移が起こることを示した。解法にはリュウビリアンの三角行列構造を利用しており、これは開放量子多体系に対する新しいクラスの可解模型の例を与えている [17]。

乱れたポテンシャル中を流れる超流動体の有効温度

一様な空間中にあるボース粒子系は、基底状態において空間全体にわたって巨視的波動関数の位相がそろった「非対角長距離秩序」を示すことが知られている。本研究では、乱れたポテンシャル中を一定の速度で流れる超流動ボース気体に関して、秩序変数の空間的なゆらぎの性質を調べた。その結果、ランダムネスと流れとの相乗効果が、秩序変数に対して熱平衡系における熱ゆらぎと等価な働きを持つことが明らかとなった。このことは、一次元と二次元では非対角長距離秩序が存在しないことを意味する。本研究の成果は、非平衡状態にある複雑な量子系の振る舞いを理解するうえでも平衡統計力学の枠組みが近似的に適用できることを示唆している [14]。

制限された量子ダイナミクスにおける普遍的な誤差上限

量子系でエネルギースケールに十分大きなギャップが開いているときは、実効的な物理は低エネルギー理論によって近似できることがよく知られている。この有効理論によりダイナミクスも近似できるが、実際には時間とともに誤差が蓄積し、近似は悪くなっていくと考えられる。我々はこのような制限されたダイナミクスにおける誤差について、普遍的に成り立つ誤差の上限を厳密に示した。これは制限されたダイナミクスの（ある時間スケールまでの）妥当性を数学的に保証する初めての結果になっている [3, 4]。

非エルミートトポロジカル相

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トポロジカル現象に大きな関心が集まっている。とくに、非エルミート系に固有のトポロジーに起因して多数の局在状態が現れる表皮効果と呼ばれる現象が、理論・実験の両面からさかんに研究されている。われわれは、相反性が存在するシンプレクティック対称性クラスでは、新しい表皮効果が生じ、それゆえに従来のバンド理論が適用できないことを明らかにした [5]。そして、従来のバンド理論に代わる、シンプレクティック対称性クラスにおける非エルミート系のバンド理論を一般的に構築した。また、非エルミートなトポロジカル相では、実スペクトルが実現できず、それゆえにダイナミクスが不安定になりうることが、ひろく知られていた。われわれは、この通説に反して、シンプレクティック対称性クラスにおいては、実スペクトルをもつ非エルミートなトポロジカル相が実現できることを見出し、その典型例を実験可能なかたちで具体的に示した [9]。さらに、回転対称性に守られた非エルミートな 2 次元系で、4 角にのみ多数の局在状態が現れる新しい局在現象を見出し、高次表皮効果と名付けた [13]。この結果は、これまで開拓されてこなかった、非エルミート系における空間対称性の役割を探究するものでもある。

非エルミート系の局在スケーリング理論

不純物をはじめとした乱れの効果は、波の局在をもたらし（Anderson 局在）、輸送現象に大きな影響を及ぼす。エネルギーや粒子の散逸は、波のコヒーレンスを破壊しうるため、輸送現象においても重要になるが、その普遍的な理解は得られておらず、乱れた非平衡開放系における局在現象・輸送現象については、多くが未解明であった。われわれは、非平衡開放系（非エルミート系）における局在現象を普遍的なかたちで記述するスケーリング理論を構築した [19]。とくに、孤立平衡系についての従来の局在スケーリング理論における最も重要な仮定である、単一パラメータースケーリング仮説が、非平衡開放系では一般に破れ、それゆえに非平衡開放系に特有のくりこみ群の固定点とそれにともなう局在転移が現れることを明らかにした。さらに、その新しい局在転移の普遍性クラスを、対称性にもとづいて一般的に分類した。

非エルミート量子多体系におけるエネルギーギャップを閉じない連続相転移

相互作用が局所的で励起ギャップの開いたハミルトニアンによって記述される系では、ハミルトニアンの連続的な系列によって滑らかに接続される 2 つの系が同じ相に属する。一方で近年は非エルミートなハミルトニアンによって有効的に記述される量子開放系にも注目が集まっている。しかし、エルミート系で古くから基本的な役割を果たしてきた励起ギャップと量子相の関係が非エルミートな量子多体系においても成立するかは未解明だった。我々は、非エルミートな量子多体系においては、相互作用が局所的なハミルトニアンで記述される量子相の間の連続相転移が励起ギャップを閉じることなく起こりうることを指摘した。このような相転移においては、ハミルトニアンのパラメータに対する感受率がエネルギー固有状態の非直交性ゆえに特異性を持つ。このような新奇な相転移を示す典型例として、トーリック・コード模型に非エルミート性を導入した可解模型を構築した [15]。

局所ランダム行列理論に基づく固有状態熱化仮説の検証

統計力学においては平衡状態は混合状態であるアンサンブルで記述されるが、孤立量子系では初期時刻に純粋状態にあった系はその後も純粋状態にあり続ける。一方で、孤立量子系が熱平衡状態へ緩和することが冷却原子気体などを用いて実験的に確かめられている。そこで、孤立量子系の熱平衡状態への緩和を説明する機構として、多体ハミルトニアンのエネルギー固有状態はそれ自体すでに熱平衡状態にあるという固有状態熱化仮説が広く受け入れられている。しかし、示量的な数の保存量を持つ系や多体局在現象を示す系など、固有状態熱化仮説を破る例もいくつか知られている。我々は、現実系が持つ相互作用の局所性や少数体性を反映したハミルトニアンのアンサンブルを構成し、そのアンサンブル上で固有状態熱化仮説が典型的に成立することを数値的に実証した。一方で、ミクロカノニカル平均からのずれの分布は、従来固有状態熱化仮説の典型性の数学的背景として提案されていた高次元球面における測度の集中現象から導かれる分布とは著しく異なることを発見した [18]。

5.3.2 量子論・統計力学と情報理論・人工知能の融合

量子倒立振り子の深層強化学習による制御

倒立振り子（cartpole）の安定化は、強化学習における最も有名なベンチマーク問題のひとつである。我々は山型ポテンシャル中の粒子を考えることでこの問題を量子系へと一般化し、現代的な深層 Q 学習アルゴリズムを適用して不安定な量子系を学習し安定化させた。山型ポテンシャル中で波動関数が拡散していくのを抑える方法として粒子位置の連続測定を用い、それが引き起こす測定の反作用により粒子の平均位置を確率的に移動させ、測定とフィードバックを組み合わせた制御法を構築した。本研究では 2 次関数型・4 次関数型のポテンシャルを扱い、また対応する通常の谷型ポテンシャル中の振動子の場合も調べた。2 次関数型ポテンシャルの場合には、粒子の状態はガウシアン型で我々の深層 Q 学習法は既存の制御法と同程度の性能を発揮した。しかし、解析解の知られていない 4 次関数型ポテンシャルの場合には粒子状態は非ガウシアン型であり、深層学習によるアプローチが既存の制御法の性能を上回った。これは、連続自由度で測定とフィードバックのかかった複雑で解くことができない物理系を AI を使って制御できる可能性を示している [8]。

周期関数の機械学習

近年の人工知能研究の大部分がニューラルネットワークに関するものであることから分かる様に、ニューラルネットワークは其の重要性を増しつつある。我々は、ニューラルネットワークの数学的な性質について研究を行った。ここ二年程度の間に、訓練したニューラルネットワークを用いてデータをどのように内挿すれば良いかという問題の解明が進み、その数学的な原理は益々明白になっている。然し、外挿の数学的な性質については未だ理解が進んでいない。外挿はニューラルネットワークの汎化性能、即ち、学習に用いていない新しいデータに対しての予測性能と深く関係しており、その数学的性質を理解することは極めて重要である。我々は理論的及び数値的な方法を用いて、ニューラルネットワークの外挿の数学的な性質を明らかにした [16]。

任意の初期状態に対する熱力学的不確定性関係

過去 20 年ほどの間に、有名なゆらぎの定理を始めとして、平衡から遠く離れた系における散逸や熱ゆらぎを理解するための一般的な枠組みとして確率的な熱力学が大きく発展してきた。最近、熱力学的不確定性関係（TUR）として知られる新たな厳密な関係式が発見された。この関係式は、複数の熱浴と接した非平衡系について、積算カレントの分散と平均値の 2 乗との比で定義されるカレントゆらぎの小ささと、エントロピー生成の総量との間に原理的なトレードオフ関係が存在することを表している。しかし、現在知られている TUR は特定の初期状態あるいは無限の時間間隔を要求しており、また連続時間 Markov 過程に対してしか成立せず、その適用範囲が非常に限られている。本研究 [11] では、我々は連続時間・離散時間両方の Markov 過程における任意の初期状態に対して成立する数種類の有限時間 TUR を導いた。連続時間ダイナミクスに対しては、時間積分したカレントの分散が終時刻のカレントによって下から押さえられることを我々は証明した。これ

は「境界（終状態でのカレントの値）がバルク（カレントの時間積分値）によって制限されている」ということを示している。我々は次にこの結果をフィードバック制御過程に適用し、最近の実験で報告された測定とフィードバック制御下での修正 TUR の破綻を説明することに成功した。離散時間過程に対しては、一般の初期状態について成立する、エントロピー生成の総量について線形な TUR を我々は導出した。これは既存の離散時間 TUR を指数的に改善する結果となっている [11]。

＜受賞＞

[1] 川畑幸平: 第 15 回日本物理学会若手奨励賞 (領域 4)、日本物理学会、2021.3.14.

＜報文＞

(原著論文)

[2] Kazuya Fujimoto, Ryusuke Hamazaki, and Yuki Kawaguchi: Family-Vicsek Scaling of Roughness Growth in a Strongly Interacting Bose Gas, Phys. Rev. Lett. **124**, 210604 (2020).

[3] Zongping Gong, Nobuyuki Yoshioka, Naoyuki Shibata, and Ryusuke Hamazaki: Universal Error Bound for Constrained Quantum Dynamics, Phys. Rev. Lett. **124**, 210606 (2020).

[4] Zongping Gong, Nobuyuki Yoshioka, Naoyuki Shibata, and Ryusuke Hamazaki: Error bounds for constrained dynamics in gapped quantum systems: Rigorous results and generalizations, Phys. Rev. A **101**, 052122 (2020).

[5] Kohei Kawabata, Nobuyuki Okuma, and Masatoshi Sato: Non-Bloch band theory of non-Hermitian Hamiltonians in the symplectic class, Phys. Rev. B **101**, 195147 (2020).

[6] Ryusuke Hamazaki, Kohei Kawabata, Naoto Kura, and Masahito Ueda: Universality classes of non-Hermitian random matrices, Phys. Rev. Research **2**, 023286 (2020).

[7] Xiao Chai, Di Lao, Kazuya Fujimoto, Ryusuke Hamazaki, Masahito Ueda, and Chandra Raman: Magnetic Solitons in a Spin-1 Bose-Einstein Condensate, Phys. Rev. Lett. **125**, 030402 (2020) [selected as Editors' Suggestion]. See also Synopsis: Physics **13**, s90 by Christopher Crockett.

[8] Zhikang T. Wang, Yuto Ashida, and Masahito Ueda: Deep Reinforcement Learning Control of Quantum Cartpoles, Phys. Rev. Lett. **125**, 100401 (2020).

[9] Kohei Kawabata and Masatoshi Sato: Real spectra in non-Hermitian topological insulators, Phys. Rev. Research **2**, 033391 (2020).

[10] R. Cosmic, K. Kawabata, Y. Ashida, H. Ikegami, S. Furukawa, P. Patil, J. M. Taylor, and Y. Nakamura: Probing XY phase transitions in a Josephson junction array with tunable frustration, Phys. Rev. B **102**, 094509 (2020).

[11] Kangqiao Liu, Zongping Gong, and Masahito Ueda: Thermodynamic Uncertainty Relation for Arbitrary Initial States, Phys. Rev. Lett. **125**, 140602 (2020).

[12] Masahito Ueda: Quantum Equilibration, Thermalization and Prethermalization in Ultracold Atoms, Nat. Rev. Phys. **2**, 669 (2020).

[13] Kohei Kawabata, Masatoshi Sato, and Ken Shiozaki: Higher-order non-Hermitian skin effect, Phys. Rev. B **102**, 205118 (2020) [selected as Editors' Suggestion].

[14] Taiki Haga and Masahito Ueda: Effective temperature of a superfluid flowing in a random potential, Phys. Rev. Research **2**, 043316 (2020).

[15] Norifumi Matsumoto, Kohei Kawabata, Yuto Ashida, Shunsuke Furukawa, and Masahito Ueda: Continuous Phase Transition without Gap Closing in Non-Hermitian Quantum Many-Body Systems, Phys. Rev. Lett. **125**, 260601 (2020).

[16] Liu Ziyin, Tilman Hartwig and Masahito Ueda: Neural Networks Fail to Learn Periodic Functions and How to Fix It, Advances in Neural Information Processing Systems 33 (NeurIPS 2020).

[17] Masaya Nakagawa, Norio Kawakami, and Masahito Ueda: Exact Liouvillian Spectrum of a One-Dimensional Dissipative Hubbard Model, Phys. Rev. Lett. **126**, 110404 (2021).

[18] Shoki Sugimoto, Ryusuke Hamazaki, and Masahito Ueda: Test of the Eigenstate Thermalization Hypothesis Based on Local Random Matrix Theory, Phys. Rev. Lett. **126**, 120602 (2021).

[19] Kohei Kawabata and Shinsei Ryu: Nonunitary Scaling Theory of Non-Hermitian Localization, To be published in Phys. Rev. Lett (arXiv:2005.00604).

[20] Takumi Yoshino, Shunsuke Furukawa, and Masahito Ueda: Intercomponent entanglement entropy and spectrum in binary Bose-Einstein condensates, To be published in Phys. Rev. A (arXiv:2009.02949).

(国内雑誌)

[21] 中川大也: 冷却原子で探る開放量子多体系の物理、数理科学 No.684, 44 (2020).

(学位論文)

[22] Zongping Gong: Order and Topology in Nonequilibrium Quantum Dynamics（博士論文）.

[23] Takumi Yoshino: Theoretical Study of Binary Bose-Einstein Condensates under Synthetic Gauge Fields（博士論文）.

[24] Kangqiao Liu: Thermodynamic Uncertainty Relations in Markovian Processes（修士論文）.

[25] Ziyin Liu: Mean-field learning dynamics of deep neural networks（修士論文）.

[26] Shoki Sugimoto: Typicality of Thermalization in Isolated Quantum Systems（修士論文）.

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[27] Kohei Kawabata: Nonunitary Scaling Theory of Non-Hermitian Localization, Localisation 2020, online, 2020.8.27.

[28] Kohei Kawabata: Topological Field Theory of Non-Hermitian Systems, Theoretical studies of topological phases of matter, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan, 2020.12.18.

[29] Masahito Ueda: Beyond-Hermitian Quantum Physics, Many Body Physics in Open Quantum Systems, online conference organized by Princeton Center for Theoretical Science, Princeton, USA, 2021.1.22.

[30] Masahito Ueda: Beyond-Hermitian Quantum Physics, Conference on Time Crystals, online conference organized by International Center for Theoretical Physics, Trieste, Italy, 2021.3.9.

[31] Masahito Ueda: Beyond-Hermitian Quantum Physics, APS March Meeting, online, 2021.3.15.

(国内会議)

招待講演

[32] 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（若手奨励賞受賞記念講演)、日本物理学会 2020 年秋季大会、オンライン、2020.9.9.

[33] 上田正仁: 強化学習による量子制御（シンポジウム講演)、日本物理学会第 76 回年次大会、オンライン、2021.3.12.

[34] 中川大也: 冷却原子系における非エルミート近藤効果（シンポジウム講演)、日本物理学会第 76 回年次大会、オンライン、2021.3.13.

[35] 川畑幸平: 非エルミート物理における対称性とトポロジー（若手奨励賞受賞記念講演)、日本物理学会第 76 回年次大会、オンライン、2021.3.14.

[36] 中川大也: 冷却原子気体で探る開放量子多体系の物理、統計物理学懇談会、オンライン、2021.3.30.

[37] Zongping Gong: 非平衡量子系における秩序、トポロジー及び厳密な結果、統計物理学懇談会、オンライン、2021.3.30.

一般講演

[38] 杉本昇大、濱崎立資、上田正仁: 局所ランダム行列理論に基づく固有状態熱化仮説の検証、日本物理学会 2020 年秋季大会、オンライン、2020.9.8.

[39] 中川大也、川上則雄、上田正仁: 1 次元散逸 Hubbard 模型の厳密解、日本物理学会 2020 年秋季大会、オンライン、2020.9.9.

[40] 中川大也、辻直人、川上則雄、上田正仁: 光を自然放出する Fermi 原子系における散逸誘起 η ペアリング超流動、日本物理学会 2020 年秋季大会、オンライン、2020.9.9.

[41] 川畑幸平、笠真生: 非エルミート系の局在スケーリング理論、日本物理学会 2020 年秋季大会、オンライン、2020.9.10.

[42] 川畑幸平、佐藤昌利、塩崎謙: 高次非エルミート表皮効果、日本物理学会 2020 年秋季大会、オンライン、2020.9.11.

[43] 川畑幸平、塩崎謙、笠真生: 非エルミートトポロジカル場の理論、日本物理学会第 76 回年次大会、オンライン、2021.3.12.

[44] 吉野匠、古川俊輔、上田正仁: 人工ゲージ場中の二成分 Bose-Einstein 凝縮体における渦格子の集団励起と結合定数の繰り込み、日本物理学会第 76 回年次大会、オンライン、2021.3.12.

[45] 中川大也、芳賀大樹、濱崎立資、上田正仁: 開放量子系のリュウビリアン固有モードにおける束縛・非束縛転移：多体系の解析と Bethe 仮設による厳密解、日本物理学会第 76 回年次大会、オンライン、2021.3.14.

[46] 芳賀大樹、中川大也、濱崎立資、上田正仁: 開放量子系のリュウビリアン固有モードにおける束縛・非束縛転移に由来するコヒーレント・インコヒーレント転移、日本物理学会第 76 回年次大会、オンライン、2021.3.14.

[47] 松本徳文、中川大也、上田正仁: Yang-Lee 量子臨界現象の開放量子系への埋め込み、日本物理学会第 76 回年次大会、オンライン、2021.3.14.

[48] 劉康橋、Zongping Gong、上田正仁: 任意の初期状態に対する熱力学的不確定性関係、日本物理学会第 76 回年次大会、オンライン、2021.3.14.

(セミナー)

[49] 川畑幸平: Symmetry and Topology in Non-Hermitian Physics、藤本・水島研究室セミナー、大阪大学（オンラインセミナー)、2020.5.26.

[50] 芳賀大樹: Liouvillian skin effect: slowing down of relaxation processes without gap closing、京都大学基礎物理学研究所（オンラインセミナー)、2020.5.29.

[51] 中川大也: Exact Bethe ansatz solution of a one-dimensional dissipative Hubbard model、京都大学基礎物理学研究所（オンラインセミナー)、2020.8.7.

[52] 中川大也: Dissipative quantum many-body physics in ultracold atoms、矢上統計物理学セミナー、慶応義塾大学（オンラインセミナー)、2020.11.2.

[53] 中川大也: 周期駆動量子系における非平衡物質相：Floquet エンジニアリング・トポロジカル相・時間結晶、非平衡オンライン若手の会、2020.11.10.

[54] Kohei Kawabata: Non-Hermitian topology, Correlated Electrons Virtual International Seminars, 2020.12.02.

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 の稼働を迎え、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。今年度は科学研究費補助金基盤研究 (S)「重力波宇宙物理学の包括的研究」の採択により、5376 コアの計算機クラスターの導入が叶い、KAGRA のデータ解析の準備を進めています。

今年度は新型コロナウイルスの蔓延のため、M0 ゼミの一部期間を除き、研究室の全てのセミナーはオンラインでの開催を余儀なくされました。また、毎日 2 時から 1 時間アーカイブチェックの時間を設け、構成員の情報交換と安否確認を行っています。

5.4.1 初期宇宙論

初期宇宙磁場

初期宇宙磁場は、観測されている現在の銀河や銀河団の磁場の起源やブレーザーの観測によって示唆される銀河間ボイド磁場を説明する上で、興味深い研究対象である。我々は初期宇宙磁場の生成およびそれの引き起こす諸現象に関する様々な研究を行った [17, 44, 57, 64]。

電弱対称性が破れる以前の初期宇宙に磁場の存在を仮定すると、標準模型のカイラル量子異常を通じて初期磁場の磁気ヘリシティは局所的な物質反物質非対称を生じるため、電弱相転移期におけるバリオン等曲率揺らぎの生成が一般に避けられない。ところが、ビッグバン元素合成の理論と軽元素の観測量との整合性から、バリオン等曲率揺らぎとその起源たる初期磁場は制限を受ける。とくに初期磁場に対する制限を明らかにし、観測的に示唆されているボイド空間の銀河間磁場強度の起源としては、電弱対称性が破れて以降の磁場生成あるいは増幅機構が必要であることを示した [19, 23, 29, 34, 46, 49, 53, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71]。

また、磁場生成機構として、アフレック=ダイン機構と呼ばれる複素スカラー場がその field space において各運動量を獲得する機構においてその位相とゲージ場が Chern-Simons 結合を持つ可能性に指摘し、この機構における磁場生成を調べた [5] 。その結果、作られたヘリカルな磁場が電弱相転移時に現在の宇宙を説明するのに十分なバリオン非対称を生成しうることが示された。

さらに、磁場と重力波が重力的な結合をすることに注目し、長距離相関の初期磁場があれば、磁場によって初期宇宙において光子が重力波に変換される現象が起こることを指摘し、こうしてできた重力波が GHz scale の背景重力波として現在の宇宙にも満ちていることを示した [8]。

ブラックホール周りの真空相転移現象についての研究

極小のブラックホールの周辺では真空相転移が強く誘発されることが示唆されている。しかし、高温のホーキング放射のもたらす真空安定化の効果を考慮していないため、この効果を取り入れて相転移確率を計算し直した [7, 48, 31]。その結果、極小のブラックホールは依然として真空相転移を強く誘発することが判明した。

重力的レプトン数生成を実現する最小模型における量子補正の繰り込みについて

擬スカラーインフラトンと、Riemann テンソルで与えられる Chern-Pontryagin 密度の結合項を有する模型では、インフレーション中に非ゼロの Chern-Pontryagin 密度、つまりはヘリカルな原始重力波が生成し、重力的カイラルアノマリーの帰結としてレプトン数が同時に生成される。このような機構を重力的レプトン数生成と言い、上記模型はこの機構を実現する最小模型である。しかしながら、生成されるレプトン数が量子効果に由来する紫外発散を有し、先行研究の評価は紫外切断のスケールをどう取るかに強く依存することが懸念されていた。そこで本研究では解析的計算により紫外発散依存性を leading order 以下までも明らかにし、それらの発散を取り除く相殺項を同定した。すると、特定の繰り込み条件の元ではレプトン数が極めて小さくなり、スファレロン過程を経ても観測されている宇宙のバリオン数は到底説明できないことがわかり、本機構の実現性に疑問を投げかける結果となった [9, 24, 30, 43, 45, 51, 58]。

原始ブラックホール改良質量関数の不定性

原始ブラックホールの質量スペクトル関数は、多くの不定性を抱えているのが現状である。我々はこれを克服するための第一歩として、各々の原始ブラックホールの質量スケールを正確に評価する条件を取り入れた改良ピークカウント理論について、その高ピーク極限における解析的な表式を導出するとともに、密度ゆらぎを粗視化する方法に起因する不定性を調べた。特に揺らぎがスケール不変型のパワースペクトルを持つ場合に、原始ブラックホール形成に重要となるスケール周辺では改良の効果がほとんど効かないことを示した [10, 25, 32, 33, 52, 56]。

ヒッグス-R^2 混合模型における再加熱過程

ヒッグス-R^2 混合模型は現在の宇宙背景放射の観測から最も支持されるインフレーション模型の一つである。この模型は複数場インフレーション模型であり、特にその再加熱過程は単一場インフレーション模型とはまったく違った振る舞いを示し、興味深い現象である [59]。特に、模型パラメータの値によっては、インフレーション直後に激しいタキオニック

プリヒーティングと呼ばれる現象が起こり、宇宙が瞬間的に熱化されうる。我々はこの現象を解析的および数値的方法によって解析し、この現象が起こり、宇宙を充分に熱化するパラメータの値とその微調整の程度を定量的に定めた [11, 26, 35, 60, 63]。

M-理論における α-attractor の実現に向けて

量子重力を含む統一理論の候補である M-理論の枠組みで観測と整合する初期宇宙のインフレーションを実現することは重要な課題である。M-理論はその理論的構造も含めて未だ完全な理解には至っていないが、その粒子極限は 11 次元超重力理論で記述されることが分かっている。余剰空間に超対称性を保つようなフラックスを導入し、4 次元コンパクト化を考えると安定した真空を持つ 4 次元有効理論が得られる。我々は得られ有効理論に残るモジュライ場が、現在の観測結果と整合する α-attractor インフレーション模型の元となる結合を持つことを示し、特に原始重力波を特徴づけるパラメータ α がフラックスポテンシャルをどのように選ぶことで変化するかを議論し、7 つの離散的な値が得られることを示した [12, 61]。

21cm 線の円偏光

中性水素の超微細構造に起因する 21cm 線は、光子の脱結合の時期から星ができるまでの暗黒時代を調べるための最も重要な観測量の一つとして期待されている。一方で、宇宙背景放射の四重極モーメントをもつ揺らぎは、中性水素のスピンを揃える働きをし、結果として 21cm 線の円偏光が生成される。宇宙背景放射の四重極モーメントは原始重力波によっても生成されるため、21cm 線の円偏光は初期宇宙の情報も含んでいると言える。先行研究では、生成される円偏光の大きさは見積もられていたものの、その角度パワースペクトルはまだ得られていなかった。我々は、先行研究で用いられていた球座標に基づいた計算手法とは異なる、直交座標に基づいた計算手法を用い、21cm 線の円偏光の角度パワースペクトルを求めることに成功した [13]。

真空崩壊に伴う粒子生成の解析

真空崩壊は背景場がトンネル効果によって一次相転移を起こす現象であるが、この際にその場と結合している粒子の有効質量は急激に変化することになる。有効質量が変化した粒子はそれに伴って基底状態が変化するため、生成消滅演算子の定義が変わることになり粒子生成が起こる。我々はこの粒子生成について、近年提唱されているトンネル効果の実時間形式の下でモデル化し、数学的手法としてストークス現象に着目して解析的な評価を求めた。これは相転移に伴う粒子生成の解析であると同時に、トンネル効果の実時間形式そのものについてトンネル確率とは違った側面からその正当性に対して示唆を与える研究でもある [14, 50]。

二次スカラー揺らぎの解析的表式

宇宙論においてスカラー揺らぎは、初期宇宙の理論と現在の観測を結ぶ重要な働きをする。宇宙背景放射の観測から、大スケールのスカラー揺らぎは大きくないことがわかっているが、小スケールのスカラー揺らぎが大きい可能性はまだ残っている。大きなスカラー揺らぎが存在する場合、その非線形効果が重要になるため、その発展を解析的に追うための基礎を築くことには意義がある。このような背景から、我々は一次のスカラー揺らぎが非線形効果を通して生み出す二次のスカラー揺らぎの解析的表式を求めた。さらに、その表式を用いて、二次スカラー揺らぎがどのような時間発展をするのか、及びどのような揺らぎのスペクトルが予言されるのかを明らかにした [15, 22]。

真空相転移のローレンツ経路積分による考察

真空相転移は時空をユークリッド化し、その上でのバウンス解を用いて解析される。ところが重力が存在するときはこの描像は不明瞭になるので、ユークリッド時空ではなくローレンツ時空で直接解析することを目指した。ドジッター時空での真空相転移を考え、重力への反作用を無視するような状況を考えると、従来のバウンスによる解析の結果を再現することができた [27]。

右巻きニュートリノの重力的粒子生成による包括的宇宙論

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矛盾無く包括的に説明し得ることを示した [47, 62]。

シュウィンガー効果を用いた再加熱過程の検証

アクシオンのような擬スカラーによって駆動されるインフレーション模型において、擬スカラーがインフレーション終了後にポテンシャルの極小点に落ち込まずに転がり続ける場合の再加熱過程を考えた。この場合、インフラトンがポテンシャル極小点周りでコヒーレントに振動して崩壊するという通常の再加熱過程の議論を適用することは出来ない。しかしながら、擬スカラーが運動し続ける際にはヘリカルな電磁場が生成することが知られており、生成した電磁場から更にシュウィンガー効果によって荷電粒子を生成して熱浴を実現することが可能である。一方、状況によっては残存した磁場が観測と矛盾した結果をもたらしてしまうことがある。我々はこうした模型について検討した結果、擬スカラーの運動が速過ぎなければ再加熱過程が上手くいくパラメータ領域が存在することを示した [54]。

5.4.2 重力波検出器 KAGRA のデータ解析

補助モニターを用いたオフライン解析による雑音除去手法の開発

2020 年 4 月に初の本格稼働を実施した KAGRA であるが、現在は 2022 年 6 月以降開始予定の LIGO-Virgo との O4 共同観測に向けた改修作業中である。重力波初検出を達成するためにはさらなる感度向上を実現しなければならず、様々な雑音源に直接対策を講じるとともに、オフラインデータ解析によりデータから雑音を統計的に除去する手法の開発が重要である。本研究では、非ガウス分布に従う信号が混合した際に分離・復元する処理手法である独立成分解析 (ICA) に着目し、補助モニターを用いた雑音除去手法の開発に取り組んだ。これまで、初期稼働時の iKAGRA データに最も単純なモデルの ICA を適用し、地震計を用いることで地面振動雑音を部分的に削減できるという結果が得られていた [6]。本年度はさらに、最新の KAGRA データと補助モニターに対して拡張した ICA モデルを適用することで、重力波の観測周波数帯域において特に影響が顕著であった音響雑音の除去に成功した [28, 36, 37, 38, 55]。

＜受賞＞

[1] 横山順一, 令和 2 年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰　科学技術賞「最も一般的なインフレーション宇宙論の研究」

[2] Jun'ya Kume, 25th KAGRA Face-to-Face Meeting Best Poster Presentation award, 2020/8/22.

[3] 粂 潤哉, 2020 年秋季大会 日本物理学会学生優秀発表賞 宇宙線・宇宙物理領域, 2020/10/10.

[4] Jun'ya Kume, ONLINE JGRG WORKSHOP 2020 Outstanding presentation award, Gold prize, 2020/11/27.

＜報文＞

(原著論文)

[5] K. Kamada, and C. S. Shin, "Magnetogenesis from a rotating scalar: á la scalar chiral magnetic effect", Journal of High Energy Physics **04**, 185 (2020).

[6] T. Akutsu *et al.* [KAGRA], "Application of independent component analysis to the iKAGRA data," Progress of Theoretical and Experimental Physics **2020** (2020) no.5, 053F01.

[7] T. Hayashi, K. Kamada, N. Oshita and J. Yokoyama, "On catalyzed vacuum decay around a radiating black hole and the crisis of the electroweak vacuum", Journal of High Energy Physics **08**, 088 (2020).

[8] T. Fujita, K. Kamada, and Y. Nakai, "Gravitational waves from primordial magnetic fields via photon-graviton conversion", Phys. Rev. D **102**, 103501 (2020).

[9] K. Kamada, J. Kume and Y. Yamada: "Renormalization in gravitational leptogenesis with pseudoscalar-tensor coupling," Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **10**, 030 (2020).

[10] K. Tokeshi, K Inomata, and J. Yokoyama, "Window function dependence of the novel mass function of primordial black holes", Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **12**, 038 (2020).

[11] M. He, R. Jinno, K. Kamada, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, "Occurrence of tachyonic preheating in the mixed Higgs-R^2 model," Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **01**, 066 (2021).

[12] M. Gunaydin, R. Kallosh, A. Linde and Y. Yamada, "M-theory Cosmology, Octonions, Error Correcting Codes," Journal of High Energy Physics **01**, 160 (2021).

[13] Lingyuan Ji, Marc Kamionkowski, Keisuke Inomata, "Standard model prediction for cosmological 21 cm circular polarization", Phys. Rev. D **103**, 023516 (2021).

[14] S. Hashiba, Y. Yamada and J. Yokoyama, "Particle production induced by vacuum decay in real time dynamics", Phys. Rev. D **103**, 045006 (2021).

[15] Keisuke Inomata, "Analytic solutions of scalar perturbations induced by scalar perturbations", Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **03**, 013 (2021).

(会議抄録)

[16] Y. Yamada, "Nonlinearly realized supergravity and its applications," AIP Conf. Proc. **2319**, no.1, 040018 (2021).

(国内雑誌)

[17] 鎌田耕平,「銀河間ボイドの化石磁場から探る初期宇宙の物理」日本物理学会誌, 2020, 75 巻, 6 号, p.329-334.

[18] 横山順一 「横山教授に聞く科学のふしぎ」 子ども新聞「風っ子」連載, 第 37 回 – 第 59 回, 上毛新聞社

(学位論文)

[19] 内田経夫、「初期磁場によるバリオン等曲率揺らぎの生成とその宇宙論的帰結」(修士論文).

[20] 渡慶次孝気、「原始ブラックホール質量関数の不定性の克服と精密化に向けた研究」(修士論文).

(編著書)

[21] T. Y. Tou, J. Yokoyama, R. A. Shukor, K. Tanaka, H. J. Choi, R. Matsumoto, O. H. Chin, J. H. Chin and K. Ratnavelu (eds), "Proceedings of 14th Asia-Pacific Physics Conference (APPC2019)," Sarawak, Malaysia, November 17-22, 2019 AIP Conf. Proc. 2319 (2021) 1.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[22] Keisuke Inomata, "Scalar perturbations induced by scalar perturbations", RESCEU Summer School 2020, Online, 2020/8/18.

[23] F. Uchida, "A baryogenesis scenario from helical magnetic fields and constraints on it", RESCEU Summer School 2020, Online, 2020/8/19.

[24] J. Kume, "Quantum correction in gravitational leptogenesis and its renormalization", RESCEU Summer School 2020, Online, 2020/8/19.

[25] K. Tokeshi, "PBH mass spectrum and window function dependence", RESCEU Summer School 2020, Online, 2020/8/19.

[26] M. He, "Tachyonic preheating in the mixed Higgs-R^2 model", RESCEU summer school 2020, Online, 2020/08/19.

[27] T. Hayashi, "Towards Coleman-de Luccia bubble nucleation in the Lorentzian path integral" RESCEU Summer School, RESCEU summer school 2020, Online, 2020/08/19.

[28] J. Kume, "Towards the offline noise subtraction using Independent Component Analysis"(poster), 25th KAGRA Face-to-Face Meeting, Online, 2020/8/20-22.

[29] F. Uchida, "Constraint on the intergalactic magnetic field from baryon isocurvature perturbations at the Big-Bang Nucleosynthesis", AAPPS-DACG Workshop on Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Online, 2020/11/11.

[30] J. Kume, "Renormalization in the minimal model of the gravitational leptogenesis", AAPPS-DACG Workshop on Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Online, 2020/11/11.

[31] T. Hayashi, "The effect of Hawking radiation on BH catalyzed phase transition", AAPPS-DACG Workshop on Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Online, 2020/11/11.

[32] K. Tokeshi, "Primordial black holes and uncertainty of the mass function: window function dependence," AAPPS-DACG Workshop on Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Online, 2020/11/11.

[33] K. Tokeshi, "Primordial black holes, improved mass function, and its window function dependence," The Online Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (Online JGRG), Online, 2020/11/23.

[34] F. Uchida, "Constraints on baryogenesis from primordial magnetic fields", The Online Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (Online JGRG), Online, 2020/11/24.

[35] M. He, "Reheating in the mixed Higgs-R^2 model", The Online Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (Online JGRG), Online, 2020/11/24.

[36] J. Kume, "Offline noise subtraction in KAGRA using independent coomponent analysis", The Online Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (Online JGRG), Online, 2020/11/27.

[37] J. Kume, "Noise subtraction in offline data analysis of KAGRA"(poster), 26th KAGRA Face-to-Face Meeting, Online, 2020/12/17-18.

[38] J. Kume, "Noise subtraction in offline analysis of KAGRA using independent component analysis", The 7th KAGRA International Workshop, National Central U. Taiwan, Online, 2020/12/19.

招待講演

[39] J. Yokoyama, "Dark matter and baryon number generation in quintessential inflation," Japan-Netherlands symposium on Gravity and Cosmology, Online, 2020/7/27.

[40] J. Yokoyama, "Gravitational waves as a new probe of the universe," 38th SPP conference, Online, 2020/10/19.

[41] J. Yokoyama, "Gravitational waves from the early universe," Korea-Japan joint session of KPS annual meeting, Online, 2020/11/6.

[42] J. Yokoyama, "Mixed Higgs R^2 inflation," 7th Korea-Japan workshop on dark energy, Online, 2020/12/10.

[43] K. Kamada, "Towards a robust estimate for gravitational leptogenesis", Zooming in on Axions in the Early Universe, Virtual Institute at CERN, Online, 2020/6/24.

[44] K. Kamada, "Primordial magnetic field – Its relationship to cosmology and implication to the IGMF", NECO on-line workshop "Probing

the Universe with High and Very High Energy Sources", International Research Network Extragalactic Astrophysics and Cosmology, Online, 2020/12/9.

(国内会議)

一般講演

[45] 粂潤哉、"Gravitational leptogenesis and renormalization in a model with pseudo-scalar-tensor coupling", 基研研究会 素粒子物理学の進展 2020、Online、2020/8/31.

[46] 内田経夫、鎌田耕平、横山順一、"バリオン非対称の起源としての宇宙磁場にバリオン揺らぎが与える制限"、基研研究会 素粒子物理学の進展 2020、ポスター、Online、 2020/8/31-2020/9/4.

[47] 羽柴聡一朗、"右巻きニュートリノの重力的粒子生成によるバリオン数と暗黒物質の生成"、基研研究会 素粒子物理学の進展 2020、ポスター、Online、2020/08/31-09/04.

[48] 林拓未、"The effect of Hawking radiation on vacuum phase transition"、 基研研究会 素粒子物理学の進展 2020、ポスター、Online、2020/08/31-09/04.

[49] 内田経夫、鎌田耕平、横山順一、"磁場によるバリオン数生成シナリオに対する、バリオン揺らぎからの制限"、日本物理学会 2020 年秋季大会、Online, 2020/9/15.

[50] 羽柴聡一朗、山田悠介、横山順一、"真空崩壊に伴う粒子生成とその帰結"、日本物理学会 2020 年秋季大会、Online、2020/09/15.

[51] 粂潤哉、鎌田耕平、 山田悠介、 "重力的レプトン数生成における量子補正の正則化とその帰結"、 日本物理学会 2020 年秋季大会、Online、2020/9/15.

[52] 渡慶次孝気、猪又敬介、横山順一、"原始ブラックホールの新しい質量関数と密度揺らぎの粗視化に伴うフィルター関数依存性"、日本物理学会 2020 年秋季大会、Online、2020/9/15.

[53] 内田経夫、鎌田耕平、横山順一、"初期磁場のバリオン揺らぎ生成の効果による制限"、 日本物理学会 2021 年第 76 回年次大会、Online, 2021/3/13.

[54] 羽柴聡一朗、中塚洋佑、鎌田耕平、"運動項優勢期におけるシュウィンガー効果による再加熱過程"、日本物理学会第 76 回年次大会、Online、2021/03/13.

[55] 粂潤哉、伊藤洋介、横山順一、鷲見貴生、横澤孝章、"オフライン解析による KAGRA データの雑音除去"、日本物理学会第 76 回年次大会、Online、 2021/3/14.

[56] 渡慶次孝気、猪又敬介、横山順一、"ピークカウント法における球対称密度揺らぎの扱いとその物理的帰結"、日本物理学会第 76 回年次大会、Online、2021/3/14.

(セミナー)

[57] 鎌田耕平, " 初期宇宙磁場とその (素粒子) 宇宙論的諸現象", 理論物理学コロキウム (宇宙), 立教大学 (オンライン), 2020/5/26.

[58] J. Kume, "Renormalization in gravitational leptogenesis with pseudo-scalar-tensor coupling", Virtual Axion Institute, Online, 2020/7/31.

[59] K. Kamada, Special lecture "Pedagogical lectures on recent progress in Higgs inflation", Yonsei University, Yonsei Lab for Dark Unvierse, Seoul (Online), South Korea, 2020/8/5-7.

[60] M. He, "Preheating in the mixed Higgs-R^2 model", invited talk at Yonsei University, Online, 2020/08/13.

[61] 山田悠介, "cosmological α-attractor and M-theory", 東京大学駒場素粒子論研究室セミナー, 東京大学 (オンライン), 2020/10/14.

[62] S. Hashiba, "Gravitational production of right-handed neutrinos after quintessential infaltion", Hokkaido University (Online), 2020/10/16.

[63] M. He, "Reheating in the mixed Higgs-R^2 model", Cosmology seminar at Perimeter Institute of Theoretical Physics, Online, 2020/11/06.

[64] 鎌田耕平, "Cosmological hypermagnetic fields: their generation and implication on the baryon asymmetry of the Universe", 京都大学素粒子論研究室セミナー, 京都大学 (オンライン), 2020/12/23.

[65] F. Uchida, "Baryon isocurvature constraints on the primordial hypermagnetic fields", IPMU journal club, Online, 2021/1/13.

[66] K. Kamada, "Constraints on the primordial hypermagnetic fields from the baryon isocurvature perturbations", ASU cosmology seminar, Arizona State Uiversity, Tempe, AZ, USA, Online, 2021/1/28.

[67] K. Kamada,"Universal constraints on primordial magnetogenesis from baryon isocurvature perturbations", Kavli IPMU APEC seminar, Kavli IPMU, University of Tokyo, Kashiwa, Japan, Online, 2021/2/4.

[68] K. Kamada, "Baryon isocurvature perturbation constrains primordial hypermagnetic fields", Institute Basic Science - Center for Theoretical Physics of the Universe, Daejeon, South Korea, Online, 2021/2/10.

[69] K. Kamada, "Chiral effects in cosmology", High Energy Theory Group Seminar, Keio University, Yokohama, Online, Japan, 2021/2/25.

[70] F. Uchida, "Baryon isocurvature constraints on the primordial hypermagnetic fields", IBS-CTPU journal club, Online, 2021/2/26.

[71] K. Kamada, "Primordial hypermagnetic fields constrained by baryon isocurvature perturbations", HET seminar, Ecole Polytechinique Federale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, Online, 2021/3/29.

(アウトリーチ)

[72] 横山順一, 第 93 回五月祭講演,「輪廻する宇宙」 オンライン 2020/9/20-21

[73] 横山順一, 立川国際高校講演会,「コロナ時代に考える宇宙のこと世界のこと」 立川国際高校 2020/12/18

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、高周波動を用いた最大プラズマ電流はそれぞれ 120、27 kA である。ST は高い規格化圧力を安定に維持できる方式として魅力的である。一方、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、それにより電流を駆動する研究を行っている。2020 年度は、LHW による電流駆動の高効率化と、駆動機構の解明をすすめ、パワーバランスを明らかにすることに成功した。LHW で誘起される代表的な不安定性であるパラメトリック崩壊不安定性の詳細測定の結果、どのような条件で、どのような場所で発生するかを明らかにした。また、プラズマの状態を詳細に把握するための、硬 X 線計測、干渉計計測、非等方電子温度計測の開発を行った。電磁誘導を用いた場合、高電流高温プラズマの生成が可能であるが、内部磁気リコネクション現象が発生し、プラズマの性能を劣化させる。詳細な解析の結果、現象発生時に、異なる温度速度をもつ 2 成分が現れることがわかった。

6.1.2　高周波実験

静電結合型進行波アンテナを用いて、200 MHz の LHW 入射によるプラズマ電流駆動実験を行った。プラズマの外側と上側に設置された 2 台のアンテナを用いることで、外側、上側及び下側模擬の 3 種類の入射方法による電流駆動実験を行い、これまでに従来法の誘導放電に比べて 1/4 程度（27 kA）のプラズマ電流を達成している。

磁気プローブによる波動計測

プラズマ周辺部を伝搬する LH 波とパラメトリック崩壊不安定性による崩壊波の大域的な構造を調べるために、高周波磁気プローブを新たに 20 チャンネル、プラズマを取り囲むように設置した。LH 波の外側入射、上側入射による電流駆動実験を行い、励起波に対して低周波側のサイドバンド（崩壊波）の割合と波の偏光分布を調べた。外側入射では真空容器内側で崩壊波の割合が高く（>200 %） 、相対的に外側では小さい（<100 %）という結果が得られた。対照的に上側入射では、励起波に対する崩壊波の割合が内側で小さく、下側から外側の領域で >300 % と大きな割合で存在していることがわかった。一方、LH 波の偏光分布は外側入射では下側で揺動磁場のポロイダル成分 $B_{\rm pol}$ が強く、内側ではトロイダル成分 $B_{\rm tor}$ が強く観測された。上側入射では内側上部のアンテナ近傍のプローブで $B_{\rm pol}$ が強く、内側下部に行くに従い $B_{\rm tor}$ が支配的になった（図 6.1.1）。

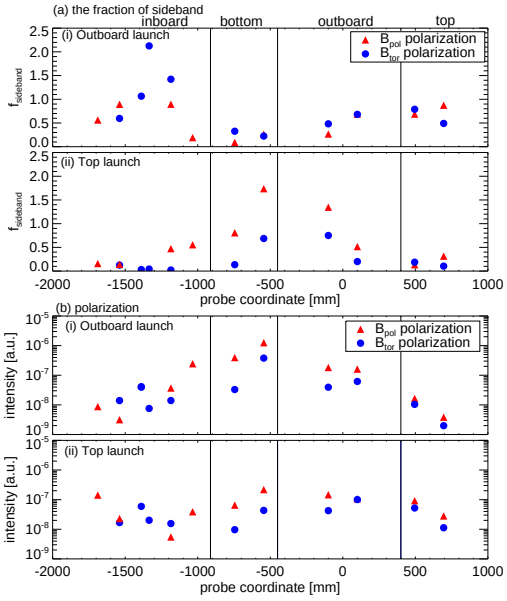


図 6.1.1: LH 波電流駆動実験における (i) 外側入射 (ii) 上側入射時の (a) 励起波に対する崩壊波の割合と (b) 励起波の偏光分布。

電子分布計測

TST-2 の LHW 電流駆動プラズマの電子密度は 10^{17} m^{-3} 台であり、トムソン散乱法による電子温度密度計測は容易ではない。そこで、積算回数を 20 まで増加させることで、周辺の低密度領域を精度よく計測することを試みた。その結果、同一磁気面上で電子温度に有意な差がある場合とない場合があることが観測された。これまでの既知の理論では、同一磁気面上での電子温度の差は説明できず、さらなる精

度の向上と測定誤差の吟味が今後の課題である。一方、周辺部の電子温度が中心部よりも高いことは明らかであり、これの原因について考察を進めた。典型的な温度は、周辺部：86 eV 程度、中心部：36 eV 程度であり、典型的な密度は 1.1×10^{17} m^{-3} である。これまでの理論等から周辺部で LHW により高速電子が生成され、高速電子とバルク電子の衝突により、周辺部の電子が加熱されると考えられ、加熱パワーは 10 kW 程度（ただし、ファクター程度の不確定性がある）と予想されている。この加熱パワーが温度勾配と面積に比例して、周辺部の外側と内側、すなわち中心部側へ分配されるとすると、中心部加熱パワーは 2.8 kW となる。定常状態ではこれに等しい冷却パワーが存在しなければならない。中心部電子の冷却機構として (1) 中性粒子のイオン化 (2) 放射を考え、概算したところ、(1) のイオン化の寄与が大きく、パワーは 0.2 kW 程度であった。理論の精度や仮定を考慮するとイオン化で実験結果を説明できる可能性がある。

高周波誘起輸送モデル

プラズマ中の電子は、LHW の電場で加速減速を受けるが、これは、速度空間内の拡散と見なすことができる。拡散で生成された高速電子は、イオン、電子、中性粒子との衝突により減速される。高速電子の磁力線に平行方向の速度が支配的であり、垂直方向の速度は無視できるという近似では、上記の速度空間内での加速減速と実空間での輸送がほぼ一対一に対応付けられる。これは、高周波励起輸送と呼ばれる現象である。実空間内で輸送された高速電子はプラズマ形状を決めるリミターに衝突し、いわゆる Thick Target X-ray を生成する。さらに、この X 線が検出されるまでの過程をモデル化することで、観測と比較することが可能となった。図 6.1.2 は、このようにして予測された X 線のスペクトルと実測を二つのケースで比較したものであり、スペクトル形状が再現されていることがわかる。このことは、モデルが定性的に正しいことを示しており、高速電子の振る舞いの本質を理解できたことを意味する。解析の結果、LHW で維持されたプラズマ中の主なパワー損失は、加速された電子のリミターへの衝突であり、その過程で電流を駆動しつつ、バルク電子やイオンを加熱することがわかった。

6.1.3 OH 実験

内部磁気再結合現象

球状トカマクに特有の MHD 不安定性である内部磁気再結合（Internal Reconnection Event, IRE）における、イオン温度、イオン流速をイオンドップラー分光法を用いて測定した。通常、イオンはマクスウェル分布を示し、ある発光線の分光スペクトルは、1 成分のマクスウェル分布で表され、フィットもよいが IRE 時にはフィッティングの残差 $\chi 2$ 乗が他の時間帯

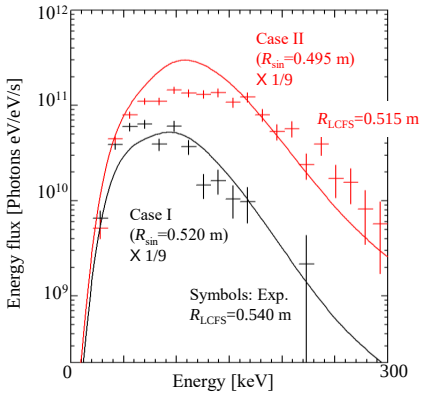


図 6.1.2: モデルで予測した X 線スペクトルと計測した X 線スペクトル。プラズマの大きさの異なる二つのケースについて示した。なお、モデルの予測値は絶対値を 1/9 倍して示してある。

に比べて悪化することが確認された。そのため、IRE 時の測定結果に対し、複数成分のマクスウェル分布によりフィットを行った。その結果 $\chi 2$ 乗が改善することがわかり、また交差検証により、2 成分マクスウェル分布のモデルのほうがより妥当であるという結果を得た。フィットの結果はプラズマ中に低温（<100 eV）と高温（~200 eV）の異なるフロー速度の成分が同時刻に存在することを示し、IRE 以前から存在した低温成分と IRE によって新たなに生成された高温成分が見えていると解釈できる。

6.1.4 計測器の開発

トムソン散乱計測

電子温度の異方性を観測するため、ダブルパストムソン散乱計測系の開発を行なった。図 6.1.3 は光学系の模式図である。終端鏡（Endmost mirror）の傾きが系全体のアラインメントにとって重要であることがわかった。光路は計測精度を最大化すると同時に、反射光による YAG レーザー損傷のリスクを最小化するように最適化した。最適化されたパラメータにおける光路に沿ったビーム系の計算値と計測値を図 6.1.4 に示す。

硬 X 線計測

LH プラズマからの制動放射硬 X 線計測において、信号処理回路の改良を行うことにより硬 X 線のパルス幅を一桁減少させ、1 ms オーダーの時間分解能での測定が可能となった。一方観測されている硬 X 線が壁に当たった電子からのものが支配的であるという予測があり、壁を見込まない視線での測定および

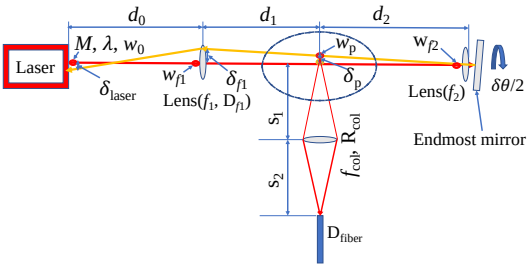


図 6.1.3: ダブルパストムソン散乱計測系の模式図。

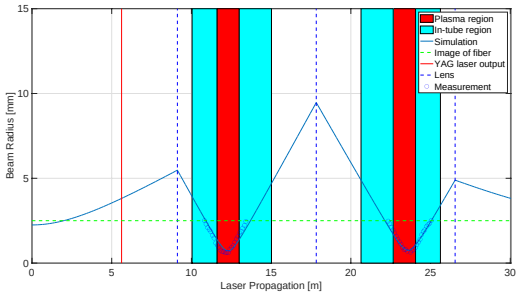


図 6.1.4: 最適化したビーム系の計算値と計測値。

ターゲット板の挿入実験により、予測を検証する準備を進めている。

干渉計による電子密度計測

複数視線で同時に電子密度測定を行うために垂直視線 50 GHz マイクロ波干渉計を、既存設備の老朽化のため径方向 104 GHz マイクロ波干渉計を新たに制作している。50 GHz 干渉計はヘテロダイン構成のマイクロ波回路と位相検出のための IQ 回路が組み上がり、導波管を配管すれば完成する状況にある。104 GHz 干渉計については、センタースタック（CS）に反射させて得られるマイクロ波のパワーが入射パワーよりも非常に小さくなるという既存の干渉計の問題点を解消するため、光学系を新たに設計している。プラズマの外側赤道面付近にホーンアンテナとミラーを一体にしたホグホーンアンテナを設置して CS で集光し、CS にも平らなミラーを設置することで入射パワーの大部分を受信できるようにすることを目指す。

6.1.5 共同研究

QUEST におけるトムソン散乱計測

当研究室では、九州大学 QUEST グループとの共同研究で先進的トムソン散乱システムの開発を行っている。これまで、トムソン散乱システムの運用は我々だけで行ってきたが、2020 年度からは、先方の人的協力を得て、共同運用体制の構築、稼働率向上を目指した。具体的には、先方の人材の教育、当研究室メンバーの遠隔実験参加の試験、省力化のための自動データ収集システムの作成を行った。また、省力化と精度向上のためにビームモニターの試験を行った。図 6.1.5 は、白黒アナログカメラによるビームモニター画像を示したもので、ミラーでのレーザーの散乱光が綺麗に観測されることがわかかる。これにより十分な精度でビームの位置がモニターできることが確認された。

図 6.1.5: 白黒アナログカメラで撮影したレーザーモニター画面。中央の楕円が YAG レーザースポットを表す散乱光、左端の半月状の構造はミラーホルダー上の散乱光を表す。

JT-60SA における EC 補助オーミック立ち上げ

近年世界的に実験が開始されている、JT-60SA をはじめとする超伝導センターソレノイド（CS）を持つ装置では、生成できる周回電場が限られるため、プラズマの立ち上げが従来の常伝導 CS 装置よりも難しい。CS による立ち上げにおいて、ブレークダウンを開始するためにはポロイダル磁場を十分広い領域で、長い時間にわたって 0 に近づける必要がある（ヌル磁場配位）。周回電場が低いほど精度の良いヌル磁場を長時間維持する必要があるが、電子サイクロトロン（EC）波を立ち上げ時に補助的に照射することで、簡単にブレークダウンを開始できることが知られている。一方、EC 波による補助を用いる場合、垂直磁場をかけた方が立ち上げには適している可能性が近年実験的に示唆されている。2020 年度は無衝突と多衝突の 2 つの極限での近似モデルを新たに開発し、立ち上げの EC 電力と垂直磁場依存性を定性的に説明することができた。

EXL-50 における低域混成波入射系開発

中国 ENN 社の EXL-50 球状トカマク装置における LHW 電流駆動系の開発を行なった。従来とは異なるパラメータ領域で電流駆動が可能な波を励起す

るため、コルゲート表面を用いたアンテナを新たに設計・制作し、TST-2 で試験した。200 MHz の LHW で駆動されるプラズマに、2.45 GHz の LHW を新型アンテナにより励起した。その結果、2.45 GHz 入射時に X 線放射強度が顕著に増加し、期待された電子加速が実際に起こっていることが確認できた。

＜報文＞

(原著論文)

[1] J.H.P. Rice, N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, O. Watanabe, H. Yamazaki, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Aoi, Y. Ko, K. Matsuzaki and Y. Osawa: "Langmuir Probe Measurements of Scrape-Off Layer Conditions in RF-Driven Plasmas in TST-2," Plasma and Fusion Res. **15**, 2402009 (2020).

[2] N. Tsujii, Y. Yoshida, Y. Takase, A. Ejiri, O. Watanabe, H. Yamazaki, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Aoi, Y. Ko, K. Matsuzaki, J.H.P. Rice and Y. Osawa: "Studies of a Lower-Hybrid Wave Driven Plasma Equilibrium with a Hybrid-MHD Model on the TST-2 Spherical Tokamak," Plasma Fusion Res. **15**, 2402010 (2020).

[3] A. Ejiri, Y. Aoi, H. Yamazaki, N. Tsujii, Y. Takase, O. Watanabe, Y. Ko, J.H.P. Rice, Y. Peng, K. Iwasaki, K. Matsuzaki, Y. Osawa and Y. Yoshimura: "Development of a Compact Hard X-Ray Camera on the TST-2 Spherical Tokamak," Plasma Fusion Res. **15**, 1202023 (2020).

[4] Y. Nagayama, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, H. Nakanishi, M. Ohsuna, H. Tsuchiya and S. Yamaguchi: "Measurement of Electron Density Fluctuations Using O-Mode Microwave Imaging Reflectometry in a TST-2 Spherical Tokamak," Plasma Fusion Res. **15**, 2402060 (2020).

[5] S. Mori, T. Shikama, K. Hanada, N. Yoneda, A.A. Kuzmin , M. Hasuo, H. Idei, T. Onchi, A. Ejiri, Y. Osawa, Y. Peng, K. Matsuzaki, S. Kado, K. Sawada, T. Ido, K. Nakamura, R. Ikezoe, Y. Nagashima, M. Hasegawa, K. Kuroda, A. Higashijima, T. Nagata and S. Shimabukuro: "Spectroscopic Measurement of Hydrogen Atom Density in a Plasma Produced with 28 GHz ECH in QUEST," Atoms **8**, 44 (2020).

[6] T. Onchi, H. Idei, M. Fukuyama, D. Ogata, R. Ashida, T. Kariya, A. Ejiri, K. Matsuzaki, Y. Osawa, Y. Peng, S. Kojima, O. Watanabe, M. Hasegawa, K. Nakamura, K. Kuroda, R. Ikezoe, T. Ido, K. Hanada, N. Bertelli, M. Ono and A. Fukuyama: "Non-inductive plasma current ramp-up through oblique injection of harmonic electron cyclotron waves on the QUEST spherical tokamak," Phys. Plasmas **28**, 022505 (2021).

[7] N. Yoneda, T. Shikama, K. Hanada, S. Mori, T. Onchi, K. Kuroda, M. Hasuo, A. Ejiri, K. Matsuzaki, Y. Osawa, Y. Peng, Y. Kawamata, S. Sakamoto, H. Ideib, T. Ido, K. Nakamura, Y. Nagashima, R. Ikezoe, M. Hasegawa, A. Higashijima, T. Nagata, S. Shimabukuro: "Toroidal flow measurements of impurity ions in QUEST ECH plasmas using multiple viewing chords emission spectroscopy," Nuclear Materials and Energy **26**, 100905 (2021).

[8] Y. Peng, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, O. Watanabe, K. Iwasaki, Y. Ko, J.H.P. Rice, Y. Osawa, G. Yatomi, I. Yamada, T. Ido, Y. Nagashima and K. Kono: "Investigation on Double-Pass Configurations for Thomson Scattering Measurements," Plasma Fusion Res. **16**, 1402027 (2021).

(国内雑誌)

[9] 高瀬雄一: 「TST-2 における MHz 帯電磁波による波動加熱実験」J. Plasma Fusion Research **96**, 655–659 (2020).

[10] 關良輔、辻井直人: 「TASK-WM や AORSA を用いた波動加熱シミュレーション」J. Plasma Fusion Research **96**, 669–673 (2020).

(学位論文)

[11] 大澤佑規:「TST-2 球状トカマク装置における周辺部電子温度密度計測」

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[12] A. Ejiri, H. Yamazaki, Y. Takase, N. Tsujii, K. Shinohara, O. Watanabe, Y. Yoshimura: "A Model for Lower Hybrid Wave Induced Transport on the TST-2 Spherical Tokamak," 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Toki, Gifu, Japan (online), Oct. 27–30, 2020.

[13] Y. Peng, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, O. Watanabe, K. Iwasaki, Y. Ko, J.H.P.Rice, Y. Osawa, G.Yatomi, I. Yamada, T. Ido,Y. Nagashima and K. Kono: "Theoretical Investigation on Double-Pass Configurations for the Thomson Scattering Measurements," 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Toki, Gifu, Japan (online), Oct. 27–30, 2020.

[14] Y. Nagashima, K. Hanada, S. Kojima, H.O.ELSerafy, H. Zushi, K. Nakamura, M. Hasegawa, H. Idei, A. Fujisawa, A. Ejiri, Y. Takase, T. Ido, K. Kuroda, T. Onchi, R. Ikezoe, S. Kawasaki, T. Nagata and A. Higashijima: "Development of an electrode system for edge/scrape-off layer measurements during steady state tokamak operations in QUEST," 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Toki, Gifu, Japan (online), Oct. 27–30, 2020.

[15] Y. Takase: "Survey of RF research on TST-2," 9th Workshop on Plasma start-up and sustainment in spherical tokamak configuration by RF, online, Jan. 25–27, 2021.

[16] A. Ejiri: “Electron temperature and density profile measurements by Thomson scattering systems on TST-2 and QUEST,” 9th Workshop on Plasma start-up and sustainment in spherical tokamak configuration by RF, online, Jan. 25–27, 2021.

[17] N. Tsujii: “Electron cyclotron heating assisted Ohmic start-up in the trapped particle configuration on spherical tokamaks,” 9th Workshop on Plasma start-up and sustainment in spherical tokamak configuration by RF, online, Jan. 25–27, 2021.

[18] A. Ejiri, H. Yamazaki, Y. Takase, N. Tsujii, K. Shinohara, O. Watanabe, Y. Yoshimura: “RF induced transport model for lower hybrid wave sustained TST-2 plasmas,” Korea-Japan Workshop on Physics and Technology of Heating and Current Drive, Feb. 25–26, 2021.

[19] N. Tsujii, Y. Ko, Y. Takase, A. Ejiri, K. Shinohara, O. Watanabe, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Osawa, G. Yatomi and I. Yamada: “Electron cyclotron wave assisted Ohmic start-up in the trapped particle configuration in spherical tokamaks,” Feb. 25–26, 2021.

[20] Y. Ko: “Polarization and PDI measurement using RF magnetic probes in TST-2 LH-driven plasma,” Feb. 25–26, 2021.

(国内会議)

一般講演

[21] 江尻晶:「大学等における高温プラズマの研究」Fusion2030 研究会 週イチ Zoom 研究会（第 4 回）, オンライン, 2020 年 6 月 24 日.

[22] 江尻晶，菊池崇志，三瓶明希夫，浅井朋彦，稲垣滋，江原真司，近藤創介，片山一成，森芳孝:「大学等のアクティビティの現状」Fusion2030 研究会第一回全体会議, オンライン, 2020 年 7 月 1 日.

[23] 江尻晶，TST-2 チーム:「TST-2 球状トカマクこれまでの成果、今後の展望」Fusion2030 研究会 週イチ Zoom 研究会（第 7 回）, オンライン, 2020 年 7 月 22 日.

[24] 辻井直人，高瀬雄一，江尻晶，渡邉理，山崎響，彭翊，岩崎光太郎，高竜太，RICE James，大澤佑規:「TST-2 の最近の研究」研究会「先進トカマク開発のための実験研究」, オンライン, 2020 年 9 月 29–30 日.

[25] 大澤佑規，江尻晶，彭翊，弥富豪，辻井直人，高瀬雄一，渡邉理，岩崎光太郎，高竜太，James Rice，山田巌:「TST-2 におけるトムソン散乱計測法を用いた低域混成波電流駆動プラズマの電子温度計測」研究会「先進トカマク開発のための実験研究」, オンライン, 2020 年 9 月 29–30 日.

[26] 高竜太，辻井直人，高瀬雄一，江尻晶，渡邉理，山崎響，James H.P. Rice, Peng Yi, 大澤佑規:「TST-2 における EC アシスト低周回電場 OH プラズマ立ち上げの最適化」研究会「先進トカマク開発のための実験研究」, オンライン, 2020 年 9 月 29–30 日.

[27] 高竜太，辻井直人，高瀬雄一，江尻晶，渡邉理，山崎響，岩崎光太郎，James H.P. Rice, Peng Yi, 大澤佑規，若月琢馬，吉田麻衣子，浦野創:「TST-2 球状トカマクにおける EC 波アシスト低誘導電場プラズマ立ち上げの最適化」第 37 回プラズマ・核融合学会年会、オンライン、2020 年 12 月 1–4 日.

[28] 辻井直人，高瀬雄一，江尻晶，渡邉理，彭翊，岩崎光太郎，高竜太，James Rice，大澤佑規，弥富豪，山田巌:「TST-2 における低域混成波駆動プラズマの電流分布計測のためのマイクロ波偏光計開発」第 37 回プラズマ・核融合学会年会、オンライン、2020 年 12 月 1–4 日.

[29] 弥富豪、江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、渡邉理、彭翊、岩崎光太郎、高竜太、James Rice、大澤佑規、山田巌:「TST-2 における硬 X 線カメラ計測システムの信号処理回路の改良」第 37 回プラズマ・核融合学会年会、オンライン、2020 年 12 月 1–4 日.

[30] 大澤佑規，江尻晶，Peng Yi, 弥富豪, 高瀬雄一，辻井直人，渡邉理，山崎響，岩崎光太郎, 高竜太，James. H. P Rice，山田巌:「TST-2 におけるトムソン散乱計測法を用いた低域混成波電流駆動プラズマの電子温度計測、第 37 回プラズマ・核融合学会年会、オンライン、2020 年 12 月 1–4 日.

[31] 山田巌、辻井直、江尻晶、高瀬雄一、渡邉理、岩崎光太郎、彭翊、高竜太、James Rice、大澤佑規、弥富豪:「TST-2 における低域混成波駆動プラズマの電子密度計測」第 37 回プラズマ・核融合学会年会、オンライン、2020 年 12 月 1–4 日.

[32] 江尻晶、山崎響、高瀬雄一、辻井直人、篠原孝司、渡邉理、吉村泰夫:「TST-2 球状トマカクにおける低域混成波誘起輸送モデル」第 37 回プラズマ・核融合学会年会、オンライン、2020 年 12 月 1–4 日.

[33] A. Ejiri, M. Hirata, S. Ichimura, R. Ikezoe, S. Kamio, M. Yoshikawa: “Fast visible light measurements for the study of RF waves in plasma,” 核融合エネルギーフォーラムプラズマ物理クラスター計測サブクラスター令和 2 年度第 1 回会合、核融合科学研究所（オンライン）2021 年 2 月 10 日.

[34] 江尻晶, 高瀬雄一, 辻井直人, 渡邉理, 篠原孝司:「外部ソースを考慮した誘導予備電離の理論研究」日本物理学会第 76 回年次大会、オンライン開催　2021 年 3 月 12–15 日.

[35] 辻井直人，高瀬雄一，江尻晶，渡邉理，篠原孝司，彭翊，岩崎光太郎，高竜太，RICE James，大澤佑規，弥富豪，山田巌:「TST-2 球状トカマク装置の低域混成波駆動トカマクプラズマにおける高速電子のダイナミクス」日本物理学会第 76 回年次大会、オンライン開催　2021 年 3 月 12–15 日.

[36] 弥富豪、江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、篠原孝司、渡邉理、彭翊、岩崎光太郎、高竜太、大澤佑規、山田巌:「TST-2 における硬 X 線測定とプラズマ電流の減衰時定数についての研究」第 23 回 若手科学者によるプラズマ研究会、オンライン開催 2021 年 3 月 16–17 日.

[37] 山田巌, 辻井直人, 江尻晶, 高瀬雄一, 篠原孝司, 渡邉理, 岩崎光太郎, 彭翊, 高竜太, James Rice, 大澤佑規, 弥富豪:「TST-2 における低域混成波駆動プラズマの

電子密度の振る舞い」第 23 回 若手科学者によるプラズマ研究会、オンライン開催 2021 年 3 月 16–17 日.

6.2 山本研究室

6.2.1 はじめに

【星・惑星系形成】
恒星および惑星系の形成は、宇宙における最も基本的な構造形成過程の 1 つであるとともに、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。そのため、観測・理論両面から活発な研究が行われている。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、このような物質的視点を軸に、星・惑星系形成過程を多面的に研究している。

【なぜ電波か】
星間分子雲の温度はおよそ 10 K 程度である。この「宇宙の中でも最も低温の天体」は、最もエネルギーの低い電磁波である「電波」を主に放射する。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。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。

6.2.2 星・惑星系形成

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。

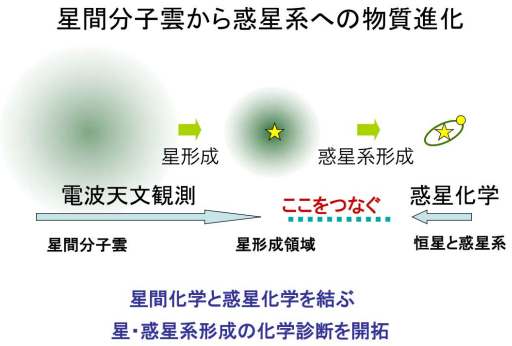


図 6.2.1: A schematic illustration of our goal

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。

ALMA による観測では、膨大な分子スペクトル線データが得られるが、これまではその中から適切な

ものを選んで解析を行ってきている。しかし、これでは ALMA による観測能力を十分活かしきっていないばかりか、スペクトル線の選択や結果の議論に恣意性が入り込む余地がある。そこで、スペクトル線分布の空間（2 次元）および速度（1 次元）情報を先入観なく比較・分類するために、昨年度から機械学習の方法を本格的に取り入れることを考えている。

6.2.3 観測成果

【低質量原始星天体 IRAS 16293–2422 のアウトフロー構造】
IRAS 16293–2422 は、へびつかい座にある連星系 (Source A, Source B) である。ALMA データの解析により、Source A から北西-南東方向に吹き出すアウトフロー構造を検出した (図 6.2.2)。このアウトフロー構造は、以前に数 1000 au スケールでの観測で報告されていたものと矛盾しない。Source A 自体もまた、原始星 A1 と A2 から成る非常に近接した連星系である。高解像度観測の結果、このアウトフローが原始星 A1 に付随するものであることがわかった。加えて、SO 分子輝線の速度構造の解析から、このアウトフローが回転運動をもつことを明らかにした。ガスがもつ比角運動量を見積もった結果、このアウトフローは、原始星 A1 に付随する円盤構造から角運動量を抜き取っている可能性が示唆された。このことは、円盤から原始星へのガスの降着を助け、原始星の進化に寄与すると考えられる。

【非常に若い原始星 IRAS 15398–3359 で捉えたアウトフローの方向変化】
IRAS 15398–3359 は、おおかみ座にある Class 0 原始星で、非常に小さな質量を持つ誕生したばかりの天体である。ALMA の大型プログラム FAUST のデータを用いて 0.3”(50 au) の分解能で観測した結果、以前の観測で捉えた北東から南西に伸びるアウトフロー構造に加え、このアウトフローと垂直な方向に伸びる構造を今回新たに捉えた (図 6.2.3)。H_2CO と $C^{18}O$ では、原始星付近で北西から南東に細く伸びる構造を示し、H_2CO ではさらにその構造に続いて伸びるアーク構造が見られた。この構造は、衝撃波領域をトレースすることが知られている SO, SiO, CH_3OH でも見られる。このことから、アーク構造が衝撃波領域であり、その速度が遅いことから新たに捉えた構造は過去のアウトフローであることがわかった。このように、非常に若い原始星で原始星進化に伴うアウトフローの方向変化を初めて観測的に示した。

【L483 の原始星付近のアウトフロー構造】
L483 のアウトフローを ALMA で観測し、CS((J = 5-4) 輝線の観測結果を用いてその構造について議論した。これまで、この天体では、原始星から 1000 au 程度離れた領域でアウトフローの構造と、原始星から 100 au ほど離れた場所でのアウトフローの向きの変化が示されていた。それらの解析においては、アウトフローのモデルとして、原始星からの距離がアウトフローの半径の 2 乗に比例する 2 次式を用いていた。しかし、このモデルでは原始星近傍 (100 au

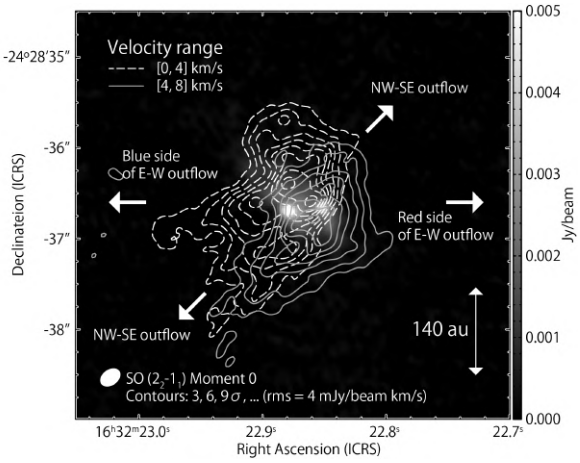


図 6.2.2: Integrated intensity maps of the SO ($J_N = 2_2 - 1_1$; contours) line overlaid on the 1.3 mm continuum map (gray scale) observed with ALMA. The sold contours represent the red-shifted component, while the dotted contours the blue-shifted one. The SO emission traces the northwest-southeast (NW-SE) outflow lobes. The northeastern and southwestern sides of the outflow are blue-shifted and red-shifted, respectively, likely due to the rotating motion around the outflow axis.

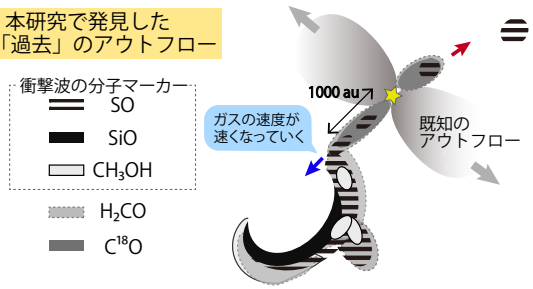


図 6.2.3: Schematic picture of the molecular distributions around IRAS 15398–3359. A structure along the top right to bottom left is a past outflow from IRAS 15398–3359 found in this study.

程度) におけるアウトフローの形状を十分に説明できなかった。そこで、この領域では、アウトフローの形状は原始星からの距離がアウトフローの半径の 4 乗に比例するモデルを適用したところ、よく観測結果を表すことができることがわかった。これは原始星の近傍においてアウトフローは従来考えられてきたものより急速に広がった後にコリメートされるような形状であることを示す。この結果はアウトフローの流体シミュレーション結果の先行論文と矛盾

しない。

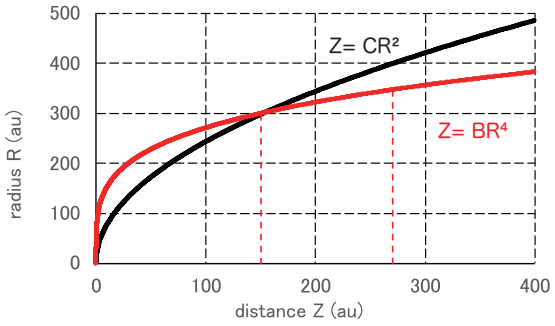


図 6.2.4: The fourth Power model and the conventional parabolic model of the L483 outflow. A horizontal axis represents the distance from the protostar along the outflow axis, while a vertical axis the radius of the outflow at a given distance.

【中質量原始連星 NGC2264CMM3 のディスク・エンベロープ構造】
NGC 2264 CMM3A, CMM3B は太陽系から 738 pc の距離にある原始連星系天体である。以前の ALMA を用いた観測により、CMM3A では多くの有機分子輝線が検出される一方、CMM3B では有機分子輝線がほとんど検出されないことが報告されていた。ALMA による高空間分解能 (∼0.1″) 観測の結果、CMM3A のダスト連続波放射がアウトフローと垂直方向に伸びた分布をしていることがわかった。この分布は 2 つのガウス分布の重ね合わせでよく説明することができた。2 つの分布は原始星周りのディスク構造と、その周りのエンベロープ構造を表していると考えられる。また、CMM3A, CMM3B のスペクトル指数 α が 2.5 程度と、星間物質のスペクトル指数 3.5-4.0 と比較して小さい値であることがわかった (図 6.2.5)。この原因としては、ダストの成長などに加えて、CMM3A, CMM3B の光学的厚みの影響が考えられる。また、CMM3A で検出される分子輝線の強度はディスク面上で低くなっていた。このことからも、この天体のダストが光学的に厚いことが示唆される。CMM3B で有機分子輝線がほとんど検出されない理由も、光学的に厚いダストに輝線が隠されているためであると考えられる。

【Class I 原始星 Elias 29 において星形成が周辺環境に与える影響】Elias 29 はへびつかい座にある Class I 後期の原始星であり、ALMA の観測データ (FAUST) の解析により周辺環境が明らかになった。$C^{18}O$、SO ではアウトフローキャビティ―のような構造が見られた。これは過去の論文の広域のアウトフローの方向と一致しており、初めて原始星近傍におけるアウトフロー構造を捉えることができた。また、原始星左側に赤方偏移したガスの小塊 (Blob) 構造が見つかった。この位置で速度が極めて高速度側に大きく変化しており、その形状からこの構造は bow-shock であると考えられる。さらに、原始星から南に 500 au 離れたところにあるリッジ構造の速度構造を解析

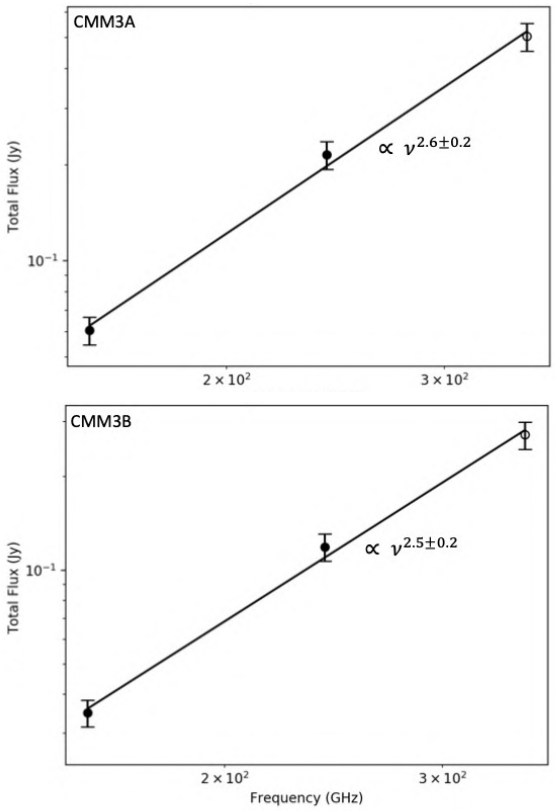


図 6.2.5: Spectral energy distribution (SED) of NGC 2264 CMM3A (upper panel) and CMM3B (lower panel).

したところ、非常に複雑な様相を呈しており、アウトフローキャビティ―との交点で両者の衝突が起こっていることが示唆された (図 6.2.6)。そのため、リッジ構造の化学組成には勾配が見られる。たとえば、この衝突位置で DCO^+ と $H^{13}CO^+$ の柱密度の比（重水素濃縮度）が極端に低くなっていることがわかった。これは、衝突による温度上昇を反映している可能性が高い。以上のように、Class I にも関わらずこの原始星はまだ活発に周辺環境が活発に変化していることがわかった。

6.2.4 機械学習による観測データ解析

ALMA は卓越した分光能力を持っており、広い周波数範囲を一度に観測できる。そのため、天体によっては非常に多くのスペクトル線が観測される。これらを総合的に解析し、物理構造や化学組成分布を明らかにするために、機械学習の導入を進めている。現在、教師あり機械学習として Support Vector Machine を、教師なし機械学習として Principal Component Analysis を用いた解析を行っている。さらに、これ

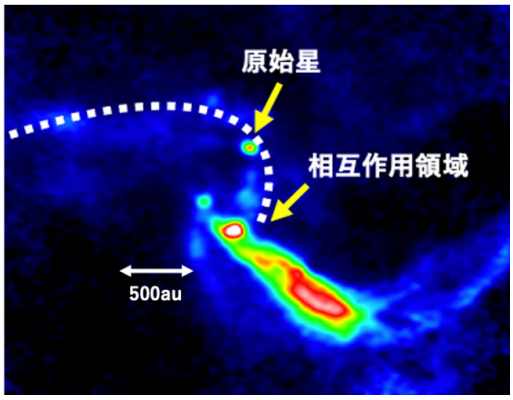


図 6.2.6: The ALMA image of the SO distribution around the protostar of Elias 29. A parabolic feature represents an outflow cavity, which interacts with the southern ridge component. This interaction is verified by a complex velocity structure of the ridge.

らを超えた方法論の開拓にも取り組みつつある。

【機械学習を用いた分子ガスの速度構造の分類】
原始星に付随する円盤/エンベロープ構造を成すガスの速度構造は、ケプラー回転円盤と回転しながら落下するエンベロープガスの二つに大別される。機械学習 (Support Vector Machine) を用いた解析を導入し、これら二種類の速度構造を分類する学習器を作成した。確率的勾配降下法を採用し、モデル計算による 3 次元の擬似観測データを用いて学習を行った結果、非常に高い正答率 (99.9%) での分類を実現した。この学習器を実際の ALMA 観測データに適用し、速度構造を分類した。その結果、デブリ円盤 49 Ceti で観測された CO 輝線と炭素原子 ([CI]) 輝線は、ケプラー回転円盤を捉えていることが支持された。この結果は過去の報告と矛盾しない。また、原始星天体 IRAS 16293–2422 で観測された 18 本の分子輝線を分類し、分子種によって異なる構造が捉えられていることがわかった。とくに、$C^{17}O$ 輝線は回転しながら落下するエンベロープガスを捉えていることが支持され、このことは以前に報告したカイ二乗検定による結果と一致する。

【速度構造も含めた 3 次元データに対する Principal Component Analysis (PCA): 低質量原始星 L483】
L483 は、Aquila Rift 領域にある dark cloud であり、その中に IRAS 18148–0440 という Class 0 低質量原始星が存在する。この天体は、数 1000 au スケールで不飽和炭素鎖分子に恵まれ、数 10 au スケールで複雑な有機分子 に恵まれるハイブリッドな化学組成の特徴を持つ。ALMA による観測で、原始星近傍において 23 種類の分子輝線を検出した。近年、観測性能の向上により、多くの分子輝線が検出されるようになり、これらの化学組成分布の特徴を一つずつ目で見て判断するのは困難になってきている。そこで我々は、この天体の速度構造も含んだ 3 次元のデータに対して、機械学習の 1 つである主成分分析 (PCA) を行い、その有効性を確かめた。速度構造も含めた PCA によって、観測データを余すことなく活用し、化学組成分布の特徴を先入観なく分類できる。PCA の結果、生命前駆体分子の一つとして知られている NH_2CHO (フォルムアミド) の分布が他の有機分子と異なるなど、原始星近傍における化学組成進化の手がかりとなる傾向を捉えた (図 6.2.7)。この手法は、今後膨大な観測データの新たな手法として期待される。

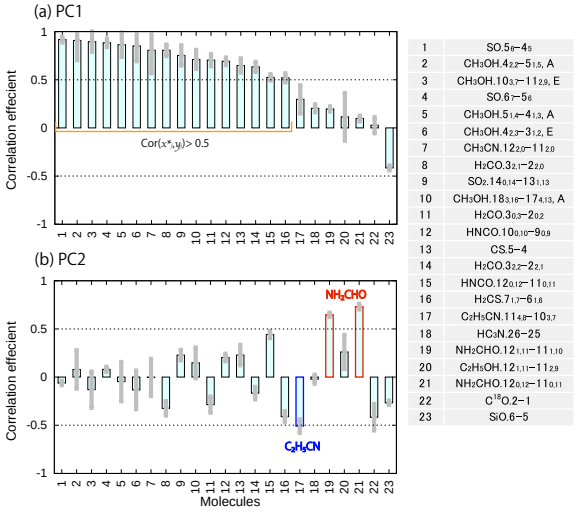


図 6.2.7: Correlation coefficients derived by the principal component analysis for the cube data observed toward L483. (a) Correlation coefficients of molecular lines with the first principal component (PC1). (b) Those with the second principal component (PC2).

＜報文＞

(原著論文)

[1] Okoda, Y., Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., & Yamamoto, S., “Molecular Distributions of the Protostellar Envelope and the Outflow of IRAS 15398–3359: Principal Component Analysis”, ApJ, 900, 40 (2020)

[2] Ebisawa, Y., Sakai, N., Menten, K.M., Oya, Y., & Yamamoto, S., “Temperature Structure of the Pipe Nebula Studied by the Intensity Anomaly of the OH 18cm Transition”. ApJ, 904, 136 (2020)

[3] Oya, Y. & Yamamoto, S., “Substructures in the Disk-Forming Region of the Class 0 Low-Mass Protostellar Source IRAS 16293–2422 Source A on a

10 au Scale", The Astrophysical Journal, 904, 185 (2020).

[4] Okoda, Y., Oya, Y., Francis, L., Johnstone, D., Inutsuka, S., Yamamoto, S., & FAUST team members, "FAUST II. Discovery of a Secondary Outow in IRAS15398–3359: Variability in Outow Direction during the Earliest Stage of Star Formation?", ApJ, 910, 11 (2021)

(学位論文)

[5] 柴山良希、「ALMA による原始連星系天体 NGC 2264 CMM3 の化学・物理構造の探究」(修士論文)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演 (指定なきものは口頭)

[6] Oya, Y., "Temperature Structure of the Pipe Nebula Studied by the Intensity Anomaly of the OH 18 cm ", The Early Phase of Star Formation 2020, July 12–17, 2020, Germany (Canceled)

[7] Okoda, Y, Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., & Yamamoto, S., "Chemical and Physical Structures around the Very Low Mass Protostellar Source IRAS 15398–3359", The Early Phase. of Star Formation 2020, July 12–17, 2020, Germany (Canceled)

[8] Oya, Y., "Circummultiple/circumstellar Structures and Outflow near its Launching Point: the IRAS 16293–2422 Source A Case", Five years after HL Tau: a new era in planet formation, December 7–11, 2020, Online

[9] Okoda, Y., Oya, Y., Francis, L., Johnstone, D., Inutsuka, S., Yamamoto, S., & FAUST team members, "Dynamic Structure around the Protostar with a Key to Disk Formation", Five years after HL Tau: a new era in planet formation, Virtual conference, Dec 7—11,2020, Online

[10] Oya, Y., "Circummultiple/Circumstellar Structures and Outflow near its Origin Point: the Multiple System IRAS 16293–2422 Source A Case", East Asian ALMA Science Workshop 2021, February 17–19, 2021, Online

招待講演

[11] Yamamoto, S., "Organic Molecules in Disk Forming Regions", 43rd COSPAR Scientific Assembly, F3.5, January 28 – February 4, 2021, Online

(国内講演)

【天文学会 2020 年秋季年会、オンライン開催、2020 年 9 月】

[12] 大屋瑶子、山本智、「Class 0 低質量原始星天体 IRAS 16293–2422 Source A のアウトフロー構造」、P131a

[13] Yuki Okoda, Yoko Oya, Logan Francis, Doug Johnstone, Shu-ichiro Inutsuka, Satoshi Yamamoto, and FAUST team members,「Discovery of the Secondary Outow Structure in IRAS15398–3359」、P132a

[14] 柴山良希, 渡邉祥正, 大屋瑶子, 山本智「ALMA による原始星天体 NGC 2264 CMM3A の回転構造の検出」、P128a

[15] 藤田孝典、大屋瑶子、山本智 、「Class 0 原始星 L483 の 40 au スケールのアウトフロー 」、P134a

[16] 雑賀恵理、大屋瑶子、山本智「ALMA による Class I 原始星 Elias 29 のアウトフローの詳細構造」、P135a

【天文学会 2021 年春季年会、オンライン開催、2021 年 3 月】

[17] 大屋瑶子、癸生川博文、三宅祥太、山本智、「ALMA 観測による高解像度 3 次元データ解析への機械学習の導入」、P101a

[18] 大小田結貴, 阿部正太郎, 駒木彩乃, 大屋瑶子, 山本智 、「速度構造を含めた 3 次元データにおける Principal Component Analysis」、P102a

[19] Saiga,E., Oya, Y., Miotello, A., Ceccarelli, C., Codella, C., Chandler, C., Sakai, N., Yamamoto, S., & FAUST Team Members 「Star Formation Feedback to a Parent Cloud: The Elias 29 Case」、P103a

[20] 柴山良希, 渡邉祥正, 大屋瑶子, 坂井南美, Ana López-Sepulcre, Sheng-Yuan Liu, Yu-Nung Su, Yichen Zhang, 酒井剛, 廣田朋也, 山本智 「ALMA による原始連星系天体 NGC 2264 CMM3 の高分解能観測」、P111a

【その他の国内講演】

[21] 大屋瑶子、大小田結貴、「極めて若い原始星天体に付随した円盤構造とその進化の観測的研究」、新学術領域「星惑星形成」大研究会、2020 年 9 月 30 日–10 月 3 日、オンライン開催

[22] Yuki Okoda, Yoko Oya, Logan Francis, Doug Johnstone, Shu-ichiro Inutsuka, Satoshi Yamamoto, and FAUST team members, 「非常に若い超低質量原始星における第二のアウトフロー構造」、分子雲から原始星誕生までを追う 新時代の星形成モデル構築に向けて 、2020 年 12 月、オンライン開催

[23] 大屋瑶子、「連星系 IRAS 16293–2422 A を取り巻く円盤構造と原始星 円盤、およびアウトフローの関係」、惑星系形成若手研究会、2021 年 2 月 2 日–24 日、オンライン開催

招待講演

[24] 山本智、「物質をみること」、宇宙電波懇談会シンポジウム 2020 年度：「極限性能で切り開く電波天文学」、2020 年 12 月 21 日–22 日、オンライン開催

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活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 $|\langle\cos\theta\rangle| \sim 0.34$ 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。

2020 年度の進展

—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による配向制御—

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として、最近、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、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 (Je Hoi Mun, Hirofumi Sakai, and Rosario González-Férez, Phys. Rev. A **99**, 053424 (2019)) 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 θ に加え、方位角 ϕ 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 ϕ 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。本研究は、Md. Maruf Hossain and Hirofumi Sakai, "All-optical orientation of linear molecules with combined linearly and elliptically polarized two-color laser fields," J. Chem. Phys. **153**, 104102 (2020) に発表した。

上記の論文では、タイトルに書かれている通り、直線分子を対象とした 1 次元的な分子配向について考察した。上述した通り、楕円偏光した第 2 高調波パルスを用いているので、原理的に 3 次元的配向制御に拡張できる。そこで、本年度は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で 3 次元的な配向制御の生成ダイナミクスを調べるため、数値計算コードの開発に着手した。相互作用ハミルトニアンの導出、必要な行列要素の計算を行った上で、高次の Crank-Nicolson 法を用いて数値計算コードの開発を進めた。次年度、引き続き本数値計算コードの開発を課題の一つとしたい。

6.3.2 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

最近、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))。

上記の理論提案では、レーザー光のパルス幅が十分長く、レーザーと分子の相互作用が断熱的に進む

と仮定して、時間に依存しない Schrödinger 方程式を数値的に解き、レーザー光の強度と試料分子の初期回転温度について、現実的な実験条件下でマクロな回転対称性をもつ分子アンサンブルが生成可能であることを示した。本年度、レーザーパルスをそのピーク強度付近でプラズマシャッターにより急峻に遮断した後に、レーザー電場のない条件下でのマクロな回転対称性をもつ分子アンサンブルの生成ダイナミクスを探究すべく、時間依存 Schrödinger 方程式を数値的に解く計算コードを開発し、以下の知見を得た。(i) 回転基底状態を初期状態とした場合には、レーザー電場に対する分子の揃い方を表すオーダーパラメータはナノ秒レーザーパルスの強度に追随した時間発展を示す。(ii) 試料分子がレーザー電場の偏光面内に揃う度合いを示すオーダーパラメータ $\langle\cos^2\theta\rangle$ が、一般の分子配列や配向の 1 周期と同じ周期をもつのに対し、2 波長レーザー電場で形成される 3 回対称なレーザー電場トラジェクトリーに揃う度合いを示すオーダーパラメータ I_Δ は、その 4 倍であることを見出した。(iii) さらに、I_Δ の 1 周期後に極大値を示すタイミングに合わせ、3 回対称な電場トラジェクトリーをもつ 2 波長フェムト秒レーザーパルスを照射することにより、I_Δ を最も効率的に増大できることも見出した。

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。この様な実験装置を昨年度開発し、所期の性能が得られることを確認した。

今年度、OCS 分子を試料とした予備的な実験を行うことにより、実験条件の最適化を進めた。OCS 分子の様な直線分子でも、3 回対称な分子アンサンブルを生成できることは、数値計算で確認済みである。予備的な実験では、フラグメントイオンの引き出し電極への印加電圧の最適化、互いに逆回り円偏光したナノ秒 Nd:YAG レーザーの基本波パルスと第 2 高調波パルスの偏光状態の最適化、プローブ用フェムト秒 Ti:sapphire レーザーパルスの偏光状態の最適化 (できるだけ完全な円偏光が望ましい) などを進めた。併せて、フラグメントイオンの観測と同時にナノ秒 Nd:YAG レーザーの 2 波長間の相対位相の安定性をモニターできるシステムも構築した。最近、3 回対称な分子アンサンブルの生成を示唆する実験データが得られるようになってきた。次年度は、実際に BX_3 タイプの試料分子を用い、マクロな 3 回対称性をもつ分子アンサンブルの生成に関する世界初の原理実証を行いたい。

6.3.3 PAL-XFEL 施設の軟 X 線自由電子レーザーを用いた光電子計測

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の探究するため、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 (6×10^{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、$\sim$ 1 ps のジッターをもつことが分かった (S. Minemoto *et al.*, J. Phys. B **51**, 075601 (2018))。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 ではまだ軟 X 線 FEL パルスが供給されていない。そこで、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、2019 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 で開発してきた X 線光電子回折装置を PAL-XFEL に移設し、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 3d 光電子やヨードベンゼン分子の I 3d 光電子の角度分布測定に成功した。

本年度は、コロナ禍の影響で現地でのビームタイム実験を実施することができなかった。このため、2019 年 6 月に測定したデータのさらなる解析に注力した。Xe 3d 光電子については、スピン軌道相互作用によって分裂した副殻成分 $3d_{5/2}$ と $3d_{3/2}$ それぞれについて、角度分布の非対称性パラメータ β の値を誤差 ± 0.05 以下の高い確度で求めた。他の実験や理論を含めて、Xe 3d 光電子についてこれまでに得られている非対称性パラメータ β の光子エネルギー依存性を調べたところ、理論値が実験値より 20%程度大きく見積もられていることを見出した。理論値と実験値の乖離の原因を探れば、内殻電離のダイナミクスをより深く理解できると期待される。

また、ヨードベンゼン分子について、分子の構造情報をどこまで抽出できるか検討を進めている。2019 年のビームタイム実験では、軟 X 線 FEL パルス の集光径が大きく (直径 50-80 μm 程度)、分子配列用 YAG レーザーパルスとの空間的重なりが良好ではなかった。この状況下でも、超閾イオン化過程の光電子は主として YAG パルスの強度が高い試料から生成すると考えられ、比較的配列度の高い分子の光電子回折像とみなせる。フラグメントイオンのシミュレーションから、分子試料の配列度 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ は最大 0.75 程度に達していると見積もられており、この配列度における超閾イオン化過程の光電子スペクトルに対する理論シミュレーションを進めている。

本研究は、高エネルギー加速器研究機構の柳下明名誉教授、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 (韓国、Max Planck POSTECH) との共同研究である。

6.3.4 その他

ここで報告した研究成果は、酒井広文研究室のメンバーと客員共同研究員として受け入れた Md. Maruf Hossain 氏（日本アイ・ビー・エム株式会社)、水流翔太氏 (デンマーク工科大学、のちルール大学ボーフム)、及び、学部 4 年生の特別実験で本研究室に配属された洪木子さん (S セメスター)、深瀬実来君、福元孝晋君 (A セメスター) の活躍によるものである。洪木子さんは、特別実験での活躍などが高く評価され、令和 2 年度理学部学修奨励賞を受賞した。おめでとう。なお、研究項目 6.3.2 の実験は、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たものである。ここに記して謝意を表する。

＜受賞＞

[1] 酒井広文、2020 年度日本分光学会賞（学会賞)、「高強度レーザー電場を用いた気体分子の配列・配向制御技術とその応用」、2020 年 5 月 28 日.

[2] 洪木子、令和 2 年度理学部学修奨励賞、「フィールドフリーな条件下でのマクロな 3 回対称性をもつ分子アンサンブル生成のダイナミクス」、2021 年 3 月.

＜報文＞

(原著論文)

[3] Md. Maruf Hossain and Hirofumi Sakai, "All-optical orientation of linear molecules with combined linearly and elliptically polarized two-color laser fields," J. Chem. Phys. **153**, 104102(11 pages) (2020).

[4] Shinichirou Minemoto, Wataru Komatsubara, and Hirofumi Sakai, "Comparative studies of the degrees of orientation of CO molecules pumped by intense femtosecond two-color pulses based on high-order harmonic generation and Coulomb explosion imaging," J. Phys. B **53**, 235101(11 pages) (2020).

[5] S. Minemoto, T. Teramoto, T. Majima, T. Mizuno, J. H. Mun, S. H. Park, S. Kwon, A. Yagishita, and D. Toffoli, "Photoelectron angular distribution studies for two spin-orbit-split components of Xe 3d subshell: A critical comparison between theory and experiment," to appear in J. Phys. B.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[6] Shinichirou Minemoto, Takahiro Teramoto, Takuya Majima, Tomoya Mizuno, Je Hoi Mun, and Akira Yagishita, "X-ray photoelectron angular distributions from organic molecules by femtosecond x-ray free electron lasers at PAL-XFEL," The 22nd International Conference on Ultrafast Phenomena, Shanghai, China, presented on November 16th, 2020 (online).

(国際会議)

招待講演

[7] 酒井広文、2020 年度日本分光学会賞 (学会賞) 受賞講演、「高強度レーザー電場を用いた気体分子の配列・配向制御技術とその応用」、2020 年度日本分光学会年次講演会、オンライン開催、2020 年 10 月 27 日 (火).

一般講演

[8] 峰本紳一郎、柯童、山田涼平、酒井広文、「マクロな 3 回対称性をもつ分子アンサンブル観測用イオンイメージング装置の開発」、2020 年第 81 回応用物理学会秋季学術講演会、オンライン開催、2020 年 9 月 10 日 (木).

[9] 洪木子、酒井広文、「フィールドフリーな条件下でのマクロな 3 回対称性をもつ分子アンサンブル生成のダイナミクス」、レーザー学会学術講演会第 41 回年次大会、オンライン開催、2021 年 1 月 18 日 (月).

[10] Ke Tong, Mirai Fukase, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Attempt to form a gaseous crystal with macroscopic three-fold symmetry,” 2021 年第 68 回応用物理学会春季学術講演会、オンライン開催、2021 年 3 月 18 日 (木).

＜その他＞

[11] 酒井広文、「独創的研究に関する私見」、レーザー研究、**48**, 329–330 (2020).

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、光と物質の相互作用を通じ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。さらにこの領域で、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。これらと並行して、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の開拓を進めている。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（COI STREAM）「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」、内閣府 SIP「光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術」などの産学連携による研究開発活動も推進するとともに、文科省/JST Q-LEAP「次世代レーザー技術領域」においてレーザー加工の学理を追及している。そして、これらの活動を通して、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 相を形成しうることが予想されてきた。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、従来の検出手段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急上昇し、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

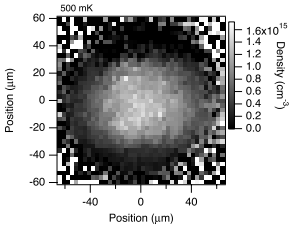


図 6.4.1: Lyman イメージングの結果 (格子温度 500 mK)

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を測定する実験系を構築した。現在励起子温度を 100 mK 台に保ちつつ誘導吸収測定を行う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。

また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凝縮体を検出する上で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。その結果、励起子の空間分布が熱分布で定義される分布に到達するためにはフォノンとの相互作用の少ない極低温の環境を実現することが極めて重要であることを明らかにした。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。このことを踏まえ上記の誘導吸収測定から励起子密度の空間分布をイメージング (図 6.4.1) することで、BEC 転移特有の局所的な高密度分布が励起パワーに依存して閾値的に現れる様子を捉える実験を進めている。

極低温ボース・フェルミ混合原子気体による量子物性の探索

極低温原子気体で実現される量子多体系は普遍的な物理法則に従う。例えば相転移時の臨界現象やフェルミ原子系で実現される BCS-BEC クロスオーバーの物理等である。極低温原子気体で電子系や核子・クォーク系と同じ物性を示す粒子系を再現し、それらの物性を探索することにより、相互に物理の理解を深めることはもちろん、新規の物理現象の発見も期待できる。特に我々は極低温ボース・フェルミ混合原子気体を有しているため、これまで研究できなかった新規の臨界現象に挑むことが可能である。この背景のもと本年度は、BEC 転移における臨界指数について着目した研究を行った。具体的には、フェッシュバッハ共鳴を用いた散乱長のコントロールによって極力ボース粒子間相互作用を抑制した ^{7}Li ボース粒子系において、^{6}Li のフェルミ粒子系を冷媒とする symapathetic cooling を通じて BEC 転移を引き起こすことに成功した。ボース粒子間で弾性散乱がなく、熱浴との相互作用で冷えるボース粒子が如何にボース凝縮に至るかは、実験的にも理論的にも研究されていない。一般的に二次の相転移は Kibble-Zurek 理論で説明できるが、ボース粒子間で弾性散乱のない場合は適応外である。この転移におけるボース粒子系の熱力学量を測定することにより臨界指数を抽出し、ボース系の BEC 転移について議論を深めた [11]。

6.4.2 非自明な光学現象の探索とその応用

誘電体ナノメンブレン人工構造を用いた真空紫外コヒーレント光発生と円偏光制御

波長 100~200 nm の真空紫外領域におけるコヒーレント光源は、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おり、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。近年発展が著しい高安定かつ高強度な超短パルス光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。

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。厚さ 300 nm の SiO_2 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 μm 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 [4]。複数のメンブレン材料を調べた結果、SiO_2 メンブレンの場合に 1 パルスあたりで発生するフォトン数が最大となり、真空紫外分光用プローブ光源としての応用が可能となる、約 10^7 個に達することが明らかになった。

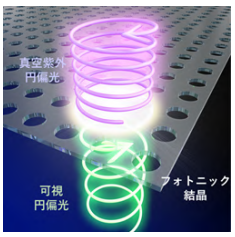


図 6.4.2: フォトニック結晶ナノメンブレンを用いた真空紫外領域におけるコヒーレント円偏光発生

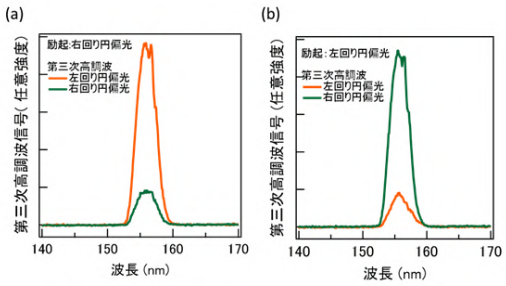


図 6.4.3: フォトニック結晶ナノメンブレンからの真空紫外第三次高調波スペクトル (a) 右回り円偏光励起 (b) 左回り円偏光励起

均一なナノメンブレンは等方的であるため、円偏光入射による高調波発生は禁制となる。我々は、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の、形状の離散回転対称性を適切に導入することによって、非線形光学過程における円偏光選択則を制御することをこれまでに見出している。この考え方に基づいて、上記のナノメンブレンに 4 回回転対称性を有する人工ナノ構造を作製し、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 (図 6.4.2)[6]。厚さ 48 nm の γ-Al_2O_3 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 の第三次高調波スペクトルを観測することに成功した (図 6.4.3)。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。さらに、数値計算シミュレーションによって、構造のわずかな異方性が、発生する高調波の円偏光度に大きく影響することも明らかにした。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。

これらの研究成果を含む当該分野の Perspective article を、[5] に発表した。

フェムト秒レーザー加工における加工深さ深さの入射光強度依存性の新規計測手法の開発

レーザー加工は、炭素繊維複合材料やガラスのような加工の難しい材料に適用できる新しい製造加工技術として、近年大変注目されている。レーザー加工を設計・制御可能な技術として産業応用を進めていくためには、レーザー加工の際に生じている複雑な物理的・化学的現象の把握と、その原理の解明が不可欠となる。最近の研究により、近年目覚ましい進歩を遂げている機械学習や大規模第一原理計算との組み合わせが、その実現に向けた強力な手法となることも明らかになってきたが、そのためには、強度、波長、パルス幅といった、レーザー光のさまざまな条件に対して、加工穴の深さや形状などに関する大量のデータを収集することが必要となる。しかしながら、レーザー加工は不可逆な現象であるために、実験には大量のレーザー加工穴の作製とそれらの測定が必要となるため、実験可能な回数が限られてしまい、系統的かつ大量の学習データを取得することが困難という問題があった。

今回、我々は、超短パルスレーザーの照射による物質の除去深さの入射光強度依存性について、高精細なイメージング技術を活用し、たった一つのレーザー加工穴から数十万点のデータを一度に求めることができる新たな手法 (フルーエンスマップ法) を開発した [10]。本研究では、レーザーパルスの強度分布が空間的に非一様であることに着目して、自作ビームプロファイラで測定したレーザー光の強度分布と、レーザー顕微鏡で測定した加工穴の深さ分布とを厳密に重ね合わせることにより、場所ごとのレーザー光強度と加工深さの関係を可視化することに成功した (図 6.4.4 左)。これによって、これまでの手法では１つの加工穴からは加工穴深さや穴半径などの限られた数点の情報しか得ることができなかったのに対し、本手法ではたった一つの加工穴から、レーザー光強度とその加工深さに関する数十万点のデータを一度に取得することが可能となった (図 6.4.4 右)。本手法によって、機械学習に必要となるデータ取得の効率の劇的な向上や、第一原理計算結果と比較するための信頼性の高いデータの系統的な取得が可能となり、レーザー加工の原理解明と制御可能性の向上に向けて大きな役割を果たすことが期待される。

6.4.3 新規コヒーレント光源開発と新しい分光手法開拓

高次高調波を用いた真空紫外領域の精密分光計測

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

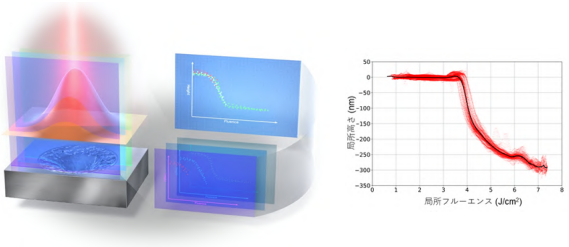


図 6.4.4: (左) 開発したフルーエンスマップ法の概念図 (右) 局所レーザー光強度 (フルーエンス) と局所高さの関係を表すヒストグラム (フルーエンスマップ)

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。[1]

更に、EUV 領域における応用上最も重要な波長である 13.5 nm に最適化した高調波の発生とそれを用いた干渉測定も進めている。具体的には希ガスにアルゴンを採用し、基本波 1300 nm の光を絞り込んで高調波発生を行い、テストサンプルであるシリコンの屈折率測定などを進めている。

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。

本年度はより高強度に光励起され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ている。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ている。更に、光物性物理学において基礎となる電子正孔系を光電子分光測定で観測した場合の結果を、他研究室と共に理論的な計算と照らし合わせながら議論を進めた [27, 39]。

6.4.4 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 達成に向けた活動に沿うもの

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] D. Hirano, Y. Nagakubo, J. Omachi, K. Yoshioka, and M. Kuwata-Gonokami: Measurement of complex refractive index with tunable extreme ultraviolet high harmonic source, Opt. Exp. 28, 15148 (2020).

[2] N. Tsuji, W. Ootani, L. Liu, K. Yoshioka, Y. Morita, and M. Kuwata-Gonokami: Study on saturation of SiPM for scintillator calorimeter using UV laser, J. Instrum. 15, C05052 (2020).

[3] P. Xia, M. Kuwata-Gonokami, and K. Yoshioka: Geometrical analysis of Kerr-lens mode-locking for high-peak-power ultrafast oscillators, Jpn. J. Appl. Phys. 59, 062002 (2020).

[4] Kuniaki Konishi, Daisuke Akai, Yoshio Mita, Makoto Ishida, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami: Tunable third harmonic generation in the vacuum ultraviolet region using dielectric nanomembranes, APL Photonics 5, 066103 (2020).

[5] Kuniaki Konishi, Tetsuo Kan, Makoto Kuwata-Gonokami: Tunable and nonlinear metamaterials for controlling circular polarization, Journal of Applied Physics 127, 230902 (2020).

[6] Kuniaki Konishi, Daisuke Akai, Yoshio Mita, Makoto Ishida, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami: Circularly polarized vacuum ultraviolet coherent light generation using a square lattice photonic crystal nanomembrane, Optica 7, 855 (2020).

[7] R. Takaku, S. Hanany, H. Imada, H. Ishino, N. Katayama, K. Komatsu, K. Konishi, M. Kuwata-Gonokami, T. Matsumura, K. Mitsuda, H. Sakurai, Y. Sakurai, Q. Wen, N. Y. Yamasaki, K. Young, J. Yumoto: Broadband, millimeter-wave anti-reflective structures on sapphire ablated with femto-second laser, Journal of Applied Physics 128, 225302 (2020).

[8] Kazuki Okamoto, Teppei Ebina, Naoki Fujii, Kuniaki Konishi, Yu Sato, Tetsuhiko Kashima, Risako Nakano, Hiroyuki Hioki, Haruki Takeuchi, Junji Yumoto, Masanori Matsuzaki, Yuji Ikegaya: Tb^{3+}-doped fluorescent glass for biology, Science Advances 7, eabd2529 (2021).

[9] Ryo Imai, Kuniaki Konishi, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami: Direct writing of optical waveguide in fused silica by fundamental beam of Yb:KGW femtosecond laser, OSA Continuum 4, 1000 (2021).

[10] Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Hiroharu Tamaru, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami: Direct correlation of local fluence to single-pulse ultrashort laser ablated morphology, Communications Materials 2, 38 (2021).

(博士論文)

[11] Chen Yiping: Towards the creation of an ideal Bose gas in a Bose-Fermi mixture（2020 年 12 月, 東京大学理学系研究科）

[12] 小松原　航: 高調波発生における偏光の選択則と伝搬の効果の探求（2021 年 3 月, 東京大学理学系研究科）

(修士論文)

[13] 川野　将太郎: 超短パルスレーザーアブレーションの時間分解複素透過率イメージング（2021 年 3 月, 東京大学理学系研究科）

＜特許＞

[14] 平野大輔、五神真、吉岡孝高: 光学定数測定装置および光学定数の測定方法、光学定数の計算方法国際出願 PCT/JP2020/030878 (2020/8/14)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[15] Y. Tajima, K. Yamada, K. Shu, A. Ishida, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, E. Chae, and K. Yoshioka: Development of a Sub-microsecond Broadband Pulsed Laser for Cooling Positronium, Conference on Lasers and Electro-Optics 2020 (CLEO 2020), all-virtual (2020/5/14)[Poster]

[16] Ayako Mizushima, R Ranga Reddy, Kuniaki Konishi, Etsuko Ohta, Tomoya Ezawa, Akio Higo, Makoto Kuwata-Gonokami, Yoshio Mita: Assessment of Annealing Treatment for Wrinckleless SiO_2 Membrane, DTIP2020 (Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS) (2020/6/23).

[17] Ryohei Yamada, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami: Observation of Luminescence Dynamics of Plasma Excited by Femtosecond Laser Ablation of Copper, The 14th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO PR 2020) (2020/8/5).

[18] Kuniaki Konishi, Daisuke Akai, Yoshio Mita, Makoto Ishida, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami: Circularly Polarized Third Harmonic Generation in Vacuum Ultraviolet Region Using Square Lattice Photonic Crystal Nanomembrane, The 14th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials 2020) (2020/9/29).

[19] Kuniaki Konishi, Hiroya Aoki, Mizuho Matoba, Kentaro Soeda, Shuichi Yokobori, Hiroharu Tamaru, Norikatsu Mio, Shinsuke Matsui, Makoto Kuwata-Gonokami, Junji Yumoto: Terahertz Polarizer Fabricated By 3D Printing Technology, 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2020) (2020/11/9).

[20] Takeshi Momose, Kuniaki Konishi, Yu Zhao, Hirotaka Morishita, Tetsuya Tsuchida, Yuyuan Huang, Hiroyuki Yasukochi, Kentaro Soeda, Momoko Deura, Yusuke Shimoyama, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami, Yukihiro Shimogaki: Supercritical Fluid Deposition Technique Enabling Metallic Coating Onto 3D-printed Polymer For Fabrication Of High-aspect-ratio THz Devices, 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2020) (2020/11/10).

[21] Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Mizuho Matoba, Ryota Takaku, Yuki Sakurai, Nobuhiko Katayama, Tomotake Matsumura, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami: Broadband Anti-Reflection Moth-Eye Structures Realized In The Above 1 THz Region By Laser Processing, 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2020) (2020/11/10).

[22] Yuyuan Huang, Kuniaki Konishi, Momoko Deura, Yusuke Shimoyama, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami, Yukihiro Shimogaki, Takeshi Momose: Material Evaluation For Inner Metallic Coating Of Hollow dielectric THz Waveguides, 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2020) (2020/11/13).

[23] Masataka Kobayashi, Yuusuke Arashida, Kanta Asakawa, Kuniaki Konishi, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami, Jun Takeda, Ikufumi Katayama: Ultrafast Dynamics in Ge2Sb2Te5 Thin Films during Laser-Induced Successive Surface Modification, The 22nd International Conference on Ultrafast Phenomena (UP 2020) (2020/11/16).

[24] Kuniaki Konishi, Daisuke Akai, Yoshio Mita, Makoto Ishida, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami: Tunable Third Harmonic Vacuum Ultraviolet Coherent Light Generation Using Dielectric Nanomembranes, The 22nd International Conference on Ultrafast Phenomena (UP 2020) (2020/11/17).

(国内会議)

招待講演

[25] 小西 邦昭: ナノメンブレンを用いた真空紫外コヒーレント光発生と円偏光制御, 第 5 回超高速光エレクトロニクス研究会 (2020/12/11). 招待講演

一般講演

[26] 山田 涼平、 櫻井 治之、小西 邦昭、三尾 典克、湯本 潤司、五神 真: 金属のフェムト秒レーザーアブレーションにおけるプラズマ発光ダイナミクスの観測, 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会、オンライン開催 (2020/9)

[27] 黒田聖也, 鈴浦秀勝, 津森貴大, 森田　悠介, 五神真:2 次元半導体励起子状態に対する角度分解光電子分光の理論, 日本物理学会　2020 年秋季大会, オンライン開催, (2020/9/8-11)

[28] 石田明, 橋立佳央理, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 山田恭平, 田島陽平, 周健 治, 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高密度ポジトロニウム生成材料の開発日本物理学会 2020 年秋季大会, オンライン開催, (2020/9/8).

[29] 山田 涼平, 櫻井 治之, 小西 邦昭, 三尾 典克, 湯本 潤司, 五神 真: 金属のフェムト秒レーザーアブレーションにおけるプラズマ発光ダイナミクスの観測, 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会 オンライン開催, (2020/9/9).

[30] 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からの真空紫外第三次高調波発生における材料・膜厚依存性, 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, オンライン開催, (2020/9/10).

[31] 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における構造異方性の影響第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, オンライン開催, (2020/9/10).

[32] 小西 邦昭, 青木 大弥, 的場 みづほ, 添田 建太郎, 横堀 秀一, 田丸 博晴, 三尾 典克, 松井 伸介, 五神 真, 湯本 潤司: 3D プリンターによる積層平板テラヘルツ偏光子の作製, 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, オンライン開催, (2020/9/11).

[33] 橋立佳央理, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 山田恭平, 田島陽平, 周健 治, 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 2020 年秋季大会, オンライン開催, (2020/9/16).

[34] 石田明, 橋立佳央理, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 山田恭平, 田島陽平, 周健 治, 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 2020 年秋季大会, オンライン開催, (2020/9/16).

[35] 石田明, 橋立佳央理, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 山田恭平, 田島陽平, 小林拓豊, 魚住亮介, 周健治, 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 (1), 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」, オンライン開催, (2020/12/11).

[36] 周健治, 田島陽平, 小林拓豊, 魚住亮介, 蔡恩美, 吉岡孝高, 橋立佳央理, 石田 明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 山田恭平, 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 (2), 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」, オンライン開催, (2020/12/11).

[37] 小林拓豊, 田島陽平, 魚住亮介, 蔡恩美 , 周健治, 吉岡孝高, 石田明, 橋立佳 央理, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 山田恭平, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 鈴木良一, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健: Ps のレーザー冷却実現に向けた光源開発及び温度測定実験, 低速陽電子実験施設研究会, オンライン開催, (2021/2/9).

[38] 魚住亮介, 田島陽平, 小林拓豊, 蔡恩美, 周健治, 吉岡孝高, 石田明, 橋立佳央 理, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 山田恭平, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 鈴木良一, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健: Ps のレーザー冷却の実証に向けた温度測定実験, 2020 年度量子ビームサイエンスフェスタ, オンライン開催, (2021/3/10). (ポスター)

[39] 黒田聖也，鈴浦秀勝，津森貴大，森田悠介，五神真: 2 次元半導体励起子状態に対する角度分解光電子分光の理論 II, 第 76 回年次大会　日本物理学会, オンライン開催, (2021/3/12-15)

[40] 周健治, 田島陽平, 小林拓豊, 魚住亮介, 蔡恩美, 吉岡孝高, 石田明, 橋立佳央 理, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 山田恭平, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 鈴木良一, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健: ポジトロニウムのレーザー冷却実験, 日本物理学会第 76 回年次大会, オンライン開催, (2021/3/13).

[41] 高久諒太，松村知岳，櫻井治之，小西邦昭，Shaul Hanany, Qi Wen, 桜井雄基, 片山伸彦, 山崎典子, 星野百合香, 湯本潤司, 五神真: 超短パルスレーザー加工を用いた CMB 偏光観測のためのアルミナ IR フィルターの広帯域反射防止構造の開発日本物理学会第 76 回年次大会オンライン開催, (2021/3/13).

[42] 小林真隆, 嵐田雄介, 浅川寛太, 金島圭佑, 小西邦昭, 湯本潤司, 五神真, 武田淳, 片山郁文: $Ge_2Sb_2Te_5$ 薄膜の LIPSS 形成におけるマルチパルス超高速ダイナミクスの観測日本物理学会第 76 回年次大会 オンライン開催, (2021/3/14).

[43] 石田明, 橋立佳央理, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 山田恭平, 田島陽平, 小林 拓豊, 魚住亮介, 周健治, 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第 76 回年次大会, オンライン開催, (2021/3/15).

[44] 小松原 航, 小西 邦昭, 湯本 潤司, 五神 真: 固体からの高調波発生における回転ドップラーシフトの観測第 68 回応用物理学会春季学術講演会 (オンライン開催, 2021/3/18).

[45] 小松原 航, 小西 邦昭, 湯本 潤司, 五神 真: Tight Focusing Limit における逆回り円偏光二色励起による高調波発生第 68 回応用物理学会春季学術講演会 オンライン開催, (2021/3/18).

[46] 小松原 航, 小西 邦昭, 湯本 潤司, 五神 真: 空気における 3 倍波発生メカニズムの解明第 68 回応用物理学会春季学術講演会 オンライン開催, (2021/3/18).

[47] 山田 涼平, 櫻井 治之, 小西 邦昭, 三尾 典克, 湯本 潤司, 五神 真: 空気との非線形相互作用による光パルスの強度分布変化のレーザー加工への影響第 68 回応用物理学会春季学術講演会 オンライン開催, (2021/3/18).

[48] Yuyuan Huang, Kuniaki Konishi, Momoko Deura, Yusuke Shimoyama, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami, Yukihiro Shimogaki, Takeshi Momose: Propagation loss of metal-coated dielectric parallel-plate waveguide in transverse-electric (TE) mode 第 68 回応用物理学会春季学術講演会 オンライン開催, (2021/3/18).

(セミナー)

[49] 小松原 航: 空気からの高調波発生における伝搬の効果と偏光の選択則光量子科学連携研究機構 (UTripl) セミナー 光量子科学研究センター (PSC) セミナー・フォトンサイエンス研究機構 (IPST) セミナー コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点 (ICCPT) セミナー 先端レーザーイノベーション拠点 (ALICe) セミナー 最先端融合科学イノベーション教育研究コンソーシアム (CIAiS) セミナー TACMI コンソーシアム オープンセミナー フォトンサイエンス国際卓越大学院プログラム（XPS）セミナー合同セミナー, 東京大学　(2021/3/25).

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．国内でも大型低温重力波検出器 KAGRA の観測が開始された．それに加え，将来計画である宇宙空間重力波アンテナ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，ダークマター探査実験，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 年の Advanced LIGO による重力波の初観測以降，重力波望遠鏡の感度は着実に向上し，観測ネットワークも拡大している．2017 年にはイタリアの Advanced Virgo が，そして 2020 年には日本の KAGRA が観測運転を開始した．2019 年 4 月から 2020 年 3 月まで行われた，O3 と呼ばれる最新の長期共同観測運転の際，KAGRA はドイツの GEO との共同観測運転 O3GK を行った [20]．LIGO，Virgo，KAGRA は 2020 年 4 月以降は観測を休止し，さらなる高感度化を目指した調整やアップグレードを行っている．2022 年には 4 回目の共同観測運転 O4 を開始する予定である．アメリカ，イタリア，日本の三極での共同観測が実現されれば，到来方向決定精度が各段に上がる．また，一般相対性理論に代わる重力理論の検証が可能となると期待されている．技術的には，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，次世代へ向けても重要な役割を担っている．

KAGRA の現状

KAGRA 計画は 2010 年にスタートした，岐阜県神岡の地下に大型低温重力波望遠鏡を建設する計画である．様々な試験運転を繰り返し，2020 年 2 月より初の観測運転を開始した．4 月には，連星中性子星の観測可能レンジとして最大 1 Mpc 程度の感度を実現した．これは当初の O3 観測時の最低目標感度である 8 Mpc には及ばないものの，GEO との共同観測により様々な知見が得られている．4 月 21 日には観測を終了させ，現在は干渉計の再調整と O3GK データの共同解析を進めている．

当研究室では KAGRA の根幹部分となる主干渉計の光学系や制御系の設計開発，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，O4 に向けた感度向上計画の立案や，感度を制限する各種雑音の評価を行った．KAGRA で用いている低温サファイア鏡の非一様性と複屈折が感度や制御に与える影響を干渉計シミュレーションなどを通じて調べた．また，観測運転時には実現できなかったシグナルリサイクリング共振器制御の実現に向けた干渉計シミュレーションも進めた．加えて，干渉計の動作安定性向上のための懸架系制御の設計光学定盤のカバーの設計，真空槽内光学系のアップグレードための設計，干渉計補助信号の感度見積もりなどを行った．さらに，KAGRA のアップグレード案を提案する [22] とともに，国立天文台の TAMA 施設を利用した，周波数依存スクイーズド真空場の生成実験も進めた．

周波数依存スクイーズ光の開発

重力波望遠鏡の将来的な感度は量子雑音という雑音によって制限される．量子雑音を低減する有効な方法として，フィルター共振器と呼ばれる光共振器を用いて，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提案されている．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，重力波望遠鏡で必要となる 100 Hz 以下での周波数依存スクイーズ光の実現研究を進めた．その結果，今年度，100 Hz 以下での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 [12]．また，フィルター共振器の制御精度を向上させる新制御手法を考案し [14]，その手法を用いて 300 m のフィルター共振器の制御精度の向上を実証した．

コンパクト連星合体からの重力波偏極モードを用いた重力理論検証

一般相対性理論は弱い重力場での検証を通して，基本的な重力理論として現在広く受け入れられている．しかし一方で，宇宙加速膨張の説明や量子論と重力理論の統合などを果たすべく，多くの拡張重力理論が提案されている．そのため，非線形効果のより働く強重力場での重力理論検証が必要とされている．重力理論によって許される重力波の偏極モードは異なるため，コンパクト連星合体からの重力波の偏極モードの探査によって重力理論を強重力場で検証できる．我々は本年度，連星ブラックホール合体からの重力波である GW170814 や連星中性子星合体からの重力波である GW170817 の純粋な偏極モード探査を，軌道傾斜角依存性を考慮して再解析し，テンソルモードが支配的であることを示した．また，スカラー・テンソル理論などで予言されているようなスカラーとテンソルモードの混合偏極モード探査を 3 台の検出器によって観測された GW170814 と GW170817 に対して実施した．その結果，スカラーモード振幅に強重力場で最も強い一般相対性理論に無矛盾な制限を与えた．

6.5.2 宇宙空間重力波望遠鏡

宇宙空間でレーザー干渉計を実現することで，長い基線長による高感度化，地面振動の影響の回避が可能になり，低い周波数帯での重力波観測が可能になる．

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．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．この DECIGO の前段階の重力は望遠鏡 B-DECIGO や，技術実証ミッション SILVIA の設計検討を進めている．

宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO

B-DECIGO は，DECIGO の前哨ミッションと位置付けられる一方，連星合体現象に対して宇宙全体を見渡すことができるだけの性能を持つ本格的な重力波望遠鏡である．ET や CE といった次世代地上重力波望遠鏡や，ESA が主導する LISA とは異なる周波数帯と独自の科学的成果が期待されている．本年度は，B-DECIGO で必要となる技術を明確化するとともに，網羅的な技術サーベイを進めた．また衛星メーカーの協力のもと，フォーメートンフライト・ドラッグフリー制御技術の成立性検討を進めた．

超精密フォーメーションフライト実証計画 SILVIA

DECIGO や B-DECIGO の実現には超精密なフォーメーションフライトが必要であり，着実な技術実証が必要となる．当研究室は JAXA フォーメーションフライトワーキンググループに参画し，公募型小型クラスで実行可能な超精密フォーメーションフライト実証計画 SILVIA (Space Interferometer Laboratory Voyaging towards Innovative Applications) を進めている．2019 年度公募型小型計画・宇宙科学ミッションコンセプト公募に応募し，2020 年 8 月には次フェーズに進むことが承認された．

SILVIA は正三角形に配置された 3 機の宇宙機で構成され，各辺の長さをファブリ・ペロー共振器で精密に測定することで精密なフォーメーションフライトを実現することを目指す計画である．共振器を構成する鏡は各宇宙機ないで非接触保持されており，この鏡を基準に宇宙機の位置や姿勢がドラッグフリー制御される．この構成は DECIGO と同等となっており，重力波を捉える感度の達成は困難なものの，重力波望遠鏡としての機能実証も可能な構成となっている．本年度は特に，共振器を構成するための初期捕捉の検討や，干渉計制御の検討を進めた．

6.5.3 ねじれ型重力波検出器 TOBA

Torsion-Bar Antenna (TOBA) とはねじれ振り子の水平回転を利用した独自の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．また，重力場勾配雑音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 $10^{-15}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ となっている．

低温ねじれ振り子の設計

目標感度達成にむけて最も障害となる雑音の 1 つが懸架ワイヤーの熱的な揺らぎである．熱揺動の大きさはワイヤーの温度とワイヤーのエネルギー散逸の大きさの平方根に比例するため，雑音低減のためには (1) 懸架ワイヤーの低温化，(2) 低散逸ワイヤーの開発，が必要である．Phase-III TOBA では懸架ワイヤーの温度を 4K まで冷却し，エネルギー散逸を $Q = 10^8$ まで下げることが要求される．

前年度までにねじれ振り子の低温化には成功しており，入射ビームの揺れや，誘導電流を介した磁場雑音の影響といった課題が分かっている．本年度はこれらの問題点を解決する新しいプロトタイプの概念設計を行った．具体的には，(1) 土台に光学素子を直接接着するモノリシック光学系を構築してビームジッターの低減を行う，(2) 試験マスを電気伝導度の小さいシリコンで製作することで誘導電流を低減する，という改良を行う予定である [37, 70].

低温モノリシック光学系の開発

Phase-III TOBA において読み取り光学系は低温下にあるため，モノリシック光学系についても低温化で動作するものを開発する必要がある．本年度はモノリシック光学系に用いる光検出器，接着剤，ファイバーコリメーターの低温での動作を試験し，使用可能なものを調査した [57]．今後は，調査した結果をもとにモノリシック光学系の構築を行う予定である．

Fiber Q measurement

In the investigation to achieve high Q for torsion pendulums at cryogenic temperatures, a cryogenic setup was designed, and preliminary Q fibre measurements at cryogenic temperatures were measured. Currently optimising the system, and solving the challenges and complexities that come with the cryogenic system, as well as the problems that come with moving to a new setup [71, 58, 35].

地震の早期アラート

TOBA を用いて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いる．本年度，TOBA での連続観測データを用いて，2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大地震に起因する重力場変動の信号を探査するデータ解析を進めた．有意な信号は見つからなかったが，解析手法を確立するとともに，上限値を与えるという結果を得た．

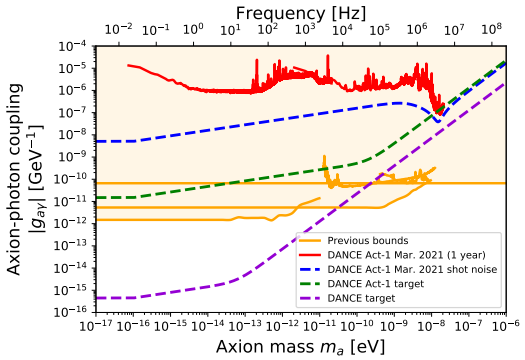
6.5.4 ダークマター探査

数々の宇宙観測によってダークマターの存在は確実視されており，宇宙の構造形成の重要な役割を果たしたことがわかっているが，その正体は全く不明である．これまでは素粒子物理学からの強い示唆から，WIMP と呼ばれる重い粒子に探索が集中していたが，検出の兆候は得られていない．こうした背景から，WIMP 以外の候補への関心が高まっており，質量で 90 桁に及ぶ様々な候補を新しい発想によって探索することの重要性が認識されてきた．

我々は特に超軽量ダークマターに着目し，レーザー干渉計を用いた探索実験を進めている．我々は，アクシオンが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こと性質に着目し，テーブルトップサイズの光リング共振器を用いて軽いアクシオンを探索する手法を提案し，DANCE (Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment) 計画を 2018 年度より開始した．また，重力波望遠鏡の線形光共振器を用いて直線偏光の偏光面回転を調べることで，アクシオン探索を行う新手法も提案し，KAGRA への導入に向けた開発を進めている．さらに，ゲージボゾン探索も進めている．ダークマターの存在は標準理論を超えた未知の力の存在を示唆するが，これを媒介するゲージボゾンがダークマターである可能性が指摘されている．このボゾン場が重力波望遠鏡を構成する懸架された鏡に力を与えうることに注目し，KAGRA を用いた探索を進めている．

光リング共振器によるアクシオン探索 DANCE

DANCE (Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment) は光リング共振器を用いることでアクシオンによる直線偏光の偏光面回転を増幅し，10^{-10} eV 程度以下のアクシオンを広帯域にわたって探査することを目指したテーブルトップ実験である．本年度は原理検証のためのプロトタイプ実験 DANCE Act-1 の光学系の組み立てを完了し，推定感度を得ることができた (下図)．(図 6.5.4)．また，デジタル制御を用いた自動ロックシステムと階層制御の開発によって，60 時間以上の共振器制御を実現した．これにより，信号雑音比向上に必要な長期間の観測が可能となった．今後は，1 週間程度の観測とデータ解析，およびさらなる感度向上を目指す．



KAGRA によるゲージボゾン探索

KAGRA はレーザー干渉計型重力波望遠鏡としては世界で唯一の低温干渉計となっており，唯一テストマスとして石英鏡ではなくサファイア鏡を用いている．干渉計を構成するその他の鏡としては石英鏡を用いているため，B-L 数の異なる石英鏡とサファイア鏡で構成された部分の干渉計補助信号を用いると，高い感度で B-L ゲージボゾンを探索することが可能となることを示した [17]．また，鏡の材質が同じ場合であっても，鏡間を光が往復する時間が有限であることを考慮に入れると，感度が大幅に向上することを示し，LIGO による既存の上限値を更新した [17]．これらのアイディアを利用して，KAGRA の 2020 年の実観測データを用いた解析を進めている．超軽量ダークマターの信号はコヒーレンス時間が振動周期の 10^6 倍程度の連続波信号として観測される．この特徴を利用して検出器由来のラインノイズと区別する手法や，2 つの観測データの相関を取る手法などの開発を進めた．また，ゲージボゾン場の振幅や位相，偏極が確率論的にふらつく効果を統計的に処理し，観測データから B-L 結合係数への制限を得る手法の開発を進めた．

6.5.5 相対論・量子光学実験

オプトメカニクス研究

安東研究室では，重力波検出器の感度向上に向けた雑音低減，および巨視的量子力学の検証を目的として，レーザー光の量子輻射圧揺らぎを観測することを目指している．我々は，mg スケールの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手法を用いて実験を行っている．このセットアップでは，量子輻射圧揺らぎを増幅するため共振器内パワーを増大させても，共振器を安定的に共振させることができる．今年度，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実証することに成功した [69, 36]．さらに，量子輻射圧揺らぎの観測のためにさらなる高感度化を進めるべく，微小なね

じれ振り子の両端で線形共振器組む新たな実験セットアップの開発を行なった．また，鏡の機械的支持に伴う熱雑音の排除を目指した，鏡の光学浮上実験も進めている．本年度はミリグラムスケールの曲率付き鏡の実現に向けて，0.1 mm 厚の薄型石英鏡の開発やフォトニック結晶ミラーの開発を進めた．

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に取り組んでいる．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，光学系全体を回転させて変調をかけることで信号取得を行う．我々はこれまでに一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るため，本年度も回転機構の改良を行った．回転に同期した雑音低減のために導入した上部支持を伴わない回転機構の調整を進めている．

＜受賞＞

[1] 榎本雄太郎: 第 15 回 (2021 年) 日本物理学会若手奨励賞, 宇宙線・宇宙物理領域 (2020 年 11 月).

[2] 有冨尚紀: The 26th KAGRA face-to-face meeting Best Poster Award, KAGRA collaboration (2020 年 12 月).

＜報文＞

(原著論文)

[3] Koji Nagano, et al.: Demonstration of a dual-pass differential Fabry-Perot interferometer for future interferometric space gravitational wave antennas, Class. Quantum Grav. 38, 085018 (2021).

[4] Takafumi Ushiba et al.: Cryogenic suspension design for a kilometer-scale gravitational-wave detector, Class. Quantum Grav. 38, 085013 (2021).

[5] Soichiro Morisaki, et al.: Improved sensitivity of interferometric gravitational-wave detectors to ultralight vector dark matter from the finite light-traveling time, Phys. Rev. D 103, L051702 (2021).

[6] KAGRA Collaboration: Vibration isolation systems for the beam splitter and signal recycling mirrors of the KAGRA gravitational wave detector, Class. Quantum Grav. 38, 065011 (2021).

[7] Seiji Kawamura et al.: Current status of space gravitational wave antenna DECIGO and B-DECIGO, PTEP, ptab019 (2021).

[8] KAGRA Collaboration: Overview of KAGRA: Calibration, detector characterization, physical environmental monitors, and the geophysics interferometer, PTEP 2021, ptab018 (2021).

[9] Tomohiro Ishikawa et al.: Improvement of the Target Sensitivity in DECIGO by Optimizing Its Parameters for Quantum Noise Including the Effect of Diffraction Loss, Galaxies 9, 14 (2021).

[10] Shoki Iwaguchi et al.: Quantum Noise in a Fabry-Perot Interferometer Including the Influence of Diffraction Loss of Light, Galaxies 9, 9 (2021).

[11] Hiroki Takeda, et al.: Pure polarization test of GW170814 and GW170817 using waveforms consistent with modified theories of gravity, Phys. Rev. D, 103, 064037 (2021).

[12] Y. Zhao, N. Aritomi et al.: Frequency-Dependent Squeezed Vacuum Source for Broadband Quantum Noise Reduction in Advanced Gravitational-Wave Detectors, Phys. Rev. Lett., 124, 171101 (2020).

[13] T. Shimoda, et al.: Torsion-Bar Antenna: A ground-based mid-frequency and low-frequency gravitational wave detector, IJMPD 29, 1940003 (2020).

[14] N. Aritomi et al.: Control of a filter cavity with coherent control sidebands, Phys. Rev. D, 102, 042003 (2020).

[15] Takuya Kawasaki, et al.: Optical trapping of the transversal motion for an optically levitated mirror, Phys. Rev. A 102, 053520 (2020).

[16] Tomotada Akutsu et al.: Compact integrated optical sensors and electromagnetic actuators for vibration isolation systems in the gravitational-wave detector KAGRA, RSI 91, 115001 (2020).

[17] Yuta Michimura, et al.: Ultralight vector dark matter search with auxiliary length channels of gravitational wave detectors, Phys. Rev. D 102, 102001 (2020).

[18] KAGRA Collaboration, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration: Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA, Living Reviews in Relativity 23, 3 (2020).

[19] Kiwamu Izumi et al.: The current status of contribution activities in Japan for LISA, PTEP 2020, ptaa124 (2020).

[20] KAGRA Collaboration: Overview of KAGRA: Detector design and construction history, PTEP, ptaa125 (2020).

[21] KAGRA Collaboration: Overview of KAGRA: KAGRA science, PTEP, ptaa120 (2020).

[22] Yuta Michimura et al.: Prospects for improving the sensitivity of the cryogenic gravitational wave detector KAGRA, Phys. Rev. D 102, 022008 (2020).

[23] Yuta Michimura, Kentaro Komori: Quantum sensing with milligram scale optomechanical systems, The European Physical Journal D 74, 126 (2020).

[24] Rika Yamada et al.: Optimization of quantum noise by completing the square of multiple interferometer outputs in quantum locking for gravitational wave detectors, Phys. Lett. A 384, 126626 (2020).

[25] KAGRA Collaboration: Application of independent component analysis to the iKAGRA data, PTEP, 053F01 (2020).

(国内雑誌)

[26] 有冨尚紀: 重力波望遠鏡の量子雑音低減のための周波数依存スクイーズド真空場, 光アライアンス誌 (2020 年 11 月).

(学位論文)

[27] 有冨尚紀: Frequency-Dependent Squeezed Vacuum Source with Filter Cavity Control using Coherent Control Sidebands for Gravitational-Wave Detectors, 博士論文 (2021 年 3 月).

[28] 武田紘樹: Tests of Alternative Theories of Gravity through Gravitational-Wave Polarizations, 博士論文 (2021 年 3 月).

[29] 千代田大樹: 光学浮上の実現に向けた微小鏡の開発, 修士論文 (2021 年 3 月).

(著書)

[30] 安東正樹, KAGRA 観測開始, 理科年表 (2021 年 1 月, 丸善出版).

[31] 安東正樹, 白水徹也 (編集幹事), 浅田秀樹, 石橋明浩, 小林努, 真貝寿明, 早田次郎, 谷口敬介 (編) : 相対論と宇宙の事典 (朝倉書店, 2020 年 6 月).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[32] Yuta Michimura et al: Levitating Optomechanics: Optical Levitation LVK Meeting (2021 年 3 月, Online).

[33] Yuta Michimura for the KAGRA Collaboration: Status of KAGRA: Instrument Updates for O4, LVK Meeting (2021 年 3 月, Online).

[34] Yuta Michimura et al: Laser interferometric searches for ultralight dark matter Transformative Research Area “Dark Matter” Symposium, (2021 年 2 月, Online).

[35] Ching Pin Ooi, et al.: Towards suspension noise measurements of crystalline fibres at cryogenic temperatures for torsion pendulums, 3rd IFQMS (2020 年 12 月, Online).

[36] Takuya Kawasaki: Quantum radiation pressure fluctuation in a linear optical cavity, 3rd IFQMS (2020 年 12 月, Online).

[37] Satoru Takano, et al.,: Cryogenic Monolithic Torsion Pendulum Made of Silicon for Gravity Gradient Sensing, 3rd IFQMS (2020 年 12 月, Online).

[38] Yuka Oshima, et al.: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment DANCE: Signal calibration and sensitivity evaluation, 7th KIW (Dec. 2020, Online).

[39] Hiroki Fujimoto, et al.: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment DANCE: Development of automated cavity locking system, 7th KIW (Dec. 2020, Online).

[40] N. Aritomi: Frequency-Dependent Squeezing for Gravitational-Wave Detectors, 7th KIW (Dec. 2020, Online).

[41] Yuta Michimur: Expectations for Sensitivity of KAGRA in O4, 7th KIW (Dec. 2020, Online).

[42] Hiroki Takeda, et al.: Polarization tests of GW170814 and GW170817 using waveforms consistent with alternative theories of gravity, 7th KIW (Dec. 2020, Online).

[43] Yuta Michimura for the KAGRA Collaboration: Future Plans for KAGRA Facility, KAGRA-OzGrav Meeting (2020 年 11 月, Online).

[44] Yuka Oshima, et al.: The current status of DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, Kashiwa Dark Matter Symposium 2020 (Nov. 2020, Online).

[45] N. Aritomi: Frequency Dependent Squeezing with 300 m filter cavity in TAMA, The 25th KAGRA face-to-face meeting (August 2020, Online).

[46] Yuta Michimura: Summary of Sensitivity Estimate for O4 in Various Interferometer Configurations, KAGRA 2020 May Telecon (2020 年 5 月, Online).

ポスター発表

[47] Hiroki Fujimoto, et al.: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment DANCE: Development of control system for long-term measurement, Rencontres de Moriond on Gravitation (Mar. 2021, Online).

[48] Yuka Oshima, et al.: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment DANCE: Current sensitivity, Rencontres de Moriond on Gravitation (Mar. 2021, Online).

[49] N. Aritomi: Frequency-Dependent Squeezing for Gravitational-Wave Detectors, The 26th KAGRA face-to-face meeting (December 2020, Online).

[50] Hiroki Takeda, et al.: Tests of alternative theories of gravity through gravitational-wave polarization modes, KAGRA The 26th Face to Face Meeting (December, 2020, Online).

招待講演

[51] Masaki Ando: Observation of Gravitational-Wave in Space, RESCEU Summer School 2020 (Aug 19, 2020, Online).

[52] Masaki Ando: Gravitational-wave Observation and KAGRA, ILC Summer Camp 2020 (Sep 24, 2020, Online).

(国内会議)

一般講演

[53] 大島由佳, 他: 光リング共振器を用いたアクシオン暗黒物質の探索実験 DANCE (5)：信号の較正と感度の評価, 日本物理学会 第 76 回年次大会 (2021 年 3 月, オンライン).

[54] 藤本拓希, 他: 光リング共振器を用いたアクシオン暗黒物質の探索実験 DANCE (4)：長時間測定に向けた制御法の開発, 同上.

[55] 有冨尚紀: 重力波望遠鏡のためのフィルターキャビティの新しい制御手法, 同上.

[56] 武田紘樹, 他: インスパイラル重力波のスカラーテンソル混合偏極探査, 同上.

[57] 高野哲，他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (26)：低温モノリシック光学系に向けた特性評価, 同上.

[58] Ching Pin Ooi, et al.: Development of Phase-III TOBA (Torsion Bar Antenna) for Gravitational Wave Observation (27): Preliminary Q factor measurements of cryogenic torsion pendulums with crystalline fibres, 同上.

[59] 安東正樹，他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (126): B-DECIGO の概要, 同上.

[60] 道村唯太: 超精密偏光計測が可能にする新しいダークマター探索, 第 14 回さきがけ研究者交流会議 (2021 年 3 月, オンライン).

[61] 安東正樹, 他: 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, Q-LEAP 第 5 回領域会議 (2021 年 1 月, オンライン).

[62] 武田紘樹, 他: Tests of alternative theories of gravity through gravitational-wave polarizations, 第 33 回理論懇シンポジウム (2020 年 12 月, オンライン).

[63] 道村唯太: 超精密偏光計測が可能にする新しいダークマター探索, さきがけ「革新光」キックオフ・領域会議 (2020 年 11 月, オンライン).

[64] 道村唯太, 他: SILVIA による重力波観測の可能性, 第 19 回 DECIGO ワークショップ (2020 年 11 月，オンライン).

[65] 安東正樹, 他: 重力波望遠鏡 B-DECIGO, 同上.

[66] 道村唯太, 他: 超精密フォーメーションフライト実証機 SILVIA による重力波観測の可能性, 第 64 回 宇宙科学技術連合講演会 (2020 年 10 月，オンライン).

[67] 安東正樹, 他: 重力波望遠鏡 B-DECIGO, 同上.

[68] 有冨尚紀: 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 (4), 日本物理学会 2020 年秋季大会 (2020 年 9 月, オンライン).

[69] 川崎拓也, 他: 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 II, 同上.

[70] 高野哲，他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (24): 低温ねじれ振り子の運転および改良計画, 同上.

[71] Ching Pin Ooi, et al.: Development of Phase-III TOBA (Torsion Bar Antenna) for Gravitational Wave Observation (25)：Achieving Cryogenic Q measurements for crystalline fibres in torsion pendulums, 同上.

[72] 道村唯太, 他: レーザー干渉計型重力波検出器による超軽量ダークマター探索, 同上.

[73] 大島由佳, 他: アクシオン暗黒物質探索のための光リング共振器の製作と制御, 同上.

[74] 武田紘樹, 他: コンパクト連星合体からの重力波偏極モード検証, 同上.

[75] 安東正樹, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (120)：B-DECIGO の概要, 同上.

[76] 安東正樹, 他: 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, Q-LEAP サイトビジット (2020 年 9 月 11 日, 東京大学).

[77] 安東正樹, 他: 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, Q-LEAP 第 4 回領域会議 (2020 年 6 月, オンライン).

(セミナー・アウトリーチ講演)

[78] Yuta Michimura: Laser interferometric searches for ultralight dark matter, SYRTE-UTokyo DM Seminar (2021 年 3 月, オンライン).

[79] 大島由佳: 天体観測の入り口, 銀河学校 2021 (2021 年 3 月, オンライン).

[80] 安東正樹: 重力波で探る宇宙の姿, 朝日カルチャーセンター (2021 年 2 月 20 日, ルミネ横浜, 神奈川).

[81] Yuta Michimura: Optical levitation of a mirror for probing macroscopic quantum mechanics, OIST Quantum Machines Seminar (2021 年 1 月, オンライン).

[82] 大島由佳: 天体解説 (オリオン大星雲 M42), 国立天文台 三鷹定例観望会 (2021 年 1 月, オンライン).

[83] 大島由佳: 実験室から宇宙へ 重力波と暗黒物質をとらえろ！ , 東大理学部で考える 女子中高生の未来 2020 (2020 年 11 月, オンライン).

[84] 安東正樹: 重力波でさぐる宇宙, 順天高校 グローバルウィーク (2020 年 11 月 13 日, 順天高校, オンライン).

[85] 大島由佳: 天体解説 (月，球状星団 M15 と散開星団 M29), 国立天文台 三鷹定例観望会 (2020 年 9 月, オンライン).

[86] Yuta Michimura: Search for ultralight dark matter with laser interferometric gravitational wave detectors, 理研 iTHEMS Dark Matter Working Group Seminar (2020 年 7 月, オンライン).

6.6 馬場研究室

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、2021 年度打ち上げ予定の 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。

6.6.1 天体観測に関する研究

超新星残骸

銀河宇宙線の供給源としての最有力候補は超新星残骸であるものの、「加速した粒子が本当に宇宙空間へ逃げ出しているのか」という深刻な問題が残されている。我々は、超新星残骸が加速した粒子が宇宙空間へ逃げていく過程を追う観測的研究を行った。年齢が異なる超新星残骸 38 個のガンマ線・X 線放射の系統解析により、加速された粒子が 1 万年から 10 万年の時間をかけて徐々に超新星残骸から逃げていく過程を初めて捉えた。図 6.6.1 は、超新星残骸の年齢を表すプラズマ年齢が大きいサンプルほど、加速された陽子の最高エネルギーを示すガンマ線放射の break energy が小さくなり、陽子逃亡が進んでいることが分かる。また、宇宙空間へ供給される粒子の最高エネルギーが天体間で 3 桁にわたるばらつきをもつことを明らかにし、宇宙線供給の物理には大きな環境依存性があることを示した。これらの成果は、超新星残骸が宇宙線供給を通して銀河進化に与える影響を定量化するための第一歩となるだろう。この研究では超新星残骸の物理量の時間発展を調べるため、それぞれの天体の正確な年齢情報を必要とした。しかし一般に、超新星残骸の年齢は定量化できないほどの不定性を含む。そこで我々は信頼できる年齢推定が可能である特殊な系 21 個を利用して、一般の超新星残骸に使える推定年齢がもつ系統誤差を定量化することに初めて成功した。結果、30 年から 40 万年という広い年齢帯域にわたり、一般の推定年齢が factor 4 の系統誤差をもつことが明らかになった。

超新星残骸のもうひとつのテーマとして、爆発噴出物や星周物質から発せられる熱的 X 線を解析することで、超新星爆発自身のメカニズムや親星のシステムの謎を探る研究も行っている。我々は、鉄などの噴出物と濃い星周物質が観測されている Kepler 超新星残骸を、*XMM-Newton* 衛星搭載の分散分光型検出器 RGS を用いて観測した。両方の成分の輝線を分離して解析することで、輝線中心や輝線幅のパラメータから視線方向のドップラー運動の情報を独立に得ることができる。我々は天体全体として星周物質が青方偏移し、一方で鉄の噴出物は赤方偏移しているということを発見した。また特徴的な中心構造の運動状態を外縁部の構造と分けて抽出することにより、中心部の星周物質がトーラス状の構造をしていることも合わせて発見した。超新星残骸におけるこれらの観測結果が、超新星爆発当時の親星の爆発シナリオや運動状態を反映していると解釈し、それらの制限をかけることに成功した。本研究が着目するサイエンスは、*XRISM* 衛星で新たに本格運用が開始される超高エネルギー分解能検出器カロリメータを用いることでより不定性なく議論することができるようになるため、その観測成果が切望される。

活動銀河核

活動銀河核 (AGN: Active Galactic Nucleus) のトーラスは、超巨大ブラックホール (SMBH) と母銀河の間に存在し、母銀河から SMBH への質量供給の役割を担うと考えられている。すなわち、トーラス構造の解明は、SMBH と母銀河の共進化を理解する上で必要不可欠である。しかしながら、トーラスの直接撮像は困難であり、その構造は未だに解明されていない。

この構造を解明するため、我々は、X 線天文衛星 NuSTAR により観測された 52 天体の隠された AGN の X 線スペクトルを解析した。隠された AGN とは、Compton 散乱に対する光学的厚みが 1 を超えるような、光学的に厚いトーラスに覆われた AGN である。我々は、クランピートーラスからの X 線スペクトルモデル (XClumpy) を適用し、全 52 天体の広帯域 X 線スペクトルの再現に成功した。この結果、約 50% の天体が真に隠された AGN であることを同定した。またトーラスのカバリングファクターが、先行研究の値よりも大きいことを発見した。この事実は、隠された AGN が、近傍宇宙にまだまだ隠されていることを示唆している。

ブラックホールアウトフロー

最近の観測でその存在が明らかになったブラックホールからのアウトフローは、電磁放射、相対論的

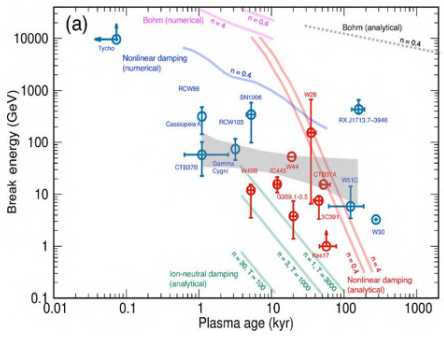


図 6.6.1: 超新星残骸の年齢としてのプラズマ年齢 (横軸) と陽子最高エネルギーを表すガンマ線放射の break energy (縦軸)[5]。

ジェットに次ぐ第３のブラックホールからのエネルギー解放過程である。アウトフローは降着円盤から立ち上がると考えられ、光速の 30%の速度に達するものもあり、ブラックホールの周辺環境とその進化にに大きな影響を与えている可能性がある。特に X 線の吸収線スペクトルを調べることで、アウトフローの性質を調べることができる。我々は銀河系内の中性子星やブラックホールの降着円盤風から超巨大ブラックホールに付随する超高速アウトフローまで、さまざまなスケールのアウトフローについて、駆動メカニズムやその周辺環境へのインパクトに興味を持ち、解析を行ってきた。X 線スペクトルは光子の生成と反応を繰り返した複雑な過程の結果であるため、その解析が従来は困難で、小高が中心となって開発した X 線放射輸送シミュレーションコード MONACO を用いてデータ解析を行い、輻射流体計算に基づくアウトフローモデルを検証した。この手法をクエーサー PG 1211+143、X 線連星 GX 13+1、H1743-322 の観測データに適用した。その結果、シミュレーションによって X 線スペクトルデータの再現に成功し、駆動メカニズムについて強い制限を得た。

6.6.2 将来宇宙計画に関する開発

XRISM 計画

我々は JAXA-NASA 計画の XRISM mission に参加し、2022 年度打ち上げに向けた開発を進めている。本年度は、打ち上げ直後の Performance verification 期間の観測天体選定に大きな貢献を果たした。特に超新星残骸、星間物質など Galactic diffuse 天体の選定には中心的役割を果たし、ブラックホールや中性子星など Galactic compact 天体、活動的銀河核 extragalactic compact 天体の選定にも大きく貢献した。観測天体リストは 2021 年 2 月にまとめられ、XRISM web site[1]に発表されている。ハードウェア開発においても特にプロセス・ソフトウェア分野で貢献を続けている。

超小型衛星 cipher 計画

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。

[1]https://xrism.isas.jaxa.jp/

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。ここ数年の開発において、10–24 keV での偏光感度と 30 秒角の符号化開口イメージングを実証してきた。

現在、大きな問題になっているのが、可視光 CMOS イメージセンサの空乏層の薄さに起因する検出効率の低さである。そこで我々は天文学専攻の光赤外観測グループと連携をとりながら、空乏層が厚いと思われる赤外線用 CMOS センサの X 線偏光撮像実験を SPring-8 のシンクロトロン放射光を用いて行った。その結果、エネルギー分解能やデッドピクセルなどの X 線検出撮像能力は従来の可視光用 CMOS センサに劣らない性能を持つことが分かった。エネルギー分解能は、10 keV において 200 eV (半値全幅) を達成でき、従来型の X 線 CCD と比べても十分な性能が見込まれる。さらに、30 keV での検出効率は可視光用 CMOS センサの 16.6±0.5 倍あることが分かった。これは、10 keV 以上では天体観測の効率が 10 倍以上良くなることを示しており、非常に有望な結果である。偏光撮像能力についても、モジュレーションファクター (100%直線偏光に対する振幅比) は 16 keV で 11%と可視光 CMOS センサと変わらない能力を持つことを示した。

これらから、赤外線 CMOS センサは cipher に必要な性能を十分に持つことがわかり、計画は次の phase に進めることになる。今後は衛星搭載の熱設計・電力設計・放射線耐性測定など、現実的な衛星ミッション化の検討を進める予定である。

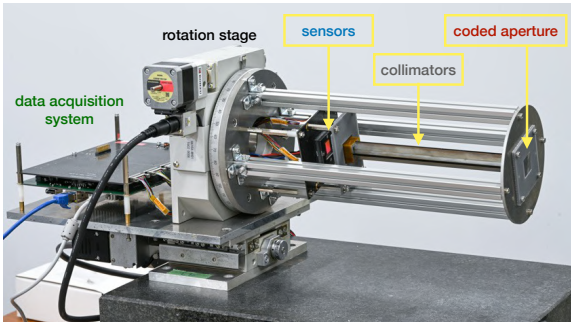


図 6.6.2: cipher の実証評価機 (2020 年 11 月の SPring-8 実験で使用したもの)。

GRAMS 計画

観測天文学における未開拓の電磁波帯域である中間エネルギーガンマ線、すなわち 0.1-10 メガ電子ボルト (MeV) の帯域には、原子核が放出するラインガンマ線が存在し、超新星爆発や連星中性子星の合

体、ブラックホールなどの高エネルギー天体における核反応の唯一の直接的プローブを提供する。我々は、MeV ガンマ線天文学開拓のため、液体アルゴン Time Projection Chamber (LArTPC) を気球に搭載して、同一検出器で反重陽子検出によるダークマター間接探索とコンプトンカメラによる MeV ガンマ線観測を同時に行なう GRAMS 実験を日米国際協力のもと推進している。検出器媒体に液体を用いることで、高密度かつ大容量の充填が可能となり、これまでにない大有効面積が実現できる。

2020 年度は LArTPC を用いた MeV ガンマ線コンプトンカメラの技術実証に向けて研究開発を行った。GRAMS の検出器は大型のアルゴン散乱体のみで構成される新しいコンセプトのコンプトンカメラであり、多重コンプトン散乱を正確に解析することが大有効面積を実現する鍵となる。従来のイベント解析アルゴリズムでは十分な性能が出ないため、新規に解析アルゴリズムの検討と開発を行った。光子の反応を全て考慮した物理的な確率モデルとシミュレーションデータに基づく深層学習モデルの２つの手法の開発に成功し、今後はその性能評価を詳しく行う予定である。また、ハードウェアとしての性能を検討するため、早稲田大学寄田研究室で稼働している気液２相アルゴン TPC のガンマ線測定データの解析を行った。その結果、多重コンプトン散乱イベントの個々の反応の位置とエネルギーが LArTPC で確かに測定できることを証明できた。ここで得られた知見は GRAMS 実証機の設計に活用する。

＜受賞＞

[1] 小高裕和, 令和 2 年度 第 61 回 東レ科学技術研究助成「ガンマ線天文学のための液体アルゴンを用いた検出器の開発」

＜報文＞

(原著論文)

[2] M. Saito, S. Yamauchi, K.K. Nobukawa, A. Bamba, T. Pannuti, “X-ray emission from the mixed-morphology supernova remnant HB 9”, PASJ, 72, 65 (2020) (doi: 10.1093/pasj/psaa042)

[3] A. Tanimoto, Y. Ueda, H. Odaka, S. Ogawa, S. Yamada, T. Kawaguchi, K, Ichikawa, “Application of X-Ray Clumpy Torus Model (XCLUMPY) to 10 Obscured Active Galactic Nuclei Observed with Suzaku and NuSTAR”, ApJ, 897, 2 (2020) (doi: 10.3847/1538-4357/ab96bc)

[4] S. Yamada, Y. Ueda, A. Tanimoto, S. Oda, M. Imanishi, Y. Toba, C. Ricci, “Nature of Compton-thick Active Galactic Nuclei in “Non-merging” Luminous Infrared Galaxies UGC 2608 and NGC 5135 Revealed with Broadband X-Ray Spectroscopy”, ApJ, 897, 107 (2020) (doi: 10.3847/1538-4357/ab94b1)

[5] H. Suzuki, A. Bamba, R. Yamazaki, Y. Ohira, “Study on the escape timescale of high-energy particles from supernova remnants through thermal X-ray properties”, PASJ, 72, 72 (2020) (doi: 10.1093/pasj/psaa061)

[6] H. Suzuki, T. Tamba, H. Odaka, A. Bamba, K. Hagino, A. Takeda, K. Mori, T. Hida, M. Yukumoto, Y. Nishioka, T.G. Tsuru, “Development of the detector simulation framework for the Wideband Hybrid X-ray Imager onboard FORCE”, NIMA, 979, 164433 (2020) (doi: 0.1016/j.nima.2020.164433)

[7] T. Kasuga, H. Odaka, K. Hatauchi, S. Takashima, T. Tamba, Y. Aizawa, S. Hashiba, A. Bamba, Y. Zhou, T. Tamagawa, “Artifact-less Coded Aperture Imaging in the X-ray Band with Multiple Different Random Patterns”, JATIS, 6, 035002 (2020) (doi: 10.1117/1.JATIS.6.3.035002)

[8] W.G. Ho, C.M. Espinoza, Z. Arzoumanian, T. Enoto, T. Tamba, D. Antonopoulou, M. Beiger, S. Guillot, B. Haskell, P.S. Ray, “Return of the Big Glitcher: NICER timing and glitches of PSR J0537-6910”, MNRAS, 498, 4605 (2020) (doi: 10.1093/mnras/staa2640)

[9] H. Sano, P.P. Plucinsky, A. Bamba, P. Sharda, M.D. Fillipovic, C.J. Law, R.Z.E. Alsaberi, Y. Yamane, K. Tokuda, F. Acero, M. Sasaki, J. Vink, T. Inoue, S. Inutsuka, J. Shimoda, K. Tsuge, K. Fujii, F. Voisin, N. Maxted, G. Rowell, T. Onishi, A. Kawamura, N. Mizuno, H. Yamamoto, K. Tachihara, Y. Fukui, “ALMA CO Observations of Gamma-Ray Supernova Remnant N132D in the Large Magellanic Cloud: Possible Evidence for Shocked Molecular Cloud Illuminated by Cosmic-Ray Protons”, ApJ, 902, 53 (2020) (doi: 10.3847/1538-4357/abb469)

[10] A. Bamba, E. watanabe, K. Mori, S. Shibata, Y. Terada. H. Sano, M.D. Filopovic, “Low X-ray Efficiency of a Young High-B Pulsar PSR J1208-6238 Observed with Chandra”, Ap&SS, 365, 178 (2020) (doi: 10.1007/s10509-020-03891-6)

[11] K. Hagino, H. Odaka, G. Sato, T. Sato, H. Suzuki, T. Mizuno, M. Kawaharada, M. Ohno, K. Nakazawa, S.B. Kobayashi, H. Murakami, K. Miyake, M. Asai, T. Koi, G. Madejski, S. Saito, D.H. Wright, T. Enoto, Y. Fukazawa, K. Hayashi, J. Kataoka, J. Katsuta, M. Kokubun, P. Laurent, F. Lebrun, O. Limousin, D. Maier, K. Makishima, K. Mori, T. Nakamori, T. Nakano, H. Noda, M. Ohta, R. Sato, H. Tajima, H. Takahashi, T. Takahashi, S. Takeda, T. Tanaka, Y. Terada, H. Uchiyama, Y. Uchiyama, S. Watanabe, K. Yamaoka, Y. Yatsu, T. Yuasa, “Origin of the in-orbit instrumental background of the Hard X-ray Imager onboard Hitomi”, JATIS, 6, 046003 (2020) (doi: 10.1117/1.JATIS.6.4.046003)

[12] M. Mizumoto, M. Nomura, C. Done, K. Ohsuga, H. Odaka, “UV line driven disc wind as the origin of ultrafast outflows in AGN”, MNRAS, 503, 1442 (2021) (doi: 10.1093/mnras/staa3282)

[13] T. Nagayoshi, A. Bamba, S. Katsuda, Y. Terada, “Detection of the hard X-ray non-thermal emission from Kepler’s supernova remnant”, PASJ, in press

[14] Y. Fujita, A. Bamba, K.K. Nobukawa, H. Matsumoto, “X-ray Emission from the PeVatron-Candidate Supernova Remnant G106.3+2.7”, PASJ, in press

[15] S. Ogawa, Y. Ueda, A. Tanimoto, S. Yamada. “Systematic Study of AGN Clumpy Tori with Broadband X-ray Spectroscopy: Updated Unified Picture of AGN Structure”, ApJ, 906, 84 (2021) (doi: 10.3847/1538-4357/abccce)

[16] R. Uematsu, Y. Ueda, A. Tanimoto, T. Kawamuro, K. Setoguchi, S. Ogawa, S. Yamada, H. Odaka, “X-ray Constraint on Location of AGN Torus in Circinus Galaxy”, ApJ, in press [arxiv]

[17] R. Tomaru, C. Done, K. Ohsuga, H. Odaka, T. Takahashi, “The thermal-radiative wind in low mass X-ray binary H 1743-322: II. iron line predictions from Monte Carlo radiation transfer”, MNRAS, 494, 3413 (2020)

[18] R. Tomaru, C. Done, K. Ohsuga, H. Odaka, T. Takahashi, “The thermal-radiative wind in the neutron star low-mass X-ray binary GX 13 + 1”, MNRAS, 497, 4970 (2020)

[19] Y. Wada, T. Enoto, K. Nakazawa, H. Odaka, Y. Furuta, H. Tsuchiya, “Photonuclear Reactions in Lightning: 1. Verification and Modeling of Reaction and Propagation Processes”, JGR Atmospheres, 125, e2020JD033193 (2020)

[20] Y. Wada, T. Enoto, K. Nakazawa, T. Yuasa, Y. Furuta, H. Odaka, K. Makishima. H. Tsuchiya, “Photonuclear Reactions in Lightning: 2. Comparison Between Observation and Simulation Model”, JGR Atmospheres, 125, e2020JD033194 (2020)

[21] K. Makishima, T. Enoto, H. Yoneda, H. Odaka, “A NuSTAR confirmation of the 36 ks hard X-ray pulse-phase modulation in the magnetar 1E 1547.0–5408”, MNRAS, 502, 2266 (2021)

(会議抄録)

[22] H. Odaka, T. Kasuga, K. Hatauchi, T. Tamba, S. Takashima, H. Suzuki, Y. Aizawa, A. Bamba, T. Watanabe, S. Nammoku, A. Tanimoto, “Concept of a CubeSat-based hard x-ray imaging polarimeter: cipher”, SPIE Proceedings, 11444, 114445V (2020)

(国内雑誌)

[23] 春日知明、「第 27 回衛星設計コンテスト参加報告〜衛星設計コンテストに初挑戦した体験談〜」、日本航空宇宙学会誌 2020 年 4 月号

[24] 春日知明、「日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書」、天文月報 2020 年 11 月号

[25] 丹波翼、「日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書」、天文月報 2021 年 1 月号

(学位論文)

[26] H. Suzuki, ”Systematic Study of Escape Processes of Cosmic Rays from Supernova Remnants based on Gamma-ray and Thermal X-ray Properties”, Ph.D. thesis

[27] 高嶋聡, 「大有効面積 MeV ガンマ線観測を目指した液体アルゴンによるコンプトン望遠鏡概念の実験的検討」、学位修士論文

[28] 畠内康輔, 「CMOS イメージセンサを用いた超小型 X 線偏光計の開発」、学位修士論文

(著書)

[29] 馬場彩、『マンガでわかる物理数学』、オーム社 (ISBN: 978-4-274-22687-8)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[30] Hiromasa Suzuki, Aya Bamba, Rei Enokiya, Hiroya Yamaguchi, Paul P. Plucinsky, Hirokazu Odaka, ”Uniform distribution of the extremely overionized plasma in the SNR G359.1-0.5 and its implication for the SNR evolution”, COMMITTEE ON SPACE RESEARCH (COSPAR), 28 January - 4 February, 2021, Sydney, Australia (oral)

[31] Hiromasa Suzuki, Aya Bamba, Ryo, Yamazaki, Yutaka Ohira, “Observational gamma-ray and X-ray study on cosmic-ray escape from supernova remnants”, YITP workshop, 7-10 December 2020, Kyoto (oral)

[32] Tomoaki Kasuga, Hirokazu Odaka, Tsubasa Tamba, Kosuke Hatauchi, Taihei Watanabe, Atsushi Tanimoto, Satoshi Takashima, Sorato Nanmoku, “cipher: a CubeSat-Based Hard X-ray Imaging Polarimetry Mission”, YITP workshop, 7–10 December 2020, Kyoto (oral)

[33] Satoshi Takashima, Hirokazu Odaka, Aya Bamba, Hiroki Yoneda, Masato Kimura, Masashi Tanaka, Kohei Yorita, ”GRAMS project: A MeV gamma-ray large area telescope using liquid argon and its concept study”, YITP workshop, 7-10 December 2020, Kyoto (poster)

[34] Tomoaki Kasuga, Hirokazu Odaka, Tsubasa Tamba, Kosuke Hatauchi, Taihei Watanabe, Atsushi Tanimoto, Satoshi Takashima, Sorato Nanmoku, “Concept of the cipher Mission: a CubeSat for the Imaging Polarimetry in the Hard X-ray Band”, 43rd COSPAR Scientific Assembly, 28 January–4 February 2021, On-line (oral)

招待講演

[35] A. Bamba. “Electromagnetic observations of neutron stars”, “Workshop on Frontiers of Nuclear Structure and Nuclear Astrophysics”, On-line, 2020 Oct. 14-16

(国内会議)

一般講演

[36] 春日知明、Jacco Vink、勝田哲、内田裕之、馬場彩「XMM-Newton 衛星搭載 RGS 検出器で探る Kepler 超新星残骸における星周物質の空間分布」、日本天文学会 2020 年秋季年会、オンライン、2020 年 9 月 8–10 日

[37] 鈴木寛大、馬場彩、山崎了、大平豊、「熱的 X 線・ガンマ線観測を通した超新星残骸からの宇宙線逃亡タイムスケールの測定」、日本天文学会 2020 年秋季年会、オンライン、2020 年 9 月 8–10 日

[38] 丹波翼、小高裕和、馬場彩、村上弘志、森浩二、林田清、寺田幸功、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 (2)」、日本天文学会 2020 年秋季年会、オンライン、2020 年 9 月 8–10 日

[39] 谷本敦、上田佳宏、小高裕和、「クランピートーラスからの X 線スペクトルモデルを用いた Compton-thick AGN の広帯域 X 線スペクトル系統解析」、日本天文学会 2020 年秋季年会、オンライン、2020 年 9 月 8–10 日

[40] 畠内康輔、春日知明、丹波翼、高嶋聡、鈴木寛大、渡邊泰平、南木宙斗、谷本敦、小高裕和、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 イメージセンサを用いた硬 X 線撮像偏光計の開発 III」、日本天文学会 2020 年秋季年会、オンライン、2020 年 9 月 8–10 日

[41] 高嶋聡、小高裕和、馬場彩、米田浩基、木村眞人、田中雅士、寄田浩平、「GRAMS 実験 2: 液体アルゴン検出器における多重コンプトン散乱イベントの解析」、日本物理学会秋季年会、オンライン、2020 年 9 月 14-17 日

[42] 渡邊泰平、丹波翼、春日知明、鈴木寛大、畠内康輔、高嶋聡、南木宙斗、谷本敦、小高裕和、馬場彩、「CMOS イメージャを用いた X 線偏光撮像システムの開発 VI: シミュレーションによる検討」、日本物理学会秋季年会、オンライン、2020 年 9 月 14-17 日

[43] 春日知明、Jacco Vink、勝田哲、内田裕之、馬場彩「Kepler 超新星残骸における星周物質の空間分布」、「超新星残骸リモート研究会 2020」、オンライン、2020 年 10 月 22 日

[44] 馬場 彩、「新しい超新星残骸をパルサーから探せないか」、「超新星残骸リモート研究会 2020」、オンライン、2020 年 10 月 22 日

[45] 鈴木寛大、馬場彩、山崎了、大平豊、「熱的X線・ガンマ線観測を用いた超新星残骸からの宇宙線逃亡タイムスケールの測定」、「超新星残骸リモート研究会 2020」、オンライン、2020 年 10 月 22 日 (oral)

[46] 丹波翼、 “X-ray observational study for emission mechanism of neutron stars”、XPS 研究交流会、東京大学、2020 年 11 月 24 日

[47] Hiromasa Suzuki, Aya Bamba, Ryo Yamazaki, Yutaka Ohira, “Observational gamma-ray and X-ray study on cosmic-ray escape from supernova remnants”, 高エネルギー宇宙物理学研究会, 14, 17 December, 2020, zoom (poster)

[48] 馬場 彩、「パルサー星雲 X 線スペクトルの解釈」、「中性子星および関連現象〜興味ある課題を検討しよう〜」、オンライン、2020 年 12 月 22 日

[49] 丹波翼、「Crab Nebula の偏光撮像を目指した超小型衛星 cipher の開発」、中性子星および関連現象〜興味ある課題を検討しよう〜、オンライン、2020 年 12 月 22 日

[50] 高嶋聡、「MeV ガンマ線観測・ダークマター探索プロジェクト GRAMS の概要とその進展」、「中性子星および関連事象〜興味ある課題を検討しよう〜」、オンライン、2020 年 12 月 22 日

[51] 渡邊泰平、小高裕和、畠内康輔、春日知明、丹波翼、鈴木寛大、高嶋聡、南木宙斗、谷本敦、馬場彩、佐久間翔太郎、林田清、成影典之、高橋忠幸、「CMOS イメージャを用いた X 線偏光撮像システムの開発 VII：読み出し系の開発」、日本物理学会第 76 回年次大会、オンライン、2021 年 3 月 12–15 日

[52] 丹波翼、渡邊泰平、小高裕和、畠内康輔、春日知明、高嶋聡、鈴木寛大、南木宙人、谷本敦、馬場彩、「X 線偏光撮像システムの開発 VIII: 偏光イメージング再構成手法の開発」、日本物理学会第 76 回年次大会、オンライン、2021 年 3 月 12–15 日

[53] 高嶋聡、小高裕和、馬場彩、米田浩基、木村眞人、田中雅士、寄田浩平、「GRAMS 実験 4: 液体アルゴン検出器のエネルギー測定性能と宇宙線バックグラウンドの研究」、日本物理学会春季年会、オンライン、2021 年 3 月 12-15 日

[54] 春日知明、Jacco Vink、勝田哲、内田裕之、馬場彩、佐藤寿紀、John P. Hughes「Kepler 超新星残骸における星周物質の非等方な空間分布」、日本天文学会 2021 年春季年会、オンライン、2021 年 3 月 16–19 日

[55] 馬場 彩、「若い強磁場中性子星 PSR J1208-6238 の X 線光度への強い制限」、日本天文学会春季年会、オンライン、2021 年 3 月 16-19 日

[56] 鈴木寛大、馬場彩、柴田晋平、「付随するコンパクト天体の運動を用いた超新星残骸の年齢推定の信頼性評価」、日本天文学会春季年会、オンライン、2021 年 3 月 16-19 日

[57] 畠内康輔、渡邊泰平、丹波翼、春日知明、高嶋聡、鈴木寛大、南木宙斗、谷本敦、小高裕和、馬場彩、成影典之、佐久間翔太郎、朝倉一統、林田清、高橋忠幸、「CMOS イメージセンサを用いた硬 X 線撮像偏光計の開発 IV」、日本天文学会春季年会、オンライン、2021 年 3 月 16–19 日

[58] 鈴木寛大、”Systematic Study of Escape Processes of Cosmic Rays from Supernova Remnants based on Gamma-ray and Thermal X-ray Properties”, 高宇連研究会、2021 年 3 月、zoom (oral)

[59] 小高裕和, 多重散乱コンプトンカメラの実現による宇宙 MeV ガンマ線感度の向上と医療への展開, 新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」領域研究会, オンライン, 2020 年 7 月 27-28 日

[60] 小高裕和, 高嶋聡, 井上芳幸, 米田浩基, 辻直美, 一戸悠人, Georgia Karagiorgi, Reshmi Mukherjee, Tsuguo Aramaki, and GRAMS Collaboration、

「GRAMS 計画 1: MeV ガンマ線観測・ダークマター探索気球実験」, 日本天文学会 2020 年度秋季大会, オンライン, 2020 年 9 月 9 日

[61] 小高裕和, 畠内康輔, 春日知明, 渡邊泰平, 丹波翼, 鈴木寛大, 高嶋聡, 南木宙斗, 谷本敦, 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 V: 開発と性能評価の現状, 日本物理学会 2020 年度 秋季大会, オンライン, 2020 年 9 月 17 日

[62] 小高裕和, 高嶋聡, 井上芳幸, 米田浩基, 辻直美, 一戸悠人, Georgia Karagiorgi, Reshmi Mukherjee, Tsuguo Aramaki, and GRAMS Collaboration, GRAMS 実験 1: MeV ガンマ線観測・ダークマター探索気球実験 · ミッション概要, 日本物理学会 2020 年度 秋季大会, オンライン, 2020 年 9 月 17 日

[63] 小高裕和, 一戸悠人, 田島広康, 辻直美, 米田浩基, 液体アルゴンを用いたガンマ線検出器, 高宇連研究会, オンライン, 2021 年 3 月 10 日

[64] 小高裕和, 高嶋聡, 井上芳幸, 米田浩基, 辻直美, 一戸悠人, Georgia Karagiorgi, Reshmi Mukherjee, Tsuguo Aramaki, and GRAMS Collaboration, GRAMS 計画 2: MeV ガンマ線観測・ダークマター探索気球実験, 日本天文学会 2021 年度 春季大会, オンライン, 2021 年 3 月 17 日

招待講演

[65] 馬場 彩、「X 線・ガンマ線観測による高エネルギー宇宙線の起源とその加速機構の解明」、日本物理学会第 76 回年次大会米沢富美子賞記念講演、2021 年 3 月 13 日

[66] 小高裕和, 「モンテカルロ放射輸送コードの開発とその応用：分子雲、ブラックホール、中性子星」, 日本物理学会 2021 年年次大会 第 14 回若手奨励賞企画講演, 2021 年 3 月 12 日

[67] 小高裕和, 「GRAMS—MeV ガンマ線観測・ダークマター探索気球実験—」, CRC タウンミーティング, オンライン, 2021 年 3 月 30 日

(セミナー)

[68] A. Tanimoto, “Development of Monte Carlo Based X-Ray Clumpy Torus Model and Its Applications to Nearby Obscured AGNs”, The University of Tokyo, 2020 July 14.

[69] A. Bamba, “X-ray study of supernova remnants as remnants of supernovae”, “Tsinghua University Colloquium series”, China, 2020 Oct. 22

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、宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background radiation, 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、CMB 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、CMB 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、CMB 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・開発を進めてきた (図 6.7.1)。

6.7.1 Polarbear 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 2016 年末まで観測を続けてきた。データ解析における進展としては、2014 年まで観測を行ったディープ観測により実現した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報告した論文を出版した [8]。また、同じディープ観測のデータを用い重力レンズパワースペクトルの測定を高精度で実現した [7]。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) 測定を

実現し、この結果を報告した論文を出版した [5]。また、ワイド観測の利点と POLARBEAR 実験の高解像度の利点を活用することで、高精度で広い範囲に及ぶ CMB E モードパワースペクトルの測定と、それを元にした宇宙論パラメータの測定を実現した [3]。

6.7.2 Simons Array 実験

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で POLARBEAR 実験の約 20 倍の感度を実現することを目指している。

2020 年度前半は、世界的な新型コロナウイルスの流行による影響を受け、チリの観測サイトも閉鎖され、観測や現場における作業は中断を余儀なくされた。その間に受信機システムの心臓部である焦点面検出器タワーや低温読み出し部の改良の準備を進めた。観測サイトでの現場作業が可能となった 2020 年度後半には、1 台目の望遠鏡の受信機にそれらの導入を完了させ、試験観測を再開した。現在までに多数の較正観測を実施してきた。これらのデータを解析することで実際に望遠鏡のビームの検出器の時定数・感度を推定し、デザイン値との比較を行っている。またそれらと並行して、2 台目の望遠鏡の準備も進められた。本研究室においても、国内外の共同研究者らとともに、光学系の反射防止膜の研究やデータ収集系の試験が行われた。2020 年度末に 2 台目の受信機の組立作業が再開され、早期の観測開始を目指している。

図 6.7.1: 南米チリ・アタカマ砂漠、標高 5,200m に設置されている POLARBEAR 実験と Simons Array 実験の俯瞰写真。手前にある 3 台が Simons Array の望遠鏡で、そのうちの中央の望遠鏡が POLARBEAR で使用された。右手側に見えるのが ACT の望遠鏡。現在は写真の中央付近に Simons Observatory を建設している。左奥に見えるのは別の CMB 実験である CLASS の望遠鏡。(写真: 横浜大学の廣瀬氏提供)

並行して各種ソフトフェアの開発も進めてきた。特に、従来実験を一桁上回るデータ量を扱うための HPC (High-Performance Computation) 環境を活用したソフトウェア・パイプラインの開発、時系列データをフィルタリングすることで生じる E モードから B モードへの漏れ込みの補正手法の開発、データをチリから米国、米国から東京大学を含む共同研究研究機関への転送するソフトウェア、チリでの観測を Web ブラウザを用い遠隔で監視するシステムの構築を進めている。

6.7.3 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。

望遠鏡作成においては、本研究室では、特に小口径望遠鏡群に注力して開発を行ってきた。Kavli IPMU の共同研究グループとともに、光学設計および光学筒の設計を進め、直径 460 mm の単結晶シリコンレンズを有する屈折光学系を採用し、光学筒自身からの熱放射を抑えるため 1 K まで冷却するという基本設計を固めた。焦点面は、希釈冷凍機により 100 mK 以下まで冷却される。昨年度は、これまで開発してきた光学鏡筒に、共同研究者が開発した反射防止膜を施したレンズをインストールし組み立てを行い光学鏡筒が完成した。完成した光学鏡筒をカリフォルニア大学サンディエゴ校に輸送し、同校で開発されている小口径望遠鏡のクライオスタットに統合され試験が開始された。希釈冷凍機の分溜器 (Still) によってレンズ、バッフルを含む光学鏡筒全体が 1 K 台に冷やされる予定であり、このような光学鏡筒は過去の CMB 実験で例がなく系統誤差となる迷光の大幅な低減が期待される。加えて、校正用の偏光光源となるワイヤーグリッド校正装置を開発し、試作装置を共同研究先であるシカゴ大学に輸送した。今後望遠鏡との統合試験が行われる予定である。

また、偏光変調のための冷却型連続回転式半波長板システムの開発において本研究室は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・評価を進めている。2 台目、3 台目の作成も順調に進んでおり (図 6.7.3)、2021 年度中に半波長板システムの作成を完了し、順次望遠鏡クライオスタットへの統合作業に移る予定である。

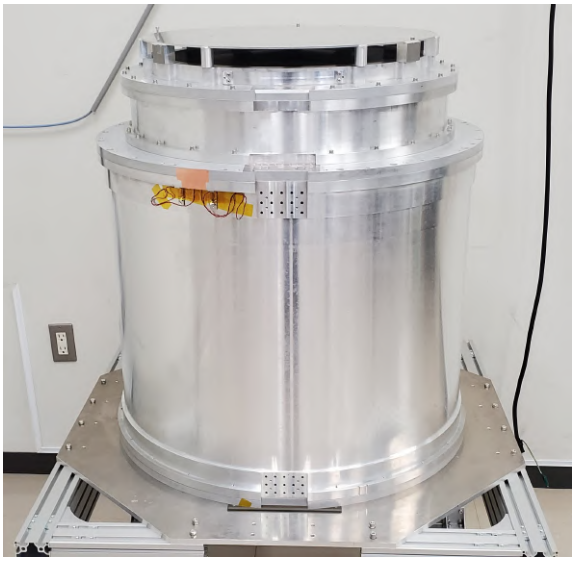


図 6.7.2: Simons Observatory 小口径望遠鏡用の光学鏡筒の写真。今年度完成し、アメリカで望遠鏡との統合試験が行われている。

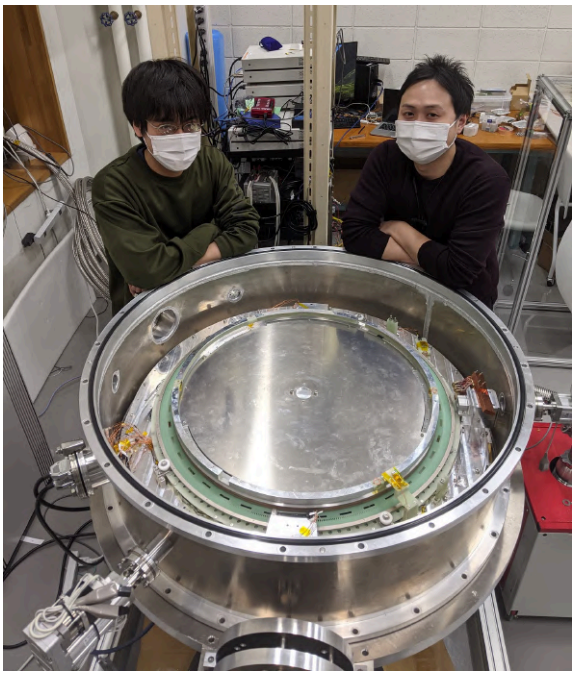


図 6.7.3: 本研究室で作成中の、2 台目 Simons Observatory 用低温連続回転式半波長板システム。Kavli IPMU との共同研究により開発し、内径 55cm の大型超伝導浮遊式ベアリングを採用する。

6.7.4 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。超伝導転移端素子およびその多重化素子の読み出し装置としてスタンフォード大学および SLAC 研究所の共同研究者が開発した読み出し装置 SMuRF が導入された。これによって、1 回の冷却で 5,000 素子以上の超伝導転移端センサおよび超伝導共振機を測定可能な測定環境が整備された。試験用の素子を用いた測定で、ノイズレベルも良好であることが確認された。超伝導転移端素子の特性評価としては、新たな測定手法を開発し測定可能な基礎パラメータを増やすと共に Simons Observatory 用試作素子の評価を行った。

光学素子の分野においては、半波長板用サファイアや赤外光フィルタ用アルミナなど、高屈折率素材のための広帯域防反射加工の開発を、高エネルギー加速器研究機構および Kavli IPMU との共同研究により進めている。ムライト溶射とプラスチック素材を用いた 90~160 GHz 帯の二層防反射加工は既に技術を確立し、Simons Array 用の赤外光フィルタを作成したほか、サファイア半波長板の防反射加工の作成も完了した。また、Simons Observatory や将来実験を見据えて、他の波長帯や、三層の防反射加工の開発も進めている。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Zhilei Xu, *et al.*, "The Simons Observatory: metamaterial microwave absorber and its cryogenic applications," Appl. Opt. 60, 864-874 (Feb 2021).

[2] Maximilian H. Abitbol, *et al.*, "The Simons Observatory: Bandpass and polarization-angle calibration requirements for *B*-mode searches", arXiv:2011.02449 (Nov 2020)

[3] The POLARBEAR Collaboration, "A measurement of the CMB *E*-mode angular power spectrum at subdegree scales from 670 square degrees of POLARBEAR data," Astrophys. J., 904(1):65 (Nov 2020)

[4] Zack Li, *et al.*, "The cross correlation of the ABS and ACT maps," JCAP09(2020)010 (Sep 2020)

[5] The POLARBEAR Collaboration, "A Measurement of the Degree Scale CMB *B*-mode Angular Power Spectrum with POLARBEAR," Astrophys. J., 897(1):55 (Jul 2020)

[6] Masashi Nashimoto, Makoto Hattori, and Yuji Chinone, "CMB Shadows: The Effect of Interstellar Extinction on Cosmic Microwave Background Polarization and Temperature Anisotropy," Astrophys. J. Letter, 895(1):21 (May 2020)

[7] The POLARBEAR Collaboration, "Measurement of the Cosmic Microwave Background Polarization Lensing Power Spectrum from Two Years of POLARBEAR Data," Astrophys. J., 893(1):85 (Apr 2020)

[8] The POLARBEAR Collaboration, "Internal delensing of cosmic microwave background polarization B-modes with the POLARBEAR experiment," Physical Review Letters, 124(13):131301 (April 2020)

[9] C. A. Hill, A. Kusaka, *et al.*, "A cryogenic continuously rotating half-wave plate mechanism for the POLARBEAR-2b cosmic microwave background receiver," Review of Scientific Instruments 91, 124503 (2020)

(会議抄録)

[10] Aamir M. Ali, *et al.*, "Small Aperture Telescopes for the Simons Observatory" Journal of Low Temperature Physics volume 200, pages461–471(2020) (April 2020)

[11] Kenji Kiuchi, *et al.*, "Simons Observatory Small Aperture Telescope overview" SPIE volume 11445, pages1372-1379(2020)

[12] Yuki Sakurai, *et al.*, "Breadboard model of the polarization modulator unit based on a continuously rotating half-wave plate for the low-frequency telescope of the LiteBIRD space mission," SPIE volume 11453, 114534E (2020).

[13] J. Ito, *et al.*, "Detector and readout characterization for POLARBEAR-2b," SPIE volume 11453, 1145320 (2020).

[14] Haruki Nishino, *et al.*, "Data acquisition and management system for the CMB polarization experiment: Simons Array," SPIE volume 11453, 1145329 (2020).

[15] Yuki Sakurai, *et al.*, "Half-meter Scale Superconducting Magnetic Bearing for Cosmic Microwave Background Polarization Experiments," J. Phys.: Conf. Ser. 1590 012060 (2020)

[16] Yuuko Segawa, *et al.*, "Method for rapid performance validation of large TES bolometer array for POLARBEAR-2A using a coherent millimeter-wave source," AIP Conference Proceedings 2319, 040019 (2021)

(国内雑誌)

[17] 茅根 裕司, "宇宙マイクロ波背景放射 B-mode 偏光観測の現在と未来: POLARBEAR 実験と次の 10 年間の展望," 天文月報, p. 542-551, 第 113 巻, 2020 年

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[18] Yuji Chinone, "Systematics–POLARBEAR/Simons Array perspective," CMB-S4 Spring 2021 Collaboration meeting, Online (March 2021)

[19] Yuji Chinone, "A Null test framework for B-mode measurements with POLARBEAR," CMB systematics and calibration focus workshop, Kavli IPMU, Kashiwa, Japan, Online (November 2020)

[20] Yuji Chinone, "The results and achievements of the POLARBEAR experiment in the 2010s and its future in the 2020s," KEK Theory Seminar, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Ibaraki, Japan, Online (September 2020)

[21] Yuji Chinone, "The results and achievements of the POLARBEAR experiment in 2010s and its future," UTokyo UTAP/RESCEU Seminar, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, Online (April 2020)

(国内会議)

一般講演

[22] 茅根 裕司 他, "POLARBEAR 実験による B モード偏光観測結果の総括と最新結果," 日本物理学会 2020 年秋季大会, 筑波大学, Online (2020/09)

[23] 茅根 裕司 他, "宇宙マイクロ波背景放射観測実験「POLARBEAR」による B モード偏光観測結果の総括," 日本天文学会 2020 年秋季年会, Online (2020/09)

[24] 茅根 裕司 他, "宇宙マイクロ波背景放射観測実験「POLARBEAR」による B モード偏光観測結果の総括," 日本天文学会 2020 年秋季年会, Online (2020/09)

[25] 木内 健司 他, "Simons Observatory 実験の概要と開発状況," 日本物理学会第 76 回年次大会, Online (2021/03)

[26] 村田 雅彬 他, "Simons Observatory 実験に向けたワイヤーグリッドを用いた偏光較正装置の性能評価," 日本物理学会第 76 回年次大会, Online (2021/03)

[27] 西ノ宮 ゆめ 他, "CMB 偏光観測に用いる TES の光学特性評価における測定環境・手法の開発," 日本物理学会第 76 回年次大会, Online (2021/03)

[28] 山田 恭平 他, "Simons Observatory 実験の連続回転式低温半波長板の開発," 日本物理学会第 76 回年次大会, Online (2021/03)

[29] 坂栗 佳奈 他, "CMB 偏光観測実験に用いる半波長板、アルミナフィルタ用反射防止膜開発," 日本物理学会第 76 回年次大会, Online (2021/03)

[30] 寺崎 友規 他, "単一光子検出用集中定数力学的インダクタンス検出器の設計," 日本物理学会第 76 回年次大会, Online (2021/03)

[31] 木内 健司 他, "Simons Observatory 実験の小口径望遠鏡に用いる低温光学筒の開発状況," 日本物理学会 2020 年秋季大会, Online (2020/09)

[32] 村田 雅彬 他, "次世代 CMB 偏光観測実験 Simons Observatory 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性能評価," 日本物理学会 2020 年秋季大会, Online (2020/09)

[33] 西ノ宮 ゆめ 他, "CMB 偏光観測に用いる TES の熱的特性評価および光学試験の進捗状況," 日本物理学会 2020 年秋季大会, Online (2020/09)

[34] 山田 恭平 他, "CMB 観測における連続回転式低温半波長板のリモートモニタリング," 日本物理学会 2020 年秋季大会, Online (2020/09)

[35] 坂栗 佳奈 他, "CMB 観測に用いるサファイア・アルミナフィルタの反射防止膜製作と性能評価," 日本物理学会 2020 年秋季大会, Online (2020/09)

[36] 寺崎 友規 他, “CMB 偏光観測に用いるマイクロ波多重化読み出し回路の性能評価,” 日本物理学会 2020 年秋季大会, Online (2020/09)

招待講演

[37] 茅根 裕司, “CMB survey: SO, SA, CMB-S4,” Testing Gravity THxOBS Japan kickoff meeting, 名古屋大学, Online (2020/08)

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、例の枚挙にいとまがない。これらはすべて、非平衡な状況で相互作用する自由度が数多く集まった結果、マクロスケールで非自明な性質が発現している典型例である。このような非平衡現象を扱う熱力学・統計力学の枠組みは発展途上にあり、その構築は現代科学に課された大きな未解決問題と言えるだろう。

近年は、学際的な流れも本格化している。例えば、非平衡で広く成り立つ「ゆらぎの定理」や「熱力学的不確定性関係」は、非平衡ゆらぎの基本的性質の理解を深化させただけでなく、生体分子モーターなどの具体的問題に切り込む力となっている。自力で動く粒子集団を扱うアクティブマター物理学は、液晶理論と統計力学の融合により基礎学理が整備され、生体分子集団から細胞組織、微生物集団に至る様々な対象において、普遍的な物理学の存在を描き出した。

こうした背景のもと、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て、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。2020 年度は、以下のような課題に取り組んだ。なお、テーマによっては研究室ウェブサイト `https://lab.kaztake.org/` でも紹介をしているので、適宜参照されたい。

6.8.1 ソフトマター系の非平衡実験

液晶トポロジカル欠陥の 3 次元動力学観測

ネマチック液晶は一軸性の異方性をもち配向秩序を形成する。配向が整合しない点は線状のトポロジカル欠陥として現れ、液晶の流動性によって配向場と流れ場の連立方程式で表される理論的に複雑な運動をする。実験的にも、液晶トポロジカル欠陥の 3 次元運動を観察する手法は確立されていない。トポロジカル欠陥の 3 次元動力学を理解することは、非平衡統計力学における重要な実験系である液晶乱流の理解に不可欠であり、細胞集団を扱うアクティブネマチックや同様の線欠陥を扱う量子渦や宇宙ひもとの関連からも、大きな意味を持つ。本研究では、蛍光色素を標識として用いた共焦点観測を行うことで、液晶トポロジカル欠陥の 3 次元動力学を捉えることに成功した（図 6.8.1）。また、トポロジカル欠陥特有の再結合と呼ばれる 2 本の線欠陥がつなぎ変わる現象について解析を行い、欠陥間距離の満たすスケーリングや運動メカニズムについて解析を行った [3, 13, 17, 19, 25, 26, 29, 40]。

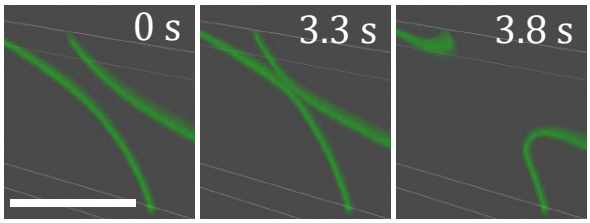


図 6.8.1: 液晶トポロジカル欠陥の再結合過程 [13]。スケールバーは 100 μm.

液晶乱流で探求する界面成長ゆらぎの普遍法則

ランダム成長過程の界面ゆらぎ等を記述する Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 普遍クラスは、1 次元では確率的可積分性による厳密解研究が進展し、普遍的な非平衡ゆらぎの詳細な統計的性質が調べられる系として注目されている。中でも、界面形状により異なる分布法則が出現するという予言は重要で、理論的には円形・平面・定常という 3 つの代表的ケースが集中的に調べられてきた。実験的には、竹内らによる液晶乱流成長過程の計測で円形・平面の統計法則は検証されていたが、定常ケースについては定常界面の実現が難しく、実験例が存在しなかった。今回、我々は、レーザーホログラフィ技術により定常状態に期待される界面形状を人為的に生成し、その時間発展を計測することで、定常 KPZ 普遍法則の初めての実験検証に成功した（図 6.8.2）[6, 10, 17, 31]。KPZ 定常状態は、非平衡定常状態の 1 つとして様々な研究と関連する可能性があり、本実験系にはそのような発展可能性も見込めるようになった。

noisy な電圧下の液晶対流ダイナミクス

非線形な系でノイズが引き起こす非自明な現象はノイズ誘起現象として関心を集めている。実際の流体系においてノイズが果たす役割についてはその多くが未解明であり、我々が関心を持つテーマである。ネマチック液晶のロール状の電気対流は、特定条件下ではその傾き角が振動することが報告されており、本研究ではこの対流振動のダイナミクスを、ノイジーな電圧を印加した条件下で調べることとした。この実験系は、散逸構造を持つ興味深い流体系でありな

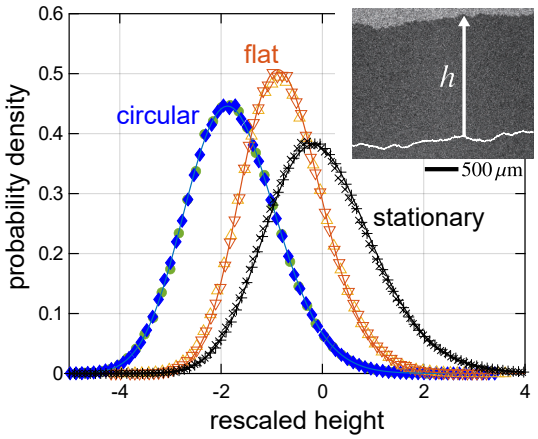


図 6.8.2: 液晶乱流成長における界面ゆらぎの測定結果（記号、有限時間効果補正済）と厳密解の予言（実線）[6, 10]。挿図は定常界面実験で得た液晶乱流の写真で、白線は生成時の界面形状を示す。

がら、印加電圧の変調などによってノイズのデザインが容易に行えるという利点を持つ。対流振動が非自明な変化を起こすようなノイズのデザイン方法を模索するとともに、共通ノイズ同期という現象の発生の有無を主要な観点として、共通のノイズを与えた複数の対流振動の時系列データを比較する解析を行っている。

自己駆動粒子集団における位置と配向の秩序

アクティブマター系における粒子配置の秩序については、平衡状態の液体のような系統的理解は得られていない。そこで我々は、まず相分離や集団運動などの多体現象が生じる密度よりも十分低密度の希薄条件下での二体相関という基本的問題に着目し、実験・理論解析・数値計算をおこなった。交流電場をエネルギー源として駆動するヤヌス粒子の相互作用を調節することで、基本的なアクティブマター模型であるアクティブブラウン粒子模型に類似の運動状態を実現した。結果として、各粒子の進行方向前方は衝突によって他の粒子の存在確率が上がる一方、粒子の後方では、真後ろではなく、両脇に他の粒子の存在確率が下がる双翼状の特異な枯渇領域が現れることを発見した (図 6.8.3)。この性質を、模型の数値計算・解析計算からも特徴付けた [7, 27, 32, 33, 36, 38, 42]。

さらにヤヌス粒子の相互作用を調節し配向相互作用を加えることで、ヤヌス粒子が長距離配向秩序を持った集団運動状態を実現することを見出した。この集団運動が、基本的な集団運動模型である Vicsek 模型において予言されていた巨大粒子数ゆらぎや冪的に減衰する配向相関を示すことを明らかにした [9, 32, 33, 36, 38]。

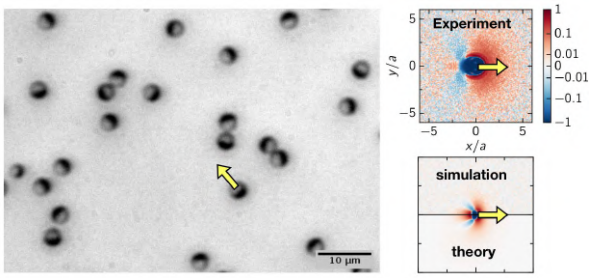


図 6.8.3: 希薄な自己駆動ヤヌス粒子集団の実験写真（左）と各粒子の周囲に他の粒子が存在する確率分布（右）。実験・数値計算・解析理論で同様の双翼状の枯渇領域が得られた [7]。

6.8.2 微生物系の非平衡実験

細胞サイズゆらぎのスケール不変性

微生物細胞の大きさは、たとえ同じ生物種でも個体ごとに異なる。こうした細胞サイズのゆらぎにはどのような法則があるだろうか。典型的な体積が異なる生物種間では、細胞サイズ分布は当然異なる。しかし、各生物種の平均体積で規格化された相対体積の分布は、生物種に依らないという報告がある。これはスケール不変性と呼ばれ、バクテリアに対しても異なる培養条件に対するスケール不変性が成り立つことが報告されている。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調べた。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、高密度菌集団に対しても一様な培養環境を維持できる独自開発デバイス「広域マイクロ灌流系」を用いて本研究に取り組んだ。大腸菌集団に対して急激に飢餓を起こし、体積分布の時間発展を計測したところ、時間変化する細胞サイズ分布に対しても常にスケール不変性が成立することを発見した (図 6.8.4)。さらに、細胞周期モデルの数値計算から、遅い飢餓過程ではスケール不変性が破綻することも発見した [8, 15, 16, 22, 23, 30, 35, 37]。

運動性バクテリア集団の混み合い

広域マイクロ灌流系 [8] を使うと、従来の微小流体デバイス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でき、一様な培養環境のもとで、細胞増殖による混み合い効果が集団の運動状態にどのような影響を及ぼすか調べることもできる。我々は、広域マイクロ灌流系を用いて閉鎖空間で運動性大腸菌を培養し、高密度における混み合い現象の計測を行った。結果、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形成されることを発見した (図 6.8.5)。我々は菌の画像解析や蛍光ビーズのトラッキング等

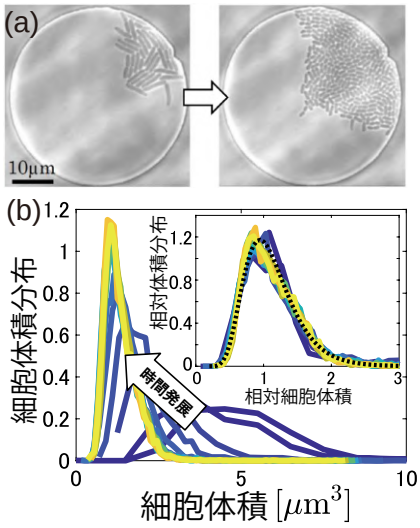


図 6.8.4: (a) 大腸菌の飢餓応答 (b) スケール不変性 [8]

により定量的解析を進め、この運動状態とガラス系との関連を見出すことに成功した。また、培養環境によっては核生成的な凝集相が出現することも見出した。この核生成的凝集現象は、上述のガラス的振る舞い、すなわち集団全体が不均一に動的減速を示す場合とは質的に異なるものである。すなわち大腸菌集団の高密度集団挙動には、ガラス的な混雑化と核生成的凝集の 2 種類の振る舞いが独立に存在する可能性があり、その統計的な特徴づけを行っている [14, 23, 28]。

境界におけるバクテリアの集団と単体の流体力学

大腸菌や枯草菌などの遊泳する棒状バクテリアは、高密度でアクティブ乱流と呼ばれる乱雑な集団運動を示す。アクティブ乱流のバルク中での挙動を記述する流体方程式は確立されているものの、境界条件は不明瞭であったため、境界の存在下での集団挙動の予測は不可能であった。そこで、我々は微細加工技術により作成した直径 20 μm 程度の微小な柱の周囲に誘起される流れ場から境界条件を実験的に推定し、境界で速度が 0 となる従来の条件に加えて、渦度も 0 となることを発見した。この境界条件を元に、柱の周囲の流れ場や流れ場のマクロ挙動を数値計算で再現することに成功し、かつ、解析計算でも説明することに成功した。[5, 20, 33, 34, 36, 39, 41, 43, 44, 47]

得られた境界条件をミクロな視点から解釈するために、単体のバクテリアの遊泳における境界の効果についても実験と数値計算をおこなった。微細加工で作成した様々な半径の柱の近傍に、単体のバクテリアが流体力学的な引力により捕捉される現象を観察することにより、捕捉力の曲率依存性を見出した。さらにバクテリアを 3 次元的な空間から擬 2 次元的な非常に薄い流体相中に閉じ込めることで、引力が急激に強くなり、それにともない柱近傍の滞在時間やバクテリア数密度も増大することを明らかにした。

6.8.3 非線形動力学によるアプローチ

大自由度カオスを機械学習で捉える

何らかの時空間ダイナミクスが観測され、その記述を試みる際、変数がいくつ必要かは本質的な情報である。力学系分野では、偏微分方程式系を主たる対象として「慣性多様体」という概念が考案されており、その次元が、系の記述に必要な変数の数を与えるとされているが、解析的なアプローチで慣性多様体の次元を求めることはできていない。我々は、Lyapunov 解析に基づいて慣性多様体の次元や局所構造を推定する数値的手法と、リザバーコンピューティングという機械学習手法を組み合わせ、時空カオス系に対して、時系列データから慣性多様体の次元や局所構造を推定することに成功した。代表的な時空カオス系である Kuramoto-Sivashinsky 方程式に対し、数値的に生成した時系列データに本手法を適用することで、先行研究による慣性多様体次元の推定値を再現した。また、リザバーにおける Lyapunov ベクトルの情報から、リザバーコンピューティングで検出された中立的摂動モードと対称性の結びつきを明らかにすることもできた [12]。

＜受賞＞

[1] K. A. Takeuchi, APS Outstanding Referee, American Physical Society, Feb. 25, 2021.

[2] 山本真大, 日本物理学会第 76 回年次大会学生優秀発表賞（領域 12）, 2021 年 3 月 12 日.

[3] 図司陽平, 日本物理学会第 76 回年次大会学生優秀発表賞（領域 12）, 2021 年 3 月 13 日.

[4] 竹内一将，オンライン授業等におけるグッドプラクティス総長表彰，東京大学，2021 年 3 月 22 日.

＜報文＞

(原著論文)

[5] 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, Commun. Phys. **3**, 76 (2020).

[6] T. Iwatsuka, Y. T. Fukai, and K. A. Takeuchi, Direct Evidence for Universal Statistics of Stationary Kardar-Parisi-Zhang Interfaces. Phys. Rev. Lett. **124**, 250602 (2020).

[7] A. Poncet, O. Bénichou, V. Démery, and D. Nishiguchi, Pair correlation of dilute Active Brownian Particles: from low activity dipolar correction to high activity algebraic depletion wings, Phys. Rev. E **103**, 012605 (2021).

[8] T. Shimaya, R. Okura, Y. Wakamoto and K. A. Takeuchi, Scale invariance during bacterial reductive division observed by an extensive microperfusion system. arXiv:2004.04903.

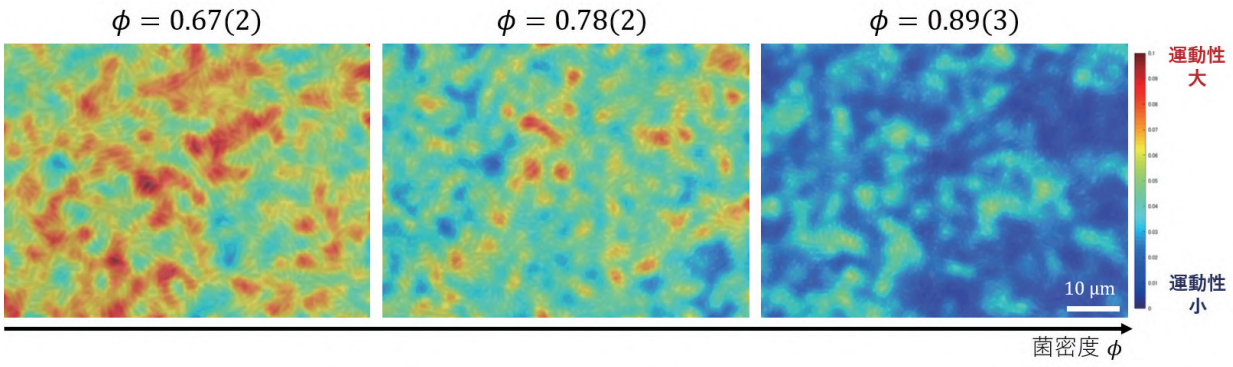


図 6.8.5: 高密度状態における 0.05 秒間の輝度差分（擬似カラーマップ）[14]。菌密度 ϕ の増加に伴って運動性が大きい領域 (暖色系) が狭まり運動性が小さい領域 (寒色系) が広がるが、これらはガラス系に似た時空間的に不均一な分布を示した。

[9] J. Iwasawa, D. Nishiguchi, and M. Sano, Algebraic correlations and anomalous fluctuations in ordered flocks of Janus particles fueled by an AC electric field, arXiv:2011.14548.

(会議抄録)

(国内雑誌)

[10] 竹内一将, 液晶が切り拓く非平衡統計力学の普遍法則 －液晶乱流（動的散乱モード）を中心に－. 日本液晶学会誌 **24**, 218-227 (2020).

[11] 西口大貴, 谷田桜子, 佐野雅己, 有賀暢迪, 国立科学博物館での企画展「相転移の世界」実施から見る 数物系展示の意義と課題. 大学の物理教育, **27(1)**, 60-64 (2021).

(学位論文)

[12] Taro P. Shimizu, Characterizing chaos in large systems by time series analysis and machine learning. Doctoral thesis (Tokyo Tech), 2021.

[13] 図司陽平, 液晶におけるトポロジカル欠陥ダイナミクスの共焦点観測. 修士論文（東京大学）, 2021.

[14] 山本真大, 高密度バクテリア集団のガラス的協同運動. 修士論文（東京大学）, 2021.

(著書)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[15] T. Shimaya, R. Okura, Y. Wakamoto and K. A. Takeuchi, Scale invariance of bacterial cell size fluctuations during starvation. APS March Meeting 2021, oral, online, Mar. 18, 2021.

招待講演

[16] K. A. Takeuchi, Microfluidics for dense bacterial populations unveils scale invariance in starving bacteria. 2020 NCTS Complex Systems Workshop, invited talk, online, Oct. 23, 2020.

[17] K. A. Takeuchi, Dynamic scaling of liquid crystal defects: microscopic and macroscopic views. Quantized vortices and nonlinear waves （量子渦と非線形波動）, invited talk, online, Feb. 19, 2021.

(国内会議)

一般講演

[18] 竹内一将, 液晶乱流で調べる、非平衡の不可逆的相転移とエントロピー生成, 山田科学振興財団 2020 年度研究交歓会, 新型コロナウィルスのため開催中止（発表有効）, 2020 年 5 月 30 日.

[19] 竹内一将, 液晶トポロジカル欠陥の三次元計測：ダイナミクスと構造の関係, さきがけ「トポロジー」領域第 3 回領域全体会議, 講演, オンライン, 2020 年 6 月 12 日.

[20] 西口大貴, H. Reinken, S. Heidenreich, A. Sokolov, M. Bär, S. H. L. Klapp, I. Aranson バクテリア乱流の境界条件と渦秩序のトポロジカル制御, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 講演, オンライン, 2020 年 9 月 9 日.

[21] 西口大貴, 谷田桜子, 有賀暢迪, 国立科学博物館での企画展「相転移の世界」実施から見る数理系展示の意義と課題, , 日本物理学会 2020 年秋季大会, 講演, オンライン, 2020 年 9 月 11 日.

[22] 竹内一将, 高密度バクテリア集団研究のための広域マイクロ灌流系と、それによる細胞集団の統計物理学・情報物理学実験の試み, 第 58 回 日本生物物理学会年会, 講演, オンライン, 2020 年 9 月 17 日.

[23] 竹内一将, 高密度バクテリア集団の統計物理実験, 新学術領域研究「生命の情報物理学」 第 2 回領域会議, 講演, オンライン, 2020 年 9 月 28 日.

[24] 嶋屋拓朗, 非運動性大腸菌集団の三次元化とアクティブネマティクス, 第 19 回 関東ソフトマター研究会, ポスター, オンライン,2020 年 11 月 21 日.

[25] 図司陽平, 液晶におけるトポロジカル欠陥ダイナミクスの共焦点観測, 第 19 回関東ソフトマター研究会, 講演, オンライン, 2020 年 11 月 21 日

[26] 竹内一将, 液晶のエキゾチック欠陥研究に向けたパターン配向実験系の製作と議論, さきがけ「トポロジー」領域 第 4 回領域全体会議, 講演, オンライン, 2020 年 12 月 2 日.

[27] 西口大貴, A. Poncet, O. Bénichou, V. Démery, 低密度アクティブブラウン粒子の pair correlation における双翼状枯渇領域とスケーリング則:理論と電場駆動ヤヌス粒子実験 日本物理学会　第 76 回年次大会, 講演, オンライン, 2020 年 3 月 12 日.

[28] 山本真大, 古田祐二朗, 嶋屋拓朗, 大倉玲子, 若本祐一, 竹内一将, 高密度バクテリア集団のガラス的協同運動, 日本物理学会第 76 回年次大会, 講演, オンライン, 2021 年 3 月 12 日.

[29] 図司陽平, 竹内一将, ネマチック液晶における線欠陥の再結合ダイナミクスの共焦点観測, 日本物理学会第 76 回年次大会, 講演, オンライン, 2021 年 3 月 13 日.

[30] 嶋屋拓朗, 大倉玲子, 若本祐一, 竹内一将, 飢餓中におけるバクテリアサイズ揺らぎのスケール不変性, 日本物理学会 第 76 回年次大会, 講演, オンライン,2021 年 3 月 14 日.

招待講演

[31] 竹内一将, 液晶実験から非平衡厳密解、そして量子多体系へ, 物理工学の新展開, 招待講演, オンライン, 2020 年 12 月 21 日.

[32] Daiki Nishiguchi, Electrokinetic Janus particles: from self-organized flagella to winged pair correlation, アクティブマター研究会 2021, 招待講演, オンライン, 2021 年 1 月 23 日.

[33] 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　第 76 回年次大会, 第 14 回若手奨励賞（領域 11）受賞者企画講演, 招待講演, オンライン, 2021 年 3 月 14 日.

(セミナー・集中講義)

[34] 西口大貴, バクテリア乱流の反強磁性渦格子秩序とトポロジカル制御. セミナー, 理研・生体非平衡物理学理研白眉研究チーム（川口喬吾研究室）, 2020 年 4 月 30 日.

[35] 嶋屋拓朗, 広域マイクロ灌流系でみる細菌の reductive division とスケール不変性. セミナー, 生物普遍性研究機構, 2020 年 5 月 22 日.

[36] 西口大貴, アクティブマターの物理学　〜集団運動の秩序・ゆらぎ・トポロジー. 集中講義, 茨城大学中川尚子研究室, オンライン, 2020 年 6 月 22, 24 日.

[37] 嶋屋拓朗, 飢餓中におけるバクテリアサイズ揺らぎのスケール不変性. セミナー, 新学術領域研究「情報物理学でひもとく生命の秩序と設計原理」, 2020 年 11 月 5 日.

[38] 西口大貴, 電場駆動ヤヌス粒子で探るアクティブマターの scaling 則：鞭打ち運動・双翼状枯渇領域・長距離秩序相. セミナー, Nonlinear Seminar @Kashiwa, 2021 年 2 月 15 日.

[39] 西口大貴, バクテリア IV 型線毛の重合と単量体拡散の時空間ダイナミクス. セミナー, 生物普遍性研究機構, 2021 年 3 月 19 日.

[40] 竹内一将, 液晶の対称性・トポロジカル欠陥, さきがけ「トポロジー」領域 第 4 回インフォーマルミーティング「実空間のトポロジカル欠陥」, 講演, オンライン, 2021 年 3 月 30 日.

(アウトリーチ)

[41] 西口大貴, 生き物の群れと泳ぎに物理で挑む, 大阪星光学院中学・高等学校 ほしゼミ日曜講座, オンライン, 2020 年 6 月 28 日.

[42] 西口大貴,「群れ」に普遍的な構造はあるか？, YouTuber 予備校のノリで学ぶ「大学の数学・物理」（ヨビノリ）学術対談, YouTube, 2020 年 7 月 12 日.

[43] 西口大貴, バクテリア乱流ってなんだ, YouTuber 予備校のノリで学ぶ「大学の数学・物理」（ヨビノリ）学術対談, YouTube, 2020 年 7 月 19 日.

[44] 西口大貴, 物理の世界の広さと未来の自分との出会い, 東京理科大学公開講座「坊っちゃん講座」,「国際科学オリンピックに参加しよう！ 物理オリンピック参加に始まる大飛躍」パネリスト, 東京理科大学からオンライン発信, 2020 年 9 月 19 日.

[45] 嶋屋拓朗, 数字で紐解く、意外で賢い細胞分裂のはなし. 10 分で伝えます！ 東大研究最前線, 第 93 回 東京大学五月祭, 2020 年 9 月 20-21 日.

[46] 嶋屋拓朗,『液晶』の物理で紐解く生命現象. 10 分で伝えます！ 東大研究最前線, 第 71 回 東京大学駒場祭, 2020 年 11 月 21-23 日.

[47] 西口大貴,「群れ」はなぜ生まれるのか NEW GENERATION アクティブマター物理学, 東京大学新聞 第 2957 号, 2021 年 2 月 9 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、カルシウムイメージングや光遺伝学（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法を用いて、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（網羅的な神経回路構造の再構築）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を統計解析したり数理モデル化したりすることにより、神経回路の動作原理を探る研究も推進している。配線パターンの分かっているモデル神経回路において、個々の神経細胞の活動をリアルタイムに解析することにより，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と構造の数理統計解析

動物の行動はニューロンの集団活動により創出されると考えられている。しかし、脳神経系がどのようにして協調的かつ機能的な集団活動を生成するのかは、神経科学における大きな謎の一つである。私たちは、ショウジョウバエ幼虫の脳神経系を構成する多数（数千個）の神経細胞の活動を経時的に測定し、得られた高次元時系列データを数理統計学的に解析することにより、神経回路全体の巨視的ダイナミクスを捉えることに挑戦している。一方、脳の情報処理の仕組みを理解するためには、集団活動の基盤となる神経回路の構造を明らかにすることも重要である。最近開発された電子顕微鏡画像３次元再構築や膨潤試料顕微鏡法を用いたコネクトミクス解析は神経回路構造を網羅的に明らかにすることを可能とする画期的な手法であるが、回路構造の追跡に膨大な労力がかかるという問題がある。また脳神経組織の構造には個体差があるため異なる個体由来のデータをいかにして統合するかということも重要な課題である。私たちは様々な数理統計手法を用いてこれらの困難点を克服し、回路の構造に関する情報を効率よく取得し、さらにそれを共通の標準テンプレートにマッピングすることを試みている。最終的には神経活動と回路構造に関する実験データをひとつのプラットフォームに落とし込むことにより、神経回路の作動原理をシステムレベルで明らかにしたいと願っている。

運動パターン生成時のシナプス集団における空間的に連続な活動伝播とその幾何構造（福益一司、能瀬聡直、高坂洋史）

中枢神経系（CNS）におけるシナプス集団には、環境や体部位の情報を空間的に連続に反映したマップ構造を持つものがある。例えば、視覚系では、視覚受容野の位置関係が、網膜や視覚野において連続的に反映される。運動系においても、体の各部位の位置関係が、その各部を制御する運動神経細胞の空間配置に反映されている（マイオトピックマップとよばれる）。このようなマップ構造には、神経回路が情報を処理する上で、何らかの利点があると考えられる。特に、運動神経細胞におけるマイオトピックマップの存在は、運動パターン生成回路（中枢パターン生成器、CPG）などの上位の介在神経細胞群の空間配置に、何らかの制約を与えることが予想される。従って、CPG のシナプスの空間配置自体に、上記のような連続性がみられる可能性が高い。本研究では、数千個のシナプスからなるショウジョウバエ幼虫の CPG をモデルとしてこの可能性を検証した。

まず初めに、前進・後進などの運動パターン生成時における CNS の集団的神経活動を、カルシウムイメージングによって撮影した。次に、各シナプス内のピクセルの強度変化は類似するという予想に基づき、イメージングデータから 5,000〜12,000 個のシナプス集団の活動情報を抽出した。最後に、このシナプス集団が連続的なマップ構造を持つかについて調べるため、シナプスの発火時間に着目し、発火時間がシナプスの空間位置に対して連続的に変化するかを検証した。

その結果、シナプス数十個程度のスケールにおいて、シナプス間の距離と発火時間差が正比例すること、すなわち、シナプスの発火が CNS 内で空間的に連続して起こっていることを見出した。このシナプス発火の空間伝播は単一細胞内の活動電位の伝播より速度が遅いことから、複数の細胞にわたるもので

ある可能性が高い。さらに詳細に分析すると、シナプス間の発火の伝播が、放射状に収束、または発散する領域が複数存在することが分かった。この収束領域と発散領域は、CNS 内で互いに縞状のパターンを形成しており、またそれら領域の一部は、マイオトピックマップを形成する運動神経細胞の位置と対応していることが判明した。以上の結果から、幼虫の神経系における CPG には、運動パターンを生成するための空間的に連続な構造が存在することが示唆された。

ショウジョウバエ中枢神経回路の三次元標準テンプレートの構築とその応用（真中美穂、能瀬聡直、高坂洋史）

神経組織の構造には個体差があるため異なる個体から得られたデータを重ね合わせて定量的な解析をすることは一般に困難である。本研究では、この困難を克服するために、ショウジョウバエ幼虫中枢神経系の標準テンプレートの構築を目指した。ショウジョウバエの中枢神経系は脳と腹部神経節 (Ventral nerve cord, VNC) で構成される。本研究では、VNC の神経構造の三次元標準テンプレートの構築を試みた。このため VNC 内の構造を免疫組織染色法で可視化し、32 点の共通のランドマークを 12 個体において同定し、その座標を抽出した。その座標をもとに、最小二乗法によって Affine 変換行列を求めることで、12 個体の平均となる標準テンプレートを作成した。

次にこの標準テンプレートの適用例として VNC 内の全神経細胞を、由来する神経幹細胞 (Neuroblast, NB) 毎に標準テンプレートにマッピングすることを試みた。まず各 NB 由来の細胞を標準テンプレートにマッピングし、さらに、調べた NB すべてを１つの標準テンプレートにマッピングすることで、VNC の神経叢 (neuropil) を NB を要素として分解することに成功した。また別の適用例としてショウジョウバエ属に属する近縁種の VNC 内神経構造の種間差を定量化した。

膨潤試料顕微鏡法による幼虫中枢神経系の３次元構造解析（伊達隆久、能瀬聡直、高坂洋史）

神経細胞同士の結合を可視化して回路を再構成する手法として、高い分解能をもつ電子顕微鏡を用いたコネクトミクス解析が広く用いられている。しかし、電子顕微鏡画像では神経細胞の同定は主に手動で行われており、膨大な労力がかかってきた。また、細胞種特異的な遺伝学的ラベリングが使用できないという問題もあった。そこで近年、膨潤試料顕微鏡法 (Expansion Microscopy、以下 ExM) という新しいナノスケールイメージング手法が開発された。この手法では、サンプル内部に吸水性ポリマー格子を構築し、組織を物理的に膨張させて蛍光プローブ同士を引き離すことで、回折限界より小さな構造を光学顕微鏡で観察することができる。電子顕微鏡画像を用いた手法に比して、ExM ではずっと効率よく画像を取得することができる。さらに遺伝子操作による蛍光ラベリングを自在に使用できるというメリットがある。そこで、本研究ではショウジョウバエ幼虫の中枢神経系に対して ExM を適用し、神経系の構造を解析した。まず、通常の免疫組織染色法により全神経細胞を蛍光物質で標識し、この標本を ExM で拡大して共焦点顕微鏡で撮影した。ExM によって、組織は 3 倍から 4 倍ほどに等方 (長さに対する誤差 3 %未満) に膨張し、分解能が約 100nm 程度まで向上した。その結果、拡大前は不鮮明だった単一神経細胞の神経突起を識別することができた。

画像取得と並行して、全神経細胞の ExM 画像から個々の神経突起を分離して識別する画像処理アルゴリズムの開発を始めた。画像の輝度地形の局所的な曲率から計算される Shape index という特徴量で細胞膜の位置を抽出することで、２次元画像内の軸索断面一つ一つを分離して検出することに成功した。同時染色したスパースな神経細胞画像とアルゴリズムの出力を比較することで、分離の正確性を確かめることができた。

今後は、拡大率の向上をはじめとした「試料作成方法の改良」と、「神経突起検出のアルゴリズムの正確性、汎用性の向上」に取り組み、神経系の微細構造をより詳細に調べる。また、神経細胞の活動イメージングと、ExM による解剖学的解析法を組み合わせる応用も模索していく。

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。筋細胞は体全体に配置しているため、そのダイナミクスを細胞レベルで解析するのは容易ではなかった。そこで、本研究室ではこれを可能とする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、回路の時空間的信号とロボットの体構造変形との関係を解析している。

神経力学モデルとソフトロボットによるショウジョウバエ幼虫の運動ダイナミクスの解析（孫喜洋、能瀬聡直、高坂洋史）

本研究では、柔らかい動物であるショウジョウバエ幼虫の運動機構を定量的に明らかにするために、神経回路と幼虫の身体の物理特性に基づいた神経力学モデルの構築と、それに基づいたソフトロボットの開発を行なった。幼虫の身体の物理特性を求めるために、物性研究で用いられる応力緩和法によって幼虫の身体の粘弾性特性を測定した。その結果、従来柔らかい動物で仮定されてきた Kelvin-Voigt model や、Maxwell model では幼虫の粘弾性特性を記述できず、

より一般的な形式である標準線形モデル（Standard linear model）が適することが分かった。また、光遺伝学と張力測定を組み合わせることで、幼虫が発揮する筋力の定量測定に成功し、これまでほとんど不明であった幼虫の筋肉の力学特性を明らかにした。以上の測定に基づいて幼虫の力学モデルを構築し、神経回路モデルと組み合わせることで、幼虫の運動の数理モデル化を行なった。その結果、実際の幼虫の運動パターンを数理モデルで再現することに成功した。

次に、この数理モデルの妥当性を検討するために、ソフトマテリアルを用いて幼虫のソフトロボットを構築し、運動の実現、および数理モデルの予想の検証を行なった。ソフトマテリアルで幼虫の体節を模したチャンバーを作成し、その各内部の圧力を、真空ポンプと Arduino マイコンボードによるバルブの時空間制御によって、コントロールした。その結果、幼虫の示すぜん動運動を模した前進運動を実現することに成功した。このロボットを用いて、筋収縮力や筋収縮時間が運動速度の制御に重要であるという数理モデルの予想を検討し、数理モデルの予想と整合した結果を得た。以上の解析から、ショウジョウバエ幼虫の運動速度制御に関して、力学的な機構が明らかになった。この研究は、新領域物質系の伊藤耕三博士、眞弓皓一博士、劉暢博士との共同研究である。

深層学習を用いたショウジョウバエ幼虫運動の定量化（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手作業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労力がかかっていた。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。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、運動パターンの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。

ショウジョウバエ幼虫前進運動の最初期に活動する神経回路の特性分析（劉英涛、能瀬聡直、高坂洋史）

ショウジョウバエ幼虫の前進運動は、「テレスコーピング」と「ウェーブ」の二段階から構成される。前段階の「テレスコーピング」では、ほとんどの体表が地面に対して相対運動せず、体液と臓器が前方に押し出されることが特徴である。本研究では、この段階に関わる中枢神経回路を探求した。今年度は、A31c と呼ばれる腹部神経節の各分節に存在し、運動の初期段階に活動する介在ニューロンの機能解析を行なった。まず光遺伝学を用いて A31c を強制的に活動させたところ、体の尾端が地面方向に屈曲する運動が引き起こされ、さらに筋収縮レベルで解析したところ、主に輪状筋が収縮するということが分かった。次に、A31c の下流のニューロンである A26f の機能解析を行なったところ、A26f は輪状筋を支配する運動ニューロンの上流に位置し、GABA 作動性、すなわち抑制性であることが分かった。この知見に一致して、光遺伝学を使って A26f を活動させると輪状筋が弛緩した。また、カルシウムイメージング法を用いて A31c と A26f の活動を観察した結果、各神経節の A26f 細胞は同時に活動し、A31c の発火とともにその活動が低下することが分かった。これらの結果から、A31c と A26f が前進運動の初期段階において各体節の輪状筋の活動を制御することが分かった。今後は、光遺伝学を利用して A31c と A26f の神経活動を阻害させて、この神経回路が運動の初期段階に必須であるかどうかを解明することを目指す。

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、今まで私たちは個々のニューロンの配線が形成される過程を生体内で可視化し、さらにこの過程を制御する機能分子を同定してきた。現在、これまでの単一ニューロンレベルの研究を回路レベルに発展させ、複数の神経配線からなる機能的な神経回路がどのようにして構築されるのかを調べている。

コマンドニューロンの軸索伸長制御による行動選択の多様化（森瀬周、高野詩菜、曽祥孫澤、能瀬聡直）

外界からの刺激に対して適切な行動を取れるよう行動戦略を適応させることは動物の生存にとって極めて重要である。しかし、適応行動を実装する神経

回路がどのようにして個体発生や進化の過程で形作られるのかに関する理解は限られている。本研究では、ショウジョウバエ幼虫において前進・後退運動の選択を制御する Wave コマンドニューロンに着目し、この問題に取り組んでいる。Wave ニューロンは 腹部神経節の各節に 1 対ずつ存在するが、節ごとにその軸索の投射パターンを変化させることにより、前側の Wave は後退を誘導するのに対し後側の Wave は前進を惹起するという体節特異的な機能を果たす。当研究室の先行研究において、Wave ニューロンの軸索誘導に関わる分子の探索が行われ、Wnt 受容体 Drosophila Frizzled 2,4(DFz2, 4) が同定された。更に本年度の研究において Drosophila Wnt4(DWnt4) を欠失した幼虫の中枢神経系において、一細胞形態解析を行ったところ、受容体と同様の表現型が確認されたことから DWnt4 が DFz2, 4 のリガンドとして働くことが示唆された。また、Wave ニューロンの配線の変化がその行動制御における機能にどのような影響を及ぼすのかを調べるため、Wave ニューロンにおいて特異的に胚発生の時期から DFz2 の機能を欠失させた幼虫由来の単離脳において、局所的光刺激により前側の Wave ニューロンを活性化した際の反応を評価・定量し行動戦略が変わっているかを調べた。その結果、DFz2 の欠失によって、従来は後退運動を誘起する前側の Wave ニューロンの活性化が前進運動を誘発するように切り替わっていた。この結果は、コマンドニューロンの軸索配線の変化が行動制御という神経回路の機能の変化に直接つながることを示唆するものである。今後さらに Wave の軸索誘導異常が行動や運動回路全体の機能へ及ぼす影響について調べることで、行動戦略の適応的な発生・進化についての洞察を得たい。

発達初期の運動回路における分子・細胞基盤の同定

(駒野目ゆう子、曾祥孫澤、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、子宮や卵の中にいる間に動き始める。この動きの意義について、「試行的に筋肉を動かし、その結果を体性感覚のフィードバックを通じて学習することで、出生後や孵化後に見られるような協調的かつ成熟した運動パターンに発達させる」ということを我々は最近証明してきた。さらに感覚フィードバックを促すペースメーカー細胞を同定し、この細胞が運動回路形成の初期から IP3 シグナリングに依存した自発的な活動を生成することを示した。しかし、IP3 シグナリングの誘起に関わる上流の G タンパク質共役受容体 (GPCR) は不明であった。そこで、本年度は関与する GPCR を同定することを目的とした。これまでの研究によりペースメーカー細胞の自発活動が幼虫の前進運動の発達に必須であることが示されているので、その上流の GPCR を阻害したときも同様の異常が観察されると予想される。そこで、まずアミノ酸配列から IP3 シグナリングに関わる可能性が比較的高いと予想される 17 個の GPCR に着目し、RNA 干渉法を用いてペースメーカー細胞特異的に阻害したときの行動への影響を指標にしてスクリーニングを行った。その結果、8 個の GPCR の阻害が幼虫の前進運動を大きく損なうことを見出した。次にこのうち最も強い阻害効果が見られた 2 つの GPCR に着目しカルシウムイメージングを行い、ペースメーカー細胞の自発活動への影響を直接調べた。その結果、このうちの一つを RNA 干渉による阻害したときに、自発活動頻度が有意に減ることが分かった。今後、同定された GPCR がペースメーカー細胞において実際に胚期で発現しているかを調べたり、その活性上昇が IP3 シグナリングを上昇させるかを調べたりすることにより、その発生期の自発的活動における機能をさらに詳細に明らかにしたい。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Giachello ANG, Zarin AA, Kohsaka H, Fan YN, Nose A, Landgraf M, Baines RA. Electrophysiological validation of premotor interneurons monosynaptically connected to the aCC motoneuron in the *Drosophila* larval CNS. *bioRxiv*, (2020) doi: 10.1101/2020.06.17.156430

[2] Sun X, Liu Y, Liu C, Mayumi K, Ito K, Nose A, Kohsaka H. A neuromechanical model and kinematic analyses for *Drosophila* larval crawling based on physical measurements. *bioRxiv*, (2020) doi: 10.1101/2020.07.17.208611

[3] Matsuo Y, Nose A, Kohsaka H. Interspecies variation of larval locomotion kinematics in the genus *Drosophila* and its relation to habitat temperature. *bioRxiv*, (2020) doi: 10.1101/2020.11.06.371120

[4] Hiramoto A, Jonaitis J, Niki S, Kohsaka H, Fetter RD, Cardona A, Pulver SR, Nose A, Regulation of coordinated muscular relaxation by a pattern-regulating intersegmental circuit, *Nat. Commun.* in press; preprint published on *bioRxiv* (2021) doi: 10.1101/2021.03.08.434356

[5] Zeng X, Kawasaki T, Inada K, Kazama H, Nose A. An electrically-coupled pioneer circuit enables motor development via proprioceptive feedback, invited revision in preparation for *Curr. Biol.*; preprint published on *SSRN* (2021) doi: 10.2139/ssrn.3787889

(総説)

[6] 能瀬聡直、高坂洋史　ショウジョウバエ行動制御回路の構造と機能解剖　生物物理 60(6):319-324 (2020) doi: 10.2142/biophys.60.319

(学位論文)

[7] 孫喜洋：Analyses of *Drosophila* larval locomotion dynamics by neuromechanical modeling and soft robot（博士論文）

[8] 真中美穂：ショウジョウバエ中枢神経回路の三次元標準テンプレートの構築とその応用（修士論文、新領域創成科学研究科）

[9] 森瀬周：ショウジョウバエ幼虫の行動選択を制御するコマンドニューロン軸索形態と機能の相関に関する研究（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

[10] Y. Liu, MF.Zwart, A. Nose, H. Kohsaka. A disinhibitory neural circuit for bending posterior segments in the initial phase of forward locomotion in *Drosophila* larvae, CSHL meeting ”Molecular Mechanisms of Neuronal Connectivity (Virtual)”, 2020.9.8-11, Online

(国内会議)

一般講演

[11] X. Sun, C. Liu, K. Mayumi, K. Ito, A. Nose, H. Kohsaka*. A neuromechanical model and kinematic analyses for *Drosophila* larval crawling based on physical measurements. 第 43 回日本神経科学大会, 2020.7.29-8.1, Online

[12] K. Fukumasu, A. Nose, H. Kohsaka. A modular structure underlying generation of distinct motor patterns revealed by multi-synapse functional imaging and high-dimensional data analysis, 第 43 回日本神経科学大会, 2020.7.29-8.1, Online

[13] K. Fukumasu, A. Nose, H. Kohsaka.: A neural circuit structure underlying generation of distinct motor patterns revealed by multi-synapse functional imaging and high-dimensional data analysis. 第 20 回東京大学生命科学シンポジウム, 2020.10.30-31, Online

[14] 高木優, 森瀬周, 能瀬聡直, ショウジョウバエ幼虫の行動選択回路における軸索誘導異常は行動戦略を変化させる, 第 43 回日本分子生物学会, 2020.12.2-4, Online

[15] K. Fukumasu, A. Nose, H. Kohsaka. Spatially continuous propagation of synapse population activity and its geometric structure in motor pattern generating circuits. 第 6 回脳情報動態領域会議, 2021.3.16-17, Online

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 心臓と骨格筋の収縮機能を決める心筋，骨格筋ミオシンの分子特性

ミオシンの分子特性の違いは，心臓や筋肉における収縮，弛緩を担うミオシンとアクチンの相互作用に大きな影響を与える．心臓では，強い収縮と迅速な弛緩を周期的に繰り返すことが求められる．一方，骨格筋では非常に幅広いダイナミックレンジの力と収縮が求めらるため，それぞれに必要とされる収縮機能は異なる．そこで我々は，心筋ミオシン，骨格筋ミオシンの分子特性が如何にこれらの臓器の収縮機能に活かされているのか検証した．以前の研究結果から，心筋ミオシン集合体の力発生は骨格筋ミオシン集合体のそれとは大きく異なることを見出した．更にシミュレーションモデルによって，これらの違いは各ミオシン分子が発するリバーススストローク（力は出す構造変化，パワーストロークとは逆向きの構造変化）の頻度に依存する可能性が示唆された．この結果を検証するため，光ピンセットを用いた 1 分子計測技術により，ADP とリン酸溶液中において負荷に対する心筋，骨格筋ミオシン 1 分子の構造変化を評価した．その結果，心筋ミオシン分子はパワーストロークとリバーススストロークを発することによって，３つの構造状態間を遷移することが判明した．一方，骨格筋ミオシンは，主にパワーストローク終了後の１つの構造状態に分布する結果を示した．従ってこれらの結果から，心筋ミオシンはより頻繁にリバーススストロークを発生していることが判明した．リバーススストロークが心臓機能にどのように寄与しているのか明らかにするため，1 分子計測，ミオシン集合体の力計測の結果をもとにシミュレーションモデルを構築した．モデルの結果から，心筋ミオシンのリバーススストロークは，心室における安定した収縮期血圧の維持，またその後の急速な血圧低下に貢献しており，一方，骨格筋ミオシンは高い収縮力と収縮速度を保つためにリバーススストロークは殆ど起こさないことが示唆された．

7.2.3 温度や pH 変性による準安定状態でのキネシンの運動測定

モータータンパク質キネシンやダイニンは、ATP 加水分解エネルギーを力学エネルギーに変換して微小管上を二足歩行運動し、細胞内では物質輸送や細胞分裂を担う。細胞機能の維持において温度や pH 環境は重要な要素であり、局所的な環境変化は分子機能の低下だけでなく細胞死をもたらすと考えられている。我々の先行研究では、数〜数十時間高温下にさらされたキネシンが微小管との結合能が完全に失われる段階に至るまでに準安定状態があると提案している。本研究では、高温下だけでなく低 pH 環境下にさらされたキネシンやダイニンを作製することで、変性時の運動機構の変遷を調べた。まず、モータータンパク質多分子が微小管を動かした速度と挙動をグライディングアッセイ法で測定した結果、先行研究と同様、運動速度や微小管結合能は低下した。特に pH 5.7 溶液環境下で 10 分間さらされたキネシ

ンは、一定の速度で動く微小管だけではなく、時々止まったり完全停止したりブラウン運動様といった多様な運動挙動が観察された。この変性されたキネシン 1 分子の運動機構を、光ピンセット法を用いて調べた。先行研究と同様、変性されたキネシンの最大力は小さく、力発生時の運動速度も遅くなった。高温度変性キネシンは両足だけでなく片足のみ微小管解離速度が遅い状態で歩行運動する様が観察されたのに対し、低 pH 変性キネシンは片足のみが微小管解離速度の遅い状態の歩行運動は観察されなかった。これは、天然状態から微小管解離速度の遅い準安定状態への遷移が速いためであると考えられる。以上より、キネシンは温度と pH いずれの環境変化でも準安定状態があることが分かり、軸索や細胞内の環境変化時に起きているモータータンパク質の分子機構を理解する上で役立つと期待する。

7.2.4 細胞損傷度の定量化に向けた細胞内拡散係数と細胞の光ゆらぎ値の解析

細胞は損傷を受けると生きるための機能が低下する. 損傷の度合いが小さければ細胞は生き続けるが, 度合いが大きいと最終的に死に至る. したがって損傷した細胞について損傷する前の状態との違いを調べるとともに, その後の細胞の生死との関連性を見ることで, 細胞の損傷度を定量し, 細胞の生きる機能について迫ることができると考えられる. 本研究室では活性酸素及び局所熱源を用いた細胞損傷において, 細胞内小器官の運動が不活発化することを見出した. 細胞内小器官の運動の不活発化のメカニズムについては未解明であるが, 細胞内小器官の運動に関連するパラメーターである細胞内粘性が細胞の代謝能力の低下に伴って急激に上昇することを示唆する実験結果が 2014 年から得られ始めている. 一般に細胞が損傷すると細胞の代謝能力は低下するが, 損傷した細胞における細胞内粘性の振舞いは明らかにされていない. そこで細胞内小器官の運動の不活発化と細胞内粘性との関連性を念頭に, 損傷した細胞における細胞内小器官及び細胞内蛍光タンパク質の動態を解析することで, それらの動態を表すパラメーターが細胞損傷度の定量に用いることができるかを調べている. 細胞の損傷は, 蛍光色素を取込んだ細胞に対し赤レーザーを照射し, 細胞内で活性酸素を生み出すことで行う. また細胞内小器官の運動を位相差像の輝度ゆらぎから簡便に算出可能な「光ゆらぎ値」によって定量化し、光退色後蛍光回復法によって同時に計測した細胞内蛍光タンパク質の拡散係数とともに, 細胞の損傷度とその後の生存確率との関連性を調べた. その結果, 損傷細胞で生存確率が低くなるに従い光ゆらぎ値拡散係数どちらも低下することがわかったが, 低下率は光ゆらぎ値が大きく, 二つの値の差異の意味合いについて興味を持っている.

7.2.5 ウニ精子鞭毛ダブレット微小管上のダイニン集団の力発生

ウニ精子鞭毛は 9 本のダブレット微小管が取り囲み、それぞれのダブレット微小管上には ATP のエネルギーを用いて微小管をマイナス端方向に滑らせる能力を持つモータータンパク質であるダイニンが 2 列に並んでいる。鞭毛の高次構造を解体段階的に解体することができ、各階層の構造においてダイニン集団がどのような特性を持つ力を発生するのか、またダイニン分子の力学特性が鞭毛に近い構造の中でどのような役割を果たすのかはわかっていない。これらの問題に答えるため、ウニ精子鞭毛、bundle または単一ダブレット微小管上のダイニンと平行に重合微小管を結合し、ダイニンの発する力を光ピンセットによって測定した。軸糸、bundle、単一ダブレット微小管上のダイニンと重合微小管のあいだで発生するの力の大きさと、軸糸では軸糸の長さ、bundle および単一ダブレット微小管では相互作用している重合微小管の長さの関係を解析した。その結果、軸糸では力は長さんに比例し、1 μ m あたり約 16 pN の力が発生した。bundle もこれに従うことが明らかになった。ダブレット微小管上には 1 μ m あたり約 115 分子のダイニンが存在し、ダイニン 1 分子が出す力は約 5 pN と報告されていることから、16 pN はダイニン約 3 分子の力に相当し、同時に力を発生するダイニンは全体の約 3%であることが示唆された。一方でダブレット微小管では長さと力の大きさに明確な比例関係は見られず、いずれの長さの微小管でも約 5 pN の力が最も高頻度に測定された。このことから、ダブレット微小管で測定された力は 1 分子程度のダイニンによるものと考えられる。単一ダブレットダイニンと相互作用した微小管は、振動し、振動数は 10〜234 Hz であった。この内の 8 例で step finding algorithm により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 8 nm であることがわかった。さらに、振動数が高いと 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。軸糸では同時に力を発生するダイニンは全体のわずか約 3%で、bundle も同じ特徴を示した。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 により示された生きた精子鞭毛内での割合よりも少ない。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り抑制的制御が解除される可能性がある。ダイニン振動時の力が 5pN 以下でステップサイズが約 8 nm であったことかっら、振動時には、少数分子のダイニンが微小管の周期 8.2nm にそってステップ運動を行うことが示唆された。

7.2.6 ウニ精子鞭毛ダイニンの Duty ratio

軸糸およびダブレット bundle では、ダイニン分子の duty ratio（力を出す割合）が低い可能性がある。これを検証するため、ウニ精子鞭毛の外腕にある 21S ダイニンの in vitro motility assay で duty ratio を求めた。ダイニン密度と滑り速度の関係に、Sakakibara らの式でフィットして得られた duty ratio は約 7%となった。このことから、軸糸および bundle で長さ当たりの力が小さい原因が低い duty ratio にあることが示された。さらに、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結果、ADP、AMPPNP、no nucleotide 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 中で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。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Seohyun Lee, Hyuno Kim, Hideo Higuchi and Masatoshi Ishikawa. Visualization Method for the Cell-Level Vesicle Transport Using Optical Flow and a Diverging Colormap. Sensors 2021, 21, 522, 1-13 (2021).

[2] Seine A. Shintani, Takumi Washio and Hideo Higuchi. Mechanism of Contraction Rhythm Homeostasis for Hyperthermal Sarcomeric Oscillations of Neonatal Cardiomyocytes. *Sci. Rep.* 10:20468, 1-12 (2020)

[3] Seohyun Lee, Hyuno Kim, Hideo Higuchi, Masatoshi Ishikawa. Visualization and Data Analysis for Intracellular Transport using Computer Vision Techniques. 2020 IEEE Sensors Applications Symposium. *IEEE Xplore* 20055684, 1-6 (2020)

[4] Seohyun Lee, Hyuno Kim, Hideo Higuchi. Extended Dual-Focus Microscopy for Ratiometric-Based 3D Movement Tracking. *Appl.Sci.* 10,6243;1-12 (2020).

[5] 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. 13, 100764,1-11 (2020).

＜学術講演＞

(国内会議)

招待講演

[6] Seine A Shintani, Takumi Washio, Hideo Higuchi. Contraction Rhythm Homeostasis manifested in warmed cardiomyocytes – the mechanism of stable rhythm and high efficiency of heartbeat at body temperature, (2021.3.28) On-line meeting. The 98th Annual Meeting of The Physiological Society of Japan.

[7] Motoshi Kaya, Molecular properties of cardiac myosin, leading to an understanding of heart function, 第 85 回日本循環器学会学術集会, Symposium: Cardiomyocyte Function, (2021.3.26-3.28)

[8] 茅 元司, 骨格筋ミオシンの分子特性と骨格筋における機能発現, 第 43 回日本分子生物学会年会, フォーラム：骨格筋細胞研究がリードする新しい健康かがくの分子生物学新基礎, オンライン (2020.12.2-12.4)

[9] 茅 元司, 心筋および骨格筋ミオシンの個性とその機能を探る, 第 58 回日本生物物理学会年会、共催シンポジウム：新学術領域研究「光圧によるナノ物質操作と秩序の創生」光圧操作の新展開：生物物理学のための新しいアプローチ, オンライン (2020.9.16-9.18)

一般講演

[10] 太田 英暁, 樋口秀男, 損傷した細胞における損傷した細胞における細胞内粘性の経時的測定、日本物理学会第 76 回年次大会, オンライン (2021.3.12-3.15)

[11] 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と実践、日本物理学会第 76 回年次大会, オンライン (2021.3.12-3.15)

[12] 黄 勇太, 鷲尾 巧, 樋口 秀男, 茅 元司、Molecular properties of single cardiac myosin adapted for heart functions revealed by single- and multi-molecule approaches. 第 58 回日本生物物理学会年会、オンライン (2020.9.16-9.18)

[13] 太田 英暁, 樋口秀男, Cytoplasmic Viscosity and Cellular Viability of the Damaged Cells、第 58 回日本生物物理学会年会、オンライン (2020.9.16-9.18)

[14] 太田 英暁, 樋口秀男, 損傷した細胞における細胞内粘性と生存確率の関係、日本物理学会 2020 秋季大会, オンライン (2020.9.8-9.17)

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 顕微鏡と機械学習

干渉散乱顕微鏡への応用

これまで、タンパク質などの一分子イメージングには、蛍光顕微鏡が用いられてきた。目的とするタンパク質を蛍光標識することで、標的タンパク質を特異的に光らせて検出することが出来る。蛍光分子は、基底状態と (一重項) 励起状態を遷移する過程で蛍光を発するが、このサイクルを回るうちに低確率だが三重項状態に入り、酸素と反応して蛍光を発しなくなる (フォトブリーチング)。このため、1 個の蛍光分子から無限に蛍光が出るわけではなく、平均で数万〜数百万個程度の光子しか放出できない。この限られた個数の光子しか利用出来ない (その意味で光子予算とも呼ばれる) ことが、蛍光一分子イメージングの大きな制約となっている。

そのため、光子予算の制約を受けない一分子イメージングの手法が切望されており、蛍光ではなく散乱を用いる顕微鏡法が注目を集めている。散乱を用いた顕微鏡法としては、散乱光のみを顕微鏡で集光して観察する暗視野顕微鏡法が古くから知られている。しかし、タンパク質のような光の波長より小さいサイズの粒子による散乱は、レイリー散乱であり、散乱光の電場の強度 E_S は粒子のサイズ (半径) の 3 乗に比例する。したがって、散乱光を直接検出する場合は、その強度は $|E_S|^2$ すなわち粒子のサイズの 6 乗に比例することになる。直径 100nm の微粒子の散乱光強度に比べて直径 10nm のタンパク質の散乱光強度は 100 万分の 1 となることを意味し、タンパク質のような 10nm スケールの粒子を直接観察することは極めて困難である。

これに対し、散乱光 (E_S) と入射光がカバーグラス表面で一部反射して戻ってくる反射光 (E_I) を干渉させれば、

$$|E_S + E_I|^2 \simeq |E_I|^2 + 2|E_S||E_I|cos\theta$$

(θ は散乱光と入射光の位相差) となって、E_S の 1 乗に比例する信号を取り出すことができて、小さなサイズの粒子の検出に有利であると考えられる。これが、干渉散乱顕微鏡の原理である (図 7.3.1)。

しかし、上式で、背景光に相当する反射光の強度 $|E_I|^2$ は信号強度 $2|E_I||E_S|cos\theta$ の 1000 倍以上となるので、背景光の 0.1%以下の僅かな変調を検出する必要がある。また、信号強度は反射光と散乱光の位相差にも依存するので、カバーグラスと粒子 (タンパク質) の距離の変化によっても信号強度は変化する。このように、干渉散乱顕微鏡では通常の顕微鏡法とは異なった画像の特徴を有するため、一分子イメージングには、それに適した画像処理の手法が必要となる。

そこで、小鷲は、干渉散乱顕微鏡画像と蛍光顕微鏡画像を同時取得することが出来る光学系を作成し、

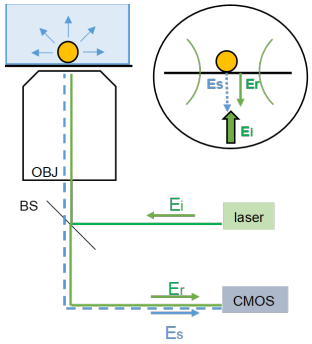


図 7.3.1: 干渉散乱顕微鏡の原理

後者を教師信号とした機械学習によって干渉散乱顕微鏡の画像処理を試み、良好な結果が得られた (図 7.3.2, [7])。

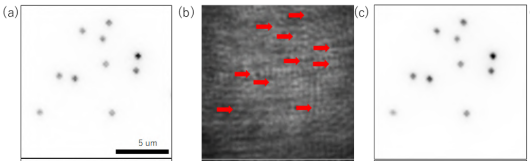


図 7.3.2: 機械学習による画像処理 [7]
(a) 蛍光顕微鏡画像 (正解画像)、(b) 干渉散乱顕微鏡の生画像、(c) 機械学習による画像処理結果

その他の応用

上記のような顕微鏡画像への機械学習の応用は、日露学生交流プログラム STEPS で岡田研でインターンを行ったロモノーソフ記念モスクワ国立大学の大学院生 Alexandr 君 (2017 年来日)、Yakov 君 (2018 年来日) との研究でスタートした。2 人とも、帰国後もこのテーマで共同研究を継続し、Yakov 君との研究は機械学習を用いた超解像顕微鏡画像処理法 (図 7.3.3, [1])、Alexandr 君との研究は機械学習を用いた細胞認識・追跡法 [2] として結実した。

近年、機械学習は、上記のような画像処理だけでなく、細胞画像の分類への応用も盛んで、がん細胞を見つけ出す AI など数多く報告されている。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、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、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

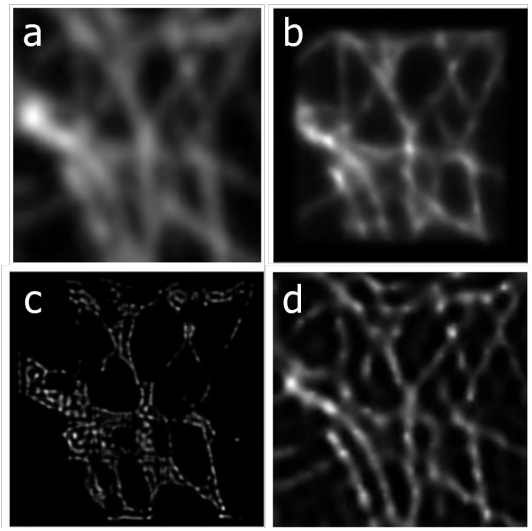


図 7.3.3: 機械学習による超解像画像処理 [1]
a: 通常顕微鏡画像、b, c: 2 種類の既存手法、d:提案手法

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 [1],[3],[6]。

この方法を発展させることで、顕微鏡画像のどこに注目してがん細胞と正常細胞を見分けているかを説明できる AI が構築できると期待した。そこで、白血病患者の末梢血の白血球細胞の核の画像を高分解能で大量に撮影することを目標に、血球細胞画像の高分解能ハイスループット取得のためのプラットフォーム開発を行った [9]。同様の目的で、ヒトの iPS 細胞由来の神経細胞を均質かつ大量に作成し、一定の形状で並べて回路網を形成させることを目的とした基盤技術開発も進めている [8]。

7.3.2 その他の一分子イメージング関連技術の開発

7.3.1 で述べたとおり、蛍光一分子イメージングでは、フォトブリーチングにより蛍光分子が光らなくなることが大きな制約となっている。そこで、私たちは、フォトブリーチングが起こりにくい蛍光色素や蛍光タンパク質の開発や応用を進めている。また、光らなくなった蛍光分子を新しい蛍光分子と交換することで実質的にフォトブリーチングの影響を受けないようにするという新しい発想の一分子イメージング技術の開発でも進展がみられた [11]。

このような観察のための技術開発に加えて、細胞の中で分子に力学的摂動を加える実験系の開発でも進展がみられた。福澤は磁気ピンセット法に着目し、高分解能対物レンズによる観察と両立可能な磁気ピンセットの作成に成功した (図 7.3.4, [10])。

＜受賞＞

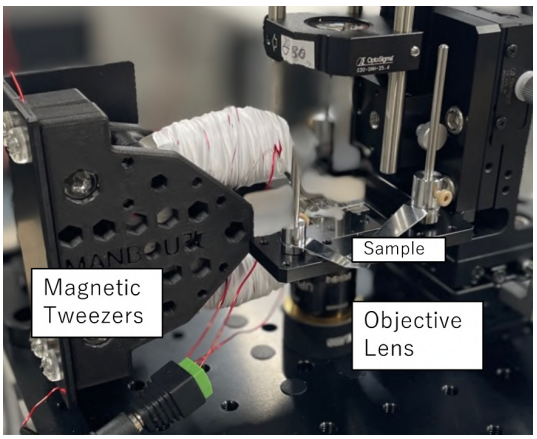


図 7.3.4: 磁気ピンセット装置 [10]

[1] 高尾大輔、若手優秀発表賞、日本細胞生物学会、2020 年 6 月 10 日。

＜報文＞

(原著論文)

[2] Nagao Y, *et al.* Robust Classification of Cell Cycle Phase and Biological Feature Extraction by Image-Based Deep Learning. *Mol Biol Cell* 31: 1346-1354 (2020).

[3] Aoyama-Ishiwatari S, *et al.* NUDT21 links mitochondrial IPS-1 to RLR-containing stress granules and activates host antiviral defense. *J Immunol* 206: 154-163 (2021).

(会議抄録)

[4] Yakov P, *et al.* Enhancement algorithms for blinking fluorescence imaging. *Proceedings of the 2019 4th International Conference of Biomedical Imaging, Signal Processing* 72-77. (2019)

[5] Alexandr Y, *et al.* A method for automatic tracking of cell nuclei with weakly-supervised mitosis detection in 2D microscopy image sequences. *Proceedings of the 2020 5th International Conference on Biomedical Signal and Image Processing. Association for Computing Machinery*, 67–73. (2020)

(国内雑誌)

[6] 高尾大輔、岡田康志、「細胞画像のわずかな違いをとらえて分類する AI—細胞画像の見分け方を AI に教えてもらおう」、実験医学増刊「機械学習を生命科学に使う!」、羊土社、2020

(学位論文)

[7] 小鷲智理、Development of iSCAT Microscopy and Improvement of the Images with Deep Learning. (博士論文)

[8] Nipun Ravindu Wickramanayaka, 神経振動の定量的計測を目指した人工ヒト神経回路の基板技術開発 (修士論文)

[9] 成田佳奈香、成人 T 細胞白血病診断に向けた超解像血球細胞画像の大量取得のプラットフォーム開発 (修士論文)

[10] 福澤治幸、細胞内非平衡環境下におけるキネシン歩行時のエネルギー入出力の解明 (修士論文、生物科学専攻)

[11] 粟津利邦、Application of a new reversible fluorescence probe for single-molecule imaging. (修士論文、大阪大学大学院生命機能研究科)

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[12] Yasushi Okada, Development of fluorescent probes for live imaging of cellular states. The 11th BRI International Symposium “From Single Cell to Systems Neuroscience”, 2021 年 2 月 19 日 オンライン

(国内会議)

招待講演

[13] 岡田康志、「細胞状態のシングルセル解析を目指したライブセルイメージング技術の開発」第 8 回日本腎臓研究会、2021 年 1 月 9 日、オンライン

[14] 岡田康志「超解像・一分子イメージングで生きた細胞の中を見る」日本量子生命科学会第 2 回総会、基調講演、2020 年 12 月、オンライン

[15] 岡田康志「Development of single-molecule and super-resolution imaging toward application in cancer cells」第 79 回日本癌学会学術総会シンポジウム「4D nucleome in cancer”、2020 年 10 月 3 日、広島市 (オンライン)

[16] 岡田康志「生命現象の情報物理学」第 58 回日本生物物理学会シンポジウム、2020 年 9 月、オンライン

[17] 岡田康志「4 次元イメージング」第 31 回細胞生物学ワークショップ、2020 年 8 月 21 日、オンライン

[18] 岡田康志「Development of super-resolution microscopy and its application to the study of axonal transport」第 43 回日本神経科学会大会塚原仲晃記念賞記念講演、2020 年 7 月、オンライン

[19] 岡田康志「超解像・一分子イメージングによる生細胞観察」第 93 回日本内分泌学会学術総会 YEC シンポジウム「新規イメージング技術による生命現象解析」2020 年 6 月、オンライン

(アウトリーチ活動)

[20] 岡田康志、「超すごい顕微鏡で生きた細胞を視る」、高校生と大学生のための金曜特別講座、東京大学、2020 年 6 月 12 日、オンライン

[21] 岡田康志、「生物物理学入門」土曜講座、灘中学校・灘高等学校、2020 年 10 月 31 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 複数薬剤に対する耐性能の定量に基づく適応度地形の推定

ある一つの薬剤を添加した環境での大腸菌進化実験を行い、その過程において同時に他の複数の薬剤に対する耐性能を定量することにより、薬剤耐性能を軸とした高次元空間における軌跡として薬剤耐性進化のダイナミクスを記述することが出来る。そこで、8 次元の耐性能空間において、異なる初期状態（耐性能）から始めた進化実験の軌跡を定量し、それに基づいてそれぞれの薬剤に対する適応度地形の推定を行った。結果として、複数のピークを持つ適応度地形が存在することが明らかとなり、さらにそうした複数ピークを持つ地形の遺伝的背景を同定することに成功した。これらの適応度地形の情報から、選択環境を切り替えることにより、進化の軌跡をコントロール可能であることが示唆された。

7.4.2 マルチカノニカル法を用いた遺伝暗号の適応度地形解析

現在確認されているほぼ全ての生物は同じ遺伝暗号を共有しており、これを標準遺伝暗号という。先行研究ではランダムに生成させた遺伝暗号表と標準遺伝暗号の比較から、標準遺伝暗号は翻訳エラーに対する頑健性が高くなるように進化してきたことを示した。しかしこれらの先行研究では、計算時間の都合により特定の制約を受けたランダム遺伝暗号の母集団しか考慮しておらず、可能な遺伝暗号の探索空間のうちの極一部のランダム遺伝暗号しか扱っていない。

そこで本研究ではマルチカノニカル法という効率的なレアイベントサンプリング手法を用いることで、より広く一般的なランダム遺伝暗号の母集団を比較対象とした。その結果、以下 3 つのことがわかった。第一に、このような母集団の中では標準遺伝暗号よ

りも頑健な遺伝暗号の割合は僅か約 10^{-20} である。これは従来まで研究されていた母集団での割合（約 10^{-6}）よりも遥かに小さい。第二に、標準遺伝暗号と同程度に頑健な遺伝暗号の構造は 4 種類あり、標準遺伝暗号はその 1 つに属する。第三に、遺伝的アルゴリズムを用いた進化シミュレーションによる同様の遺伝伝暗号の分布にはかなりの偏りがある。また提案手法により、遺伝暗号の適応度地形の構造を得ることができた。ここから、遺伝暗号がどのように進化してきたかを理解することを目指している。

7.4.3 変形可能なアクティブ粒子集団の数理モデルの解析

アクティブマター研究では、鳥や魚の運動を極めて単純化し「群れ」の集団的秩序現象がどのように自己組織化するかを明らかにしてきた。しかし細胞の集団運動の場合は、個々の細胞の形が変形しうるという点で従来のアクティブマター研究とは大きく異なる。特に、細胞集団による組織の形成・恒常性・破綻などの現象の普遍的法則を理解するためには、細胞の運動を極めて単純化しつつも変形を許す「ソフト」なアクティブマターの研究が非常に重要となるが、こういった研究は発展途上である。

本研究では、細胞輪郭のフーリエ級数展開を基礎とした数理モデルを開発した。細胞形状は細胞輪郭のフーリエ展開を通し、フーリエモードの重ね合わせとして記述できる。この表式では細胞運動は各フーリエ係数のダイナミクスとして記述される。このようなモデリングは一細胞の変形動態の記述として多数行われて来たが、排除体積効果や細胞間接着などが支配的な細胞集団には適応できない。本研究では粒子-場の二重性表記を利用し、排除体積効果や細胞間接着を導入し、多様な多細胞環境を記述できる数理モデルを開発した。この手法では、千〜万個オーダーの変形可能な細胞を同時に計算可能である。これを用いて、変形可能であることで組織の流動化転移が起こることを発見し、解析を進めている。

7.4.4 機械学習を用いた生物形態の定量化

骨や器官の「形態」を計測する技術として頻繁に用いられるのが、解剖学的に特徴のある部位をランドマー クとして用いるランドマーク法である。しかしこの手法はランドマーク位置の定義に恣意性があり、また、 ランドマークを共有しない離れた種間の形態の比較ができないという問題もある。

本研究では、機械学習を応用し、ランドマーク情報が明示的に含まれていない画像データから形態の定量化を行う手法を開発した。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 代謝モデルを用いた成長ダイナミクスと休眠ダイナミクスの研究

代謝現象の数理モデルは従来、定常的に増殖している状態に関して積極的に行われてきた。これらの研究では化学物質の生成と消費が釣り合っており、その濃度が変化しないことを仮定することで、複雑な代謝ネットワークから比較的単純な法則を導き出すことに成功している。ところが近年の実験的な報告により、このような定常性の仮定は指数増殖期という限られた状況でしか妥当でないことが分かってきた。

そこで、定常性を仮定しない微分方程式モデルを用いて大腸菌の代謝ネットワークをモデリングし、その挙動を調べた。その結果、大腸菌の中心代謝経路はたとえ同一の生化学パラメーターを用いても、初期値によって高い成長率と低い成長率の 2 種類の状態に落ち着くこと、また低成長状態は厳密には安定な状態（アトラクター）ではなく極めて長い遷移状態の途中であることが明らかになった。続いて我々は、重要な性質を保持しつつ代謝ネットワークを簡略化する方法を考案し、その手法に基づいて上述した 2 種類の状態を示すミニマルなモデルを大腸菌の中心代謝経路より導き出した。

大腸菌は低成長状態（休眠相）において、経験した環境を記憶しうるということが近年実験的に報告されている。記憶現象は非定常状態のみで可能であるため、本モデルで確認された「極めて長い遷移状態」は大腸菌の休眠相を理解するための重要な数理モデルと成りうる。今後、得られたミニマルモデルの更なる解析を行っていく予定である。

7.4.6 最適なラグタイム分布の理論的導出

大腸菌などの微生物は、ある時間飢餓状況に置かれると再び栄養が供給されてもすぐには成長を再開することが出来ず、「ラグタイム」と呼ばれる遅延時間を示す。栄養をめぐって多くの微生物が競合している状況を想定すると、ラグタイムは可能な限り短くしたほうが個体の生存と複製には有益であるように感じるが、必ずしもそうではない。例えば、人間の腸内環境などでは食事とともに抗生物質が運ばれてくる場合がある。この場合は栄養が来ても即座に成長を再開せず、抗生物質を休眠状態でやりすごす方が生存上有利である。

ヘブライ大学の Balan らはこのような、栄養の供給と抗生物質の投与が同時に状況が繰り返されると、ラグタイムが伸びるように大腸菌が進化するということを実験的に示した。Balaban らは栄養の供給とともに必ず抗生物質が投与されるように実験をデザインしたが、われわれは彼女らの設定を計算機上で再現し、抗生物質が確率的に投与される場合にどのようなラグタイムが最適になるかということを調べた。結果、最適なラグタイムは投与確率や時間によって不連続的に転移することが明らかになった。加えて抗生物質の効果の持続時間も確率的に決まる場合

へと問題を拡張し、変分法を用いて集団としての最適なラグタイム分布を導くことに成功した。

7.4.7 ゲノムの構造変異を高頻度に観察できる進化実験の構築

ゲノム解読技術の発展により、バクテリアのゲノムは、進化の過程で水平伝播による遺伝子の獲得や、重複、欠損、組み換えによって極めてダイナミックな構造変遷を遂げてきたことが明らかとなっている。こうした一連の構造変異によって、バクテリアは様々な新奇機能を獲得することができ、その生育可能範囲を広げてきた。一方で、ランダムに生じる構造変異の多くは細胞の生育に対してむしろ有害な効果をもたらすため、バクテリアはこうした変異に対して頑強なゲノム構造へと進化してきたと考えられている。このように、バクテリアのゲノム構造の進化では進化能と頑強性という相反する性質が両立していると考えられ、その両立の仕組みを解明できる実験が求められている。

そこで我々は第一歩として、大腸菌を改変し、野生型大腸菌を用いた実験では希にしか観察できないゲノムの構造変異を高頻度に引き起こすことを試みている。本年度は、遺伝子の重複や欠損、組換えすべてに関わる転位因子（挿入配列やトランスポゾン）に着目し、人工的にその活性を引き上げてどのような構造変異が生じるかを調べた。転位因子の活性を高めた結果、近傍の配列が大きく欠損する構造変異が高頻度に生じ、細胞の生育に有害な作用をもたらすことが確認できた。一方で、こうした欠損構造変異の結果、当初は離れた位置にあった遺伝子が転位因子に隣接し、転位因子の内部の遺伝子の発現を高める新奇な相互作用が生じる事例（新奇機能の獲得）が繰り返し観察された。このように、転位因子の活性を高めることで、目標としていた構造変異を高頻度に引き起こし、また新奇機能の獲得が生じうることが分かった。現在は、本研究で構築した高活性型の転位因子を活用し、ゲノム構造の進化実験の設計を行っている。

7.4.8 遺伝子発現調節領域における変異に対する頑強性の定量

生物の表現型進化は自由自在ではなく、早く進化する表現型とそうでない表現型がある。生物の表現型進化の大部分は遺伝子発現の進化によって引き起こされることから、表現型進化における進化速度の差異は、対応する遺伝子発現量の進化の差異に対応すると予想されている。実際、比較ゲノミクスから、遺伝子発現量の進化速度は、遺伝子ごとに異なることがわかっているが、考慮すべき変異が大量かつ多様であるため、そのメカニズムは大部分が未知である。

そこで我々は、大腸菌の遺伝子発現調節領域に注目し、この狭い範囲 (200 塩基対) にだけ人為的に無作為変異を導入し、下流の遺伝子発現（GFP で標識）がどのように変化するかを調べる実験を行った。変異導入に用いた調節領域は、大腸菌の必須遺伝子、非必須遺伝子それぞれを駆動する配列から無作為に選んだものだけでなく、人工的にランダムに設計した配列も用いた。これらについて、変異に対する発現量の頑強性を調べたところ、非必須遺伝子の発現調節領域に比べて、人工のそれは発現量が増加しやすく、必須遺伝子のそれは発現量が低下しやすいことが分かった。この実験結果から、遺伝子発現調節領域の違いが、下流の遺伝子の発現量の進化の方向にバイアスを作り出していることが示唆された。今回見られた進化方向のバイアスが、自然界の発現量進化とどのように対応しているか現在解析を進めている。

＜受賞＞

[1] 岩澤諄一郎, 日本物理学会領域 12 学生優秀発表, 日本物理学会 第 76 回年次大会, 2021 年 3 月.

[2] 岩澤諄一郎, 理学系研究科研究奨励賞（博士過程）, 東京大学, 2021 年 3 月.

＜報文＞

(原著論文)

[3] C. Furusawa and N. Irie:Toward understanding of evolutionary constraints: experimental and theoretical approaches, Biophys. Rev. 12(5):1155-1161 (2020).

[4] T. Horinouchi, C. Furusawa: Understanding metabolic adaptation by using bacterial laboratory evolution and trans-omics analysis, Biophys. Rev., 12(3):677-682 (2020).

[5] R. Ohbayashi, S. Hirooka, R. Onuma, Y. Kanesaki, Y. Hirose, Y. Kobayashi, T. Fujiwara, C. Furusawa, S-Y Miyagishima: Evolutionary changes in DnaA-dependent chromosomal replication in Cyanobacteria, Front. Microbiol., 11, 786 (2020).

[6] T. Horinouchi, T. Maeda, H. Kotani, C. Furusawa: Suppression of antibiotic resistance evolution by single-gene deletion, Sci. Rep., 10(1):4178 (2020).

[7] T. Maeda, J. Iwasawa, H. Kotani, N. Sakata, M. Kawada, T. Horinouchi, A. Sakai, K. Tanabe, C. Furusawa: High-throughput laboratory evolution and evolutionary constraints in Escherichia coli, Nature Communications, 11(1):5970 (2020).

[8] Y. Himeoka, N. Mitarai: When to wake up? The optimal waking-up strategies for starvation-induced persistence, PLoS Comp. Biol., 17(2):e1008655 (20201).

(国内雑誌)

[9] 古澤力, 前田智也, 芝井厚: 大腸菌進化実験の表現型・遺伝子型解析：微生物生態系進化の予測と制御へ向けて, 実験医学, 38(18):3072 (2020).

[10] 斉藤稔, 井元大輔, 澤井哲: 深層学習による細胞形状解析, 実験医学増刊「機械学習を生命科学に使う！！」, 38(20):3461 (2020).

(学位論文)

[11] 岩澤諄一郎:Deciphering Evolutionary Constraints through Microbial Laboratory Evolution combined with Machine Learning（博士論文）

[12] 大町祐史:マルチカノニカル法を用いた遺伝暗号における適応度地形の解析（修士論文）

[13] 長谷川隼:微生物代謝モデルを用いた生態系進化の解析（修士論文）

(著書)

[14] 金子邦彦, 澤井哲, 高木拓明, 古澤力 『細胞の理論生物学: ダイナミクスの視点から』, 東京大学出版会 (2020).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[15] J. Iwasawa, Y. Hirano, Y. Sugawara: Label-Efficient Multi-Task Segmentation using Contrastive Learning, MICCAI BrainLes 2020 workshop, 2020 年 10 月.

招待講演

[16] C. Furusawa: Toward prediction and control of microbial evolution: Analysis of phenotypic constraints, Quantitative evolution, phylogeny and ecology: from models to data and back, 2021 年 2 月.

(国内会議)

一般講演

[17] 芝井厚, 古澤力: 大腸菌の種内進化において高発現遺伝子への純化選択は緩和されている, 第 12 回生命情報科学若手の会・研究会, 2020 年 8 月.

[18] 畑中直木, 津留三良, 古澤力: 大腸菌プロモーターの変異に対するロバストネスの測定と解析, 第 22 回日本進化学会年大会, 2020 年 9 月.

[19] 芝井厚, 古澤力, 津留三良: 高変異率の大腸菌長期実験進化から遺伝子進化速度の一般法則を探る, 第 22 回日本進化学会年大会, 2020 年 9 月.

[20] 細田一史, 村上なおみ, 瀬尾茂人, 長田穣, 松田秀雄, 近藤倫生, 古澤力: 生物進化と生態系変化の制約にモデル人工生態系で迫る, 第 22 回日本進化学会年大会, 2020 年 9 月.

[21] 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とその応用, 第 58 回生物物理学会年会, 2020 年 9 月.

[22] 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, 第 58 回生物物理学会年会, 2020 年 9 月.

[23] 古澤力: Study on evolutionary fluctuation-response relationship in multicellular development, 第 58 回生物物理学会年会, 2020 年 9 月.

[24] 細田一史, 村上なおみ, 瀬尾茂人, 長田穣, 松田秀雄, 古澤力, 近藤倫生: 栄養構造を持つ 12 種微生物の人工生態系における確率現象, 第 58 回生物物理学会年会, 2020 年 9 月.

[25] 三吉健太, 川井隆太郎, 堀之内貴明, 前田智也, 古澤力, 戸谷吉博, 清水浩: 実験室進化実験による大腸菌の非酸化的解糖経路のフラックス増強, 化学工学会第 51 回秋季大会, 2020 年 9 月.

[26] 金井雄樹: Construction of a Genetic Tool to Study Rapid Genome-wide Rearrangement in Experimental Evolution of Escherichia coli, 第 20 回 東京大学生命科学シンポジウム, 2020 年 10 月.

[27] 堤真人, 斉藤稔, 古澤力: Characterization of biological morphology by using machine learning, 第 20 回 東京大学生命科学シンポジウム, 2020 年 10 月.

[28] 川井隆太郎, 三吉健太, 堀之内貴明, 前田智也, 古澤力, 戸谷吉博, 清水浩: 代謝モデルを利用した指向性進化による大腸菌イソプレノール合成のボトルネック解消, 日本生物工学会関西支部大会, 2020 年 12 月.

[29] 堤真人: 機械学習を用いた生物形態の定量化とその応用, 第 3 回 ExCELLS シンポジウム, 2020 年 12 月.

[30] 岩澤諄一郎, 西口大貴, 佐野雅己: Long-range order in Janus particles fueled by an AC electric field: Algebraic correlations and anomalous fluctuations, Active Matter Workshop 2021, 2021 年 1 月.

[31] 清家泰介, 阪田奈津枝, 小谷葉月, 古澤 力: 環境 pH 変化に依存した酵母のフェロモン活性の揺らぎ, 第 15 回日本ゲノム微生物学会年会, 2021 年 3 月.

[32] 岩澤諄一郎, 前田智也, 古澤力: 大腸菌進化実験の薬剤耐性時系列を用いた適応度地形の推定, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2020 年 3 月.

[33] 斉藤稔 : 変形可能なアクティブ粒子集団の数理モデル, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月.

[34] 村上茉奈美, 川井隆太郎, 前田智也, 堀之内貴明, 古澤力, 戸谷吉博, 清水浩: 連続培養を用いた指向性進化実験による大腸菌のメバロン酸取り込み能力の強化, 日本農芸化学会 2021 年度大会, 2021 年 3 月.

[35] 清家泰介, 阪田奈津枝, 古澤 力: 移動性の高いショウジョウバエからの野生酵母の単離と多様性, 日本農芸化学会 2021 年度大会, 2021 年 3 月.

招待講演

[36] 古澤力: 進化過程の予測と制御へ向けて：大規模大腸菌進化実験の表現型・遺伝子型解析, 第 22 回日本進化学会年大会, 2020 年 9 月.

[37] 細田一史, 村上なおみ, 瀬尾茂人, 長田穣, 松田秀雄, 近藤倫生, 古澤力: 生物進化と生態系変化の制約にモデル人工生態系で迫る, 第 22 回日本進化学会年大会, 2020 年 9 月.

[38] 斉藤稔, 井元大輔, 澤井哲: 細胞変形ダイナミクスの数理モデリングとデータ駆動解析, 2020 年度日本数理生物学会年会, 2020 年 9 月.

[39] 古澤力: 表現型揺らぎと進化可能性：微生物進化実験によるアプローチ, 日本植物学会 第 84 回大会, 2020 年 9 月.

[40] 前田智也, 岩澤 諄一郎, 古澤 力: 大規模進化実験で解き明かす大腸菌の薬剤耐性進化における制約, 第 94 回日本細菌学会総会, 2021 年 3 月.

[41] 古澤力: 微生物進化の予測と制御へ向けて：大腸菌の大規模進化実験, 第 94 回日本細菌学会総会, 2021 年 3 月.

(セミナー)

[42] 姫岡優介: Biology as a mathematical science, 株式会社 Mercari R4D オンラインセミナー, 2020 年 6 月.

[43] 古澤力: 生物システムの記述と理解へ向けて, 株式会社 JSR 講演会, 2020 年 10 月.

[44] 岩澤諄一郎: 大腸菌進化実験と機械学習を用いた進化的拘束の解析, 統計物理と統計科学のセミナー@統計数理研究所, 2021 年 2 月.

[45] Junichiro Iwasawa: High-throughput laboratory evolution with machine learning reveals constraints for drug resistance evolution, Biology Seminar at iTHEMS, RIKEN, 2021 年 2 月.

[46] 大町祐史: マルチカノニカル法を用いた遺伝暗号における適応度地形の解析, 大阪大学 CMC オンラインセミナー, 2021 年 3 月.

アウトリーチ

[47] 姫岡優介: コペンハーゲンで考える、生き物の話, Newsweek Japan WorldVoice（連載）, 2020 年 8 月 ∼2020 年 11 月.

8 技術部門

(八幡、南野、下澤、佐伯、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

新型コロナ感染症対策として 2020 年の 4 月 1 日から 5 月 29 日までは在宅勤務となったため、依頼加工業務は行わず電子メールで加工相談や外注依頼の代理を受け付けた。この間に、密集防止対策として、加工相談や工作機械使用の web 上での予約制を導入、加工依頼図面のメール添付での提出に対応、完成品受渡し場所を室外に設置、などの準備を行い 6 月より再開した。2020 年 6 月から 2021 年 3 月までの実験装置試作室の主な利用状況は以下の通りであった。

- 内部製作 (総図面枚数 : 448 枚、総個数 : 887 個)
- 設計及び部品等の問い合わせ (外注加工依頼を含む) 依頼件数の割合 : 物理 : 67.5%、素粒子 C : 10.0%、化学 : 8.2%、地殻化学 : 9.5%、地球惑星 : 0.7%、生物 : 2.6%、フォトンサイエンス : 1.3%

  主な依頼者 (物理 : 安東研、島野研、日下研、井手口研、素粒子 C : 浅井研、化学・地殻化学実験施設)

なお、新型コロナウイルス感染症の対策として、理学系学務課からの依頼により、講義室用の飛沫防止パネル 15 台を材料費のみで製作した。そのほか、廊下にアルコール消毒液を設置するための台を、6 台製作し提供した。

8.1.2 設計・加工の自動化の推進

設計・加工の自動化を推進し教育・研究に利用していくために、今年度はマシニングセンタと 3 次元形状計測装置を新規導入した。各研究室にも CAD/CAM による設計や評価の導入支援を行い、他部局工作室とも緊密に連絡を取りながら設計・加工の自動化を推進する予定である。

8.2 技術室 (八幡、南野、佐伯)

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。

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、学術ジャーナルからの一次情報や、厚労省、文科省、国立感染研などからのガイドラインの収集や、防疫用の透明カーテンの試作などを実施し、レポートとして学内で情報共有した。学生実験授業を対面で行うための消毒作業などのマニュアルの策定や、安全衛生教育、また、アルコール消毒液、フェイスシールドなどの資機材を準備し、実験室内の手洗い場を再整備した。

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。

- メールサーバを大学のメールホスティングサービスに切り替え、いくつかの研究室のメールシステムの集約を行った。
- 大学院入試の出願資料を受領するシステムの開発に携わった。
- 教室予約システムを理学系研究科のサービスに移行し、専攻独自システムを整理できた。
- 論文審査システムの改修に携わった。
- ウェブサーバ、教員登録システム、大学院入試システム、TA 管理システム、海外出張登録システムの運用管理，保守を行った。

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。

- 理学系研究科アカウントのユーザ管理を行った。これまでの申請体制は在宅勤務を想定していなかったため、学外からも申請できるようにウェブフォームでの申請に切り替えた。
- オンライン化されたイベントのために、動画コンテンツの作成やライブ中継のサポートを行った。
- ラーニングサイトのサーバ，システム更新を行った。
- 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 の設定を行った。

また、教職員の在宅勤務のための VPN 接続設定などをサポートした。

8.2.3 学生実験 (佐伯、八幡)

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など学生実験全般の運営を行った。今年度は、世界的なコロナウィルス感染症蔓延の影響で、物理学実験 I の開始が 7 月 20 日になった。そのため、スケジュールの再編、実施方法の検討、一部実験のオンライン化、安全対策などの対応を行った。学生向けの物理学実験説明会 (2 回)、実験担当教職員の実験担当者会議 (2 回) はオンラインで行った。放射線安全講習は、アイソトープ総合センターの DVD を使い、オンラインで行った。

- コロナ対策
  安全対策用品について、まとめて購入し、各テーマの担当者に配付した。フェースシールドを教職員、TA、学生実験の受講者全員に一人一枚配付した。実験に差支えない場合は、実験室のドアと窓を開け、実験室の換気を行った。実験室の入り口付近に、消毒用アルコールを置き、手指を消毒してから実験室へ入室した。実験終了後の試問やレポート提出はオンラインで行った。
  各テーマのコロナ対策について、実験担当者で共有した。

- 物理学実験 I (S セメスタ)
  「エレクトロニクス」の指導 (八幡)

  教員と共同して、従来のエレクトロニクス I、II をエレクトロニクスにまとめ、試行的にオンラインで開催した。このためのカリキュラムの組立や解説書、また、実験を配信する実験セットを準備した。ここの中で、新たに回路シミュレーション (LTspice) を 3 日目に取り入れ、実験結果とシミュレーションモデルを比較し、現実系をより良く説明するモデルを構築する授業とした。このカリキュラムでは、教育する知識は減ったものの、理解が深まったように考えられる [12]。

- 物理学実験 II (A セメスタ)
  「生物物理学」の指導 (佐伯)

  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、今年度の学生実験に導入した。実験は一人ずつ行い、データはグループで共有し、実験後にオンラインで教職員と学生でグループディスカッションを行った [10]。

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 [9, 11] とともに、特に、新型コロナウイルス感染症の蔓延防止対応 [1] として、遠隔でも学生実験授業を行うための要素技術開発を開始した。特に認知発達を促す、個人内の協応の機会を与えるため、学生が在宅でも大学にある実験装置を遠隔操作し、実験を行うことを想定した実験授業の技術開発を行った [7]。 あるいは、学生の手元でタブレット端末で簡単に実験し、オンラインで実験結果を共有して理解を深める技術開発を行った [3, 4, 8]。

- 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、理学系内の少量ユーザーへの供給系統を二重化した。緊急事態宣言下でも、在宅から液面、圧力を監視できるため、円滑に供給が行えた。また、現システムを導入して 10 年が経過し、一部が経年故障したため、更新作業を開始した。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 [6]。

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)
- 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 (下澤)
- 理学系寒剤管理委員会 (八幡)

(原著論文)

[1] 八幡 和志: 遠隔教育についての考察, 大学の物理教育, 26,97 (2020).

[2] K. Yawata: Design of Laboratory Class Material with USB Based Data Acquisition Systems for Distant Education, Proceedings of International Conference on Technology and Social Science 2020 (2020/12/2-4).

[3] 青木 悠樹、八幡 和志: タブレットのタッチパネルを用いた摩擦測定教材の開発と授業実践, 物理教育 69-1 (2021 年 69 巻 1 号 p. 8-13).

[4] Y. Aoki and K. Yawata: Dynamics Experiments on the Touch Panel of a Tablet Computer, Physics Teacher, (accepted).

＜受賞＞

[5] K. Yawata; Best Paper Award at International Conference on Technology and Social Science 2020 (ICTSS 2020).

＜報文＞

[6] 技術部報告集 2020 (東京大学大学院理学系研究科 · 理学部技術部、2021 年 2 月).

＜学術講演＞

(国際会議)

[7] K. Yawata: Design of Laboratory Class Material with USB Based Data Acquisition Systems for Distant Education, International Conference on Technology and Social Science 2020 (2020/12/2-4 online).

(国内会議)

[8] 青木悠樹, 八幡和志、タブレットを用いた摩擦測定教材の開発と実践、日本物理学会 2020 年秋季大会 (オンライン、2020 年 9 月).

[9] 八幡和志, 佐伯喜美子, 南野真容子、Society5.0 に対応する、教育と研究の要素技術開発 (I)、日本物理学会 2020 年秋季大会 (オンライン、2020 年 9 月).

[10] 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と実践、日本物理学会第 76 回年次大会 (オンライン、2021 年 3 月).

[11] 田中忠芳, 館宜伸, 八幡和志, 渡會兼也, 沖野信一, 東拓郎, 谷口和成, 山田吉英, 松浦執, 土佐幸子, 藤井清美, 久恒彩子, 郭清蓮, 佐藤恵一, 鍵山茂徳, 大島和成, 並木雅俊, 江尻有郷、STEM 教育コンテンツと言語活動を統合した理工系基礎力育成プログラムの開発 VI (遠隔による物理実験教育の可能性)、日本物理学会第 76 回年次大会 (オンライン、2021 年 3 月).

[12] 八幡和志, 雑賀恵理, 川野将太郎, 影山豪大, 山田涼平, 大屋瑶子, 小高裕和, 馬場彩, 山本智、実験とシミュレーションの相互作用による構造的理解の深化、日本物理学会第 76 回年次大会 (オンライン、2021 年 3 月).

II

Summary of group activities in 2020

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 Liang Group

Research Subjects: Nuclear many-body theory

Member: Haozhao Liang

In our group, we study the properties of atomic nuclei and neutron stars based on various nuclear many-body theories. In particular, one of the main research themes is nuclear density functional theory (DFT), which aims at understanding both ground-state and excited-state properties of thousands of nuclei in a consistent and predictive way. Our research interests also include the microscopic foundation of nuclear DFT, the interdisciplinary applications in nuclear astrophysics, particle physics, condensed matter physics, etc., and the relevant studies in general quantum many-body problems.

Highlights in research activities of this year include:

1. Nucleon finite-size effects on nuclear proper-ties
2. Non-relativistic expansion of the Dirac equation
3. Effects of tensor force on nuclear spin-isospin resonances
4. Relativistic DFT for superheavy elements
5. Sine-square deformation in two-dimensional Lorentzian conformal field theory
6. Lipkin model with quantum computation

3 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 this academic year are summarized below:

1. Phenomenology
   1.1. Dark matter phenomenology [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]
   1.2. Axion detection [10, 11]
   1.3. Flavor models [12, 13]
   1.4. Supersymmetric models [14]
   1.5. Supersymmetric grand unified models [15, 16, 17, 18]
   1.6. Inflation and reheating [19, 20, 21, 22, 23, 24]
   1.7. Migdal effect [25]
   1.8. Oscillon [26, 27]
   1.9. ILC beam-dump experiments [28]
   1.10. $b \to s\ell\ell$ [29]
2. Superstring theory and formal aspects of quantum field theories
   2.1. Janus interface entropy and Calabi's diastasis in superconformal field theories [30]
   2.2. Regge OPE blocks and light-ray operators [31]
   2.3. Hawking radiation and capacity of entanglement [32]
   2.4. $O(N)$ model [33]
3. Matrix model
   3.1. Dimensional oxidization on coset space [34]
4. Mathematical physics
   4.1. q-Deformation of Corner Vertex Operator Algebras by Miura Transformation [35]
   4.2. Quantum deformation of W-algebras and AGT correspondence [36]

References

[1] K. Nakayama and Y. Tang, Phys. Lett. B **811**, 135977 (2020) [arXiv:2006.13159 [hep-ph]].

[2] D. J. E. Marsh and W. Yin, JHEP **01**, 169 (2021) [arXiv:1912.08188 [hep-ph]].

[3] F. Takahashi, M. Yamada and W. Yin, Phys. Rev. Lett. **125**, no.16, 161801 (2020) [arXiv:2006.10035 [hep-ph]].

[4] F. Takahashi, M. Yamada and W. Yin, JHEP **01** (2021), 152 [arXiv:2007.10311 [hep-ph]].

[5] W. Yin, JHEP **10**, 032 (2020) [arXiv:2007.13320 [hep-ph]].

[6] F. Takahashi and W. Yin, [arXiv:2012.11576 [hep-ph]]. To appear in JCAP.

[7] A. Azatov, M. Vanvlasselaer and W. Yin, [arXiv:2101.05721 [hep-ph]]. To appear in JCAP

[8] K. Nakayama, JCAP **08**, 033 (2020) [arXiv:2004.10036 [hep-ph]].

[9] S. Chigusa, T. Moroi and K. Nakayama, Phys. Rev. D **101**, no.9, 096013 (2020) [arXiv:2001.10666 [hep-ph]].

[10] S. F. Ge, K. Hamaguchi, K. Ichimura, K. Ishidoshiro, Y. Kanazawa, Y. Kishimoto, N. Nagata and J. Zheng, JCAP **11**, 059 (2020) [arXiv:2008.03924 [hep-ph]].

[11] T. Abe, K. Hamaguchi, N. Nagata, Phys. Lett. **B815**, 136174 (2021).

[12] K. Asai, K. Nakayama and S. Y. Tseng, Phys. Lett. B **814**, 136106 (2021) [arXiv:2011.10365 [hep-ph]].

[13] K. Asai, K. Hamaguchi, N. Nagata and S. Y. Tseng, JCAP **11**, 013 (2020) [arXiv:2005.01039 [hep-ph]].

[14] E. Kpatcha, I. Lara, D. E. López-Fogliani, C. Muñoz and N. Nagata, Eur. Phys. J. C **81**, no.2, 154 (2021) [arXiv:1912.04163 [hep-ph]].

[15] K. Hirao and T. Moroi, [arXiv:2102.04070 [hep-ph]].

[16] J. Ellis, M. A. G. Garcia, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, JHEP **05**, 021 (2020) [arXiv:2003.03285 [hep-ph]].

[17] K. Hamaguchi, S. Hor and N. Nagata, JHEP **11**, 140 (2020) [arXiv:2008.08940 [hep-ph]].

[18] J. Ellis, J. L. Evans, N. Nagata, K. A. Olive and L. Velasco-Sevilla, Eur. Phys. J. C **81**, no.2, 120 (2021) [arXiv:2011.03554 [hep-ph]].

[19] J. Ellis, M. A. G. Garcia, N. Nagata, N. D. V., K. A. Olive and S. Verner, Int. J. Mod. Phys. D **29**, no.16, 2030011 (2020) [arXiv:2009.01709 [hep-ph]].

[20] Y. Ema, R. Jinno and K. Nakayama, JCAP **09**, 015 (2020) [arXiv:2006.09972 [astro-ph.CO]].

[21] T. Asaka, H. Ishida and W. Yin, JHEP **07**, 174 (2020) [arXiv:1912.08797 [hep-ph]].

[22] J. Jaeckel and W. Yin, JCAP **02**, 044 (2021) [arXiv:2007.15006 [hep-ph]].

[23] T. Moroi and W. Yin, [arXiv:2011.09475 [hep-ph]]. To appear in JHEP

[24] T. Moroi and W. Yin, [arXiv:2011.12285 [hep-ph]]. To appear in JHEP

[25] K. Nakamura, K. Miuchi, S. Kazama, Y. Shoji, M. Ibe and W. Nakano, PTEP 2021 (2021) 1, 013C01 [arXiv:2009.05939 [physics.ins-det]].

[26] M. Kawasaki, W. Nakano, H. Nakatsuka and E. Sonomoto, JCAP 01 (2021) 061 [arXiv:2010.09311 [astro-ph.CO]].

[27] M. Kawasaki, W. Nakano, H. Nakatsuka and E. Sonomoto, [arXiv:2010.13504 [astro-ph.CO]]. JCAP accepted.

[28] Y. Sakaki and D. Ueda, Phys. Rev. D **103** (2021) no.3, 035024 [arXiv:2009.13790 [hep-ph]].

[29] M. Endo, S. Mishima and D. Ueda, [arXiv:2012.06197 [hep-ph]].

[30] K. Goto, L. Nagano, T. Nishioka and T. Okuda, "Janus interface entropy and Calabi's diastasis in four-dimensional $\mathcal{N} = 2$ superconformal field theories," JHEP **08**, no.08, 048 (2020) [arXiv:2005.10833 [hep-th]].

[31] N. Kobayashi, T. Nishioka and Y. Okuyama, "Regge OPE blocks and light-ray operators," JHEP **11**, 040 (2020) [arXiv:2005.06343 [hep-th]].

[32] K. Kawabata, T. Nishioka, Y. Okuyama and K. Watanabe, "Probing Hawking radiation through capacity of entanglement," [arXiv:2102.02425 [hep-th]]. Submitted to JHEP.

[33] C. P. Herzog and N. Kobayashi, "The $O(N)$ model with ϕ^6 potential in $R^2 \times R^+$," JHEP **09**, 126 (2020) [arXiv:2005.07863 [hep-th]].

[34] K. Harada, P. M. Ho, Y. Matsuo and A. Watanabe, "Dimensional oxidization on coset space," JHEP **10** (2020), 198 [arXiv:2005.13936 [hep-th]].

[35] K. Harada, Y. Matsuo, G. Noshita and A. Watanabe, "q-Deformation of Corner Vertex Operator Algebras by Miura Transformation," [arXiv:2101.03953 [hep-th]], accepted for publication, JHEP.

[36] K.Harada, "Quantum deformation of Feigin-Semikhatov's W-algebras and 5d AGT correspondence with a simple surface operator", arXiv:2005.14174.

4 Sakurai Group

Research Subjects: Structure and dynamics of exotic nuclei and exotic atoms

Member: Hiroyoshi Sakurai and Megumi Niikura

Our group investigates the structure and dynamics of exotic nuclei and exotic atoms. Our experimental programs utilize the accelerator facilities at RI Beam Factory in RIKEN, Research Center for Nuclear Physics (RCNP) in Osaka University, and Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC). Some of our research subjects are the following.

Nuclear charge distribution and radius measurements using muonic X ray

The nuclear charge distribution and radius are the most basic measurable values of atomic nuclei. The muonic X-ray measurement is one of the most common methods to determine the charge radius. We developed an analysis procedure using higher transitions of the muonic atom in addition to the lowest K transitions and reduced the model dependency. Furthermore, we proposed a new method to measure the charge distribution using muonic X ray and evaluated its systematic uncertainty.

High current beamline for transmutation accelerator
A high-current beam accelerator for the transmutation of waste fuels from the nuclear power plant is under development. The difficulty of a high beam current transportation is a larger beam diameter than the 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 the 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 of unstable nuclei. This array consists of 12 germanium detectors gathered from all over the world. A series of experiments were held at RIBF in 2020 with the world's highest beam intensity of unstable nuclei. Our proposed experiment to investigate the neutron shell evolution of titanium isotopes has been conducted at RIBF in December 2021.

Study of pion production
We investigate the cluster structure in atomic nuclei by sub-threshold pion production. An experiment to measure cross-section of pion production was performed at RIBF. π^0 was produced by ^{52}Ca beam impinged on a carbon target. Two gamma rays emitted from the decay of π^0 were detected by CATANA array. A correlation between the amount of produced pions and the number of neutrons that contribute to the reaction was found. Theoretical investigation is necessary to discuss the structure of ^{52}Ca.

Development of Low-energy muonic X-ray spectrometer for element analysis
A low-energy muonic X-ray spectrometer for element analysis (μLeXSea) is under development for the 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 detectors with a BGO anti-Compton suppressor. In this year, a prototype detector was tested and demonstrate the 60% Compton background with BGO Compton suppressor as shown in Fig. 2.1.5.

Study of the equation of state of high-density neutron matter by heavy-ion collision
To study the equation of state of high-density neutron matter experimentally, measurements of the collective flow of protons and neutrons in heavy-ion collisions are promising. We have performed the heavy-ion collision experiment (400-AMeV ^{132}Xe beam + CsI) conducted at HIMAC and confirmed the collective flow of protons and neutrons at the target rapidity for the first time. We are planning a new experiment with a detector with improved resolution of the reaction plane.

5 Aihara-Yokoyama Group

Research Subjects: Experimental Particle Physics and Observational Cosmology

Members: Hiroaki Aihara, Masashi Yokoyama, Yoshiuki Onuki, and Kota Nakagiri

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 τ 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 the B meson system. We played a central role in 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 of the Belle II detector. This year, using the first data set recorded with Belle II, we set upper limits for the branching fractions of $B \to K\ell^+\ell^-$ ($\ell = e$ or μ) decays. These decay modes are flavor changing neutral current (FCNC) processes, which are expected to be sensitive to the effects from new physics beyond the Standard Model. In addition, we developed the proper-time resolution function for time dependent analyses, which was used for the first measurement of CP violation parameter ϕ_1 at Belle II.

2. Study of neutrino oscillations and search for proton decay: T2K, Super-Kamiokande, and Hyper-Kamiokande experiments We have been studying neutrino oscillations with the T2K long baseline neutrino experiment. In T2K, 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 probabilities for neutrinos and antineutrinos. We reported a new constraint on the CP violating phase to exclude almost half of the possible values at the 3σ confidence level.

We have been leading the program to improve the sensitivity of T2K by reducing the systematics uncertainties related to the neutrino interaction. Our group proposed a major upgrade of the T2K near neutrino detector and has been playing central roles in the project. This year, we designed a test system for the quality assurance of more than 50,000 MPPC used for the new near detector. Also, we developed an algorithm to identify electrons with the new near detector and estimated the sensitivity to the electron neutrino interaction.

Proton decay is the only way to directly prove the Grand Unified Theory, which is an attractive candidate for a model of physics beyond the Standard Model. Using the data collected with the Super-Kamiokande detector, we searched for the decay $p \to e^+\eta$ and $p \to \mu^+\eta$. No signal candidate is found and we set the most stringent lower limits to the partial lifetimes of these decays.

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 under construction. This year, the delivery of photomultiplier tubes has 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.

We searched for pairs of quasars using images recorded by HSC. We examined 34,476 known quasars and identified more than 400 candidates for dual quasars. With optical spectroscopic follow-up observations, seven dual quasars are newly identified. In addition, information of those dual quasars such as the black hole mass and luminosity was obtained by detailed analysis.

6 Asai group

Research Subjects: (1) Particle Physics with the energy frontier accelerators (LHC) (2) Physics analysis in the ATLAS experiment at the LHC: (Higgs, SUSY and Extra-dimension) (3) Particles Physics without accelerator using high intensity of Photon (4) Positronium and QED

Member: S.Asai, A.Ishida

- (1) LHC (Large Hadron Collider) has the excellent physics potential. Our group is contributing to the ATLAS group in the Physics analyses: focusing especially on three major topics, the Higgs boson, Supersymmetry, and new diboson resonances(WW and $\gamma\gamma$).
  - Higgs: After the discovery of Higgs Boson, We are measuring the Yukawa coupling precisely.
  - SUSY: We have excluded the light SUSY particles (gluino and squark) whose masses are lighter than 1.4 and 1.5TeV, respectively.
- (2) Small tabletop experiments have the good physics potential to discover the physics beyond the standard model, if the accuracy of the measurement or the sensitivity of the research is high enough. We perform the following tabletop experiments:
  - Bose Einstein Condensation of positronium.
  - Axion searches using Spring 8

- $\gamma\gamma$ scatter Using FEL Xray.
- Vacuum Birefringence using Strong Magnetic field or Strong light.

7 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
Duality of electromagnetic responses between electric conductivity and orbital magnetic susceptibility.[1]
Anomalous conductivity of two-dimensional electron systems in organic conductors.[2]

• Thermal transport phenomena
Theory of magnon drag in Seebeck effects: Application to thin-film Heusler alloy.[3]
Theory of paramagnon drag in thermoelectric transport properties.
Thermal conductivity at low temperatures in excitonic insulators.[4]

• Theories on topological materials
Dirac nodal lines and topological crystalline insulators.[5]
Bulk physical properties of nodal line materials.[6]
Magnon higher order topological insulators in antyskyrmion crystals.[7]
Universal quantization of orbital-Zeeman cross term in magnetic susceptibility.[8]

• Organic conductors
Photo-induced phase transition using Floquet theory.[9]
Control of magnetism by oxygen adsorption in metal-organic framework systems.[10]

• Spin systems and spin-orbit interaction
Detection theory of multipolar quantum spin ice in pyrochlore materials.[11]

[1] S. Fujiyama, H. Maebashi, N. Tajima, T. Tsumuraya, H.-B. Cui, M. Ogata, and R. Kato: preprint. "Large diamagnetism and electromagnetic duality in two-dimensional Dirac electron system"

[2] Y. Suzumura and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 044709 (2021). "Anomalous conductivity of two-dimensional Dirac electrons in organic conductor under pressure"

[3] H. Matsuura, M. Ogata, E. Bauer, and T. Mori: in preparation. "Theory of huge thermoelectric effect based on magnon drag mechanism: Application to thin-film Heusler alloy"

[4] S. Takarada, M. Ogata, and H. Matsuura: arXiv:2104.03604 (2021). "Theory of thermal conductivity on excitonic insulator"

[5] I. Tateishi: Phys. Rev. Research **2**, 043112 (2020). "Mapping rules from nodal line semimetal to topological crystalline insulator in face centered cubic lattice", and I. Tateishi: Phys. Rev. B **102**, 155111 (2020). "Nodal lines and mapping to mirror Chern numbers in Ca_2As family"

[6] I. Tateishi, V. Könye, H. Matsuura, and M. Ogata: arXiv: 2103.05591 (2021). "Characteristic singular behaviors of nodal line materials emerging in orbital magnetic susceptibility and Hall conductivity"

[7] T. Hirosawa, S. A. Díaz, J. Klinovaja, and D. Loss: Phys. Rev. Lett. **125**, 207204 (2020). "Magnonic quadrupole topological insulator in antiskyrmion crystals"

[8] S. Ozaki, and M. Ogata: Phys. Rev. Research **3**, 013058 (2021). "Universal quantization of the magnetic susceptibility jump at a topological phase transition"

[9] K. Kitayama, and M. Mochizuki: Phys. Rev. Research **2**, 023229 (2020). "Predicted photo-induced topological phases in organic salt α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$"

[10] M. Kato, K. Tokushuku, H. Matsuura, M. Udagawa, and M. Ogata: arXiv:2104.04166 (2021). "Magnetic switching by oxygen adsorption in metal-organic framework systems"

[11] A. S. Patri, M. Hosoi, S. Lee, and Y. B. Kim: Phys. Rev. Research **2**, 033015 (2020). "Theory of magnetostriction for multipolar quantum spin ice in pyrochlore materials", and A. S. Patri, M. Hosoi, and Y. B. Kim: Phys. Rev. Research **2**, 023253 (2020). "Distinguishing dipolar and octupolar quantum spin ices using contrasting magnetostriction signatures"

8 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 2020 are as follows.

- Development of the data assimilation method for crystal structure exploration using incomplete diffraction data:
  In this fiscal year, we improved the method to assimilate powder diffraction data with noise.
- Electronic state of YH_6, a high-Tc superconductor at ultra-high pressure:
- Wannier-function-based analysis of the electron-phonon coupling constant
- Revisiting Floquet theory for first-principles calculations
- Density functional theory for superconductors considering spin fluctuation
- Mechanism of Li conduction in superionic conductor $LiCB_9H_{10}$
- Construction of relativistic density functional theory and electronic states of superheavy elements
- Density functional in electron systems and its application to nuclear density functional theory
- Construction of correlation density functional using functional renormalization group
- Machine learning construction of electron-temperature-dependent interatomic potential
- Development of a first-principles calculation method in the electron-lattice strong coupling limit

9 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 computational physics methods based on sampling methods such as the Monte Carlo algorithm, path integrals to represent quantum fluctuations, information compression using the singular value decomposition and the tensor networks, and statistical machine learning, etc. By making full use of these powerful numerical methods, we aim to elucidate various exotic states, phase transitions, and dynamics in various quantum many-body systems, from quantum spin systems to actual materials. Also, we are studying the basic theory of quantum computers and quantum machine learning algorithms and working on the development and release of open-source software for next-generation large-scale simulations.

[1] 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).

[2] Tatsuhiko Shirai, Takashi Mori, Thermalization in Open Many-Body Systems Based on Eigenstate Thermalization Hypothesis, Phys. Rev. E **101**, 042116 (11pp) (2020).

[3] Shohei Hayashida, Hajime Ishikawa, Yoshihiko Okamoto, Tsuyoshi Okubo, Zenji Hiroi, Gøran J. Nilsen, Hannu Mutka, Takatsugu Masuda, Zero-energy excitation in the classical kagome antiferromagnet $NaBa_2Mn_3F_{11}$, Phys. Rev. B **101**, 214409 (6pp) (2020).

[4] Takeo Hoshi, Mitsuaki Kawamura, Kazuyoshi Yoshimi, Yuichi Motoyama, Takahiro Misawa, Youhei Yamaji, Synge Todo, Naoki Kawashima, Tomohiro Sogabe, Kω – Open-source library for the shifted Krylov subspace method of the form $(zI - H)x = b$, Comp. Phys. Comm. **258**, 107536 (10pp) (2021).

[5] Daiki Adachi, Tsuyoshi Okubo, Synge Todo, Anisotropic tensor renormalization group, Phys. Rev. B **102**, 054432 (7pp) (2020).

[6] Ken M. Nakanishi, Keisuke Fujii, Synge Todo, Sequential minimal optimization for quantum-classical hybrid algorithms, Phys. Rev. Research **2**, 043158 (10pp) (2020).

[7] Botao Li, Synge Todo, A. C. Maggs, Werner Krauth, Multithreaded event-chain Monte Carlo with local times, Comp. Phys. Comm. **261**, 107702 (10pp) (2021).

[8] Hidemaro Suwa, Geometric allocation approach to accelerating directed worm algorithm, Phys. Rev. E **103**, 013308 (14pp) (2021).

[9] Sh. Yamamoto, H. Suwa, T. Kihara, T. Nomura, Y. Kotani, T. Nakamura, Y. Skourski, S. Zherlitsyn, L. Prodan, V. Tsurkan, H. Nojiri, A. Loidl, J. Wosnitza, Element-specific field-induced spin reorientation and tetracritical point in $MnCr_2S_4$, Phys. Rev. B **103**, L020408 (6pp) (2021).

[10] Hidemaro Suwa, Shang-Shun Zhang, Cristian D. Batista, Exciton condensation in bilayer spin-orbit insulator, Phys. Rev. Research **3**, 013224 (11pp) (2021).

[11] Hayate Nakano, Tatsuhiko Shirai, Takashi Mori, Tensor-network approach to thermalization in open quantum many-body systems, Phys. Rev. E **103**, L040102 (6pp) (2021).

[12] Xinliang Lyu, RuQing G. Xu, Naoki Kawashima, Scaling dimensions from linearized tensor renormalization group transformations, to appear in Phys. Rev. Research.

10 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) magnetism in Fermi Hubbard models, (iv) dissipative quantum many-body systems, and (v) non-ergodic dynamics in non-integrable systems. In addition, we are also interested in the mathematical aspects of the above-mentioned fields. Our research projects conducted in FY 2020 are the following:

- Topological phases of matter
  - Topological magnon systems characterized by $\mathbf{Z}_2$ topological invariants [1]
  - Topological invariants of bosonic Bogoliubov-de Gennes systems with disorder [2]
  - Skyrmions in the nonlinear sigma model with a Dzyaloshinskii-Moriya type interaction [3]
  - Symmetry-protected topological phases in spinor Bose-Hubbard models
- Strongly correlated systems
  - Ferromagnetism in the $SU(n)$ Hubbard model with a nearly flat band [4]
  - Exact analysis of nonlinear Drude weights for quantum spin chains
- Dissipative quantum many-body systems
  - Topological characterization of fractional quantum Hall states in the presence of dissipation [5]
  - Exact analysis of quantum Ising chain with boundary dephasing [6]
- Mathematical and statistical physics
  - Constructing an infinite sequence of non-integrable models exhibiting perfect quantum many-body scars [7]
  - Error bounds for constrained quantum dynamics [8, 9]
  - Classical supersymmetric ground states of the Nicolai model [10]
  - Majorana reflection positivity in the attractive $SU(n)$ Hubbard model [11]

[1] Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura, Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 12A104 (2020).

[2] Yutaka Akagi, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 123601 (2020).

[3] Yutaka Akagi, Yuki Amari, Nobuyuki Sawado, and Yakov Shnir, Phys. Rev. D **103**, 065008 (2021).

[4] Kensuke Tamura and Hosho Katsura, J. Stat. Phys. **182**, 16 (2021).

[5] Tsuneya Yoshida, Koji Kudo, Hosho Katsura, and Yasuhiro Hatsugai, Phys. Rev. Research **2**, 033428 (2020).

[6] Naoyuki Shibata and Hosho Katsura, Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 12A108 (2020).

[7] Naoyuki Shibata, Nobuyuki Yoshioka, and Hosho Katsura, Phys. Rev. Lett. **124**, 180604 (2020) [Editors' Suggestion].

[8] Zongping Gong, Nobuyuki Yoshioka, Naoyuki Shibata, and Ryusuke Hamazaki, Phys. Rev. Lett. **124**, 210606 (2020).

[9] Zongping Gong, Nobuyuki Yoshioka, Naoyuki Shibata, and Ryusuke Hamazaki, Phys. Rev. A **101**, 052122 (2020).

[10] Hosho Katsura, Hajime Moriya, and Yu Nakayama, J. Phys. A: Math. Theor. **53**, 385003 (2020).

[11] Hironobu Yoshida and Hosho Katsura, Phys. Rev. Lett. **126**, 100201 (2021) [Selected as Editors' Suggestion].

11 Kabashima Group

Research Subjects: Statistical mechanics of disordered systems and its application to information science

Member: Yoshiyuki Kabashima and Takashi Takahashi

We are working in a cross-disciplinary field between statistical mechanics and information science. Our research interests include error-correcting codes, cryptography, CDMA multi-user detection, data compression, compressed sensing, sparse modeling, high-dimensional statistics, probabilistic inference, neural networks, random matrix, machine learning, spin glasses, etc.

The followings are highlights in our research activities in AY 2020:

1. Performance analysis of pseudo likelihood method for Ising model selection
2. Signal recovery of compressed sensing based on SCAD regularization
3. ℓ_0-based sparse signal recovery by greedy Monte Carlo search
4. Development of approximate stability selection algorithm based on semi-analytic bootstrap method
5. Performance analysis of stability selection
6. Inference of neuronal couplings from spiking data measured by multi-electrode arrays
7. Analysis of short term memory stored in randomly connected recurrent neural networks

12 Tsuji Group

Research Subjects: Condensed matter theory, nonequilibrium quantum many-body systems

Member: Naoto Tsuji

We are interested in nonequilibrium physics of quantum many-body systems and statistical mechanics. The aim is to realize a new order or new physical property by driving quantum systems out of equilibrium. At first sight, it sounds unlikely to happen because energy injected by an external drive would turn into heat, which would destroy all the interesting properties of quantum many-body systems that might emerge at low energies. However, contrary to our intuition, recent studies have found various possibilities such that novel states of matter that can never be realized in equilibrium do emerge out of equilibrium. We are trying to understand their mechanism and explore the frontier of nonequilibrium condensed matter physics.

In the academic year of 2020, we worked on the following projects:

- Nonequilibrium superconductivity
  — Higgs mode in conventional superconductors [1, 4]
  — Higgs mode in unconventional superconductors [3]
  — Dynamical instability of η pairing states
  — Collective modes in multiband superconductors [8]
  — Superconducting fluctuations driven by electric fields [5]
- Nonequilibrium open quantum systems
  — Quantum magnetism induced by particles losses [2]
  — η pairing superfluids induced by spontaneous light emission
  — Collective modes and phase transitions in dissipative superfluids [7]
- Quantum information scrambling
  — Fluctuation theorem and quantum interference
  — SYK strange metal in multiorbital systems [6]

[1] N. Tsuji and Y. Nomura, "Higgs-mode resonance in third harmonic generation in NbN superconductors: Multiband electron-phonon coupling, impurity scattering, and polarization-angle dependence", Phys. Rev. Research **2**, 043029 (2020).

[2] 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).

[3] L. Schwarz, B. Fauseweh, N. Tsuji, N. Cheng, N. Bittner, H. Krull, M. Berciu, G. S. Uhrig, A. P. Schnyder, S. Kaiser, and D. Manske, "Classification and characterization of nonequilibrium Higgs modes in unconventional superconductors", Nat. Commun. **11**, 287 (2020).

[4] R. Shimano and N. Tsuji, "Higgs mode in superconductors", Annu. Rev. Condens. Matter Phys. **11**, 103 (2020).

[5] R. Iwazaki, N. Tsuji, and S. Hoshino, "Effects of periodic drive on superconductors above the transition temperature", JPS Conf. Proc. **30**, 011047 (2020). [Proceedings of International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2019)]

[6] N. Tsuji, "Spin freezing crossover in multi-orbital systems and SYK strange metal", an invited talk at CEMS Topical Meeting Online, 'Quantum Technology meets Quantum Matter', online, September 2020.

[7] K. Yamamoto, M. Nakagawa, N. Tsuji, M. Ueda, and N. Kawakami, "Dissipation-induced collective excitations and nonequilibrium phase transition in fermionic superfluids", a contributed talk at APS March Meeting 2021, online, March 2021.

[8] T. Kamatani, N. Tsuji, S. Kitamura, and T. Morimoto, "Optical responses of Higgs and Leggett modes in multiband superconductors", a contributed talk at APS March Meeting 2021, online, March 2021.

13 Ashida Group

Research Subjects: Condensed matter theory, theoretical quantum optics

Member: Yuto Ashida

This group focuses on theoretical studies at the intersection of quantum many-body physics and quantum optics. We have been studying physics of open and out-of-equilibrium systems, where quantum systems interact with external world and thus feature nonunitary dynamics. We employ the ideas/methods of field theory, renormalization group, and topology as well as variational approach, Bayesian inference, and reinforcement learning. We have also been studying physical phenomena in the corresponding classical systems as well as their potential applications. More recently, we have started to study applications/understanding of machine learning from a perspective of physics. We list research projects done in the academic year of 2020 below.

- Non-Hermitian physics, open systems [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]
- Quantum electromagnetism and quantum many-body physics [8, 9]
- Statistical physics, machine learning [10, 11]

[1] Y. Fuji and Y. Ashida, Measurement-induced quantum criticality under continuous monitoring, Physical Review B **102**, 054302 (2020).

[2] Y. Takasu, T. Yagami, Y. Ashida, R. Hamazaki, Y. Kuno and Y. Takahashi, PT-symmetric non-Hermitian quantum many-body system using ultracold atoms in an optical lattice with controlled dissipation, Prog. Theor. Exp. Phys. ptaa094 (2020).

[3] R. Cosmic, K. Kawabata, Y. Ashida, H. Ikegami, S. Furukawa, P. Patil, J. M. Taylor and Y. Nakamura, Probing XY phase transitions in a Josephson junction array with tunable frustration, Physical Review B **102**, 094509 (2020).

[4] K. Yamamoto, Y. Ashida and N. Kawakami, Rectification in Nonequilibrium Steady States of Open Many-Body Systems, Physical Review Research **2**, 043343 (2020).

[5] K. Sone, Y. Ashida and T. Sagawa, Exceptional non-Hermitian topological edge mode and its application to active matter, Nature Communications **11**, 5745 (2020).

[6] N. Matsumoto, K. Kawabata, Y. Ashida, S. Furukawa and M. Ueda, Continuous phase transition without gap closing in non-Hermitian quantum many-body systems, Physical Review Letters **125**, 260601 (2020).

[7] Y. Ashida, Z. Gong and M. Ueda, Non-Hermitian Physics, Advances in Physics, in press.

[8] Y. Ashida, A. Imamoglu, J. Faist, D. Jaksch, A. Cavalleri and E. Demler, Quantum Electrodynamic Control of Matter: Cavity-Enhanced Ferroelectric Phase Transition, Physical Review X **10**, 041027 (2020).

[9] Y. Ashida, A. Imamoglu and E. Demler, Cavity Quantum Electrodynamics at Arbitrary Light-Matter Coupling Strengths, Physical Review Letters, in press.

[10] Z. T. Wang, Y. Ashida, and M. Ueda, Deep Reinforcement Learning Control of Quantum Cartpoles, Physical Review Letters **125**, 100401 (2020).

[11] Y. Ashida and T. Sagawa, Learning the best nanoscale heat engines through evolving network topology, Communications Physics **4**, 45 (2021).

14 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 breaking, a wide variety of structures, and direct access for measurements. (1) Charge/spin/mass transports including superconductivity and spin current, (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 materials, 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:

- Anomalous Hall effect and topological Hall effect due to skyrmions at interfaces/heterostructures between topological insulators and ferromagnetic materials
- 2D superconductivity at monolayer alloy metallic surface superstructures and by proximity effect
- Weak anti-localization at a two-dimensional Dirac nodal line system and non-transition-metal dichalcogenide atomic layers
- Spin injection by circularly polarized light irradiation on topological insulators
- Superconducting Graphene and ferromagnetic Graphene with metal intercalation

(2) Surface phases and atomic-layer materials:

- Epitaxial growth of Dirac nodal line material Cu_2Si atomic layers and topological crystalline insulators

(3) New methods:

- Fabrication of a four-point probe UHV system with tunneling-spectroscopy capability
- Fabrication of a UHV system with polarization-controlled mid-infrared irradiation
- Lateral-ToF system with pulsed laser for carrier mobility measurements

[1] 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).

[2] 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 (Apr, 2020).

[3] 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 **33**, 075007(8pp) (Jun, 2020).

[4] N. Fukui, R. Hobara, A. Takayama, R. Akiyama, T. Hirahara, S. Hasegawa: *Scattering of topological surface-state carriers at steps on surfaces*, Physical Review **B** 102, 115418 (Sep, 2020),

15 Okamoto Group

Research Subjects: Experimental Condensed Matter Physics,

Low temperature electronic properties of two-dimensional systems.

Member: Tohru Okamoto and Ryuichi Masutomi

We study low temperature electronic properties of two-dimensional systems.
The current topics are following:

1. Two dimensional electrons at cleaved semiconductor surfaces:
   At the surfaces of InAs and InSb, conduction electrons can be induced by submonolayer deposition of other materials. Recently, we have performed in-plane magnetotransport measurements on in-situ cleaved surfaces of p-type substrates and observed the quantum Hall effect which demonstrates the perfect two dimensionality of the inversion layers. Research on the hybrid system of 2D electrons and adsorbed atoms has great future potential because of the variety of the adsorbates and the application of scanning probe microscopy techniques.

   To explore exotic physical phenomena related to spin at a semiconductor surface, magnetic-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.

16 Shimano Group

Research Subjects: Optical and Terahertz Spectroscopy of Condensed Matter

Member: Ryo Shimano and Naotaka Yoshikawa

We study light-matter interactions and many body quantum correlations in solids, aiming at 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) (1 THz∼4 meV) frequency range where various quasi-particle excitations and various collective excitations exist. The research topics in FY2020 are as follows.

1. **Nonequilibrium dynamics of superconductors:** We have investigated the photoexcited nonequilibrium dynamics of high-T_c cuprate superconductors and iron-based superconductors, by using a collective mode, namely the Higgs mode and nonlinear Josephson current response as a ultrafast probe fro the superconducting order parameter.

2. **Nonequilibrium dynamics of charge density wave system:** Large amplitude driving of a specific phonon is recently developed as a new approach to access nonequilibrium matter phases in correlated electron systems. In this work, we investigated a thin film of transition metal dichalcogenide (TMD) 3R-$Ta_{1+x}Se_2$ which shows a charge density wave(CDW) order at low temperatures. Upon the irradiation of an intense THz pulse, we demonstrated the resonant excitation of CDW amplitude mode, which in turn gives rise to emergence of a gapped state, suggesting a phase transition induced by the amplitude mode excitation.

3. **Terahertz emission from Dirac electrons in Bi:** We discovered that THz radiation is efficiently emitted from thin films of the semimetal Bi, a Dirac electron system, by irradiating it with circularly polarized light pulses. It is interpreted that the THz radiation is caused by the combination of spin polarization generation at the sample's surface by circularly polarized light, spin current generation by diffusion, and its conversion into a current pulse by the inverse spin Hall effect. Our findings open a new route to simple and compact methods for generating THz wave pulses and also for the ultrafast control of spin current.

4. **Generation of azimuthal and radial polarization of THz beam from a spintronic emitter:** We succeeded in demonstrating a method for switchable generation of THz radial and azimuthal beam, where a topological vortex nature appears in its polarization state, using a spintronic emitter. By focusing radially/azimuthally polarized THz-CVB, we demonstrated a generation of longitudinal electric/magnetic field component at the focal point.

References

[1] R. Shimano and N. Tsuji: Higgs mode in Superconductors, Ann. Rev. Cond. Mat. Phys. **11**, 103-124 (2020).

[2] H. Chu et al.: Phase-resolved Higgs response in superconducting cuprates, Nat. Commun. **11**, 1793 (2020)

[3] K. Katsumi et al.: Superconducting fluctuations probed by the Higgs mode in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ thin films, Phys. Rev. B **102**, 054510 (2020).

[4] S. Nakamura et. al.: Nonreciprocal Terahertz Second-Harmonic Generation in Superconducting NbN under Supercurrent Injection, Phys. Rev. Lett. **125**, 097004 (2020).

[5] Y. Hirai et. al.: Terahertz Emission from Bismuth Thin Films Induced by Excitation with Circularly Polarized Light, Phys. Rev. Appl. **14**, 064015 (2020). Editor' suggestion.

[6] H. Niwa et al.: Switchable generation of azimuthally- and radially-polarized terahertz beams from spintronic terahertz emitter, Optics Express, in press.

17 Takagi-Kitagawa Group

Research Subjects: Physics of Correlated Electron Systems

Member: Hidenori Takagi, Kentaro Kitagawa, Naoka Hiraoka

We are exploring new compounds with transition metal elements in which novel, exotic and/or functional electronic phases are realized. Our main targets in FY2020 included, $4f$ lanthanoide honeycomb-lattice compounds with interplay of electron correlations and strong spin orbit coupling, spin liquids, anti-perovskites with Dirac electrons, bosonic Bose-Einstein condensation 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 2018–2020.

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 materials. 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 exhibits metamagnetic behavior which has been theoretically expected for the antiferromagnetic Kitaev spin liquid and its proximate. We further explore $4f$ 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. 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.

18 Hayashi Group

Research Subjects: Quantum spintronics/optics

Member: Masamitsu Hayashi, Masashi Kawaguchi

We work in the field of quantum spintronics and optics. Currently we put a particular focus on the strong coupling of spins, photons, magnons and phonons, mediated by the spin orbit interaction of the system, and look for the physics that can be applied to quantum physics.

- Spin current generation
  - Observation of the acoustic spin Hall effect in strong spin-orbit metals[4]
  - Magnetization direction dependent spin Hall effect in ferromagnets[2]
  - First principles studies on the relation between the anomalous Hall and spin Hall effects in ferromagnets[5]
- Topological physics and superconductivity
  - Superconducting properties of W thin films on topological insulators[1]
- Non-linear optical effects
  - Terahertz wave radiation from via spin current[3]
- Machine learning for chiral magnetism
  - Machine learning and pattern recognition determine the Dzyaloshinskii Moriya interaction from a single magnetic domain image[6]

[1] Y.-C. Lau, R. Akiyama, H. T. 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 $(Bi,Sb)_2Te_3$. J. Phys. Mater. 3, 034001 (2020).

[2] G. Qu, K. Nakamura, M. Hayashi, Magnetization direction dependent spin Hall effect in ferromagnets. Phys. Rev. B 102, 144440 (2020).

[3] Y. Hirai, N. Yoshikawa, H. Hirose, M. Kawaguchi, M. Hayashi, R. Shimano, Terahertz emission from thin films induced by excitation with circularly polarized light. Phys. Rev. Appl. 14, 064015 (2020).

[4] T. Kawada, M. Kawaguchi, T. Funato, H. Kohno, M. Hayashi, Acoustic spin Hall effect in strong spin-orbit metals. Science Advances 7, eabd9697 (2021).

[5] G. Qu, K. Nakamura, M. Hayashi, First Principles Investigation of Anomalous Hall and Spin Hall Effects in Ferromagnetic CoPt. J. Phys. Soc. Jpn. 90, 024707 (2021).

[6] M. Kawaguchi, K. Tanabe, K. Yamada, T. Sawa, S. Hasegawa, M Hayashi, Y. Nakatani, Determination of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction using pattern recognition and machine learning. npj Comp. Mater. 7, 1 (2021).

19 Kobayashi Group

Research Subjects: mesoscopic physics, quantum sensing, diamond NV center, noise & fluctuations, nonequilibrium phenomena

Member: Kensuke Kobayashi and Kento Sasaki

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 are interested in various phenomena in mesoscopic systems, especially quantum many-body effects, non-equilibrium phenomena, and spin/thermal transport. High-precision measurement of conductance and current fluctuations enables us to quantitatively understand quantum transport, which has been difficult in the past. We now specially focus on the quantum sensing using diamond NV center (Nitrogen-Vacancy center), on which we are developing single quantum spin microscope for the application to the high-precision measurement of physical properties, especially mesoscopic systems.

In FY2020, we addressed the following research topics:

- Precise measurement of physical properties using diamond quantum sensors
- Non-equilibrium transport and many-body correlations in Kondo effect
- Nonlinear transport in magnetic tunnel junctions
- Fabrication of single electron pump
- Non-equilibrium current fluctuations in the tunneling effect using spin Esaki diodes
- Development of low temperature amplifier for current noise measurement
- Behavior of spin torque oscillator in non-linear regime
- Electric detection of spin dynamics in spinglass
- Magnetic transport measurements in atomic layer ferromagnet Fe_5GeTe_2

Published papers:

[1] S. Iwakiri *et al., Appl. Phys. Lett.* **117,** 022406 (2020).

[2] S. Sugimoto *et al., AIP Adv.* **10,** 075115 (2020).

[3] T. Arakawa *et al., Phys. Rev.* B **102,** 045308 (2020).

[4] S. Norimoto *et al., Rev. Sci. Inst.* **91,** 085110 (2020).

[5] M. Watanabe *et al., Appl. Phys. Lett.* **117,** 072403 (2020).

[6] M. Yokoi *et al., Sci. Adv.* **6,** eaba1377 (2020).

[7] K. Sasaki *et al., Appl. Phys. Lett.* **117,** 114002 (2020).

[8] H. Taniguchi *et al., Phys. Rev.* B **102,** 094405 (2020).

[9] Y. Teratani *et al., Phys. Rev.* B **102,** 165106 (2020).

[10] M. Watanabe *et al., AIP Adv.* **11,** 015005 (2021).

[11] D. Terasawa *et al., J. Phys. Soc. Jpn* **90,** 024709 (2021).

[12] T. Ohta *et al., AIP Adv.* **11,** 025014 (2021).

[13] S. Lee *et al., Rev. Sci. Inst.* **92,** 023910 (2021).

20 Nakatsuji-Sakai Group

Research Subjects: Condensed Matter Experiment

Member: Satoru Nakatsuji, Akito Sakai, Tomoya Higo, Takahiro Tomita

A new era in quantum materials research arises, featuring discoveries of novel topological phases of matter and interdisciplinary approaches. Our research activities focus on designing and synthesizing new materials with emergent quantum properties that have never been seen before, then exploring the physics and functionalities of 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 in strongly correlated topological phases and frustrated magnets
2. Room-temperature topological transport in magnetic materials
3. Non-Fermi-liquid behavior and exotic superconductivity in multipolar Kondo materials

Summary of research subjects in 2020

1. Electrical Manipulation of a Topological Antiferromagnetic State

The Weyl semimetal features nodal points formed by two linearly dispersive non-degenerate bands. These touching points or Weyl nodes act monopoles or antimonopoles of underlying Berry curvature, resulting in large anomalous Hall effect (AHE). The electrical manipulation of Weyl nodes is among the key topics of technological innovation utilizing a novel topological state. Moreover, electrical manipulation of an antiferromagnetic Weyl metal is considered a significant advancement, given the prospects of antiferromagnetic (AF) spintronics for realizing high-density, ultrafast devices.

We demonstrate the electrical switching of the AF Weyl state using Mn_3Sn/nonmagnetic metals (NM = Pt, W, Cu) bilayer devices and the spin-orbit torque (SOT) switching method[5]. The AHE serves as a readout for the SOT switching. We achieved the electrical switching of the AF Weyl metal using the same protocol as the one used for ferromagnetic metals. The critical write current density in the NM layer is considerably smaller than that in the NM/FM devices. These results indicate that topological antiferromagnets offer the unmatched potential for spintronic applications that may surpass today' s ferromagnetic counterparts.

2. Omnidirectional Control of Large Electrical Output in a Topological Antiferromagnet

The magnetization of a ferromagnet determines the signal size of memory and sensor, and thus manipulating the magnetization orientation is crucial for practical applications. While a large net magnetization yields

significant responses on its reversal, it may simultaneously limit the range of its directional control owing to the demagnetizing field. Thus, alternative materials that carry negligible magnetization but a strong response are highly demanded. Using polycrystalline Mn_3Sn thin films, we report omnidirectional control of the significant transverse responses in an antiferromagnet and demonstrate that the absence of shape anisotropy is the key to the omnidirectional control[1]. This work lays the foundation for engineering simple - structured, highly efficient devices, including multi - level memory and heat flux sensors.

3. Evidence for Weyl fermions in the chiral antiferromagnet Mn_3X (X = Sn, Ge)
A significant obstacle in antiferromagnetic spintronics is the tiny response of the antiferromagnetic structure to magnetic fields. The recent discoveries of large room-temperature anomalous transport effects in antiferromagnets Mn_3X (X = Sn, Ge) signifies an experimental breakthrough in this direction. These anomalous transport properties are considered fingerprints of Weyl fermions. Therefore, understanding the role of magnetic Weyl fermions in driving the transport properties of chiral antiferromagnets is all the more important for utilizing topological states of matter in practical applications.
In this work, we establish Weyl fermions as the origin of the large anomalous Hall and Nernst effects in Mn3X systems by combining our previous reports with a new, comprehensive set of transport measurements and theoretical analysis of high-quality Mn3X single crystals[2]. Our findings of magnetotransport signatures specific to chiral anomalies in Mn3Ge and planar Hall effect in Mn3Sn provide concrete evidence for the presence of Weyl fermions in both materials.

4.Strain tuning of magnetic phase transition in Weyl antiferromagnet Mn_3Sn
Combing strain and dilatometry offers a compelling route to high-resolution thermodynamic information on magnetic phase evolution. The stoichiometric Mn_3Sn undergoes a first-order transition at about 270K from the triangular to a spin spiral structure, in which the topological transport properties vanish. Tuning this transition may help understand the underlying mechanism and access the topological properties at low temperatures.
Together with collaborators at Max Planck Institute, we developed a piezoelectric-based dilatometer for measuring thermal expansion under tunable uniaxial stress, a clean tuning method to control and probe magnetic phase transitions[3]. With this device, we show that the first-order transition in Mn_3Sn is suppressed by about 50 K under a c-axis compression of 1.5 GPa, indicating that the transition is insensitive to stress, contrast sharply with its acute sensitivity to compositional changes. This finding suggests that the lattice is not the primary driver of the transition. This uniaxial stress technique is compatible with various experimental probes and is widely applicable to other materials.

5. Large transverse thermoelectric effect in iron-based binary ferromagnets
Thermoelectricity provides vital technology for versatile energy harvesting and heat current sensors. So far, thermoelectric technologies are focused on the longitudinal Seebeck effect. Its transverse counterpart, the anomalous Nernst effect (ANE) features several potential benefits. Namely, the transverse geometry of the Nernst effect enables simplified structures of thermoelectric generators with enhanced conversion efficiency. A server obstacle here is that the anomalous Nernst effect is too small compared to the Seebeck effect for real-life thermoelectric applications. Thus, it is essential to design a new class of materials that exhibit a large ANE without an external magnetic field.

We discovered record high spontaneous transverse thermoelectric effects at room temperature in two iron-based compounds, Fe_3X (X = Ga, Al)[4]. We then succeeded in fabricating Fe_3Ga and Fe_3Al thin films suitable for designing low-cost, flexible thermoelectric generators. Our innovative iron-based thermoelectric material represents a significant step toward commercializing thermoelectric generators that can power small devices such as remote sensors or wearable devices.

[1] T. Higo *et al.*, Adv. Funct. Mater. 2008971 (2021).

[2] T. Chen *et al.*, Nat. Commun. **12**, 572 (2021).

[3] M. Ikhlas, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **117**, 233502 (2020).

[4] A. Sakai, S. Minami, T. Koretsune, T. Chen, T. Higo, *et al.*, Nature. **581**, 53 (2020)

[5] H. Tsai, T. Higo, *et al.*, Nature. **580**, 608 (2020)

21 Theoretical Astrophysics Group

Research Subjects: Observational Cosmology, Extrasolar Planets, Star Formation, high-energy astrophysics, and Artificial Intelligence

Member: Yasushi Suto, Naoki Yoshida, Kazumi Kashiyama , Masamune Oguri & Tilman Hartwig

The 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, high-energy astrophysics, and artificial intelligence.

"Observational Cosmology" attempts to understand the evolution of the universe on the basis of the observational data in various wavebands. The proper interpretation of recent and future data provided by Planck, Hubble Space Telescope, ALMA, and wide-field galaxy surveys such as Subaru Hyper-Suprime-Cam survey are very 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 evolution of the universe. Our current interests include non-linear 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, statistics of gravitationally lensed quasars, and the chemical formation history of the Milky Way.

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 the evolution of the cosmic structure 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. We study the formation and mixing of the first heavy elements in the universe. Comparing the predictions of our simulations to observations allows us to better understand the nature of the underlying physical processes.

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 4000 exoplanets have been reported as of March 2021. 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.

To maximise the information gain from astrophysical observations and numerical simulations, we also apply and develop state-of-the-art machine learning techniques. We use supervised machine learning algorithms to classify observations of metal-poor stars, quasars, and satellite galaxies of the Milky Way. We improve existing deep learning methods with a new class of activation functions that allow users to improve the extrapolation properties of their neural networks. Artificial intelligence (AI) is a rapidly evolving field with many promising applications. To better understand the social impact of AI research, we also collaborate with social scientists to better understand the impact and public attitudes towards AI research.

Let us summarize this report by presenting recent titles of the PhD and Master's theses in our group;

2020

- Observational signatures from tidal disruption events of white dwarfs

- Multiwavelength Signals From Pulsar-Driven Supernovae
- Measuring stellar rotation periods and stellar inclinations of kepler solar-type stars

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

22 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.

We consider that a quantum computer is not just a machine to run computational algorithms but also a machine to perform any operations allowed by quantum mechanics. We analyze what kinds of new properties and effects may appear in quantum systems by using quantum computers to improve our understanding of quantum mechanics from an operational point of view. We also investigate applications of quantum properties and effects such as entanglement for information processing, communication, quantum learning, and quantum manipulations by developing quantum algorithms and quantum protocols. Recently, we are analyzing non-locality, causal structures, parallelizability, and anonymity of quantum information processing and quantum programming by investigating higher-order quantum operations and distributed quantum computation.

This year, our group consisted of two faculty members, Mio Murao (Professor), Akihito Soeda (Assistant Professor), Jun-yi Wu, and 6 graduate students–Qingxiuxiong Dong (D3), Wataru Yokojima (D1), Atsuhi Okamoto (M2), Yutaka Hashimoto (M1), Kosuke Matsui, and Anian Altherr (USTEP graduate student from ETH Zurich). Our projects engaged in the academic year of 2020 were the following:

- Higher-order quantum operations
  - Quantum learning: Equivalence determination with quantum tester by Y. Hashimoto, A. Soeda, and M. Murao
  - Storing and retrieving of higher-order quantum operations by W. Yokojima, A. Soeda, and M. Murao
  - Success-or-Draw structure in higher-order transformations by Q. Dong, A. Soeda and M. Murao with Dr. Marco Túlio Coelho Quintino
  - The uniqueness of the extension of quantum switch on non-unitary operations by Q. Dong, A. Soeda, and M. Murao with Dr. Marco Túlio Coelho Quintino at IQOQI Vienna
  - Inclusion hierarchy of parallel, adaptive, and indefinite causally ordered startegies in discrimination of quantum channels by M. Murao with Dr.Jessica Bavaresco and Dr. Marco Túlio Coelho Quintino at IQOQI Vienna
- Controls for quantum dynamics
  - Mathematical models based on quantum field theory for artificial quantum systems by A. Soeda
- Distributed quantum information processing
  - Distributed implementation of unitary operation between two nodes by entanglement-assisted LOCC by K. Matsui, J. Wu, A. Soeda, and M. Murao
  - Entanglement detection of multi-photon states distributed between two parties in an linear optical network by M. Murao and J. Wu
  - Distributed fidelity estimation of bipartite entangled states by M. Murao and J. Wu

23 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. Furthermore, we have recently tackled an understanding of AI and machine learning from a viewpoint of physics. We list our main research subjects in FY2020 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms, nonequilibrium open systems
  - Exact solution of a one-dimensional dissipative Hubbard model [1]
  - Effective temperature of a superfluid flowing in a random potential [2]
  - Universal error bound for constrained quantum dynamics [3, 4]
  - Non-Hermitian topological phases [5, 6, 7]
  - Continuous phase transition without gap closing in non-Hermitian quantum many-body systems [8]
  - Test of the eigenstate thermalization hypothesis based on local random matrix theory [9]
- Unification of quantum physics, statistical mechanics, information theory, and machine learning
  - Deep reinforcement learning control of quantum cartpoles [10]
  - Machine learning of periodic functions [11]
  - Thermodynamic uncertainty relation for arbitrary initial states [12]

[1] M. Nakagawa, N. Kawakami, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **126**, 110404 (2021).
[2] T. Haga and M. Ueda, Phys. Rev. Research **2**, 043316 (2020).
[3] Z. Gong, N. Yoshioka, N. Shibata, and R. Hamazaki, Phys. Rev. Lett. **124**, 210606 (2020).
[4] Z. Gong, N. Yoshioka, N. Shibata, and R. Hamazaki, Phys. Rev. A **101**, 052122 (2020).
[5] K. Kawabata, N. Okuma, and M. Sato, Phys. Rev. B **101**, 195147 (2020).
[6] K. Kawabata and M. Sato, Phys. Rev. Research **2**, 033391 (2020).
[7] K. Kawabata, M. Sato, and K. Shiozaki, Phys. Rev. B **102**, 205118 (2020) [selected as Editors' Suggestion].
[8] N. Matsumoto, K. Kawabata, Y. Ashida, S. Furukawa, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **125**, 260601 (2020).
[9] S. Sugimoto, R. Hamazaki, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **126**, 120602 (2021).
[10] Z. T. Wang, Y. Ashida, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **125**, 100401 (2020).
[11] Liu Ziyin, T. Hartwig and M. Ueda, Advances in Neural Information Processing Systems 33 (NeurIPS 2020).
[12] K. Liu, Z. Gong, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **125**, 140602 (2020).

24 J. Yokoyama Group

Research Subjects: Theoretical Cosmology and Gravitation

Members: Jun'ichi Yokoyama and Kohei Kamada

This group being a part of Research Center for the Early Universe (RESCEU) participates in research and education of Department of Physics in close association with Theoretical Astrophysics Group of Department of Physics. We are studying various topics on cosmology of the early universe, observational cosmology, and gravitation on the basis of theories of fundamental physics such as quantum field theory, particle physics, and general relativity. We have also been working on gravitational wave data analysis toward signal detection by KAGRA. Below is the list of topics studied during the academic year 2020.

Early Universe Cosmology

- Primordial magnetic fields
- Vacuum phase transition around a black hole
- Renormalization of quantum effects in the minimal gravitational leptogenesis
- Uncertainty in the improved mass spectrum of the primordial black holes
- (P)reheating in the Higgs-R^2 mixed model
- Towards the realization of the α-attractor in the M-theory
- Cosmological 21 cm circular polarization
- Particle production associated with vacuum decay
- Analytical expressions of the second order scalar perturbations
- Lorentzian path integral of the vacuum phase transition
- Comprehensive study of the gravitational production of the right-handed neutrinos
- Reheating process with the Schwinger effect

Gravitational wave analysis

- Offline noise subtraction with physical environmental monitors

25 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 of 0.36 m and a minor radius of 0.23 m. The plasma current is <120 kA for inductive operation and <27 kA for RF driven operation. Spherical tokamaks are attractive since they can sustain plasmas with high β (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 FY2020, the hard X-ray 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.

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 outer midplane and the top of the plasma. Since LH waves drive current by generating fast electrons, measurements of X-ray radiations by those fast electrons are important. On FY2020, parametric decay instability was observed with magnetic probes. The spatial distribution of the sideband depended strongly on the current drive scenario. We have improved the accuracy of edge Thomson scattering measurement to study the difference between the electron density and temperature profiles. One-dimensional fast electron transport model was developed. The simulated shape of the energy spectrum of the radiated X-ray was consistent with the experimental measurements for two different outer radius locations.

The ion doppler spectroscopy was performed to study the time evolution of flow during internal reconnection events (IRE). It was found that a high temperature component ($\sim$200 eV) appears during IRE in addition to the <100 eV component that exists before the IRE.

Several diagnostic developments were performed in FY2020. Optical design of a double-pass Thomson scattering configuration was performed to measure electron temperature anisotropy. The time resolution of the hard X-ray diagnostic was improved by one order of magnitude. New microwave interferometer optics was developed to improve the accuracy and reliability of the electron density measurement.

As a collaboration, Thomson scattering diagnostic on QUEST is being developed. As a collaboration with QST, we are investigating the optimum electron cyclotron (EC) wave assisted Ohmic start-up scenario for JT-60SA. In FY2020, we have developed models to describe the EC assisted breakdown and were able to explain the EC power and the vertical field dependences observed experimentally. We started a collaboration with ENN to develop a current drive system using LH waves. To excite LH waves in an unconventional parameter regime, we developed a novel corrugated surface antenna. A new 2.45 GHz antenna was fabricated and tested on the TST-2 device. We attempted to inject LH waves with the new antenna to a plasma generated with 200 MHz. Although we could not see a current drive effect because of the limited 2.45 GHz power (5 kW compared to 50 kW for 200 MHz), we observed a clear enhancement of hard X-ray radiation, which showed that the new antenna indeed accelerated electrons as expected.

26 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 (~ 1000 au) is indeed inherited in the disk forming region (~ 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, the ALMA large program FAUST (Fifty AU Study of the chemistry in the disk/envelope system of Solar-like protostar) is ongoing. Furthermore, we are now incorporating machine-learning techniques to explore the physical and chemical structures in an unbiased way.

[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. **824**, 88 (2016).

[2] Oya, Y. et al. Substructures in the Disk-forming Region of the Class 0 Low-mass Protostellar Source IRAS 16293–2422 Source A on a 10 au Scale, Astrophys. J., **904**, 185 (2020).

[3] Okoda, Y. et al. FAUST II. Discovery of a Secondary Outflow in IRAS 15398–3359: Variability in Outflow Direction during the Earliest Stage of Star Formation?, Astrophys. J., **910**, 11 (2021).

27 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) All-optical orientation of linear molecules with combined linearly and elliptically polarized two-color laser fields [1]

We show that a combination of a fundamental pulse with linear polarization along the vertical direction and an elliptically polarized second harmonic pulse with both vertical and horizontal electric field components can be used to orient linear molecules efficiently, leading to higher degrees of orientation. Due to this specific combination of polarizations, the asymmetric hyperpolarizability interaction potential, which remains the same as that in a linearly polarized two-color laser field, is created along the vertical component of the elliptically polarized second harmonic pulse. On the other hand, the horizontal component suppresses the otherwise strong symmetric polarizability potential responsible for alignment, increasing the tunneling probability from the shallower potential well to the deeper one. As a result, the degree of orientation increases and can be controlled by changing the intensity of the horizontal component of the

elliptically polarized second harmonic pulse. This study is the generalization of the all-optical molecular orientation technique based on the anisotropic hyperpolarizability interaction.

(2) Comparative studies of the degrees of orientation of CO molecules pumped by intense femtosecond two-color pulses based on high-order harmonic generation and Coulomb explosion imaging [2]

With an intense femtosecond two-color pulse optimized for the generation of even-order harmonics from CO molecules, we directly measure the actual degrees of orientation by utilizing the Coulomb explosion imaging technique with appropriate probe polarization. We find that the macroscopic orientation of CO molecules is negligible even when significant even-order harmonics are observed. This finding shows that the generation of even-order harmonics cannot be ascribed to the macroscopic orientation of CO molecules. The rotational wave packet of CO molecules created with an intense femtosecond two-color pulse is thought to be in an uninvestigated quantum state, which cannot be explained by the theoretical model based on the Born-Oppenheimer approximation, without inversion symmetry at any of the three steps of high-order harmonic generation, leading to the generation of even-order harmonics.

[1] Md. Maruf Hossain and Hirofumi Sakai, "All-optical orientation of linear molecules with combined linearly and elliptically polarized two-color laser fields," J. Chem. Phys. **153**, 104102(11 pages) (2020).

[2] Shinichirou Minemoto, Wataru Komatsubara, and Hirofumi Sakai, "Comparative studies of the degrees of orientation of CO molecules pumped by intense femtosecond two-color pulses based on high-order harmonic generation and Coulomb explosion imaging," J. Phys. B **53**, 235101(11 pages) (2020).

28 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 ultra-cold atomic gases. In particular, we have been investigating the phase of Bose-Einstein condensation of excitons, which has not been experimentally proven while considered as the ground state of an electron-hole ensemble. Based on quantitative spectroscopic measurements, the temperature and density of the 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
   1.2. Preparation of new quantum many-body systems using ultra-cold atomic gases
2. Investigation for non-trivial optical responses and development of applications:

2.1. Circularly polarized coherent VUV generation by photonics crystal nanomembrane

2.2. Exploring the mechanism of laser ablation by femtosecond lasers

2.3. Development of new technology to fabricate micro three-dimensional artificial structures using laser processing and additive manufacturing

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

29 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 and precursor missions
- Development of TOBA (Torsion Bar Antenna)
- Dark Matter Seach
- High-precision experiments on relativity and opto-mechanics
  - Opto-mechanics experiments with triangular cavity
  - Optical levitation experiments
  - Experimental study of space isotropy

Reference

[1] Koji Nagano, et al.: Demonstration of a dual-pass differential Fabry?Perot interferometer for future interferometric space gravitational wave antennas, Classical and Quantum Gravity 38, 085018 (2021).

[2] Soichiro Morisaki, et al.: Improved sensitivity of interferometric gravitational-wave detectors to ultralight vector dark matter from the finite light-traveling time, Physical Review D 103, L051702 (2021).

[3] Seiji Kawamura et al.: Current status of space gravitational wave antenna DECIGO and B-DECIGO, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2021, ptab019 (2021).

[4] Y. Zhao, N. Aritomi et al.: Frequency-Dependent Squeezed Vacuum Source for Broadband Quantum Noise Reduction in Advanced Gravitational-Wave Detectors, Phys. Rev. Lett., 124, 171101 (2020).

[5] T. Shimoda, et al.: Torsion-Bar Antenna: A ground-based mid-frequency and low-frequency gravitational wave detector, International Journal of Modern Physics D Vol. 29, No. 04, 1940003 (2020).

[6] N. Aritomi et al.: Control of a filter cavity with coherent control sidebands, Phys. Rev. D, 102, 042003 (2020).

[7] Takuya Kawasaki, et al.: Optical trapping of the transversal motion for an optically levitated mirror, Physical Review A 102, 053520 (2020).

[8] Yuta Michimura, et al.: Ultralight vector dark matter search with auxiliary length channels of gravitational wave detectors, Physical Review D 102, 102001 (2020).

[9] KAGRA Collaboration, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration: Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA, Living Reviews in Relativity 23, 3 (2020).

[10] Yuta Michimura et al.: Prospects for improving the sensitivity of the cryogenic gravitational wave detector KAGRA, Physical Review D 102, 022008 (2020).

[11] Yuta Michimura, Kentaro Komori: Quantum sensing with milligram scale optomechanical systems, The European Physical Journal D 74, 126 (2020).

[12] Hiroki Takeda, et al.: Pure polarization test of GW170814 and GW170817 using waveforms consistent with modified theories of gravity, Phys. Rev. D, 103, 064037 (2020).

30 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, and active galactic nucleus.

Member: Associate Prof: Aya Bamba, Assistant Prof: Hirokazu Odaka

Our aim is understanding high energy phenomena in the universe, such as supernova explosions and their remnants, compact stars such as neutron stars and blackholes, and active galactic nucleus. Such high energy objects emit X-rays and gamma-rays, so we observe such high energy photons using baloons and satellites.

This year we examined carefully how and when accelerated particles on the shocks of supernova remnants escape to the space and become galactic cosmic rays. With systematic study of a few tens suprenova remnants in X-ray and gamma-ray band, it is found that accelerated particles escape from the acceleration sites (shocks of supernova remnants) within $\sim$10 kyrs[2]. This is the first observational measurent of particle escape from the acceleration sites. The acceleration efficiency has diversity within the order of 3, which means that only a few supernova remnants contribute the Galactic cosmic rays.

Torus of active galactic nucleus (AGNs) feed supermassive blackholes and important to understand the co-evolution of galaxy and the blackholes. This year we have made systematic analysis of AGNs hidden by their torus with the X-ray emission model we developed ("XClumpy"), and found that around half of AGNs are hidden type. It is found that the covering fluction by their torus is larger than previously expected. Our result implies that there are more undiscovered AGNs hidden by their torus.

We also study on the detector development for the near future missions. For the XRISM, to be launched on the Japanese fiscal year 2022, we fixed the performance verification targets. For Cipher mission, the first imaging polarimetory cubesat in the hard X-ray band, we tested the X-ray use of infrared CMOS sensor and found that it totally satisfies our requests wigh good efficiency. We also started GRAMS mission deverlopment in this year.

[1] A. Tanimoto, Y. Ueda, H. Odaka, S. Ogawa, S. Yamada, T. Kawaguchi, K, Ichikawa, "Application of X-Ray Clumpy Torus Model (XCLUMPY) to 10 Obscured Active Galactic Nuclei Observed with Suzaku and NuSTAR" , ApJ, 897, 2 (2020) (doi: 10.3847/1538-4357/ab96bc)

[2] H. Suzuki, A. Bamba, R. Yamazaki, Y. Ohira, "Study on the escape timescale of high-energy particles from supernova remnants through thermal X-ray properties" , PASJ, 72, 72 (2020) (doi: 10.1093/pasj/psaa061)

[3] H. Suzuki, T. Tamba, H. Odaka, A. Bamba, K. Hagino, A. Takeda, K. Mori, T. Hida, M. Yukumoto, Y. Nishioka, T.G. Tsuru, "Development of the detector simulation framework for the Wideband Hybrid X-ray Imager onboard FORCE" , NIMA, 979, 164433 (2020) (doi: 0.1016/j.nima.2020.164433)

[4] T. Kasuga, H. Odaka, K. Hatauchi, S. Takashima, T. Tamba, Y. Aizawa, S. Hashiba, A. Bamba, Y. Zhou, T. Tamagawa, "Artifact-less Coded Aperture Imaging in the X-ray Band with Multiple Different Random Patterns" , JATIS, 6, 035002 (2020) (doi: 10.1117/1.JATIS.6.3.035002)

[5] A. Bamba, E. watanabe, K. Mori, S. Shibata, Y. Terada. H. Sano, M.D. Filopovic, "Low X-ray Efficiency of a Young High-B Pulsar PSR J1208-6238 Observed with Chandra", Ap&SS, 365, 178 (2020) (doi: 10.1007/s10509-020-03891-6)

31 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 concluded its observation campaign, and Simons Array experiment started the osbervation. 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 under constraction, with the first light expected in two years. We plan to deploy an array of what we call "small aperture telescopes," 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 telescope.
- 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, cryogenic bearing system for HWP, and anti-reflection coating for high-index optical material. 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.

32 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 academic year 2020:

(1) Non-equilibrium phenomena in soft matter systems
(1-1) Observing and characterizing 3D dynamics of topological defects in liquid crystal
(1-2) Universal scaling laws for random growth processes explored in liquid-crystal turbulence [2]
(1-3) Noise-induced phenomena in electroconvection dynamics of liquid crystal
(1-4) Positional and orientational orders in collections of self-propelled particles [3, 5]

(2) Non-equilibrium phenomena in living systems
(2-1) Scale invariance in cell size fluctuations [4]
(2-2) Crowding of motile bacterial populations
(2-3) Hydrodynamics of bacterial populations and individuals with the effect of boundaries [1]

(3) Approaches based on nonlinear science
(3-1) Machine-learning approach to spatiotemporal chaos

More detailed information can be found at the group's website, `https://lab.kaztake.org/`

References

[1] 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, Commun. Phys. **3**, 76 (2020).

[2] T. Iwatsuka, Y. T. Fukai, and K. A. Takeuchi, Direct Evidence for Universal Statistics of Stationary Kardar-Parisi-Zhang Interfaces. Phys. Rev. Lett. **124**, 250602 (2020).

[3] A. Poncet, O. Bénichou, V. Démery, and D. Nishiguchi, Pair correlation of dilute Active Brownian Particles: from low activity dipolar correction to high activity algebraic depletion wings, Phys. Rev. E **103**, 012605 (2021).

[4] T. Shimaya, R. Okura, Y. Wakamoto and K. A. Takeuchi, Scale invariance during bacterial reductive division observed by an extensive microperfusion system. arXiv:2004.04903.

[5] J. Iwasawa, D. Nishiguchi, and M. Sano, Algebraic correlations and anomalous fluctuations in ordered flocks of Janus particles fueled by an AC electric field, arXiv:2011.14548.

33 Nose Group

Research Subjects: Formation and function of neural networks

Member: Akinao Nose and Hiroshi Kohsaka

The aim of our laboratory is to elucidate the mechanisms underlying the formation and function of neural networks, by using as a model, the simple nervous system of the fruitfly, *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*. 33(3):179-189 (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)

34 Higuchi Group

Research Subjects:Protein dymamics in vitro,cells and mice

Member:Hideo Higuchi and Motoshi Kaya

Difference in molecular properties between cardiac and skeletal myosins determines types of contraction required in heart and skeletal muscles.

Changes in the molecular properties of myosin strongly affect the interactions of myosin with actin, that result in contraction and relaxation of the heart and skeletal muscles. In the 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 cardiac myosin molecules switched among three distant conformational positions, ranging from a pre- to post-power stroke positions. In contrast to cardiac myosin, fast skeletal myosin stayed primarily in the post-power stroke position, suggesting that cardiac myosin executes the reverse stroke more frequently than fast skeletal myosin. To elucidate how the reverse stroke affects the force production of myofilaments and possibly heart function, a simulation model was developed that combines the results from the single-molecule and myofilament experiments. The results of this model suggest that the reversal of the cardiac myosin power stroke may be key to characterizing the force output of cardiac myosin ensembles and possibly to facilitating 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 enhance force output along with high speed of shortening.

Molecular mechanism of kinesin denatured by temperature or pH.

Motor proteins kinesin and dynein move along microtubules converting ATP hydrolysis energy into mechanical energy and have cellular functions in organelle transport and cell division. Environmental temperature and pH are vital for survival; therefore, it is supposed that local environmental changes lead to cell death. In our previous study, we proposed that kinesin has metastable states before the complete inactivation stage, by a single molecular measurement of kinesin preincubated at high temperature for hours. In our study, we prepared kinesin or dynein preincubated at high temperature or pH for minutes to hours and investigated the transition of movement. First, we measured the behaviors of microtubules glided by multiple kinesin or dynein, called microtubule gliding assay. The velocity and microtubule-binding affinity decreased, same as the previous results. Especially, kinesin preincubated in pH 5.7 solution for 10 minutes glided microtubules in various behaviors; steady speed, stop and go, completely stop or Brownian motion. Next, we measured the stepping motion of the denatured kinesin at single molecular level using optical tweezers. The denatured kinesin generated smaller force and moved slower than wild kinesin, same as our previous results. Kinesin denatured at high temperature was previously observed to move with a slow microtubule dissociation rate in both kinesin heads and only one head. However, Kinesin denature at low pH was observed to move with a slow dissociation rate only in both heads, not observed in only one head. This suggests that the transition rate from the native state to the metastable state of slow dissociation rate was faster in pH-denatured kinesin than temperature-denatured kinesin. In summary, we propose that kinesin has metastable states in the change of temperature or pH, and this study would contribute to understanding the molecular mechanism of motor proteins upon environmental changes in axons or cells.

Analysis of intracellular diffusion constant and intensity fluctuation for quantitative evaluation of cellular damages

Decreasing mobility of organelles in cells damaged by intracellular reactive oxygen species (ROS) or local heat was found in our laboratory. Because there are some probabilities that our findings are related to "glass-like properties of cytoplasm" , mobility of intracellular organelles and red fluorescent proteins (RFP) were measured with cells damaged by ROS. Cellular survival probabilities were measured at the same time for quantitative evaluation of cellular damages. As a result, both mobility of intracellular organelles and RFP decreased in damaged cells which had low survival probabilities. In addition, the decreasing ratio of intracellular organelles were higher than that of intracellular RFP. We have interested in whether the difference is meaningful or not.

< References >

[1] Seohyun Lee, Hyuno Kim, Hideo Higuchi and Masatoshi Ishikawa. Visualization Method for the Cell-Level Vesicle Transport Using Optical Flow and a Diverging Colormap. Sensors 2021, 21, 522, 1-13 (2021).

[2] Seine A. Shintani, Takumi Washio and Hideo Higuchi. Mechanism of Contraction Rhythm Homeostasis for Hyperthermal Sarcomeric Oscillations of Neonatal Cardiomyocytes. *Sci. Rep.* 10:20468, 1-12 (2020)

[3] Seohyun Lee, Hyuno Kim, Hideo Higuchi, Masatoshi Ishikawa. Visualization and Data Analysis for Intracellular Transport using Computer Vision Techniques. 2020 IEEE Sensors Applications Symposium. *IEEE Xplore* 20055684, 1-6 (2020)

[4] Seohyun Lee, Hyuno Kim, Hideo Higuchi. Extended Dual-Focus Microscopy for Ratiometric-Based 3D Movement Tracking. *Appl.Sci.* 10,6243;1-12 (2020).

[5] 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. 13, 100764,1-11 (2020).

35 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.

Nearly half year from April, the laboratory works were forced to stop due to the lab closure by COVID-19 in FY2020. "Wet experiments" using protein or living cells were seriously delayed. We, therefore, rather focused on the development of the image processing algorithms using machine learning or deep learning technologies. For example, Kowashi applied deep learning based image processing algotirhms for the processing of the images of interferometric scattering microscope. Two papers were published by former international intern students from Lomonosov Moscow State University through STEPS (Students and Researchers Exchange Program in Sciences with Russian Universities) program. Yakov has developed an image henhancement algorithm for super-resolution microscopy [1], and Alex has developed a cell segmentation and tracking algorithm [2]. We also tried to develop "explainable AI" for the cell image classification. Microscope images were first classified by deep learning AI. Then, we extracted the features that AI has used for the classification by using Grad-CAM analysis. As a proof of this concept, we have classified the microscopic cell images for the cell cycle, and the Grad-CAM analysis indicated that AI has classified the cell images by focusing on nucleus and Golgi. We cell biologists expected nucleus would be most informative for the cell cycle classification, but this analysis unexpectedly identified Golgi as another marker for the cell cycle. In fact, we confirmed that Golgi changes its shape and size according to the cell cycle. This would be a primitive but first example that cell biologists learned from AI [3].

[1] Yakov P, *et al.* Enhancement algorithms for blinking fluorescence imaging. *Proceedings of the 2019 4th International Conference of Biomedical Imaging, Signal Processing* 72-77. (2019)

[2] Alexandr Y, *et al.* A method for automatic tracking of cell nuclei with weakly-supervised mitosis detection in 2D microscopy image sequences. *Proceedings of the 2020 5th International Conference on Biomedical Signal and Image Processing. Association for Computing Machinery*, 67–73. (2020)

[3] Nagao Y, *et al.* Robust Classification of Cell Cycle Phase and Biological Feature Extraction by Image-Based Deep Learning. *Mol Biol Cell* 31: 1346-1354 (2020).

[4] Aoyama-Ishiwatari S, *et al.* NUDT21 links mitochondrial IPS-1 to RLR-containing stress granules and activates host antiviral defense. *J Immunol* 206: 154-163 (2021).

36 Furusawa Group

Research Subjects: Theoretical Biophysics, Evolutionary Biology, Complex Systems

Member: Chikara Furusawa and Yusuke Himeoka

Biological systems have both robustness and plasticity, a property that distinguishes them from artificial systems and is essential for their survival. Biological systems exhibit robustness to various perturbations, including noise in gene/protein expressions and unexpected environmental changes. Simultaneously, they

are plastic to the surrounding environment, changing their state through processes such as 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.

Our work extracts the universal features of cellular dynamics responsible for robustness and plasticity in biological systems. We 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. Metabolic simulation for understanding growth and lag-phase
5. Development of a method to characterize animal morphology using machine learning

References

[1] C. Furusawa and N. Irie:Toward understanding of evolutionary constraints: experimental and theoretical approaches, Biophys. Rev. 12(5):1155-1161 (2020).

[2] T. Horinouchi, C. Furusawa: Understanding metabolic adaptation by using bacterial laboratory evolution and trans-omics analysis, Biophys. Rev., 12(3):677-682 (2020).

[3] R. Ohbayashi, S. Hirooka, R. Onuma, Y. Kanesaki, Y. Hirose, Y. Kobayashi, T. Fujiwara, C. Furusawa, S-Y Miyagishima: Evolutionary changes in DnaA-dependent chromosomal replication in Cyanobacteria, Front. Microbiol., 11, 786 (2020).

[4] T. Horinouchi, T. Maeda, H. Kotani, C. Furusawa: Suppression of antibiotic resistance evolution by single-gene deletion, Sci. Rep., 10(1):4178 (2020).

[5] T. Maeda, J. Iwasawa, H. Kotani, N. Sakata, M. Kawada, T. Horinouchi, A. Sakai, K. Tanabe, C. Furusawa: High-throughput laboratory evolution and evolutionary constraints in Escherichia coli, Nature Communications, 11(1):5970 (2020).

[6] Y. Himeoka, N. Mitarai: When to wake up? The optimal waking-up strategies for starvation-induced persistence, PLoS Comp. Biol., 17(2):e1008655 (20201).

III

2020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 : 山本 智, 北川 健太郎

1. 序論
1.1 現代物理と科学的手法
2. 物理量と単位
2.1 国際単位系 SI
2.2 各種の常用単位系とその変換
3. 誤差論
3.1 実験誤差
3.2 確率統計
4. 計測法
4.1 電磁波の計測
4.2 温度の計測
4.3 距離の計測
4.4 その他の計測
5. 実験の基礎技術
5.1 真空技術
5.2 エレクトロニクス
5.3 X 線回折
6. データ解析と可視化
6.1 グラフ作成
6.2 非線形最小自乗法
6.3 逆問題
7. 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：濱口 幸一

1. 複素関数論

1.1 この章の目標

1.2 準備

1.3 複素関数とその微分、正則関数

1.4 複素積分

1.5 テイラー展開、ローラン展開と留数、留数定理

1.6 一致の定理と解析接続

1.7 発展的話題

2. 常微分方程式

2.1 はじめに

2.2 定義と分類

2.3 一階微分方程式の解法の例

2.4 線形微分方程式

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 物理学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：島野 亮

1. 電磁場の基本法則
- **1.1** 真空中の Maxwell 方程式
- **1.2** 微視場と巨視場
- **1.3** 分極と磁化
- **1.4** 連続媒体 (物質) 中の Maxwell 方程式
- **1.5** 電磁場とポテンシャル
- **1.6** 電磁場のエネルギー
- **1.7** 電磁場の運動量
- **1.8** 境界面での境界条件

2. 静電場
- **2.1** 静電場の方程式
- **2.2** 境界値問題とグリーン関数の方法
- **2.3** 極座標における境界値問題
- **2.4** 静電ポテンシャルの多重極展開
- **2.5** 誘電体
- **2.6** 静電エネルギー
- **2.7** 電気容量

3. 静磁場と定常電流
- **3.1** 静磁場の方程式とアンペールの法則
- **3.2** 磁性体の境界値問題
- **3.3** 回路のインダクタンス
- **3.4** 準定常電流

4. 電磁波
- **4.1** 真空中と物質中の電磁波
- **4.2** 波動方程式のグリーン関数
- **4.3** 電磁波の伝播
- **4.4** 電磁波の性質

1.2.2 量子力学 II：福嶋 健二

0. 量子力学 I の復習

1. 対称性・ユニタリー変換・保存則

2. 角運動量代数・スピン

3. 角運動量の合成

4. 磁場中のスピンの運動・Berry 位相

5. 3 次元球対称ポテンシャル中の量子力学

6. 球面調和関数の性質

7. 水素原子

8. 時間に依存しない摂動

9. 縮退のある場合の Brillouin-Wigner 摂動論

10. 摂動計算の例 (Stark 効果・正常および異常 Zeeman 効果)

11. 摂動展開の破綻と Borel 再和

12. 時間に依存する摂動

13. 断熱定理

14. Ritz の変分原理

15. WKB 近似と Euclid 時空での量子トンネル

16. WKB 近似の応用：摂動展開の漸近形と破綻

17. Wigner 関数

18. 経路積分法による量子化

19. 経路積分法による調和振動子の解法

20. ダイヤグラムによる摂動展開

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. 実習環境整備

2. 計算機実験の基礎

2.1 数値誤差

2.2 数値微分

2.3 ニュートン法

2.4 二分法

2.5 行列演算

2.6 疑似乱数

2.7 複素数

2.8 ライブラリの利用

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. 行列の対角化

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 変分法

5.5 特異値分解・一般化逆行列

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（導入）

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. グランドカノニカル分布

6.1 導入

6.2 性質

6.3 応用：理想気体（高温）

7. 量子理想気体

7.1 多粒子系の量子力学

7.2 量子理想気体の平衡状態

7.3 状態密度

7.4 理想 Fermi 気体

7.5 理想 Bose 気体

8. 結晶の比熱

8.1 古典論

8.2 Einstein モデル

8.3 Debye モデル

9. 黒体放射

9.1 熱放射の普遍性

9.2 空洞放射

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

2.4 運動方程式

2.5 エネルギー方程式

2.6 粒子の方程式から流体の方程式へ

2.7 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 等角写像とクッタ・ジューコフスキー変換

4. 粘性流

4.1 レイノルズ数

4.2 ストークス近似

4.3 一様等方乱流

4.4 コルモゴロフ則の問題点と改良

5. 水波

5.1 長い波

5.2 表面波

5.3 表面張力波

6. 不安定性

6.1 分類と安定性解析

6.2 ケルビン・ヘルムホルツ不安定性

6.3 レイリー・テイラー不安定性

7. 拡散とブラウン運動

7.1 拡散方程式とランダムウォーク

7.2 ブラウン運動

7.3 ランジュバン方程式

7.4 揺動散逸定理

8. 様々な流体

8.1 分子粘性と乱流粘性

8.2 電磁流体

8.3 揚力

1.2.7 物質科学基礎：高木 英典, Ali Alavi, Jochen Mannhart, Bernhard Keimer

1. Electronic band structure of solids

1.1 The electronic structure problem

1.2 Electron-electron interactions

1.3 From Hartree-Fock theory to more sophisticated methods

2. Electronic transport

2.1 From Drude to quantum transport

2.2 From free electrons to strong correlations

2.3 From two dimensional electron gas (2DEG) to fractional quantum Hall effect (FQHE) and beyond

3. Superconductivity

3.1 Key experimental observations

3.2 BCS theory

3.3 Exotic superconductivity with unconventional Cooper pairing

4. Spectroscopy of solids

4.1 Scattering of photons, neutrons, and electrons from solids

4.2 Case studies

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（干渉）

4. 波動光学（回折）

5. 偏光光学

6. ビーム光学

7. 共振器光学

8. 先端光計測

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 点群と結晶点群

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

2.4 因子群

2.5 準同型と同型

3. 有限群の表現

3.1 表現とは?

3.2 既約表現

3.3 指標

3.4 表現論の量子力学への応用

4. 対称群

4.1 対称群と交代群

4.2 対称群の共役類と既約表現

5. リー群

5.1 リー群とは?

5.2 行列間の距離

5.3 コンパクト線形リー群

5.4 リー群からリー代数へ

6. リー代数

6.1 リー代数の定義と具体例

6.2 リー代数の表現

6.3 半単純リー代数

6.4 ルートとウェイト

7. **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 電磁場中の荷電粒子の量子力学

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 スピン軌道相互作用と微細構造

3.4 ボルン－オッペンハイマー近似（断熱近似）

3.5 水素分子

3.6 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

5. 相対論的量子力学

5.1 Klein-Gordon 方程式

5.2 Dirac 方程式

5.3 Weyl 方程式

5.4 Dirac 方程式の解

1.3.4 生物物理学：能瀬 聡直, 岡田 康志

1. 生物物理学とは

2. 細胞と数

3. 遺伝と進化

4. 発生 (分化と位置情報)

5. 生体分子の構造

6. 機能とゆらぎ

7. 神経科学概論

8. 神経細胞膜の電気的性質

9. シナプス伝達

10. 神経ネットワークによる情報処理

11. 脳の可塑性と記憶

12. 遺伝子組換え技術、神経イメージング、光による神経活動操作

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. モンテカルロと統計力学
1.1 多体系の統計力学
1.2 数え上げ
1.3 乱択アルゴリズム
1.4 物理過程のシミュレーション
1.5 疑似乱数・ヒストグラム
1.6 モンテカルロ積分
1.7 マルコフ連鎖モンテカルロ
2. 対角化と量子力学
2.1 偏微分方程式の初期値問題
2.2 対角化による解法
2.3 横磁場イジング模型
2.4 多体量子系の時間発展
2.5 量子コンピュータ
3. 少数多体系・分子動力学
3.1 常微分方程式の初期値問題
3.2 シンプレクティック積分法
3.3 ベルレ法
3.4 分子動力学法
3.5 ビリアル定理
3.6 温度の制御
4. 最適化
4.1 最適化問題
4.2 ニュートン法
4.3 囲い込み法
4.4 最急降下法・勾配降下法・共役勾配法
4.5 Nelder-Mead の滑降シンプレックス法
4.6 量子アニーリング・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：須藤 靖

1. 4次元時空とシュワルツシルト計量
1.1 線素と計量
1.2 シュワルツシルト時空の性質
2. 一般相対性原理とその数学的表現
2.1 特殊相対論の限界: 慣性系とは? 重力は“力”か?
2.2 一般相対論の概念構成
2.3 物理量の表現: ベクトル
2.4 物理量の表現: 双対ベクトル
2.5 物理量の表現: テンソル
2.6 まとめ: 物理量とテンソル
3. 測地線の方程式
3.1 重力場のもとでの粒子の運動方程式
3.2 ニュートン理論との対応
4. 重力場の方程式
4.1 マッハの原理と重力場の方程式
4.2 エネルギー運動量テンソル
4.3 アインシュタイン方程式への道
4.4 ニュートン理論との対応
4.5 宇宙定数

4.6 変分原理による定式化

5. シュワルツシルト時空とブラックホール

5.1 球対称重力場の計量

5.2 シュワルツシルト解導出の概略

5.3 シュワルツシルト半径と事象の地平線

5.4 シュワルツシルトブラックホールのまわりの質点の運動

5.5 一般相対論の古典的検証

5.6 水星の近日点移動の計算

5.7 光線の曲がり角の計算

5.8 ブラックホール天文学

6. 重力波

6.1 アインシュタイン方程式の弱場近似と重力波

6.2 重力波の平面波解

6.3 重力波の四重極近似解

6.4 重力波によるエネルギー損失率

6.5 連星系からの重力波

6.6 調和振動子からの重力波

6.7 重力波の直接検出

1.4.2 サブアトミック物理学 : 横山 将志

1. イントロダクション

2. サブアトミックな世界の探り方

3. 反粒子

4. 量子電磁力学 **(QED)**

5. 弱い相互作用

6. ストレンジネスと **CP** 非保存

7. 加速器

8. 原子核とハドロン

9. 電弱統一理論

10. ニュートリノ

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 : 常次 宏一

1. Introduction – Phase transitions, symmetry breaking, and order parameter

2. Mean field theory

3. Critical behaviors near phase transition

4. Scaling theory

5. Landau theory

6. Fluctuations and Landau-Ginzburg (LG) model

7. Gaussian theory

8. Ginzburg criterion

9. Introduction to Renormalization Group (RG) – Real-space RG

10. RG in k-space, Wick' s theorem, and RG of Gaussian model

11. RG of LG model: epsilon expansion and Wilson-Fisher fixed point

12. Scaling theory supplement: Dangerously irrelevant operator and correction to scaling

13. Systems with continuous symmetry: O(N) model and nonlinear sigma model

14. Disordered systems: Replica trick, random fixed point, and Harris criterion

15. Polymer statistics

1.4.5 現代物理学入門 : 小林 研介, 樺島 祥介

1. 量子力学の発見
2. エレクトロニクスの発展
3. コヒーレント量子輸送
4. ランダウア公式
5. メゾスコピック物理の展開
6. ゆらぎ
7. 統計力学と情報科学
8. 平均場近似
9. レプリカ法による **SK** モデルの解析
10. キャビティ法による **SK** モデルの解析
11. **CDMA** マルチユーザ復調問題の統計力学
12. 低密度パリティ検査符号の統計力学

1.4.6 場の量子論 I : 松尾 泰

1. 準備
1.1 自然単位系
1.2 ローレンツ変換
1.3 相対論的古典力学
1.4 第二量子化
2. 相対論的場の方程式
2.1 Klein-Gordon 方程式
2.2 Dirac 方程式
2.3 場のローレンツ変換
3. 対称性と保存則
3.1 Euler-Lagrange 方程式
3.2 ネーターの定理
3.3 例
4. 場の正準量子化
4.1 スカラー場
4.2 Causality と Feynman 伝搬関数
4.3 Dirac 場
4.4 電磁場
5. 相互作用と摂動展開
5.1 相互作用描像と Dyson 展開
5.2 S 行列、Feyman 則, Wick の定理
5.3 崩壊率と散乱断面積
6. 量子補正概論
6.1 ループ振幅
6.2 くりこみ理論

1.4.7 系外惑星 : 須藤 靖

1. はじめに
1.1 太陽系から銀河宇宙へ
1.2 宇宙観の広がりと太陽系外惑星
2. 惑星と恒星の諸性質
2.1 太陽系天体の典型的スケール
2.2 惑星の明るさ
2.3 天体の光度と等級
2.4 主系列星のスペクトル型とハビタブルゾーン
3. 物理法則と天体
3.1 天体形成史
3.2 宇宙の階層構造
3.3 物理法則と初期条件
3.4 ガス惑星の質量
3.5 恒星の質量
3.6 宇宙の階層と基本物理定数
4. 系外惑星発見史
4.1 系外惑星発見前史
4.2 太陽系外惑星発見の歴史
4.3 ケプラー探査機と系外惑星探査の進展
5. 系外惑星検出法
5.1 系外惑星の直接検出

5.2 ケプラー問題と軌道要素
5.3 系外惑星の間接検出
6. 系外惑星系の統計
6.1 惑星パラメータの分布
6.2 惑星パラメータ間の相関
6.3 惑星の存在率
6.4 ハビタブル惑星の存在率
6.5 多重惑星系
6.6 自転公転角
7. 原始太陽系形成と林モデル
7.1 惑星形成の概略: コア集積モデル
7.2 最小質量太陽系モデル – 林モデル –
8. 原始惑星系円盤の構造
8.1 ガス円盤の力学的構造
8.2 円盤の熱的構造
9. 原始惑星系円盤の進化
9.1 惑星系円盤進化の基礎方程式
9.2 円筒座標系の復習
9.3 幾何学的に薄い円盤ガスの基礎方程式
9.4 幾何学的に薄いガス円盤の進化
10. ダストの成長と微惑星形成
10.1 ダスト成分の沈澱
10.2 ダストの成長と微惑星仮説
10.3 薄いダスト層における重力不安定性理論
11. 原始惑星の形成
11.1 原始惑星の形成
11.2 ガス惑星の形成
11.3 円盤ガスの消失

1.4.8 量子光学 : 酒井 広文

1. 原子と放射の相互作用
1.1 時間に依存する Schrödinger 方程式
1.2 相互作用ハミルトニアン
1.3 遷移速度
1.4 B 係数の表式
1.5 光学 Bloch 方程式
1.6 Rabi 振動
1.7 放射広がり
1.8 飽和広がり
1.9 放射減衰を伴う Rabi 振動
1.10 衝突広がり
1.11 Doppler 広がり
1.12 合成吸収線の形状
2. 電磁場の量子化
2.1 古典電磁場のポテンシャル論
2.2 Coulomb ゲージ
2.3 自由古典場
2.4 量子力学的調和振動子
2.5 場の量子化
2.6 場の交換の性質
2.7 零点エネルギー
2.8 モード位相演算子
2.9 単一モード個数状態の物理的性質
2.10 コヒーレント光子状態
2.11 単一モードコヒーレント状態の物理的性質
3. 量子化した場と原子との相互作用
3.1 原子の多極モーメント
3.2 多極相互作用ハミルトニアン
3.3 電気双極子近似
3.4 原子ハミルトニアンの第 2 量子化
3.5 光子の吸収速度と放出速度
4. レーザーの基礎
4.1 光共振器のモード
4.2 光共振器の安定性
4.3 発振条件
4.4 波動方程式に基づくレーザー理論
4.5 各種のレーザー
4.5.1 3 準位レーザーと 4 準位レーザー

4.5.2 固体レーザー
4.5.3 気体レーザー
4.5.4 色素レーザー
4.5.5 半導体レーザー

1.4.9 固体物理学 II：中辻 知

1. 強束縛近似とバンド構造
1.1 ブロッホの定理
1.2 強く束縛された電子の近似
1.3 グラフェンと Dirac 方程式
2. 幾何学とベリー位相
2.1 曲面の曲率と平行移動
2.2 量子系への拡張
3. 固体中のベリー位相と電子運動
3.1 磁場中の電子の運動と Aharonov-Bhom 効果
3.2 異常速度と異常ホール効果
3.3 二準位系
3.4 量子ホール効果
3.5 Weyl 半金属
4. モット絶縁体と Hubbard 模型
4.1 モット転移
4.2 Hubbard Model
4.3 超交換相互作用
4.4 遷移金属反強磁性体
5. 超伝導
5.1 超伝導現象
5.2 第一種超伝導体と第二種超伝導体
5.3 電子と格子振動の相互作用
5.4 クーパー対

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：横山 順一

1. 私たちの宇宙
2. 恒星の物理
2.1 星の構造・力学平衡
2.2 放射輸送
2.3 エディントン光度
2.4 対流

2.5 星のエネルギー収支

2.6 恒星の大まかな性質

2.7 熱核反応

3. 一般相対論的宇宙論

3.1 宇宙原理と FLRW 計量

3.2 フリードマン宇宙

3.3 ルメートル・ハッブルの法則と赤方偏移

3.4 宇宙論的パラメタ

3.5 初期宇宙の熱史

3.6 ビッグバン元素合成

3.7 宇宙の晴れ上がり

3.8 脱結合後の分布

3.9 ニュートリノの脱結合

3.10 インフレーション宇宙論

補遺 **A** サハの式

1.4.12 生物物理学特論 II：樋口 秀男, 新井 宗仁, 野口 博司

1. 蛋白質の構造と物性

2. 蛋白質はどのようにして立体構造を形成するのか

3. 蛋白質の機能と疾患

4. 蛋白質の進化とデザイン

5. 生体膜の構造とその機能

6. 曲面の物理、表面張力、濡れ

7. 生体膜のシミュレーション

8. 赤血球、血流

9. 蛋白質 1 分子の機能をいかに測定し、理解するか。

10. 細胞内蛋白質機能をイメージングしてわかること。

11. 個体内蛋白質の役割の多様性

1.5 4年生 A セメスター

1.5.1 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

1.5.2 場の量子論 II：渡利 泰山

1. path integral formulation of quantum mechanics

1.1 bosonic system

1.2 two-state system

2. What is quantum field theory for?

3. S-matrix etc., and how to compute them

3.1 S-matrix, decay rate, and cross section

3.2 LSZ reduction formula

3.3 time-ordered correlation function and Feynman rule

3.4 other quantities of interest in QFT

4. scattering processes at the leading order

4.1 vector field propagator

4.2 e+ + e- to mu+ + mu- cross section

4.3 crossing symmetry and elastic scattering

4.4 Compton/Thomson scattering

5. introduction to 1-loop computation

6. bound states

6.1 Bethe-Salpeter equation

6.2 hydrogen atom spectroscopy in QED

6.3 Bethe-Salpeter wavefunction in a QFT process

7. unitarity

7.1 partial wave unitarity

7.2 optical theorem

8. low-energy effective field theory

9. path integral formulation in quantum field theory

9.1 repeating the derivation

9.2 partition function, free-energy, effective potential (formal)

9.3 background field method

9.4 imaginary time formalism (thermal field theory)

9.5 real time formalism (Schwinger Keldysh formalism)

1.5.3 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. Collective Motion

4.1 Vibrational motion

4.2 Rotational motion

5. Microscopic Models of Nuclear Structure

5.1 Hartree-Fock single particle Hamiltonian

5.2 Deformed single particle state

5.3 Spherical Shell model

5.4 Unified model of nuclear structure

6. Nuclear reaction

6.1 Compound nuclear reaction

6.2 Direct reaction

6.3 Optical model

7. Recent Topics with radioactive nuclear beams

1.5.4 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

1.5.5 固体物理学 III : 林 将光

1. 2 次元電子系

2. ランダウ準位

3. 整数量子ホール効果

4. グラフェンと擬スピン

5. 相対論的量子ホール効果

6. ベリー位相

7. 量子異常ホール効果とチャーン数

8. 端伝導

9. 量子スピンホール効果と **Z2** 指数

10. クーパー対

11. 電子格子相互作用

12. BCS 理論

13. ジョセフソン接合

14. 超伝導量子ビット

1.5.6 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、Markov ネットワークと 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、Fisher 情報行列と情報幾何、相互情報量、エントロピー生成、揺らぎの定理、情報熱力学第二法則

5. 確率過程とパラメータの力学系
力学系、キュムラント母関数、定常状態と固定点、安定性、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. レート方程式上の化学熱力学
化学反応ネットワーク、理想希薄溶液、Gibbs の自由エネルギー、f-ダイバージェンスと熱力学第二法則

1.5.7 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

1.5.8 重力波物理学 : Kipp Cannon, 都丸 隆行

1. Gravitational Waves (Cannon)

1.1 Motivation

1.2 Spaces, Geodesics, Curvature

1.3 Linear Gravity, Gravitational Waves

2. Sources of Gravitational Waves I: Orbiting Binary System (Cannon)

2.1 Linear Metric Perturbation

2.2 Time Evolution, Energy Balance

2.3 Time to Collapse

2.4 Newtonian Chirp

3. Detection of Gravitational Waves (Tomaru)

3.1 Philosophical Introduction

3.2 Various Methods of Gravitational Wave Detection 1 – Binary Pulsar Observation and Resonant Mass Detector –

3.3 Various Methods of Gravitational Wave Detection 2 – Doppler Tracking and Pulsar Timing –

3.4 Laser Interferometric Gravitational Wave Detector

3.5 Noises in Gravitational Wave Detector

4. Gravitational-Wave Data Analysis (Cannon)

4.1 Time Series as a Vector

4.2 Neyman-Pearson Criterion

4.3 Fourier Transform as a Linear Operator

4.4 Gaussian Random Variables

4.5 Karhunen-Loeve Theorem

4.6 Matched Filter

4.7 Compact Object Merger Detection

5. Recent Observational Results (Cannon)

1.5.9 物理学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　堀田 凱樹 名誉教授

— 文化功労者 —

堀田凱樹名誉教授（現 公益財団法人井上科学振興財団理事長）が 2020 年度の文化功労者に選ばれました。堀田先生は生物物理学、行動遺伝学、神経発生学等の分野において数多くの顕著な業績を挙げられています。特に、分子生物学の黎明期である 1960 年代後半から 1970 年代にかけて、ショウジョウバエのモザイク解析という手法を用いて、動物行動を遺伝子と発生現象に結びつけ、さらに数理統計学的に解析した一連のご研究は極めて独創的なもので、内外の研究者に大きな影響を与えました。また 80 年代以降、脳神経系の発生制御に関わる遺伝子を次々に同定することに成功しました。一方、我が国においてショウジョウバエ、ゼブラフィッシュなどのモデル生物を用いた分子遺伝学を普及するのに大学等の組織の枠を越えてご尽力され、分野の発展に大きく貢献されました。このようなご功績が評価され今回文化功労者として顕彰されました。

2.2　酒井 広文 教授

— 2020 年度日本分光学会賞（学会賞） —

酒井広文教授が、研究題目「高強度レーザー電場を用いた気体分子の配列・配向制御技術とその応用」により 2020 年度日本分光学会賞（学会賞）を受賞しました。同賞は、分光学およびその関連分野に関する優れた研究実績をもち、学術の発展に特に顕著な功績のあったものを対象として授与されます。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。酒井教授の分光学の関連分野の発展に対する顕著な業績が高く評価されました。

2.3　髙木 英典 教授

— Eugen and Ilse Seibold Prize —

髙木英典教授が 2020 年度 Eugen and Ilse Seibold-Prize をドイツ研究振興協会［Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)：日本の学術振興会に対応］より受賞しました。この賞は学術研究を通じて、日独の交流に貢献した研究者に隔年で与えられます。髙木教授はクロスアポイントを通じて 2013 年よりマックスプランク研究所の所長を兼務し、日独を跨いで、固体中の相関電子が形成する量子相の開拓を推進し、大きな成果を挙げてきました。これの共同研究を通じて、次世代の日独の研究交流の在り方を提示したばかりか、MPI-UBC-東大量子物質連携研究センターを通じて、物理教室の学部生のインターンシッププログラムや授業の配信などを実現してきました。今回の受賞は、これらの貢献が高く評価されたことによるものです。

2.4 横山 順一 教授

— 令和 2 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 —

横山順一教授ほか 2 名が、「最も一般的なインフレーション宇宙論の研究」により、令和 2 年文部科学大臣表彰科学技術賞を受賞しました。宇宙空間の大域的一様等方平坦性の説明や銀河などの大規模構造のタネとなる密度ゆらぎの起源を与える機構として、宇宙初期に指数関数的膨張が起こったというインフレーション宇宙論が現在広く受け入れられています。これまで数百を超えるインフレーション模型が考案されてきましたが、近年の宇宙観測の精密化により、理論模型の選別が現実味を帯びてきました。横山教授らは、Generalized G-inflation という、単一場インフレーションを統一的に記述する方法を構築し、精密宇宙観測時代において観測データを系統的に解析し、真のインフレーション模型を定め、宇宙開闢の謎に迫る道を開きました。

2.5 福嶋 健二 教授

— 第 14 回湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞 —

福嶋健二教授が「カイラル磁気効果の理論的研究」により第１４回湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞を受賞しました。相対論的重イオン衝突実験の初期に生成される磁場とカイラリティーの揺らぎが、量子アノマリーを通じて電荷の輸送現象を引き起こす現象は、カイラル磁気効果と呼ばれ注目されています。福嶋氏はこのカイラル磁気効果に対し、カイラル化学ポテンシャルを導入することで、場の理論の枠組みから一般的な公式を導きました。この成果により、カイラル磁気効果は、相対論的重イオン衝突実験に限らず、素粒子物理、物性物理、宇宙物理を含む広い分野への応用が可能となり、非常に多くの文献に引用されてきました。福嶋氏はこの論文の後も、継続してカイラル磁気効果の研究で活躍し、この分野をリードする研究者として高く評価され、受賞に至りました。

2.6 林 将光 准教授

— 第 17 回日本学術振興会賞受賞 —

林将光准教授が「強磁性ナノ構造の磁化ダイナミクスとスピン軌道相互作用が誘起する物性に関する研究」により、第 17 回（2020 年度）日本学術振興会賞を受賞しました。本賞は、日本学術振興会が平成 16 年度に創設したもので、学術上特に優れた成果を上げたと認められる 45 歳未満の研究者に対し贈られるものです。林氏は電子のスピンが関与する物性物理学、とりわけスピントロニクスに関する研究で顕著な成果をあげました。強磁性体ナノ細線に電流を流すと、スピン移行トルク現象によって磁壁を高速で移動できることを見いだし、それを利用した磁気シフトレジスタのメモリ動作を実証しました。また、スピン軌道トルクの計測法を確立、カイラル磁性の起源である界面ジャロシンスキー守谷相互作用の発現機構解明に貢献するなど、スピン軌道相互作用が誘起する物理を研究する「スピンオービトロニクス」という新分野開拓に寄与しました。国際的に高い競争状態にあるスピントロニクスの分野におけるインパクトの高い先駆的な研究が評価され、受賞に至りました。

2.7 竹内 一将 准教授

— 米国物理学会 Outstanding Referees of the Physical Review Journals —

竹内一将准教授が、米国物理学会 Outstanding Referees of the Physical Review Journals の 2021 年受賞者の一人に選ばれました。国際論文誌における投稿論文の査読は、研究者が担う、現代科学を支える重要任務の１つです。質の高い査読報告をすることは、その論文誌の品質を保つだけでなく、研究成果が、正確に、わかりやすく世界に公表されることに寄与します。米国物理学会の Outstanding Referees Program は、同学会が出版する Physical Review 系列論文誌の査読者として顕著な貢献をした研究者を表彰するために 2008 年に設立されました。約 71,000 人いるとされる査読者の中から毎年 150 人程度のみが選出される、競争率の高い賞となっています。査読報告の質、量、迅速性に基づく選考により、2021 年は、竹内准教授を含む 151 名の研究者が世界から選出され、本賞受賞に至りました。

2.8 明石 遼介 助教（常行研）

— 第 15 回（2021 年）日本物理学会若手奨励賞 —

常行研助教の明石遼介氏が、日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。明石氏は、近年発見された水素化物における高温超伝導現象について、シミュレーションに基づく理論研究を進めました。地球深部程度の超高圧のもとで硫化水素が転移温度 200 ケルビンの超伝導体となるという 2015 年の報告以来、水素化物が示す超伝導の機構解明を目指して研究が進められています。しかしこの現象は圧力セル内部でのみ観測されるものであり、使えるプローブは限られています。明石氏は結晶構造から超伝導転移温度の理論値を見積もる先端シミュレーション手法を用いて、硫化水素高圧相のさまざまな候補構造について転移温度を調べました。実験結果との比較から圧力セル内での結晶構造転移のプロセスを提唱、またその高い Tc をもたらす微視的機構を解明し、以後の研究に大きな影響を与えました。

2.9 大栗 真宗 助教（須藤研）

— 2020 年度（第 25 回）日本天文学会欧文研究報告論文賞 —

大栗氏は、Kavli IPMU の日影千秋氏（須藤研出身）とともに、すばる望遠鏡に搭載された Hyper Suprime-Cam を用いた弱い重力レンズ効果による宇宙論パラメータの高精度測定を主導した。この論文（Hikage, Oguri, *et al.*, “Cosmology from cosmic shear power spectra with Subaru Hyper Suprime Suprime-Cam first-year data”, PASJ, 71, 2019, 43）は、すばる HSC の威力を最大限活用したもので、観測的宇宙論研究に大きなインパクトを与えている。

2.10 江間 陽平 氏（諸井研、現 ドイツ電子シンクロトロン研究所）

— 第 15 回（2021 年）日本物理学会若手奨励賞 —

江間陽平氏が、第 15 回日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。江間氏は素粒子標準模型に含まれるヒッグス粒子がインフレーションを引き起こす模型（いわゆるヒッグスインフレーション模型）の理解に大きく貢献しました。特に、リッチスカラー 2 乗項が存在する場合の詳細な解析を行い、観測と無矛盾なインフレーションが実現可能であることを明らかにしました。さらに、ヒッグスインフレーション模型においてはリッチスカラー 2 乗項から生じるスカラー自由度がユニタリティーの回復に寄与し、模型がプランクスケール近くまで適用可能となることを明らかにしています。江間氏の行ったヒッグスインフレーション模型についての解析および彼が発見した紫外完備化の機構は、今後のインフレーション研究にとって重要な知見です。本受賞は江間氏の独創性が高く評価されたものであり、彼の今後の更なる活躍が期待されています。

2.11 齊藤 真彦 氏（浅井研、現 素粒子物理国際研究センター）

— 第 15 回（2021 年）日本物理学会若手奨励賞 —

宇宙を支配する暗黒物質が何なのか？ 多くの素粒子研究者が、超対称性粒子が暗黒物質であり、ウィーノ・ヒグシーノだと考えています。これらを LHC で探すには、数 cm から数 mm の非常に短い飛跡を同定しないといけなくて、これまで不可能だと思われていました。斎藤さんは、飛跡を同定する新しい手法を、数学と高度のプログラミング技術で開発し、世界最高エネルギー加速器 LHC を用いて、暗黒物質の探索を行いました。同時に、加速器のエネルギーが増強される (欧州の将来計画) と、超対称性暗黒物質を確実に発見できることを示しました。このことが評価され、日本物理学会若手奨励賞が与えられました。斎藤さんは、この数学とプログラミングの高い能力を活かして、現在、素粒子物理国際研究センターで、「科学をする AI」の開発を進めています。欧州の将来計画が実現する近い将来、斎藤君が開発した AI が、暗黒物質を発見するなんて SF な世界が実現しているかもしれないですね。

2.12 榎本 雄太郎 氏（安東研、現 大学院工学系研究科）

— 第 15 回（2021 年）日本物理学会若手奨励賞 —

榎本雄太郎氏が第 15 回日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。対象となったのは、 重力波望遠鏡におけるレーザー干渉計の動作点引き込み法についての一連の研究成果でした。レーザー干渉計型の重力波望遠鏡では、複数の自由度を同時に制御し、動作状態を実現する動作点引き込み（ロックアクイジション）と呼ばれる段階に大きな不確定性がありました。その中で榎本氏は、補助レーザー光を用いて段階的に干渉計を制御していく手法を提案し、岐阜県・神岡の地下サイトに建設された重力波望遠鏡 KAGRA（かぐら）で実証するとともに、現在検討が進められている次世代の重力波望遠鏡でもその手法が適用可能であることを示しました。重力波の観測運転にむけて実際に KAGRA を動作させ、国内の重力波研究分野を大きく前進させたのみならず、次世代の重力波望遠鏡に向けて、レーザー干渉計の制御動作状態への引き込みという重要課題を世界的にも初めて本格的に研究し、その可能性を示す意義のある研究でした。今後の更なる活躍が期待されています。

2.13 和田 有希 氏（馬場研、現 理化学研究所）

— 第 15 回（2021 年）日本物理学会若手奨励賞 —

馬場研元大学院生の和田有希さんが、第 15 回日本物理学会若手奨励賞（宇宙線・宇宙物理領域）を受賞されました。和田氏は、日本海沿岸に発生する冬季雷雲が雷現象に関連する高エネルギー現象の研究に最適であることに着目し、自ら可搬型検出器を設計・制作・展開しました。その結果、多くの雷放電・雷雲由来のガンマ線を地上で検出し、地球大気中の原子との相互作用による光核反応も発見しました。大気中でも粒子加速やそれに伴う高エネルギー光子放射が存在することを初めて定量的に示した素晴らしい結果であり、今後の益々の活躍が期待されます。

2.14 濱崎 立資 氏（上田研、現 理化学研究所）

— 第 15 回（2021 年）日本物理学会若手奨励賞 —

濱崎立資氏（理研白眉チームリーダー）が日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。研究内容は、「孤立および開放量子多体系における熱平衡化過程の研究」です。濱崎氏は、学位論文研究において、孤立系の熱化に関してフォン・ノイマンが最初に提唱した典型性というシナリオが、局所物理相互作用という現実の物理系で要請される仮定の下では成立しないことを数学的に証明しました。濱崎氏はこのほかにも非エルミート系のランダム行列理論など理論物理学の幅広い分野で活躍しています。理研白眉チームの若きリーダーとして、濱崎氏の益々のご活躍を期待しています。

2.15 平岩 徹也 氏（佐野研、現 シンガポール国立大学）

— 第 15 回（2021 年）日本物理学会若手奨励賞 —

元佐野研助教の平岩徹也氏が、日本物理学会（領域 12）若手奨励賞を受賞されました。平岩氏は、統計物理学、ソフトマター、生物物理学の境界領域で顕著な活躍をされ、特に生体組織や細胞、細胞骨格の動力学に関して優れた成果を上げてきました。多細胞生物の組織のダイナミクスに関してキラリティの破れに基づく機構を提案し、その数理モデルで実験事実を再現しました。また、アクチンミオシン細胞骨格で架橋が少なくなると分子モーターの収縮応力が消失する転移があることを定量的に明らかにしました。さらに、接触遊走阻害により細胞の遊走方向が自然に揃うことを発見し、走化性の実験結果を説明することに成功しました。いずれの研究成果も独創性が高く、かつ実験結果を説明可能な理論モデルを提案しており、分野に対するインパクトが極めて高いことが評価されました。

2.16 金川 和弘 氏（須藤研、現 茨城大学）

— 2020 年度（第 25 回）日本天文学会欧文研究報告論文賞 —

ALMA 望遠鏡は数多くの原始惑星系円盤のリング・ギャップ構造を直接撮像することに成功している。金川氏は、惑星重力によって形成されたギャップからそこに隠れている惑星の質量を推定するモデルを提案し、HL Tau 周囲の円盤の主要な 3 つのギャップ構造に存在する惑星の質量が 0.2∼1.4 木星質量であると推定した（Kanagawa *et al.*, “Mass constraint for a planet in a protoplanetary disk from the gap width”, PASJ, 68, 2016, 43）。この方法論は原始惑星系円盤と系外惑星系を関係付ける重要なものである。

2.17 阿部 智広 氏（濱口研、現 名古屋大学）

— 素粒子奨学会第 15 回中村誠太郎賞 —

阿部智広氏が素粒子奨学会 2020 年度（第 15 回）中村誠太郎賞を受賞しました。阿部氏の受賞論文は、宇宙暗黒物質の熱的残存量の計算において暗黒物質粒子が熱平衡に達しない場合の効果を調べたものです。通常、WIMP 暗黒物質の熱的残存量計算においては WIMP が熱平衡状態（kinetic equilibrium）にあると仮定しますが、WIMP の結合が弱い場合にはこの熱平衡の仮定は必ずしも成り立ちません。阿部氏はヒッグス粒子と結合するマヨラナフェルミオンを WIMP 暗黒物質とする模型においてボルツマン方程式を解いて残存量の精密な計算を行い、熱平衡からのずれの効果（early kinetic decoupling）が無視できないことを示しました。暗黒物質粒子の質量によっては、ヒッグス粒子の暗黒物質粒子対への崩壊幅が一桁大きくなることもあり、将来実験における検証に対するインパクトも高く評価されました。

2.18 八幡 和志 技術専門職員

— ICTSS 2020 Best Paper Award —

技術専門職員の八幡和志氏が International Conference on Technology and Social Science 2020 (ICTSS 2020) で Best Paper Award を受賞されました。この研究は、新型コロナウイルスによる感染症の蔓延により必要となった、学生実験授業を遠隔操作で行うための技術開発です。従来から進められていた、Society 5.0 対応型の実験授業の開発を応用し、広範なコンピューター、電子回路分野の汎用的な技術を組み合わせることで、実現されており、応用性の高い技術となっています。教育全般での利用が期待されることから、今回の受賞となりました。

2.19 川畑 幸平 氏（上田研）

— 第 15 回（2021 年）日本物理学会若手奨励賞 —

川畑幸平氏（D3）が日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。研究内容は、「非エルミート物理による対称性とトポロジー」です。川畑氏はまだ博士課程在学中ですが、大学院入学当初から非エルミート系の物理学に興味を持ち、多くの共同研究者と多方面にわたる研究をしてこられました。今回、その一部であるトポロジーと対称性に関する一連の研究が受賞対象となりました。心からお祝いを申し上げ、今後の益々のご活躍を期待したいと思います。

2.20 東京大学総長賞・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 2 年度東京大学総長賞・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。

- 東京大学総長賞　野口 亮 氏
- 理学系研究科研究奨励賞（博士課程）　野口 亮 氏、勝見 亮太 氏、竹中 彰 氏、廣澤 智紀 氏、玉光 未侑 氏、岩澤 諄一郎 氏

- 理学系研究科研究奨励賞（修士課程）　北山 圭亮 氏、田中 宏明 氏、長澤 俊作 氏、奥山 義隆 氏
- 理学部学修奨励賞　吉田 智治 氏、大賀 成朗 氏、洪 木子 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]

樺島 祥介	教授（知の物理）	R2/4/1	採用	東京工業大学
酒井 明人	講師	R2/4/1	採用	本学物性研究所
佐々木 健人	助教（小林研）	R2/4/1	採用	日本学術振興会特別研究員
上田 大輝	特任研究員（諸井研）	R2/4/1	採用	総合研究大学院大学
上道 雅仁	特任研究員（樋口研）	R2/4/1	採用	本専攻博士課程
中野 湧天	特任研究員（濱口研）	R2/4/1	採用	本専攻博士課程
見波 将	特任研究員（中辻研）	R2/4/1	採用	金沢大学
Chen Taishi	特任研究員（中辻研）	R2/4/1	配置換え	本学物性研究所
古薗 由里	事務補佐員（小形研）	R2/4/1	採用	
Liang Haozhao	准教授	R2/5/1	採用	理化学研究所
木下 慶美	特任研究員（樋口研）	R2/5/1	採用	本学生物科学専攻
堀之内 裕理	特任研究員（JSR 包括連携）	R2/5/1	採用	本専攻客員共同研究員
山口 奈央美	事務補佐員（中辻研）	R2/5/1	採用	
殷 文	特任研究員（諸井研）	R2/6/1	採用	Korea Advanced Institute of Science and Technology
江口 恭代	事務補佐員（JSR 包括連携）	R2/6/1	採用	
前田 幸子	事務補佐員（JSR 包括連携）	R2/6/1	採用	
倉田 正和	特任研究員（浅井研）	R2/7/1	採用	九州大学
中桐 洸太	助教（横山 (将) 研）	R2/8/1	採用	高エネルギー加速器研究機構
阿部 智広	特任研究員（濱口研）	R2/10/1	採用	名古屋大学
宮下 哲	特任研究員（トランス）	R2/10/1	採用	科学技術振興機構
辻 直人	准教授	R2/10/16	採用	理化学研究所
蘆田 祐人	准教授	R2/11/1	採用	本学工学系研究科
右田 美奈	一般職員	R2/11/1	採用	
髙橋 昂	助教（樺島研）	R2/11/16	採用	本学知の物理
天野 有紀	特任専門職員（村尾研）	R2/11/16	採用	
Chen Xianzhe	特任研究員（中辻研）	R2/12/1	採用	中国清華大学
Lama Hisay	特任研究員（竹内研）	R2/12/1	採用	IBS Center for Soft and Living Matter
姫岡 優介	助教（古澤研）	R3/1/1	採用	University of Copenhagen
山下 麻依	事務補佐員（JSR 包括連携）	R3/2/1	採用	
肥後 友也	特任准教授（社会連携講座）	R3/2/16	採用	本学物性研究所
清水 幸子	事務補佐員（トランス）	R3/3/1	採用	
清家 展子	事務補佐員（トランス）	R3/3/1	採用	

[物理学教室から移られた方々]

上道 雅仁	特任研究員（樋口研）	R2/5/31	辞職	本学総合文化研究科
齋藤 稔	助教（古澤研）	R2/7/31	辞職	自然科学研究機構
Liu Ziyin	技術補佐員（上田研）	R2/7/31	辞職	
藤田 篤	主任	R2/10/31	配置換え	本学化学専攻事務室
西岡 辰磨	助教（松尾研）	R2/12/31	辞職	京都大学
前田 幸子	事務補佐員（JSR 包括連携）	R2/12/31	辞職	
相原 博昭	教授	R3/3/31	定年退職	本学理事
高瀬 雄一	教授	R3/3/31	定年退職	Tokamak Energy Ltd
湯本 潤司	教授	R3/3/31	定年退職	本学特任教授
鈴木 隆敏	助教	R3/3/31	辞職	
阿部 智広	特任研究員（濱口研）	R3/3/31	辞職	東京理科大学
飯田 英明	特任研究員（福嶋研）	R3/3/31	辞職	
殷 文	特任研究員（諸井研）	R3/3/31	辞職	東北大学
上田 大輝	特任研究員（諸井研）	R3/3/31	辞職	北京大学
木下 慶美	特任研究員（樋口研）	R3/3/31	辞職	名古屋大学
倉田 正和	特任研究員（浅井研）	R3/3/31	辞職	高エネルギー加速器研究機構
Chen Taishi	特任研究員（中辻研）	R3/3/31	辞職	Southeast University
Chen Xianzhe	特任研究員（中辻研）	R3/3/31	辞職	日本学術振興会特別研究員
小澤 綾子	主任	R3/3/31	配置換え	本学教養学部教務課
山口 奈央美	事務補佐員（中辻研）	R3/3/31	辞職	

4 役務分担

【役務】	【教員】	【職員】
専攻長・学科長	常行	木暮、野澤、右田
幹事	樋口、吉田	
専攻主任	浅井	物理教務
専攻副主任	村尾	物理教務
常置委員	髙木、須藤	物理教務
教務	小形（理)、馬場（大学院)、 竹内（ガイダンス)、北川（学生相談）	物理教務
学生実験	安東、岡本、日下	佐伯、八幡
卓越大学院	浅井・安東（XPS)、山本・相原（FoPM)、 須藤（IGPEES)、長谷川・常行（MERIT）	物理教務、物理事務
【外国人学生・留学】		
優先配置	福嶋	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 留学生支援	吉田、横山 (順)	物理教務
留学	安東	物理教務
【駒場生進学】		
進学指導/推薦入試アドバイザー	小形、竹内	物理教務
駒場対策	教務担当者が兼務	物理教務
【奨学金・支援】		
奨学金		物理教務
博士課程学生支援制度	岡本	渡辺、右田
就職	長谷川、湯本	仁井田、野澤
部屋割	林	木暮
安全衛生	酒井 (広)	八幡
放射線	横山 (将)	物理事務
管理技術室	酒井 (広)（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 (広)、岡本（安全衛生・低温）	八幡
	藤堂（IT 関連）	南野
図書	諸井（理)、岡本、北川	総務課図書チーム
コロキウム	上田、島野、古澤	物理事務
年次報告	竹内、小林	仁井田、八幡
記録係		物理事務、物理教務
理交会	藤堂	木暮
親睦会	小林	レクリエーション委員
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
JSR-UT ハブ	中辻、湯本、常行	
緊急対応教職員	酒井 (広)、松尾	

5　教室談話会

- 2021 年 2 月 19 日 (金) 16:00–17:30
  高瀬 雄一 教授（最終講義）
  「核融合エネルギーの実現に向けて」
- 2021 年 3 月 10 日 (水) 10:30–12:00
  福山 寛 名誉教授（最終講義）
  「ヘリウムとグラファイトの狭間で」
- 2021 年 3 月 10 日 (水) 13:30–15:00
  湯本 潤司 教授（最終講義）
  「波長を操る —研究と社会を繋ぐ—」
- 2021 年 3 月 10 日 (水) 16:00–17:30
  相原 博昭 教授（最終講義）
  「第三世代の素粒子物理」

6　物理学教室コロキウム

- 第 111 回コロキウム　2020 年 5 月 1 日 (金) 17:00–18:30

  永長 直人 氏（東京大学工学系研究科物理工学専攻）

  「ダイナミクスにおける右と左: 固体における非相反現象」
  ※新型コロナウイルスの感染拡大を受け中止になりました。

- 第 112 回コロキウム　2020 年 5 月 22 日 (金) 17:00–18:30

  仏坂 健太 氏（東京大学ビッグバン宇宙国際研究センター）

  「重力波天文学のフロンティア」

- 第 113 回コロキウム　2020 年 6 月 12 日 (金) 17:00–18:30

  Smadar NAOZ 氏（UCLA 天文学科）

  「The Life and Death of Extrasolar Planets and their Freinds」
  ※新型コロナウイルスの感染拡大を受け中止になりました。

- 第 114 回コロキウム　2020 年 7 月 17 日 (金) 17:00–18:30

  小野 輝男 氏（京都大学化学研究所）

  「スピンオービトロニクス：電荷・スピン・軌道の 3 つの自由度が織りなす物理」
  ※新型コロナウイルスの感染拡大を受け中止になりました。

- 第 115 回コロキウム　2020 年 11 月 20 日 (金) 17:00–18:30

  高井 研 氏（海洋研究開発機構）

  「物理学大好き微生物学者の語る生命研究の理想と現実」

- 第 116 回コロキウム　2020 年 11 月 27 日 (金) 17:00–18:30

  日高 義将 氏（高エネルギー加速器研究機構）

  「対称性から見た世界 –南部理論からトポロジカル物質まで–」

- 第 117 回コロキウム　2021 年 1 月 8 日 (金) 17:00–18:30

  Qikun Xue 氏（南方科技大学）

  “Two-dimensional quantum land for future technology”

- 第 118 回コロキウム　2021 年 1 月 15 日 (金) 17:00–18:30

  Sriram Ramaswamy 氏（Indian Institute of Science,Bangalore）

  “A Journey Through Active Matter”

7　金曜ランチトーク

- 実施なし　※非公開ランチトークのみ

8　ニュートン・カフェ

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の流行により失われた、学生と教員、そして学生同士の交流を図るため、少人数の学部学生（主に 2 年生と 3 年生）を対象として、研究セミナー “ニュートン・カフェ” を 8 回にわたって開催した。実施にあたっては物理学科 3 年生のニュートン祭委員の協力を得た。

- 第 1 回 2020 年 12 月 2 日 (水) 18:00–19:30
  開催研究室：岡田研究室、安東研究室、濱口研究室
- 第 2 回 2020 年 12 月 9 日 (水) 18:00–19:30
  開催研究室：横山 (将) 研究室、吉田研究室
- 第 3 回 2020 年 12 月 23 日 (水) 18:00–19:30
  開催研究室：中辻研究室、辻研究室
- 第 4 回 2021 年 1 月 8 日 (金) 18:00–19:30
  開催研究室：小形研究室、日下研究室、竹内研究室
- 第 5 回 2021 年 1 月 27 日 (水) 18:00–19:30
  開催研究室：樺島研究室、小林研究室、濱口研究室
- 第 6 回 2021 年 2 月 5 日 (金) 18:00–19:30
  開催研究室：上田研究室、横山 (将) 研究室、吉田研究室、辻研究室
- 第 7 回 2021 年 2 月 17 日 (水) 18:00–19:30
  開催研究室：蘆田研究室、安東研究室、桂研究室、馬場研究室
- 第 8 回 2021 年 3 月 3 日 (水) 18:00–19:30
  開催研究室：島野研究室、須藤研究室、古澤研究室

年次研究報告　2020年度

2021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　　辻　　直人
　　小林研介
　　八幡和志
　　仁井田和子