ISSN 0910-0709

Department of Physics

School of Science

The University of Tokyo

Annual Report

2022

令和４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

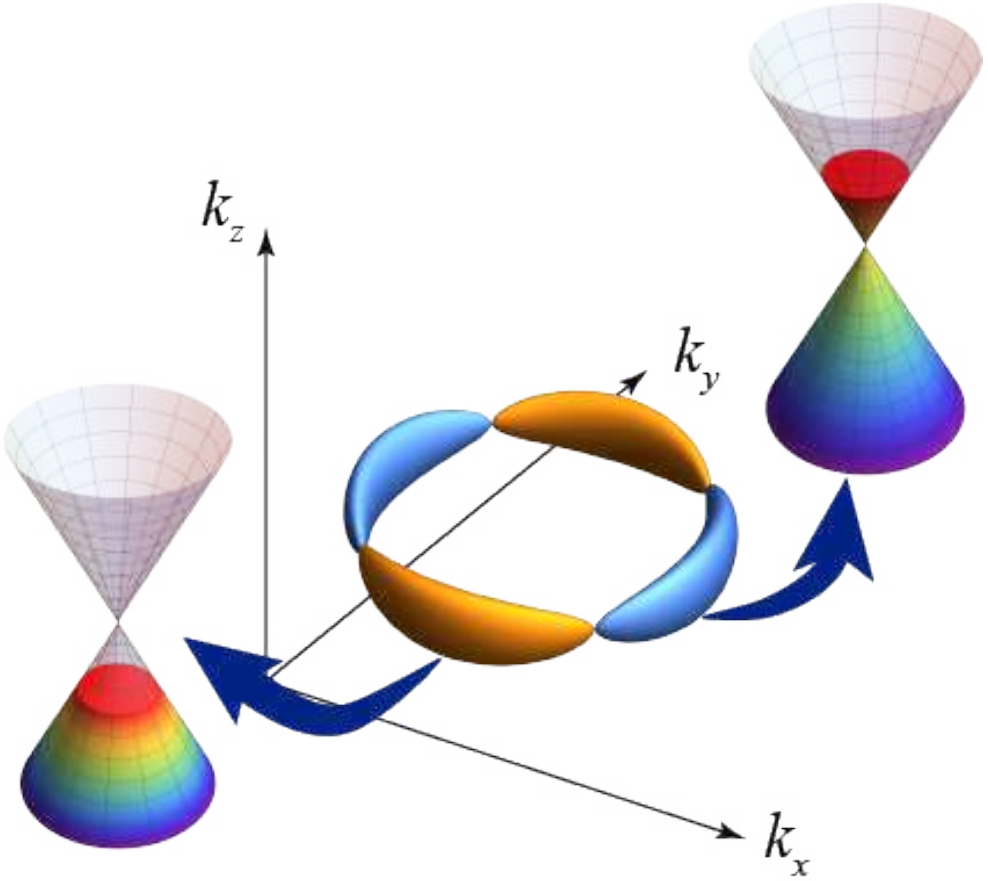

図 1: 擬 1 次元有機伝導体 HMTSF-TCNQ の電荷密度波（CDW）状態におけるフェルミ面の模式図。第一原理計算の結果から、この物質はギャップのないディラック電子系のノード（ディラックコーンの頂点）が波数空間で連続的に存在している状態、つまりノーダルライン半金属であることが明らかになった。さらにノードのエネルギーは波数空間内で少しだけ上下するために、下図のように波数空間内の位置によって電子のフェルミ面 (青い部分) とホールのフェルミ面 (橙の部分) が交互に出現する。電子とホールが共存するので半金属である。HMTSF-TCNQ の実験で見られる大きな軌道反磁性とその奇妙な温度依存性は、この特異なフェルミ面によって説明可能である。（尾崎壮駿ほか、小形研究室）

Schematic figure of the Fermi surface in the charge density wave (CDW) state of quasi-one dimensional organic conductor HMTSF-TCNQ. From the first-principles calculation, it is shown that this material has a ground state in which the nodes of gapless Dirac electron systems exist continuously in momentum space, or a nodal line semimetal. Furthermore, since the energy of the nodes changes slightly in the momentum space, the electron Fermi surface (blue part) and the hole Fermi surface (orange part) appear alternately depending on the position in the momentum space, as shown in the figure. It represents a semimetallic state because electrons and holes coexist. The large diamagnetism and its unconventional temperature dependence observed experimentally in HMTSF-TCNQ can be explained using this characteristic Fermi surface. (Soshun Ozaki et al, Ogata group)

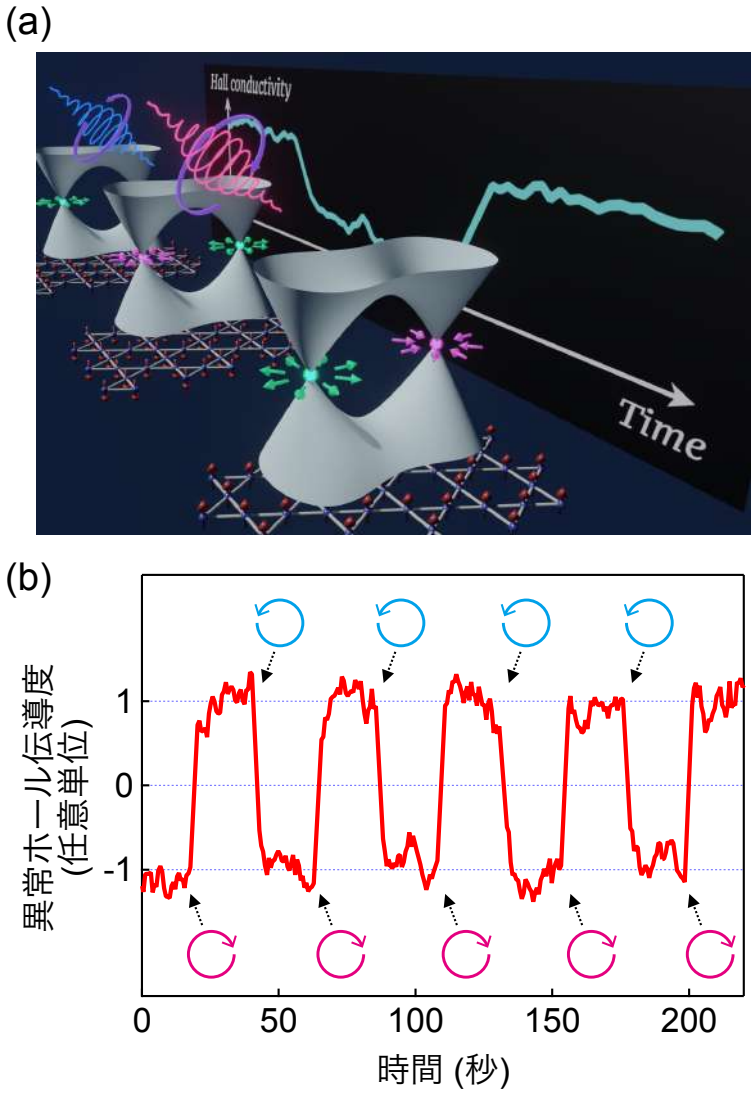

図 2: (a) カゴメ格子を有する $Co_3Sn_2S_2$ は、特徴的なバンド構造（図中グレーのコーン）に由来して物質中の電子が質量ゼロのワイル粒子として振る舞う、ワイル半金属の一種である。$Co_3Sn_2S_2$ に円偏光の光（青や赤の螺旋）を照射することで、この物質が持つ強磁性の磁化とワイル粒子のカイラリティ（右巻き：ピンク、左巻き：緑）を繰り返し自在に反転することに成功した。(b) 右回り円偏光 (ピンク)、左回り円偏光 (水色) を繰り返し照射した際の異常ホール伝導度の時間変化。円偏光のヘリシティを変えることで、ワイル粒子のカイラリティと対応する異常ホール伝導度の符号が繰り返し反転している。(島野研究室)

(a) $Co_3Sn_2S_2$, which has a kagome lattice, is a Weyl semimetal in which the electrons behave as massless Weyl particles due to the characteristic band structure (gray cones in the figure). By irradiating $Co_3Sn_2S_2$ with circularly polarized light (blue and red spirals), the ferromagnetic magnetization and the chirality of Weyl cones in this material (right-handed: pink, left-handed : Green) were successfully reversed repeatedly. (b) Time evolution of anomalous Hall conductivity under repeated irradiation with left-handed (light blue) and right-handed (pink) circularly polarized light, which shows repeated flips. (Shimano Group)

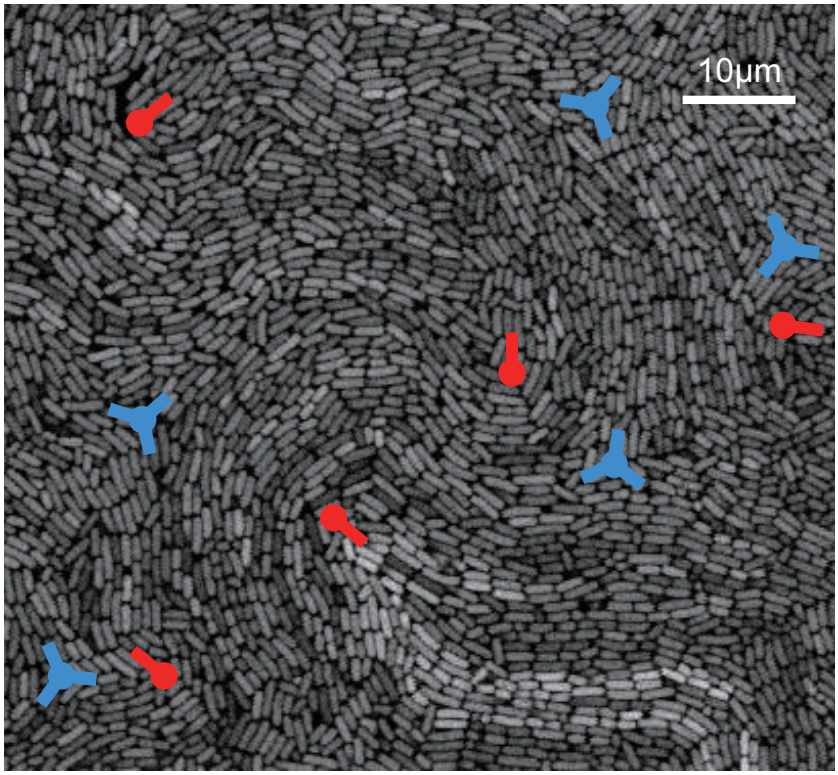

図 3: 大腸菌集団に生じる液晶的配向秩序とトポロジカル欠陥。トポロジカル欠陥の箇所に大腸菌が引き寄せられ、コロニーが局所的に隆起することが見出された。 従来知見では巻き数 $-1/2$ の欠陥からは細胞が逃避することが期待されていたが、本研究では $-1/2$ 欠陥にも細胞が引き寄せられていた。我々は、細胞が鉛直方向に傾くことで極性秩序が生じていることを発見し、それによる極性起因力によって $-1/2$ 欠陥への細胞流を説明することに成功した。T. Shimaya and K. A. Takeuchi, PNAS Nexus **1**, pgac269 (2022).（竹内研究室）
Liquid crystalline orientation order and topological defects in colonies of *Escherichia coli*. Topological defects were found to attract bacteria, increasing the local colony height at the locations of the defects. While existing theory predicted that cells should be repelled from defects of winding number $-1/2$, our experiments showed the opposite. We found that vertical tilting of cells led to the formation of polar order, and the force induced by this polarity turned out to be the key to account for the cell in-flux toward $-1/2$ defects. T. Shimaya and K. A. Takeuchi, PNAS Nexus **1**, pgac269 (2022). (Takeuchi 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 4 年度（2022 年 4 月–2023 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、中村哲氏（原子核物理学実験：東北大学）、助教として、高三和晃氏（辻研：ローレンス・バークレー国立研究所）、福田朝氏（諸井研：ローレンス・バークレー国立研究所）、横溝和樹氏（蘆田研：日本学術振興会特別研究員）、永尾翔氏（中村研：東北大学）、山崎隼汰氏（村尾研：IQOQI Vienna）、萩野浩一氏（馬場研：関東学院大学）が着任されました。また、明石遼介助教（常行研）が量子科学技術研究開発機構主任研究員として、大屋瑶子助教（山本研）が京都大学講師として、小高裕和助教（馬場研）が大阪大学准教授として、森田悠介助教（五神研）が本学フォトンサイエンス研究機構助教として転出されました。また、五神真教授、山本智教授が本年度定年を迎えられました。

本年度も教室関係者の活発な研究・教育活動の結果、多くの方が受賞されています。牧島一夫名誉教授が瑞宝中綬章を受章されました。また、辻直人准教授、酒井明人講師が令和 4 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞を、和田有希氏（馬場研、現大阪大学）、　石橋未央氏（中辻研）が第 39 回（2022 年度）井上研究奨励賞を、肥後友也氏（中辻研）が丸文研究奨励賞（令和 4 年度）を、仲里佑利奈氏（吉田研）が令和 4 年度学生表彰「東京大学総長賞」総長賞を受賞されました。さらに、田島裕之助教（Liang 研）、赤城裕助教（桂研）、吉川尚孝助教（島野研) 秋山進一郎氏（藤堂研）、野辺拓也氏（浅井研）、鈴木寛大氏（馬場研、現 甲南大学）が第 17 回（2023 年）日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。また、加藤勢氏、川田拓弥氏、髙久諒太氏、杉山素直氏が令和 4 年度理学系研究科研究奨励賞（博士課程）を、仲里佑利奈氏、吉田智治氏、小川和馬氏、直川史寛氏が同研究奨励賞（修士課程）を、佐々木大地氏、高波海斗氏、永島来悟氏が令和 4 年度理学部学修奨励賞を受賞しました。

これまで新型コロナウイルスの影響が続き、大学での活動にいろいろな制約がありましたが、令和 4 年度は学部や大学院の講義も物理学実験、物理学ゼミナール、特別実験・理論演習とともに、感染予防に極力注意しながら基本的に対面で行われました。また物理学科の学生が五月祭で行っている企画 PhysicsLab も対面で開催されました。一方、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開催されませんでした。その代わりに、前年度に引き続き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。また例年行われていた夏休み前のビアパーティーは開催されませんでしたが、その代わりに 10 月にアルコール・食事無しで学生と教員の交流会を開催しました。

令和 2 年度から始まった物理学教室と産業界との連携はますます発展しています。JSR 株式会社との包括連携に基づいた共同研究の基盤活動は、理学部 1 号館中央棟 3 階にオープンした協創オフィス「JSR・東京大学協創拠点 CURIE」を起点として、教室内の先生との交流を生み、複数の共同研究に繋がっています。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、一方 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ていきます。また、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」もこれまで何名もの学生に給付され、彼らの研究活動を支援しています。

また令和 3 年度から IBM 量子コンピューターの実機（ソフトウェア）を用いた量子ネイティブ人材育成を開始していますが、令和 4 年度からは浅野キャンパスに設置された IBM 量子コンピューターの実機に触れる教育内容に拡充して行っています。

令和 4 年 10 月に、サスティナブル量子 AI 研究拠点が、JST 共創の場形成支援プログラム (COI-NEXT) の政策重点分野 (量子技術分野) に採択されました。これは、東京大学・慶應大学・理化学研究所・OIST・シカゴ大学をはじめ川崎市や多数の参画企業が一体となり研究開発を進めるもので、量子機械学習・量子シミュレーション・量子計測デバイスを結合した量子 AI 技術を創出、量子 HPC 基盤の構築を目指しています。

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、樺島祥介教授、蘆田祐人准教授、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。

2023 年 5 月 1 日
物理学専攻 専攻長・物理学科 学科長
小形 正男

目 次

I 研究室別 2022 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 . . . 4
1.3 素粒子論研究室 . . . 9
1.3.1 現象論 . . . 9
1.3.2 弦理論，場の理論全般 . . . 10

2 原子核・素粒子実験 **15**
2.1 原子核実験グループ (中村研究室) . . . 15
2.1.1 JLab における Λ ハイパー核電磁生成分光実験 . . . 15
2.1.2 MAMI における崩壊 π^- 中間子分光 . . . 16
2.1.3 ELPH におけるハイパー核研究 . . . 17
2.1.4 J-PARC における次世代ハイパー核分光実験 . . . 18
2.1.5 異分野融合研究 . . . 18
2.2 横山（将）・中島研究室 . . . 20
2.2.1 加速器による長基線ニュートリノ振動実験（T2K 実験） . . . 20
2.2.2 スーパーカミオカンデ実験 . . . 21
2.2.3 ハイパーカミオカンデ計画 . . . 21
2.2.4 新検出器開発 . . . 22
2.3 浅井研究室 . . . 24
2.3.1 LHC・ATLAS 実験での研究 . . . 24
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 . . . 25
2.3.3 基礎科学への応用を目指した量子技術研究 . . . 27

3 物性理論 **30**
3.1 小形研究室 . . . 30
3.1.1 ディラック電子系 . . . 30
3.1.2 熱応答・熱電応答の理論 . . . 30
3.1.3 超伝導の理論 . . . 31
3.1.4 軌道磁場効果 . . . 31
3.1.5 有機伝導体の理論 . . . 32
3.1.6 カイラリティの物理 . . . 32
3.2 常行研究室 . . . 36
3.2.1 THz 領域の複素誘電率計算手法の開発 . . . 36
3.2.2 非熱的レーザー加工の機構解明とシミュレータの開発 . . . 36
3.2.3 データ同化構造探索手法の開発 . . . 37
3.2.4 進化的アルゴリズムによる構造探索 . . . 37
3.2.5 水素化物ペロブスカイトの超伝導 . . . 38
3.2.6 相関波動関数を用いた電子状態計算手法の開発 . . . 38
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 強相関多体系における新奇な状態・相転移現象 . . . 42
3.3.3 量子計算と量子アルゴリズム . . . 42
3.3.4 統計的機械学習と物質科学 . . . 43
3.3.5 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 . . . 43
3.4 桂研究室 . . . 46
3.4.1 強相関系・トポロジカル系 . . . 46
3.4.2 散逸のある量子多体系 . . . 47
3.4.3 数理物理学・統計力学 . . . 47
3.4.4 その他 . . . 48
3.5 樺島研究室 . . . 52
3.5.1 スパース推定 . . . 52
3.5.2 組み合わせ最適化問題 . . . 52
3.5.3 統計的学習理論 . . . 53
3.5.4 拡散モデルに基づく圧縮センシング . . . 54
3.6 辻研究室 . . . 55
3.6.1 超伝導体のダイナミクス . . . 55
3.6.2 量子開放系のダイナミクス . . . 56
3.6.3 直流電場・電流が誘起する量子相 . . . 56
3.6.4 量子多体系の非線形応答 . . . 57
3.6.5 トポロジカル相のダイナミクス . . . 57
3.7 蘆田研究室 . . . 59
3.7.1 開放系・非エルミート物理 . . . 59
3.7.2 強結合量子光-物質系の物理 . . . 59
3.7.3 統計物理・機械学習 . . . 60
3.7.4 その他 . . . 60

4 物性実験 62
4.1 長谷川研究室 . . . 62
4.1.1 表面/界面での輸送・磁性特性 . . . 62
4.1.2 表面・原子層ナノ構造の形成 . . . 64
4.1.3 新しい装置・手法の開発 . . . 64
4.2 岡本 研究室 . . . 67
4.2.1 劈開表面に形成された２次元電子系 . . . 67
4.2.2 金属超薄膜の超伝導 . . . 67
4.2.3 ビスマス超薄膜の電気伝導 . . . 69
4.3 島野研究室 . . . 70
4.3.1 超伝導体 . . . 70
4.3.2 原子層物質 . . . 72
4.3.3 ディラック、ワイル半金属 . . . 72
4.4 高木・北川研究室 . . . 76
4.4.1 スピン軌道相互作用を利用した擬スピン量子相 . . . 76
4.4.2 高圧物性研究 . . . 77
4.5 林研究室 . . . 80
4.5.1 スピン流物性 . . . 80
4.5.2 界面スピン軌道相互作用とカイラル磁性 . . . 80
4.5.3 強結合量子 . . . 81
4.6 小林研究室 . . . 83
4.6.1 色中心における量子制御 . . . 83
4.6.2 量子センサの物性計測応用 . . . 84

4.6.3 メゾスコピック系における量子輸送 . . . 86
4.7 中辻・酒井研究室 . . . 89
4.7.1 トポロジカル磁性体における新規量子現象の探索と巨大応答 . . . 89
4.7.2 多体系における量子エンタングルメント状態 . . . 91

5 一般物理理論 94
5.1 宇宙理論研究室 (須藤・吉田) . . . 94
5.1.1 観測的宇宙論 . . . 94
5.1.2 宇宙の構造形成 . . . 94
5.1.3 ブラックホール 3 体系 . . . 95
5.1.4 高エネルギー天体現象 . . . 95
5.1.5 星・惑星系の形成と進化 . . . 95
5.1.6 系外惑星 . . . 96
5.1.7 量子計算 . . . 96
5.2 村尾研究室 . . . 100
5.2.1 量子機械学習・量子学習 . . . 100
5.2.2 分散型量子情報処理アルゴリズム . . . 101
5.2.3 高階量子演算 . . . 101
5.2.4 量子エラー訂正 . . . 102
5.2.5 量子熱力学と量子リソース理論 . . . 103
5.3 上田研究室 . . . 105
5.3.1 冷却原子気体・非平衡開放系 . . . 105
5.3.2 量子論・統計力学と情報理論・人工知能の融合 . . . 106
5.4 横山 (順) 研究室 . . . 109
5.4.1 宇宙論: 時空構造 . . . 109
5.4.2 宇宙論: 物質の起源と進化 . . . 109
5.4.3 重力波検出器 KAGRA データ解析 . . . 110
5.4.4 時間領域天文学 . . . 111

6 一般物理実験 115
6.1 江尻研究室 . . . 115
6.1.1 TST-2 実験の概要 . . . 115
6.1.2 低域混成波によるトカマクプラズマの非誘導生成 . . . 115
6.1.3 高速電子に起因する内部励起波動の観測 . . . 117
6.1.4 電子サイクロトロン波補助オーミック立ち上げ . . . 117
6.1.5 計測器開発 . . . 117
6.1.6 共同研究 . . . 118
6.2 山本研究室 . . . 120
6.2.1 はじめに . . . 121
6.2.2 星・惑星系形成 . . . 121
6.2.3 観測成果 . . . 122
6.2.4 研究室を閉じるにあたって . . . 122
6.3 酒井広文 研究室 . . . 125
6.3.1 レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展 . . . 125
6.3.2 最近の進展 . . . 126
6.3.3 マクロな 3 回対称性をもつ分子アンサンブルの生成 . . . 128
6.3.4 PAL-XFEL 施設の軟 X 線自由電子レーザーを用いた光電子角度分布の計測 . . . 128
6.3.5 その他 . . . 129
6.4 五神 研究室 . . . 130
6.4.1 物質系の巨視的量子現象の探索 . . . 130
6.4.2 フェムト秒レーザー加工穴径の定量的予測を可能にするシミュレーション手法の開発 132

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 . . . 133
6.4.4 フォトンサイエンス研究機構 . . . 133
6.5 安東研究室 . . . 134
6.5.1 重力波望遠鏡 KAGRA . . . 135
6.5.2 宇宙空間重力波望遠鏡 . . . 135
6.5.3 ねじれ型重力波検出器 TOBA . . . 136
6.5.4 アクシオンダークマター探索 . . . 137
6.5.5 相対論・量子光学実験 . . . 137
6.6 馬場研究室 . . . 140
6.6.1 宇宙物理現象観測に関する研究 . . . 140
6.6.2 将来宇宙計画に関する開発 . . . 142
6.6.3 GRAMS 計画 . . . 142
6.6.4 cipher 計画 . . . 142
6.7 日下研究室 . . . 146
6.7.1 POLARBEAR 実験 . . . 147
6.7.2 Simons Array 実験 . . . 147
6.7.3 Simons Observatory 実験 . . . 147
6.7.4 次世代 CMB 実験用 装置開発 . . . 148
6.7.5 マグノンを用いたアクシオン探索 . . . 148
6.8 竹内研究室 . . . 150
6.8.1 ソフトマター系の非平衡実験 . . . 151
6.8.2 微生物系の非平衡実験 . . . 152
6.8.3 非線形動力学によるアプローチ . . . 153
6.9 三尾研究室 . . . 156
6.9.1 レーザー加工の物理 . . . 156
6.9.2 KAGRA project . . . 157

7 生物物理 159
7.1 能瀬研究室 . . . 159
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 . . . 159
7.1.2 運動出力ダイナミクスの定量的解析 . . . 160
7.1.3 行動制御回路を構成する神経細胞の同定と機能解析 . . . 161
7.1.4 機能的神経回路の発生と進化 . . . 162
7.2 樋口研究室 . . . 164
7.2.1 はじめに . . . 164
7.2.2 弱体化した細胞における細胞内小胞拡散の定量 . . . 165
7.2.3 低温から培養温度に至る過程における細胞の形態や発生力の変化 . . . 165
7.2.4 精子鞭毛振動のメカニズム解明 . . . 165
7.2.5 鞭毛振動運動を再現できる最小モデルシステムの構築 . . . 166
7.3 岡田研究室 . . . 167
7.3.1 ナノ流路を用いたタンパク質動態計測 . . . 167
7.3.2 耐光性蛍光タンパク質 StayGold . . . 167
7.3.3 超解像蛍光顕微鏡の生物学研究への応用 . . . 168
7.4 古澤研究室 . . . 171
7.4.1 環境応答に基づく表現型進化の予測 . . . 171
7.4.2 選択圧にフィードバック制御をかけた進化実験による進化能の定量 . . . 171
7.4.3 代謝モデルを用いた共生進化過程の解析 . . . 171
7.4.4 数理モデルを用いた無細胞翻訳系の最適化 . . . 171
7.4.5 代謝動力学モデルにおける恒常性の乱れ . . . 172
7.4.6 実験室進化における遺伝子の配列進化速度と発現量の逆相関 . . . 172

7.4.7 長期定常期の大腸菌の遺伝子発現状態の推定 . . . 173

8 技術部門 176
8.1 実験装置試作室 . . . 176
8.1.1 利用状況 . . . 176
8.1.2 設計・加工の自動化の推進 . . . 176
8.2 技術室 . . . 176
8.2.1 学生実験 . . . 176
8.2.2 各種委員会 . . . 176

II Summary of group activities in 2022 177
1 Fukushima Group . . . 178
2 Liang Group . . . 178
3 High Energy Physics Theory Group . . . 179
4 Nakamura Group . . . 180
5 Yokoyama(M)-Nakajima Group . . . 181
6 Asai group . . . 182
7 Ogata Group . . . 183
8 Tsuneyuki Group . . . 184
9 Todo Group . . . 184
10 Katsura Group . . . 185
11 Kabashima Group . . . 186
12 Tsuji Group . . . 187
13 Ashida Group . . . 188
14 Hasegawa Group . . . 188
15 Okamoto Group . . . 189
16 Shimano Group . . . 190
17 Takagi-Kitagawa Group . . . 191
18 Hayashi Group . . . 192
19 Kobayashi Group . . . 193
20 Nakatsuji-Sakai Group . . . 194
21 Theoretical Astrophysics Group . . . 196
22 Murao Group . . . 199
23 Ueda Group . . . 200
24 Yokoyama (J) Group . . . 201
25 Ejiri Group . . . 202
26 Yamamoto Group . . . 204
27 Sakai (Hirofumi) Group . . . 205
28 Gonokami Group . . . 206
29 Ando Group . . . 207
30 Bamba Group . . . 208
31 Kusaka Group . . . 209
32 Takeuchi Group . . . 210
33 Mio Group . . . 211
34 Nose Group . . . 212
35 Higuchi Group . . . 213
35.1 Oscillation by the minimum model system of flagella . . . 214
35.2 Quantitative evaluation of intracellular vesicle diffusion in weakened cells. . . . 214
36 Okada Group . . . 215
37 Furusawa Group . . . 215

III 2022 年度 物理学教室全般に関する報告 217

1 学部講義概要 218
1.1 2 年生 A セメスター . . . 218
1.1.1 電磁気学 I : 横山 将志 . . . 218
1.1.2 解析力学 : 常行 真司 . . . 218
1.1.3 量子力学 I : 日下 暁人 . . . 219
1.1.4 物理実験学 : 安東 正樹, 中島 康博 . . . 220
1.1.5 物理学演習 II : 常行 真司, 日下 暁人, 鎌田 耕平, 松浦 弘泰 . . . 220
1.1.6 物理数学 I : 濱口 幸一 . . . 221
1.1.7 物理数学 II : 辻 直人 . . . 221
1.1.8 物理学演習 I : 横山 将志, 濱口 幸一, 辻 直人, 永田 夏海, 高三 和晃 . . . 222
1.1.9 物理学のための科学英語基礎 : 小野 義正 . . . 223
1.2 3 年生 S セメスター . . . 224
1.2.1 電磁気学 II : 島野 亮 . . . 224
1.2.2 物理学実験 I: 全実験担当教員 . . . 224
1.2.3 量子力学 II : 福嶋 健二 . . . 224
1.2.4 物理学演習 III : 福嶋 健二, 島野 亮, 中川 大也, 田島 裕之 . . . 225
1.2.5 現代実験物理学 I : 江尻 晶, 酒井 明人 . . . 225
1.2.6 計算機実験 I : 藤堂 眞治, 高橋 昂, 藤澤幸太郎 . . . 226
1.2.7 量子コンピューター実習 : 浅井 祥仁, 寺師 弘二 . . . 226
1.2.8 統計力学 I : 小林 研介 . . . 227
1.2.9 流体力学 : 吉田 直紀 . . . 228
1.2.10 物理学演習 IV: 小林 研介, 竹内 一将, 赤城 裕, 諏訪 秀麿 . . . 228
1.3 3 年生 A セメスター . . . 230
1.3.1 物理学実験 II: 全実験担当教員 . . . 230
1.3.2 光学 : 井手口 拓郎, 三尾 典克 . . . 230
1.3.3 量子力学 III : 諸井 健夫 . . . 230
1.3.4 現代実験物理学 II : 安東 正樹, 中島 康博 . . . 231
1.3.5 物理学演習 V : 諸井 健夫, 竹内 一将, 浅井 祥仁, 大森 寛太郎, 山本 新 . . . 231
1.3.6 生物物理学 : 樋口 秀男, 岡田 康志 . . . 232
1.3.7 物理数学 III : 小形 正男 . . . 232
1.3.8 固体物理学 I : 林 将光 . . . 232
1.3.9 電磁気学 III : 浅井 祥仁 . . . 233
1.3.10 統計力学 II : 竹内 一将 . . . 233
1.3.11 計算機実験 II : 藤堂 眞治, 高橋 昂, 藤澤 幸太郎 . . . 234
1.4 4 年生 S セメスター . . . 235
1.4.1 機械学習概論 : 樺島 祥介 . . . 235
1.4.2 場の量子論 I : 松尾 泰 . . . 235
1.4.3 サブアトミック物理学 : 中村 哲 . . . 235
1.4.4 計算科学概論 : 6 名によるオムニバス講義・実習 . . . 236
1.4.5 統計力学特論 : 押川 正毅 . . . 236
1.4.6 現代物理学入門 : 蘆田 祐人, 中村 哲 . . . 236
1.4.7 一般相対論 : 横山 順一 . . . 236
1.4.8 系外惑星 : 相川 祐理, 河原 創 . . . 237
1.4.9 量子光学 : 酒井 広文 . . . 238
1.4.10 固体物理学 II : 中辻 知 . . . 238
1.4.11 プラズマ物理学 : 江尻 晶 . . . 239
1.4.12 宇宙物理学 : 馬場 彩 . . . 240
1.4.13 生物物理学特論 II : 能瀬 聡直, 酒井 邦嘉, 新井 宗仁 . . . 240

1.4.14 化学物理学：高木 英典 . . . 240
1.5 4 年生 A セメスター . . . 241
1.5.1 素粒子物理学：田中 純一, 大谷 航 . . . 241
1.5.2 場の量子論 II：伊部 昌宏 . . . 241
1.5.3 原子核物理学：Haozhao Liang . . . 242
1.5.4 現代物理と機械学習：蘆田 祐人 . . . 242
1.5.5 電子回路論：北川 健太郎 . . . 243
1.5.6 固体物理学 III：酒井 明人 . . . 243
1.5.7 非平衡科学：伊藤 創祐 . . . 243
1.5.8 普遍性生物学：古澤 力 . . . 244
1.5.9 重力波物理学：Kipp Cannon, 都丸 隆行 . . . 244
1.5.10 物理学のための科学英語特論：小野 義正 . . . 245

2 各賞受賞者紹介 246
2.1 牧島 一夫 名誉教授 . . . 246
2.2 辻 直人 准教授 . . . 246
2.3 肥後 友也 特任准教授 . . . 246
2.4 酒井 明人 講師 . . . 247
2.5 和田 有希 氏（馬場研、現大阪大学大学院工学研究科） . . . 247
2.6 赤城 裕 助教（桂研） . . . 247
2.7 秋山 進一郎 特任助教（藤堂研） . . . 248
2.8 田島 裕之 助教（Liang 研） . . . 248
2.9 野辺 拓也 特任助教（浅井研） . . . 248
2.10 吉川 尚孝 助教（島野研） . . . 249
2.11 石橋 未央 氏（中辻研） . . . 249
2.12 鈴木 寛大 氏（馬場研、現甲南大学） . . . 249
2.13 仲里 佑利奈 氏（吉田研） . . . 250
2.14 理学系研究科研究奨励賞・理学部学修奨励賞 . . . 250

3 人事異動 251

4 役務分担 253

5 教室談話会 254

6 物理学教室コロキウム 255

7 金曜ランチトーク 256

8 ニュートン・カフェ 258

I

研究室別 2022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、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、カイラル量子異常、中性子星深部の状態方程式の計算など、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。

回転を用いた閉じ込め問題への新しいアプローチの開発

福嶋、Chen、嶋田は回転するグルーオン物質の性質を摂動計算によって解析し、虚数の角速度で回転する高温物質が閉じ込めの性質を持つことを発見した。さらに回転する物質の低温での性質も、現在考えられている閉じ込めのメカニズムを用いて予想し、角速度を軸とする QCD 相図を提唱した。その結果、本研究が発見した新奇な高温閉じ込め相が、よく知られた低温・低密度の閉じ込め相（ハドロン相）と連続することが示唆され、回転を用いて閉じ込め問題にアプローチできることが見出された。また実数角速度で回転する物質の非閉じ込めの性質についても解析し、相転移温度の角速度依存性について推測した。本研究は Physical Review Letters の Editors' Suggestion に選ばれた [1]。

中性子星内部の高密度物質のトレース量子異常の研究

福嶋は中性子星からの観測データ解析に基づき、高密度物質中におけるトレース量子異常の大きさを推定した。その結果、中性子星の内部では従来考えられていたよりも低い密度で、まだ結合定数が小さくないにもかかわらず、近似的にスケール不変な物質状態が実現していることを見出した。またスケール不変性の急速な回復によって音速にピークが立つメカニズムを提唱した [2]。

クォーク物質へのクロスオーバー転移シナリオによる中性子星合体の重力波解析

福嶋は現代的な QCD 相転移の知見にコンシステントとなる「クロスオーバー転移」によって原子核物質がクォーク物質へと融けるシナリオに沿って、中性子星内部の高密度物質の状態方程式を構築する新しい方法を提案した。このようにして作られた状態方程式は摂動 QCD による理論計算へと漸近する性質を満たしている。摂動 QCD 領域は状態方程式がソフトになるため、逆に状態方程式のソフト化こそがクォーク物質発現の指標になり得ることを指摘し、その実証のために、重力波シミュレーションによって実際に、中性子星合体以後に放出される重力波のパターンに特徴的な振る舞いが見えることを報告した [3]。

時刻をパラメータとする非平衡相転移

平衡系に比べて非平衡系における相転移現象は理論的な取り扱いが難しく、特に量子系の場合は近似に頼らない計算手法は限られる。本研究では、特定のスピン模型では非平衡状態であっても量子モンテカルロ法を用いた第一原理計算が可能であることを示した [5]。さらに、このスピン模型の時間発展の数値的シミュレーションを実行し、時間経過によって常磁性相から強磁性相へ相転移することを示した。今回確認された相転移は、時刻をパラメータとした特異性を持つ新奇な非平衡相転移である。言うなれば、平衡系における 2 次相転移の臨界温度を「臨界時刻」に置き換えた非平衡 2 次相転移である。

量子コンピュータを用いた核子多体系の格子ゲージ理論計算の性能評価

原子核物理学における核子多体系の計算は格子ゲージ理論の究極の目標である。核子多体系の計算では核子数が増えると急激に計算コストが増大することが知られており、現在の古典コンピュータを用いた計算では核子数 3、4 個程度が限界である。本研究では、古典コンピュータと量子コンピュータの計算コストが核子数に対してそれぞれどのようにスケールするか (計算複雑性) を議論した。研究の結果、古典コンピュータでは指数関数的に計算コストが増大するのに対して量子コンピュータでは多項式的な増大しかしないことがわかり、将来的には量子コンピュータによる計算の方が高速になる可能性が示された。

汎関数繰り込み群による θ 真空の研究

福嶋、島崎らは θ 真空への汎関数繰り込み群の適用可能性について研究した。汎関数繰り込み群は微分方程式に基づく量子論の (原理的には) 厳密な定式化である。近似のない厳密な定式化であるにもかかわらず、トポロジーのような大局的な性質を扱うためには、元の理論の定義されている多様体を変形する必要があることを議論した。そして θ 真空のエネルギースペクトルの完全な再現、特に $\theta = \pi$ における基底状態の縮退を正しく導くためには、非局所性を含む解空間で微分方程式を解かねばならないことを明らかにした。また θ 項の存在に代表されるような「符号問題」をもつ系に対しては、有効作用が一意に定義できるとは限らないことも指摘した [8, 23]。

Solitonic symmetry beyond homotopy groups

Topological solitons are non-perturbative excitations often existing in quantum field theories. Their conservation law has a topological origin and is believed to be described by homotopy groups. We challenged this doctrine by carefully studying the creation/annihilation operators for topological solitons and uncovered a far more sophisticated conservation law. We found that the solitonic symmetry is in general a non-invertible generalized symmetry and its invertible part is not determined by homotopy groups but by some generalized homologies [6]. This discovery also brought new insights into our understanding of generalized symmetry.

＜報文＞

(原著論文)

[1] S. Chen, K. Fukushima, Y. Shimada, "Perturbative Confinement in Thermal Yang-Mills Theories Induced by Imaginary Angular Velocity", Phys. Rev. Lett. **129**, 242002 (2022).

[2] Y. Fujimoto, K. Fukushima, L.D. McLerran, M. Praszalowicz, "Trace Anomaly as Signature of Conformality in Neutron Stars", Phys. Rev. Lett. **129**, 252702 (2022).

[3] Y. Fujimoto, K. Fukushima, K. Hotokezaka, K. Kyutoku, "Gravitational Wave Signal for Quark Matter with Realistic Phase Transition", Phys. Rev. Lett. **130**, 091404 (2023).

[4] F. Gross, E. Klempt, K. Fukushima, *et al.*, "50 Years of Quantum Chromodynamics", e-Print: 2212.11107 [hep-ph], invited volume for the EJPC.

[5] T. Hayata, Y. Hidaka, A. Yamamoto, "Dissipation-induced dynamical phase transition in postselected quantum trajectories", PTEP **2022**, 023I02 (2023).

[6] S. Chen, Y. Tanizaki, "Solitonic symmetry beyond homotopy: invertibility from bordism and non-invertibility from TQFT", e-Print: 2210.13780 [hep-th].

(会議抄録)

[7] K. Fukushima, "Gravitational Waves Probing Quark Matter Crossover", Acta Phys. Polon. Supp. 16, 100 (2023).

(学位論文)

[8] 島崎拓哉, "Difficulty in the functional renormalization group for the θ vacuum and an attempt toward the resolution", 博士論文, 2023

[9] 大沼勝弥, "Application of Tensor Networks to (1+1)-Dimensional SU(2) Lattice Gauge Theory at Finite Density", 修士論文, 2023.

[10] 嶋田侑祐, "Phase structure of hot QCD matter under rotation with complex angular velocity", 修士論文, 2023.

(国際会議)

一般講演

[11] K. Fukushima, "Gravitational Waves Probing Quark Matter Crossover", 29th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2022), Kraków, Poland, April 6, 2022 (online).

[12] K. Fukushima, "Crossover toward Quark Matter in Neutron Stars", XVth Quark Confinement and the Hadron Spectrum, University of Stavanger, Norway, August 2, 2022.

[13] Shi Chen, "Solitonic symmetry beyond homotopy: invertibility from bordism and non-invertibility from TQFT", KEK Theory Workshop 2022, Online, Dec. 7-9, 2022.

招待講演

[14] K. Fukushima, "Roundtable Discussions on Neutron Stars", XVth Quark Confinement and the Hadron Spectrum, University of Stavanger, Norway, August 2, 2022.

[15] K. Fukushima, "Chiral Anomaly and the Interpretation with Spacetime Dependent Electromagnetic Fields", Workshop on Electromagnetic Effects in Strongly Interacting Matter, Sao Paulo, Brazil, Oct. 27, 2022.

[16] K. Fukushima, "Confinement induced by imaginary angular velocity and a conjectured phase diagram", QCD and Gauge/Gravity Duality, Pohang (APCTP), Korea, Nov. 7, 2022.

[17] K. Fukushima, "A Possibility of Twisted Gauge Backgrounds and Chirality Production in the Heavy-Ion Collision", Chirality, Vorticity and Magnetic Field in Heavy Ion Collisions, UCLA, USA, Dec. 3, 2022.

[18] K. Fukushima, "Electric Conductivity and Chiral Anomaly – perturbative and holographic perspectives", Holographic perspectives on chiral transport, Trento (ect*), Italy, March 13, 2023.

(国内会議)

一般講演

[19] 大沼勝弥, 福嶋健二, 山本新, "Inhomogeneous phases in finite-density Schwinger model with tensor networks", 日本物理学会, 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月 6-8 日.

[20] 嶋田侑祐, Shi Chen, 福嶋健二, "Confinement and deconfinement in a hot gluonic system with real/imaginary rotation", 日本物理学会, 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月 6-8 日.

招待講演

[21] 山本新, "変分法", 場の理論の新しい計算方法 2022, 京都大学基礎物理学研究所, 2022 年 9 月 12-13 日.

[22] 福嶋健二, "回転するハドロン物質の諸問題", 市村宗武先生追悼講演会, 学士会館, 2022 年 10 月 9 日.

(セミナー)

[23] T. Shimazaki, "Exploring the θ-vacuum structure in the functional renormalization group approach", University of Southampton, United Kingdom (online), May 6, 2022.

[24] K. Fukushima, "Continuity or discontinuity between nuclear and quark matter, and the astrophysical implication", Hadron Ion Tea at LBL, May 10, 2022.

[25] 山本新, "Quantum sampling for the Euclidean path integral of lattice gauge theory", 京都大学, 2022 年 5 月 11 日.

[26] 山本新, "経路積分の量子計算", 立教大学, 2022 年 6 月 28 日.

[27] K. Fukushima, "Reality of crossover and duality toward quark matter and the gravitational wave signals", QCD Theory Seminars online, July 4, 2022.

[28] Shi Chen, "Topological symmetry beyond homotopy groups in 4D CP^1 sigma model", 東京大学, 2022 年 10 月 21 日

[29] 山本新, "Lattice gauge theory in curved spacetimes", 理化学研究所, 2022 年 12 月 15 日.

[30] Shi Chen, "Solitonic symmetry beyond homotopy groups", Yanqi Lake Beijing Institute of Mathematical Sciences and Applications (BIMSA), China, 2023 年 1 月 11 日

[31] Shi Chen, "Solitonic symmetry beyond homotopy groups", QCD Theory Seminars, 2023 年 3 月 20 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. To this end, a cold atomic gas can be regarded as an ideal testing ground for many-body theories because of its controllability. In this regard, we are also interested in investigating novel many-body phenomena and developing quantum many-body theories through the comparisons with cold-atom experiments.

Charge symmetry breaking force in nuclear DFT

Theoretical determination of the nuclear energy density functional (EDF) is one of the important topics in nuclear DFT. These days, the charge symmetry breaking (CSB) force, a part of the isospin symmetry breaking terms in the nuclear force, has been highlighted in nuclear DFT. Recently, Naito, Liang, and collaborators found that the CSB part of the nuclear interaction may affect the estimation of the density dependence of the symmetry energy L by using the difference of the charge radii of mirror nuclei in 10 MeV. They have also performed a systematic study of effects of the isospin symmetry breaking terms of the nuclear interaction on nuclear ground-state properties.

Functional renormalization group approach to DFT

The accuracy of DFT is governed by that of EDF. Thus, the theoretical derivation of an accurate EDF is highly demanded. Naito and his collaborator have derived the Coulomb correlation EDF for electronic systems by using the functional renormalization group in the local density approximation. In particular, they started to derive the EDF for nuclear systems this year.

Neutron-star properties and nuclear structure

The mass and radius (M-R) relation of neutron stars can be estimated by using the combination of the nuclear equation of state (EoS) and the Tolman-Volkoff-Oppenheimer equation. The nuclear EoS

can be calculated by using microscopic theories or estimated by nuclear properties. Recently, Naito and collaborators have shown a relation between several nuclear properties and M-R relation to pin down neutron-star properties precisely [4]. Most of astrophysical observations constrain heavy-mass regions, while nuclear properties constrain low-mass regions.

Nuclear mass predictions with machine learning

The rapid neutron-capture process (r-process) is responsible for producing about half of the elements heavier than iron in the Universe. The r-process studies necessitate the joint efforts of nuclear physicists and astrophysicists. In particular, nuclear mass is a crucial input, which determines not only the r-process path but also the reaction energies of β decay and neutron capture. Due to the difficulties in the quantum many-body problem and the complexity of nuclear force, accurate nuclear mass prediction is a very challenging theoretical task. Even in the experimentally known region, the accuracies of nuclear mass predictions are generally around 500 keV, which is much poorer than the accuracy of 100 keV required by the r-process studies. In a recent work, Liang and his collaborator improved significantly nuclear mass predictions with the Bayesian neural networks (BNN) by learning the mass surface of even-even nuclei and the correlation energies to their neighboring nuclei [7]. By keeping the known physics in various sophisticated mass models and performing the delicate design of neural networks, the proposed Bayesian machine learning mass model achieves an accuracy of 84 keV, which crosses the accuracy threshold of the 100 keV in the experimentally known region. It is also demonstrated the corresponding uncertainties of mass predictions are properly evaluated.

A systematic calculation of β-decay half-lives

For data on radioactive nuclei, β decay provides some of the most important information, applicable to various fields. However, some β-decay data are not available due to experimental difficulties. For this reason, theoretically calculated results have been embedded in the data on radioactive nuclear β decay to compensate for the missing information. In a recent work, Liang and collaborators preformed a new systematic calculation of β-decay half-lives [6]. In this study, a proton-neutron quasiparticle random-phase approximation on top of a Skryme energy density functional is applied. The half-lives are calculated by including the allowed and first-forbidden transitions. In particular, the isoscalar pairing strength is estimated by a Bayesian neural network, where the predicted isoscalar pairing strengths are verified by preparing the training data and test data. It is found that the half-lives calculated with the BNN isoscalar pairing strengths reproduced most of the experimental data, although those of highly deformed nuclei were underestimated. The predictive performance is further studied with new experimental data that were not used for the BNN training and it is found that they were reproduced well.

A Kohn-Sham scheme based neural network for nuclear systems

The last decade has seen the independent machine-learning studies on different nuclear observables to meet the experimental values. In a recent work, Yang, Liang, and collaborators designed a Kohn-Sham scheme based on a multi-task neural network for the supervised learning of nuclear shell evolution [22]. The training set is composed of the single-particle wave functions and occupation probabilities of 320 nuclei, calculated by the Skyrme density functional theory. It is found that the deduced density distributions, momentum distributions, and charge radii are in good agreements with the benchmarking results for the untrained nuclei. In particular, accomplishing shell evolution leads to a remarkable improvement in the extrapolation of nuclear density. After a further charge-radius based calibration, the network evolves a stronger predictive capability. This opens the possibility to infer correlations among observables by combining experimental data for nuclear complex systems.

Cooper multiplet correlations

While superconductors and superfluids associated with Cooper pairs have been studied extensively, such a clustering associated with the Cooper instability is not necessarily limited to two-body pairing correlations but may involve multi-body clusters consisting of more than three particles. For such a purpose, the generalized Cooper problem has been further applied to cluster states such as Cooper triples and even Cooper quartets, which correspond to the three- and four-body counterparts of Cooper pairs, respectively. In a similar way to the infinite symmetry nuclear matter case, Guo, Tajima, and Liang investigated the biexciton-like quartet correlation in the electron-hole system by applying the quartet Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) theory [5]. Further, for the three-body sector, Guo and Tajima elucidated the fate of the in-

medium two- and three-body cluster states in one-dimensional spinless fermions with only attractive two-body interactions. The one-dimensional spinless fermions were found to be stable against the three-body clustering [14]. On the other hand, the competition between pairing and tripling in one-dimensional fermions with coexistent s- and p-wave interactions was also featured out [18]. The study on such higher-order Cooper cluster states may make promising contributions to the investigation of unconventional superconductivity and superfluidity in condensed-matter and in nuclear systems.

Density-induced BCS-BEC crossover and its three-body counterpart

The crossover from BCS Fermi superfluid to Bose-Einstein-condensate (BEC) has been extensively discussed in various systems such as ultracold atoms, unconventional superconductors, and nuclear matter. While the interaction can be tuned by using the Feshbach resonance to realized the BCS-BEC crossover in ultracold atoms, the fermion density can be varied instead of the interaction in other systems. However, the density-induced BCS-BEC crossover never happens in the case of the zero-range interaction. In this regard, Tajima and Liang investigated the density-induced BCS-BEC crossover and the role of the effective range [13]. It was found that at least two dimensionless parameters, that is, scattering length and effective range normalized by the Fermi momentum, are required to understand the density-induced crossover. Sakakibara, Tajima, and Liang also studied the two-dimensional BCS-BEC crossover with the finite-range corrections, which can be relevant to layered superconductors and neutron superfluid in the nuclear pasta phase of neutron-star crusts.

Moreover, Tajima and his collaborators investigated the density-induced crossover phenomena from Cooper triples, which are the three-body counterpart of Cooper pairs, to bound trimer states. In particular, to see a relationship between this three-body crossover and the hadron-quark crossover in dense matter, the effective quark model with three-body interaction was considered in analogy with a cold atomic system exhibiting the three-body crossover and the quantum scale anomaly [17]. The density-induced crossover from baryons to quark Cooper triples was found by analyzing the pole structure of in-medium three-body T-matrix in this system. This work was also summarized in the Japanese article for the public readers [23].

Polarons and clusters in ultracold atoms and their applications to nuclear systems

The polaron is a quasiparticle picture to understand the role of many-body effects on minority particles (or impurities) in medium. Such a concept can also be used for the description of clusters in medium as the polaron-molecule transition/crossover has been investigated in ultracold atoms.

For an application to nuclear physics, Tajima and his collaborators considered the fate of ^{5}He resonant state immersed in cold neutron matter. Such a situation may be relevant to an astrophysical environment such as neutron-star binary merger and superonova explosion where light nuclear clusters inevitably arise. To describe the $J^\pi = 3/2^-$ neutron-alpha scattering, they employed the p-wave two-channel model which is extensively used in cold atomic systems near the p-wave Feshbach resonance [15]. The ^{5}He resonant state was found to turn into the bound state in medium because the decay process to dissociated neutron and alpha particles are prohibited by the neutron Pauli blocking. This result indicates the importance of in-medium light clusters in astrophysical environments.

Non-Hermitian topological unitary p-wave Fermi superfluid

A unitary Fermi gas is characterized by the divergent scattering length, where there are no length scales for the interaction. Such a system possesses the scale invariance and the so-called universal thermodynamics. While three-dimensional s-wave unitary Fermi gases have been studied extensively, one-dimensional p-wave ones were elusive because of its experimental difficulty associated with atomic losses. Tajima and his collaborators studied the effects of two-body loss originating from the dipolar relaxation in p-wave Fermi superfluid near the unitary limit [21]. This system can be described by the non-Hermitian BCS-Leggett theory and exhibits an interplay among non-trivial properties such as universal thermodynamics, topological phase transition, and BCS-BEC evolution, in a unified manner. The ground-state phase diagram and the mechanism of the non-Hermitian phase transition were identified.

Multi-particle tunneling transport in strongly-correlated systems

Tunneling transport phenomena through an interface are important subjects in condensed-matter and in nuclear systems. While the transport in

weakly-coupled systems can be dominated by the single-particle tunneling and its sequential one, it is not the case in strongly-correlated systems such as ultracold atoms and nuclei. Tajima and his collaborators showed that pair- and spin-tunneling processes naturally appear through the interaction term of the bulk Hamiltonian in strongly-correlated systems separated by the potential barrier [9]. Moreover, to see the direct evidence of such a multi-particle tunneling transport, Tajima and his collaborators showed that the nonequilibrium noise can be used as a probe of pair-tunneling current in the BCS-BEC crossover [19].

Andreev reflection through nonlinear radio-frequency transport

The Andreev reflection, which occurs at a normal-state-superconductor (superfluid) junction, provides a deterministic teleportation process at an ideal normal-superconductor interface, making it behave like an information mirror. However, in reality it is challenging to control the Andreev reflection in the spatially-separated junction in which mode mixing exists at the interface. To solve this problem, Zhang, Tajima, Liang and their collaborators proposed a system provoking the momentum-conserved Andreev reflection without the mode mixing by applying multiple radio-frequency (rf) laser fields. They found the Andreev current gives the only contribution in the synthetic junction system at zero detunings regardless of the ratio of the chemical potential bias to the superfluid gap, which is in sharp contrast to that in conventional junctions. This proposed system is also used to make a simulation for the black hole event horizon which exhibits a information-mirroring behavior.

＜受賞＞

[1] 内藤智也, 2022 RIBF Users Group Thesis Award, 理研仁科センター, 2022 年 9 月.

[2] 田島裕之, 第 17 回 (2023 年) 日本物理学会若手奨励賞 (領域 1), 日本物理学会, 2023 年 3 月.

＜報文＞

(原著論文)

[3] H. Sagawa, S. Yoshida, T. Naito, T. Uesaka, J. Zenihiro, J. Tanaka, and T. Suzuki, Phys. Lett. B **829**, 137072 (2022).

[4] H. Sotani, N. Nishimura, and T. Naito, Prog. Theor. Exp. Phys. **2022**, 041D01 (2022).

[5] Y.X. Guo, H. Tajima, and H.Z. Liang, Phys. Rev. Research **4**, 023152 (2022).

[6] F. Minato, Z.M. Niu, and H.Z. Liang, Phys. Rev. C **106**, 024306 (2022).

[7] Z.M. Niu and H.Z. Liang, Phys. Rev. C **106**, L021303 (2022).

[8] D. Kagamihara, R. Sato, K. Manabe, H. Tajima, and Y. Ohashi, Phys. Rev. A **106**, 033308 (2022).

[9] H. Tajima, D. Oue, and M. Matsuo, Phys. Rev. A **106**, 033310 (2022).

[10] T. Naito, Prog. Theor. Exp. Phys. **2022**, 093D04 (2022).

[11] Y. Sekino, H. Tajima, and S. Uchino, Phys. Rev. Research **4**, 043014 (2022).

[12] X.-H. Fan, Z.-X. Yang, P. Yin, P.-H. Chen, J.-M. Dong, Z.-P. Li, and H.Z. Liang, Phys. Lett. B **834**, 137482 (2022).

[13] H. Tajima and H.Z. Liang, Phys. Rev. A **106**, 043308 (2022).

[14] Y.X. Guo and H. Tajima, Phys. Rev. A **106**, 043310 (2022).

[15] H. Tajima, H. Moriya, W. Horiuchi, K. Iida, and E. Nakano, Phys. Rev. C **106**, 045807 (2022).

[16] T. Naito, X. Roca-Maza, G. Coló, H.Z. Liang, and H. Sagawa, Phys. Rev. C **106**, L061306 (2022).

[17] H. Tajima, S. Tsutsui, T. M. Doi, and K. Iida, Symmertry **15**, 333 (2023).

[18] Y.X. Guo and H. Tajima, Phys. Rev. B **107**, 024511 (2023).

[19] H. Tajima, D. Oue, M. Matsuo, and T. Kato, PNAS Nexus **2**, pgad045 (2023).

[20] H. Sotani and T. Naito, Phys. Rev. C **107**, 035802 (2023).

[21] H. Tajima, Y. Sekino, D. Inotani, A. Dohi, S. Nagataki, T. Hayata, Phys. Rev. A **107**, 033331 (2023).

[22] Z.-X. Yang, X.-H. Fan, Z.-P. Li, and H.Z. Liang, Phys. Lett. B **840**, 137870 (2023).

(国内雑誌)

[23] 飯田圭, 鷹野正利, 田島裕之, 「中性子星は三体力が際立った「巨大な原子核」か」, 岩波書店「科学」 **92**, (10) 931-936 (2022).

(学位論文)

[24] Tingyu Zhang, “Study of Andreev reflection realized by nonlinear radio-frequency transport in an ultracold Fermi gas”, 修士論文

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[25] T. Naito, “Toward ab initio charge symmetry breaking in nuclear energy density functionals”, Symposium on “Developments of Physics of Unstable Nuclei” (YKIS2022b), Kyoto University, Kyoto, Japan, May 23, 2022.

[26] Y. Sekino, H. Tajima, and S. Uchino, "Conductivity of Alternating Spin Currents in Ultracold Atomic Gases", 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29), Sapporo, Japan, August, 18-24, 2022.

[27] S. Akagami, H. Tajima, and K. Iida, "Possible condensation of Cooper triples", 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29), Sapporo, Japan, August, 18-24, 2022.

[28] T.Y. Zhang, "Andreev Reflection in Ultracold Atomic Systems as an Information Mirror", YITP workshop, Quantum extreme universe from quantum information, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan, September 30, 2022.

[29] H. Tajima, H. Moriya, W. Horiuchi, K. Iida, and E. Nakano, "Resonance-to-bound transition of ^{5}He in neutron matter from the viewpoint of Feshbach molecules in a Bose-Fermi mixture", International Symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems (CLUSHIQ2022), Sendai, Japan, October 31-November 3, 2022.

[30] H. Tajima, "Exploring in-medium clusters in ultracold atoms", Mini-workshop on ultracold-atom theory, RIKEN, Saitama, Japan, November 22, 2022.

[31] T. Naito, G. Colò, H.Z. Liang, X. Roca-Maza, and H. Sagawa, "Isospin symmetry breaking in the nuclear ground state", VIth Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure—The Many Facets of Nuclear Structure— (Bormio2023), Sala Terme, Italy, February 8, 2023.

招待講演

[32] T. Naito, "Can we improve energy density functionals? —A perturbative method—" SSNET'22 —International Conference on Shapes and Symmetries in Nuclei: from Experiment to Theory—, Laboratoire de Physique des 2 infinis Irène Joliot-Curie (IJCLab), online, Orsay, France, June 2, 2022.

[33] H.Z. Liang, "Exotic nuclear physics for astrophysics", International Workshop on Origin of Elements and Cosmic Evolution: From Big-Bang to Supernovae and Mergers, Beihang University, China, online, July 21, 2022.

[34] H.Z. Liang, "Towards *ab initio* Nuclear Density functional Theory", Summer School on Exotic Nuclei, School of Physics, Henan Normal University, China, online, July 25, 2022.

[35] T. Naito, "Isospin symmetry breaking in nuclear ground state" NuSym22, X International Symposium on Nuclear Symmetry Energy, Laboratori Nazionali del Sud, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), online, Catania, Italy, September 27, 2022.

(国内会議)

一般講演

[36] 田島裕之, 森谷元, 堀内渉, 飯田圭, 仲野英司, 「希薄中性子物質中の ^{5}He の共鳴-束縛転移と Feshbach 分子とのアナロジー」, 大阪大学 RCNP 研究会「低エネルギー核物理と高エネルギー天文学で読み解く中性子星」, 2022 年 8 月 3–5 日.

[37] 湊太志, 内藤智也, 岩本修, 「ミュオン捕獲後の粒子放出」日本物理学会 2022 年秋季大会, 岡山理科大学, 2022 年 9 月 7 日.

[38] 田島裕之, 大上能悟, 松尾衛, 「強相関冷却原子気体における多体トンネル輸送」, 日本物理学会秋季大会, 東京工業大学, 2022 年 9 月 13 日.

[39] 田島裕之, 筒井翔一朗, 土居孝寛, 飯田圭, 「3 体共鳴近傍の 3 成分フェルミ原子気体における 3 体束縛分子からクーパートリプルへのクロスオーバー 」, 日本物理学会秋季大会, 東京工業大学, 2022 年 9 月 13 日.

[40] 関野裕太, 田島裕之, 内野瞬, 「2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体の交流スピン伝導率」, 日本物理学会秋季大会, 東京工業大学, 2022 年 9 月 14 日.

[41] 湊太志, 内藤智也, 岩本修, 「原子核構造モデルによるミュオン捕獲後の粒子放出計算」, ミュオンソフトエラー研究会, 九州大学, 2022 年 11 月 19 日.

[42] H.Z. Liang, "Nuclear mass predictions with machine learning reaching the accuracy required by *r*-process studies", Workshop on combining nuclear theory and machine learning for fundamental studies and applications, 理化学研究所, 2022 年 11 月 29 日.

[43] H. Tajima, "Towards universal energy density functionals of non-relativistic spin-1/2 Fermi gases", Workshop "Fundamentals in density functional theory", 京都大学基礎物理学研究所, 2022 年 12 月 12 日.

招待講演

[44] 田島裕之, 「強結合多成分フェルミ超流動: 冷却原子気体から多バンド超伝導、核物質まで 」, 日本物理学会秋季大会, シンポジウム「BCS-BEC クロスオーバーの新展開」, オンライン, 2022 年 9 月 10 日.

[45] T. Naito, "Isospin symmetry breaking in nuclear ground state", RIBF Users Meeting 2022, 理化学研究所 仁科加速器科学研究センター, オンライン, 2022 年 9 月 20 日.

[46] T. Naito, "Towards First-Principles Energy Density Functionals", Workshop "Fundamentals in density functional theory", 京都大学基礎物理学研究所, 2022 年 12 月 15 日.

[47] H.Z. Liang, "Quantum computing for nuclear structure properties?", Workshop "Fundamentals in density functional theory", 京都大学基礎物理学研究所, 2022 年 12 月 19 日.

[48] 田島裕之, "Three-body crossover in fermionic systems across the hierarchical structure", 第 8 回クラスター階層領域研究会, 大阪大学接合科学研究所, 荒田記念館, 2023 年 2 月 11 日.

[49] 内藤智也, 「原子核電荷分布を考慮した電子・ミュオン波動関数計算コードの開発」, 学術変革領域 B 光子対診断医療学 第 2 回研究会, 京都大学楽友会館, 2023 年 2 月 16 日.

[50] 田島裕之, “Polarons and correlated transport in cold atomic and nuclear systems”, 第 4 回若手放談会: エキゾチック核物理の将来, 理化学研究所 神戸融合・連携イノベーション推進棟, 2023 年 3 月 15 日.

[51] 田島裕之, 「強相関多成分フェルミ気体の理論研究」, 日本物理学会 2023 年春季大会, 若手奨励賞受賞講演, オンライン, 2023 年 3 月 23 日.

[52] 田島裕之, 「中性子星物質中の量子多体効果: 冷却原子気体研究からのアプローチ」, 日本物理学会 2023 年春季大会, 理論核物理領域シンポジウム「中性子星クラストの理論研究: 原子核物理と宇宙物理の交差点」, 一般シンポジウム講演, オンライン, 2023 年 3 月 25 日.

(セミナー)

[53] H. Tajima, Y.X. Guo, H.Z. Liang, “Cooper quartet correlations in multi-component fermionic systems”, RIKEN Strangeness Nuclear Physcis (SNP) seminar, online, 2022 年 4 月 14 日.

[54] H.Z. Liang, “Towards *ab initio* Nuclear Density functional Theory”, Seminar, College of Physics, Jilin University, China, online, 2022 年 4 月 19 日.

[55] T. Naito, “Isospin symmetry breaking in nuclear ground state”, High Energy Theory Group Seminar, 中央研究院 物理研究所 高能理論組 (台北市) 主催, オンライン, 2022 年 4 月 22 日.

[56] H.Z. Liang, “Nuclear spin-isospin physics: From phenomena to fundamentals”, Open Seminar in Frontier of Nuclear Physics, Fudan University, China, online, 2022 年 4 月 27 日.

[57] H. Tajima, “Sound velocity and superfluid properties in the density-induced BEC-BCS crossover”, RIKEN iTHEMS GW-EOS working group seminar, online, 2022 年 6 月 9 日.

[58] T. Naito, “Isospin symmetry breaking in nuclear ground state”, 309th RIBF Nuclear Physics Seminar/RIKEN SNP Lab Seminar, 理化学研究所 仁科加速器科学研究センター (埼玉県和光市) 主催, オンライン, 2022 年 6 月 22 日.

[59] H.Z. Liang, “Nuclear spin-isospin physics: From phenomena to fundamentals”, Seminar, School of Physics and Optoelectronic Engineering, Anhui University, China, online, 2022 年 10 月 18 日.

[60] 田島裕之, 「強相関フェルミ超流動: BCS-BEC クロスオーバーを中心に」, 千葉工業大学基礎科学セミナー第 56 回, 千葉工業大学, 2022 年 11 月 12 日.

[61] 内藤智也, 「原子核基底状態におけるアイソスピン対称性の破れ」, 日本物理学会四国支部特別企画 科学セミナー, 高知大学 理工学部, 2022 年 11 月 22 日.

[62] 田島裕之, Y.X. Guo, H.Z. Liang, 「核物質中の多体クラスターにおける媒質効果」, 京都大学原子核理論研究室コロキウム, 京都大学, 2022 年 12 月 14 日.

[63] T. Naito, “Isospin symmetry breaking in the nuclear ground state”, 核多体セミナー, 京都大学 理学部 物理学教室 原子核理論研究室, 2022 年 12 月 23 日.

[64] 田島裕之, “Clusters and Polarons in Neutron Matter”, 北海道大学原子核理論グループセミナー, オンライン, 2023 年 2 月 13 日.

1.3 素粒子論研究室

1.3.1 現象論

超対称模型における電弱真空の安定性の研究

諸井は、千草・庄司とともに、超対称模型における電弱真空の安定性について、特にミューオン異常磁気能率アノマリーとの関連という観点から研究を行なった [2]。その結果、ミューオン異常磁気能率アノマリーを解決するのに必要なスミューオン粒子の質量の上限を得た。

インフレーションが引き起こす電弱真空不安定性の研究

Li と諸井は、中山・殷と共に、Starobinsky インフレーション前後における電弱真空の不安定性について研究した [3]。とくにインフレーション後の電弱真空の不安定性について数値格子計算を用いて詳細に解析し、non-minimal 結合パラメータの上限を得た。

ILC 実験におけるアクシオン検出の研究

福田は、音野（九州大)、白井（東大 IPMU）とともに、ILC 実験におけるアクシオンの検出可能性を議論した [4]。ILC 実験での陽電子源として使われるガンマ線レーザーに磁場を加えることで、QCD アクシオンとして予言されるパラメーター領域の一部を制限できることを明らかにした。

コンパクト星表面温度観測による暗黒物質探索

藤原，濱口，永田は，J. Zheng (上海交通大) とともに，電弱多重項暗黒物質の中性子星捕獲率を系統的に計算し，将来の暗黒物質直接探索実験ないし中性子星表面温度観測による探索によりこれらの暗黒物質模型を検証することが可能であることを明らかにした [5]。

濱口，永田，Ramirez-Quezada は，ミューオン磁気双極子モーメントの実験値と理論値のずれを説明可能な暗黒物質模型を考察し，それらの暗黒物質候補を中性子星表面温度観測によって探索しうることを示した [6]。

Ramirez-Quezada は，球状星団 M4 中の白色矮星における暗黒物質の捕獲率を計算し，観測から得られる暗黒物質・核子散乱弾面積に対する制限が暗黒物質直接探索実験により課される制限と相補的であること，特に GeV 以下の質量領域において後者よりもはるかに強い制限が得られること，を明らかにした [7]。

MUonE 実験による $U(1)_{L\mu-L\tau}$ ゲージボゾンの探索

濱口, 永田, Tseng, 和田は浅井 (東大 ICRR) とともに、MUonE 実験を用いた $U(1)_{L\mu-L\tau}$ ゲージボゾンの探索について研究を行なった。その結果、適切な選択基準を課すことで、ミューオン磁気双極子モーメントの実験値と理論値のずれを説明可能なパラメーター領域を含む広いパラメーター領域で $U(1)_{L\mu-L\tau}$ ゲージボゾンが探索可能であるという結果を得た [8]。

超対称大統一理論

濱口，Hor，永田は，超対称 SU(5) 大統一理論における最小南部・ゴールドストン・ヒッグス模型を解析し，模型に備わる大域的対称性により大統一スケールの粒子の質量スペクトルが強く制限されること，将来の陽子崩壊実験により広範囲のパラメーター領域を検証可能であること，をそれぞれ明らかにした [9]。

超対称標準模型における電気双極子モーメント

永田は, 金田(東京女子大), K. A. Olive, M. Pospelov (ミネソタ大)，L. Velasco-Sevilla（西江大）とともに, Constrained Minimal Supersymmetric Standard model (CMSSM) における電子および核子の電気双極子モーメントを計算し，模型に内在する CP 位相に対する実験制限を与えた [10]。

VLL 模型における電気/磁気双極子モーメント

濱口, 永田, Tseng, Osaki は, Vector-like lepton 模型における電子およびミューオンの電気/磁気双極子モーメントを計算し，ミューオン磁気双極子モーメントの実験値と理論値のずれを説明しつつ，電子およびミューオンの電気双極子モーメントが将来実験で検出される可能性があることを明らかにした [11]。

ILC 実験におけるミューオン異常磁気能率への超対称性粒子の寄与の再構成

濱口、諸井は、遠藤（KEK)、岩本（ELTE Eötvös Loránd 大学)、川田（KEK)、北原（名古屋大)、末原（九州大）とともに、ILC 実験におけるミューオン異常磁気能率への超対称性粒子の寄与の再構成に関する研究を行った [12]。

1.3.2 弦理論，場の理論全般

量子トロイダル代数と超対称ゲージ理論の研究

松尾と野下は、縄田（復旦大）・朱（蘇州大) とともに量子トロイダル代数・W 代数・可解系などに関するレビュー論文を執筆中。松尾は、その一部をサンタバーバラで開かれた研究会で発表した [46]。

野下は、超群ゲージ理論の 5 次元 AGT 対応を量子トロイダル gl(1) の表現論を用いることで調べた。とくに ghost-brane に対応する表現、および intertwiner の構成を行うことで超群ゲージ理論の分配関数を純代数的に導出し、anti-topological vertex との対応を調べた。また、S-dual な超膜理論についていくつかの予想を与えた [13]。

W 代数と ILW 方程式、Bethe 仮設方程式の関連

渡辺は Procházka と、Maulik-Okounkov の R 行列から出発して intermediate long wave 方程式 (ILW 方程式) の保存量の量子化を具体的に得て、さらにこれの Bethe 仮設方程式との関連や特定の極限での振る舞いを調べた [14]。

一般化対称性

大森は T. Huang(カリフォルニア工科大), Y. Lin(ハーバード大学, 立川 (Kavli IPMU), 手塚 (京都大) と共に、Haagerup 対称性と呼ばれる一般化対称性を持つ 1 次元格子系の数値計算を実行し、臨界相にあることを数値的に示した [15]。 大森は C. Cordova (シカゴ大) と T. Rudelius (UC バークレー校) とともに、高次対称性の破れと弱重力予想との関係について [16] にて議論した。 大森は Y. Choi(ニューヨーク州立大) と共に、フェルミオン系の高階ベリー位相を決定する公式を決定した [17]。 大森は C. Cordova(シカゴ大) と共に、可換ゲージ理論の ABJ アノマリーが非可逆的対称性として再解釈できることを指摘し、さらに非可換ゲージ理論への埋め込みに伴うインスタントン補正をこの非可逆的対称性を弱く破る効果として特徴づけられることを指摘した。

境界/欠陥付きの共形場理論

奥山は、大阪大学の西岡、嶋守と共に境界/欠陥付きの共形場理論の相関関数と境界/欠陥無しの共形場理論の相関関数の間に成り立つ関係を指摘した [19]。また、境界と線欠陥がある場合の O(N) 模型の臨界現象における振る舞いを、摂動論に頼らずに、自然な公理系に基づいて解析する手法を考案した [20, 21]。

共形場理論と誤り訂正符号

矢萩は、2 次元共形場理論と古典誤り訂正符号の対応について調べた。符号からボソンを記述する共形場理論を構成することで、スペクトルや分配関数について誤り訂正符号を利用して解析する方法を示した [22]。

＜受賞＞

[1] 渡辺彬生、日本物理学会 2022 年秋季大会学生優秀発表賞、日本物理学会、2022 年 10 月。

＜報文＞

(原著論文)

[2] S. Chigusa, T. Moroi and Y. Shoji, "Upper bound on the smuon mass from vacuum stability in the light of muon g − 2 anomaly," Phys. Lett. B **831** (2022), 137163 [arXiv:2203.08062 [hep-ph]].

[3] Q. Li, T. Moroi, K. Nakayama and W. Yin, "Instability of the electroweak vacuum in Starobinsky inflation," JHEP **09** (2022), 102 [arXiv:2206.05926 [hep-ph]].

[4] H. Fukuda, H. Otono and S. Shirai, "Searching for the QCD axion with the proposed International Linear Collider beam facility," Phys. Rev. D **106**, no.5, 055029 (2022) [arXiv:2203.06137 [hep-ph]].

[5] M. Fujiwara, K. Hamaguchi, N. Nagata and J. Zheng, "Capture of electroweak multiplet dark matter in neutron stars," Phys. Rev. D **106**, no.5, 5 (2022) [arXiv:2204.02238 [hep-ph]].

[6] K. Hamaguchi, N. Nagata and M. E. Ramirez-Quezada, "Neutron star heating in dark matter models for the muon g − 2 discrepancy," JHEP **10**, 088 (2022) [arXiv:2204.02413 [hep-ph]].

[7] M. E. Ramirez-Quezada, "Constraining dark matter interactions mediated by a light scalar with white dwarfs," [arXiv:2212.09785 [hep-ph]] Phys. Rev. D に掲載決定済.

[8] K. Asai, K. Hamaguchi, N. Nagata, S. Y. Tseng and J. Wada, "Probing the Lμ-Lτ gauge boson at the MUonE experiment," Phys. Rev. D **106** (2022) no.5, L051702 [arXiv:2109.10093 [hep-ph]].

[9] K. Hamaguchi, S. Hor and N. Nagata, "Minimal Nambu-Goldstone-Higgs model in supersymmetric SU(5) revisited," Phys. Rev. D **107**, no.3, 035016 (2023) [arXiv:2210.09333 [hep-ph]].

[10] K. Kaneta, N. Nagata, K. A. Olive, M. Pospelov and L. Velasco-Sevilla, "Quantifying Limits on CP Violating Phases from EDMs in Supersymmetry," JHEP **03**, 250 (2023) [arXiv:2303.02822 [hep-ph]].

[11] K. Hamaguchi, N. Nagata, G. Osaki and S. Y. Tseng, "Probing new physics in the vector-like lepton model by lepton electric dipole moments," JHEP **01**, 100 (2023) [arXiv:2211.16800 [hep-ph]].

[12] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto, S. i. Kawada, T. Kitahara, T. Moroi and T. Suehara, "Stau study at the ILC and its implication for the muon g-2 anomaly," Contribution to Snowmass 2021 [arXiv:2203.07056 [hep-ph]].

[13] G. Noshita, "5d AGT correspondence of supergroup gauge theories from quantum toroidal gl_1," JHEP **12** (2022) 157 [arXiv:2209.08313[hep-th]].

[14] T. Procházka and A. Watanabe, "On Bethe equations of 2d conformal field theory," [arXiv:2301.05147 [hep-th]].

[15] T. C. Huang, Y. H. Lin, K. Ohmori, Y. Tachikawa and M. Tezuka, "Numerical Evidence for a Haagerup Conformal Field Theory," Phys. Rev. Lett. **128** (2022) no.23, 231603 [arXiv:2110.03008 [cond-mat.stat-mech]].

[16] C. Cordova, K. Ohmori and T. Rudelius, "Generalized symmetry breaking scales and weak gravity conjectures," JHEP **11** (2022), 154 [arXiv:2202.05866 [hep-th]].

[17] Y. Choi and K. Ohmori, "Higher Berry phase of fermions and index theorem," JHEP **09** (2022), 022 [arXiv:2205.02188 [hep-th]].

[18] C. Cordova and K. Ohmori, "Noninvertible Chiral Symmetry and Exponential Hierarchies," Phys. Rev. X **13** (2023) no.1, 011034 [arXiv:2205.06243 [hep-th]].

[19] T. Nishioka, Y. Okuyama and S. Shimamori, "Method of images in defect conformal field theories," Phys. Rev. D **106** (2022) no.8, L081701 [arXiv:2205.05370 [hep-th]].

[20] T. Nishioka, Y. Okuyama and S. Shimamori, "Comments on epsilon expansion of the O(N) model with boundary," JHEP **03** (2023), 051 [arXiv:2212.04078 [hep-th]].

[21] T. Nishioka, Y. Okuyama and S. Shimamori, "The epsilon expansion of the O(N) model with line defect from conformal field theory," JHEP **03** (2023), 203 [arXiv:2212.04076 [hep-th]].

[22] S. Yahagi, "Narain CFTs and error-correcting codes on finite fields", JHEP **08** (2022) 058 [arXiv:2203.10848 [hep-th]].

(会議抄録)

(国内雑誌)

[23] 濱口幸一 "宇宙における物質の起源とマヨラナニュートリノ" 数理科学 2022 年 4 月号 No.706「マヨラナ粒子をめぐって一性質から最先端の研究まで」(サイエンス社, 2022).

(学位論文)

[24] 博士論文：A. Watanabe, "Analysis of W algebra using Miura transformation: construction of universal R-matrix and q-corner VOA".

[25] 修士論文: 尾崎弦太, “Vector-like Lepton モデルにおける Lepton Dipole Moments への新たな寄与について.”

[26] 修士論文: T. Sichanugrist, “Dark Matter Detection via Nuclear Magnons”.

[27] 修士論文: 島村洲太朗, “フラクトン系における場の理論と双対性.”

[28] 修士論文: 矢萩慎一朗, “2 次元共形場理論と誤り訂正符号”.

(著書)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[29] M. E. Ramirez-Quezada, “Neutron star heating and the muon g-2 discrepancy”, Planck, June 2022.

[30] M. E. Ramirez-Quezada, “Neutron star heating and the muon g-2 discrepancy”, DSU2022, The University of New South Wales, Sydney, Australia, Dec 5–9, 2022.

[31] J. Wada, “Probing the $L_\mu - L_\tau$ Gauge Boson at the MUonE Experiment”, SUSY 2022, University of Ioannina, Greece, Jun. 27, 2022.

[32] N. Nagata, “Probing the $L_\mu - L_\tau$ Gauge Boson at the MUonE Experiment”, Pascos 2022, Max-Planck-Institut fur Kernphysik, Heidelberg, Germany, Jul. 25, 2022.

[33] T. Sichanugrist, “Observing Axion Emission from Supernova with Collider Detectors (poster presentation)”, 2022 Asia-Europe-Pacific School of High-Energy Physics, South Korea, Oct. 5-18, 2022.

[34] Y. Kanazawa, “Solution to Axion Quality Problem by Non-Minimal Gravitational Coupling“, KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology and International Joint Workshop on the Standard Model and beyond, Nov. 29-Dec. 2, 2022.

[35] G. Noshita, “BPS/CFT correspondence of supergroup gauge theories,” FoPM International Symposium, University of Tokyo, Feb. 6-8, 2023.

[36] K. Kawabata, “Narain CFTs from qudit stabilizer codes”, FoPM International Symposium, University of Tokyo, Feb. 6-8, 2023.

[37] H. Takahashi, “Grand Unified Theory and Proton Decay,” FoPM International Symposium, University of Tokyo, Feb. 6-8, 2023.

招待講演

[38] M. E. Ramirez-Quezada, “Cómo estudiar física de altas energías observando a las estrellas” (How to study high energy physics observing stars), RED Global MX (Capítulo Japón) March 2023.

[39] T. Moroi, “The Muon $g - 2$ Anomaly and Supersymmetry,” SUSY 2023 (June 27 – July 02, 2022), Ioaninna, Greece.

[40] T. Moroi, “Detecting Hidden Photon Dark Matter via the Excitation of Qubits,” CAU BSM Workshop (February 20 - 24, 2023), Seoul, Korea.

[41] N. Nagata, “Neutron Star Heating and Dark Matter”, 2nd workshop: Multimessenger Study of Heavy Dark Matter, YITP, Kyoto, Jul 11–12, 2022.

[42] N. Nagata, “Wino/Higgsino DM at FCC”, FCC BSM Physics Programme Workshop, CERN, Geneva, Switzerland, Sep 15–16, 2022.

[43] N. Nagata, “GUT, proton decay, and BSM theories”, NNN2022, Hida City Cultural Communication Center, Gifu, Japan, Sep 28–30, 2022.

[44] N. Nagata, “On the WIMP dark matter signature in old neutron stars”, Workshop on Physics of Dark Cosmos: dark matter, dark energy, and all, Lavalse Hotel Busan, Busan, South Korea, Oct 21–23, 2022.

[45] N. Nagata, “Neutron Star Heating: WIMP DM vs Others”, DSU2022, The University of New South Wales, Sydney, Australia, Dec 5–9, 2022.

[46] Yutaka Matsuo, “A brief survey of quantum toroidal algebra and the connection with the integrability”, workshop “Integrability in String, Field, and Condensed Matter Theory” Aug 22, 2022 - Oct 14, 2022, KITP, UC Santa Barbara.

[47] K. Ohmori, “Introduction to Symmetries in Quantum Field Theory”, Global Categorical Symmetries, Waterloo, Canada, June 16–17, 2022.

[48] K. Ohmori, “Non-invertible Symmetry in Our Dimensions”, Strings 2022, Vienna, Austria, July 19–22, 2022.

[49] K. Ohmori, “Developments in Non-invertible symmetry: Recent and Near Future”, Generalized Global Symmetries, Quantum Field Theory, and Geometry, Stony Brook, USA, Sep 19–23, 2022.

[50] K. Ohmori, “Neutrino Masses from Generalized Symmetry Breaking”, KEK-th 2022, online, Dec. 7–9, 2022.

[51] K. Ohmori, “non-invertible symmetry in 3+1d”, The 17th Kavli Asian Winter School (KAWS) on Strings, Particles and Cosmology, Daejeon, Korea, Jan. 9–18, 2023.

[52] K. Ohmori, “Fusion Surface Models: 2+1d Lattice Models from Higher Categories”, QFT and Related Mathematical Aspects, Shuzenji, Japan, Mar. 13–15, 2023.

(国内会議)

一般講演

[53] 和田淳太郎, “MUonE 実験によるミューオン $g - 2$ を説明可能な $U(1)_{\mu-\tau}$ ゲージボソンの探索”, FPWS2022, 2022 年 11 月 8 日.

[54] G. Noshita, “5D AGT correspondence of Supergroup Gauge Theories from Ding-Iohara-Miki algebra,” YITP workshop Strings and Fields 2022, Aug. 19, 2022.

[55] 野下剛, “量子トロイダル gl(1) を用いた超群ゲージ理論の 5 次元 AGT 対応,” 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 22-25 日 (オンライン).

[56] 渡辺彬生, “W infinity algebra and quantum ILW Hamiltonians”, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 岡山大学, 2022 年 9 月.

[57] 尾崎弦太, “Vector-like Lepton モデルにおける Lepton Dipole Moments で探る新物理,” 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 22-25 日 (オンライン).

[58] 尾崎弦太, “Vector-like Lepton モデルにおける Lepton Dipole Moments への新たな寄与について,” 素粒子現象論研究会 2022, 大阪公立大学, 2023 年 3 月.

[59] T. Sichanugrist, “Dark Matter Detection via Nuclear Magnons”, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 22-25 日 (オンライン).

[60] 矢萩慎一朗, “フェルミオン CFT と古典誤り訂正符号”, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 22-25 日 (オンライン).

[61] S. Hor, “Nambu-Goldstone Higgs Models in SU(5),”, Summer Institute 2022, Sep. 18-22, 2022.

[62] S. Hor, “Nambu-Goldstone Higgs Models in SU(5),”, KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology, Nov. 29 - Dec. 2, 2022.

[63] Y. Okuyama, “Method of images in defect conformal field theories,” YITP workshop Strings and Fields 2022, Aug. 21, 2022.

[64] 川畑洸貴, “キューディット量子誤り訂正符号による共形場理論の構成”, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 22-25 日 (オンライン).

[65] Q. Li, “Instability of the Electroweak Vacuum in Starobinsky Inflation,”, Summer Institute 2022, Sep. 18-22, 2022.

[66] Q. Li, “Instability of the Electroweak Vacuum in Starobinsky Inflation,”, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 22-25 日 (オンライン).

招待講演

[67] 永田夏海, “WIMP Dark Matter Capture in Neutron Stars”, NHWG33, Osaka University, May 7, 2022.

[68] 永田夏海, “2040 年代の素粒子と宇宙”, 次世代エネルギーフロンティアの検討会, レクトーレ湯河原, Aug 18, 2022.

[69] 永田夏海, “大統一理論におけるヨタスケールの物理”, 日本物理学会 2022 年秋季大会, オンライン, 2022 年 9 月 10 日.

[70] 永田夏海, “ヨタスケールの物理”, 高エネルギー将来計画委員会理論レビュー, オンライン, 2023 年 1 月 10 日.

[71] S. Hor, “Nambu-Goldstone Higgs Models in SU(5) GUT,”, 36th Regular Meeting of the New Higgs Working Group, Osaka University, Feb. 14, 2023.

[72] 濱口幸一, “素粒子の標準模型を超える物理と超新星・中性子星,” 東北大学「物理科学の最前線」(オンライン), 2022 年 7 月 1 日.

(セミナー)

[73] M. E. Ramirez-Quezada, “White Dwarfs as Dark Matter Probes”, The University of Gottingen, July 11 2022.

[74] M. E. Ramirez-Quezada, “Dark matter capture in compact objects: a window to BSM physics”, Max Planck July 7, 2022.

[75] M. E. Ramirez-Quezada, “Can Radio sky reveal primordial electron-proton interactions?”, Perimeter Institute June 21 2022.

[76] M. E. Ramirez-Quezada, “White Dwarfs as DM probes”, TUM, 4 July, 2022.

[77] M. E. Ramirez-Quezada, “Exploring new physics with compact stars”, IPMU, January 2023.

[78] N. Nagata, “Axion Quality Problem Alleviated by Non-Minimal Coupling to Gravity,” Tokyo Institute of Technology, Japan, Jun 8, 2022.

[79] N. Nagata, “On the WIMP dark matter signature in old neutron stars,”, TH Cosmo Coffee, CERN, Geneva, Switzerland, Aug 3, 2022.

[80] N. Nagata, “Toward Direct Detection of Axions,”, The University of New South Wales, Sydney, Australia, Dec 12, 2022.

[81] G, Noshita, “5d AGT correspondence of supergroup gauge theories from quantum toroidal gl_1,”, University of Tokyo Komaba, Oct. 12, 2022.

[82] G, Noshita, “5d AGT correspondence of supergroup gauge theories from quantum toroidal gl_1,”, Institute de Mathematiques de Bourgogne, France, Oct. 19, 2022.

[83] G, Noshita, “5d AGT correspondence of supergroup gauge theories from quantum toroidal gl_1,”, Joint HEP-TH seminar (online), Nov. 23, 2022.

[84] S. Hor, “R-Symmetric Flipped SU(5),”, DESY, Hamburg, Germany, Jun. 9, 2022.

[85] S. Hor, “Minimal Nambu-Goldstone Higgs Model in Supersymmetric SU(5),”, Hiroshima University, Japan, Feb. 24, 2023.

[86] K. Ohmori, “Neutrino Masses from Generalized Symmetry Breaking”, Tohoku University, Japan, Dec. 8, 2022.

[87] K. Ohmori, “Neutrino Masses from Generalized Symmetry Breaking”, Kyushu University, Japan, Dec. 16, 2022.

[88] K. Ohmori, “Fusion Surface Models: 2+1d Lattice Models from Higher Categories”, University of Chicago, USA, Mar. 27, 2023.

[89] Y. Okuyama, “Method of images in defect conformal field theories”, Osaka University, Japan, May. 18, 2022.

[90] Y. Okuyama, “Method of images in defect conformal field theories”, Rikkyo University, Japan, Jan. 17, 2023.

[91] Y. Kanazawa, “Direct Serach for Supernova Axions“, Institute de Fisica Teorica (UAM/CSIC), Madrid, Spain, Sep. 8, 2022.

2　原子核・素粒子実験

2.1　原子核実験グループ (中村研究室)

原子核実験グループ (Nuclear EXperimental Group; NEX) は 2022 年 4 月に中村教授が着任し新体制での研究を開始した。また、9 月には永尾助教が着任した。

我々は、国内外の大型粒子加速器を駆使し、核子 (陽子、中性子) に加えてストレンジクォークを含むハイペロンから構成されるハイパー原子核実験を推進することで、強い相互作用をする量子多体系の理解を目指した近代的な原子核物理学の実験研究を展開している。

このような量子多体系にはクォークから構成されるバリオン（陽子、中性子といった核子を含む)、バリオン多体系としての（ハイパー）原子核、バリオン多体系が重力により束縛された巨大な原子核とも言える宇宙で最も密度の高い中性子星があり、大きさのスケールは 1 fm (10^{-15} m) から 10 km (10^4 m) と 19 桁にも渡っている。これらを核力を拡張したバリオン間相互作用をベースとして統一的に理解するために 1) 米国ジェファーソン研究所 (JLab)、2) ドイツマインツ大学 (MAMI)、3) 東北大学電子光理学研究センター (ELPH) というストレンジクォークを作ることができる高エネルギーの大強度電子加速器施設を拠点に実験研究を推進している。これらに加えて、4) 東海の大強度陽子加速器施設 J-PARC において次世代プロジェクトとして準備が進んでいる高強度高分解能ビームライン (HIHR) における次世代のπ中間子ビームを用いたハイパー核実験を主導している。

現在、ハイパー核研究における 4 つの大きな謎として 1) ハイパートライトンパズル、2) 原子番号ゼロハイパー核 (nnΛ) の存否、3）ラムダハイパー核の荷電対称性の破れ、4) ハイペロンパズル（重い中性子星がなぜ存在するのか）がある。我々は様々な実験を通してこれらの謎を解決するため研究を推進している。

2.1.1　JLab における Λ ハイパー核電磁生成分光実験

従来、ハイパー原子核研究は K^- 中間子や π^+ 中間子ビームを用いた (K^-, π^-) 反応や (π^+, K^+) 反応

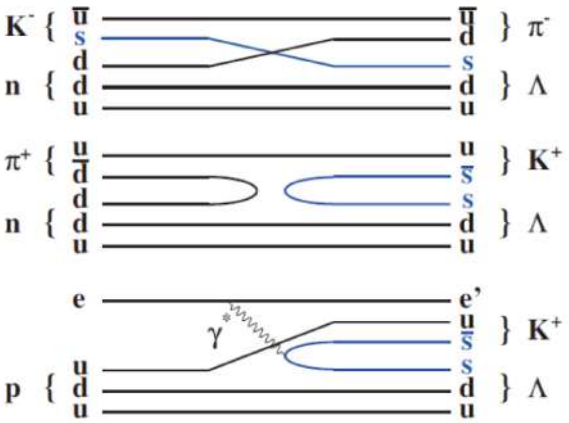

図 2.1.1:　典型的なラムダ粒子生成反応。上から (K^-, π^-), (π^+, K^+), $(e, e'K^+)$ 反応

を用いて研究されてきたが、我々は 2000 年より米国ジェファーソン国立研究所 (JLab) において電子ビームを用いた $(e, e'K^+)$ 反応を用いたラムダハイパー核精密分光という新しい研究手法を創始、発展させてきた (図 2.1.1)。

陽子加速器で得られる大強度陽子を標的に照射し二次粒子として生成される K^-, π^+ 中間子とは異なり、電子加速器で直接加速できる電子はエネルギーの単色性、ビームエミッタンス（位置と角度の分布）が極めて良い高品質なビームとして得られる。JLab の CEBAF(連続電子線加速器施設）で得られる高品質電子ビームと我々が開発した高分解能磁気スペクトロメータを組み合わせた実験 (図 2.1.2) を遂行することにより世界で初めてラムダハイパー核分光実験として分解能 1 MeV(FWHM) を切る精密分光に成功した。

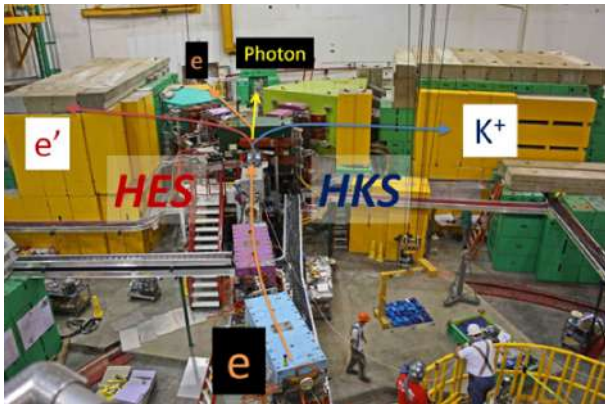

図 2.1.2: JLab Hall-C 実験室に設置した HKS(高分解能 K 中間子スペクトロメータ) と HES(高分解能電子スペクトロメータ)

中性ハイパー核 nnΛ 探索

存在が確立している最も単純なハイパー核は陽子、中性子、ラムダ粒子が一つずつで構成される三重水素ラムダハイパー核（ハイパートライトン: ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$) であるが、その陽子を中性子に置き換えた nnΛ 系が現在注目を浴びている。これまでのハイパー核に関する知見によれば nnΛ は束縛しないと考えられるが近年ドイツの GSI 研究所において nnΛ 系の束縛状態を観測した、という報告があり、もしそれが正しいとすると原子番号ゼロのハイパー核の最初の発見、ということになる。しかし、実験精度の制限などからその存否は未だ確定していない。トリチウム標的を用意して ${}^{3}\mathrm{H}(e,e'\mathrm{K}^{+})\mathrm{nn}\Lambda$ 反応を使うとこの状態が束縛状態でも寿命が極端に短い共鳴状態であっても探索することが可能である。ただし、放射性物質であるトリチウムを標的として使う必要があり、実験的には難しい。しかし、我々は JLab において、40 TBq の低温ガストリチウム標的を用いて本実験を行い、欠損質量分布の生成閾値付近に興味深い構造があるものの、束縛状態としてのクリアなピークが存在しないことを示し、その生成断面積に上限値を与えた。また、この反応により準自由生成されたラムダ粒子のエネルギー分布より、未だ、謎に包まれた Λn 相互作用に関する貴重な知見を得ることに成功した。

ハイペロン電磁生成

$(e,e'\mathrm{K}^{+})$ 反応は陽子をハイペロンである Λ,Σ^{0} に変換する反応であるため水素標的を用意し、既知の Λ,Σ^{0} の質量を使うことでエネルギーの絶対値較正を極めて高い精度で行うことができる。これは $(e,e'\mathrm{K}^{+})$ 反応によるラムダハイパー核精密分光の極めて重要な実験的利点であり、中性子をハイペロンに変換する (K^{-},π^{-}), (π^{+},K^{+}) 反応では不可能である。この $p(e,e'\mathrm{K}^{+})\Lambda/\Sigma^{0}$ 反応は、エネルギー較正のために重要であるが、それと同時に物理的にも興味深い研究対象である。ハイパー核電磁生成の素過程である本反応はストレンジネス電磁生成の理論に対する貴重なインプットであるにも関わらず、低運動量移行 (Q^{2}) 領域、超前方において信頼できるデータに乏しい。ある程度、実験データが存在する領域に関しては様々な理論計算の結果はほぼ一致しているが、低運動量移行 (Q^{2}) 領域、超前方においては理論予想が大きく食い違い、信頼できる実験結果が待ち望まれている。我々は低温水素ガス標的を用いて $Q^{2}\sim 0.5\ (\mathrm{GeV}/c^{2})^{2}, W=2.14\ \mathrm{GeV}, \theta^{cm}_{\gamma K}\sim 0^{\circ}$ において $p(e,e'\mathrm{K}^{+})\Lambda/\Sigma^{0}$ 反応の微分断面積を測定することに成功し、現在詳細な解析を進めている。

η' 電磁生成

$p(e,e'\mathrm{K}^{+})$ 反応を研究するセットアップで、K^{+} 中間子測定器における粒子識別条件を K^{+} 中間子から陽子に変更することで $p(e,e'p)\eta'$ 反応の研究が可能である。η' 中間子は擬スカラー中間子九重項の中でもとりわけ質量が大きく特異な中間子であり、原子核中におけるカイラル対称性の破れの自発的回復などとも関連する興味深い粒子である。この η' 中間子の電子散乱反応による生成現象をハイパー核研究と同時に測定することに成功した。

$(e,e'\mathrm{K}^{+})$ 反応分光

我々が JLab において創始・発展させてきたラムダハイパー核精電磁生成精密分光はこれまでに軽いハイパー核研究において重要な成果を上げてきた。JLab における次期計画はこれまで中重核領域では調べられたことのないラムダハイパー核束縛エネルギーのアイソスピン依存性を調べるものである。このために ${}^{40}\mathrm{Ca}, {}^{48}\mathrm{Ca}$ という貴重な同位体濃縮した標的を用意し、$(e,e'\mathrm{K}^{+})$ 反応を用いて ${}^{40}_{\Lambda}\mathrm{K}, {}^{48}_{\Lambda}\mathrm{K}$ ハイパー核を生成、分光する。このために必要な新たな 1 対の電荷分離電磁石 (PCS) を国内で設計・製作し、JLab に輸出した。PCS を用いた新しいセットアップで軽いラムダハイパー核から中重核、さらには鉛標的を用いて ${}^{208}\mathrm{Pb}(e,e'\mathrm{K}^{+}){}^{208}_{\Lambda}\mathrm{Tl}$ 反応による ${}^{208}_{\Lambda}\mathrm{Tl}$ ハイパー核という広い質量数領域におけるラムダハイパー核精密分光の展開を目指して、その準備を進めている。これらの研究により高密度状態下における Λnn 三体斥力の質量依存性、アイソスピン依存性を明らかにし、重い中性子星がなぜ存在できるのかという謎（ハイペロンパズル）の解決を目指す。

2.1.2 MAMI における崩壊 π^{-} 中間子分光

ハイパー核は自由空間中で不安定であり、弱い相互作用により一定の確率で ${}^{\mathrm{A}}_{\Lambda}\mathrm{Z}\rightarrow{}^{\mathrm{A}}(\mathrm{Z}{+}1)+\pi^{-}$ のように通常原子核と π^{-} 中間子の二体に崩壊する。ハイパー核が静止している場合、この π^{-} 中間子が持つ運動量は親ハイパー核の質量を反映した単一運動量となり、この運動量を測定することでハイパー核の質量分光が可能となる。この全く新しいハイパー核質量分光法は「崩壊 π^{-} 中間子分光」と呼ばれ、我々は $(e,e'\mathrm{K}^{+})$ 反応分光とは相補的な新しい研究手段として 2011 年よりドイツ・マインツ大学にある連続電子線加速器 MAMI-C において本手法を創始、展開してきた。基底状態であると同時に二体崩壊して π^{-} 中間子を放出するハイパー核にのみ適用可能という条件はあるものの、$(e,e'\mathrm{K}^{+})$ 反応分光実験よりさらに高分解能、高精度な実験が可能である。これまで実施した実験において、四重水素ラムダハイパー核 $({}^{4}_{\Lambda}\mathrm{H})$ からの π^{-} 中間子ピークを分解能 0.1 MeV/c (FWHM) で観測、世界最高精度で ${}^{4}_{\Lambda}\mathrm{H}$ の質量を決定することに成功した (図 2.1.3)。これによりラムダハイパー核における荷電対称性の破れの研究が大いに進展した。現在、この手法に関する研究をさらに進めている。

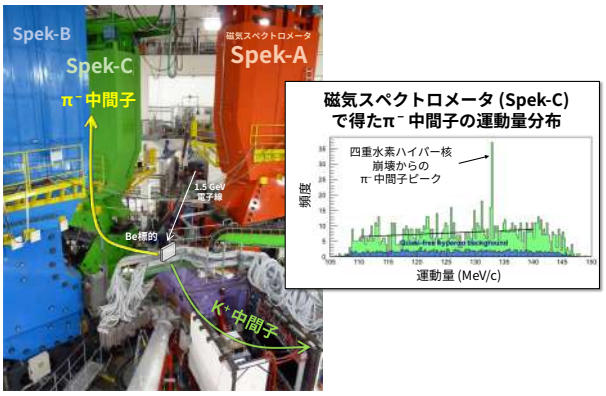

図 2.1.3: （左）MAMI の実験セットアップ。緑色（左奥）の Spek-C 検出器と紫色（手前）の Kaos 検出器で崩壊 π^- と K^+ 中間子を測定する。（右）MAMI で観測した ${}^{4}_{\Lambda}\mathrm{H}$ からの π^- 中間子ピーク。世界最高分解能、精度による観測結果。

三重水素ラムダハイパー核の高精度質量測定

近年、三重水素ラムダハイパー核 (${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$) の質量が従来報告されている値より軽い (束縛エネルギーが大きい) のではないかという結果が米国・BNL の STAR 実験から報告されており、ハイパートライトンパズルの一端となっている。${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ は最も単純なハイパー核であり厳密三体計算が可能なことから、その質量はより重いハイパー核に対する理論計算を遂行するために必要なインプットとしても使われる。もし本当に ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ の質量が軽いとすれば、これまでの理論フレームワークを再考しなければならない可能性があり大いに注目を集めている。一方で、欧州・LHC の ALICE 実験よりまた異なった ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ 質量が報告されるなど、さらなる実験精度向上が望まれている状況にある。

このような背景から、我々は崩壊 π^- 中間子分光をさらに展開し ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ 質量高精度測定を実現するべく研究を進めている。大強度・高品質な電子線を使った崩壊 π^- 中間子分光法を使えば、既存の実験データをはるかに凌ぐ精度で ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ 質量を測定できる。

この実験を実施するべく 2022 年 6 月から 7 月にかけて磁気スペクトロメータの再立ち上げと新開発の Li 標的の設置を行った。7 月および 9 月から 10 月にかけてデータ収集を実施し、これまの実験で測定した統計量の約 2 倍の物理データを取得することに成功し、現在解析を進めている。

電子ビームエネルギーの高精度測定

崩壊 π^- 中間子分光の実験精度を保証するにあたり、磁気スペクトロメータの運動量較正が極めて重要である。MAMI では電子原子核弾性散乱からの散乱電子を用いて運動量較正しており、標的に入射する電子ビームのエネルギー精度が最終的な実験精度を決定している。この電子ビームエネルギーの高精度測定法の開発も並行して進んでおり、２台のアンジュレータを利用した「放射光干渉法」を新たに確立させつつある。

これまで収集した実験データの解析により、180 MeV の電子ビームエネルギーを $\Delta E/E < 10^{-4}$ の精度で測定することに成功した。また、更なる実験セットアップ改良により 10^{-5} 程度まで精度が向上することも分かった。

取得した ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ のデータと本研究を組み合わせることで既存の測定結果の約 10 倍という圧倒的な精度で ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ の質量を決定できると期待される。

2.1.3 ELPH におけるハイパー核研究

先述の JLab、MAMI における研究では、大強度連続電子線を利用した電磁反応によりハイパー核の生成と高精度分光を実現している。この生成過程では、中間過程として仮想光子（直接観測には現れない仮想的な光子）がストレンジクォークを生成する。一方、仮想光子ではなく、高エネルギー実光子ビーム（ガンマ線）を用いることでも JLab、MAMI における実験と同様にハイペロンやハイパー核を生成することが可能である。しかし、光子ビームは電子線加速器からの二次ビームとして生成されるため、ビーム強度やエネルギー均一性は電子線に劣る。その一方で、その特徴を逆手にとり大立体角や幅広いエネルギーレンジをを覆った測定が可能であり、ハイパー核から放出される様々な粒子の角度、運動量分布を幅広く観測したい、というような研究に対して光子ビームを使ったハイパー研究は効果的である。

我々は、東北大学電子光理学研究センター（ELPH）にある 1.3 GeV の電子シンクロトロンからの制動放射光子ビームを使って研究を展開している。また、国内の大学が所有する加速器という面から、大規模な研究施設が運営する加速器と比較して利用しやすく、フレキシブルなビームタイムを用いて検出器の評価を行うためのテスト実験なども頻繁に行っている。

光生成したハイパー核の寿命測定実験

ラムダハイパー核は約 200 ps の寿命で弱い相互作用で崩壊するが、核種によって崩壊チャンネルや寿命が異なる。これらは束縛しているラムダ粒子とコア原子核との波動関数の重なり具合や全角運動量によって決まるので、寿命や崩壊確率を調べることはハイパー核構造や内部相互作用の研究に繋がる。近年、前述した STAR や ALICE など重イオン衝突実験から ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ の寿命測定結果も多数の報告がされているが、それらは必ずしも一致した結果ではなく、${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}$ の寿命の長短に関しても実験・理論の両面からの議論が続いている。この議論は先述の質量の問題とあわせてハイパートライトンパズルと呼ばれ、この数年間に最も活発に議論されている問題のひとつであ

る。我々はこのハイパートライトンパズルに対して、高時間分解能検出器 ($\sigma < 100$ ps) を用いたハイパー核寿命の直接時間測定法という手法で挑戦している。重イオン衝突実験とは全く異なる系統誤差を持つ別種の手法によって測定を行うことで、${}^{3}_{\Lambda}$H 寿命測定の信頼度を向上させることができる。

寿命測定実験に向け、ELPH 第二実験室にあるビームラインに新しいビームプロファイルモニターを設置し、わずか 1 秒のデータ収集によりビーム位置を約 10 μm で測定可能なシステムの構築に成功した (図 2.1.4)。また、光検出器 (SiPM) を用いた磁場下でも動作可能な高時間分解能検出器の基礎技術の確立にも成功した。

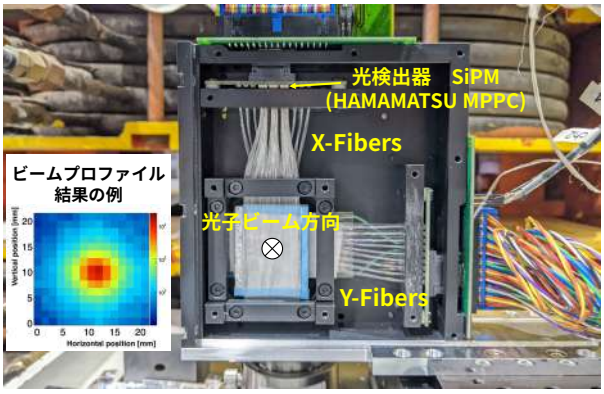

図 2.1.4: 新設した光子ビームプロファイルモニターと測定結果例。背景にあるのは荷電粒子バックグラウンドを除去するための大きな電磁石の一部。

重水素標的を用いた Λn 終状態相互作用測定

ラムダハイパー核実験の解析でも重要な Λn 間相互作用は Λn の散乱実験により測定するのが最も直接的だが、実験的困難からこのような実験は未だ実施されていない。我々は重水素標的を用いて $\gamma d \to \Lambda n K^+$ 反応を用いて、生成された Λ 粒子と中性子の終状態相互作用 (FSI) を観測することで Λn 間相互作用の研究を進めている。現在、必要となる検出器、新型光子標識化装置の開発を進めている。

2.1.4 J-PARC における次世代ハイパー核分光実験

大強度陽子加速器施設 J-PARC のハドロン実験施設の拡張計画が現在、強力に推進されている。そこで旗頭となっている π 中間子ビームラインが高強度高分解能ビームライン (HIHR : High Intensity High Resolution beamline) である。この HIHR は運動量分散整合技術を導入することにより通常、一粒子毎に運動量を測定する必要のある入射 π 中間子の運動量を測ることなく、ラムダハイパー核の励起エネルギーを測定できる夢の研究施設である。従来は入射ビームの品質により数 MeV の分解能に制限されていた π 中間子を用いたラムダハイパー核反応実験であるが、HIHR では半値全幅 0.5 MeV を切る分解能を達成し、初めて $(e, e'\mathrm{K}^+)$ に匹敵、もしくは上回る精度の研究が中間子ビームを用いて推進できることになる。(π^+, K^+) 反応と $(e, e'\mathrm{K}^+)$ 反応では同じ標的を用いてもアイソスピンの異なるラムダハイパー核が生成されるため、これらは相補的であり、荷電対称性の破れの研究をする上では両者が極めて重要である。J-PARC においてあらゆる質量領域におけるハイパー核精密分光を可能とする「ハイパー核工場」を実現するべく、現在 HIHR および次世代の (π^+, K^+) 反応によるラムダハイパー核精密分光実験のデザインを進めている。

2.1.5 異分野融合研究

先端検出器技術の異分野応用 (基礎科学から核医学などの応用科学まで) を目指して、大強度電子ビーム下における高分解能 γ 線検出器の導入、関連する電子回路の開発研究を進めている。

＜報文＞

(原著論文)

[1] B. Pandey *et al.*, "Spectroscopic study of a possible Λnn resonance and a pair of ΣNN states using the $(e, e'K^+)$ reaction with a tritium target", Phys. Rev. C 105, L051001 (2022).

[2] S. Li *et al.*, "Revealing the short-range structure of the mirror nuclei ^{3}H and ^{3}He", Nature 609, 41 (2022).

[3] T. Nanamura *et al.*, "Measurement of differential cross sections for $\Sigma + p$ elastic scattering in the momentum range 0.44–0.80 GeV/c", Prog. Theor. Exp. Phys., 2022, 093D01 (2022).

[4] P. Achenbach *et al.*, "The spectrometer and target systems for hypernuclear physics at the Mainz Microtron", Nucl. Inst. and Meth A, 1043, 167500 (2022).

(会議抄録)

[5] P. Eckert *et al.*, "Systematic treatment of hypernuclear data and application to the hypertriton", Suplemento de la Revista Mexicana de Física. Vol.3 No.3 (2022).

[6] T. Gogami *et al.*, "High accuracy spectroscopy of 3- and 4-body Λ hypernuclei at Jefferson Lab", EPJ Web of Conferences 271, 01001 (2022)

[7] P. Eckert *et al.*, "Commissioning of the hypertriton binding energy measurement at MAMI", EPJ Web of Conferences 271, 01006 (2022)

[8] F. Garibaldi *et al.*, "Studying ΛN interactions through the ^{208}Pb$(e,e'K^+)^{208}_{\Lambda}$Tl reaction", EPJ Web of Conferences 271, 01007 (2022).

[9] T. Gogami *et al.*, "Cross-section measurement of virtual photoproduction of iso-triplet three-body hypernucleus, Λnn", EPJ Web of Conferences 271, 02002 (2022)

[10] K. Okuyama *et al.*, "Study of the Λ/Σ^0 electroproduction in the low-Q^2 region at JLab", EPJ Web of Conferences 271, 02003 (2022)

[11] K. Itabashi *et al.*, "Study of Λn FSI with Λ quasi-free productions on the ^{3}H$(e,e'K^+)$X reaction at JLab", EPJ Web of Conferences 271, 02006 (2022).

[12] K. Miwa *et al.*, "Recent progress and future prospects of hyperon nucleon scattering experiment", EPJ Web of Conferences 271, 04001 (2022).

[13] F. Sakuma *et al.*, "J-PARC hadron experimental facility extension project", EPJ Web of Conferences 271, 11001 (2022).

[14] T. Gogami *et al.*, "Strangeness physics programs by S-2S at J-PARC", EPJ Web of Conferences 271, 11002 (2022).

[15] S.N. Nakamura *et al.*, "Future prospects of spectroscopic study of Lambda hypernuclei at JLab and J-PARC HIHR", EPJ Web of Conferences 271, 11003 (2022).

[16] P. Klag *et al.*, "High accuracy synchrotron radiation interferometry with relativistic electrons", The 13th Biennial Conference on Classical and Quantum Relativistic Dynamics of Particles and Fields. arXiv:2212.11139.

(国内雑誌)

[17] 中村哲、永尾翔、田村裕和、山本剛史, 「ラムダ粒子は，陽子と中性子を区別できるか？——ラムダハイパー核における荷電対称性の破れ」, 日本物理学会誌 2022 年 77 巻 5 号 p.287-292.

[18] 中村哲, 「量子ビーム科学の基礎と応用、3. 電子ビーム 3.2 固定標的の実験」、原子力システム研究懇談会.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[19] S. Nagao, "Status of the PCS magnets & simulation study", Hypernuclear Collaboration Meeting 2022Aug, July 22 (2022), Online.

[20] S. Nagao, "Modification from Hall-A to Hall-C", Hypernuclear CollaborationMeeting 2022Dec, December 13 - 14 (2022), Online.

[21] S. Nagao, "Hypernuclear decay pion spectroscopy at MAMI, Germany", Hypernuclear Physics Workshop 2023 at JLab, March 3 (2022), JLab USA.

[22] S.N. Nakamura, "Strangeness nuclear physics in the world and significance of research project at JLab", Hypernuclear Physics Workshop 2023 at JLab, March 3 (2022), JLab USA.

招待講演

[23] S.N. Nakamura, "Future prospects of spectroscopy of Lambda hypernuclei at JLab and J-PARC HIHR", The 14th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, June 27 - July 1 (2022), Prague Czech Republic.

[24] S. Nagao, "Recent results and future prospects of the JLab hypernuclear program", EMMI Workshop 4th Workshop on Anti-Matter, Hyper-Matter and Exotica Production at the LHC, February 13 - 17 (2022), Bologna Italy.

[25] S. Nagao, "Future prospects of hypernuclear high-resolution & high-precision spectroscopies with electron beams", Third International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility, March 14 - 16 (2023), J-PARC.

[26] S.N. Nakamura, "High precision spectroscopic study of Lambda hypernuclei with the (π, K) reaction at HIHR", Third International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility, March 14 - 16 (2023), J-PARC.

(国内会議)

一般講演

[27] 中村哲, 「エネルギー光子ビームで探る原子核内部と中性子星深部」, 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, 2022 年 5 月 20 - 21 日, オンライン

[28] 永尾翔, 「ハイパー核精密分光実験を用いたバリオン間力へのアプローチ」, 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, 2022 年 5 月 20 - 21 日, オンライン

[29] 永尾翔, 「JLab, MAMI におけるハイパー核質量分光：A=3 ハイパー核の分光実験」, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月 6 - 8 日, 岡山理科大学

[30] 木野量子、永尾翔, 「ELPH BST リングにおける GeV 領域光子ビームプロファイル」, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月 6 - 8 日, 岡山理科大学

[31] 西幸太郎, 「アンジュレーターによるシンクロトロン放射光を利用した電子ビームエネルギー測定」, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 22 - 25 日, オンライン

[32] 西田賢, 「ELPH 光子ビームプロファイルモニタにおける荷電粒子検出効率の改善」, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 22 - 25 日, オンライン

(セミナー)

[33] S.N. Nakamura, "Hypernuclei", A3F CNS Summer School, August 20 - 24 (2022), Shinrin-Koen Heitage Resort.

2.2 横山（将）・中島研究室

本研究室では、素粒子物理・宇宙素粒子物理に関する実験・観測を行っている。現在は特に、スーパーカミオカンデ実験、およびスーパーカミオカンデと大強度陽子加速器 J-PARC を使ったニュートリノ振動実験・T2K 実験を推進している。さらに研究を発展させるべく、スーパーカミオカンデの後継となるハイパーカミオカンデの建設を進めている。また、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の電子・陽電子衝突型加速器スーパー B ファクトリーを使った Belle II 実験にも参加している。

これら世界最先端の実験設備を使って、自分たちの手で素粒子や宇宙の謎を実験的に解き明かすことが、我々の目標である。

2.2.1 加速器による長基線ニュートリノ振動実験（T2K 実験）

T2K（Tokai-to-Kamioka）実験は、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC で人工的に作り出した（反）ニュートリノビームを 295 km 離れた岐阜県飛騨市のスーパーカミオカンデで観測し、ニュートリノの種類が飛行中に自然に変化する「ニュートリノ振動」という現象を用いて、ニュートリノの性質を明らかにする実験である。T2K 実験の現在の大きな目標は、ニュートリノと反ニュートリノでのミューオン型から電子型への遷移確率の差異を見ることで、物質と反物質の性質の違い（CP 対称性の破れ）を観測することである。

T2K 前置検出器アップグレード

T2K 実験では、加速器で人工的に作り出した素性のわかったニュートリノを使い、また生成直後のニュートリノの性質を J-PARC 施設内に設置した前置検出器と呼ばれる装置で実測し、ニュートリノ振動が起きた後のスーパーカミオカンデでの観測データと比較することで、不定性を抑え精度の良い測定を可能としている。

我々の研究室では、T2K 実験の感度をさらに向上させるために前置検出器を改良型の新装置と入れ替えるアップグレード計画を提案し、国際共同プロジェクトを主導してきた。中でも特に、プラスチックシンチレータのキューブを約 200 万個並べて 3 方向から読み出す新構造の検出器 SuperFGD の建設と、前置検出器のデータを解析に使うための事象再構成・事象選別ソフトウェアの開発を進めている。

ニュートリノ検出器 SuperFGD の建設　SuperFGD 検出器では、シンチレータからの光の検出に半導体光検出器 MPPC を使用する。当研究室では、SuperFGD 検出器で使用する MPPC 56,384 個（基板 881 枚）のうち 50,688 個（792 枚）の試験を担当し、動作を確認した。

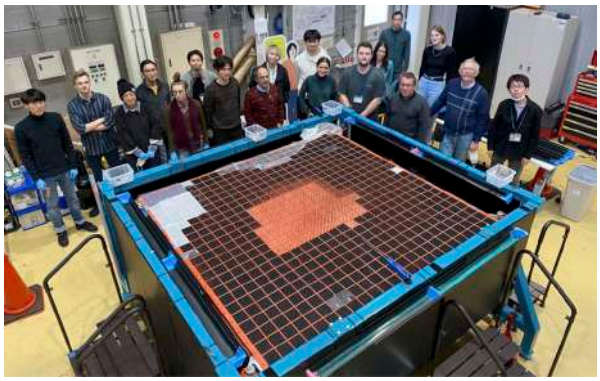

図 2.2.5: J-PARC 施設での SuperFGD 検出器の組み立ての様子。当研究室の大学院生が他国の研究者や大学院生と協力して作業を進めている。

2022 年 10 月に、J-PARC 施設での SuperFGD 検出器の組み立てが始まった。ロシアで製作され、釣り糸を使って層状に組まれたシンチレータキューブを位置を合わせつつ構造体の中に 56 層積み上げ、2022 年末までに構造体を閉じることができた。2023 年初頭からは合計 55,888 本の波長変換ファイバーを釣り糸に換えて挿入し、また MPPC・較正装置の取り付けを行った（図 2.2.5）。その際、881 枚の MPPC 基板を正しく取り付け、またその情報を管理できるよう、GUI を使ったシステムを短期間で開発し運用した。

さらに、建設後に宇宙線等を用いて装置の応答の較正を行う手法の開発を進め、必要な較正項目や要求される精度の確認と、実機で現実的に達成できる較正精度の見積りを行った（児玉将馬 修士論文 [16]）。

前置検出器の事象再構成と電子ニュートリノ事象選択　当研究室では、細分化された SuperFGD の構造を利用し、CP 対称性の破れの測定に重要な電子ニュートリノの反応断面積の測定を行うための研究を進めている。今年度は、反応点の再構成や粒子識別のアルゴリズムの改良を行い、データ収集の開始に向けて準備を進めた。

ニュートリノ振動の研究

T2K 実験での加速器ニュートリノの測定とスーパーカミオカンデによる大気ニュートリノの観測を合わせて解析することで、ニュートリノ振動パラメータの測定感度を向上させることが可能となる。この合同振動解析においては、これまで独立に解析されてきた 2 種類のデータを組み合わせるために、さまざまな系統誤差のチェックが必要となる。我々はその中で、ニュートリノ-原子核反応モデルの不完全さに起因する効果の大きさを見積もるための、シミュレーションを用いた研究を進めた。その結果を元にニュートリノ-原子核反応モデルの取り扱いを改善し、近日中に実データの解析に進む予定である。

2.2.2 スーパーカミオカンデ実験

スーパーカミオカンデは、直径 39.3 m、高さ 41.4 m の円筒形の水槽内に 5 万トンの純水を満たし約 11,000 本の 50 cm 径光電子増倍管を備えた、世界最大の地下ニュートリノ観測および陽子崩壊探索実験装置である。1996 年の運転開始以降長い歴史を持つ測定器であるが、継続して装置や解析手法の改良を行い、世界のニュートリノ研究を牽引してきた。

SK-Gd

スーパーカミオカンデは、2020 年夏に 5 万トンの超純水中に 13 トンの硫酸ガドリニウム八水和物 ($Gd_2(SO_4)_3{\cdot}8H_2O$) を添加し、SK-Gd として新たな観測を開始した。2022 年には、約 27 トンの硫酸ガドリニウム八水和物を追加で導入し、さらなる高感度での観測をスタートさせた。

レアアースの一種であるガドリニウム (Gd) は中性子捕獲断面積が大きく、また捕獲後にスーパーカミオカンデでも検出可能な比較的高いエネルギー（合計約 8 MeV）のガンマ線を放出する。このガンマ線を検出することで、スーパーカミオカンデにおける中性子の検出効率を向上させ、新たな研究を推進している。とりわけ、ニュートリノ反応と同時に放出される中性子を同時計測することでノイズを飛躍的に低減し、未発見の超新星背景ニュートリノの世界初観測を目指している。また、T2K 実験や大気ニュートリノ観測、陽子崩壊探索などの解析においても中性子の信号を利用することで感度の向上が期待できる。

ガドリニウム追加導入　2022 年 6 月 1 日から 7 月 4 日にかけて、2020 年の導入量の約 2 倍に相当する 27 トンの硫酸ガドリニウム八水和物をスーパーカミオカンデに溶解し、ガドリニウムの重量濃度として 0.033%を達成した。約 1 ヶ月に渡って途切れることなく硫酸ガドリニウム八水和物を継続的に溶解させる手法を開発し、その運用に成功した。

神岡の山中を突き抜けて地下まで到達する高エネルギーの宇宙線ミューオンは、原子核破砕で中性子を生成する。宇宙線の信号と中性子捕獲による γ 線信号の時間差により、中性子の捕獲時定数を測定できる。ガドリニウム濃度が高くなるにつれ、捕獲時定数は短くなる。2022 年のガドリニウム追加導入中の期間に、検出器を鉛直方向に区切った領域ごとに中性子の捕獲時定数を測定した結果を図 2.2.6 に示す。検出器の下側からガドリニウム濃度の高い水を入れていくにつれ、高濃度になった領域で中性子捕獲時定数が短くなっていく様子が確認できる。

SK-Gd 検出器の較正　中性子の信号は、測定器の応答をよりよく理解するための新たな手段ともなる。宇宙線による原子核破砕で生成される中性子を利用することで、検出器全域にわたって連続的に応答の較正を行うことが可能となる。データ中からそのような中性子の信号を抜き出す手法を開発し、検出器応答の位置依存性を測定し、また応答が時間的に安定していることを確認した。さらに、中性子の信号をスーパーカミオカンデの数 MeV–数 10MeV 領域でのエネルギー較正に用いることを目標として、モンテカルロシミュレーションとの比較による検出器応答の研究を行った。（志摩静香 修士論文 [17]）

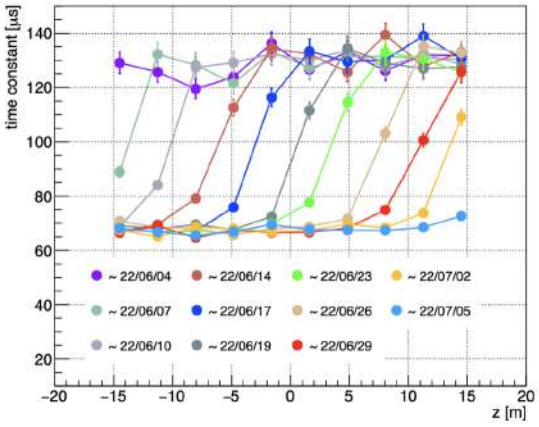

図 2.2.6: 中性子捕獲時定数を用いたガドリニウム溶解の様子の確認。横軸はスーパーカミオカンデの鉛直方向の位置、縦軸はその区間で観測された中性子捕獲の時定数を表す。[17]

超新星背景ニュートリノの探索　2020 年から 2022 年にかけて取得した、ガドリニウム濃度 0.01%での 552 日分の観測データを用いた超新星背景ニュートリノの探索を進めている。ガドリニウムによる中性子検出を利用することで、従来の純水での観測に比べ、中性子を誤検出することによる背景事象を大幅に低減しつつ、信号の検出効率を約 2 倍に向上させることに成功した。この結果、552 日分の SK-Gd データで、純水での 2970 日分の観測に匹敵する感度を達成した。現在、この探索結果をまとめた論文を準備している。

2.2.3 ハイパーカミオカンデ計画

スーパーカミオカンデでの研究をさらに発展させるべく、より大きく高性能の次世代検出器ハイパーカミオカンデの建設を推進している。ハイパーカミオカンデは、直径 68m、深さ 71m の円筒形のタンクに 26 万トンの超純水を満たした大型水チェレンコフ検出器であり、ニュートリノ振動の研究、陽子崩壊の探索や、超新星からのニュートリノ検出など、宇宙と素粒子にわたる幅広い分野で世界最高の研究を行うための施設となる。

ハイパーカミオカンデの建設は 2020 年に始まり、2027 年の運転開始を目指して国際協力でプロジェクトを進めている。我々の研究室では、検出器の建設計画全体を取りまとめ国際共同実験を牽引することに加え、光電子増倍管の性能検査や測定器の詳細な

図 2.2.7: 光電子増倍管 100 本を同時に測定する検査システム

較正方法の確立など、検出器の性能を最大に引き出すための開発研究を行っている。

光電子増倍管の開発・生産・品質管理

ハイパーカミオカンデ用の光電子増倍管は、スーパーカミオカンデのものよりも光検出効率、電荷分解能、時間分解能などの性能がそれぞれ約 2 倍改善している。2022 年 4 月までに 3,772 本の光電子増倍管が納入され、外観や特性の検査を行ってきた。その中で、暗計数率の不安定性が確認されたことを受けて、一時納入を中止して原因の究明と対策を進めた。光電子増倍管 100 本を同時に測定し安定性の評価をすることが可能なシステムを構築した（図 2.2.7）。設計の改良と出荷前後の安定性検査を合わせることで品質を保証する仕組みを確立し、納品再開に向けて最終的な確認を行なっている。

検出器の較正と純水システム

ハイパーカミオカンデの性能を最大限に引き出すべく、装置の較正方法を開発している。8 cm 径の光電子増倍管 19 本をモジュール化したマルチ PMT モジュールを利用することで較正精度を上げる手法の研究や、設置前に 50 cm 径光電子増倍管の性能を精密に測定して較正に役立てるプリキャリブレーションの手法の開発を進めている。

また、検出器の性能を大きく左右する純水の品質を保持できるよう、純水の供給や循環を行う純水装置や検出器内の配管の検討も、スーパーカミオカンデの経験をもとに進めている。

2.2.4 新検出器開発

将来、新たな実験を実現することを目指し、素粒子検出器の基礎開発を行なっている。

有機液体 TPC 原子炉ニュートリノや超新星ニュートリノといった数 MeV から数十 MeV の反電子ニュートリノの超高精度測定を目指し、有機液体を媒質として用いた Time Projection Chamber(TPC) を開発している。原理検証のため、小型イオンチェンバーを製作し、候補となる有機液体の基礎特性を測定している。これまでに候補液体の一つである 2,2,4-トリメチルペンタンを用い、その電離信号の観測に成功した。現在、液相から気相への電子の抽出および気相でのガス増幅の測定を目指し、実験および装置の改良を進めている。

Gd を用いた無機結晶シンチレーター ニュートリノが、それ自身の反粒子であるという性質（マヨラナ性）を持つと、ある種の原子核においてニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊が起こると予言されている。ガドリニウム 160 もニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($^{160}\mathrm{Gd} \rightarrow ^{160}\mathrm{Dy} + 2\mathrm{e}^-$) を起こすと予想されている。これを探索するため、SK-Gd のために開発した超高純度 Gd 精製技術を応用し、Gd を含んだ無機結晶シンチレーターを開発している。約 100 g の Ce ドープ GAGG 結晶 ($\mathrm{Ce} : \mathrm{Gd_3Al_{12}Ga_3O_{12}}$) を製作し、その放射性不純物の含有量を、結晶内部の発光の遅延同時計測、および高純度ゲルマニウム検出器や表面 α 検出器を用いた測定により評価した [44]。現在、この結果をもとに改良した結晶の生成方法の検討を進めている。

発光時定数の短い波長変換ファイバーの試験 近年新しく開発された発光時定数の短い波長変換ファイバー（クラレ社製 YS-2, 4, 6）の基本特性を測定し、従来広く使用されてきた同社製の Y-11 に比べて確かに時定数が短くなっていることを確認した（児玉 将馬 修士論文 [16]）。

＜受賞＞

[1] 児玉 将馬，第 10 回高エネルギー物理春の学校 優秀賞，2022 年 5 月

[2] 江口 碧, Best Poster Award, The 21st international workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN22), Sep 30, 2022

＜報文＞

(原著論文)

[3] L. N. Machado *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Pre-supernova Alert System for Super-Kamiokande," Astrophys. J. **935**, no.1, 40 (2022).

[4] H. Oshima *et al.* [NINJA Collaboration], "Measurements of protons and charged pions emitted from ν_μ charged-current interactions on iron at a mean neutrino energy of 1.49 GeV using a nuclear emulsion detector," Phys. Rev. D **106**, no.3, 032016 (2022).

[5] R. L. Workman *et al.* [Particle Data Group], "Review of Particle Physics," PTEP **2022**, 083C01 (2022).

[6] Yasuhiro Nakajima, "A step forward in understanding the universe: The latest results from the Daya Bay experiment," The Innovation **3(6)**, 100332 (2022).

[7] R. Matsumoto *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Search for proton decay via $p \to \mu^+ K^0$ in 0.37 megaton-years exposure of Super-Kamiokande," Phys. Rev. D **106**, no.7, 072003 (2022).

[8] M. Mori *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Searching for Supernova Bursts in Super-Kamiokande IV," Astrophys. J. **938**, no.1, 35 (2022).

[9] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Scintillator ageing of the T2K near detectors from 2010 to 2021," JINST **17**, no.10, P10028 (2022).

[10] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Neutron tagging following atmospheric neutrino events in a water Cherenkov detector," JINST **17**, no.10, P10029 (2022).

[11] K. Hosokawa, M. Ikeda, T. Okada, Y. Nakajima, *et al.* "Development of ultra-pure gadolinium sulfate for the Super-Kamiokande gadolinium project," PTEP **2023**, no.1, 013H01 (2023).

[12] I. Alekseev, T. Arihara, V. Baranov, A. Eguchi, K. Iwamoto, H. Kikutani, S. Kodama, K. Nakagiri, Y. Yoshimoto, M. Yokoyama, *et al.* "Super-FGD prototype time resolution studies," JINST **18**, no.01, P01012 (2023).

[13] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Search for Cosmic-Ray Boosted Sub-GeV Dark Matter Using Recoil Protons at Super-Kamiokande," Phys. Rev. Lett. **130**, no.3, 031802 (2023).

[14] C. Lin *et al.* [KOTO Collaboration], "Search for the Pair Production of Dark Particles X with $K_{\rm L}^0 \to XX$, $X \to \gamma\gamma$," Phys. Rev. Lett. **130**, no.11, 111801 (2023).

[15] H. Budd, J. Capo, J. Chaves, K. Iwamoto, M. Yokoyama, *et al.*, "Total Neutron Cross-section Measurement on CH with a Novel 3D-projection Scintillator Detector," Physics Letters B **840**, 137843 (2023).

(学位論文)

[16] Shoma Kodama, "Development of Calibration Methods for the New T2K Neutrino Detector SuperFGD and Evaluation of New Wavelength Shifting Fiber," Master's thesis, Jan. 2022.

[17] Shizuka Shima, "Study of Super-Kamiokande detector calibration using cosmogenic neutron capture on Gadolinium," Master's thesis, Jan. 2022.

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[18] Yasuhiro Nakajima, "Calibration strategies for Hyper-Kamiokande," Workshop on the evolution of advanced electronics and instrumentation for Water Cherenkov experiments, April 11, 2022, Online

[19] Masashi Yokoyama, "Prospect of physics with large neutrino detectors," Physics in LHC and Beyond, May 12–15, 2022, Matsue, Japan

一般講演

[20] Aoi Eguchi, "The T2K Near Detector upgrade," The 23rd International Workshop on Neutrinos from Accelerators (NuFact 2022), July 31– Aug 6, 2022, Salt Lake City, Utah, United States

ポスター発表

[21] Aoi Eguchi, "EM shower reconstruction and electron neutrino selection with the T2K SuperFGD detector," The XXX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics" (Neutrino 2022), May 30–June 4, 2022, Online

[22] Aoi Eguchi, "EM shower reconstruction and electron neutrino selection for the T2K near detector upgrade," The 21st international workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN22), Sep 28–30, 2022, Hida, Japan

[23] Yoshimi Yoshimoto, "Performance test of multi-pixel photon counters for super-fine grained detector of T2K," NNN22, Sep 28–30, 2022, Hida, Japan

[24] Shizuka Shima, "Study of energy scale calibration and Gd concentration monitoring using cosmogenic neutron in SK-Gd," NNN22, Sep 28–30, 2022, Hida, Japan

[25] Shoma Kodama, "Development of calibration methods for the SuperFGD in the T2K experiment using cosmic muons," NNN22, Sep 28–30, 2022, Hida, Japan

[26] Wataru Okinaga, "Improvement in PID methods for selecting electron neutrino events in the upgraded near detector of T2K," International Conference on the Physics of the Two Infinities, March 27–30, 2023, Kyoto University, Kyoto, Japan

[27] Shoma Kodama, "Development of calibration method of the new near detector SuperFGD in the T2K experiment using cosmic muons," International Conference on the Physics of the Two Infinities, March 27–30, 2023, Kyoto University, Kyoto, Japan

(国内会議)

招待講演

[28] Yasuhiro Nakajima, "Status of SK and SK-Gd," Workshop on "Exploration of Particle Physics and Cosmology with Neutrino," November 2, 2022, Kyoto University

[29] 中島 康博,「スーパーカミオカンデ 太陽ニュートリノと SK-Gd」東京大学宇宙線研究所　令和 4 年度共同利用研究成果発表会 2023 年 2 月 21-22 日，東京大学 柏キャンパス

[30] 中桐 洸太 ,「次世代ニュートリノ検出器のための大口径光検出器の開発と運用」，同上

一般講演

[31] 小林 北斗,「T2K 実験 WAGASCI 検出器フロントエンドエレクトロニクスを用いた電荷測定における線形性の評価」，第 10 回高エネルギー物理春の学校，2022 年 5 月 26–28 日，琵琶湖コンファレンスセンター

[32] 児玉 将馬,「T2K 実験における新型前置検出器の宇宙線等を用いた較正手法の開発」，同上

[33] 渡辺 英一朗,「ニュートリノ観測のための有機液体放射線検出器の開発」，同上

[34] 江口 碧,「T2K 前置検出器アップグレードに向けた電子再構成手法の開発」，日本物理学会 2022 年秋季大会，2022 年 9 月 6–8 日，岡山理科大学

[35] 志摩 靜香,「SK-Gd における宇宙線ミューオン由来の核破砕中性子捕獲信号を用いたエネルギー較正および Gd 濃度モニター」、同上

[36] 児玉 将馬,「T2K 実験における新型前置検出器 SuperFGD の宇宙線を用いた時間分解能等に関する較正手法の開発」，同上

[37] 冲永 和平,「T2K 新型前置検出器における電子ニュートリノ事象選択のための粒子識別手法の改善」，第 29 回 ICEPP シンポジウム，2023 年 2 月 19–22 日，志賀レークホテル

[38] 小林 北斗,「T2K 実験新型前置検出器を用いた電子ニュートリノ事象選別のための反応点再構成手法の開発」，同上

[39] Yoshimi Yoshimoto, “Performance test of multi-pixel photon counters for super-fine grained detector of T2K,” 日本物理学会 2023 年春季大会，2023 年 3 月 22–25 日，オンライン

[40] 江口 碧,「SK 大気ニュートリノと T2K ビームニュートリノの合同振動解析に向けた反応モデルの柔軟性テスト」，同上

[41] 冲永 和平,「T2K 新型前置検出器における電子ニュートリノ事象選択のための粒子識別手法の改善」，同上

[42] 小林 北斗,「T2K 実験新型前置検出器を用いた電子ニュートリノ事象選別のための反応点再構成手法の開発」，同上

[43] 児玉 将馬,「発光時定数の短い新型波長変換ファイバーの性能評価」，同上

[44] 山田 祐佳，山口 由貴， 中島 康博,「GAGG 結晶を用いたニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊の探索」，同上

ポスター発表

[45] 冲永 和平,「宇宙線ミューオンを用いた g 因子の測定」， 第 10 回高エネルギー春の学校 2022 年 5 月 26–28 日，琵琶湖コンファレンスセンター

(セミナー)

[46] 横山 将志,「宇宙は何でできている？　スーパーカミオカンデでの研究最前線」， 松山南高教養アップ講座， 2022 年 7 月 21 日， オンライン

[47] 中島 康博,「幽霊粒子ニュートリノで探る宇宙の謎」，同志社中学　学びプロジェクト，2023 年 1 月 19 日，オンライン

[48] 横山 将志，STREAM 研修模擬講義，愛媛県立宇和島東高等学校 STREAM 研修，2023 年 1 月 20 日，東京大学本郷キャンパス

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。さらに、2021 年度からは素粒子物理国際研究センター (量子 AI テクノロジー研究分野)・量子ネイティブ育成センターと協力して、基礎科学への応用を目指した量子技術研究を行っている。

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 2.3.8) は、2022 年から重心系エネルギーが 13.6 TeV に増強されて運転を再開している。2022 年までに、積算ルミノシティーで約 36 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称性粒子探索を行っている。

図 2.3.8: LHC 加速器。

高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けた初段ミューオントリガーの開発と検証

LHC 加速器をアップグレードした「高輝度 LHC」は、2029 年に運転開始予定である。アップグレード後の瞬間最高ルミノシティーは 7.5×10^{34} cm^{-2} s^{-1} まで増強される。加速器のアップグレードに伴い、トリガーシステムのエレクトロニクスも刷新される。エンドキャップ領域におけるミューオントリガー系では、7 層の TGC 検出器のヒット情報のコインシデンスをとることによって通過したミューオンの運動量を概算し、トリガー判定を行うボードである Sector Logic (SL) が新たに開発される。

本研究では、開発・統合が進む SL の検証試験を行うための機構を設計・開発・運用した（図 2.3.9)。本検証機構では、同一のテストパルスパターンを実機試験、ファームウェアのシミュレーション (Xilinx Vivado Simulator)、ソフトウェアシミュレーション（ビットワイズシミュレータ）の 3 つ全てに使用し、各出力を照合することによって堅固な検証を実現する。本機構の構成要素として、ビットワイズシミュレータとテストパターン生成機構を開発し、検証機構の運用までを行った。

本研究で開発したビットワイズシミュレータは、SL トリガー系のファームウェアと完全に同一のロジックを有するソフトウェアシミュレータである。多段のトリガー計算の各段階でファームウェアと全く同じ構造で計算を行う。計算では小数を用いた近似は行わず、ファームウェアの信号線にブール値や整数型を対応させて記述しているため、入出力がファームウェアとビット単位で完全に一致する。

テストパターン生成機構は、様々なテスト入力パターンを、SL への入力となる 128 bit × 58 links の形式に翻訳・整形する機構である。この生成機構は様々なフォーマットでの入力に対応しており、検出器のチャンネル 1 つずつ指定してヒット信号を入力することも、座標情報から直線飛跡となる 13 点をまとめて入力することも可能である。前者の入力形式を複数組み合わせることによって、任意のヒットパターンを作ることができる。

検証機構の運用では、直線飛跡および MC データから生成したテストパターンを用いた試験の 2 種類の試験を行った。直線飛跡による試験では、2 種のシミュレーションと実機の出力を比較することにより、ファームウェアのバグを発見・修正することができた。MC データを用いた試験では、トリガーロジック内で inefficiency が生じる仕組みについて、イベントごとに代表点の組み合わせやヒットパターンまで遡った精査を行い、原理的に回復可能であることが理解された。

ビットワイズシミュレータは現在も開発を進めており、2023 年度中に SL トリガー系の全てのロジックをカバーするシミュレータとして完成させる予定である。また、試用のための新たなロジックも並行して随時開発・検証し、トリガーロジックの改善可能性を探っていく。

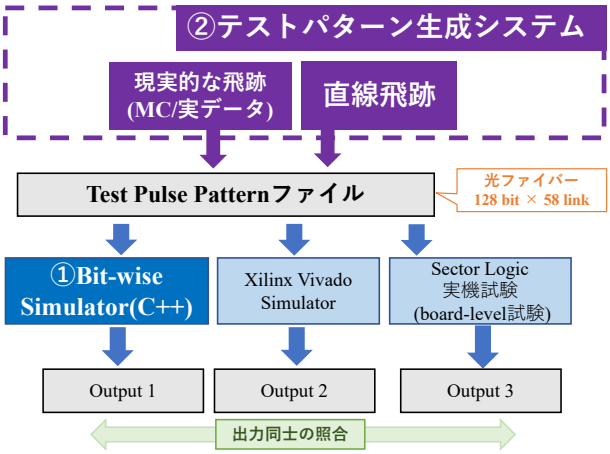

図 2.3.9: 検証機構全体図。

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, e^+) の束縛系であるポジトロニウム (Positronium, 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 (Bose-Einstein condensate, 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べく研究している。本研究室では、Ps 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。早期に Ps レーザー冷却を実現すべく、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 物質構造科学研究所 (Institute of Materials Structure Science, IMSS) 低速陽電子実験施設 (Slow Positron Facility, SPF) で実験を行っている。2022 年度は五神研究室・大学院工学系研究科吉岡研究室と共同で開発したプロトタイプ Ps 冷却用レーザーを用いて Ps レーザー冷却原理実証実験 [51] に取り組むとともに、陽電子蓄積装置開発 [2] や Ps 生成・濃縮・冷却材開発 [53, 56, 58]、さらに Ps レーザー冷却原理検証実験におけるシンチレータ信号波形の機械学習を用いた解析手法の開発 [57, 59] を行った。

Ps 生成・濃縮・冷却材開発においては、材料性能評価のため、KEK-IMSS-SPF-B2 ビームラインにおける Ps 飛行時間 (Time-of-flight, TOF) 測定を行った。実験の概念図を図 2.3.10 に示す。シリカエアロゲル、ナノプロセシング、規則配列シリカナノ粒子、の 3 つの手法で試作したシリカ（酸化ケイ素、SiO_2）ナノ材料について室温での測定を行い、いずれの材料でも Ps 生成を確認した。詳細な解析は現在進行中だが、シリカエアロゲル表面から真空中に放出された Ps の温度として、2,600–3,000 K という暫定値を得た。より低温の Ps を生成するため Ps 生成材を低温にする計画であり、2023 年度以降のビームタイムにおいて、試料を低温にした場合の Ps-TOF 測定によりさらなる性能評価を行い、Ps-BEC 実現に最適な Ps 生成・濃縮・冷却材開発を進めていく。

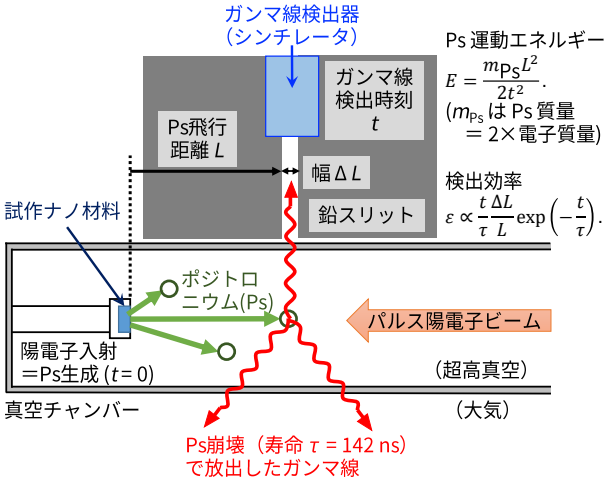

図 2.3.10: ポジトロニウム飛行時間 (Ps-TOF) 測定実験の概念図。

一方、Ps レーザー冷却原理実証実験においては、10 ns 程度のパルス時間内に大量に生成された Ps が 142 ns の寿命でガンマ線に崩壊するため、ガンマ線検出器（シンチレータ）信号がパイルアップし、解析を困難にしている。従来、周波数フィルターを用いた逆畳み込み (Wiener deconvolution) 法によってパイルアップした波形から個別のガンマ線パルス信号を識別していたが、解析に時間がかかるうえ、パイルアップ確率が高くなると識別性能が悪化する問題があった。そこでこの問題を解決するため、機械学習を用いた逆畳み込み法の開発を行っている。まず、従来法による逆畳み込み結果を「正解」とした教師あり学習を試みた。さまざまな手法を試した結果、敵対的生成ネットワーク (Generative Adversarial Network, GAN) による解析（図 2.3.11）が最も高い性能を発揮し、従来法に比べて高いパルス識別性能を示した。現在、詳細な性能評価を進めるとともに、従来法に頼らない、より効率的かつ識別性能の高い手法の開発を行っている。

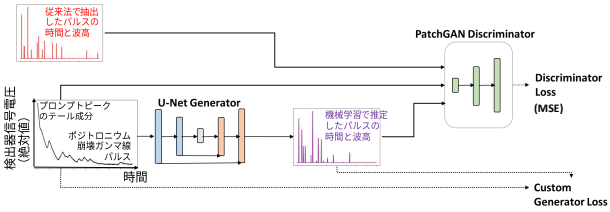

図 2.3.11: シンチレータ信号におけるパイルアップ識別のための機械学習ネットワーク構成図。

多波長観測による暗黒物質の間接探索

宇宙にはまだ多くの謎が残されているが、その謎の一つが暗黒物質の正体である。宇宙の 27 %を占めると考えられている暗黒物質は目で見ることができず、何でできているのかもわかっていない。ミュー粒子の異常磁気能率の測定結果から、質量 500 GeV 程度の超対称性粒子が暗黒物質であることが示唆される。この暗黒物質は銀河中心で対消滅し、その時に放出された高エネルギー電子から二次的に電波やガンマ線が放出される。矮小楕円体銀河の一つである Draco 銀河を対象とし、予想される電波強度を計算した。また、インドの電波干渉計である GMRT の Draco 観測データを解析し、暗黒物質の探索をおこなった。解析にあたっては、バックグラウンド源となる背景電波点源の除去を慎重におこなった。その結果、暗黒物質は見つからなかったが、50 ∼ 100 mJy 程度の電波放出に対する積分上限値が得られた（図 2.3.12）。ただし、この上限値には電波干渉計に特有な missing flux と呼ばれる効果が考慮されていないため、今後は missing flux の寄与を見積もる。また、より高感度な電波干渉計での観測も予定している。

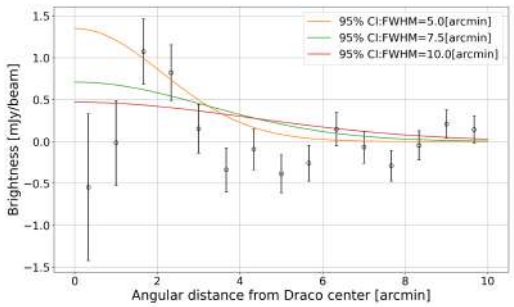

図 2.3.12: Draco 矮小楕円体銀河からの暗黒物質起源電波探索結果。横軸が Draco 中心からの角度距離、縦軸が電波強度で、エラーバー付きのデータ点とともに予想されるシグナルの上限値曲線を示す。

ミリ波を用いた光と弱い結合をもつ粒子の探索

パラフォトンは、標準模型を超えた新しい物理で予言される extra $U(1)$ ゲージボソンであり、暗黒物質の候補でもある。パラフォトンは通常の光子と混合を起こすため、パラフォトン暗黒物質が導体を通過した場合、導体表面において微小な通常光子の反射をもたらす。この微小な反射は、パラフォトン質量を反映したエネルギーをもつため、超伝導ミリ波検出器（SIS 検出器）とアルミ球面ミラーを利用して、ミリ波質量領域のパラフォトン探索をおこなった。探索範囲は、検出器の帯域幅に相当する 216 ∼ 264 GHz の領域で、各周波数において 40 分の観測をおこなった。また、GHz 帯のノイズが問題となるため、局部発信周波数をずらしながら測定をおこなうことで、ヘテロダイン後のノイズを同定し、除去をおこなった。今後、解析によって暗黒物質の発見を目指す。

2.3.3 基礎科学への応用を目指した量子技術研究

近年急速に発展している量子コンピューターや人工知能 (Artificial Intelligence, AI) の技術を基礎科学研究に応用すべく、どのような研究にどう応用するか、という点を含め、量子センサー開発などハード・ソフト両面の基礎的な研究を進めている。

行列積状態を用いた変分量子固有値ソルバーの実装と場の理論への応用

場の理論の一分野である量子色力学はハドロンの構成や相互作用を記述する理論であり、主に格子 QCD に対するモンテカルロ法によって数値的に調べられている。そして数値計算を通じてこれまでいくつもの物理量が計算され理論の検証に寄与してきた。しかしモンテカルロ法には符号問題という課題が存在し、特に有限密度の原子核やクォークなどの計算が困難となっている。

これに対し、量子状態を扱うことにより高い計算能力が期待されている量子コンピュータを用いた。特に物理系のシミュレーションとしては量子コンピュータによる状態生成と古典コンピュータによる最適化計算を行い基底状態を求める変分量子固有値ソルバー (VQE) というアルゴリズムを用いた。ただし現在の量子コンピュータはノイズや量子ビットの制限から複雑な問題を扱うことは厳しい。そこで物性物理や機械学習分野にて計算リソースの削減に用いられているテンソルネットワークを活用することで、探索する空間の大きさや量子ビット数の観点から効率的なアルゴリズムの実装に取り組んだ。

以上より、本研究では QCD といくつもの共通点を有する Schwinger モデルに対し、テンソルネットワークの一つである行列積状態を適用した VQE と従来の VQE との性能の比較を行った。収束性能の比較に関する結果を図 2.3.13 に示す。バイオリンプロットと呼ばれ、厳密対角化の値に対するそれぞれの VQE の収束値の比の分布を示している。左の 3 種類のグラフは行列積状態を用いた VQE、中央と右の 3 種類のグラフは従来の VQE による結果を示しており、テンソルネットワークを用いることで高い収束性能が実現できることを確認できた。今後は Schwinger モデルの臨界点付近や時間発展した場合の収束性能について取り組んでいきたい。

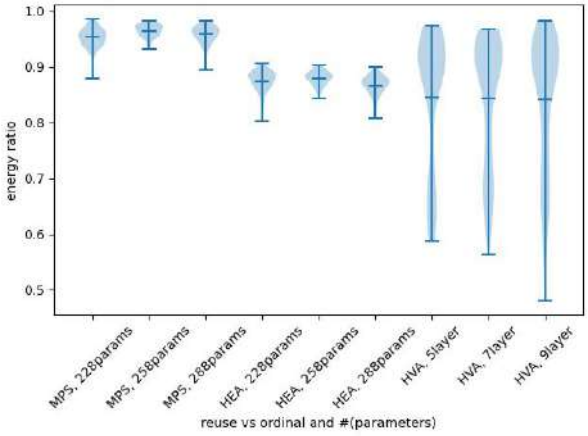

図 2.3.13: 収束性能の比較（バイオリンプロット）。

＜報文＞

(原著論文)

[1] S. Asai, Y. Kanazawa, T. Moroi, and T. Sichanugrist, “Observing axion emission from supernova with collider detectors”, Phys. Lett. B **829**, 137137 (2022).

[2] K. Michishio, H. Higaki, A. Ishida, and N. Oshima, “Efficient positron trapping and extraction with a center-hole SiC remoderator”, New J. Phys. **24**, 123039 (2022).

The ATLAS Collaboration

[3] JHEP **08** (2022), 087

[4] JHEP **06** (2022), 005

[5] Phys. Rev. D **106** (2022) no.3, 032005

[6] Phys. Rev. D **106** (2022) no.3, 032008

[7] JHEP **06** (2022), 063

[8] JHEP **11** (2022), 040

[9] JHEP **08** (2022), 104

[10] Phys. Rev. D **105** (2022) no.9, 092002

[11] Eur. Phys. J. C **82** (2022) no.11, 988

[12] Eur. Phys. J. C **82** (2022) no.7, 608

[13] JHEP **08** (2022), 027

[14] Phys. Rev. Lett. **129** (2022) no.6, 061803

[15] Eur. Phys. J. C **82** (2022), 717

[16] JHEP **08** (2022), 175

[17] Phys. Rev. D **105** (2022) no.9, 092012

[18] Eur. Phys. J. C **82** (2022) no.7, 606

[19] Phys. Rev. D **106** (2022) no.5, 052001

[20] Eur. Phys. J. C **82** (2022) no.5, 438

[21] JHEP **08** (2022), 089

[22] Phys. Lett. B **830** (2022), 137106

[23] Eur. Phys. J. C **82** (2022) no.4, 334

[24] Phys. Lett. B **829** (2022), 137066

[25] Phys. Rev. D **105** (2022) no.9, 092003

[26] Phys. Rev. C **105** (2022) no.6, 064903

[27] JHEP **06** (2022), 097

[28] JHEP **03** (2022), 041

[29] Eur. Phys. J. C **82** (2022) no.4, 374

[30] Phys. Rev. D **105** (2022) no.1, 012006

[31] Eur. Phys. J. C **82** (2022) no.7, 622

[32] Eur. Phys. J. C **82** (2022) no.1, 95

[33] JHEP **01** (2022), 063

[34] JINST **17** (2022) no.01, P01013

[35] Comput. Softw. Big Sci. **6** (2022), 7

[36] Eur. Phys. J. C **82** (2022) no.2, 105

[37] Phys. Lett. B **829** (2022), 137077

[38] Phys. Rev. D **105** (2022) no.1, 012001

[39] Eur. Phys. J. C **82** (2022) no.3, 223

[40] Eur. Phys. J. C **82** (2022) no.3, 206

[41] Phys. Lett. B **824** (2022), 136832

[42] Phys. Rev. Lett. **127** (2022), 271801

[43] Eur. Phys. J. C **82** (2022) no.1, 7

[44] Comput. Softw. Big Sci. **6** (2022) no.1, 3

(会議抄録)

[45] K. Shu, K. Yamada, K. Hashidate, A. Ishida, T. Namba, S. Asai *et al.*, "Development of a porous silica cavity for laser excitation of confined positronium", JJAP Conf. Proc. **9**, 011202 (2023).

(国内雑誌)

[46] 石田明, "真空中におけるポジトロニウムのレーザー冷却", Photon Factory Activity Report 2021 **39**, 183 (2022).

(学位論文)

[47] 寺尾萌里乃, "行列積状態を用いた変分量子固有値ソルバーの実装と場の理論への応用", 修士論文 (2023).

[48] 山下恵理香, "高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けた初段ミューオントリガーの開発と検証", 修士論文 (2023).

(著書)

[49] "Conceptual design of an experiment at the FCC-hh, a future 100 TeV hadron collider", M. Mangano and W. Riegler (eds.), M. Aleksa, P. P. Allport, S. Asai *et al.*, CERN Yellow Reports: Monographs, CERN-2022-002 (CERN, Geneva, 2022).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[50] C. Kawai "Indirect detection of Dark Matter with radio observation", International Conference on the Physics of the Two Infinities (ILANCE Conference 2023), March 29, 2023, Kyoto.

招待講演

[51] A. Ishida, "Recent progress in positronium laser cooling", 19th International Conference on Positron Annihilation (ICPA-19), August 24, 2022, Helsinki (Online).

(国内会議)

一般講演

[52] 山下恵理香, "HL-LHC ATLAS ミューオントリガーシミュレータの開発及び、それを用いた性能評価と実機の検証", 第 29 回 ICEPP シンポジウム、2023 年 2 月 20 日、志賀レークホテル、長野.

日本物理学会:2022 年秋季大会: 岡山理科大学:2022 年 9 月

[53] 石田明, "ポジトロニウムのボース・アインシュタイン凝縮 I(全体像と高密度ポジトロニウム生成)".

[54] 荻野恭輔, "超伝導 SIS 検出器を用いたミリ波領域におけるパラフォトン暗黒物質探索".

[55] 河井力, "電波観測による暗黒物質の間接探索".

日本物理学会:2022 年秋季大会: 東京工業大学:2022 年 9 月

[56] 石田明, "飛行時間測定によるポジトロニウム生成用試作ナノ材料の性能評価".

[57] R. W. Gladen, "Positronium Laser Cooling: Improving detector pulse analysis efficiency via machine learning".

京都大学複合原子力科学研究所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」: 京都大学複合原子力科学研究所およびオンライン:2022 年 12 月

[58] 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生成用試作ナノ材料のポジトロニウム飛行時間測定による性能評価".

[59] R. W. Gladen, "Positronium Laser Cooling: Improving detector pulse analysis efficiency via machine learning".

日本物理学会:2023 年春季大会: オンライン開催:2023 年 3 月

[60] 山下恵理香, “高輝度 LHC-ATLAS 実験初段ミューオントリガー:実機の入出力を再現するシミュレータの開発及びそれを活用した実機の検証と性能評価”.

[61] 河井力, “電波観測を用いた暗黒物質の間接探索”.

[62] 荻野恭輔, “超伝導検出器を用いたミリ波帯域におけるパラフォトン暗黒物質探索”.

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

Type-I, II, III の質量ゼロディラック電子における熱電効果の理論的研究

固体中のディラック電子系は楕円状のフェルミ面を持つ type-I、双曲線状のフェルミ面を持つ type-II、そしてそれらの「臨界点」である type-III に区分される。3 種類のディラック電子の電気伝導と熱電応答を統一的に調べるため、簡潔な強束縛模型を用いて線形応答理論に基づく応答係数の計算を行った。その結果、type-III ディラック電子の電気伝導・熱電応答の振る舞いは定性的には type-I に類似すること、また熱電応答は type-I 側の最適な傾きで最大化されることを見出した。[8]

ギャップを持つ二次元ディラック電子系でのスピン流

質量のある (エネルギーギャップがある) ディラック電子系について、スピンの関与した特異な輸送現象を明らかにした。スピン軌道相互作用によってギャップが開いた場合、一般にトポロジカルな量であるスピンに依存したベリー曲率が生じる。この場合にはスピンホール効果や磁場中のスピン伝導度など、スピン流が関与した物理量にベリー曲率の寄与が典型的に現れることがわかった。この現象は、擬 2 次元有機導体である α-$(BETS)_2I_3$ において期待でき、そのスピンホール伝導度の大きさは Pt に匹敵する大きなものであると評価された。[33, 47, 49]

3.1.2　熱応答・熱電応答の理論

カルコパイライト $\mathbf{Cu_{1+x}Fe_{1-x}S_2}$ におけるマグノンドラッグ効果の理論的研究

自然界に豊富に存在するカルコパイライト $Cu_{1+x}Fe_{1-x}S_2$ は、823K で反強磁性体に転移する磁性半導体である。この物質のゼーベック係数は常温付近において大きなピーク構造を示すが、その起源は明かにされていない。そこで本研究では微視的理論によりゼーベック係数を解析し、このピークの起源として反強磁性マグノンドラッグの可能性があることを明らかにした [4, 42, 53, 57]。

強相関電子系の電気・熱輸送と熱電効果

$YbAl_3$ や $YbCu_4Ag$ などの f 電子系化合物は大きな熱電パワーファクターをもつことが知られている。これら大きなパワーファクターと Kadowaki–Woods 則の下方への破れとの関連を指摘するとともに、電流と熱流に対する電子–電子ウムクラップ散乱の効果の違いによって、Wiedemann–Franz 則が大きく下方へと破れる可能性があることを示した。これらは強相関電子系の熱電性能の向上に向けたひとつの指針を与える。また、銅酸化物高温超伝導体や鉄系超伝導体などの量子臨界領域では温度に比例する電気抵抗とともに、ゼーベック係数に対数的な温度依存性をもつ質量増強因子が現れることが実験的に観測されている。量子 xy モデルのトポロジカルな揺らぎによって散乱されるフェルミオンのモデルに基づき、久保公式を正確に解くことにより、これらの観測事実を導き出すとともに、電子の熱伝導率には質量増強因子が現れないことを明らかにした。[6, 34, 50, 71]

データ駆動型アプローチによる熱電物質の伝導度スペクトルの推定

熱電効果（ゼーベック効果）は熱流の種類に依存し多様な起源があるが、電子の寄与による熱電効果に関して電流と熱流に関する Sommerfeld-Bethe 関係式と呼ばれる関係式が成立する。この関係式を用いると、伝導度スペクトルのみによりゼーベック係数を求めることができるため、第一原理計算による大規模な物質探索において新たな熱電物質を見つける上で重要な手法となりつつある。しかし、伝導度スペクトルは状態密度や群速度に加えて電子の輸送緩和時間に依存するため、理論的に求めることは難しいという問題がある。そこで、機械学習の手法により Sommerfeld-Bethe 関係式の逆問題を解くことで、電気伝導度とゼーベック係数の実験データから伝導度スペクトルや化学ポテンシャルを推定する手法を開発した。この手法を Ta_4SiTe_4 の実験データに適用することで伝導度スペクトルや化学ポテンシャルに加えて電子の寄与による熱伝導率や性能指数の上限を予測できることを明らかにした。さらに、伝導度スペクトルや化学ポテンシャルのドーピング依存性も明らかにした [2, 9]。

熱電応答における弱局在

乱れの強い系では Anderson 局在と呼ばれる現象が見られる。この効果は電気伝導度に対しては不利に働くが、熱電応答においてどのような影響を持つかは明らかになっていなかった。我々は、特に不純物による弱局在を対象に、線形応答理論により熱電応答係数の解析を行った。その結果、典型的な不純物半導体において、低温での Seebeck 係数や Power

Factor が弱局在により増強される可能性を見出した。[52, 68]

電子ホール散乱による半金属の輸送現象

近年観測された、半金属における Wiedemann-Franz 則の破れに起因して、電子ホール散乱を持つ半金属の輸送現象が議論されている。我々は、電子ホール散乱を持つ半金属の Boltzmann 方程式を、非弾性散乱を正確に扱うことのできる変分法によって解析した。熱電効果を含む輸送係数を詳細に調べ、電子ホール散乱の効果によって熱電性能が向上しうることがわかった。また、磁場下における Hall Lorenz 比の Wiedemann-Franz 則の破れについて、具体的な計算を行い議論した。[22, 30, 37, 56, 63, 69, 72]

励起子絶縁体の熱応答

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 (励起子) を形成し、それが BEC 的あるいは BCS 的に凝縮した状態は励起子絶縁体と呼ばれる。励起子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し、興味深い熱応答を示す可能性がある。我々はこの励起子絶縁体における熱応答を理論的に計算した。その結果、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 関係式を破る励起子絶縁体特有の寄与が現れることが分かった。そして、ドーピングや磁場の特定の条件下でゼーベック係数へ特に大きな寄与が現れ得ることを示した。

スピン流を介した横型熱発電

Seebeck 効果は温度勾配に平行に電圧が生じる現象だが、工学応用上は温度勾配に垂直に電圧を取り出すことが望ましいため、デバイス設計を工夫する必要がある。我々は、スピン自由度を介したシンプルな構造に基づく新しい横型熱発電機構を提案した [3, 11]。具体的には、スピン Hall 効果が強く起こる物質を考え、温度勾配を加えることで過渡的にスピン流が温度勾配に垂直に生じる現象を用い、さらに強磁性体を接合することで電圧に変換するという方法である。その結果、大きな起電力が得られることを示した。

ノーダルライン半金属薄膜の熱電性能

近年、効率的な熱電変換を可能にする材料の探索が盛んに行われている。熱電性能は、性能指数 ZT で評価されることが一般的であり、1 以上のものが実用化に耐えうるものとされている。大きな ZT を獲得するためには、大きなゼーベック係数を持ちながら熱伝導度を抑制することが必要となる。我々は、ノーダルライン半金属薄膜のドラムヘッド型表面状態が鋭い状態密度を与え、結果として大きなゼーベック係数を持つこと、並びに表面状態が不純物に頑強であることによって熱伝導度の一部の寄与を大きく抑制できることを提案し、10 程度の ZT が実現されうることを提案した。[10]

3.1.3 超伝導の理論

ノーダルライン半金属における超伝導の理論

一次元のバンド交差を持つノーダルライン半金属は、非自明なバンド・トポロジーを持つ超伝導の舞台として注目を集めており、上部臨界磁場に特異な振る舞いを持つ物質が報告されている。我々は、ノーダルライン半金属の有効モデルに対して準古典グリーン関数の手法を適用して上部臨界磁場の計算を行った。それにより、上部臨界磁場の異方性および急峻な温度依存性の起源を解明した。特に、低温での上部臨界磁場の線形な温度依存性が、ノーダルラインに起因する特異なフェルミ面の形状に由来していることを、理論的に示すことに成功した。[18, 36, 43]

モットギャップを超える励起による絶縁体-導体転移

最近、モット絶縁体に光を当てることによって絶縁体-導体の相転移を引き起こす実験がなされている。基底状態では電子の二重占有状態とホールの状態が束縛状態を形成して絶縁体となっているが、光励起によって自由な二重占有状態が生じたと考えられる。このことを調べるために、二重占有状態の密度が一定値以上になるように固定した変分法を開発して調べた。その結果、実験と比較できるような金属状態が実現することが分かった。[24]

3.1.4 軌道磁場効果

軌道–Zeeman 交差帯磁率の量子化

帯磁率には軌道、スピン Zeeman 効果、およびそれらの交差項 (軌道–Zeeman 項) の 3 つの寄与がある。なかでも軌道–Zeeman 項は 2 次元のトポロジカル絶縁体で普遍的な値に量子化されることが最近の我々の研究で明らかになっている。我々は 2 次元トポロジカル絶縁体の模型の 1 つである Kane-Mele 模型において、これら 3 つの寄与について詳細に評価した。この手法では、ブリルアンゾーン全体、またエネルギー的に離れたバンドを含むすべてのバンドの寄与を取り込むことができる。その結果、内核電子の反磁性等の補正が得られた。また、軌道–Zeeman 項の量子化が確認され、絶縁体状態および金属状態における振る舞いが明らかになった。さらに、この量子化を実験的に検出する方法について議論した。[13, 29]

エネルギー変化のあるノーダルライン模型における常磁性–反磁性異方性

近年、トポロジカル物質における軌道磁気応答が興味を持たれている。その中で、ノーダルライン半金属 ZrSiS において磁場の向きによって常磁性と反磁性が入れ替わる現象が実験的に見出された。その解明に向けて我々はノーダルライン上でエネルギーが変化するようなシンプルな模型を提案し、その軌道帯磁率を調べた。その結果、波数空間の 2 次元面

内にあるノーダルラインに関して垂直な磁場に対しては常磁性が、平行な磁場には反磁性が発生することが明らかになった。[14, 51] また、この研究の過程で、松原和を高速に計算する ir-basis の手法が軌道帯磁率の計算にも応用可能であることを示した。[15]

3.1.5 有機伝導体の理論

ノーダルライン半金属 HMTSF-TCNQ における軌道反磁性と電荷密度波

HMTSF-TCNQ は約 30K で電荷密度波転移する有機電荷移動錯体として知られている。この物質に対して第一原理計算を行い、開いたノーダルラインをもつトポロジカル半金属であることがわかった。さらにタイトバインディング模型を作り、電子状態を詳細に調べた。電荷密度波転移温度以下では、格子変位によりノーダルラインが閉じて、変形されることが明らかになった。さらに、スピン格子緩和時間 T_1 と軌道帯磁率を評価した。軌道帯磁率に低温で大きな反磁性のプラトーが現れるという異常が実験から明らかになっているが、バンド間効果、不純物散乱およびノーダルラインの変形を考慮した我々の計算は、これを絶対値を含めてよく再現した。[28, 29]

Floquet 理論を用いた光誘起相転移の理論研究

近年のレーザー技術の著しい発展に触発され、我々は光照射下の α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ の振舞いをフロケ理論を用いて解析した。その結果、円偏光を照射したときは Chern 絶縁体への相転移を、直線偏光を照射したときは 2 つの Dirac 点に対応して生じる創発的反平行磁束量子ペアが対消滅することを予言した。円偏光と直線偏光の中間とも言える楕円偏光を照射したときは 2 つの Dirac 点の衝突・崩壊を伴う Chern 絶縁体から通常のバンド絶縁体へのトポロジカル相転移を示した。さらに電荷秩序を含めた解析を行うことで、バンド構造にある 2 つの Dirac 点のうち片方の Dirac 点でギャップレスで、もう片方の Dirac 点でギャップが開くハーフバレーメタル相の実現を予言した。[17, 26, 27, 35, 39, 40, 41, 54, 58]

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-F$_2$PhCO$_2$)$_4$}$_2${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。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。[45, 48, 59]

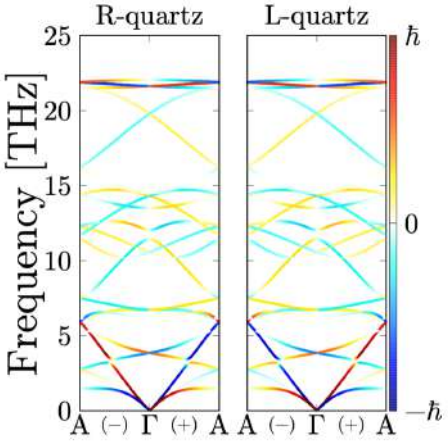

図 3.1.1: α-quartz のフォノンの分散関係。カラーバーはフォノンが持つ角運動量の大きさを表す。

有機伝導体における２次元ディラック電子系のゼーベック係数

圧力下の α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ は２次元ディラック電子系を持つと考えられているが、そのゼーベック係数を不純物散乱の効果と電子格子相互作用を考慮して調べた。その結果、ゼーベック係数は高温で正であり、ある温度において最大値をとるが、低温にすると符号反転が起こりゼーベック係数が負になるという特異な温度依存性を示すことがわかった。これは分子の積層方向に並行な成分においても、垂直な成分においても生じる。特異な温度依存性は、このディラック電子系特有の化学ポテンシャルの温度依存性からくることが分かった。今後の α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ の実験結果と比較が期待される。[25]

3.1.6 カイラリティの物理

カイラルフォノンの輸送理論

結晶中の原子が平衡位置周りを回転運動するモードであるカイラルフォノンが近年注目されている。カイラルフォノンは角運動量を持ち、特定の結晶に温度勾配を印加することでフォノンの角運動量を生成できることが知られている。これまでに、フォノン版の Einstein-de Haas 効果などカイラルフォノンの検出に関する理論的な提案がなされたが、輸送現象を用いた検出の詳細な温度依存性に関する研究は乏しい。今回、カイラルな結晶構造を持つ α-quartz について、熱伝導率の測定実験と適合するように緩和時間を決定し、カイラルフォノンの角運動量生成に関する熱輸送係数の温度依存性を詳細に解析することに成功した (図 3.1.1)。[20, 46, 55, 60, 61, 70]

キラリティ誘起スピン選択性

CISS と呼ばれる特異な現象のメカニズム解明を目的に研究を行った。CISS とはキラル物質を通過した電子が物質のキラリティに依存したスピン偏極を受ける現象のことである。キラル物質を通過させるだけで簡単にスピン偏極が得られることで注目を集めているが、その仕組みは明らかにされていない。そこでスピン流またはスピン磁化のいずれかの現象で CISS を説明できるか検証を行った。対称性の解析から、CISS をスピン流により説明することは難しいと明らかになった。一方、物質をモデル化した模型ではスピン磁化が現れることが明らかとなった [21, 31, 38, 44]。

＜受賞＞

[1] 第 27 回 (2022) 日本物理学会論文賞 The 27th Outstanding Paper Award of the Physical Society of Japan: “Three-Dimensional Dirac Electrons at the Fermi Energy in Cubic Inverse Perovskites: Ca_3PbO and Its Family” by T. Kariyado and M. Ogata.

[2] **Award** JPSJ Papers of Editors’ Choice: “Data-Driven Reconstruction of Spectral Conductivity and Chemical Potential Using Thermoelectric Transport Properties” [9]

[3] **Selected as Featured and Scilight of APL** “Thermoelectric power generation via transverse thermo-spin conversions” [11]

＜報文＞

(原著論文)

[4] H. Matsuura, M. Ogata, N. Tujii, and T. Mori: in preparation. “Theory of thermoelectric effect based on antiferromagnetic magnon drag in natural chalcopyrite $Cu_{1+x}Fe_{1-x}S_2$”

[5] H. Matsuura, H. Mukuda, and K. Miyake: AAPPS Bulletin **32**, 30 (2022). “Valence skipping phenomena, charge Kondo effect, and superconductivity”

[6] H. Maebashi and C. M. Varma: arXiv:2207.11982. “Quantum-critical transport of marginal Fermiliquids”

[7] T. Yamamoto, M. Ogata, and H. Fukuyama, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 044704 (2022). “Thermoelectric Effect in Mott Variable-Range Hopping”

[8] T. Mizoguchi, H. Matsuura, and M. Ogata: Phys. Rev. B **105**, 205203 (2022). “Thermoelectric transport of type-I, II, and III massless Dirac fermions in a two-dimensional lattice model”

[9] T. Hirosawa, F. Schafer, H. Maebashi, H. Matsuura, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 114603 (2022) (Editors’ choice). “Data-Driven Reconstruction of Spectral Conductivity and Chemical Potential Using Thermoelectric Transport Properties”

[10] M. Hosoi, I. Tateishi, H. Matsuura, and M. Ogata: Phys. Rev. B **105**, 085406 (2022). “Thin films of topological nodal line semimetals as a candidate for efficient thermoelectric converters”

[11] J. Fujimoto and M. Ogata, Appl. Phys. Lett. **120**, 122404 (2022). “Thermoelectric power generation via transverse thermo-spin conversions” [selected as Featured and Scilight of APL]

[12] J. Fujimoto and M. Ogata, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 054603 (2022). “Seebeck Effect of Dirac Electrons”

[13] S. Ozaki, and M. Ogata: Phys. Rev. B **107**, 085201 (2023). “Topological contribution to magnetism in the Kane-Mele model: An explicit wave-function approach”

[14] S. Ozaki, I. Tateishi, H. Matsuura, T. Koretsune, and M. Ogata: in preparation. “Dia- to paramagnetic anisotropy of the orbital magnetic susceptibility emerging from the nodal line with energy variation”

[15] M. Wallerberger, S. Badr, S. Hoshino, S. Huber, F. Kakizawa, T. Koretsune, Y. Nagai, K. Nogaki, T. Nomoto, H. Mori, J. Otsuki, S. Ozaki, T. Plaikner, R. Sakurai, C. Vogel, N. Witt, K. Yoshimi, and H. Shinaoka: Software X **21**, 101266 (2023). “sparse-ir: Optimal compression and sparse sampling of many-body propagators”

[16] K. Kitayama and M. Ogata: in preparation. “Momentum and energy tuning of Weyl points in Floquet Weyl semimetal by using bicircular light”

[17] K. Kitayama, M. Ogata, M. Mochizuki, and Y. Tanaka: J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 104704 (2022). “Predicted novel type of photoinduced topological phase transition accompanied by collision and collapse of Dirac-cone pair in organic salt α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$”

[18] J. Endo, H. Matsuura, and M. Ogata: Phys. Rev. B **107**, 094521 (2023). “Theoretical analysis of anisotropic upper critical field of superconductivity in nodal-line semimetals”

[19] M. Kato, H. Matsuura, M. Udagawa, and M. Ogata: Phys. Rev. B **106**, 014423 (2022). “Flux roughening in spin ice with mixed $\pm J$ interactions”

[20] K. Ohe, H. Shishido, M. Kato, H. Matsuura, and Y. Togawa: submitted. “Chirality-Induced Selectivity of Phonon Angular Momenta in Chiral Quartz Crystals”

[21] R. Hirakida, J. Fujimoto, and M. Ogata: Phys. Rev. B **106**, 085127 (2022). “Chirality-dependent second-order spin current in systems with time-reversal symmetry”

[22] K. Takahashi, H. Matsuura, H. Maebashi, and M. Ogata: Phys. Rev. B **107**, 115158 (2023). “Thermoelectric properties in semimetals with inelastic electron-hole scattering”

[23] Z. Chi, G. Qu, Y.-C. Lau, M. Kawaguchi, J. Fujimoto, K. Takanashi, M. Ogata, and M. Hayashi: Phys. Rev. B **105**, 214419 (2022). “Spin Hall effect driven by the spin magnetic moment current in Dirac materials”

[24] H. Yokoyama, K. Kobayashi, T. Watanabe, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 124705 (2022). “Excited States beyond Mott Gap in Half-Filled-Band Hubbard Model”

[25] Y. Suzumura and M. Ogata: arXiv:2211.00966. “Seebeck Coefficient of Two-dimensional Dirac Electrons in Organic Conductor under Pressure”

(会議抄録)

[26] K. Kitayama, M. Ogata, Y. Tanaka, and M. Mochizuki: Proceedings of LT29 “Theoretical studies of photoinduced topological phase transitions in organic salt α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$”

(国内雑誌)

[27] 望月維人、北山圭亮、田中康寛、小形正男：固体物理 **57**, 397 (2022). “有機導体 α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ の光誘起トポロジカル相転移の理論研究”

[28] 尾崎壮駿、立石幾真、松浦弘泰、小形正男: 日本物理学会誌 **77**, 751 (2022). “分子性導体におけるノーダルラインとそれによる軌道帯磁率”

(学位論文)

[29] 尾崎壮駿：“Anomalous orbital magnetism in topological materials” (トポロジカル物質における特異な軌道磁性) (東京大学大学院理学系研究科・博士論文)

[30] 高橋慶伍：“電子ホール散乱による半金属の輸送現象” (Transport phenomena in semimetals with electron-hole scattering) (東京大学 大学院理学系研究科・修士論文)

[31] 開田亮佑：“時間反転対称性を有する系におけるキラリティに依存したスピン偏極現象” (Chirality-dependent spin polarization phenomena in systems with time-reversal symmetry) (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)

(著書)

[32] 松浦弘泰、小形正男：計算科学を活用した熱電変換材料の研究開発動向（分担執筆）“熱電理論における微視的理論の方法：フォノンドラッグ効果を中心に”

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[33] M. Ogata, S. Ozaki, and H. Matsuura: The 14th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM2022). “Anomalous spin transport properties and orbital magnetic susceptibility in gapped Dirac electrons with tilting”

[34] H. Maebashi, K. Takahashi, H. Matsuura, and M. Ogata: 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (Sapporo, Japan, August 18–24, 2022). “Lorenz ratio of anisotropic Fermi liquid”

[35] K. Kitayama, M. Ogata, Y. Tanaka, and M. Mochizuki: LT29. “Theoretical studies of photoinduced topological phase transitions in organic salt α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$”

[36] J. Endo, H. Matsuura, and M. Ogata: LT29. “Upper critical field of superconductivity in nodal-line semimetals”

[37] K. Takahashi, H. Matsuura, H. Maebashi, and M. Ogata: LT29. “Transport in semimetals: contribution from electron-hole scattering”

[38] R. Hirakida, J. Fujimoto, and M. Ogata: LT29. “The chirality-dependent spin polarization phenomenon in systems with time-reversal symmetry”

[39] K. Kitayama, M. Ogata, Y. Tanaka, and M. Mochizuki: The 14th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM2022). “Theoretical studies of photoinduced topological phase transitions in organic salt α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$”

[40] K. Kitayama, M. Ogata, Y. Tanaka, and M. Mochizuki: YIPQS long-term and Nishinomiya-Yukawa memorial workshop “Novel Quantum States in Condensed Matter 2022”. “Theoretical studies of photoinduced topological phase transitions in organic salt α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$”

[41] K. Kitayama, M. Ogata, Y. Tanaka, and M. Mochizuki: 2nd International symposium in Trans-scale quantum science (TSQS2022). “Theoretical studies of photoinduced topological phase transitions in organic salt α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$”

[42] M. Ogata, H. Matsuura, N. Tujii, and T. Mori: APS March Meeting (Las Vegas, NV, USA, 2023, 3.5–10). “Theory of thermoelectric effect based on antiferromagnetic magnon drag in natural chalcopyrite $Cu_{1+x}Fe_{1-x}S_2$”

[43] J. Endo, H. Matsuura, and M. Ogata: APS March Meeting. “Theoretical analysis of anisotropic upper critical field in nodal-line semimetals”

[44] R. Hirakida, J. Fujimoto, and M. Ogata: APS March Meeting. “Chirality-dependent second-order spin current in systems with time-reversal symmetry”

[45] M. Kato, H. Matsuura, M. Udagawa, and M. Ogata: International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2022 (Paris/online). “Flux localization by magnetic charge in two-dimensional spin ice”

[46] M. Kato, H. Matsuura, and M. Ogata: 2nd International Symposium on Trans-scale Quantum Science (The University of Tokyo/online). “Theory on transport properties of chiral phonons and its application to α-quartz”

招待講演

[47] M. Ogata, S. Ozaki, and H. Matsuura: 2nd Global Summit on Condensed Matter Physics (CONMAT2022) (Dubai, UAE, October 17–19, 2022 online). “Topological nature and anomalous spin transport properties of Dirac electrons in organic conductors”

[48] 加藤将貴：日本物理学会 (春季大会 online). 領域 7, 領域 3, 領域 4, 領域 5, 領域 8, 領域 10 合同シンポジウム “Metal-organic frameworks: Recent evolution for functional and quantum materials (Part I)”. “Theoretical study of magnetic control by gas adsorption in metal-organic frameworks”

(国内会議)

一般講演

[49] 小形正男：日本物理学会（秋季大会 東工大, 2022, 9.12–15). “Tilting およびギャップがあるディラック電子系のスピン輸送現象”

[50] 前橋英明, 高橋慶伍, 松浦弘泰, 小形正男：日本物理学会 (秋季大会). “異方的フェルミ液体のローレンツ比：ウムクラップ散乱の効果”

[51] 尾崎壮駿、立石幾真、松浦弘泰、是常隆、小形正男：日本物理学会（秋季大会）“エネルギー上下のあるノーダルライン半金属における軌道帯磁率”

[52] 遠藤純矢、松浦弘泰、小形正男：日本物理学会（秋季大会）“熱電応答における弱局在の理論”

[53] 松浦弘泰, 小形正男, 辻井直人, 森孝雄：日本物理学会 (春季大会 online, 2023, 3.22–3.25). “カルコパイライト $Cu_{1+x}Fe_{1-x}S_2$ におけるマグノンドラッグ効果の理論的研究”

[54] 北山圭亮、小形正男、田中康寛、望月維人：日本物理学会 (春季大会 online). “α 型有機導体における光誘起ハーフバレー金属相の理論研究”

[55] 加藤将貴、松浦弘泰、戸川欣彦、小形正男：日本物理学会 (春季大会 online). “カイラルフォノンの熱輸送の理論と α-quartz への応用”

[56] 高橋慶伍、松浦弘泰、前橋英明、小形正男：日本物理学会 (春季大会, online). “電子ホール散乱を持つ半金属の磁場下での Hall Lorenz 比”

[57] 松浦弘泰, 小形正男, 辻井直人, 森孝雄：日本熱電学会 (新潟県長岡市, 2022. 8.8–10). “カルコパイライト $Cu_{1+x}Fe_{1-x}S_2$ におけるマグノンドラッグ効果の理論的研究”

[58] 北山圭亮、小形正男、田中康寛、望月維人：有機固体若手の会 2022 冬の学校. “α 型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”

[59] 加藤将貴、徳宿邦夫、松浦弘泰、宇田川将文、小形正男：ISSP 短期研究会 (online). “金属有機構造体の酸素吸着による磁気制御”

[60] 加藤将貴、松浦弘泰、小形正男：Stat & QuantPhys Autumn School 2022 (online). “Theory on transport properties of chiral phonons and its application to α-quartz”

[61] 加藤将貴、松浦弘泰、小形正男：キラル物性若手研究会 (熊本大学, 2022,11.29–12.1). “カイラルフォノンの熱輸送の理論と α-quartz への応用”

[62] 加藤将貴：キラル物性若手研究会 (物性研究所/online, 2023, 3.21). “Recent developments in chiral phonons”

[63] 高橋慶伍: 研究室横断若手研究会 (Online, 2022, 6.8) “半金属における熱電効果の理論的研究: 電子ホール散乱の寄与”

[64] 小形正男：2022 年度第 1 回成果報告会：未来社会創造事業「磁性を活用した革新的熱電材料・デバイスの開発」 2023, 3.27 (東京大学 Haseko-Kuma Hall) “磁性による熱電特性の増強に関する理論的な機構解明、マテリアルデザイン”

招待講演

[65] 松浦弘泰：科研費キックオフミーティング, (東北大学, 2022, 9.5) “Beyond Boltzmann 熱電研究の現状と今後の狙い”

[66] Hiroyasu Matsuura：IEEE Kansai/Shikoku Joint Sections Magnetics Society Chapter Lecture (Osaka Metropolitan University, 2023, 3.3) “線形応答理論に基づいた熱電理論 (Theory of Thermoelectric Effect Based on Linear Response Theory）”

[67] 松浦弘泰：研究会「トポロジカル熱電変換物性の最前線」(京都大学国際科学イノベーション棟, .2023, 3. 15–16) “熱電の理論あれこれ”

[68] 遠藤純矢：研究会「トポロジカル熱電変換物性の最前線」(京都大学国際科学イノベーション棟, .2023, 3. 15–16) “熱電における局在とフォノンドラッグの理論”

[69] 高橋慶伍：研究会「トポロジカル熱電変換物性の最前線」(京都大学国際科学イノベーション棟, .2023, 3. 15–16) “半金属のゼーベック効果: 電子ホール散乱の寄与”

[70] 加藤将貴、松浦弘泰、戸川欣彦、小形正男：ISSP ワークショップ「カイラル物質科学の新展開」 (物性研究所). “カイラルフォノンの熱輸送の理論と α-quartz への応用”

(セミナー)

[71] Hideaki Maebashi: JST 未来社会森 PJ 第 17 回コロキウム (online, 2022, 11.28) “Thermoelectric properties in strongly correlated metals with and without Umklapp scattering”

[72] Keigo Takahashi: JST 未来社会森 PJ 第 17 回コロキウム (online, 2022, 11.28) “Thermoelectric properties in semimetals with inelastic electron-hole scattering”

[73] 加藤将貴、宇田川将文：科研費基盤研究 S「強磁性トンネル接合素子の人工知能応用」月例ミーティング (大阪大学/online, 2022, 12.22–24). “人工スピンアイスにおけるフラックスメモリによるシフトレジスタの理論提案”

3.2 常行研究室

実験データに合致した答えが得られるように理論モデルのパラメータを調整するのではなく、物質を構成する原子の原子番号や質量数などの基礎的情報と物理の基本原理をもとに電子状態を計算し、分子動力学法や格子力学計算、磁性理論、超伝導理論などとも組み合わせて物質の構造物性や電子物性を非経験的に求める手法を、物性物理学における第一原理計算と言う。第一原理計算を用いると、観測や実験からは得られない物性情報を得ることや、実験に先んじた物性予測、新物質・新材料の予言を行うことが可能になる。当研究室ではそのような第一原理計算手法を中心に、さまざま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 THz 領域の複素誘電率計算手法の開発

近年、産業応用への期待から、GHz、THz 帯での物質の誘電特性計算の必要性が高まっている．この周波数帯では、格子振動に伴う電子状態変化（分極変化）が本質的に重要であり、それらを第一原理から取り扱うためには課題も多い。そこで我々は、密度汎関数理論に基づ第一原理電子状態計算、格子力学計算、分子動力学法、機械学習等を利用して、予言力のある複素誘電率計算手法の開発を行っている。

ルチル型 TiO_2 結晶の誘電関数

高い誘電率を持つことから様々な応用で期待されているルチル型 TiO_2 は、その高い非調和性でも知られている．我々は格子振動の非調和性を正確に取り込むために、第一原理的に決定した 3 次の力定数も取り込んだ自己無撞着フォノン (SCPH) 理論を用いて格子力学計算を行い、やはり第一原理計算したボルン有効電荷を用いて複素誘電関数を計算する手法を開発した。これをルチル型 TiO_2 に応用した結果、従来の摂動論による計算に比べて複素誘電率虚部にピークをフォノン振動数やフォノン線幅が大幅に改善することを示した（Fig.3.2.2）。また実験的に見つかっていたが起源が不明だった誘電関数のピークが、2 フォノンプロセスによるものであることをつきとめた [9, 14, 17, 20, 23] 。

双極子モーメントの機械学習による分子凝縮系の誘電関数計算

線形応答理論によれば、誘電率は系の双極子モーメントの時間相関関数から計算される。分子動力学法を用いて長時間の時間発展計算を行えば、原理的には大きな構造揺らぎのある分子凝縮系やポリマー材料の誘電率も計算できるが、時間発展の各ステップで

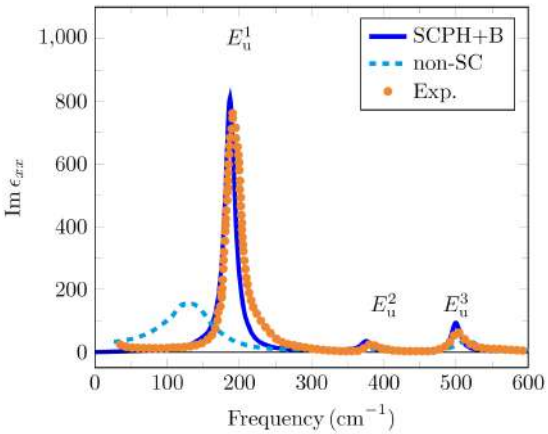

図 3.2.2: TiO_2 の複素誘電率虚部の実験値（シンボル）と SCPH 法による計算値（実線）。SCPH 法による計算は、従来法（破線）にくらべて実験値を良く再現する。

分極を精度良く求める計算コストが高く、実現が難しい。そこで今年度は、計算の高速化のため構成分子の双極子モーメントの計算を機械学習で行うスキームを開発し、液体メタノールやプロピレングリコールで高い精度を発揮することを確認した [25, 26]。

3.2.2 非熱的レーザー加工の機構解明とシミュレータの開発

フェムト秒からピコ秒程度の超短パルスによる非熱的レーザー加工は、長パルスや CW レーザーに比べて標的の熱的損傷が少ないことから、微細加工への応用が期待されているが、パルス幅による違いの原因は明らかになっていない。一方、産業上望ましい加工結果を得るためには, レーザー強度やパルス幅などのパラメータの最適化が重要になる。そこで我々は、レーザー加工の背景にある学理解明と、各パラメータが与える影響を理論計算によって評価・予測する手法の開発を目指してきた。これまでの研究では、電子エントロピーを取り入れた第一原理計算を使って、超短パルスレーザーで実現される超高温電子状態でのさまざまな物質の安定性を調べることで、電子エントロピー効果が金属の非熱的加工に本質的に重要であることを指摘した。また電子エントロピー効果を考慮した有限温度の原子間力モデルの作成や、それを用いたレーザー加工の分子動力学シミュレーション手法を開発している。

今年度は、格子系と励起された電子系が加工の時間スケールでは異なる温度にあると考えるニ温度モデルの下で、電子エントロピー効果を格子系の状態方程式の変化として取り入れた、流体力学的な定式化による金属のレーザー加工シミュレーション手法を開発した。この手法では、レーザー加工とは独立な実験や理論計算で決定したいくつかの物理パラメー

タを用いることで、レーザー強度やパルス幅を変えた場合の金属のマクロな加工深さや熱的損傷を半定量的に予測可能であり、実際に Cu や Al の加工深さの実験結果をよく再現することが確認できた。また熱的損傷については比較すべき定量的な実験データがないものの、これまで定性的に言われていたパルス幅による熱的損傷の違いが、電子エントロピー効果によって生じることを示した [12, 19, 30]。

3.2.3 データ同化構造探索手法の開発

結晶構造探索

結晶構造予測は、様々な新規物質の発見に貢献してきており、今後も効率的に材料開発を進める上で不可欠な要素になると考えられる。これまで、結晶構造予測の効率化のために「メタヒューリスティクス」と呼ばれる手法が開発されてきたが、依然としてポテンシャルエネルギーを目的関数とした原子位置の大域的最適化は計算コストの面で大きな問題となっている。そこで我々は、分子動力学法を用いたシミュレーティッドアニーリングを粉末回折実験データに「同化」させることで、効率的に原子配置の大域的最適化を行う手法を開発している [10]。この手法を用いると、粉末回折実験データのノイズが極めて大きく結晶構造解析が困難であったとしても、格子定数が特定できる場合には、結晶構造の予測が可能である [5]。

今年度は上記の手法を、従来の構造解析手法では格子定数さえ決定困難な回折実験データに対しても適用できるように改良することを試みた。新しい手法を用いると、格子定数の事前予測なしに正しい結晶構造が得られるだけでなく、複相の反射が混在する回折実験データに対しては複相を含む多結晶体が得られ、複相同時に構造推定が可能になることを確認した（Fig.3.2.3）。さらにこの多結晶体に含まれる各相の構造推定を容易にするため、多結晶体から結晶粒を抽出する方法を開発した [28]。

アモルファス材料の構造探索

長距離秩序を持たないガラスやアモルファス材料は、回折実験データを用いた構造解析が非常に難しいため、分子動力学シミュレーションを使って高温の液体状態から急冷することで構造モデルを得る手法がしばしば用いられる。ところがこれらの材料の構造緩和時間は非常に長いために、中距離秩序を表すと考えられる粉末回折実験データの first sharp diffraction peak(FSDP) を定量的に再現するような信頼性の高い構造モデルを構築するためには、冷却速度を下げた極めて長時間のシミュレーションが必要になる。そこで我々は、分子動力学法を用いたアモルファス材料の構造予想を加速するために、これまでに結晶構造予想に利用していたデータ同化手法を用いることを考え、アモルファス材料 (a-H_2O 及び a-SiO_2) に適用した。解析の結果、データ同化手法を用いると、従来法では再現の難しかった FSDP の位置や強度を、短時間のシミュレーションでよく再現できることが確認された。得られた構造についてパーシステントホモロジー解析を行ったところ、この方法で得られた a-H_2O では、O-O-O の角度分布の幅が狭く、中距離において従来手法で得られているものと比べて秩序化されていることがわかった [7, 18]。

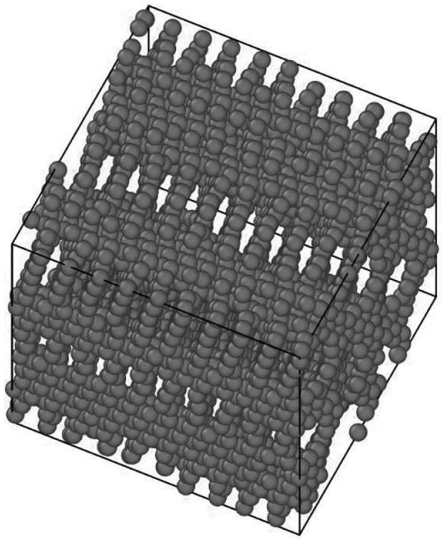

図 3.2.3: グラファイトとダイヤモンドからの反射が混在する粉末 X 線回折実験データから、データ同化により得られた炭素多結晶体。グラファイトとダイヤモンド様の結晶粒が含まれることが確認できる。

3.2.4 進化的アルゴリズムによる構造探索

巨大スピンホール伝導率を示す直方晶タングステン

タングステンは最安定な体心立方構造（α 相）と準安定な A15 型構造（β 相）が薄膜で得られており、β 相は単体では最大級のスピン流を生み出すことが知られている。スピン流の大きさは物質の結晶構造に大きく依存する。そこで本研究では、進化的アルゴリズムと第一原理計算を組み合わせた結晶構造探索手法をタングステンに適用させて、安定・準安定構造を探索し、スピンホール伝導率が増大する結晶構造の探索を行なった。その結果、α 相及び β 相に加えて新たに 15 種類の準安定構造が得られ、このうち二つの直方晶構造（Fig.3.2.4）は α 相の螺旋変形によって形成されており、スピンホール伝導率が β 相の 1.2 倍に増大することを予測した [8]。

トリニトロトルエン（TNT）の分解過程

新機能性材料として大きな可能性を秘めるナノダイヤモンドは TNT を用いた爆轟法によって製造されるため、生成物質の制御が困難であるという問題

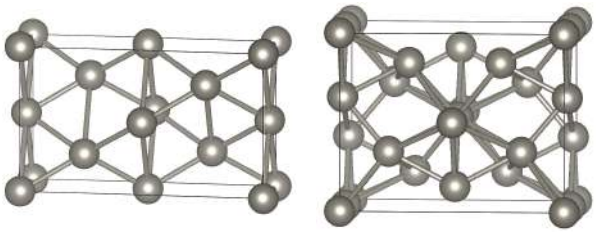

図 3.2.4: 進化的アルゴリズムで予測した直方晶タングステンの結晶構造

を抱えている。TNT の爆轟反応過程について新たな知見を得るために、本研究では進化的アルゴリズムによる化学反応探索のための方法論を開発し、TNT 結晶に水素ラジカルを導入した系に適用させた。その結果、水素ラジカルが TNT の六員環を形成する C やニトロ基を形成する N 及び O と反応して NO、H2O、C2H3N として TNT 分子から脱離し、部分的に分解した TNT 分子同士が C、N、O を介して結合することでエネルギーが大きく減少することを見出した (Fig.3.2.5)。これが連鎖的に繰り返されて TNT の分解とナノダイヤモンドの生成が起こることを予測した [6]。

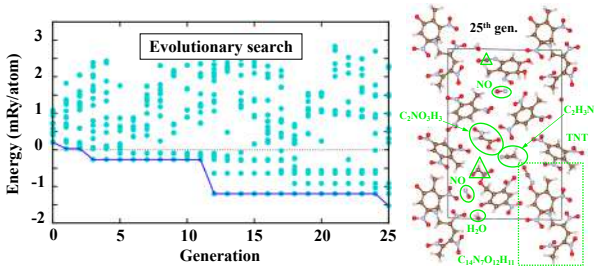

図 3.2.5: 進化的アルゴリズムによる TNT 分解過程シミュレーションの様子と第 25 世代における構造

ランタン-ホウ素-水素及びランタン-ホウ素-窒素系における超伝導相

2020 年に 180 GPa まで圧縮したランタン（La）-水素（H）系で 550 K の超伝導転移が報告された。水素化物を合成する際に使用したアンモニアボラン由来のホウ素（B）や窒素（N）がランタン水素化物と化合して室温超伝導が引き起こされた可能性が考えられているが、その詳細は不明である。この真偽を明らかにするためには高圧力における La-B-N-H 系の安定相をまずは決定する必要がある。本研究では、これまでに開発した進化的アルゴリズムによる形成エネルギー凸包構築手法を、3 元系 La-B-H 系及び La-N-H 系に適用した。その結果、$La_2B_3H_{30}$、$LaBH_8$、La_2BH_{12}、La_3NH_4 などの新たな高圧安定相が出現し、最大で 50-60 K の超伝導になることを予測した（Fig.3.2.6）。現在のところ B や N を加えた系では報告されている室温超伝導相が得られないため、更なる検証が必要である [13, 22, 24, 27, 34]。

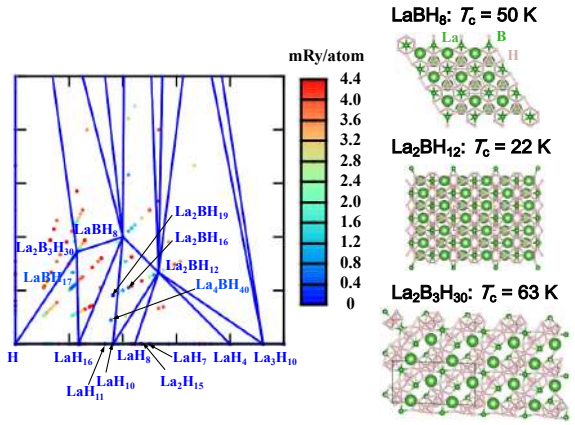

図 3.2.6: 進化的アルゴリズムで構築した 250 GPa における La-B-H 系の形成エネルギー凸包と安定相 $LaBH_8$、La_2BH_{12}、$La_2B_3H_{30}$ の結晶構造。

3.2.5 水素化物ペロブスカイトの超伝導

近年、硫化水素の高圧相 H_3S など、極めて高い超伝導転移温度を示す水素化物が複数見つかっているが、いずれも 100GPa を超える超高圧でしか安定に存在しない。そこで常圧でも安定で高圧下の H_3 とよく似た立方晶の結晶構造を持つ絶縁体のペロブスカイト型水素化物 $KMgH_3$ に着目し、さまざまな圧力でホールドープした場合の動的安定性と超伝導転移温度を、フォノンの非調和効果を考慮して調べた。その結果、$KMgH_3$ は格子の動的安定性を保つ適切なドープ量の範囲で、24K (100GPa)、3.3K (常圧) で超伝導転移を示すという理論予測が得られた [11, 31]。

3.2.6 相関波動関数を用いた電子状態計算手法の開発

ジャストロウ-スレーター型の相関波動関数を用いて電子相関を考慮した電子状態計算を実現する、トランスコリレイティッド法の開発を継続している。この手法では、多体ハミルトニアンから相似変換され

た非エルミートな TC ハミルトニアンの近似固有解を求めるのが普通であるが、変分法を使うために TC ハミルトニアンをエルミート化する手法が提案されている。そこでこの手法を最も簡単な He 原子で検証した結果、エルミート化によって電子相関を考慮した軌道の最適化の効果がなくなり、エネルギーの精度が低下することがわかった [29]。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Y. Komatsu, R. Shimizu, R.i Sato, M., K. Nishio, T. Katase, D. Matsumura, H. Saitoh, M. Miyauchi, J. R. Adelman, R. M. L. McFadden, D. Fujimoto, J. O. Ticknor, M. Stachura, I. McKenzie, G. D. Morris, W. A. MacFarlane, J. Sugiyama, K. Fukutani, S. Tsuneyuki, and T. Hitosugi, "Repeatable Photoinduced Insulator-to-Metal Transition in Yttrium Oxyhydride Epitaxial Thin Films", Chem. Mater., 34, 3616 (2022).

[2] C. M. Le, R. Akashi and S. Tsuneyuki, "Missing quantum number of Floquet states", Phys. Rev. A 105, 052213 (2022).

[3] M Ohnishi, T Tadano, S Tsuneyuki, J Shiomi, "Anharmonic phonon renormalization and thermal transport in the type-I $Ba_8Ga_{16}Sn_{30}$ clathrate from first principles", Phys. Rev. B 106, 024303 (2022).

[4] H. Katow, R. Akashi, Y. Miyamoto, and S. Tsuneyuki, "First-Principles Study of the Optical Dipole Trap for Two-Dimensional Excitons in Graphane", Phys. Rev. Lett. 129, 047401 (2022).

[5] S. Yoshikawa, R. Sato, R. Akashi, S. Todo and S. Tsuneyuki, "A Noise-Robust Data Assimilation Method for Crystal Structure Prediction Using Powder Diffraction Intensity", J. Chem. Phys., 157, 224112 (2022).

[6] T. Ishikawa, K. Kusakabe, Y. Makino, S. Sakamoto, and N. Okuyama, "Search for the Decomposition Process of 2,4,6-Trinitrotoluene by an Evolutionary Algorithm", J. Phys. Chem. A 126, 8082 – 8087 (2022).

[7] Y. Zhao, R. Sato, S. Tsuneyuki, Accelerating simulated annealing of glassy materials with data assimilation, J. Non-Crystal. Solids, 600, 122028 (2023).

[8] T. Ishikawa, R. Akashi, K. Kubo, Y. Toga, K. Inukai, I. Rittaporn, M. Hayashi, and S. Tsuneyuki, "Large intrinsic spin Hall conductivity in orthorhombic tungsten", Phys. Rev. Materials 7, 026202 (2023).

[9] T. Amano, T. Yamazaki, R. Akashi, T. Tadano, and S. Tsuneyuki, "Lattice Dielectric Properties of Rutile TiO_2: First-Principles Anharmonic Self-Consistent Phonon Study", Phys. Rev. B 107, 094305 (2023).

(国内雑誌)

[10] 佐藤 龍平、常行 真司,「XRD 回折パターンを利用した水素データ同化分子動力学計算」, 日本結晶学会誌 64,170-173 (2022).

(学位論文)

[11] Shaocong Lu, "On the Stability and Anharmonic Phonon Properties of Metallic Perovskite Hydrides: A First-principles Study" (水素化物ペロブスカイトの安定性と非調和フォノン物性：第一原理計算による研究)（東京大学、2022 年 9 月修士（理学））

[12] 渡邉修人, "Hydrodynamic simulation of laser ablation with electronic entropy effects included" (電子エントロピー効果を考慮したレーザーアブレーションの流体力学的シミュレーション) (東京大学, 2023 年 3 月 修士 (理学))

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[13] T. Ishikawa, "EVOLUTIONARY SEARCH FOR SUPERCONDUCTING PHASES IN THE LANTHANUM-BORON-HYDROGEN SYSTEM", 2nd International Symposium "Hydrogenomics", Online, 16-19 May, 2022.

[14] T. Amano, T. Yamazaki, R. Akashi, and S. Tsuneyuki, "First-Principles Study of Lattice Dielectric Function in Rutile TiO_2", CCP2022 - 32th IUPAP Conference on Computational Physics, Online, Aug. 8, 2022.

招待講演

[15] S. Tsuneyuki, "First-Principles Calculation of Anharmonic Lattice Properties", TSMC-UTokyo Symposium, Online, Aug 10, 2022.

[16] S. Tsuneyuki, "Theoretical Exploration of Hydride Superconductors", 2nd International Conference on Trans-Scale Quantum Science, Nov. 9, 2022.

(国内会議)

一般講演

[17] 天野智仁、山崎民雄、明石遼介、常行真司、「ルチル型 TiO_2 における 格子誘電関数の第一原理計算」物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会 2022、オンライン、2022 年 5 月 12 日.

[18] Yuansheng Zhao, Ryuhei Sato and Shinji Tsuneyuki, "Accelerating simulated annealing of glassy materials with data assimilation", 日本物理学会 2022 年秋季大会、東京工業大学、2022 年 9 月 13 日.

[19] 渡邉修人, 明石遼介, 常行真司,「電子エントロピー効果を考慮したレーザーアブレーションの流体力学的シミュレーション」, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京工業大学, 2022 年 9 月 13 日.

[20] 天野智仁、山崎民雄、明石遼介、只野央将、常行真司、「ルチル型 TiO_2 における 格子誘電関数の第一原理計算」日本物理学会 2022 年秋季大会、東京工業大学、2022 年 9 月 15 日.

[21] 佐藤 龍平, 吉川 誠司, 趙 元晟, 常行 真司,「水素データ同化計算」, ハイドロジェノミクス 第 9 回若手育成スクール, 2022 年 9 月 26-27 日.

[22] 石河孝洋,「ランタン-ホウ素-窒素-水素系における室温超伝導水素化物の探索」, ハイドロジェノミクス最終報告会, ホテル日航つくば 別館 1 階「昴 西・中の間」(つくば市), 2022 年 11 月 21 日 23 日.

[23] T. Amano, T. Yamazaki, R. Akashi, T. Tadano and S. Tsuneyuki, "First-Principles Study of Lattice Dielectric Function in Rutile TiO_2", YITP workshop Fundamentals in density functional theory (DFT2022), Kyoto University, Dec. 12, 2022.

[24] 石河孝洋, 三宅隆, 常行真司,「ランタン-ホウ素-水素系及びランタン-窒素-水素系における高圧安定相と超伝導相」, 第 63 回高圧討論会, 立命館いばらきフューチャープラザ (茨木市), 2022 年 12 月 13 日 15 日.

[25] 天野智仁、山崎民雄、明石遼介、常行真司、「双極子モーメントの機械学習モデルによる誘電特性の研究」計算物理 春の学校 2023、沖縄県市町村自治会館、2023 年 3 月 14 日

[26] 天野智仁、山崎民雄、明石遼介、常行真司、「双極子モーメントの機械学習モデルによる誘電特性の研究」日本物理学会 2023 年春期大会、オンライン、2023 年 3 月 22 日

[27] 石河孝洋, 三宅隆, 常行真司,「進化的アルゴリズムによるランタン-ホウ素-水素系及びランタン-窒素-水素系における超伝導相の探索」, 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン, 2023 年 3 月 22 日.

[28] 久保祐貴、佐藤龍平、石河孝洋、常行真司: 「データ同化手法による多相の結晶構造同定」、日本物理学会 2023 年春季大会、オンライン、2022 年 3 月 22 日.

[29] 千田拓実, 常行真司,「Transcorrelated 法における非エルミート項の最適化への影響」, 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン, 2023 年 3 月 22 日.

[30] 渡邉修人, 明石遼介, 石河孝洋, 常行真司: 電子エントロピー効果を考慮した理論計算によるレーザーアブレーションのパルス幅依存性, 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン, 2023 年 3 月 23 日

[31] S. Lu, R. Akashi and S. Tsuneyuki, "First-principles study of stability of metallic perovskite hydrides", 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 23 日.

招待講演

[32] 常行真司,「見えない水素を計算機で"見る"—水素を含む物質の第一原理計算とデータ同化—」, 水素連携研究会 第 2 回トピックス研究会 (物理分科会) (オンライン), 2022 年 5 月 31 日.

[33] 常行真司,「物質・材料の構造シミュレーションとデータ同化」, 第 2 回 CREST ナノ力学研究会:「マルチスケールシミュレーション」(オンライン), 2022 年 6 月 25 日.

[34] 石河孝洋,「進化的アルゴリズムによる新物質探索:水素化物高温超伝導への応用」, ハイドロジェノミクス第 9 回若手育成スクール, 岡崎コンファレンスセンター (愛知県岡崎市), 2022 年 9 月 26 日 27 日.

[35] 常行真司,「物質・材料シミュレーションの今とこれから」, 早稲田大学各務記念材料技術研究所 計算材料科学連続セミナー電子材料第 2 シリーズ第 1 回 (オンライン), 2022 年 10 月 25 日.

[36] 常行真司,「材料研究のためのマルチモーダルコンピューティング」(基調講演),「再生可能エネルギー最大導入に向けた電気化学材料研究拠点」発足記念シンポジウム (DX-GEM Symposium), 2023 年 2 月 26 日.

(セミナー)

[37] 石河孝洋,「高圧力下水素化物における高温超伝導」, 東京大学駒場物性セミナー 2022 年度秋学期第 4 回, オンライン, 2022 年 11 月 18 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、さらには量子コンピュータにいたるまで、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。また、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。さらに、「量子ソフトウェア」寄付講座や JST 共創の場形成支援プログラム「サスティナブル量子 AI 研究開発拠点」の活動を通じて、サンプリングやテンソルネットワークに基づく量子アルゴリズムや量子機械学習手法の研究開発も行っている。

3.3.1 強相関系のシミュレーション手法

テンソル繰り込み群とマルコフ連鎖モンテカルロ法

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。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、テンソルネットワーク表現とマルコフ連鎖モンテカルロ法を組み合わせた、新しいサンプリング手法の研究も進めている [20]。

格子フェルミオン系に対するテンソル繰り込み群

格子フェルミオンを含む量子多体系は、物理学の様々な分野において現れる。例えば、素粒子物理学では格子量子色力学が代表的であり、グルーオンを介したクォーク同士の相互作用を記述する多体系になっている。物性物理学における強相関電子系も格子フェルミオンからなる多体系の一例であり、強いクーロン相互作用下で発現する豊かな物理現象には多くの興味が持たれている。この研究では、格子フェルミオン系の取り扱いが容易なテンソルネットワーク法に着目し、格子フェルミオン系の経路積分を計算する手法の開発に取り組んでいる。具体的には、格子フェルミオン系の経路積分をテンソルネットワークによって表現し、テンソル繰り込み群を用いてネットワークの縮約を近似的に実行することで、無限体積極限での経路積分の計算を実現する。今年度は、ボンド重み付きテンソル繰り込み群 (BTRG) をフェルミオン系が取り扱えるように拡張し、2 次元 Wilson フェルミオンを使った実証計算を行った (図 3.3.7)。この研究から、BTRG における最適なハイパーパラメタの決定方法がフェルミオン系においても有効であることが分かった。さらに、Ising 模型で確認されていたスケール不変テンソルの構成やボンド次元に関するスケーリングが Wilson フェルミオンに対しても成り立つことが明らかになった。また、フレーバー自由度を伴う格子フェルミオン系に対して、行列積分解を応用したテンソル繰り込み群法の開発にも取り組んでいる [6, 17, 19, 26, 27, 32, 34, 37]。

幾何学的割り当て法によるワームアルゴリズム

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—できるだけまっすぐ前へ進めという指針—を提案し、従

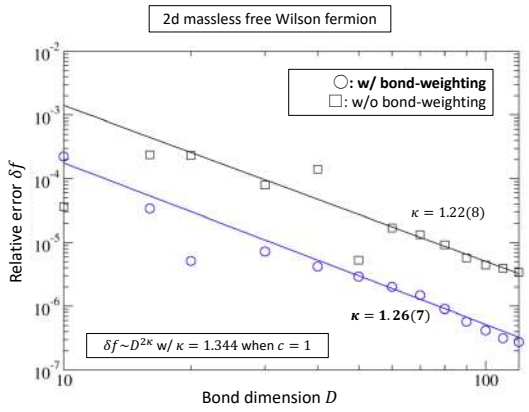

図 3.3.7: ボンド重み付きテンソル繰り込み群による 2 次元 Wilson フェルミオンの自由エネルギー計算。

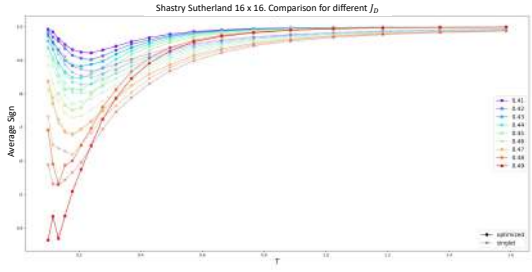

図 3.3.8: Shastry-Sutherland 模型における負符号の緩和。

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 [7, 11, 15]。

局所ユニタリ変換による負符号問題の低減

量子多体系に対する量子モンテカルロ法は広く使われている計算手法であるが、一部の量子格子模型において負符号問題が生じ、逆温度に対して指数関数的に統計誤差が増大してしまう。低温で負符号を消すことは量子モンテカルロ法にとって重要な課題である。負符号問題はハミルトニアンの行列表示に依存するため、表示基底を変更することで軽減が可能である。我々は、局所ハミルトニアンに注目し、最適な局所基底変換を導入することで、負符号問題の軽減に成功した。特に、幾つかの Frustration-Free と呼ばれる量子スピン系においては、先行研究では不可能であった最適解が得られるだけでなく、その他のモデルにおいても先行研究よりも優れた結果が得られた。これにより、量子モンテカルロ法を用いた物理量のシミュレーションにおいて、より高精度で効率的な計算が可能となった。

連続空間経路積分モンテカルロ法

連続空間経路積分モンテカルロ法は、相互作用するボーズ粒子系の超流動密度や凝縮率などの物理量を数値的に計算できる唯一の手法である。ワームアルゴリズムにより数百粒子系の超流動ヘリウムのグランドカノニカルアンサンブルにおけるシミュレーションが可能となったが、アルゴリズムの実装は 7 つの異なる更新手順を含む複雑なものである。我々は、カノニカルアンサンブルにおけるより効率的でシンプルな更新手法を開発している。ハミルトンモンテカルロ法、イベントチェーンモンテカルロ法などの高度なマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いることで、シミュレーションの自己相関時間をさらに短縮することが可能となった。また、従来のワームアルゴリズムでは、アルゴリズムの性能に大きく影響するハイパーパラメータが数多く存在していたが、Wang-Landau アルゴリズムを用いることで、シミュレーション中にハイパーパラメータを自動的に調整することが可能となった [14]。

3.3.2 強相関多体系における新奇な状態・相転移現象

フラストレートスピン系における新しい磁化プラトー相

スピン相互作用が原子間の距離に依存する効果は、スピンに「フラストレーション」があるとより重要になる。例えば隣のスピンが反対向きの方がエネルギー的に安定なとき、三角形の頂点に位置するスピン同士は「つじつま」を合わせることができない。このような場合、局所的な安定構造の組み合わせが大域的に最安定な状態とはならず、それぞれのスピンが反対向きルールをある程度妥協することで、最も安定な状態が決まる。そのような効果を、幾何学的フラストレーションと呼ぶ。一般的にスピン相互作用は原子間の距離に依存するが、この効果は通常無視できるほど小さくなる。しかしフラストレーションがある場合は、ほんの少しの相互作用の変化が大きな構造変化につながることがある。我々はカゴメ格子と呼ばれる格子上のスピンモデルをモンテカルロ計算し、新しい 1/9 磁化プラトー相が現れることを明らかにした (図 3.3.9)。現実の物質では、例えば、クロムスピネル化合物などでカゴメ格子を作ることができれば、今回の理論的予測が実現できるのではないかと提案している [2]。

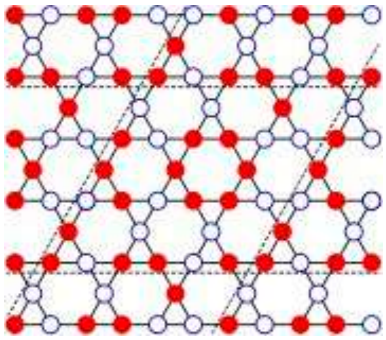

図 3.3.9: カゴメ格子の 1/9 磁化プラトー相におけるスピン配位。

量子ダイマー模型の有限温度相転移

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) に基づくクラスター更新法にプライオリティーキューを使った高速な演算子検索手法を組み合わせた、効率的な量子モンテカルロ法を開発した。適切な秩序変数の選択と有限スケーリングにより、量子ダイマーモデルの定量的な相図を有限温度相図を得た (図 3.3.10)。臨界点における臨界指数は、古典ダイマーモデルの相転移における Kosterlitz-Thouless 転移と一致し、古典極限での傾きも古典模型の臨界温度と一致することが分かった。量子揺らぎが大きくなるにつれて相境界の傾きが小さくなり、Rohksar-Kivelson (RK) 点で臨界温度がちょうど絶対零度となる、すなわち絶対零度でのコラムナーダイマー相が中間相なしに RK 点まで伸びていることを強く示唆する結果を得た [2]。

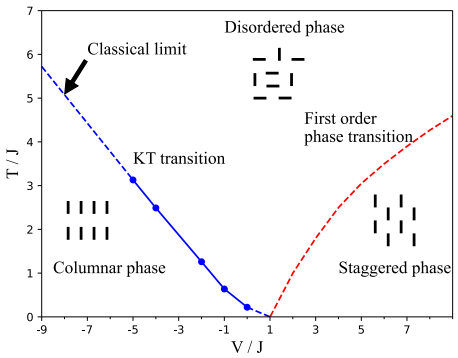

図 3.3.10: 二次元量子ダイマー模型の有限温度相図。

3.3.3 量子計算と量子アルゴリズム

量子多体問題における量子計算優位性の探索

物性物理の問題でよく見られるような、並進対称性があり相互作用が短距離である量子多体系につい

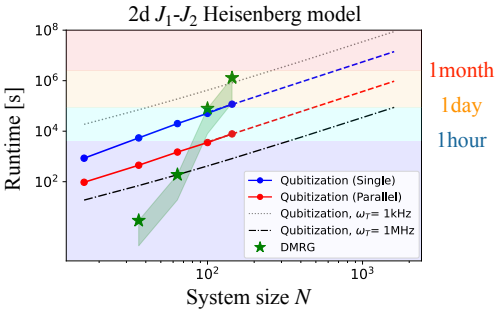

図 3.3.11: 二次元ハイゼンベルグ模型のシミュレーション時間の評価。

て、基底状態を求める計算の実行時間を、古典コンピュータと誤り耐性量子コンピュータの双方で見積もり、量子コンピュータでの計算が優位となる問題サイズを検討した。古典コンピュータではテンソルネットワーク法の一種である密度行列繰り込み群法を、量子コンピュータでは Qubitization に基づく量子位相推定法を検討した結果、量子化学などのより複雑な量子多体系に比べて、比較的小さいサイズで量子コンピュータでの計算が優位になり、少ない量子ビット数、少ない実行時間で、量子コンピュータによる計算の恩恵が得られることを示した (図 3.3.11)。

3.3.4 統計的機械学習と物質科学

統計力学的なアプローチによる深層ニューラルネットの解析

人工ニューラルネットワークを用いた深層学習は近年様々な分野で顕著な成果を挙げているが、動作原理の理解を志した基礎研究はまだ発展途上の段階にある。我々は、人工ニューラルネットワークにおける信号伝播過程を統計力学的手法で明らかにすることを目指して研究を展開している。今年度は、全結合順伝播型ニューラルネットワークにおける信号伝搬過程を記述する理論的枠組を幅が有限の場合へ拡張するとともに、正規乱数で初期化された順伝播型深層ニューラルネットワークの一部における信号伝搬過程が、吸収状態転移を記述する非平衡統計力学の枠組で見通しよく整理できる (図 3.3.12) ことを示した。

3.3.5 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

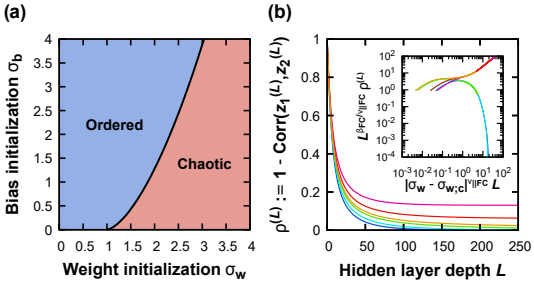

図 3.3.12: 全結合ニューラルネットワークにおける吸収状態転移。

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・公開を続けている [5]。

多変数変分モンテカルロ法におけるバッチ処理を用いた 2 体グリーン関数計算

mVMC (http://github.com/issp-center-dev/mVMC) は、変分モンテカルロ法を用いた量子多体シミュレーションを効率的に行うための汎用的なオープンソースソフトウェアパッケージである。我々は 2 体グリーン関数の計算について、グリーン関数のクエリをバッチ処理にまとめることで、大幅なパフォーマンス向上を達成した。この方法は、mVMC の開発ブランチである libVMC (http://github.com/xrq-phys/libvmc) で実装およびテストされ、バッチ処理がない計算に比べて 3 倍の高速化が確認された。現在、これらの改善の mVMC への統合を進めている。

GEMMFIP: BLIS における GEMM の統合

新たなアプローチにより、大規模および小規模な問題サイズに対する高性能レベル 3 BLAS 操作を実現した。これは、従来の “PACK してから GEMM をする” 方法と、最近開発されたアンパックされたメモリ上で GEMM を行う GEMMSUP を組み合わせることによって実現されている。この方法により、特に中規模の問題サイズにおける BLIS の性能が一貫して向上することが分かった。さらに、この新しいコードパスは、ARM および x86_64 における、異なる GEMM へのアプローチの統合につながることも期待される。

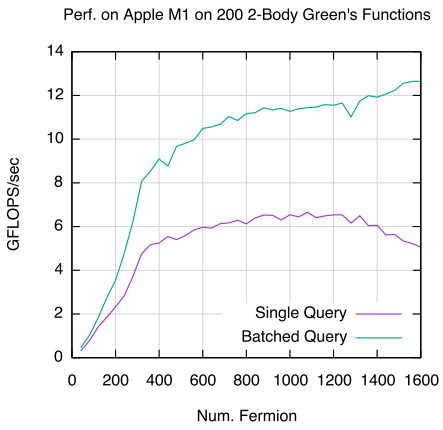

図 3.3.13: バッチ処理を用いた 2 体グリーン関数計算の高速化。

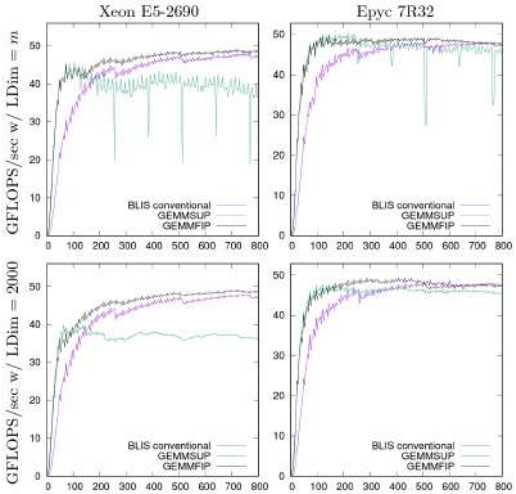

図 3.3.14: GEMMFIP のベンチマーク結果。

さらに、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、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 ALPSCore、並列厳密対角化パッケージ HΦ、テンソルネットワークアルゴリズムのためのライブラリ CTL などの公開・開発を行っている [3, 28]。

＜受賞＞

[1] 秋山進一郎、第 17 回 (2023 年) 日本物理学会若手奨励賞、日本物理学会、2022 年 10 月.

＜報文＞

(原著論文)

[2] Masaki Gen, Hidemaro Suwa, Nematicity and fractional magnetization plateaus induced by spin-lattice coupling in the classical kagome-lattice Heisenberg antiferromagnet, Phys. Rev. B **105**, 174424 (10pp) (2022).

[3] Yuichi Motoyama, Tsuyoshi Okubo, Kazuyoshi Yoshimi, Satoshi Morita, Takeo Kato, Naoki Kawashima, TeNeS: Tensor Network Solver for Quantum Lattice Systems, Comp. Phys. Comm. **279**, 108437 (10pp) (2022).

[4] Junyi Yang, Hidemaro Suwa, Derek Meyers, Han Zhang, Lukas Horak, Zhaosheng Wang, Gilberto Fabbris, Yongseong Choi, Jenia Karapetrova, Jong-Woo Kim, Daniel Haskel, Philip J. Ryan, M. P. M. Dean, Lin Hao, and Jian Liu, Quasi-Two-Dimensional Anomalous Hall Mott Insulator of Topologically Engineered Jeff=1/2 Electrons, Phys. Rev. X **12**, 031015 (11pp) (2022).

[5] Yuichi Motoyama, Kazuyoshi Yoshimi, Takeo Kato, Synge Todo, MateriApps LIVE! and MateriApps Installer: Environment for starting and scaling up materials science simulations, Software X **20**, 101210 (8pp) (2022).

[6] Shinichiro Akiyama, Bond-weighting method for the Grassmann tensor renormalization group, J. High Energy Phys. **11**, 030 (2022).

[7] Hidemaro Suwa, Lifted directed-worm algorithm, Phys. Rev. E **106**, 055306 (9pp) (2022).

[8] Seiji Yoshikawa, Ryuhei Sato, Ryosuke Akashi, Synge Todo, Shinji Tsuneyuki, A Noise-Robust Data Assimilation Method for Crystal Structure Prediction Using Powder Diffraction Intensity, J. Chem. Phys. **157**, 224112 (8pp) (2022).

[9] Xizhi Liu, Sayan Mukherjee, Stability theorems for some Kruskal–Katona type results, Eur J. Combin. **110**, 103666 (20pp) (2022).

[10] Dhruv Mubayi, Sayan Mukherjee, Triangles in graphs without bipartite suspensions, Discrete Math. **346**, 113355 (19pp) (2023).

(国内雑誌)

[11] 諏訪秀麿, 藤堂眞治, 確率の流れをあやつるモンテカルロ法—詳細つりあいの破れとリフティング, 日本物理学会誌 **77**, 731–739 (2022).

[12] 大久保毅, 拡張キタエフ模型における熱ホール伝導度のテンソルネットワーク法による研究, 固体物理 **57**, 633–642 (2022).

[13] 大久保毅, 量子多体系とテンソルネットワーク, 数理科学 12 月号 58–64 (2022).

(学位論文)

[14] Xun Zhao, Improved path-integral worm Monte Carlo method and its application to interacting bosons (修士論文)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[15] Hidemaro Suwa, “Nonreversible worm update for the Ising model,” CCP2022 33rd IUPAP Conference on Computational Physics, August 2022, online.

[16] Hidemaro Suwa, Shang-Shun Zhang, and Cristian D. Batista, “Triplet exciton condensation in Sr3Ir2O7,” 29th International Conference on Low Temperature Physics, August 2022, Sapporo.

[17] Shinichiro Akiyama, Yoshinobu Kuramashi, Yusuke Yoshimura, “Particle Physics with Tensor Network Scheme,” The 30th Anniversary Symposium of the Center for Computational Sciences at the University of Tsukuba, October 2022, Tsukuba.

[18] Hidemaro Suwa, Gia-Wei Chern, Kipton Barros, and Cristian D. Batista, “Large-scale calculation of dynamical spin structure factor for correlated electron systems,” International Conference on Integrated Spectroscopy for Strong Electron Correlation -Theory, Computation and Experiment, December 2022, Tokyo.

[19] Shinichiro Akiyama, “Bond-weighting method for the Grassmann tensor renormalization group,” KEK Workshop 2022, December 2022, オンライン.

招待講演

[20] Synge Todo, “Markov-chain Monte Carlo sampling in tensor-network representation,” 15th Asia Pacific Physics Conference, August 2022, オンライン.

[21] Tsuyoshi Okubo, “Tensor network approach to Kitaev spin liquid,” 15th Asia Pacific Physics Conference, August 2022, オンライン.

[22] Synge Todo, “High-Performance Computing Infrastructure in Japan,” Chinese Physical Society Fall-Meeting 2022, November 2022, オンライン.

[23] Tsuyoshi Okubo, “Tensor network approach to two-dimensional frustrated spin systems,” APCTP-IACS-SNBNCBS Workshop on Computational Methods for Emergent Quantum Matter: From Theoretical Concepts to Experimental Realization, November 2022, Kolkata, India.

[24] Tsuyoshi Okubo, “Tensor network representation of Kitaev spin liquid and its application to quantum circuit-based variation calculations,” Novel Quantum States in Condensed Matter 2022 (NQS2022), November 2022, YITP, Kyoto.

[25] Synge Todo, “Algorithms and computational techniques for quantum + classical computing,” Quantum+Classical: Exploring new technological opportunities of the next-gen computing with Quantum, December 2022, tokyo.

[26] Shinichiro Akiyama, “Tensor renormalization group approach to higher-dimensional lattice field theories,” Challenges and opportunities in Lattice QCD simulations and related fields, February 2023, R-CCS, Kobe.

[27] Shinichiro Akiyama, “An overview of tensor network method for lattice field theories,” Kobe Workshop on Cosmology and Fundamental Physics 2023, March 2023, Kobe.

(国内会議)

招待講演

[28] 藤堂眞治, 「量子格子模型ソルバー ALPS による強相関多体系のシミュレーション」, JST-CRDS 俯瞰ワークショップ「新しい計算物質科学の潮流」, 2022 年 4 月, 東京.

[29] 藤堂眞治, 「計算科学ロードマップ 2022 について」, 第 1 回計算物質科学協議会総会, 2022 年 8 月, オンライン.

[30] 藤堂眞治,「統計物理・量子物理のためのプログラム開発技術」, Stat & Quant Phys Autumn School 2022, 2022 年 10 月, オンライン.

[31] 藤堂眞治, 「ポスト富岳にむけた計算科学ロードマップ」, 第 14 回材料系ワークショップ, 2022 年 10 月, 秋葉原.

[32] 秋山進一郎，藏増嘉伸，吉村友佑, 「テンソルネットワーク法を用いた素粒子物理学の研究」, 第 9 回「富岳」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会, 2022 年 10 月, オンライン.

[33] 藤堂眞治, 「MATLAB を活用した数学基礎教育」, MATLAB 利用促進シンポジウム, 2022 年 12 月, 東大.

[34] 秋山進一郎, 「素粒子物理学とテンソルネットワーク」, 第 2 回量子ソフトウェアワークショップ：これからの量子シミュレーション 古典から量子へ、量子から古典へ , 2023 年 1 月, 東京大学.

[35] 藤堂眞治, 「マテリアルイノベーションにむけた制度・拠点構築」, JST-CRDS 科学技術未来戦略ワークショップ「マテリアルイノベーションを実現する先進的計算物質科学」, 2023 年 2 月, 東京.

[36] 藤堂眞治, 「プログラム開発の技術」, 計算物理春の学校 2023, 2023 年 3 月, 那覇.

[37] 秋山進一郎, 「テンソル繰り込み群法による格子場理論研究の開拓」, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月, オンライン.

[38] 大久保毅, 「テンソルネットワークによる量子古典エンタングルアルゴリズムの提案」, 物性研究のための量子アルゴリズム最前線, 2023 年 3 月, 大阪大（ハイブリッド）.

(セミナー)

[39] Tsuyoshi Okubo, “Quantum-classical entangled approach with tensor networks to investigating quantum spin liquid,” Baiwang forum on quantum physics and quantum information sciences, July 2022, 北京量子信息科学研究院.

[40] Tsuyoshi Okubo, “Tensor network representation of Kitaev spin liquid and its application to quantum circuit-based variational calculations,” 東北大学物理学教室物性コロキウム, July 2022, 東北大.

3.4 桂研究室

物性理論・統計力学の基礎的な問題に関する理論的研究を行っている。特に、相関の強い多体系における創発的な物性の解明および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、平衡および非平衡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・トポロジカル系

非エルミート量子多体系における複素 Berry 位相の量子化

基底状態にギャップをもつエルミート量子多体系のトポロジカル相を解析する有効な手法の一つとして、量子化 Berry 位相を用いる方法がある。これは系に局所的なひねりを導入することで定義された Berry 位相が、幾つかの対称性の下で量子化し、それによりトポロジカル相を特徴付けているスピン一重項などのオブジェクトの有無を検出できるというものである。

坪田は、楊、赤城、桂とともに、この量子化 Berry 位相の方法を非エルミートな場合に拡張した。実ラインギャップがある非エルミート量子多体系において、複素 Berry 位相という非エルミート系に一般化された Berry 位相が、二種類の一般化された対称性の下で $\mathbf{Z}_2$ 量子化を示すことを証明した。また、具体的なモデルでの数値的検証により、この量子化複素 Berry 位相がフェルミオン系・スピン系に関わらず非エルミート多体系のトポロジカル相の解析に有効であることを示した。これらの結果は原著論文 [2] にまとめられた。

一般化 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を有する SU(3) 磁性体における CP^2 スキルミオン結晶

2009 年、磁気スキルミオンと呼ばれるトポロジカルソリトンが、磁性体中で観測された。それを契機として、実験と理論の両面から、磁気スキルミオンの研究が精力的に行われ、トポロジカルホール効果などの磁気スキルミオンに起因した新たな物理現象の発見や、低消費電力デバイスをはじめとする磁気スキルミオンの工業的応用の提案がされてきた。近年では、従来の磁気スキルミオンにはない特性をもつトポロジカルソリトンの探索が盛んに行われ、反強磁性体やフェリ磁性体などの様々な磁性体中のスキルミオンも議論されている。ただし、これまで安定なスキルミオン結晶（スキルミオンが周期的に配列した磁気構造）が見出されていたのは、秩序変数空間が $S^2 = CP^1$ である古典スピン系あるいはスピン 1/2 の系に限られていた。

甘利と赤城は、Gudnason（河南大）、新田（慶應大）、Shnir（JINR）と共に、秩序変数空間が複素射影空間 $CP^2 = \mathrm{SU}(3)/\mathrm{U}(2)$ である、一般化 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用と Zeeman 相互作用を含んだスピン 1 の SU(3) 強磁性体の模型において、低磁場領域と高磁場領域で異なる種類のスキルミオン結晶が系の基底状態として現れることを見出した。具体的には、高磁場領域では単位トポロジカルチャージをもつスキルミオンの三角格子が、低磁場領域ではトポロジカルチャージ 1/2 をもつスキルミオン、すなわち半スキルミオンから成るハニカム格子が系の基底状態であることがわかった。これらのスキルミオン結晶を、系の秩序変数空間が CP^2 であることから、CP^2 スキルミオン結晶と名付けた (図 3.4.15(a) 参照)。上記 2 種類の CP^2 スキルミオン結晶間の遷移は、相転移ではなくクロスオーバーであると、これらの配位が持つエネルギーやトポロジカルチャージ密度から計算される配位的エントロピー（Shannon エントロピーを場の理論的に一般化した量）の振る舞いなどから結論付けた。また、これらの配位は従来の磁気スキルミオンと同様に磁気双極子の構造因子に triple-q 構造を持つことに加え、CP^2 スキルミオン結晶特有の性質として、磁気四重極子の構造因子においても triple-q 構造を持つことを数値的に見出した (図 3.4.15(b) 参照)。これらの結果は、国際会議 [23, 35]、国内会議 [43, 56, 59, 68, 70] で発表されたほか、原著論文 [5] にまとめられた。

$S = 1$ スピン鎖における双対性・臨界性・トポロジー

$S = 1$ スピン鎖における Haldane 相は、対称性に守られたトポロジカル相 (SPT 相) の典型例として知られている。Kennedy と田崎は、非局所的なユニタリー変換（KT 変換）を用いることで、Haldane 相は隠れた $\mathbf{Z}_2 \times \mathbf{Z}_2$ 対称性が破れた相にあることを明らかにした。またこれにより、隠れた反強磁性秩序の存在や有限系における端状態の存在などを統一的に理解できることを示した。KT 変換により、元々の $S = 1$ スピン鎖では無秩序であった基底状態は、古典的な秩序のある状態へとマップされる。このことは、量子 Ising 鎖において、Kramers-Wannier 双対変換が無秩序相と秩序相を関係付ける点に似ている。

このことをヒントに、Yang と桂、Li（東大物性研）と奥西（新潟大）は、スピン 1 bilinear-biquadratic (BLBQ) 鎖とその KT 変換による双対をパラメター λ で内挿する模型を考え、その性質を調べた。その結果以下の興味深い結果が得られた。(i) 自己双対線における臨界性：量子 Ising 鎖とのアナロジーからも、KT 変換により自己双対な場合は、系はギャップレスであることが期待される。このことを、自己双対な模型と $S = 1/2$ XXZ スピン鎖との関係を用いることで厳密に示した。特に元の模型が $S = 1$ Heisenberg 鎖の場合は、自己双対な模型は低エネルギーでは $S = 1/2$ XY スピン鎖に帰着する。また、自己双対線上には中心電荷 $c = 1$ の共形場理論で記述される臨界的な相および多重臨界点が存在することを明らかにした。(ii) トポロジカルおよび自明な Ising 臨界性：BLBQ 模型のパラメター θ および

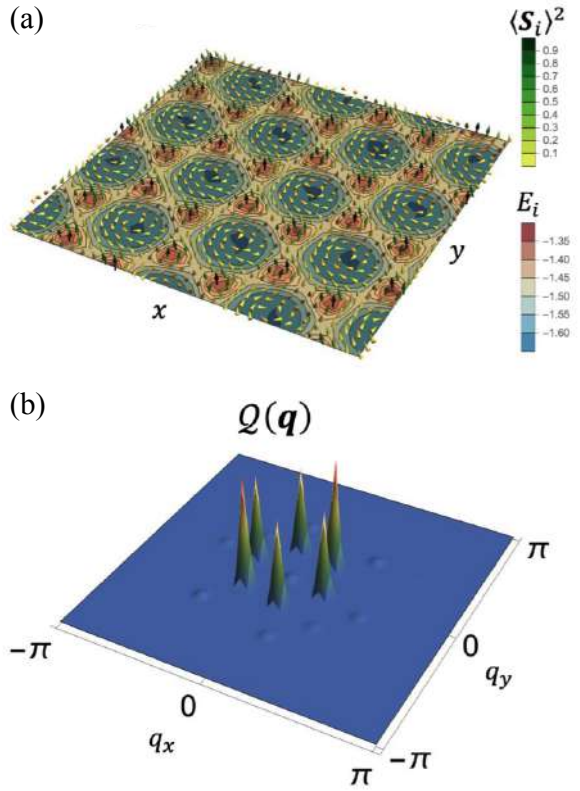

図 3.4.15: (a) CP^2 スキルミオン結晶と (b) その磁気四重極子の構造因子 $Q(\mathbf{q})$

λ の 2 つのパラメターに関する基底状態相図を密度行列繰り込み群（DMRG）法で調べた。その結果、$-\pi/4 \leq \theta \leq \arctan 1/2$, $-1 \leq \lambda \leq 1$ の範囲には、4 つの相があることを明らかにした。このうち 2 つは Haldane 相および $\mathbf{Z}_2 \times \mathbf{Z}_2$ 対称性が破れた相、残りの 2 つは $\mathbf{Z}_2$ 対称性が破れた相である。詳細な解析により、Haldane 相と $\mathbf{Z}_2$ 対称性が破れた相の境界はトポロジカルな Ising 臨界性を示すこと、この相境界の KT 双対は自明な Ising 臨界性を示すことを明らかにした。これらの結果は、研究会 [37, 42] で発表されたほか、原著論文 [7] にまとめられた。Yang はこの研究と、これまで行ってきた研究を博士論文にまとめた [11]。

3.4.2 散逸のある量子多体系

散逸ハバード模型におけるリウビリアンギャップと単一スピンフリップダイナミクス

量子系は、環境との相互作用によって必ず散逸を受ける。そのため、散逸のある開放量子系の問題を考えることは、物理現象をより適切に記述するために必要不可欠である。その中でも、我々は実験的に重要である 2 体の原子ロスのある Fermi-Hubbard 模型に注目した。この模型の理論的な解析は散逸がない場合よりも難しく、例えば緩和時間を特徴づける量であるリウビリアンギャップの厳密な解析は 1 次元かつスピンが 1/2 の場合に限られていた。

そこで d 次元立方格子上の SU(N) フェルミハバード模型のリウビリアンギャップを、1 サイトあたりの平均原子数が 1 個の場合に解析的に求めた。特に、リウビリアンギャップは d や N に依存せず、立方格子の一辺の長さが L かつ周期的境界条件の場合には、L の逆二乗に比例することを示した。次に、各サイトが 1 種類の粒子で詰まった状態から、1 つだけ違う種類の粒子に置き換えた状態を初期状態とするダイナミクスを調べた。この場合、置き換えた粒子の生存確率は散逸や原子間の相互作用が小さな場合には指数関数的に減衰するのに対し、散逸や原子間の相互作用が大きな場合はべき的に減衰することを解析的・数値的に示した。これらの結果は、国際会議 [15, 18, 26, 27, 30]、国内会議 [46, 57] で発表されたほか、原著論文 [8] にまとめられた。

3.4.3 数理物理学・統計力学

量子多体傷跡状態をもつ高次元スピンレスフェルミオン系

非可積分な孤立量子多体系の熱化の機構は統計力学の基礎に関わる問題として長年調べられてきた。現在、熱化を説明する仮説として固有状態熱化仮説 (ETH) が知られており、多くの量子多体系で成立することが確認されている。一方で近年、孤立量子系において非可積分系であるにも関わらず熱化しないダイナミクスが確認された。その背景には量子多体傷跡状態 (QMBS) という非熱的な励起状態の存在が指摘されており、初期状態がこの状態と大きくオーバーラップを持つときに、熱化が妨げられると考えられている。これは上述の ETH を破る例として興味を集めており、QMBS の性質や QMBS の現れる模型の構成法などが盛んに研究されている。ただし従来のこうした研究では一次元系を調べるものが多く、またその自由度に関してはほとんどがスピン系を取り扱っていた。そのため、そうした例と比較して、高次元系およびフェルミオン系のような粒子系での QMBS はまだ十分に調べられていない。

田村と桂はスピンレスフェルミオン系において QMBS が現れる高次元模型の系統的な構成法を新たに提案した。任意の二部格子上のホッピング項と、隣接サイトの粒子の有無に依存して運動する、density-assisted hopping と呼ばれる項からなる模型を考える。このときホッピング項を定めるホッピング行列は任意の実対称行列とする。そしてこのホッピング行列から決まる係数を持った density-assisted hopping 項を考える。まずこのような模型において、あるクラスの固有状態が厳密に構成できることを明らかにした。さらにこの状態が実際に非熱的な状態であることを議論するために、エンタングルメント・エ

ントロピー、粒子数密度の相関関数、ダイナミクスを数値的に計算した。その結果、構成された状態が非熱的な性質を持つことが確認された。なお、この模型の構成法において、並進対称性は必ずしも仮定されないため、並進不変でないランダムネスのある場合の厳密な QMBS の例にもなっている。最後に、この QMBS を基底状態に持つハミルトニアンを具体的に構成し、ある条件のもとでそれが一意な基底状態であることを証明した。これらの結果は、原著論文 [6] にまとめられた。

$S = 1$ 量子磁性体における半古典的シミュレーション

量子磁性体の古典的極限を考えるとき、個々のスピンを O(3) ベクトルと考えるのが通例である。これにより、スピン 1/2 の磁性体における通常の磁気秩序は、半古典的なレベルで驚くほどうまく記述できる。しかし、$S > 1/2$ のような磁性体は「より古典的」であると考えられるにもかかわらず、O(3) ベクトルではその特性の多くを説明することはできない。特に、磁性絶縁体、鉄系超伝導体、冷却原子系において実現の可能性が示唆されている単一サイトで磁気四極子を持つ状態を記述することはできない。これらの問題に対しては、古典的な極限を別の形でとらえる必要があり、そのために新しいツールが必要である。

赤城と Remund（OIST）, Pohle（東大院工）, Romhányi（California 大 Irvine 校）, Shannon（OIST）は、$S = 1$ 量子磁性体の半古典的特性を正しく記述する新しい方法を確立した。この方法は、量子スピン 1 を完全に記述するために必要な $su(3)$ 代数を拡張した $u(3)$ 代数に基づいている。このアプローチにより、磁気双極子と磁気四極子を同等に扱う枠組みが得られ、数値計算を実装しやすい運動方程式の記述が可能となる。

この新しい方法を、三角格子上の $S = 1$ bilinear biquadratic 模型の磁気四極子状態（スピンネマティック状態、スピン液晶状態）に適用し、解析的に求められる古典的低温展開や flavor wave 理論と、古典的モンテカルロ法や分子動力学シミュレーションなどの数値計算との比較を通じ、その妥当性を確かめた。そして、本手法の大きな成果として、半古典分子動力学シミュレーションによる動的構造因子に補正項 ω/T を加え $T \to 0$ の極限を取ることで、$T = 0$ の flavor wave 理論の（量子論の）結果を再現できることを明らかにした [図 3.4.16 参照]。また、実験との関連性を考慮し、本手法が異方性を持つ模型にも適用できることを確かめた。この手法によって、今までアクセスできなかったスピン液晶におけるトポロジカル励起のダイナミクスを調べることもできる。これらの成果は、国際会議 [16, 20, 31] で発表されたほか、論文 [3] にまとめられた。

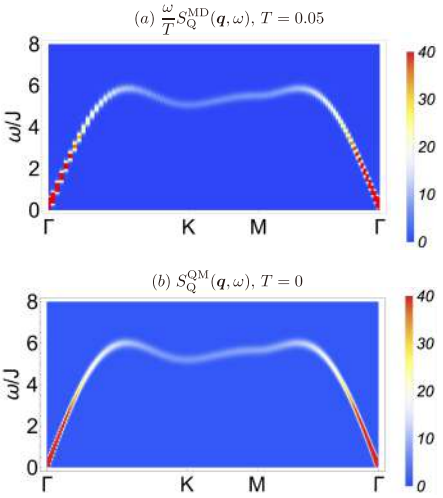

図 3.4.16: (a) $u(3)$ 分子動力学シミュレーションと (b) $T = 0$ での flavor-wave 理論によって得られた磁気四極子 $S_{\mathrm{Q}}(\mathbf{q}, \omega)$ の動的構造因子

3.4.4 その他

高次元拡張 Nicolai 模型におけるフェルミオン的部分系対称性とフラクトン相

フラクトン相とは、(i) 基底状態が指数関数的に縮退している（ただしエントロピーは体積則よりは小さい）、(ii) 運動が空間的に制限された励起をもつ、(iii) 部分系対称性がある、などの特徴をもつ。このような相を実現する微視的モデルとしては、X-cube 模型と呼ばれるものが有名であり、現在まで様々な種類の模型が提案されている。一方で、従来議論されてきた部分系対称性は主にボゾン的な対称性であり、超対称性などのフェルミオン的対称性はほとんど議論されてこなかった。

桂と中山（立教大）は、Nicolai 模型と呼ばれる超対称性をもつ格子フェルミオン系の模型の副格子自由度を含む拡張を考えると、フェルミオン的部分系対称性が自然に現れることを明らかにした。この模型はパラメター g で特徴付けられ、$g \neq 0$ の場合には、超対称性は自発的に破れており、またフェルミオン的部分系対称性の帰結として、基底状態エントロピー S は L^{d-1} に比例する。ただし、$d = 2, 3$ は模型が定義される格子の空間次元で、L は系の線形サイズである。一方で、相互作用が強い極限（$g = 0$）では、元々の Nicolai 模型と同様に、基底状態エントロピーは $S \propto L^d$ と体積則に従う。したがって、この拡張 Nicolai 模型は、$g \neq 0$ の場合には上述のフラクトン的な相にあることが分かった。さらに、これらの格子模型の連続極限や、フェルミオン的部分系対称性のゲージ化についての議論を行った。これらの結果は、原著論文 [4] にまとめられた。

＜受賞＞

[1] 赤城 裕, 第 17 回日本物理学会若手奨励賞「トポロジカルな磁性とその発現機構・創発現象に関する理論的研究」, 日本物理学会, 2023 年 3 月 23 日.

＜報文＞

(原著論文)

[2] Shoichi Tsubota, Hong Yang, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura: Symmetry-protected quantization of complex Berry phases in non-Hermitian systems, Phys. Rev. B **105**, L201113 (2022).

[3] Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhanyi, and Nic Shannon: Semi-classical simulation of spin-1 magnets, Phys. Rev. Research **4**, 033106 (2022).

[4] Hosho Katsura and Yu Nakayama: Spontaneously broken supersymmetric fracton phases with fermionic subsystem symmetries, J. High Energ. Phys. **2022**, 72 (2022).

[5] Yuki Amari, Yutaka Akagi, Sven Bjarke Gudnason, Muneto Nitta, and Yakov Shnir: CP^2 skyrmion crystals in an SU(3) magnet with a generalized Dzyaloshinskii-Moriya interaction, Phys. Rev. B **106**, L100406 (2022).

[6] Kensuke Tamura and Hosho Katsura: Quantum many-body scars of spinless fermions with density-assisted hopping in higher dimensions, Phys. Rev. B **106**, 144306 (2022).

[7] Hong Yang, Linhao Li, Kouichi Okunishi, and Hosho Katsura: Duality, criticality, anomaly, and topology in quantum spin-1 chains, Phys. Rev. B **107**, 125158 (2023).

[8] Hironobu Yoshida and Hosho Katsura: Liouvillian gap and single spin-flip dynamics in the dissipative Fermi-Hubbard model, Phys. Rev. A **107**, 033332 (2023).

(学位論文)

[9] 北濱駿太: Exact results for Kitaev nanoribbons with boundary dephasing (修士論文).

[10] 長尾健太郎: 超対称性のある格子フェルミオン模型とスピン 1/2 鎖の関係 (修士論文).

[11] Hong Yang: Symmetry-Protected Topological Phases of Quantum Particles with Integer Spin (博士論文).

[12] 田村健祐: Rigorous Results for SU(N) Ferromagnetism in Hubbard-type Models (博士論文).

(著書)

[13] 『–Python で実践– 基礎からの物理学とディープラーニング入門 (エンジニア入門シリーズ 112)』, 福嶋 健二, 桂 法称.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[14] Hong Yang: Magnetic and Topological Phases of "Spinful Bosons" in Optical Lattices, *Ultracold Atoms Japan 2022*, Okinawa, Apr. 2022.

[15] Hironobu Yoshida: Exact analysis of the Liouvillian gap for the SU(N) Hubbard model with two-body loss in arbitrary dimension, *Ultracold Atoms Japan 2022*, Okinawa, Apr. 2022.

[16] Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhányi, and Nic Shannon, Spin-1 magnets – A $u(3)$ Formalism, *The 11th International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2022 [HFM22]*, Paris, France, June 2022.

[17] Leilee Chojnacki, Rico Pohle, Han Yan, Yutaka Akagi, and Nic Shannon, Analogues of light and gravity in the collective excitations of quantum magnets, *The 11th International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2022 [HFM22]*, Paris, France, June 2022.

[18] Hironobu Yoshida (Hosho Katsura): Exact analysis of the Liouvillian gap for the SU(N) Hubbard model with two-body loss, *SCES 2022*, Amsterdam, the Netherlands, July 2022.

[19] Shunta Kitahama (Hosho Katsura, Naoyuki Shibata): Kitaev Nanoribbon Model with Boundary Dephasing, *29th International Conference on Low Temperature Physics*, Hokkaido, Aug. 2022.

[20] Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhányi, and Nic Shannon, Spin-1 magnets – A $u(3)$ Formalism, *29th International Conference on Low Temperature Physics*, Hokkaido, Aug. 2022.

[21] Leilee Chojnacki, Rico Pohle, Han Yan, Yutaka Akagi, and Nic Shannon, Analogues of light and gravity in the collective excitations of quantum magnets, *29th International Conference on Low Temperature Physics*, Hokkaido, Aug. 2022.

[22] Atsushi Ono and Yutaka Akagi, Photocontrol of spin scalar chirality in centrosymmetric itinerant magnets, *29th International Conference on Low Temperature Physics*, Hokkaido, Aug. 2022.

[23] Yuki Amari, Yutaka Akagi, Sven Bjarke Gudnason, Muneto Nitta, Yakov Shnir: CP^2 Skyrmion crystals in an SU(3) magnet with a generalized Dzyaloshinskii-Moriya interaction, *2nd International Symposium on Trans-scale Quantum Science (TSQS2022)*, Tokyo, Nov. 2022.

[24] Shunta Kitahama: Kitaev Nanoribbon with Boundary Dephasing, *Novel Quantum States in Condensed Matter 2022*, Kyoto, Nov. 2022.

[25] Leilee Chojnacki, Rico Pohle, Han Yan, Yutaka Akagi, and Nic Shannon, Analogues of light and gravity in the collective excitations of quantum

magnets, The German Conference of Women in Physics (Deutsche Physikerinnentagung), Karlsruhe, Germany, Nov. 2022.

[26] Hironobu Yoshida: Exact analysis of the Liouvillian gap and dynamics in the dissipative SU(N) Fermi-Hubbard model, *Novel Quantum States in Condensed Matter 2022*, Kyoto, Dec. 2022.

[27] Hironobu Yoshida: Single spin-flip dynamics in the dissipative Fermi-Hubbard model, *The 1st young researchers' workshop of the Extreme Universe Collaboration*, Nagoya University, Feb. 2023.

[28] Shunta Kitahama (Hosho Katsura, Naoyuki Shibata): Kitaev Nanoribbon Model with Boundary Dephasing, *APS March Meeting 2023*, Las Vegas, USA, Mar. 2023.

[29] Kensuke Tamura (Hosho Katsura): General theory of flat-band ferromagnetism in the SU(n) Hubbard model, *APS March Meeting 2023*, Las Vegas, USA, Mar. 2023.

[30] Hironobu Yoshida (Hosho Katsura): Liouvillian gap and single spin-flip dynamics in the dissipative Fermi-Hubbard model, *APS March Meeting 2023*, Las Vegas, USA, Mar. 2023.

[31] Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhányi, and Nic Shannon, Spin-1 magnets – a $u(3)$ Formalism, *APS March Meeting 2023*, Las Vegas, USA, Mar. 2023.

[32] Atsushi Ono and Yutaka Akagi, Optically controlled spin scalar chirality in centrosymmetric magnetic metals, *APS March Meeting 2023*, Las Vegas, USA, Mar. 2023.

招待講演

[33] Hironobu Yoshida: Rigorous Results for Lattice Fermion Models with SU(N) Symmetry, *Asian-European workshop on "*SU(N) *physics in condensed matter and cold atoms"*, online, Japan, May 2022.

[34] Hosho Katsura: Magnonic analogs of topological insulators in two and three dimensions, *Band Topology in Quantum Magnets: From Nontrivial Excitations to Non-Hermitian Topology and Spintronics*, Dresden, Germany, June 2022.

[35] Yutaka Akagi: Emergence/control of topological spin textures in various spin systems, *12th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics*, online, Spain, July 2022.

[36] Hosho Katsura, Constructing frustration-free models via Witten's conjugation, *Quantum extreme universe from quantum information*, Kyoto, Japan, Sept. 2022.

[37] Hosho Katsura, Duality, criticality, and topology in quantum spin-1 chains, *Delft Many-Body Workshop Series*, Delft, the Netherlands, Oct. 2022.

[38] Hironobu Yoshida, Majorana reflection positivity in the attractive SU(N) Fermi-Hubbard Model, *Rigorous statistical mechanics and related topics*, Kyoto, Japan, Nov. 2022.

[39] Hosho Katsura, Magnonic analogs of topological insulators in 2 and 3 dimensions, *APCTP-IACS-SNBNCBS Workshop on Computational Methods for Emergent Quantum Matter*, Kolkata, India, Nov. 2022.

[40] Hosho Katsura, Flat bands and related topics, *APCTP-IACS-SNBNCBS Workshop on Computational Methods for Emergent Quantum Matter*, Kolkata, India, Nov. 2022.

[41] Hosho Katsura, Constructing frustration-free models via Witten's conjugation, *Rikkyo MathPhys 2023* Japan, Jan. 2023.

(国内会議)

一般講演

[42] Hong Yang: Duality, Criticality, Anomaly, and Topology in Quantum Spin-1 Chains, 第 17 回量子スピン系研究会, 2022 年 4 月, ハイブリッド.

[43] 赤城裕: 磁性体におけるスピン液晶スキルミオンの開拓, 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」 第二期公募研究キックオフミーティング, 2022 年 6 月, 東京大学物性研究所 (ハイブリッド).

[44] 田村健祐: SU(n) Hubbard 模型における平坦バンド強磁性の一般論, 格子上の場の理論と連続空間上の場の理論, 2022 年 7 月, 京大基礎物理学研究所.

[45] 山本真太朗, 甘利悠貴, 澤渡信之: Din-Zakrzewski インスタントン上のフェルミオンの数理, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[46] 吉田博信, 桂法称: 原子ロスのある SU(N) フェルミハバード模型のリウビリアンギャップの厳密な解析, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[47] 北浜駿太, 柴田直幸, 桂法称: 境界散逸のあるキタエフナノリボン模型の厳密解, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[48] 田村健祐, 桂法称: SU(n) Hubbard 模型における平坦バンド強磁性の一般論, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[49] 國見昌哉, 富田隆文, 桂法称, 加藤雄介: Rydberg 原子を用いた Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を有する量子スピン鎖の実現方法の提案, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[50] 中川大也, 桂法称, 上田正仁: 多成分 Hubbard 模型の部分可積分性：散逸によって誘起される非エルゴード的ダイナミクス, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[51] 小野淳, 赤城裕: 空間反転対称な遍歴磁性体におけるスピンスカラーカイラリティと円偏光自由度の非線形結合, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[52] 山田昌彦, 赤城裕, 宇田川将文: 数値的負符号問題の解決 1 有限温度キタエフ模型の数値解, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[53] 山田昌彦, 赤城裕, 宇田川将文: 数値的負符号問題の解決 2 無限乗積展開法の発展, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[54] 山田昌彦, 赤城裕, 宇田川将文: 数値的負符号問題の解決 3 第二密度行列くりこみ群法の発見, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[55] 甘利悠貴, 赤城裕, 澤渡信之, Yakov Shnir: 一般化 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を有する CP^2 非線形シグマ模型における孤立スキルミオン, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[56] 甘利悠貴, 赤城裕, Sven Gudnason, 新田宗土, Yakov Shnir: 一般化 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を有する SU(3) スピン系における CP^2 スキルミオン結晶, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月, 東京工業大学.

[57] 吉田博信, 桂法称: 原子ロスのある SU(N) フェルミハバード模型におけるリウビリアンギャップと粒子数ダイナミクス, 第 4 回冷却原子研究会「アトムの会」, 2022 年 9 月, 関西セミナーハウス.

[58] 國見昌哉, 富田隆文, 桂法称, 加藤雄介: Rydberg 原子を用いた Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を有する量子スピン鎖の実現方法の提案と非平衡スピンダイナミクス, 第 4 回冷却原子研究会「アトムの会」, 2022 年 9 月, 関西セミナーハウス.

[59] 赤城裕: Topological magnetism in quantum spin-nematics, 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会, 2022 年 12 月, 名古屋大学 (ハイブリッド).

[60] 甘利悠貴, 赤城裕, S. Gudnason, 新田宗土, Y. Shnir: Realization of spin nematic Skyrmion crystals in cold atom systems, 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会, 2022 年 12 月, 名古屋大学 (ハイブリッド).

[61] 山田昌彦, 三野巧, 高橋雅大, 赤城裕, 諏訪秀麿, 藤本聡, 宇田川将文: 行列積くりこみ群法の開発, 物性研短期研究会「固体におけるエニオンと分数統計粒子研究の最前線」, 2023 年 2 月, 物性研究所 (ハイブリッド).

[62] 長尾健太郎, 桂法称: 超対称性のある格子フェルミオン模型とスピン 1/2 XXZ 鎖の関係, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月, オンライン.

[63] 江崎蘭世, 赤城裕, 桂法称: XCuCl$_3$ (X=Tl, K) の BEC 相における電場誘起トリプロン熱ホール効果, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月, オンライン.

[64] 山本真太朗, 甘利悠貴, 澤渡信之: Din–Zakrzewski インスタントンとマヨラナフェルミオンの数理, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月, オンライン.

[65] 古谷峻介, 桂法称, 堀田知佐: 非一様な feedback 制御による量子多体基底状態への緩和, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月, オンライン.

[66] 山田昌彦, 三野巧, 高橋雅大, 赤城裕, 諏訪秀麿, 藤本聡, 宇田川将文: 行列積繰り込み群法による Yang-Lee 模型の解析, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月, オンライン.

[67] 山田昌彦, 三野巧, 高橋雅大, 赤城裕, 諏訪秀麿, 藤本聡, 宇田川将文: 行列積くりこみ群法による二次元量子多体系の解析, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月, オンライン.

[68] 甘利悠貴, 赤城裕, Sven Gudnason, 新田宗土, Yakov Shnir: スピン軌道相互作用を有する冷却原子系における CP^2 スキルミオン結晶とその派生相, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月, オンライン.

招待講演

[69] 桂法称: SU(N) ハバード模型における厳密な結果, 格子上の場の理論と連続空間上の場の理論, 2022 年 7 月, 京大基礎物理学研究所.

[70] 赤城裕: トポロジカルな磁性とその発現機構・創発現象に関する理論的研究, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月, オンライン.

(セミナー)

[71] Hong Yang: Duality, Criticality, Anomaly, and Topology in Quantum Spin-1 Chains, OIST 量子理論ユニットセミナー, 2022 年 4 月, ハイブリッド.

[72] Hosho Katsura: Constructing frustration-free models via Witten's conjugation, University of Tuebingen, Mathematical Physics Seminar, 2022 年 5 月, ハイブリッド.

[73] Hosho Katsura: Magnonic analogs of topological insulators in two and three dimensions, Utrecht University, Quantum Matter Colloquium, 2022 年 10 月, ハイブリッド.

[74] Hosho Katsura: Constructing frustration-free models via Witten's conjugation, University of Amsterdam, CMT seminar, 2022 年 10 月, ハイブリッド.

[75] Hironobu Yoshida: Rigorous results for lattice fermion models with SU(N) symmetry, 凝縮系理論グループセミナー, 京都大学, 2022 年 12 月, ハイブリッド.

[76] Yuki Amari: Skyrmion crystals and their relatives in SU(3) chiral magnets, OIST 量子理論ユニットセミナー, 2023 年 2 月, ハイブリッド.

[77] Hironobu Yoshida: Liouvillian gap and single spin-flip dynamics in the dissipative Fermi-Hubbard model, Quantum Materials Seminar, University of California, Berkeley, 2023 年 3 月, ハイブリッド.

[78] Shunta Kitahama: Kitaev nanoribbon with boundary dephasing: Non-Hermitian free-fermion Hamiltonians and its application, Quantum Materials Seminar, University of California, Berkeley, 2023 年 3 月, ハイブリッド.

3.5 樺島研究室

2022 年度の樺島研の構成メンバーは樺島の他、髙橋昂助教、Xiangming Meng 特任助教、D1:1 名、M2:1 名、M1:1 名であった。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用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、2022 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

ℓ_1-正則化付き線形回帰によるイジング逆問題の性能分析

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基づいて、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。最尤推定に従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。

この問題に対し、前年度、我々は推定に用いるモデルが実際のモデルと異なっている場合の素朴な例としてイジング逆問題に ℓ_1-正則化付き線形回帰を用いた場合のネットワーク再構成の可能性をレプリカ法を用いて吟味し、正しい偽尤度関数を用いた場合とほぼ同じデータ量でネットワーク構造を同定できることを示した。ただし、レプリカ法による解析は数学的厳密性に欠け、また、解析できる対象も単純化された系に事実上限られる。2022 年度は、レプリカ法により得られた結果に基づき、より一般のネットワークに対して数学的に厳密にネットワーク再構成の可能性を吟味した。この結果は [5] で発表した。

極スパース状況下における LASSO 回帰

観測データの背後にある説明変数にスパース性を仮定し、大規模な数の候補の中からそれらを過不足なく選ぶ変数選択の問題を考える。観測数 M、説明変数の数 N 及び真の信号の非ゼロ成分 d が同じレートで発散する設定ではレプリカ法による解析方法が有効であり、様々な変数選択法についての典型評価が近年行われてきた。一方、d が N に比べて遥かに小さい極スパースな場合には d の有限サイズ効果が無視できず、上述の問題設定のときとは異なる振る舞いが期待される。

これらを念頭に、本研究では $d = O(1)$ で $N \to \infty$ とする極限における変数選択法の統計力学的解析を試みた。具体的には、変数選択を行う上で正則化項として ℓ_1 ノルムを課す LASSO 線型回帰について計画行列の各成分が同一のガウス分布から独立に生成されている場合の平均的な性能をレプリカ法を用いて評価した。その結果、特に、$N \to \infty$ の極限で $M = \alpha \log(N)$ とスケーリングした場合、$\alpha > \alpha_{\rm c}$ では完全な変数選択が LASSO によって可能であると期待され、臨界値 $\alpha_{\rm C}$ は高々 $O(Md)$ 個のランダム変数の確率的振る舞いによって定まることが分かった。これらの結果は [12, 16, 4] で発表した。

3.5.2 組み合わせ最適化問題

一般化されたナップザック問題の統計力学的解析

重量制限の下、できるだけ価値の高いアイテム種の組み合わせを求めるナップザック問題は代表的な組み合わせ最適化問題であり、最悪評価に基づく計算の複雑性クラスでは NP-困難クラスに属することが知られている。標準的なナップザック問題では、重量制約は 1 つであり、また、各アイテム種の採用可能数も高々 1 個である。我々は、重量制約および各アイテム種の採用可能数をそれぞれ複数とした一般化された多次元ナップザック問題（以下、GMDKP）に対して統計力学的な分析を行った。

標準的なナップザック問題についてはいくつかの効率的なアルゴリズムが知られており、 解の性質も詳しく調べられている。ただし、 GMDKP についてはアルゴリズムや解の性質に関する知見は少ない。そこで、我々は同問題のランダムアンサンブルについて解空間の構造を調べた。具体的には、 レプリカ対称性仮定のもとで、 典型的な最適総価値をレプリカ法を用いて計算した。その結果、 貪欲型ヒューリスティック（発見的手法）は、 主要項が最適総価値と等しい「ほぼ最適な解」を低い計算コストで見つけることができることがわかった。加えて、 アイテムの価値が不均一な場合にレプリカ対称性が破れ、 解空間の構造が複雑化する一方で、最適総価値の主要項についてはレプリカ対称解による評価が正しいことを支持する結果を得た。以上の結果は GMDKP が NP-困難クラスの中でも「簡単な」問題であることを示唆している。これらの結果は [2, 15] で発表した。

ハードウエア実装のためのレプリカシミュレーテッドアニーリングの効率化

計算機上で温度 T の確率過程を模擬し、高温から低温に徐冷することでエネルギー関数の基底状態を探索するシミュレーテッドアニーリング（SA）は組み合わせ最適化問題の近似解を求めるメタヒューリスティクスとして広く用いられている。また、最近では FPGA や GPU などを活用し、SA を高速に実行する専用ハードウエアの開発も盛んである。

近年、いくつかのクラスの組み合わせ最適化問題に関して、適当な相互作用下にある複数の複製系（レプリカ）に対して SA を並列的に動作させることに

より、解探索に要する計算コストを大幅に削減できることが報告されている。しかしながら、レプリカ間の相互作用の導入は、通信コストを増加させるためハードウエア実装を行う際のボトルネックとなる。

我々は、レプリカ間相互作用の代わりに、各時点までの最適解を参照することで通信コストを抑えつつも同等の性能が得られることを示した。この結果は [3] で発表した。

3.5.3 統計的学習理論

反復型自己学習アルゴリズムによる半教師あり学習

機械学習の最も基本的な枠組みは、ラベル有りデータに基づく教師あり学習である。しかし、実践的な場面では、取得データの一部にしかラベルが付与されておらず、大半がラベルなしデータであることがしばしばである。そこで、少数のラベル有りデータと、大量のラベル有りデータの組み合わせによって優れた予測性能を持つ分類器を学習する半教師あり学習の方法が必要である。

自己学習アルゴリズムは、汎用的な半教師あり学習のメタヒューリスティクスである。自己学習アルゴリズムの基本的なアイディアは、手元の学習済みモデルによってラベルなしデータ点のラベルを予測し、その予測を真のラベルであるかのように扱って改めて教師あり学習で学習しなおすというものである。

このアルゴリズムを、2 成分混合ガウス分布における線形モデルの学習に適用した場合の性能は、学習回数が 1 回の場合については典型的な性能が解析されていたが、一般に T 回予測と学習を繰り返した場合の挙動は未知であった。髙橋はレプリカ法を階層的に T 回用いることで、オンライン自己学習アルゴリズムの T 反復目における学習の結果を平均場理論的に解析できることを示した。この平均場理論を用いて、取得ラベルの偏りがない場合には、教師あり学習とほぼ等価な汎化性能が得られることを明らかにした。一方、偏りがある場合には偏り度合いに応じて教師あり学習と比較した汎化誤差が急激に悪くなることも明らかにした。これは自己学習のルーチンで用いる教師あり学習として、データに対して適切なものを用いた場合には疑似ラベルは真のラベルに匹敵する内容を持つことを示唆している。これらの結果は [7, 13, 14] で発表した。

バギングによる不偏推定量の分散縮小

統計的な推論は有限個のデータに基づいて実行されるため、取得データに応じて推論結果も統計的に揺らぐことになる。この揺らぎを数学的に特徴付け、仮説検定等を通じて推論結果の信頼性を客観的に担保することは推測統計学の根幹である。近年、(データ数)≃(パラメータ次元) が成り立つような高次元統計領域における検定法とその性能についての研究が盛んに行われている。そのうちの一つに、スピングラスの平均場理論に現れる有効一体問題の統計性を利用して不偏推定量を構築する方法が知られている。この不偏推定量の分散が小さければ検定法の検出力は高くなるが、一般には推定法を変えることで分散を小さくするのは容易ではない。特に、非凸正則化などを用いたアプローチでは、不偏推定量を構築する際に用いられるアルゴリズムの収束性が悪化する可能性があることが知られている。

髙橋は、推定に用いる損失関数そのものを変えるのではなく、データのブートストラップリサンプリングを行い、複数のリサンプリングデータに対しての推論結果を平均化するバギングによるアプローチを検討した。レプリカ法と近似信念伝搬法を組み合わせて得られる AMPR、replicated VAMP といった手法によって得られる不偏推定量が、個別のリサンプリングデータに対して得られる不偏推定量の重ね合わせになっていることを明らかにし、その分散の大きさを AMPR の状態発展方程式を用いて網羅的に数値解析した。スパース推定に基づく不偏推定量を重ね合わせる際、データ数が多く真のパラメータがスパースであるような良条件下においては、単一データにおいて有限の強さの正則化を入れたスパース推定が十分優れているため、バギングの効果はほぼない。いっぽう、真のパラメータがあまりスパースではなくなってくると、あるところで最適な正則化強度が $+0$ となる相転移が生じる。すなわち、無限小の正則化を用いて得られる推定量の重ね合わせを用いた推定量をバギングしたものを用いるのがよいという結果が得られる。実際、この場合にはバギングで不偏推定量の分散が 15% 程度減少する。さらに、最適な正則化強度が $+0$ である場合には正則化強度についてもランダムネスを導入することで更に分散が縮小する。つまり、取得データの性質に応じて、単一データによって十分パラメータの情報が取得できる領域から、単一データでは情報が抽出できず比較的情報の少ないバラツキのある解を無数に重ね合わせたほうがましになる領域への相転移が生じていることが示唆されている。また、真のパラメータが全て非ゼロであるような場合には、そこで最適な推定量である Ridge 正則化に基づく不偏推定量と同等の分散を持つことが明らかになった。これは、線形モデルにおいてはバギングが暗黙的に Ridge 正則化として働いていることを示唆している。この結果は [19] で発表した。

標本分散共分散行列の固有空間の分析

データを観測する際には、統計的な揺らぎの影響は無視できない。真の情報と観測から推定される情報は一般には一致しない。そのため、推定された情報がどの程度統計的な揺らぎの影響を受けているかを定量的に分析することは重要な問題である。ここでは特に N 次元のベクトルデータを想定し、そのデータを生成する分布の特徴を推定することを考える。これを推定する一つの方法は、標本共分散行列の固有基底 (主成分ベクトル) を求めることである。このとき標本共分散行列の固有基底が真の共分散行列の固有基底とどれだけ類似しているかは、サンプル数 M や真の共分散行列の固有値分布に依存する。

我々は、標本共分散行列と真の共分散行列の固有ベクトル間でのオーバーラップに着目して統計力学的解析を行った。レプリカ法を用いることによりオーバーラップが従う統計的性質を記述する巨視的方程式が得られた。また固有値密度についても巨視的方程式を導いた。これらを比較することで真の共分散行列と標本共分散行列の最大固有ベクトルどうしのオーバーラップが $o(N)$(常磁性相) から $O(N)$(強磁性相) へと変わる相転移の条件が求まった。これらの結果は [18] で発表した。

3.5.4 拡散モデルに基づく圧縮センシング

敵対的生成ネットワークや拡散モデル (diffusion model: DM) などの提案により、大量のデータにもとづいてそれらを生成する分布を構成する「生成モデル」が、近年注目されている。生成モデルは実在しない顔画像、絵画、音楽、文章など、従来、ヒト以外にはなし得なかった情報生成の機械化を可能にする能力に注目が集まっている。

一方、こうしたモデルは適切な事前分布として利用することで情報処理の効率化にも役立つ。たとえば、断層写真がしたがう事前分布を $p(x)$(x は断層写真の像) とし、X 線 CT や MRI による測定過程を測定ノイズによる影響も考慮して条件付き分布 $p(y|Ax)$(A は観測行列) として表現する。ベイズの定理をもちいれば測定結果 y を得た後の x の事後分布は $p(x|y) = \frac{p(y|Ax)p(x)}{p(y)}$ で与えられる。$p(x)$ および $p(y|Ax)$ が実際の生成プロセスを表現している場合には、この事後分布にもとづく情報処理が、あり得るすべての方法の中で最良の性能を与える。残念ながら、$p(x)$ の同定は難しく、多くの場面でこうしたベイズの定理による方法を活かしきることはできていない。とはいえ、そうした中でも $p(x)$ の役割を適当なスパース性の仮定で置き換えた「圧縮センシング」は標準的な信号処理法を凌駕する高い性能を示すことが近年明らかにされている。

このことは、$p(x)$ としてより適切な分布を用いれば、さらに効率的な情報処理が可能になることを示唆している。具体的には X 線 CT による被曝量を大幅に削減することや MRI に要する計測時間の大幅な短縮につながる。我々は、score-based generative model と呼ばれる DM から構成された生成モデル（事前分布）と尤度 $p(y|Ax)$ の DM 的な取り扱いとを組み合わせることで、実用上重要な 1-bit 圧縮センシングの枠組みで、既存手法を大幅に上回る信号復元性能を得ることに成功した。この結果は [22, 6] で発表した。

＜報文＞

(原著論文)

[1] T. Takahashi and Y. Kabashima, IEEE Trans. Info. Theor. **68**, pp. 5579-5600 (2022)

[2] Y. Nakamura, T. Takahashi, Y. Kabashima, J. Phys. A: Math. Theor. **55**, pp. 375003(1-20) (2022)

[3] M. Konoshima, H. Tamura, Y. Kabashima, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, pp. 113001(1-4) (2022)

[4] K. Okajima, X. Meng, T. Takahashi, Y. Kabashima, arXiv:2302.13093, to appear in AISTATS2023

[5] X. Meng, T. Obuchi, Y. Kabashima, arXiv:2110.08500, to appear in AISTATS2023

[6] X. Meng and Y. Kabashima, arXiv:2211.13006, to appear in ICLR2023

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[7] T. Takahashi, “Sharp Asymptotics of Self-training with Linear Classifier”, Youth in High-Dimensions: Recent Progress in Machine Learning, High-Dimensional Statistics and Inference, June 27-30, 2022, ICTP, Trieste, Italy.

招待講演

[8] Y. Kabashima, “Assessing transfer entropy from biochemical data”, Nobel Symposia: Predictability in Science in the Age of AI, October 24-28, 2022, STIAS, Stellenbosch, South Africa

[9] Y. Kabashima, “Assessing transfer entropy from biochemical data”, Dynamic Days Asia Pacific 12, November 7-11, 2022, KIAS, Daejeon, South Korea

[10] Y. Kabashima, “Statistical mechanics approach to linear regression”, Functional Inference and Machine Intelligence (FIMI) 2023, March 14-16, 2023, 統計数理研究所, 立川市

(国内会議)

一般講演

[11] 樺島祥介, “情報の中のスピングラス”, 日本物理学会 2022 年秋季大会, オンライン, 9 月 10 日 (2022)

[12] 岡島光希, Xiangming Meng, 髙橋昂, 樺島祥介, “極スパース状況下における LASSO 回帰の統計力学的解析”, 日本物理学会 2022 年秋季大会, オンライン, 9 月 10 日 (2022)

[13] 髙橋昂, “反復型自己学習アルゴリズムのレプリカ解析”, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 東工大, 9 月 12 日 (2022)

[14] 髙橋昂, “反復型自己学習アルゴリズムの典型性能評価”, 第 25 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS 2022), つくば国際会議場, 11 月 21-22 日 (2023)

[15] 中村優太, 髙橋昂, 樺島祥介, “一般化されたナップザック問題の統計力学的解析”, 日本物理学会 2023 年春季大会, online, 3 月 22 日 (2023)

[16] 岡島光希, Xiangming Meng, 髙橋昂, 樺島祥介, “極スパース条件における Lasso によるサポート復元条件”, 日本物理学会 2023 年春季大会, online, 3 月 22 日 (2023)

[17] 樺島祥介, “高次元機械学習への統計力学的アプローチ”, 日本物理学会 2023 年春季大会, online, 3 月 23 日 (2023)

[18] 小宮山智浩, 髙橋昂, 樺島祥介, “標本共分散行列の固有空間の解析”, 日本物理学会 2023 年春季大会, online, 3 月 25 日 (2023)

[19] 髙橋昂, “ブートストラップ平均化された不偏推定量の統計力学的解析”, 日本物理学会 2023 年春季大会, online, 3 月 25 日 (2023)

招待講演

[20] 樺島祥介, “Assessing transfer entropy from biochemical data”, 機械学習と核物理に関する miniWS, 理化学研究所和光キャンパス, 11 月 29-30 日 (2022)

[21] 樺島祥介, “Assessing transfer entropy from biochemical data”, CREST 「バイオ DX 」領域 2 022 年度公開シンポジウム, JST 東京本部 別館, 11 月 20 日 (2022)

[22] 樺島祥介, “拡散モデルに基づく圧縮センシング”, 公開シンポジウム「データ駆動科学と情報計測の新展開」(DDIMA), 3 月 28-30 日 (2023)

(セミナー)

[23] 樺島祥介, “スパースモデリングへの統計力学的アプローチ”, 上智大学大槻研究室セミナー, 11 月 21 日 (2022)

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。

2022 年度は、辻直人准教授、高三和晃助教、修士課程の Huanyu Zhang 氏、牛原啓氏、西村俊祐氏、研究生の Niklas Ziereis のメンバーで研究を行った。主に、超伝導体のダイナミクス、量子開放系のダイナミクス、直流電場・電流が誘起する量子相、量子多体系の非線形応答、トポロジカル相のダイナミクスなどの研究テーマに取り組んだ。辻が「超伝導体におけるヒッグスモードの光共鳴現象の理論研究」により令和 4 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞した [1]。

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と非線形応答

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直接相互作用させることができる。この非線形結合を使うと、超伝導体に照射した光の周波数の 2 倍が超伝導ギャップエネルギーに一致するときにヒッグスモードと光が共鳴し、それに伴って巨大な三次高調波が発生する。実際に高強度のテラヘルツ波を用いた実験により三次高調波の共鳴が観測され、ヒッグスモード由来の応答と整合する結果が得られている。辻はこれら超伝導体のヒッグスモードを含む集団励起モードと非線形応答の最近の発展についてセミナー [37, 38] を行った。

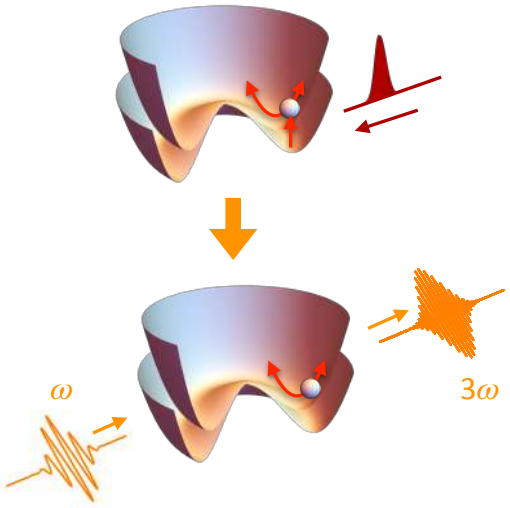

図 3.6.17: 超伝導体にシングルパルス光を照射するとクエンチとして働くことでヒッグス振動が誘起され、ヒッグスモードを介した三次高調波が増幅される様子。

超伝導体における三次高調波の光増強現象

最近、超伝導体の 3 次高調波が光励起によって大幅に増強される現象が実験的に報告されており [33]、5 次の非線形効果やヒッグスモードの自己相互作用の効果について議論されてきた。ところが、これまでの理論解析は不純物効果を考慮しない清浄極限に限定されており、より現実的な不純物がある場合についてはわかっていなかった。辻は、不純物効果を含めた超伝導体の 3 次高調波の光増強現象について非平衡グリーン関数をもとに理論的に解析した [7, 8, 20]。その結果、ポンプ光の周波数が超伝導ギャップより十

分大きい場合には 3 次高調波に対するヒッグスモードの寄与が増大することがわかった。一方、準粒子の寄与はポンプ光の強度を大きくしても変化しなかった。このことは、ポンプ光がクエンチとして働いてヒッグス振動を誘起することで、ヒッグス振動を媒介する 3 次高調波が増幅したと解釈できる。クエンチで誘起したヒッグスモードによって 3 次高調波が増大する現象は、ポンプ光の周波数を超伝導ギャップエネルギーに近づけた場合にも起こることがわかった。

超伝導体のフロッケ状態

時間的に周期的な外場によって駆動された量子多体系では、外場の衣をまとったフロッケ状態と呼ばれる非平衡定常状態が現れる。フロッケ状態においては準粒子の質量やエネルギーギャップ、寿命などが外場の効果によって変化し、平衡状態には見られなかった物理的性質を示すことがある。Zhang、高三、辻は、BCS 理論をフロッケ・ケルディッシュ形式に拡張することで、時間的に周期的な電場によって駆動された超伝導体のフロッケ状態を理論的に解析した [16]。散逸の効果を取り込むために自由フェルミオン熱浴と結合した BCS 模型を考え、平均場近似の範囲で超伝導相を扱った。その結果、一粒子スペクトルにフロッケサイドバンドや超伝導ギャップとは別のギャップ構造が現れることがわかった。また、電場の周波数が大きい場合に電場駆動によって常伝導相から超伝導相に転移する場合があることが見出された。これは周期電場によって有効的に引力相互作用が増強したことによる結果と解釈できるが、散逸があり電子分布が平衡状態から大きく変化しているにも関わらず超伝導相が誘起される点が非自明である。

3.6.2 量子開放系のダイナミクス

近年、人工量子系などにおいて散逸を制御したり設計する技術が発展してきたことにより、量子開放系は非平衡量子多体系の物理を展開する新しいクラスとして注目されている。

量子マスター方程式によるエネルギー流の解析

量子開放系のダイナミクスはマルコフ型の量子マスター方程式 (GKSL 方程式) によって記述されることが多いが、その際に用いる近似が量子多体系では正当化されない場合があったり、エネルギー流 (熱流) を正しく記述しない場合があることが知られている。牛原、高三、辻は量子多体系に適用可能な局所 GKSL 方程式を用いて、異なる温度の熱浴に結合した磁場中のスピン 1/2 のスピン鎖のエネルギー流を解析した [35, 36]。Redfield 方程式の結果と比較することで、スピン間相互作用が弱い時に局所 GKSL 方程式によって精度よく記述されることがわかった。スピン間相互作用を変えていくとエネルギーギャップの大きさが変わり、エネルギー流は非単調な振る舞いをする。二つの熱浴の温度差を大きくしていった時に、エネルギー流が非線形な応答を示すことも明らかにした。

量子多体系におけるフィードバック制御

多体系の量子状態を制御する方法として、観測してその結果に応じてユニタリー操作をすることを繰り返す量子フィードバック制御がある。量子系に特有の性質として観測による反作用が必ずあり、その効果を使うことで観測誘起相転移を引き起こすことができる。観測に加えてフィードバック制御をすることによりさらに新しい量子状態を安定化させることができると期待される。西村はフィードバック制御を実装することが可能なランダムユニタリー量子回路の数値シミュレーションを行い、エンタングルメントエントロピーの時間発展などの初期の結果について報告した [22, 34]。

量子アクティブマター

アクティブマターとは、自ら動く要素の集まりであり、鳥や魚の群れなどがその代表例として挙げられる。自ら動く性質 (自己駆動性) により系は平衡から大きく離れ、この非平衡性に起因した様々な相転移やパターン形成が生じる。アクティブマターはこれまで主に古典系を舞台に研究されてきたが、最近、高三は足立氏・川口氏 (理研) と共に、アクティブマターの物理を量子多体系に拡張する研究を行った。具体的には、冷却原子等の人工量子系において散逸を制御された形で導入することで、古典系の自己駆動性と類似の効果を引き起こせることを示し、それに起因した量子相転移 (相分離・強磁性転移など) を引き起こせることを明らかにした。この成果に関して、国際ワークショップでの招待講演 [10] を含む、複数の研究会・学会にて発表を行った [25, 39, 40]。

3.6.3 直流電場・電流が誘起する量子相

近年の実験技術の進歩により、強い電場を物質に印加することが可能になり、これを利用した量子物性の制御が盛んに研究されている。特に、直流電場やそれに伴う電流を利用した制御においては、電場が空間反転対称性を破ることによる新たな機能性の発現が期待される。高三は、このような方向性での物性制御を探究してきた。特に今年度は、超伝導体を直流電流で制御する可能性を調べた。具体的には、直流電流によって準粒子スペクトルを変形させ、トポロジカル相転移を引き起こせることを示し、それを利用することで様々なトポロジカル超伝導体を実現できることを明らかにした。この成果について、論文 [2, 3] として出版した他、国際会議での招待講演 [9] を含む、複数の研究会・学会にて発表を行った [12, 13, 14, 19, 24, 30, 41]。

3.6.4 量子多体系の非線形応答

非線形応答は、線形応答では得られない豊富な情報が得られるプローブとしても、周波数変換等のデバイス応用における動作原理としても重要な物理現象であり、これまでの研究により多くの性質が明らかにされている。しかしながら、自由電子系を超えた、相互作用を含む一般の量子多体系における非線形応答の性質は十分には明らかになっておらず、近年でも盛んに調べられている。高三は以前からこの課題に取り組んでおり、今年度は、押川氏・渡辺氏 (東大) と共に、量子多体系の非線形応答の研究の中で見出された新しい物理量である「非線形ドルーデ重み」に関する研究を行った。具体的には、熱力学極限で発散する等の病的振る舞いが報告されてきた非線形ドルーデ重みに関して、その病的振る舞いの起源が熱力学極限とゼロ周波数極限の順序に起因するものであることを示し、それを適切に考慮した新たな物理量である「バルクドルーデ重み」を考えることでこれらの病的振る舞いが解消されることを明らかにした。この成果に関して論文 [5] として発表した他、学会発表 [31] を行った。

3.6.5 トポロジカル相のダイナミクス

トポロジカル絶縁体中のエキシトニック状態

高三は、森氏・森本氏 (東大)・Ciocys 氏・Ai 氏・Currier 氏・Moore 氏・Lanzara 氏 (カリフォルニア大学バークレー校) と共に、光照射されたトポロジカル絶縁体に生じるダイナミクスを時間分解角度分解光電子分光によって調べ、ダイナミクスの中に長寿命の励起子状態が現れることを明らかにした。この励起子は、トポロジカル表面状態の電子とバルク状態の正孔によって生じていると考えられ、トポロジカル物性と励起子物性をつなぐ新しい発見である。高三は本実験結果の理論解析を担当し、実験で得られた 1 粒子スペクトルを有効モデルから再現した。この成果に関して論文 [4] として発表した他、学会発表 [15, 32] も行った。

＜受賞＞

[1] 辻直人、令和 4 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞.

＜報文＞

(原著論文)

[2] Kazuaki Takasan, Shuntaro Sumita, and Youichi Yanase, “Supercurrent-induced topological phase transitions”, Phys. Rev. B **106**, 014508 (2022).

[3] Shuntaro Sumita, and Kazuaki Takasan, “Supercurrent-induced Weyl superconductivity”, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 074703 (2022).

[4] Ryo Mori, Samuel Ciocys, Kazuaki Takasan, Ping Ai, Kayla Currier, Takahiro Morimoto, Joel E. Moore, and Alessandra Lanzara, “Spin-polarized spatially indirect excitons in a topological insulator’, Nature **614**, 075141 (2023).

[5] Kazuaki Takasan, Masaki Oshikawa, and Haruki Watanabe, “Drude weights in one-dimensional systems with a single defect”, Phys. Rev. B **107**, 075141 (2023).

(総説)

[6] Youichi Yanase, Akito Daido, Kazuaki Takasan, and Tsuneya Yoshida, “Topological d-wave superconductivity in two dimensions”, Physica E **140**, 115143 (2022).

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[7] Naoto Tsuji, “Higgs-mediated nonlinear optical response and its amplification in superconductors”, Novel Quantum States in Condensed Matter 2022 (NQS2022), YITP, Kyoto, November 2022.

[8] Naoto Tsuji, “Nonlinear terahertz spectroscopy of superconductors: Higgs mode and beyond”, Trends in the Theory of Quantum Materials 2022 (TTQM2022), Zürich, Switzerland, November 2022.

[9] Kazuaki Takasan, “Controlling states of matter with DC electric field and current: magnetism, optical response, and superconductivity”, Conference on Laser and Synchrotron Radiation Combination Experiment 2022 (LSC2022), Pacifico Yokohama (Yokohama, Japan), April 2022.

[10] Kazuaki Takasan, “Quantum active matter in non-Hermitian systems”, Non-Hermitian Quantum Mechanics 2022 (NH2022), University of Tokyo (Tokyo, Japan), July 2022.

一般講演

[11] Kazuaki Takasan, “Ferromagnetism in tilted fermionic Mott insulators”, Quantum extreme universe from quantum information, Yukawa Institute for Theoretical Physics (Kyoto, Japan), September 2022.

[12] Kazuaki Takasan, “DC-driven quantum matter: electric field, normal current, and supercurrent”, Novel Quantum States in Condensed Matter 2022 (NQS 2022), Yukawa Institute for Theoretical Physics (Kyoto, Japan), November 2022.

[13] Kazuaki Takasan, Shuntaro Sumita, and Youichi Yanase, “Supercurrent-induced topological phase transitions”, American Physical Society March Meeting2023, Caesars Forum Convention Center, (Las Vegas, USA), March 2023.

[14] Shuntaro Sumita, and Kazuaki Takasan, “Weyl superconductivity induced by supercurrent flow American Physical Society March Meeting2023, Caesars Forum Convention Center, (Las Vegas, USA), March 2023.

[15] Ryo Mori, Samuel Ciocys, Kazuaki Takasan, Ping Ai, Kayla Currier, Takahiro Morimoto, Joel E. Moore, and Alessandra Lanzara, “Observation of an excitonic state in a topological insulator”, American Physical Society March Meeting2023, Caesars Forum Convention Center, (Las Vegas, USA), March 2023.

ポスター発表

[16] Huanyu Zhang, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Floquet Many-body Theory for Driven BCS Superconductors: With Potential Application to the Nonlinear Responses”, FoPM Symposium 2023, University of Tokyo (Tokyo, Japan), February 2023.

(国内会議)

招待講演

[17] 辻直人、「高エネルギー超伝導物性物理学の創出」、JST 創発的研究支援事業「融合の場」第 1 回公開シンポジウム、東京、2022 年 6 月.

[18] 高三和晃、「非平衡物質相の物性物理学 (前半) / “海外で研究すること” について (後半)」、第 67 回物性若手夏の学校、オンライン、2022 年 8 月.

[19] 高三和晃、「光電場や電流を利用した超伝導体の動的制御」、第 28 回渦糸物理ワークショップ、青山学院大学、2022 年 12 月.

一般講演

[20] 辻直人、「超伝導体における三次高調波の光増強現象と不純物効果」、日本物理学会秋季大会、東京工業大学、2022 年 9 月.

[21] 松井千尋、辻直人、「不純物を含む散逸付き XXZ 鎖の定常状態の解析」、日本物理学会秋季大会、東京工業大学、2022 年 9 月.

[22] 西村俊祐、「量子多体系におけるフィードバック制御」、第 67 回物性若手夏の学校、オンライン、2022 年 8 月.

[23] 高三和晃、手塚真樹、「強い傾斜ポテンシャル下の Mott 絶縁体に生じる強磁性」、日本物理学会秋季大会、東京工業大学、2022 年 9 月.

[24] 高三和晃、角田峻太郎、柳瀬陽一、「超伝導電流が誘起するトポロジカル相転移」、日本物理学会秋季大会、東京工業大学、2022 年 9 月.

[25] 足立景亮、高三和晃、川口喬吾、中野裕義、「異方的アクティブ格子ガスが示す長距離相関とモティリティ誘起相分離」、日本物理学会秋季大会、東京工業大学、2022 年 9 月.

[26] 中村真、石垣秀太、高三和晃、「AdS/CFT 対応における非平衡定常状態の有効温度」、日本物理学会秋季大会、東京工業大学、2022 年 9 月.

[27] 中村真、石垣秀太、高三和晃、「AdS/CFT 対応による非線形電気伝導度の計算における正則条件について」、日本物理学会秋季大会、岡山理科大学、2022 年 9 月.

[28] 牛原啓、池田昌司、「張力下でのバネネットワークが示す新規な相転移現象」、日本物理学会秋季大会、東京工業大学、2022 年 9 月.

[29] 高三和晃、手塚真樹、「極端強電場下の Mott 絶縁体に生じる強磁性ダイナミクス」、日本物理学会春季大会、オンライン、2023 年 3 月.

[30] 高三和晃、角田峻太郎、柳瀬陽一、「超伝導電流印加下の準粒子スペクトルに生じるトポロジカル相転移」、日本物理学会春季大会、オンライン、2023 年 3 月.

[31] 高三和晃、押川正毅、渡辺悠樹、「欠陥のある 1 次元量子系におけるバルク Drude ウェイト」、日本物理学会春季大会、オンライン、2023 年 3 月.

[32] 森亮、Samuel Ciocys、高三和晃、Ping Ai、Kayla Currier、森本高裕、Joel E. Moore、Alessandra Lanzara、「トポロジカル絶縁体中のエキシトニック状態の観測」、日本物理学会春季大会、オンライン、2023 年 3 月.

ポスター発表

[33] 礒山和基、辻直人、島野亮、「s 波超伝導体 NbN における Higgs モードの量子干渉測定」、第 14 回低温科学研究センター研究交流会、東京大学、2023 年 2 月.

[34] 西村俊祐、「量子多体系におけるフィードバック制御」、QEd サマースクール、沖縄科学技術大学院大学、2022 年 9 月.

[35] 牛原啓、高三和晃、辻直人、「多体系に適用可能な量子マスター方程式を用いたエネルギー流の解析」、量子情報と量子基礎論の諸側面、東京大学、2023 年 2 月.

[36] 牛原啓、高三和晃、辻直人、「多体系に適用可能な量子マスター方程式を用いたエネルギー流の解析」、計算物理春の学校 2023、沖縄市町村自治会館、2023 年 3 月.

(セミナー)

[37] Naoto Tsuji, “Collective modes in superconductors: a new perspective from nonlinear terahertz responses”, CCES seminar (online), IBS Center for Correlated Electron Systems (CCES), Seoul National University, March 2023.

[38] 辻直人、「超伝導体における「ヒッグス粒子」」、第 4 回物性セミナー、オンライン (東京大学)、2022 年 6 月.

[39] Kazuaki Takasan, “Activity-induced quantum phase transitions: A proposal for quantum active matter”, StatPhys Seminar, online, June 2022.

[40] 高三和晃、「自己駆動性が誘起する量子相転移：“量子アクティブマター” の提案 」、統計物理と統計科学のセミナー、オンライン、2022 年 12 月.

[41] 高三和晃、「光電場・電流による超伝導体の動的制御」、物性物理オンラインセミナー、オンライン、2023 年 3 月.

(アウトリーチ)

[42] 高三和晃、「非平衡状態で物質の “限界” を超える」、東大理学部 高校生のための冬休み講座 2022 Online、オンライン、2022 年 12 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になった。

一方で、観測/制御下における量子系の研究は、これまで主として量子光学の分野で少数自由度系を対象に精力的に行われてきた。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、摂動的および非摂動的領域の非平衡開放系の物理について、量子測定理論・繰り込み群・トポロジー・場の理論・機械学習などの考え方/手法も援用しながら研究を行ってきている。

3.7.1 開放系・非エルミート物理

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中でも、特に非エルミート系と呼ばれるクラスの物理系に着目し、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究してきた。

連続体模型における非エルミートブロッホバンド理論とフォトニック結晶への応用

非エルミート物理の研究で主要な研究対象の 1 つである非エルミート表皮効果は、多数の固有状態が系の境界に局在する現象である。これまで、非エルミート表皮効果は強束縛模型を用いて解析されていたが、連続体模型における非エルミート表皮効果はほとんど探索されていなかった。横溝は東工大村上研、納富研と共同研究を行い、Strum-Liouville 型微分方程式で記述される周期的な非エルミートポテンシャル中の波の連続バンドを計算する方法を確立した。特に、空間について 1 階微分の項が複素ゲージポテンシャルを表しており、これが非エルミート表皮効果の起源であることを明らかにした。また、得られた結果を基に、非エルミート表皮効果を示すフォトニック結晶の提案を行った。理論計算と数値シミュレーションの結果、誘電率の異方性と光学的損失が非エルミート表皮効果を引き起こすという結論が得られた。以上の成果は論文を通じて発表された [1]。

非線形系の非エルミート物理

非エルミート系の研究は、従来線形領域や 1・2 次元などの低次元系において主に良く理解されてきた。これに対し、今年度は非線形領域や 3 次元系で現れるトポロジカル現象の解明に取り組んだ。以前に我々が行った研究で、非エルミート系に特有な「例外点」と呼ばれる構造に守られた、特異な端状態（例外端状態）が発現することを見出した。以前の研究では線形領域でかつ 2 次元系の場合において議論を行っていたが、本研究では非線形領域および 3 次元系への拡張を行った。特に、蘆田は東大工学系の沙川研とともに、例外端状態の概念を非線形振動子に拡張し、物理系の境界領域でのみ振動子が同期する「トポロジカル同期現象」が生じることを数値的に見出した。さらに、3 次元系において、例外端状態がトポロジカルに保護された頑健なレージング表面モードとして発現することを、モデル計算により具体的に示した。以上の結果は論文を通じて発表された [2, 4]。

浮揚ナノ粒子アレイの非エルミート物理

これまで非エルミート物理は、冷却原子系などの量子系から、光学系やアクティブマターなどの古典系に至る、多様な物理系で研究がなされてきている。しかし、これら従来の物理系では、強い非相反相互作用を高い制御性のもとで実現することが容易ではなかった。横溝、蘆田は多数の浮揚ナノ粒子の配列が非エルミート物理を研究するための理想的なプラットフォームになり得ることを理論的に提案した。実際、浮揚ナノ粒子の高い制御性によって、これまでに実現することが困難であった粒子間の負の相互作用や長距離非相反相互作用が実現可能になる。このような相互作用の下では非エルミート表皮効果の発生が期待されるため、系の振る舞いは非エルミート系におけるブロッホバンド理論を用いて解析できる。解析の結果、負の相互作用による臨界相の発現や、長距離非相反相互作用に起因したバンド構造の特異点の出現が明らかになった。今後、これまでの非エルミート系では実現が難しいとされてきた非エルミート現象が、浮揚ナノ粒子アレイによって検証されることが期待される。以上の成果は、国際会議と国内会議の一般講演を通じて発表された [11, 17]。

3.7.2 強結合量子光-物質系の物理

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引き起こす可能性が精力的に調べられてきた。一方、量子的な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。近年の実験技術の発展により、共振器中に閉じ込められた量子電磁場と物質が強く相互作用する物理系 - 共振器物質系 - が実現しつつある。我々はこの物理系が持つ可能性に注目し、そこで発現する新たな物理現象の発見を目指し研究を行っている。

強結合導波管量子電磁力学の非摂動理論

これまでの我々の研究で、共振器量子電磁力学 (QED) 系において、電磁場モードが単一でかつ長波長近似

が成立する場合に、光物質結合強度が強い極限で両者が漸近的にデカップルできるユニタリ変換が構成されていた。蘆田はこの理論解析を、導波管 QED 系と呼ばれる、連続的かつ複数の量子電磁場モードが物質と強く結合した物理系に拡張した（スイス連邦工科大学との共同研究）。これにより、非摂動領域に特有な「連続スペクトル中の束縛状態」(BIC) が生じることや、光物質束縛状態の新奇な非平衡量子ダイナミクスが発現することなどが明らかとなった。以上の結果は、論文や国際会議での招待講演などを通して発表された [3, 12, 13, 14]。

ジョセフソン接合系における量子散逸相転移

抵抗に繋がれたジョセフソン接合系における量子散逸相転移（超伝導 - 絶縁体転移）の有無は、物性・統計物理学において長年議論されてきた基礎的問題である。増木、蘆田は東大物性研の押川研と共同研究を行い、非摂動な繰り込み群の手法を用いることで系の基底状態の相図を明らかにした。特に、数値的繰り込み群と汎関数繰り込み群という二つの独立な繰り込み群解析の結果から、今まで非有意と考えられてきた項の非摂動効果によって、絶縁体相が実現するパラメータ領域が強く制限されることを明らかにした。また増木、蘆田は理研の横田氏と協力することで、この研究をさらに発展させ、LPA 近似を超えた汎関数繰り込み群による解析を行った。これによりジョセフソン接合系に限らず、スピン-ボソン模型などより広いクラスの強結合開放系の正確な非摂動解析が可能となった。以上の成果は、論文や国際招待セミナーなどを通じて発表された [5, 8, 19, 20]。

超結合領域における量子幾何とトポロジー

量子電磁場と結合する量子系における量子幾何やトポロジーの解析は、強束縛模型へのパイエルス代入といった現象論的な模型に基づく解析が主であった。一方で、超強結合領域においても有効な解析手法は知られていなかった。増木、蘆田は電磁場 - 物質間の量子もつれを漸近的に解くユニタリ変換を用いることで、全結合領域で有効的な量子幾何解析の一般論を構築した。特に、構築された一般論をディラック電子系に適用することで、量子電磁場モードとの結合によって起こるトポロジカル相転移の性質を明らかにした。以上の成果は、国内会議での一般講演や招待講演を通じて発表された [15, 18]。

共振器中の捻り二層物質系

二層の二次元物質を僅かにずれた角度で重ねると、単層の周期構造に比べて遥かに大きな超周期構造が現れる。こうした捻り二層物質系では、特定の角度で電子の運動エネルギーが強く抑制されて強相関効果が増大することが知られている。増木、蘆田は摂動論に基づき、hBN などのヘテロ接合系からなる「hyperbolic 共振器」と結合した捻り二層物質系の低エネルギー有効ハミルトニアンを求める一般論を構築した。特に、$MoSe_2/WSe_2$ という具体的な捻り二層物質系に理論を適用し、hyperbolic 共振器との結合によって電子スピン間の磁性フラストレーションを増強できることを明らかにした。以上の成果は、国際会議でのポスター講演を通じて発表された [9]。

超結合領域における近藤効果

近藤効果は、物質中に局在したスピンが伝導電子によって遮蔽されていく現象で、量子多体現象の代表例として知られている。一方、実験技術の進展により、共振器中の物質が電磁場と強く結合する共振器物質系が実現されつつある。共振器物質系を用いた電磁場と量子多体系の超結合領域の研究に対して、電磁場と相互作用する物質での近藤効果の理解は重要である。持田、蘆田は電磁場と強く結合した近藤系のハミルトニアンに対し、電磁場、伝導電子、局在スピンのそれぞれの量子もつれを切り離すことができるユニタリー変換を順次適用することで、有効的に系の解析が行えるようにした。そして、電磁場および局在スピンの自由度が切り離された伝導電子系にガウシアン変分多体計算を行うことで、電磁場が近藤効果に与える影響を調べた。先行研究の背景・問題点や本研究の問題設定を議論するため、国際会議でポスター講演を行った [10]。

3.7.3 統計物理・機械学習

近年、機械学習の研究の飛躍的な進展に伴い、機械学習や人工知能分野で提案されてきた新たなデータ解析手法を、物理学の諸問題に援用する試みが多くなされている。研究 [6] では、東大小林研と協力し、ガウス過程回帰を応用することで、ナノダイヤモンド中の窒素空孔中心を用いた磁場測定の確度を向上することに成功した。これにより、さまざまな形状を持つ測定対象に対して、ナノダイヤモンドを用いた高確度な磁場測定が可能となると期待される。また本研究についてプレスリリースを行った [21]。研究 [7] では、東大工学系の沙川研と協力し、深層強化学習を用いた熱平衡量子純粋状態の準備に関する研究を行った。これにより少数の局所物理量の知識のみから、それ以外の多様な物理量の計算が可能となると期待される。特に、量子系が可積分の場合は精度が冪的に、非可積分な場合は精度が指数的に向上することを見出した。

3.7.4 その他

磁気モノポールと異常ホール効果

非自明な磁気構造を持つ物質において、伝導電子が交換相互作用を受けることで、その構造を反映し

た様々な輸送現象が生じる。こうした物質の輸送特性の研究は、物質中の量子力学の理解のためだけでなく、ナノテクノロジーなどへの応用においても重要である。持田は東工大石塚研と共同研究を行い、スピン軌道相互作用の下で伝導電子が磁気構造に散乱される過程を調べた。その結果、磁気モノポールや格子歪みのある磁性体において、異常ホール効果が生じることを明らかにした。本研究で発見された異常ホール効果は、磁気モノポールのような探索の難しい磁気構造の検出に応用できる可能性がある。以上の成果は、国内会議での一般公演を通じて発表された [16]。

＜報文＞

(原著論文)

[1] K. Yokomizo, T. Yoda, and S. Murakami, Non-Hermitian waves in a continuous periodic model and application to photonic crystals, Physical Review Research **4**, 023089 (May 2022).

[2] K. Sone, Y. Ashida and T. Sagawa, Topological synchronization of coupled nonlinear oscillators, Physical Review Research **4**, 023211 (June 2022).

[3] Y. Ashida, T. Yokota, A. Imamoglu and E. Demler, Nonperturbative Waveguide Quantum Electrodynamics, Physical Review Research **4**, 023194 (June 2022).

[4] K. Sone, Y. Ashida and T. Sagawa, Exceptional Topological Surface Laser, Physical Review B **105**, 235426 (June 2022).

[5] K. Masuki, H. Sudo, M. Oshikawa, and Y. Ashida, Absence versus Presence of Dissipative Quantum Phase Transition in Josephson Junctions, Physical Review Letters **129**, 087001 (Aug. 2022).

[6] M. Tsukamoto, S. Ito, K. Ogawa, Y. Ashida, K. Sasaki and K. Kobayashi, Machine-learning-enhanced quantum sensors for accurate magnetic field imaging, Scientific Reports **12**, 13942 (Sep. 2022).

[7] S. Baba, N. Yoshioka, Y. Ashida and T. Sagawa, Deep reinforcement learning for preparation of thermal and prethermal quantum states, Physical Review Applied **19**, 014068 (Jan. 2023).

[8] T. Yokota, K. Masuki and Y. Ashida, Functional Renormalization Group Approach to Circuit Quantum Electrodynamics, accepted for publication in Physical Review A.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[9] K. Masuki and Y. Ashida, Cavity Moiré Materials: controlling correlated phases of matter with quantum light-matter couplings, FoPM International Symposium, Tokyo, Feb. 6-8, 2023.

[10] J. Mochida and Y. Ashida, Variational approach for Kondo problem with Quantum Light-Matter interaction, FoPM International Symposium, Tokyo, Feb. 6-8, 2023.

[11] Kazuki Yokomizo and Yuto Ashida, Non-Hermitian physics of levitated nanoparticle array, "Non-Equilibrium Physics in AMO Systems Ⅱ" at APS March meeting 2023, Las Vegas, Mar. 6-10, 2023.

招待講演

[12] Y. Ashida, Nonperturbative cavity/waveguide quantum electrodynamics and dissipative quantum phase transition, Ultracold Atoms Japan 2022, Okinawa, Apr. 12-14, 2022.

[13] Y. Ashida, Nonperturbative cavity/waveguide quantum electrodynamics, APPC15, Korea (hybrid), Aug. 21-26, 2022.

[14] Y. Ashida, Nonperturbative renormalization group approach to dissipative quantum phase transition, Dynamics Days Asia Pacific DDAP12, Korea (hybrid), Nov. 7-11, 2022.

(国内会議)

一般講演

[15] 増木貫太, 蘆田祐人, 超強結合領域の共振器量子物質系における量子幾何, 日本物理学会 2022 年次秋季大会, 東京, 2022 年 9 月 12 日-15 日.

[16] 持田隼, 石塚大晃, スピン軌道相互作用による磁気モノポールの skew 散乱と異常ホール効果, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京, 2022 年 9 月 12 日-15 日.

[17] 横溝和樹, 蘆田祐人, 浮揚ナノ粒子アレイの非エルミート物理, 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン, 2023 年 3 月 22 日-25 日.

招待講演

[18] 蘆田祐人, 共振器量子光-物質系の物理, 日本物理学会 2023 年春季大会シンポジウム, オンライン, 2023 年 3 月 22 日-25 日.

(セミナー)

[19] Y. Ashida, Dissipative QPT and nonperturbative QED, ISTA seminar, Vienna (hybrid), Sep. 15, 2022.

[20] Y. Ashida, Nonperturbative cavity/waveguide quantum electrodynamics, ETH Zurich Condensed Matter Seminar Series, Zurich, Sep. 23, 2022.

＜アウトリーチ＞

(プレスリリース)

[21] 小林研介, 蘆田祐人, 佐々木健人, 塚本萌太, ナノダイヤモンド磁場イメージング - 量子計測×機械学習の新展開, 2022 年 9 月 1 日.

(雑誌寄稿)

[22] 蘆田祐人, 理学部ニュース 1+1 から∞の理学「物の理を理解する」, 2022 年 11 月 21 日

4 物性実験

4.1 長谷川研究室

4 月から修士課程 1 年生として皆川遼太朗が新しくメンバーに加わった。9 月には Liu Shengpeng が博士課程を修了して中国に帰国して就職した。3 月には高城拓也が博士課程を修了してオーストリアに博士研究員として渡航した。

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、非相反光電流などである。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（MBE）法によってナノマテリアルを作成し、試料を空気にさらすことなく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・改良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/界面での輸送・磁性特性

真性強磁性トポロジカル絶縁体 $\mathbf{Mn(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4}$ 原子層薄膜における層内・層間磁気相互作用

真性強磁性トポロジカル絶縁体 $Mn(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4$（MBST）は、磁性元素 Mn 原子が規則的にシート状配列した結晶構造を持つ層状物質であり、Mn 原子どうしの磁気的相互作用が強いので量子異常ホール効果の観測温度向上が期待されている。本研究では、トポロジカル絶縁体 $(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4$（BST）薄膜の片面に MBST を 1 ユニット層だけ接合させた MBST/BST ヘテロ接合構造と、BST の両面にそれぞれ 1 ユニット層ずつ MBST を接合させた MBST/BST/MBST サンドイッチ構造の原子層薄膜試料を作製し、それらの結晶構造や電気伝導特性、磁気特性を系統的に調べた。それによって、MBST の層内・層間磁気相互作用のメカニズムの解明を試みた。まず層内磁気相互作用については、Sb 添加量を増やすことで格子定数が縮むので MBST 層内の Mn-Mn 距離を小さくできる特長を活かして、キュリー温度の Sb 添加量依存性を調べた。その結果、Sb を添加して Mn-Mn 距離を小さくするほどキュリー温度が上昇することが分かった。一方、ゲート電圧によってキャリア密度を変化させても磁気特性がほとんど変わらなかったことから、キャリアに依存せずに Mn 原子どうしの接近に伴い強磁性が安定化する層内磁気相互作用が働いていることを明らかにした。一方、層間磁気相互作用については、MBST /BST ヘテロ接合構造と MBST /BST /MBST サンドイッチ構造のキュリー温度を比較することで、そのメカニズムを検証した。その結果、後者のサンドイッチ構造のキュリー温度の方が前者より 3 倍以上に高いことが分かり、層間磁気相互作用は強磁性的であることを明らかにした。本結果は、MBST が 3 ユニット層以上の多層構造では層間磁気相互作用が反強磁性的であるという先行研究の結果と異なる。つまり、サンドイッチ構造のように 2 層の MBST が積層すると層間磁気相互作用が強磁性的に働き、3 層以上に層数を増やすと反強磁性の効果が大きくなることを示唆している。

トポロジカル結晶絶縁体 $\mathbf{Pb_{1-x}Sn_xTe}$ を用いた多チャネル量子異常ホール効果の観測

結晶の鏡映対称性に保護された表面状態を有するトポロジカル結晶絶縁体 (TCI) は、第一ブリルアンゾーに複数のディラック錐を有する 新奇な物質である。 TCI である $Pb_{1-x}Sn_xTe$ (PST) に強磁性 を付与することにより、ディラック点にギャプが開き、その中にフェルミ準位を調整することにより、チャーン数の大きい量子異常ホール効果 (QAHE) が実現すると予測されている。フェルミ準位の位置やギャップの大きさは Pb/Sn 組成比を変化させることで調整可能あり、実際、物理パラメータ測定システム（PPMS）装置による電気伝導測定を通してキャリアの種類や密度変化とおよその電荷中性点を求めた。本研究では、TCI の結晶性を損なわずに磁性を付与するため、Z_2 型トポロジカル絶縁体（TI）の量子異常ホール効果（QAHE）観測成功の事例に倣 い、PST 層に Cr 原子をデルタドープした $(Bi_{0.5}Sb_{0.5})_2Te_3$ 層で上下から挟むサンドイッチ構造を採用している。RHEED パターンからエピタキシャル結晶成長に成長功したことを確認した。今後、Pb/Sn 組成比や Cr のド ープ量、 膜厚など複数のパラメータを変化させた試料を作製し、電気伝導測定と検証を通じて多チャネル量子異常ホー効果観測を目指す。

Si(111) 表面上の (Tl,Pb) 単原子層における円偏光誘起非相反電流

スピン分裂した電子系に円偏光を照射すると、波数空間上での電子分布に偏りが生じ、一方向に流れる電流が生成される（円偏光フォトガルバニック効果

(CPGE))。従来の報告では *ex situ* 測定が多く、また光応答が極めて小さいことから、単原子層・表面超構造物質における CPGE 観測はできないと考えられていた。本研究では巨大ラシュバ効果が報告されている Si 基板上の単原子層物質である (Tl,Pb)/Si(111) を作成し、超高真空中 *in situ* で円偏光の照射によって誘起された光電流を観測した。Tl と Pb の蒸着量を制御して表面超構造を $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ や 4×4 周期の単原子層合金を作って測定した結果、$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ の場合に非相反光電流が最大化することが明らかになった。この非相反光電流の大小関係はラシュバパラメータのそれと定性的に一致しており、スピン分裂が大きいほどに CPGE が強く生じるという直観に合致する振る舞いが確認された。また物質表面 1 原子層では物質の誘電率は真空中と同様に振る舞うという示唆も得られた。

Si(111) 表面上の (Tl,Sn) 2 原子層における円偏光誘起非相反電流

スピン軌道相互作用が強い物質では、バンドのスピン縮退が解けたり、スピンホール効果でアップスピンとダウンスピンが逆方向に流れるといった現象が見られる。こういった物質に円偏光を照射しスピン注入することでスピン流を簡便に発生させる試みがなされている。本研究では 2 原子層表面超構造物質である (Tl,Sn)/Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ を作成し、超高真空 *in situ* で円偏光を照射し非相反光電流を測定した。その結果、試料右端と左端で非相反光電流の符号が反転する光誘起逆スピンホール効果（PISHE）のような現象が観測され、上述の (Tl,Pb) の CPGE ケースとは全く異なる振る舞いをみせた。さらにこれは、円偏光を斜め入射にすると増幅されることもわかり、面直スピンにより生じる PISHE の直観的な描像と反する振る舞いを見せた。この振る舞いはスピン軌道相互作用による歳差運動でスピンの面内 – 面直変換が生じている可能性があり、現在は他の物質で同様な振る舞いを見られないか探索しているところである。バンド分散の情報に加え、スピンの歳差運動からも原子層物質でのスピンの動きについて調査していく。

$SrTiO_3$ 結晶表面の SEM 電子線照射下での電気伝導測定

$SrTiO_3$ (STO) は、バンドギャップ 3.2 eV をもつ透明酸化物絶縁体である。STO(001) 面は、熱処理により酸素欠損が生じて電子ドープされ、欠損量順に $\sqrt{13}\times\sqrt{13}$, $2\times$,$\sqrt{5}\times\sqrt{5}$ の表面超構造をとり、表面ドナー準位の存在も指摘されているが、表面の電気伝導伝導特性は不明であった。そこで本研究では、non-doped STO(001) 基板表面において $\sqrt{13}\times\sqrt{13}$ 表面超構造をバッファードフッ酸（BHF）エッチングとアニールに処理によって形成し、探針制御用走査電子顕微鏡 (SEM) を用いて超高真空中 *in situ* 4 探針電気伝導測定を行った。その結果、SEM の電子線ドーズレートを一定にしない場合は抵抗値にばらつきが認められ一方、ドーズレートを一定にすると抵抗値は安定し、探針間隔に依らない 2 次元伝導が観測された。これは SEM の電子線により STO の表面ドナー準位からキャリアが励起され導電性が増大した可能性を示している。今後はより基板表面から酸素欠損した表面超構造でも同様の実験をし、電子線照射が電気伝導に与える影響を調べる。

トポロジカル結晶絶縁体 SnTe 上での α-Sn 原子層の成長と超伝導

多重マヨラナゼロモード（MZM) や非従来型超伝導を探索するため、２次元超伝導体（2DSC）/トポロジカル結晶絶縁体（TCI）ヘテロ接合系を研究している。その一例として TCI である SnTe(111) 層上に α-Sn 原子層を成長させたヘテロ接合系を調べている。α-Sn 原子層が BKT 転移を示して約 4 K で超伝導に転移したので、この系は 2DSC/TCI であり、多重 MZM 探索に適していることがわかった。この系を超伝導臨界温度 T_C の 5 % までの超低温まで磁気伝導特性を調べた。面内臨界磁場がパウリ極限を超える非常に大きな値を示し、それはスピン軌道散乱効果によって説明されると考えられる。面直臨界磁場の温度依存性が異常な振る舞いを示すこともわかり、それは、多バンド超伝導理論で説明できると考えられる。、また、汎関数密度法による電子状態計算も行い、超伝導状態を示す試料ではいずれもバンド反転が起こっていることがわかった。さらに、α-Sn 原子層の T_C が下地の SnTe(111) 層の膜厚に依存することもわかり、その原因を追究するために現在光電子分光法でバンド構造の観測を行っている。

SiC 上の 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 電子や f 電子軌道を持つ金属原子をグラフェンに添加すると、金属原子とグラフェンの π-軌道との交換相互作用が生じ、強磁性が発現されることが理論的に示唆されていた。本研究室では $4f$ 電子軌道をもち常磁性バルク体である Yb を、グラフェン/SiC 上蒸着しアニールしてインターカレートさせると、金属原子修飾グラフェンにおいて最大 107 K に臨界温度を持つ強磁性を観測することに成功している。本研究では、その強磁性の発現機構の解明のため、作製条件を系統的変えた Yb インターカレートグラフェンを作製し、それらのホール・電気伝導測定を行った。その結果、キャリア密度が低いほど強磁性転移温度が高くなるという、従来の 3 次元のキャリ媒介希薄磁性半導体とは異なる傾向が観測され、Yb インターカレートグラフェンが単純なキャリア媒介強磁性ではないことが示唆された。また、1.2×10^4 cm^2/Ω という高い電子移動度を持ちながらも、強磁性によりグラフェンのディラックコーンにバンドギャップが生じている可能性がある。今後はより詳細な電子状

態と磁気構造の解明とともに、量子異常ホール効果などの新奇物性の開拓を目指す。

4.1.2 表面・原子層ナノ構造の形成

室温 wetting layer 成長法による超平坦薄膜の成長

昨年度、成長温度や表面処理の工夫を行い、$SrTiO_3$ 基板上に世界記録的に平坦な SnTe 薄膜を MBE 法によって作る成長技術を開発したが、それに続いて、PbTe においても同様の手法で平坦薄膜を作製することができたことを反射高速電子回折によって確認した。このことから、$SrTiO_3$ 基板上への成長において、SnTe に限らずより広範に (Pb,Sn)Te に用いることができる手法であると考えられる。なお本結果を踏まえて、SnTe において昨年度出願していた国内特許に PbTe の製造法を加え、今年度国際特許出願を行った。

テラヘルツ光を用いたサイクロトロン共鳴による Bi 薄膜結晶の物性研究

Bi は、固体物理学の発展と常に共にあったほどに研究の歴史の古い物質であるが、今なお興味の尽きない物質である。Bi 薄膜は量子井戸現象を示すため、膜厚によりバンド構造が半金属-半導体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がある。そこで、Si(111) 面に成長した Bi(111) 単結晶薄膜での強磁場・テラヘルツ光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正確な有効質量や膜厚によるバンド構造の変化を明らかにする。分光実験では当該膜厚では初めて明瞭な吸収が観測され、磁場依存するエネルギーバンドの重なりを示唆する結果も得られた。現在はさらに膜厚を細かく振った試料を用意し、膜厚による価電子帯・伝導帯の重なりの変化を追っている。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であるので、今後は Sb ドープ系での有効質量やキャリアの変化なども明らかにしていく。(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* ４探針電気伝導・トンネル分光同時測定装置の開発

物質表面や薄膜の超伝導を調べるとき、電気伝導とトンネル分光を超高真空中で同一タイミング・同一試料で測定できると、より本質的な物理現象の理解につながる。そこで、本研究室で所有している超高真空 *in situ* ４端子電気伝導測定装置を改良し、トンネル分光測定機構を追加することによって同一試料上で両方の測定を行うことを可能にした。STM 探針での鉛薄膜試料の超伝導ギャップの測定により、3.2 K において約 0.5 meV の分解能が実現していることが確認されている。分解能が制限されている主な要因は、振動によって安定したトンネル接合を維持することが難しいことである。そこで、今後は内部除振機構の導入によってプローブ周辺の安定性を高め、トンネル分光測定の分解能を改善する。その上で同一の超伝導試料に対する *in situ* 電気伝導測定・トンネル分光測定を行い、おもに原子層超伝導体に対するでの多角的な測定を行っていく。さらに、トンネル電流のショット雑音を測定すればトンネルする電子が通常の電子であるのかクーパー対を組んだものであるのか知ることができる。２次元超伝導体においては揺らぎの影響からクーパー対を組んでいるものの波動関数の位相コヒーレンスが壊れているためにゼロ抵抗にならない、ボーズ金属と呼ばれる量子金属相が実現しうると言われており、探針付近に低温で動作する高周波アンプを導入することでショット雑音の測定を可能にし、ボーズ金属の実験的証拠を得ることを目指していく。

超高真空中 *in situ* 偏光制御中赤外線照射装置の開発

電子のスピンを利用するスピントロニクスに光を用いる手法がある。円偏光はスピン角運動量を持つため、円偏光の右/左回りに応じて物質中の電子をスピンの向きに応じて選択的に励起することができるので、円偏光を用いた手法は近年盛り上がりを見せている。本研究室では超高真空装置内で試料を作成し、*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にビューポートにより円偏光が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制作し既存のチャンバーに接続した。この設計により研究室に既存のレーザー波長 635 nm、1550 nm に加えて、2μm ∼9 μm と広い波長範囲での中赤外光に対応した円偏光が生成でき、様々な励起エネルギーに応じた円偏光誘起電流が測定できると期待できる。この波長域は、トポロジカル絶縁体のバルクギャップやラシュバ効果の典型的なエネルギー分裂幅である 100 meV ∼ 300 meV をカバーしており、エネルギー分裂幅に対応した波長での高効率なスピン生成が期待できる。現在は組み立てと動作確認がほぼ完了した段階であり、2023 年度内には本装置が稼働し始める予定である。

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)「グラフェンを用いたスピン圧検出プローブとそれを用い

たスピン実空間観察手法の開発」（代表 保原麗）
・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研究課題」（代表 保原麗）

＜受賞＞

[1] 遠山晴子（2021 年度卒業生）：原子層 *2* 次元構造における超伝導の特性解明, 2022 年度日本表面真空学会女性研究者賞（若手女性研究者優秀賞）2022 年 9 月 26 日.

[2] 秋山了太：*Growth of atomically flat SnTe(001) thin films using the room temperature wetting layer method and its electrical transport measurements*, 2022 年度日本表面真空学会学術講演会 講演奨励賞（若手研究者部門）, 2023 年 1 月 25 日.

[3] 秋山了太：高品質トポロジカル絶縁体薄膜の開発と次世代高速動作スピンデバイスへの応用（電気・電子）, 第 63 回（2022 年度）公益財団法人 UBE 学術振興財団学術奨励賞, 2023 年 3 月 30 日.

＜報文＞

(原著論文)

[4] R. Akiyama, R. Ishikawa, K. Akutsu-Suyama, R. Nakanishi, Y. Tomohiro, K. Watanabe, K. Iida, M. Mitome, S. Hasegawa, S. Kuroda: *Direct probe of ferromagnetic proximity effect at the interface in SnTe/Fe heterostructure by polarized neutron reflectometry*, The Journal of Physical Chemistry Letters **13**, 8228-8235 (Aug, 2022).

[5] Y. Endo, M. Li, R. Akiyama, X. Yan, C. Brandl, J. Z. Liu, R. Hobara, S. Hasegawa, W. Wan, K. S. Novoselov and W.-X. Tang: *Dynamic observation of topological domain walls motion driven by Lithium intercalation in epitaxial graphene on SiC*, under review.

[6] T. Kobayashi, Y. Toichi, K. Yaji, Y. Nakata, Y. Yaoita, M. Iwaoka, M. Koga, Y. Zhang, J. Fujii, S. Ono, Y. Sassa, Y. Yoshida, Y. Hasegawa, F. Komori, S. Shin, S. Ichinokura, R. Akiyama, S. Hasegawa, T. Shishidou, M. Weinert, K. Sakamoo: *Revealing the hidden spin-polarized bands in a superconducting Tl bilayer crystal*, under review.

(特許)

[7] 秋山了太：岩塩型構造を持つ化合物の単結晶薄膜及びその製造方法, 国際特願 PCT/JP2023/7032, 出願日 2023 年 2 月 27 日.

(国内雑誌)

[8] 高城拓也, 秋山了太, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, 中西亮介, 佐藤瞬亮, 深澤拓朗, 佐々木泰祐, 遠山晴子, 樋渡功太, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 平原徹, 長谷川修司：自己形成型強磁性原子層を持つトポロジカル絶縁体によるサンドイッチ構造での軟磁性的スキルミオンの電気的観測, 表面と真空 **65**(9), 405-410 (Sep, 2022).(Editor’s Choice)

[9] 遠山晴子、秋山了太、長谷川修司: カルシウムのインターカレートにより誘起される特異なグラフェン超伝導, 固体物理 **57**(10),593-606 (Oct. 2022).

[10] 秋山了太, 高城拓也, 黒田眞司, 長谷川修司: ポロジカル絶縁体と強磁性の協奏効果表面と真空 66(1), 28-33 (Jan, 2023). (Editor’s choice)

(その他)

[11] 秋山了太、長谷川修司: *Ca* 原子を挿入したグラフェンで新規な超伝導への進化をとらえる, 理学部ニュース 2022 年 7 月号 p.4 (Jul, 2022).

[12] 長谷川修司: *IPhO2022* ベラルーシ大会の中止と代替スイス大会の開催, JPhO News Letter **34**, p. 8 (Jul, 2022).

[13] 遠山晴子: 原子層二次元構造における超伝導の特性解明（受賞者紹介）, 表面と真空 **66**(1), 60 (Jan, 2023).

[14] 長谷川修司（制作監修）: JST 研究倫理教育映像教材『倫理の空白』(准教授編・若手学生編), 科学技術振興機構報研究公正ポータル, Youtube, 2022 年 5 月 11 日.

(学位論文)

[15] LIU Shengpeng: *Growth and physical properties of cuprous selenide thin films* (博士論文).

[16] 高城拓也: 真性強磁性トポロジカル絶縁体を用いた原子層薄膜の構造と磁気・電気特性に関する研究 (博士論文).

[17] 清水翔太：$SrTiO_3$ 基板上 *FeSe* 薄膜の構造と電気伝導特性の評価（修士論文）.

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[18] S. Hasegawa: *Two-Dimensional Atomic-Layer Materials*, The 14th International Symposium on Atomic Level Characterization for New Materials and Devices ’22 (ALC’22), Kankoku Shiryokan, Okinawa (Japan), 2022 年 10 月 19 日.

[19] S. Hasegawa: *Two-Dimensional Atomic-Layer Materials*, The Sixth Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials (ASCO-NANOMAT 2022), Vladivostok (online), 2022 年 4 月 25 日.

一般講演

[20] S. Sato, R. Hobara, R. Akiyama, K. Watanabe, S. Hasegawa: *Development of the Simultaneous Measurement System of Four-Point-Probe Electrical Transport and Tunneling Spectroscopy*, The 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS2022), The University of Tokyo, 2022 年 11 月 10 日.

[21] R. Akiyama, S. Kaneta-Takada, S. Ohya, S. Shimizu, H. Horiuchi, T. Takashiro, S. Hasegawa, *Growth of atomically flat topological crystalline insulator SnTe(001) thin films using the room temperature wetting layer method and its electrical transport measurements*, The 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS2022), The University of Tokyo, 2022 年 11 月 9 日.

[22] T. Takashiro, R. Akiyama, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, R. Nakanishi, S. Sato, T. Fukasawa, T. Sasaki, H. Toyama, K. L. Hiwatari, A. V. Zotov, A. A. Saranin, T. Hirahara, S. Hasegawa：*Soft-magnetic skyrmions induced by surface-state coupling in a sandwich structure with an intrinsic ferromagnetic topological insulator*, The 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS2022), The University of Tokyo, 2022 年 11 月 8 日.

[23] I. Taniuchi, R. Akiyama, R. Hobara, S. Hasegawa: *Circular photogalvanic effect in surface superstructures on Si(111) with huge Rashba-splittings*, The 2nd international symposium on trans-scale quantum science (TSQS2022), The University of Tokyo, 2022 年 11 月 8 日.

[24] . Guo, R. Akiyama, T. Konoike, Y. Hattori, T. Takashiro, R. Hobara, T. Terashima, S. Uji, S. Hasegawa: *Two-dimensional superconductivity in α-Sn/SnTe(111) heterostructure*. The 22nd International Vacuum Congress (IVC-22), Sapporo Convention Center, 2022 年 9 月 12 日.

[25] I. Taniuchi, R. Akiyama, R. Hobara, S. Hasegawa: *Circular photogalvanic effect at surface superstructures on Si(111) with huge Rashba-splittings*, The 22nd International Vacuum Congress (IVC-22), Sapporo Convention Center, 2022 年 9 月 12 日.

[26] R. Akiyama, S. Kaneta-Takada, S. Ohya, S. Shimizu, H. Horiuchi, T. Takashiro, S. Hasegawa, *Growth of atomically flat SnTe(001) thin films using the room temperature wetting layer method and its electrical transport measurements*,The 22nd International Vacuum Congress (IVC-22), Sapporo Convention Center, 2022 年 9 月 14 日.(2022 年度日本表面真空学会 学術講演会 講演奨励賞（若手研究者部門）)

[27] S. Sato, R. Hobara, R. Akiyama, K. Watanabe, S. Hasegawa： *Development of the simultaneous measurement system of four-point-probe electrical transport and tunneling spectroscopy*, The 22nd International Vacuum Congress (IVC-22), Sapporo Convention Center, 2022 年 9 月 14 日.

[28] T. Takashiro, R. Akiyama, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, R. Nakanishi, S. Sato, T. Fukasawa, T. Sasaki, H. Toyama, K. L. Hiwatari, A. V. Zotov, A. A. Saranin, T. Hirahara, S. Hasegawa：*Soft-magnetic skyrmions induced by surface-state coupling in a sandwich structure with an intrinsic ferromagnetic topological insulator*, The 92nd IUVSTA workshop and The 4th Asia-Pacific Symposium on Solid Surfaces, 沖縄科学技術大学院大学（沖縄）, 2022 年 9 月 19 日

(国内会議)

招待講演

[29] 高城拓也, 真性強磁性トポロジカル絶縁体を含む原子層サンドイッチ構造におけるスキルミオンの電気的観測, 量子物理学・ナノサイエンス第 85 回特別セミナー, 東京工業大学, 2023 年 3 月 10 日.

[30] 長谷川修司: 物質を解明して役立てる物理学 ―日本人研究者たちの寄与―, 国際純粋・応用物理学連合 100 周年記念オンライン講演会 『日本の物理学研究 ―過去・現在・未来―』, 2022 年 10 月 1 日.

[31] 長谷川 修司: 薄膜・表面物理のための磁性・スピントロニクス入門, 応用物理学会薄膜・表面物理分科会 第 50 回 薄膜・表面物理セミナー 『二次元磁性体研究の最前線』, ハイブリッド/東京理科大森戸記念館, 2022 年 7 月 22 日 (金).

一般講演

[32] 清水翔太、保原麗、秋山了太、堀内皓斗、金田真悟、大矢忍、長谷川修司: 探針制御用走査電子顕微鏡を備えた *in situ 4* 探針電気伝導測定装置による $SrTiO_3$ 表面上の原子層構造の測定, 第 14 回低温科学研究センター研究交流会, 理学部 1 号館中央棟 2 階小柴ホール, 2023 年 2 月 16 日.

[33] 高城拓也, 秋山了太, 長谷川修司, 自己形成型真性トポロジカル強磁性体 $Mn(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_4$ における面間・面内磁気相互作用の *Sb/Bi* 比率依存性, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京工業大学, 2022 年 9 月 14 日.

[34] 川村康文, 五十嵐美樹, 石川真理代, 市原光太郎, 一宮彪彦, 海老崎功, 右近修治, 大嶋孝吉, 大塚洋一, 岸澤眞一, 毛塚博史, 小池洋二, 小牧研一郎, 近藤泰洋, 櫻井一充, 佐々田博之, 柴崎幸貴, 真梶克彦, 末元徹, 鈴木功, 武士敬一, 西野友年, 長谷川修司, 林壮一, 松本益明, 松本悠, 三木一司, 水谷紫苑, 味野道信, 山崎詩郎, 吉村勇治: 物理チャレンジ *2022* 報告 *III*- - 実験問題部会, 日本物理学会秋季大会, 東京工業大学, 2022 年 9 月 13 日.

[35] 東辻浩夫, 栗原進, 吉岡大二郎, 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, 中西秀, 鈴木功, 佐藤誠, 安藤靜敏, 毛塚博史, 近藤泰洋, 佐藤杉弥, 真梶克彦, 末元徹, 中屋敷勉, 並木雅俊, 長谷川修司, 松本益明, 光岡薫, 吉見光祐: 第 *22* 回アジア物理オリンピック *2022*(インド, オンライン) 報告, 日本物理学会秋季大会, 東京工業大学, 2022 年 9 月 13 日.

[36] 東辻浩夫, 栗原進, 吉岡大二郎, 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, 中西秀, 鈴木功, 佐藤誠, 安藤靜敏, 毛塚博史, 近藤泰洋, 佐藤杉弥, 真梶克彦, 末元徹, 中屋敷勉, 並木雅俊, 長谷川修司, 松本益明, 光岡薫: 第 *52* 回国際物理オリンピック *2022*(スイス, オンライン) 報告, 日本物理学会秋季大会, 東京工業大学, 2022 年 9 月 13 日.

(セミナー)

[37] 長谷川 修司: トポロジカル物質とは何か ―表面物理学の観点から―, 東京大学生産技術研究所福谷研究室セミナー, 2022 年 11 月 30 日.

[38] 長谷川修司: *20* 世紀が半導体の世紀なら、*21* 世紀はトポロジカル物質の世紀である, シュレディンガーの水曜日（WirelessWire News）(オンライン), 2022 年 7 月 6 日.

(講義等)

[39] 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）, 2022 年度夏学期（駒場）.

[40] 長谷川修司, 秋山了太, 佐藤瞬亮 (TA), 谷内息吹 (TA), 皆川遼太郎 (TA)：物理学実験 II（学部 3 年生）電子回折, 2022 年度冬学期（本郷）.

(アウトリーチ)

[41] 研究室総出: 東大の研究室をのぞいてみよう ―物性物理学、とくに表面物理学の紹介と実験室見学―, 理学部 1 号館, 2023 年 3 月 27 日.

[42] 長谷川修司: プレチャレンジ：実験レポートの書き方と大気圧測定実験, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 栃木県立大田原高等学校 (栃木）, 2022 年 3 月 21 日.

[43] 長谷川修司: 物理チャレンジ対策講座（女子プレチャレンジ）：実験レポートの書き方と LED 特性の測定実験, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 栃木県立宇都宮女子高等学校 (栃木）, 2022 年 1 月 28 日.

[44] 長谷川修司: サイエンス講演会：発光ダイオードの実験で光の性質を探ろう, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 岡山県立岡山操山高等学校 (岡山）, 2023 年 2 月 3 日.

[45] 研究室総出: La Trobe 大学＋国立シンガポール大学学部生の研究室見学, 理学部 1 号館, 2023 年 2 月 1 日.

[46] 研究室総出: 茨城県緑岡高等学校 SSH 事業大学研究室訪問, 理学部 1 号館, 2022 年 10 月 26 日.

[47] 長谷川修司: 鳥取県立米子東高等学校「科学を創造する人財育成事業」科学実験, 鳥取県立米子東高等学校 (鳥取）, 2022 年 10 月 15 日.

[48] 長谷川修司: 栃木県高等学校教育研究会理科部会物理分科会夏季研修会, 栃木県立宇都宮高等学校 (栃木）, 2022 年 9 月 25 日.

[49] 研究室総出: 茨城県立土浦第一高等学校　模擬授業と研究室見学, 理学部 1 号館, 2022 年 8 月 1 日.

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

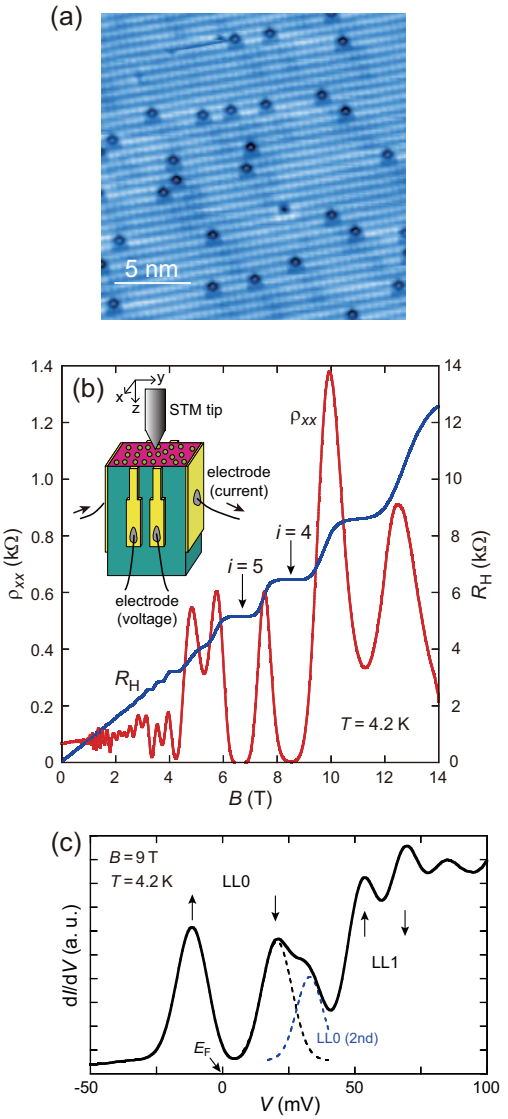

図 4.2.1: (a) InSb 劈開表面に鉄を 0.01 ML つけた場合の STM 像（20×20 nm^2）。黒い輪郭を持った丸が Fe であり、明るい縞模様が Sb の格子である。(b) 4.2 K における縦抵抗率とホール抵抗の磁場依存性。明瞭な整数量子ホール効果が観測されている。(c) 走査トンネル分光の測定例。微分コンダクタンスから２次元電子系の状態密度を調べることができる。ここでは、スピン分裂したランダウ準位が観測されている。

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。

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。我々は近年研究してきた GaAs 劈開表面上に作成された超伝導薄膜において、垂直（面直）磁場下および平行（面内）磁場下で非相反伝導が生じるか検証を行った。

垂直磁場下での研究

超伝導薄膜に垂直磁場を印加した場合には渦糸（ボルテックス）の運動により非相反伝導が生じる可能性がある。本研究では超伝導薄膜を作成する GaAs 基板のエッジに非対称な構造を作成して空間反転対称性を破った。鉛とアルミの超薄膜 ($0.3 - 2$ nm 程度) に対して垂直磁場下で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垂直磁場の正負に対して反対称になることがわかった。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。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。さらに今年度はこの整流効果の実用性を調べるために、超伝導薄膜に流す電流の値を変化せて測定を行った。その結果、1 μA 程度までの電流を整流できていることがわかった。超伝導ダイオードなどの実用面を考えるとまだ十分な値とは言えないが、今後、空間反転対称性を破る構造の工夫や超伝導物質の改良により大きな整流効果をもつデバイスの開発を目指す予定である。

平行磁場下での研究

半導体基板の表面に作成された超伝導薄膜は半導体基板と真空に挟まれているため、鉛直方向に空間反転対称性が破れている。さらに、鉛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ラッシュバ効果が期待される。このような試料に対して電流の方向に直交するように平行磁場を印加した場合、電流の方向若しくは磁場の方向に依存した非相反伝導が期待される。今年度は、鉛単体、鉛とビスマスとインジウムの積層構造をもつ超薄膜に対して測定を行った。現時点においては超伝導臨界電流値における非相反効果は現れていない。今度、イオン液体などを用いて強い電場勾配をかける手法を

用いて非相反効果の実現とその検出を目指す予定である。

Pb 超薄膜の超伝導と表面磁性体の近藤効果

Pb 超薄膜に磁性体を吸着あるいは混入させると超伝導転移温 T_c は減少する。近藤温度 T_K が T_c よりも十分に低い場合には、磁性不純物は自由磁気モーメントとして振る舞い、磁気散乱によって超伝導を破壊する。例えば、磁性不純物として Ce を用いた庭田らの実験では、磁気散乱が強磁場中で抑制されることによる磁場誘起超伝導が観測されている（PRL2017）。一方、$T_K \gg T_c$ の場合には、近藤一重項が形成され磁性体の磁気モーメントは消失し、クーパー対を形成する電子間の実効的な斥力が対破壊の原因となると考えられている。

図 4.2.2(a) に、Ag でコートした Pb 超薄膜に Fe を段階的に蒸着した場合の結果を示す。この例のように T_c は磁性不純物の蒸着量に対して直線的に減少するが、その傾きは磁性不純物の種類や Au や Ag のコーティングによって大きく変わることが明らかになった。図 4.2.2(b) に、理論式と比較するために無次元化した傾きの大きさを示す。$T_K \gg T_c$ の領域に対する理論によれば、傾きの大きさはおおむね T_K に反比例する。磁性不純物を Pb 超薄膜に直接堆積させた場合には、傾きの大きさが磁性原子のスピンの大きさ S に対して急激に増大するが、これは Hund 結合によって近藤一重項の形成が抑制されて T_K が小さくなった結果として理解できる。貴金属などをホストとしたバルクの希薄磁性合金でも同様の S 依存性が知られている。

また、Pb 超薄膜の表面を 1.5 原子層程度の Au または Ag で覆った後に Co または Fe を蒸着すると、直接蒸着した場合よりも T_c の減少の傾きが大きくなる。一見意外な結果に思えるが、磁性体に隣接する原子が Pb よりも価数が小さな金属に置き換わったことにより T_K が低くなった結果として理解することができる。Mn 蒸着の場合は、Ag をコートすることによって傾きが小さくなったが、T_K が小さくなって自由磁気モーメント領域（$T_K \ll T_c$）に入ったと考えられる。T_c の磁性不純物の蒸着量に対する減少率が、自由磁気モーメント領域から近藤領域に移り変わる $T_K \sim T_c$ においてピークをもつことは理論的に予想されていたが、これまで物質を系統的に変えて測定を行った例はない。今後、平行磁場に対する応答を調べることにより、Ag 上の Mn が自由磁気モーメント領域にあることを検証する予定である。

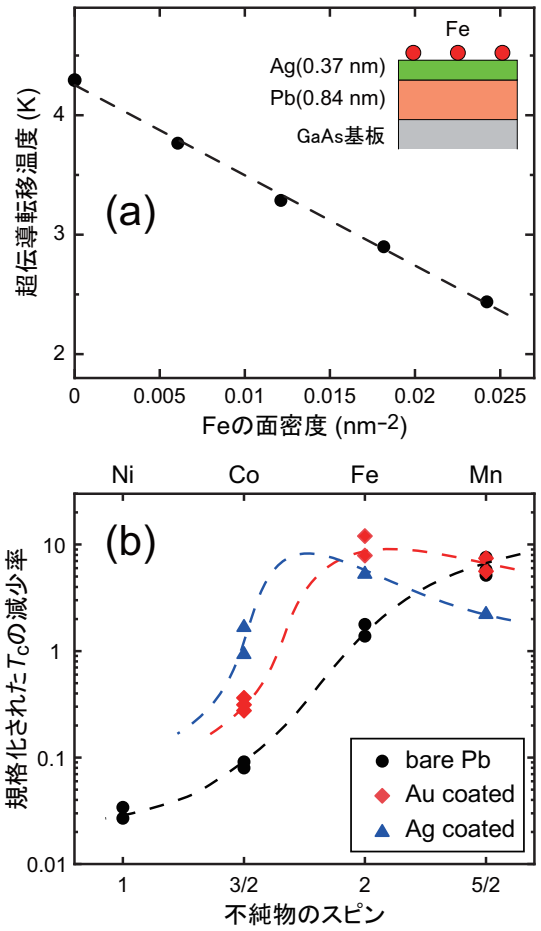

図 4.2.2: (a) Pb 超薄膜の表面を Ag でコートした後に Fe を堆積させた場合の超伝導転移温度 T_c の変化。(b) 磁性不純物量に対する T_c の減少率を 3d 磁性金属のスピンの大きさに対してプロットした。黒は Pb に磁性体を直接乗せた場合、赤と青は Pb 超薄膜表面を 1-2 原子層の Au または Ag でコートした後に磁性体を乗せた場合の結果である。

4.2.3 ビスマス超薄膜の電気伝導

GaAs 劈開表面に形成されたビスマスの超薄膜に対する研究を行った。急冷蒸着法で作製した Bi 超薄膜は、数ケルビンの超伝導転移温度をもつアモルファス状態であるが、極低温から昇温させていくと、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。平行磁場依存性が小さかったことと、磁性元素が含まれていないことから、電子の軌道運動に対する磁場の影響以外の原因は考えにくい。一方で、電子の軌道運動に対する磁場の影響が大きい場合には、大きな Hall 効果が期待されるが、意外なことに縦抵抗の 1 %以下であった。ローレンツ力が電子と正孔

で逆方向になるため、Hall 抵抗が打ち消しあっていることが考えられるが、バルクのビスマスに対する解析でしばしば用いられる 2 キャリアモデルで今回の結果を説明するためには、電子と正孔が、キャリア密度だけでなく、移動度についてもほぼ等しいことを仮定する必要がある。実際、バルクの半金属ビスマスでは、電子と正孔の有効質量が異なるため、小さくない Hall 抵抗が観測される。

我々の実験結果とよく似た、大きな正の磁気抵抗と小さな Hall 抵抗は、電子正孔対称性をもつグラフェンの系において報告されている。Dirac 点近傍のグラフェンの磁場中電気伝導の解析にしばしば用いられるパドル・モデルを用いた解析を行ったところ、実験結果を良く再現することができた。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。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。

＜報文＞

(原著論文)

[1] N. Ito, R. Masutomi, T. Okamoto: Cancellation of electron and hole contributions to the Hall effect in ultrathin Bi films grown on GaAs(110), Phys. Rev. B **105**, 205434 (2022).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[2] R. Masutomi, T. Okamoto: Observation of crossover from a complex stripe phase to a helical phase in multilayer films, Tsinghua Univ and The Univ of Tokyo The 7th Joint Workshop on Trans-scale Materials Science (Physics and Materials) (口頭発表), (online connection between Tokyo and Beijing), December 13, 2022.

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誘起超伝導

銅酸化物高温超伝導体では電荷、スピン、格子の自由度が複雑に絡み合っており、超伝導の他にも電荷密度波やスピン密度波といった秩序相が現れる。特にランタン系銅酸化物に見られる電荷・スピンのストライプ秩序は 3 次元的なバルク超伝導と競合する秩序として知られている。一方、ストライプ秩序相においても 2 次元的な超伝導が発達していることが示唆されており、ストライプ秩序と超伝導との関係を明らかにすることは銅酸化物における高温超伝導発現機構を理解するうえでも重要である。近年では、超伝導転移温度以上のストライプ相に強い光パルスを照射すると、超伝導が発現することを示唆する研究が報告され、「光誘起超伝導」現象として関心を集めている。我々はこのストライプ秩序と超伝導との関係を解明することを目的として、ストライプ系超伝導体の代表ともいえる $La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO_4$ (LNSCO) を対象に、光誘起超伝導現象の検証を進めている。

昨年度までの研究により、正孔ドープ濃度 $x = 0.12$ の LNSCO において超伝導転移温度以上で、光誘起超伝導の一つの証拠となるジョセフソンプラズマ共鳴を示唆する振る舞いが光励起後に c 軸テラヘルツ帯反射率スペクトルに現れることを確認していたが、本年度はその詳細な検証を行った。まず、光励起状態の緩和時間（典型的に 2 ps 程度）よりも長いパルス幅をもつ近赤外光を用意し、それを励起光として用いた場合の応答を調べたところ、光励起状態がパルス幅に応じて長寿命化し、励起パルスの包絡線に応じてプラズマ周波数が変化する振る舞いが観測された。この結果は、ストライプ秩序を励起光で破壊し続けることで、抑制されていた超伝導が持続的に回復するという描像で解釈できる。また、ストライプ秩序が飽和的に破壊された状態で生じるプラズマ周波数が、励起光のパルス幅によらず 4 meV という同一の値に漸近する様子が観測された。この値は、静的なストライプ秩序を示さない Nd 置換のない超伝導体 $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ (LSCO) の同じ正孔ドープ濃度において、平衡状態の超伝導相で観測されるジョセフソンプラズマ周波数とほぼ一致する。これは、LNSCO における光誘起状態が超伝導であることを強く示唆する。図 4.3.3 に示すように、この光誘起超伝導を示唆する応答は電荷ストライプが発達する温度（67 K）まで明瞭に観測され、ストライプ秩序と超伝導発現が密接に関連することを示している。続いて、ストライプ秩序が最も発達する $x = 0.12$ から正孔ドープ濃度を減らした $x = 0.10$ の試料での実験を行った。その結果、光誘起プラズマ周波数は $x = 0.12$ の試料よりも低エネルギー側にシフトし、2 meV の位置に現れた。静的ストライプのない LSCO の平衡超伝導相では正孔ドープ濃度の減少に伴ってジョセフソンプラズマ周波数が低下することが知られており、LNSCO の光励起状態も同様の傾向に従うことが確かめられた。

以上の結果は、ストライプ秩序と超伝導発現が密接に関連すること、ストライプ秩序を光で破壊する

ことで光誘起超伝導が現れることを強く裏付けるものである。現在、ストライプ形成と超伝導の相関についてより深い理解を得ることを目指しさらに系統的な測定を続けている。

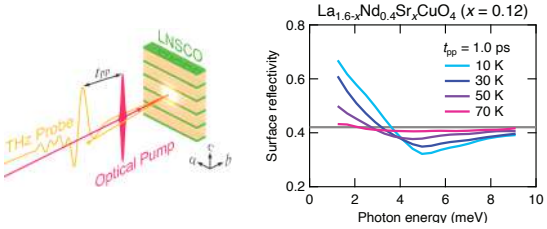

図 4.3.3: （左）近赤外励起-THz プローブ分光の実験セットアップ。（右）近赤外光パルス励起から 1.0 ps 後のテラヘルツ帯 c 軸反射スペクトルの温度依存性。灰色の実線は光励起前の平衡状態での反射スペクトルを表す。超伝導転移温度は 3.2 K。超伝導転移温度よりはるか高温、電荷ストライプのオンセット温度（67 K）まで、超伝導に由来するジョセフソンプラズマ共鳴と解釈されるスペクトル構造が現れる。

集団励起モードの観測による鉄系超伝導体のペアリング対称性の研究

鉄系超伝導体 FeSe は強く異方的な 2 回回転対称性を有する超伝導ギャップを持つことがトンネル分光法や角度分解光電子分光法などの手法によって示されているが、その起源については未だ明らかになっていない。FeSe における異方的なギャップ構造がどのような対称性のペアリング相互作用に起因しているかは鉄系超伝導体の超伝導発現機構とも密接に関係しており、多くの議論がなされている。

さて、ペアリング相互作用が複数の対称性成分を持つ場合、ギャップ関数の副次的な対称性成分の揺らぎに対応する集団励起モードである Bardasis-Schrieffer モード (BS モード) が発現する。このため、FeSe における BS モードの存在を実験的に示すことによって超伝導のペアリング相互作用に関する知見が得られると期待される。特に、最近理論的に提唱された BS モードに起因する THz 第三高調波発生（THz-THG）に着目し、FeSe の BS モードの観測を試みた。

THz-THG の温度依存性を測定したところ、超伝導転移温度以下で発生効率が大きく増加した。この THz-THG の位相について解析を行ったところ、超伝導のヒッグス (Higgs) モードよりも低エネルギー側に共鳴構造が存在することを示唆する位相のとびが観測された。その振る舞いは理論研究によって指摘されている BS モードの特徴と整合することから、観測結果は THz-THG が FeSe における BS モードの存在を示唆するものであると推定した。現在、より明確な BS モードの証拠を捉えるために、周波数依存性などの系統的な測定を進めている。

ヒッグスモードの量子干渉測定

超伝導体においては、超伝導転移に伴って超伝導秩序変数の振幅揺らぎに相当するヒッグスモードと呼ばれる集団励起モードが現れる。これまでに我々は特に従来型 s 波超伝導体において 2 つの方法でヒッグスモードの観測に成功してきた。1 つは高強度 THz 波パルスの照射による超伝導の超高速クエンチを利用したものであり、この非断熱的クエンチによってヒッグスモードの自由振動が誘起される。もう 1 つは超伝導体に狭帯域マルチサイクル THz 波パルスを照射したときに、入射 THz 波の 3 倍の周波数を持つ THz 波が放射される、THz 第 3 高調波発生 (THG) と呼ばれる現象である。これは THz 波とヒッグスモードの非線形結合の結果, 超伝導秩序変数が THz 波の周波数の 2 倍の周波数で振動することに由来する。本研究では、ヒッグスモードのコヒーレント制御を通じた超伝導秩序変数のコヒーレント増幅を試みた。測定には s 波金属超伝導体 NbN 薄膜試料 (T_c = 15 K、2Δ = 5 meV (= 1.3 THz)) を用い、これに高強度・広帯域の THz 励起パルスと、それに直交する偏光をもつ高強度・狭帯域の THz プローブパルス (中心周波数 $\omega/2\pi$ = 0.5 THz) を時間差 (遅延時間 t_{pp}) をつけて照射した。試料から透過してくるプローブ THz 波にはヒッグスモードの振幅を反映した THG 信号が含まれているが、t_{pp} を変えながら THG 信号の大きさ I_{TH} を測定したところ、I_{TH} が t_{pp} に対して振動すること、その振動の周波数はプローブ THz 波の周波数の 2 倍である 1.0 THz であることが明らかになった。THG 信号の振動は 2 つの異なる過程によって励起されたヒッグスモード振動 (励起パルスが誘起する自由振動とプローブパルスによる強制振動) が、両者の時間差によって強め合ったり弱め合ったりする、ヒッグスモードの量子干渉効果として解釈が可能であり、フェルミオン凝縮系の物質波の増幅現象とみなすことができる。現在その詳細なメカニズムや超伝導準粒子に由来する非線形過程の影響などについて考察を進めている。

第二高調波発生による鉄系超伝導体の磁束量子の運動の可視化

最近、我々は、「汚れた極限」の s 波超伝導体 NbN において、超伝導電流を注入しながら高強度・狭帯域の THz 波パルスを照射すると、磁束量子の運動に起因する巨大な THz 第 2 高調波（THz-SHG）が発生することを見出した。THz-SHG の共鳴から求められた磁束量子の質量が、超伝導秩序変数のトポロジカル欠陥の運動エネルギーとして計算される磁束コアの理論的な質量とよく一致することから、THz-SHG を用いると、磁束量子間の相互作用の影響を受けることなく、磁束コアの運動特性を観測できることが明らかになった。そこで、磁束コアの「クリーン度」

による運動特性の変化を調べるために、クリーンなコアを持つと考えられている $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ の薄膜に対して、THz-SHG の観測実験を行った。SHG に必要な空間反転の破れをもたらす超伝導電流の導入は、転移温度以下の低温で微小な面直磁場を印加することで生じる遮蔽電流を利用し、同時に希薄な磁束量子系を生成させた。

発生した THz-SHG の偏光・強度を、入射波の偏光と、サンプルの中での集光位置、すなわち遮蔽電流の向きを変えながら測定した。磁束量子が発する THz 電場について偏光と強度の時間変化を観測することで、磁束量子の 2 次元的な運動の軌跡を抽出することに成功した。電流によって傾いた 2 次元ガウシアン型のピン止めポテンシャルに束縛された磁束の運動を仮定して運動方程式を解くことにより、観測された磁束の 2 次元運動を再現することに成功した。

クリーンな磁束コアが運動すると、準粒子散乱による高い粘性抵抗が生じることが予想されるが、THz-SHG の強度から評価した粘性抵抗は、想定される値より 2 〜 3 桁小さく、汚れた極限の NbN のときとほぼ同程度の大きさだった。これらの結果から、コア内の準粒子散乱が磁束量子の運動にほとんど影響していないこと、言い換えればコア内に束縛されていた準粒子は、高強度 THz 波によって駆動された磁束コアの高速運動に追随できていないことを明らかにした。

4.3.2 原子層物質

遷移金属ダイカルコゲナイドの電荷密度波の非熱的相転移ダイナミクス

遷移金属とカルコゲン元素が二次元的に結合した原子層物質である遷移金属ダイカルコゲナイドは、低次元性を反映して低温で超伝導や電荷密度波 (CDW) など多様な秩序相を発現するものが存在する。この電荷密度波 (CDW) 相に光照射をすると、電子相の高効率な非熱的融解現象や、平衡状態では出現しない隠れた秩序相への相転移といった現象が生じることが報告されており、光による電子相制御の対象として活発な研究が進められている。最近我々は、MBE 成長した 3R-$Ta_{1+x}Se_2$ 薄膜に高強度テラヘルツ (THz) 波パルスを照射すると、CDW 振幅モードが二光子励起され、さらに平衡状態にない絶縁体的な状態が現れることを見出した。今年度は、高強度 THz 波パルス照射によって平衡状態の CDW 秩序がどのように抑制されていくか、その動的な融解過程のメカニズムを明らかにすることを目標に実験を行った。

高強度 THz 波を CDW 相の 3R-$Ta_{1+x}Se_2$ 薄膜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、駆動力としての THz 波が過ぎ去った後も CDW 振幅モードに由来する減衰振動が観測された。励起 THz 波の強度を上げていくと、一定の強度以上で急激に振動のソフトニングやダンピングの増加が顕著になっていき、最終的には振幅モードが消失する振る舞いが観測された。この実験結果は、Ginzburg-Landau(GL) モデルに基づく秩序変数の時間発展のシミュレーションで再現され、振幅モードのソフトニングがポテンシャルのピコ秒スケールでの動的な変化を反映していることを突き止めた。さらに、CDW 融解に必要な THz 波による注入エネルギーの温度依存性を調べると、系を CDW 転移温度まで上昇させるために必要なエネルギーより 1 桁以上小さく、CDW の凝集エネルギーの温度依存性とよく一致することがわかった。つまり、THz 波励起によって CDW を形成する電子系と CDW 形成に寄与する格子系のみに対して選択的にエネルギー注入することで、非常に高効率な非熱的電子相融解を実現したと考えられる。

4.3.3 ディラック、ワイル半金属

ディラック電子系 Bi におけるフロッケディラック-ワイル変換

ワイル半金属は時間反転対称性あるいは空間反転対称性の破れに伴って発現するトポロジカルに非自明な半金属である。ワイル半金属中の電子は質量のないカイラルな「ワイルフェルミオン」として振る舞い、非自明なトポロジーや巨大なベリー曲率双極子に起因してカイラル異常、フェルミアーク表面状態、巨大な異常ホール効果など様々な特徴的な物性を示す。

このようなワイル半金属状態を外場で作り出し、自在に制御する方法として「フロッケエンジニアリング」と呼ばれる枠組みが注目を集めている。中でも、3 次元ディラック電子を円偏光で周期駆動することでディラック電子がワイルフェルミオンのペアに分裂する「フロッケワイル半金属」が実現することが理論的に提唱されて以来、フロッケエンジニアリングによるトポロジー制御は理論・実験の両面で大変注目を集めている。

このフロッケディラック-ワイル変換の実現を目指して、我々は 3 次元ディラック電子系であるビスマスの薄膜試料に波長 4 μm の円偏光を照射し、誘起される異常ホール効果をテラヘルツ波の偏光回転を通して測定する実験を行った。その結果、広い強度領域で異常ホール伝導度が光の電場強度に比例 (光の強度の 1/2 乗に比例) するという興味深い性質を見出した。

この結果の解明を目指し、共鳴的な光駆動によって実現するフロッケディラック-ワイル変換の性質について理論的な考察を進めた。その結果、等方的かつ質量のない 3 次元ディラック電子の模型から出発しフロッケ理論を適用することで、円偏光の 1 光子共鳴点で新しいワイル点のペアが生成されていることがわかった。通常のワイル点はモノポール数が ± 1 だが、今回見出されたワイル点はモノポール数が ± 2 の「フロッケ二重ワイル状態」とも表現すべき状態になっていることがわかった。

$Co_3Sn_2S_2$ における円偏光誘起カイラルゲージ場生成

前節でも述べたように、フロッケエンジニアリングによって電子系のトポロジーを制御する試みが注目を集めており、3 次元ディラック半金属を円偏光で駆動した際に現れるフロッケワイル半金属状態の実現が望まれている。我々はカゴメ格子金属 $Co_3Sn_2S_2$ のディラック電子相に着目して、フロッケワイル状態の実現を目指して実験を進めている。$Co_3Sn_2S_2$ は、キュリー温度 (およそ 185 K) 以下で強磁性を発現する磁性ワイル半金属である。一方でキュリー温度以上の常磁性相では 3 次元のディラック半金属状態を示し、3 次元ディラック電子系の研究にも適した物質である。

我々はスパッタリング法によって成膜した室温の $Co_3Sn_2S_2$ 薄膜に、円偏光の中赤外光パルス (波長 4 μm、パルス幅 100 fs) を照射することでフロッケワイル半金属状態の実現を目指した。円偏光によるワイル半金属相への転移は異常 Hall 効果として現れることが期待され、実際に光照射中のみ誘起された異常ホール伝導度を低エネルギーの THz 波のファラデー回転を利用して観測した。最近、円偏光に誘起される異常 Hall 効果の起源として、カイラルゲージ場以外にも 1 光子共鳴点での Berry 曲率分布や電子の実励起による効果など様々な寄与が考察されている。それぞれの寄与を切り分けるために重要な性質として、駆動周波数依存性が挙げられる。フロッケワイル状態の特徴としてワイル点間の距離が光電場の 2 乗と周波数の -3 乗に比例するカイラルゲージ場によってもたらされることが知られており、誘起される異常ホール伝導度も同じスケーリング則に従うと考えられる。我々は 73 THz から 120 THz の範囲にわたる複数の駆動周波数に対して測定を行い、カイラルゲージ場から期待される周波数の -3 乗と整合する結果が得られた。今後はさらに $Co_3Sn_2S_2$ に即した有効模型による理論との定量性を含めた議論を進めていく予定である。

$Co_3Sn_2S_2$ における全光学的磁化・カイラリティ反転

磁性ワイル半金属は、運動量の 3 次元方向に線形な分散を持つ特殊なバンド構造を持ち、バンドの交差点であるワイル点が波数空間内で磁気単極子のように振る舞うことで異常ホール効果や異常ネルンスト効果などの特殊な物性を示す。異常ホール効果や異常ネルンスト効果の符号は磁気単極子の符号に対応するワイル粒子のカイラリティによって決まるため、このカイラリティを制御することで磁性ワイル半金属が示すこれらの特異な応答を制御することが可能である。磁性ワイル半金属においてはカイラリティと磁化が結合しており、磁場や電流を用いた制御法が報告されている。

我々は、巨大な異常ホール伝導度を示す $Co_3Sn_2S_2$ 薄膜のワイル強磁性相にサブ mJ/cm^2 程度の円偏光の中赤外光パルス (波長 4 μm、パルス幅 100 fs) を照射した。その結果、この物質のテラヘルツ帯における非常に大きな異常ホール効果を光の偏光によって選択的かつ不揮発的に繰り返し反転できることが判明した (図 4.3.4(a))。これは、$Co_3Sn_2S_2$ の磁化、およびカイラリティを全光学的に反転することに成功したことを意味する。磁気光学イメージングを用いて反転現象を詳細に調べたところ、この反転を実現するには適切な光強度のパルスを複数回照射する必要があることや温度がキュリー温度から遠ざかるほど必要な光強度が大きくなるといった傾向を観測した。適切な光強度で磁化反転が起こるという性質を利用すると、光の照射位置をスイープすることで自在に磁化領域を制御できる (図 4.3.4(b))。得られた実験結果から、磁気円二色性に起因して光照射により一方の磁化ドメインが選択的に熱化し冷却する過程が繰り返される過程により磁化反転に至っていることを明らかにした。また、同機構に基づいたモデルでのシミュレーションを行い、実験結果を再現できることを示した。

今回観測した全光学的磁化反転象の起源は磁性ワイル半金属に普遍的な性質である磁気円二色性に基づくため、他の磁性ワイル半金属にも適用できることが期待でき、磁性ワイル半金属の大きな異常ホール効果を用いた次世代の光記録デバイスへの応用が考えられる。また、電流を用いた磁性ワイル半金属の磁化制御とは異なり、光は任意の空間パターンに磁化/カイラリティを書き込むことが可能であるため、複雑な磁気テクスチャーを再現することが可能になった。

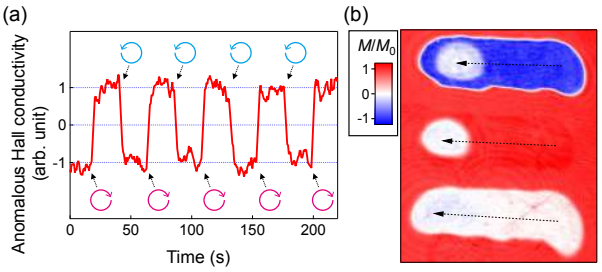

図 4.3.4: (a) 円偏光のヘリシティ (右回り・左回り) を繰り返し反転しながら光パルスを照射した際の、異常ホール伝導度の時間変化。(b) 単一磁化状態の薄膜試料に、上から左回り円偏光、右回り円偏光、直線偏光を照射しながら矢印に沿って照射位置をスイープした後の磁気光学イメージング像。

＜受賞＞

[1] 吉川尚孝: 日本物理学会若手奨励賞（領域 5）

[2] 平井誉主在: 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science, poster award

[3] 小川和馬: 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science, poster award

[4] 松本陽行: 第 14 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

[5] 鳴坂潮: 第 14 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

[6] 小川和馬: 理学系研究科研究奨励賞

＜報文＞

(原著論文)

[7] Kota Katsumi, Morihiko Nishida, Stefan Kaiser, Shigeki Miyasaka, Setsuko Tajima, Ryo Shimano: Absence of the superconducting collective excitations in the photoexcited nonequilibrium state of underdoped $YBa_2Cu_3O_y$, arXiv.2209.01633.

[8] Naotaka Yoshikawa, Yoshua Hirai, Kazuma Ogawa, Shun Okumura, Kohei Fujiwara, Junya Ikeda, Takashi Koretsune, Ryotaro Arita, Aditi Mitra, Atsushi Tsukazaki, Takashi Oka, Ryo Shimano: Light-induced chiral gauge field in a massive 3D Dirac electron system, arXiv.2209.11932.

[9] Naotaka Yoshikawa, Kazuma Ogawa, Yoshua Hirai, Kohei Fujiwara, Junya Ikeda, Atsushi Tsukazaki and Ryo Shimano: Non-volatile chirality switching by all-optical magnetization reversal in ferromagnetic Weyl semimetal $Co_3Sn_2S_2$, Communications Physics **5**, 328 (2022).

[10] Yoshua Hirai, Naotaka Yoshikawa, Masashi Kawaguchi, Masamitsu Hayashi, Shun Okumura, Takashi Oka, Ryo Shimano: Anomalous Hall effect of light-driven three-dimensional Dirac electrons in bismuth, arXiv.2301.06072.

[11] Morihiko Nishida, Kota Katsumi, Dongjoon Song, Hiroshi Eisaki, Ryo Shimano: Light-induced coherent interlayer transport in stripe-ordered $La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO_4$, arXiv.2303.01961.

[12] Takuya Matsuda, Tomoya Higo, Takashi Koretsune, Natsuki Kanda, Yoshua Hirai, Hanyi Peng, Takumi Matsuo, Naotaka Yoshikawa, Ryo Shimano, Satoru Nakatsuji, and Ryusuke Matsunaga: Phys. Rev. Lett. **130**, 126302 (2023).

(学位論文)

[13] 礒山和基：光励起された超伝導体からのテラヘルツ第３高調波発生の研究（博士論文）

[14] 丹羽宏彰：Study of a generation method and spectroscopic applications of terahertz cylindrical vector beams（博士論文）

[15] 小川和馬：円偏光照射による強磁性ワイル半金属 $Co_3Sn_2S_2$ における磁化及びカイラリティ制御の研究（修士論文）

[16] 鳴坂潮：高強度テラヘルツ波励起による 2 次元物質 3R-$Ta_{1+x}Se_2$ の電荷密度波相の融解ダイナミクスに関する研究（修士論文）

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[17] M. Nishida, K. Katsumi, D. Song, H. Eisaki, R. Shimano: Transient Terahertz Optical Response of Stripe-ordered SuperconductorLa $_{1.6-x}$Nd $_{0.4}$Sr $_x$CuO $_4$, M2S, Vancouver Convention Centre, Jul. 19, 2022. (poster)

[18] K. Ogawa, N. Yoshikawa, Y. Hirai, K. Fujiwara, J. Ikeda, A. Tsukazaki, R. Shimano: All-optical switching of magnetization and chirality in ferromagnetic Weyl semimetal, Gordon Research Seminar on Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems, Ventura, Oct. 8-9, 2022. (oral)

[19] K. Ogawa, N. Yoshikawa, Y. Hirai, K. Fujiwara, J. Ikeda, A. Tsukazaki, R. Shimano: All-optical switching of chirality in magnetic Weyl semimetal $Co_3Sn_2S_2$ using mid-infrared laser pulses, Gordon Research Conference on Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems, Ventura, California, Oct. 9-14, 2022. (poster)

[20] Y. Hirai, N. Yoshikawa, M. Kawaguchi, M. Hayashi, S. Okumura, T. Oka, R. Shimano: Terahertz anomalous Hall effect in the light-driven Dirac electrons in bismuth, 2022 Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems (Gordon Research Conference), Ventura, California, Oct. 9-14, 2022. (poster)

[21] N. Yoshikawa, Y. Hirai, Kazuma Ogawa, S. Okumura, K. Fujiwara, J. Ikeda, T. Koretsune, R. Arita, A. Mitra, A. Tsukazaki, T. Oka, R. Shimano: The observation of chiral gauge field in the Floquet state of 3D Dirac semimetal $Co_3Sn_2S_2$, 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS2022), Tokyo, 8-11 Nov. 2022 (poster)

[22] K. Ogawa, N. Yoshikawa, Y. Hirai, K. Fujiwara, J. Ikeda, A. Tsukazaki, R. Shimano: All-optical switching of chirality and magnetization in ferromagnetic Weyl semimetal Co3Sn2S2, 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS2022), Tokyo, 8-11 Nov. 2022 (poster)

[23] Y. Hirai, N. Yoshikawa, M. Kawaguchi, M. Hayashi, S. Okumura, T. Oka, R. Shimano: Circularly polarized light-induced terahertz anomalous Hall effect of three-dimensional Dirac electrons in bismuth, 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS2022), Tokyo, 8-11 Nov. 2022 (poster)

[24] H. Matsumoto, S. Nakamura, H. Ogawa, T. Kobayashi, N. Shikama, F. Nabeshima, A. Maeda, and R. Shimano: Collective modes in iron chalcogenide superconductors $FeSe_{1-x}Te_x$ studied by terahertz third-harmonic generation, Spectroscopies of Novel Superconductors 2022, Indian Institute of Science, Dec. 13, 2022. (poster)

[25] M. Nishida, K. Katsumi, D. Song, H. Eisaki, R. Shimano: THz Spectroscopy of Optical Pumped Cuprate Superconductor, FoPM International Symposium, Hongo, Feb. 6-8, 2023. (oral)

[26] Y. Hirai, N. Yoshikawa, M. Kawaguchi, M. Hayashi, S. Okumura, T. Oka, R. Shimano: Three-dimensional Dirac electrons driven by circular polarized light, FoPM International Symposium, Hongo, Feb. 6-8, 2023. (oral))

[27] H. Matsumoto, S. Nakamura, H. Ogawa, T. Kobayashi, F. Nabeshima, A. Maeda, and R. Shimano: Terahertz third harmonic generation in superconductors, FoPM International Symposium, Hongo, Feb. 6 – 8, 2023. (oral))

[28] M. Nishida, K. Katsumi, D. Song, H. Eisaki, R. Shimano: Photo-induced c-axis terahertz response of stripe-ordered cuprate superconductor $La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO_4$, APS march meeting 2023, Las Vegas Caesars Forum Convention Center, Mar. 8, 2023. (oral)

[29] N. Yoshikawa, Y. Hirai, K. Ogawa, S. Okumura, K. Fujiwara, J. Ikeda, T. Koretsune, R. Arita, A. Mitra, A. Tsukazaki, T. Oka, R. Shimano: Chiral gauge field in light-driven Dirac electrons in $Co_3Sn_2S_2$, APS March Meeting 2023, Las Vegas, 6-10 Mar. 2023. (oral)

招待講演

[30] R. Shimano: Inhomogeneous superconducting-like terahertz response of photoexcited stripe-ordered phases in$La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO_4$, Superstripes2022 (online), June 20, 2022

[31] R. Shimano: Higgs Mode Responses in Photoexcited Unconventional Superconductors, M2S, Vancouver Convention Centre, July 19, 2022.

[32] R. Shimano: Light-induced anomalous Hall effect in three dimensional Dirac electron systems, Workshop on New trends in Nonequilibrium Many-Body Systems: Methods and Concepts, MPI-PKS, Dresden, Aug. 4, 2022.

[33] Y. Hirai, N. Yoshikawa, M. Kawaguchi, M. Hayashi, R. Shimano: Helicity-dependent terahertz-wave emission from the Dirac electrons in bismuth, SPIE Optics + Photonics 2022, San Diego, Aug. 21-25, 2022.

[34] R. Shimano: Study of superconductivity from nonequilibrium, MPi-UBC-UTokyo PI Meeting, UBC, Vancouver,Sept.20, 2022.

[35] R. Shimano: Amplitude Mode-Driven Phase Transition in a Charge Density Wave Phase of Transition Metal Dichalcogenide, Gordon Research Conference on Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems, Ventura, California, Oct. 11, 2022.

[36] R. Shimano: Floquet Engineering in 3D Dirac and Weyl Semimetals, Pan Pacific Workshop on Topology and Correlation in Exotic Material, Moorea, French Polynesia, Oct.24-27, 2022.

[37] R. Shimano: Light-induced Josephson plasma resonance-like response without long range order in cuprate superconductors, The 13th TOYOTA RIKEN International Workshop on Integrated Spectroscopy for Strong Electron Correlation - Theory, Computation and Experiments(ISSCE), Koshiba Hall, Univ. of Tokyo, Dec. 5, 2022.

[38] R. Shimano: Coherent c-axis charge carrier responses in photoexcited cuprate superconductors above Tc, Spectroscopies of Novel Superconductors 2022, Indian Institute of Science, Dec. 14, 2022. (online)

(国内会議)

一般講演

• 日本物理学会 2022 年秋季大会（2022 年 9 月 12-15 日、東京工業大学）

[39] 小川和馬, 吉川尚孝, 平井誉主在, 藤原宏平, 池田絢哉, 塚﨑敦, 島野亮：強磁性ワイル半金属 $Co_3Sn_2S_2$ の中赤外円偏光照射による全光学的磁化反転（口頭発表）

[40] 松本陽行, 中村祥子, 小川浩生, 小林友輝, 色摩直樹, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮：$FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ 薄膜におけるテラヘルツ第 3 高調波発生（口頭発表）

[41] 松田拓也, 肥後友也, 是常隆, 神田夏輝, 平井誉主在, Hanyi Peng, 松尾拓海, 吉川尚孝, 島野亮, 中辻知, 松永隆佑：ワイル反強磁性金属 Mn_3Sn における高密度励起による有効質量の軽いキャリアの出現（口頭発表）

[42] 中村祥子, 松本陽行, 小川浩生, 小林友輝, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮：超伝導遮蔽電流存在下の $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ 薄膜によるテラヘルツ第 2 高調波発生

• 京都大学基礎物理学研究所研究会「非自明な電子状態で発現する超伝導現象の新しい潮流」（2022 年 12 月 21-23 日、京都大学）

[43] 松本 陽行, 中村 祥子, 小川 浩生, 小林 友輝, 色摩 直樹, 鍋島 冬樹, 前田 京剛, 島野 亮: テラヘルツ第三高調波発生を用いた鉄系超伝導体 $FeSe_{1-x}Te_x$ における集団励起モードの観測（ポスター発表）

[44] 西田森彦, 勝見恒太, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮: 銅酸化物超伝導体 $La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO_4$ のストライプ秩序相における光励起 c 軸テラヘルツ分光（ポスター発表）

• 第 14 回低温科学研究センター研究交流会（2023 年 2 月 16 日、東京大学）

[45] 平井誉主在, 吉川尚孝, 河口真志, 林将光, 奥村駿, 岡隆史, 島野亮：円偏光駆動した 3 次元 Dirac 電子系ビスマスの異常 Hall 効果（口頭発表）

[46] 西田森彦, 勝見恒太, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮：銅酸化物高温超伝導体 $La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO_4$ の光励起 c 軸テラヘルツ分光（ポスター発表）

[47] 松本陽行, 中村祥子, 小川浩生, 小林友輝, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮：鉄系超伝導体 FeSe のネマティック超伝導状態におけるテラヘルツ第三高調波発生（ポスター発表）

[48] 鳴坂潮, 吉川尚孝, 松岡秀樹, 田中勇貴, 武藏摩紀, 中野匡規, 岩佐義宏, 島野亮：テラヘルツ波を用いた 3R-$Ta_{1+x}Se_2$ の電荷密度波相の非熱的融解とそのダイナミクス（ポスター発表）

[49] 礒山和基, 辻直人, 寺井弘高, 島野亮：s 波超伝導体 NbN における Higgs モードの量子干渉測定（ポスター発表）

[50] 小川和馬, 吉川尚孝, 平井誉主在, 藤原宏平, 池田絢哉, 塚﨑敦, 島野亮：中赤外円偏光パルスを用いた強磁性ワイル半金属 $Co_3Sn_2S_2$ の磁化及びカイラリティの反転（ポスター発表）

• 日本物理学会 2023 年春季大会（2023 年 3 月 22-25 日、オンライン開催）

[51] 奥村駿, 平井誉主在, 吉川尚孝, 島野亮, 岡隆史：3 次元 Dirac 電子系の 1 光子共鳴点における Floquet 二重 Weyl 状態（口頭発表）

[52] 平井誉主在, 吉川尚孝, 河口真志, 林将光, 奥村駿, 岡隆史, 島野亮：3 次元 Dirac 電子系ビスマスの円偏光誘起異常 Hall 効果と Floquet 二重 Weyl 状態（口頭発表）

[53] 吉川尚孝：（若手奨励賞）高強度中赤外光・THz 波を用いた光駆動電子系の研究

招待講演

[54] 島野亮：光励起された銅酸化物高温超伝導体のコヒーレント c 軸伝導, 京大基研研究会「非自明な電子状態で発現する超伝導現象の新しい潮流」, 2022 年 12 月 19 日

[55] 島野亮：3 次元ディラック及びワイル半金属のフロッケエンジニアリング, 日本物理学会 2023 年春季大会一般シンポジウム, 2023 年 3 月 23 日, オンライン開催

(セミナー)

[56] 吉川尚孝：3 次元ディラック物質 $Co_3Sn_2S_2$ における光誘起カイラルゲージ場, 物性研 LASOR セミナー, 2022 年 12 月 19 日

[57] 吉川尚孝：強磁性ワイル半金属 $Co_3Sn_2S_2$ の全光学磁化反転による不揮発的カイラリティスイッチング, 2022 年度第 9 回光機能研究会, 2023 年 2 月 24 日

[58] 西田森彦, 勝見恒太, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮: Nd-LSCO 単結晶試料における光励起-THz 分光の実験的研究, 産業技術総合研究所つくばセンター, 2023 年 3 月 30 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 4 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、ボーズアインシュタイン凝縮相の創成、磁性共存超伝導相、及び量子磁性相の探索のための高圧下測定技術開発に注力した。

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

多体量子スピン物理において、絶対零度まで磁性スピンが量子的に絡み合った状態、量子スピン液体の実現はマイルストーンである。量子スピン液体は一次元スピン模型では理論も実験も共に確立されているが、二次元以上ではそうではなく、これまでの実験報告例である三角格子物質等ではハミルトニアンに厳密解が存在せず、量子スピン液体の「発見」の証拠に必要な素励起（準粒子）の研究さえ困難であった。１０年強前にキタエフによって二次元の蜂の巣型格子でスピン液体の厳密解が理論的に示されてからこのキタエフ量子スピン液体の実現が盛んに模索されてきた。キタエフ蜂の巣格子模型では、スピンハミルトニアンをマヨラナフェルミ準粒子として一体問題に帰着した厳密解が得られる。さらに、マヨラナ粒子を操作することができればトポロジカル量子計算も可能とされている。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。

キタエフ物質を創るには、非従来型の異方的相互作用を導入する必要があり、スピン-軌道相互作用が大きいイリジウム酸化物、4f 電子系などに対する実現性が提唱されてきた。当研究室では、キタエフ模型の初の実証例を目指してイリジウム酸化物 $H_3LiIr_2O_6$ に着目し、磁化率、比熱、核磁気共鳴測定において少なくとも 50 mK まで液体であり続ける量子液体物質であることを報告してきた (2018 年 2 月理学部プレスリリース)。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。その中の有力候補である、$4f^1$ の Pr^{4+} 化合物 α, β-Na_2PrO_3 の磁性状態を明らかにしてきた。α 相 (二次元ハニカム格子) では ^{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示唆された。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過程が見られた。本年度は、物性がこれまでに報告されていない β 相 (三次元ハイパーハニカム格子) の Na_2PrO_3 の基礎物性を明らかにした。α 相に類似して基底状態は反強磁性であったが、三次元の格子にも関わらずある程度の短距離秩序が見られたため、キタエフ型相互作用に起因するフラストレーションが存在している可能性がある。現在は、圧力印加等で液体相に近づける努力をしている。別のアプローチとして、第一原理計算データベースを利用して計算機上で安定解と知られている元素比を元に、経験的な結晶合成技術を組み合わせて物質開発を進めている。実際に 4 年生特別実験で新しく見つかった希土類の Sm 蜂の

単格子化合物 Cu_3SmTe_3 を量子スピン液体候補として研究している。キタエフ型相互作用が期待できる Γ_7 クラマース二重項基底で数 K 以上の相互作用を持つハニカム化合物としては、Pr 酸化物系に続く 2 例目となる。この系は半金属であるため、電荷ドーピングまたは圧力印加による伝導電子増加を介した基底状態制御が考えられる。新しい切り口のキタエフ系物質開発として推進している。

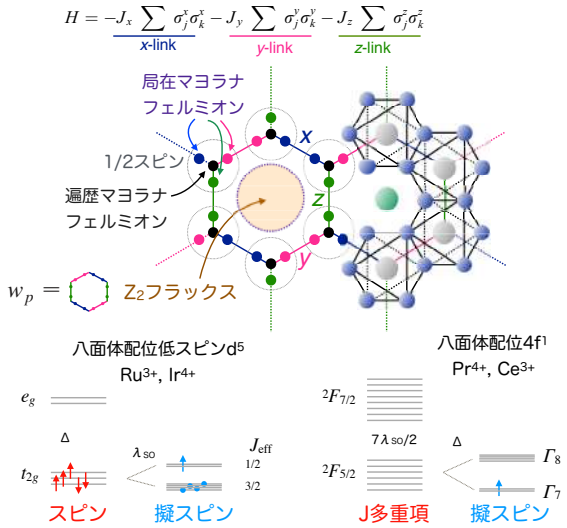

図 4.4.5: ハニカム格子・ハイパーハニカム格子系における量子スピン液体 (左) Kitaev Honeycomb 模型ハミルトニアンのスピンとマヨラナフェルミオンの関係。(右) 異方的相互作用を持つ擬スピン 1/2 での八面体配位結晶場分裂 Δ とスピン－軌道相互作用 λ_{SO} の関係。(左) 現在まで Mott 転移、主要なキタエフ候補物質の研究対象とされてきた代表的な $4d^5, 5d^5$ 電子。(右) 最近キタエフ型相互作用の実現が提唱された $4f^1$ 電子。

4.4.2 高圧物性研究

量子磁性研究のための高圧下精密磁化測定技術の開発

高圧力は物質の基底状態を連続的に変化することができるため、固体物理の研究手法の一つとして広く活用されている。例えば 200 GPa（万気圧）と非常に高い圧力下で室温近くの水素化物超伝導の発見報告の一部にダイヤモンドアンビルセル (DAC) と SQUID 磁束計が利用されてきた。しかし、量子スピン系のような弱い磁性体の研究には数 GPa 程度の圧力下であっても殆ど利用されていなかった。当研究室は、小型の高圧装置と高感度な市販の SQUID 磁気計を組み合わせて行う高圧磁化測定手法に多方面な改良を施すことにより、興味深い量子相を示す物

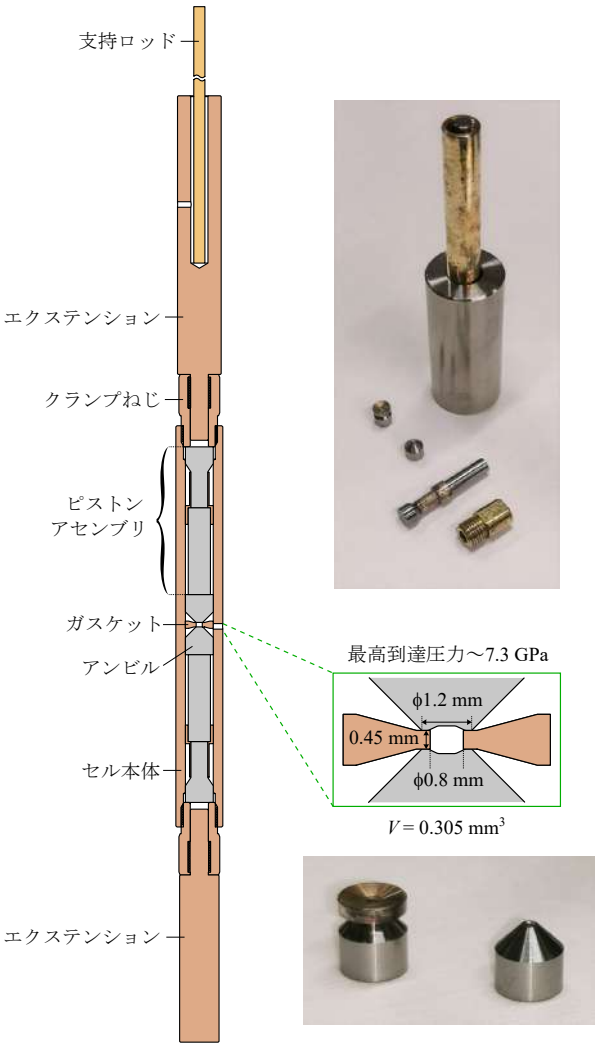

図 4.4.6: 2021 年に新たに開発した精密磁化測定用超高圧セル。セルの断面図及び写真。断面図では灰色がセラミック素材、茶色がバインダレス非磁性超硬合金素材を表す。セル本体の内径は 5 mm、外径は 8.4 mm。

質を迅速にスクリーニングするための手段を開発しており、昨年度、7 GPa まで高精度（体積磁化率で $\sim 10^{-4}$）の磁化測定を可能にした（2021 年 6 月に JPSJ 紙で注目論文）。弱い常磁性を含む磁性研究全般にとって非常に有用である。本年は、いくつかの物質群（Sm 化合物、Cr ハニカム化合物など）の高圧下磁性を明らかにしてきた。もっと高精度、またはより高圧力下での磁化測定のために、構造を全面的に刷新したモアッサナイトアンビル高圧セルを開発している。また、希釈冷凍温度域でも高圧下磁化測定が出来る技術も開発中である。今後も、高圧力下の量子磁性研究を開拓していく。

超高圧下の新しい超伝導相研究

近年、超高圧下（1 万気圧以上）の実験技術がますます進展しており、それに伴い新しい超伝導体が発見されてきている。以前は磁性が強すぎて超伝導になるとは思われていなかった Mn,Cr 化合物もそれらの一つである。そのような変わった超伝導（磁気量子臨界点近傍の超伝導）では、超伝導相が現れる直前にどういう磁性状態になっているか、また、超伝導相と磁性相がどのように競合または共存して現れるか？ という問いが重要になっている。当研究室では、独自に開発した最先端の超高圧下磁化測定、核磁気共鳴測定技術を持っており、10 万気圧程度の圧力下でこれらのメカニズムを調べている。前述の精密磁化測定技術で大まかに磁性状態を把握し、以前開発した超高圧下核磁気共鳴法を用いて超伝導相と磁性相がどのように競合または共存して現れるかを精密に測ることで研究している。MnP では、高圧らせん磁性相が過去の報告よりも高圧側に生き残っており、超伝導相と何らかの共存の可能性が高いことを発見した。$CrSiTe_3$ においては、新たな半金属強磁性相が見つかり、相図上では超伝導相と共存している。今後は、両物質において、本質的な磁性超伝導共存状態があるのかどうか注意深く吟味していく必要がある。

＜報文＞

(原著論文)

[1] D. Huang, H. Nakamura, K. Küster, U. Wedig, N. B. M. Schröter, V. N. Strocov, U. Starke, H. Takagi: Probing the interlayer coupling in 2H-NbS_2 via soft x-ray angle-resolved photoemission spectroscopy. Physical Review B **105**, 24, 245145 (2022).

[2] J.A.N. Bruin, R.R. Claus, Y. Matsumoto, J. Nuss, S. Laha, B.V. Lotsch, N. Kurita, H. Tanaka, and H. Takagi: Origin of oscillatory structures in the magnetothermal conductivity of the putative Kitaev magnet α-$RuCl_3$. APL Materials **10** 090703 (2022).

[3] D. Golež, S. K. Y. Dufresne, M.-J. Kim, F. Boschini, H. Chu, Y. Murakami, G. Levy, A. K. Mills, S. Zhdanovich, M. Isobe, H. Takagi, S. Kaiser, P. Werner, D. J. Jones, A. Georges, A. Damascelli, A. J. Millis: Unveiling the underlying interactions Ta_2NiSe_5 from photoinduced lifetime change Physical Review B **106** L121106 (2022).

[4] Y-M. Wu, U. Niemann, M. Kim, Y. Wang, H. Takagi, P. A. van Aken: Electronic-structure engineering through atomic-scale strain control in geometrically frustrated spinel LiV_2O_4 Microscopy and Microanalysis **28** Supplement S1, 2374 (2022).

[5] T. Halloran, Y. Wang, M. Li, I. Rouchochatzakis, P. Chauhan, M. B. Stone, T. Takayama, H. Takagi, N. P. Armitage, N. B. Perkins, C. Broholm: Magnetic excitations and interactions in the Kitaev hyperhoneycomb iridate β-Li_2IrO_3 Physical Review B **106** 064423 (2022).

[6] L. Nádvorník, O. Gueckstock, L. Braun, C. Niu, J. Gräfe, G. Richter, G. Schütz, H. Takagi, M. Zeer, T. S. Seifert, P. Kubaščík, A. K. Pandeya, A. Anane, H. Yang, A. Bedoya-Pinto, S. S. P. Parkin, M. Wolf, Y. Mokrousov, H. Nakamura, T. Kampfrath: Terahertz Spin-to-Charge Current Conversion in Stacks of Ferromagnets and the Transition-Metal Dichalcogenide $NbSe_2$ Adv. Mater. Interfaces 2201675 (2022).

[7] M.M. Hirschmann, A.S. Gibbs, F. Orlandi, D. Khalyavin, P. Manuel, V. Abdolazimi, A. Yaresko, J. Nuss, H. Takagi, A.P. Schnyder, A.W. Rost: Creating and controlling Dirac fermions, Weyl fermions, and nodal lines in the magnetic antiperovskite Eu_3PbO Phys. Rev. Mater. **6**, 114202 (2022).

[8] H. Okamura, T. Mizokawa, K. Miki, Y. Matsui, N. Noguchi, N. Katayama, H. Sawa, M. Nohara, Y. Lu, H. Takagi, Y. Ikemoto, T. Moriwaki: Pressure suppression of the excitonic insulator state in Ta_2NiSe_5 observed by optical conductivity Physical Review B **107**, 045141 (2023).

[9] T. F. Schweizer, U. Niemann, X. Que, Q. He, L. Zhou, M. Kim, H. Takagi, and D. Huang: Epitaxial growth and scanning tunneling microscopy of LiV_2O_4 thin films on $SrTiO_3$(111) APL Mater. **11**, 021109 (2023).

[10] L. Zhou, Q. He, X. Que, A. W. Rost, and H. Takagi: A spectroscopic-imaging scanning tunneling microscope in vector magnetic field Review of Scientific Instruments **94**, 033704 (2023).

[11] W. A. MacFarlane, M. Oudah, R. M. L. McFadden, D. Huang, A. C. Chatzichristos, D. Fujimoto, V. L. Karner, R. F. Kiefl, C. D. P. Levy, R. Li, I. McKenzie, G. D. Morris, M. R. Pearson, M. Stachura, J. O. Ticknor, E. Thoeng, H. Nakamura, and H. Takagi: ^{8}Li beta-NMR studies of Epitaxial Thin Films of the 3D topological Dirac semimetal Sr_3SnO J. Phys.: Conf. Ser. **2462**, 012057 (2023).

(学位論文)

修士論文

[12] 荒井悠太郎：MnP の圧力誘起磁気量子臨界点と超伝導 (Pressure-induced magnetic quantum critical point and superconductivity in MnP)

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[13] H. Takagi: Thermal transport in Candidate Kitaev and Related Magnets “, TOPCOR Dresden, 11-13/04/2022.

[14] H. Takagi: “Towards Kitaev Quantum Spin Liquid”, Workshop “New Spin on Molecular Quantum Materials”, SPICE Uni Mainz, Germany, 24/05/2022.

[15] H. Takagi: “Thermal transport in candidate Kitaev Quantum Spin Liquid “, Telluride Workshop on “Competing Interactions and Colossal Responses in Transition Metal Oxides and Related Compounds”, Colorado, USA, 21/06/2022.

[16] H. Takagi: “Thermal transport in candidate Kitaev Quantum Spin Liquid”, Gordon Research Conference on correlated electron systems, Mount Holyoke College, USA, 28/06/2022.

[17] K. Kitagawa: ”Liquidness of quantum spin systems as seen by NMR”, Microscopic Properties of Quantum Materials, Sapporo, 01/08/2022.

[18] H. Takagi: “Magnetothermal transport in the field induced quantum spin liquid state of Jeff=1/2 honeycomb magnet”, 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29), Sapporo, Japan, 23/08/2022

[19] H. Takagi: “High-pressure synthesis of cationic superconductor$Ba_{1-x}K_xSbO_3$ -control of orbital energy through relativistic effect – “, Quantum Materials Symposium (QMS), Maui, USA, 10/09/2022.

[20] H. Takagi: “Magnetothermal transport in Jeff=1/2 honeycomb magnet”, Workshop on Frustrated Metals and Insulators, ICTS Bangalore, India, 15/09/2022.

[21] H. Takagi: “Superconductivity in cationic metal $Ba_{1-x}K_xSbO_3$ - comparison with anionic metal $Ba_{1-x}K_xBiO_3$”, Workshop for UBC-MPI-UTokyo center for quantum materials, UBC, Vaancouver, Canada, 21/09/2022.

[22] H. Takagi: “Thermal Transport in Honeycomb/Kagome Quantum Spin Liquids”, Quantum Materials Symposium (QMS), Pyon Chang, Korea, 09/02/2023.

(国内会議)

一般講演

[23] 今田絵理阿, 松本洋介, Simon Schnierer, Jan Bruin, 北川健太郎, 高木英典: ハイゼンベルク反強磁性体 YbCl3 における磁場下 BEC の NMR 測定日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京工業大大岡山キャンパス, 12aW641-10, 2022 年 9 月 12 日.

[24] 吉田章吾, 北川健太郎, 山田陽彦, 小山岳秀, 中井祐介, 上田光一, 水戸毅, 芳賀芳範: 金色相 SmS の低温，高圧下で現れるギャップ状態と磁気秩序状態の 33S-NMR 測定による研究 II 日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京工業大大岡山キャンパス, 12aW331-9, 2022 年 9 月 12 日.

[25] 花栗哲郎, 幸坂祐生, 山田幾也, 東正樹, 高野幹夫, 高木英典, 笠原成, 芝内孝禎, 松田祐司: 銅酸化物・鉄系超伝導体における準粒子干渉パターンの位相と超伝導ギャップ日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京工業大大岡山キャンパス, 12aW541-1, 2022 年 9 月 12 日.

[26] 平岡奈緒香, 荒井悠太郎, 松林和幸, 北川健太郎, 高木英典: 2 次元ハニカム強磁性体 CrSiTe3 の高圧下磁化日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京工業大大岡山キャンパス, 13pW631-6, 2022 年 9 月 13 日.

[27] 北川健太郎, 露木裕太, 土場優雅, 矢田季寛, 小島慶太, 片山尚幸, 松林和幸, 高木英典: Sm テルライドでのキタエフ候補物質開発 II 日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京工業大大岡山キャンパス, 13pW541-15, 2022 年 9 月 13 日.

[28] 露木裕太, 北川健太郎, 林義之, Kelton Whiteaker, Marian Blankenhorn, 周旭光, 松田康弘, 三宅厚志, 徳永将史, 高木英典: f 電子系キタエフ候補物質 Na2PrO3 の磁性日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京工業大大岡山キャンパス,13pW541-16, 2022 年 9 月 13 日.

[29] 荒井悠太郎, 平岡奈緒香, Jinguang Cheng, Wei Wu, Jianlin Luo, 上床美也, 北川健太郎, 高木英典: らせん磁性超伝導体 MnP の超高圧 NMR 日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京工業大大岡山キャンパス,15aW541-2, 2022 年 9 月 15 日.

[30] 北川 健太郎, 荒井 悠太郎, 平岡 奈緒香, CHENG Jinguang, WU Wei, LUO Jianlin, 上床 美也, 高木英典: 超高圧 NMR・磁化測定によるヘリカル磁性超伝導体 MnP の研究第６３回高圧討論会、立命館大学大阪いばらきキャンパス, 3A08, 2022 年 12 月 15 日,

[31] 平岡 奈緒香, 荒井 悠太郎, 松林 和幸, 北川 健太郎, 高木 英典: CrSiTe3 の高圧下磁化と電気伝導第６３回高圧討論会、立命館大学大阪いばらきキャンパス, 3P32, ポスター, 2022 年 12 月 15 日,

[32] 吉田章吾, 平岡奈緒香, 北川健太郎, 武藤哲也, 芳賀芳範, 中井祐介, 水戸毅: SmS 金色相における特異なギャップ状態 -高圧下における 33S-NMR と帯磁率の研究, 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン開催, 22pH2-7, 2023 年 3 月 22 日.

[33] 露木裕太, 北川健太郎, 高木英典: f 電子系キタエフ候補物質 Na2PrO3 の磁性日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン開催, 23aH1-12, 2023 年 3 月 23 日.

[34] 安井勇気, 岩田孝太, 岡崎尚太, 宮坂茂樹, 杉本宜昭, 花栗哲郎, 高木英典, 笹川崇男: モット絶縁体 NiS2 のステップ近傍における絶縁ギャップ観察日本物理学

会 2023 年春季大会, オンライン開催, 23aH2-5, 2023 年 3 月 23 日.

[35] 荒井悠太郎, 平岡奈緒香, Jinguang Cheng, Wei Wu, Jianlin Luo, 上床美也, 北川健太郎, 高木英典: らせん磁性超伝導体 MnP の磁気構造と相転移日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン開催, 24aH1-4, 2023 年 3 月 24 日.

[36] 平岡奈緒香, 荒井悠太郎, 松林和幸, ○北川健太郎, 高木英典: 2D ファンデルワールス結晶 CrSiTe3 の高圧下超伝導と磁性日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン開催, 24aH1-4, 2023 年 3 月 24 日.

[37] 藤田剛, 川鍋郁弥, 深澤英人, 大濱哲夫, 小堀洋, 北川健太郎, 岩本凱成, 荒木新吾, 小林達生: 単結晶 α-Mn の圧力下ゼロ磁場 NMR 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン開催, 24aH2-5, 2023 年 3 月 24 日.

招待講演

[38] 高木英典:「超伝導の不思議とマジック」、市民公開講座、第２９回低温物理国際会議、札幌市 21/08/2022

[39] 北川健太郎: 自作装置で切り拓く磁性体の NMR 研究第２回高知大学強相関電子物性研究会、高知大学朝倉キャンパス、2022 年 8 月 29 日

(セミナー)

[40] 高木英典: “Competing Interactions and Colossal Responses in Transition Metal Oxides and Related Compounds”, special colloquium hosted by president, 物質材料機構理事長講和会, 05/08/2022.

4.5 林研究室

物性物理学において、電子がもつ角運動量「スピン」は磁性や電気伝導、光応答や超伝導など、多くの局面で重要な働きをすることが知られています。電子や光子、物質中の素励起であるフォノン (格子振動) やマグノン (磁気励起) など、スピンを持つ粒子や波動は物質の中でどのように躍動し、どのような物性を誘起するのか。これらの疑問に答え、スピンの物理学を確立することが林研の目標です。

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 極の向き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。

ディラック電子系におけるスピン流 [10]

線形な分散関係を持つ電子はディラック電子と呼ばれ、グラフェンやビスマスなど特殊な物質の中に存在することが知られています。ビスマスにおけるスピンホール効果を調べたところ、ディラック電子系におけるスピン流はスピン角運動量の流れではなく、磁気モーメントの流れから構成されるものであることがわかりました。スピン角運動量の流れは電子とホールで逆になり、ディラック電子系では消失します。一方、磁気モーメントの流れはキャリアの種類によらないため、スピン流形成に寄与します。ビスマスはその巨大な g 因子によってキャリアが持つ磁気モーメントが非常に大きいため、大きなスピンホール伝導度を有することが明らかになりました。

4.5.2 界面スピン軌道相互作用とカイラル磁性

スピン軌道相互作用が大きい物質を組み合わせた薄膜ヘテロ構造では、これまでにない新たな現象が最近次々と見つかっており、注目されています。たとえば、異種金属間や金属・酸化物の界面では、その電子状態に起因したスピン軌道相互作用が発現し、垂直磁気異方性や、カイラルスピン構造を誘起するジャロシンスキー・守谷型の交換相互作用が発現することが最近わかってきました。このような界面で発現するスピン軌道相互作用に由来する効果は、バルクのそれよりも大きい場合があり、その機構解明が重要な研究課題となっています。

フェリ磁性体 TbFeCo 合金における電流駆動磁壁移動 [8]

フェリ磁性体 TbFeCo 合金において、電流で駆動した磁壁の移動方向が合金の組成で変化することを明らかにしました。正味の磁化がゼロとなる磁化補償点組成より希土類元素 (Tb) が多い場合、磁壁は電流と逆方向に移動するのに対し、少ない場合は電流と同じ方向に移動することがわかりました。これらの結果は、TbFeCo 合金に電流を印加すると、打ち消し合う 2 つ以上の駆動力が作用し、磁壁の移動速でを低下させていることを示唆しています。

4.5.3 強結合量子

電子、光子、フォノン、マグノンなど物質中の粒子や波動はお互いと結合することが知られています。結合強度が大きくなると、2 つの特性を合わせた新たな状態が現れることがあります。粒子や波動間の結合に関する研究は近年、量子技術応用を念頭に活発化しています。本研究では強結合状態を実現できる条件を解明し、量子力学に本質に迫る研究を行います。

人工反強磁性体における表面弾性波の大きな非相反伝導 [11]

波の進む向きによって振幅が異なる現象を「非相反伝導」と呼ぶ。表面弾性波は物質中を伝搬する音波の 1 つで、速度数 km/s 程度で伝播します。人工反強磁体の中を伝播する表面弾性波を調べたところ、右と左に伝播する波の大きさが異なることがわかりました。人工反強磁性体は非磁性薄膜を 2 つの強磁性薄膜で挟み、強磁性層の磁化が反平行となる構造を持っています。表面弾性波が人工反強磁体の中のスピン波と相互作用し、非相反伝導が誘起されていると考えられます。

＜受賞＞

[1] 川田拓弥, 理学系研究科研究奨励賞 (博士課程) 東京大学大学院理学系研究科, 2023 年 3 月 23 日.

[2] 川田拓弥, Spin-torque FMR induced by acoustic spin Hall effect, 講演奨励賞, 応用物理学会, 2022 年 11 月 17 日.

[3] Hiroki Matsumoto, Cavity magnetomechanics of surface acoustic waves with a synthetic antiferromagnet, Best poster presentation award, 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science, 2022 年 11 月 11 日.

[4] 川田拓弥, 優秀賞, フォトンサイエンス国際卓越大学院プログラム (XPS), 2022 年 11 月 17 日.

[5] 松本啓岐, 人工反強磁性体における表面弾性波フォノン－マグノン結合, 学生優秀発表賞 (領域 3), 日本物理学会, 2022 年 10 月 14 日.

[6] 松本啓岐, 2 次元フォノニックグラフェンにおける表面弾性波フォノンの伝導特性, 学生優秀発表賞 (領域 10), 日本物理学会, 2022 年 5 月 20 日.

＜報文＞

(原著論文)

[7] Large intrinsic spin Hall conductivity in orthorhombic tungsten. T Ishikawa, R Akashi, K Kubo, Y Toga, K Inukai, I Rittaporn, M Hayashi, S. Tsuneyuki. Phys. Rev. Mater. 7, 026202 (2023).

[8] M. Ishibashi, K. Yakushiji, M. Kawaguchi, A. Tsukamoto, S. Nakatsuji, M. Hayashi, Reversal of current-induced domain wall motion in TbFeCo ferrimagnetic thin films across the magnetization compensation point. Jpn. J. Appl. Phys. 62 013001 (2023).

[9] T. Taniguchi, S. Isogami, Y. Shiokawa, Y. Ishitani, E. Komura, T. Sasaki, S. Mitani, M. Hayashi, Magnetization switching probability in the dynamical switching regime driven by spin-transfer torque. Phys. Rev. B 106 104431 (2022).

[10] Z. Chi, G. Qu, Y.-C. Lau, M. Kawaguchi, J. Fujimoto, K. Takanashi, M. Ogata, M. Hayashi, Spin Hall effect driven by the spin magnetic moment current in Dirac materials. Phys. Rev. B 105, 214419 (2022).

[11] H. Matsumoto, T. Kawada, M. Ishibashi, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Large surface acoustic wave nonreciprocity in synthetic antiferromagnets. Appl. Phys. Express 15, 063003 (2022).

(会議抄録)

[12] Helicity-dependent terahertz-wave emission from the Dirac electrons in bismuth. Y Hirai, N Yoshikawa, H Hirose, M Kawaguchi, M Hayashi, R Shimano, Proc. SPIE 12205, Spintronics XV, 1220502 (2022).

(国内雑誌)

[13] 河口真志, 林 将光, 強磁性ヘテロ構造における界面ジャロシンスキー・守谷相互作用の制御, 日本磁気学会誌「まぐね」, vol.17, no.1, pp. 19-26 (2022).

(学位論文)

[14] 川田拓弥, Electromagnetic responses in metallic thin films induced by piezoelectric acoustic waves, 博士論文 (2023).

[15] 松本啓岐, Acoustic phonon-magnon coupling in synthetic antiferromagnets, 博士論文 (2023).

[16] 鬼頭諄, 透明導電膜 Bi-In 合金の光・伝導特性, 修士論文 (2023).

[17] 宮崎稜大, ディラック半金属 Bi における円偏光誘起起電流のキャリアドープ・構造依存性, 修士論文 (2023).

[18] 丸井幸博, 金属薄膜における電流誘起磁気光学 Kerr 効果, 博士論文 (2022).

[19] Yujun Wang, Magneto-transport properties of CrTe2 thin films, 修士論文 (2022).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[20] H. Matsumoto, D. Hatanaka, M. Asano, T. Kawada, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Cavity magnetomechanics of surface acoustic waves with a synthetic antiferromagnet (poster). Best poster presentation award, 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science, 11/11/2022, Univ. Tokyo, Tokyo.

[21] H. Matsumoto, T. Kawada, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Nonreciprocal propagation of surface acoustic waves in a CoFeB/Ru/CoFeB trilayer synthetic antiferromagenet. The Joint European Magnetic Symposia (JEMS). 7/25/2022, Online.

[22] T. Kawada, M. Kawaguchi, H. Kohno, M. Hayashi, Contribution of electric displacement field to the acoustic spin Hall effect. International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS). 7/15/2022, OIST, Okinawa, Japan.

[23] H. Matsumoto, T. Kawada, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Detection of acoustically driven spin wave resonance by DC measurement. International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS). 7/15/2022, OIST, Okinawa, Japan.

[24] M. Ishibashi, K. Yakushiji, M. Kawaguchi, A. Tsukamoto, S. Nakatsuji, M. Hayashi Inertia-Driven Fast Current-induced Domain Wall Motion in Compensated Ferrimagnets. International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS). 7/12/2022, OIST, Okinawa, Japan.

招待講演

[25] M. Hayashi, Spin currents and light-spin interaction in Dirac materials, 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science, Nov. 8, 2022.

[26] Y. Hirai, N. Yoshikawa, H. Hirose, M. Kawaguchi, M. Hayashi, R. Shimano, Helicity-dependent terahertz-wave emission from the Dirac electron system bismuth, SPIE Spintronics XV, Aug. 21, 2022.

(国内会議)

一般講演

[27] 平井誉主在, 吉川尚孝, 河口真志, 林将光, 奥村駿, 岡隆史, 島野亮, 3 次元 Dirac 電子系ビスマスの円偏光誘起異常 Hall 効果と Floquet 二重 Weyl 状態. 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 23 日, オンライン.

[28] 塚本萌太, 山本航輝, 河口真志, 林将光, 佐々木健人, 小林研介, 色中心磁場センサと磁気光学カー効果の同時イメージング技術. 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 22 日, オンライン.

[29] 山本航輝, 塚本萌太, 河口真志, 林将光, 佐々木健人, 小林研介, ダイヤモンド量子センサによる磁壁の観測. 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 22 日, オンライン.

[30] 川田拓弥, 松本啓岐, 河口真志, 林将光, 強磁性単層膜における一方向性プレナーホール起電力. 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 22 日, オンライン.

[31] M. Asano, H. Matsumoto, M. Hayashi, D. Hatanaka, Theoretical investigation of cavity magnomechanics with a synthetic antiferromagnet. 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 2023 年 3 月 18 日, ハイブリッド開催 (上智大学四谷キャンパス).

[32] H. Matsumoto, D. Hatanaka, M. Asano, T. Kawada, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Phonon-magnon coupling in a synthetic antiferromagnet integrated into a surface acoustic wave cavity. 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 2023 年 3 月 18 日, ハイブリッド開催 (上智大学四谷キャンパス).

[33] I. Yasuda, T. Kawada, M. Kawaguchi, M. Hayashi, ディラック半金属 PtSe2 における偏光依存光応答. 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 2022 年 9 月 23 日, ハイブリッド開催 (東北大学川内キャンパス).

[34] H. Kondo, M. Shoshin, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Pulsed Laser Induced Chirality Switching in Tellurium Thin Films. 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 2022 年 9 月 23 日, ハイブリッド開催 (東北大学川内キャンパス).

[35] T. Kawada, H. Matsumoto, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Spin-torque FMR induced by acoustic spin Hall effect. 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 2022 年 9 月 22 日, ハイブリッド開催 (東北大学川内キャンパス).

[36] T. Kawada, H. Matsumoto, M. Kawaguchi, K. Yakushiji, H. Kohno, M. Hayashi, Acoustic spin Hall effect in heavy metal/ferrimagnetic metal bilayers. 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 2022 年 9 月 22 日, ハイブリッド開催 (東北大学川内キャンパス).

[37] H. Matsumoto, K. Yakushiji, T. Kawada, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Magnetoacoustic resonance in RE-TM ferrimagnets. 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 2022 年 9 月 22 日, ハイブリッド開催 (東北大学川内キャンパス).

[38] Y. Wang, M. Kawaguchi, M. Hayashi, The anomalous Hall effect of MBE-grown van der Waals ferromagnet CrTe2. 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 2022 年 9 月 22 日, ハイブリッド開催 (東北大学川内キャンパス).

[39] M. Ishibashi, K. Yakushiji, M. Kawaguchi, A. Tsukamoto, S. Nakatsuji, M. Hayashi, Error rate of a ferrimagnetic spin shift resister. 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 2022 年 9 月 20 日, ハイブリッド開催 (東北大学川内キャンパス).

[40] 松本啓岐, 川田拓弥, 河口真志, 友田基信, 松田理, 林将光, 音響電流によるフォノニック結晶中のフォノン伝導測定. 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月 15 日, ハイブリッド開催 (東京工業大学大岡山キャンパス).

[41] 宮崎稜大, 河口真志, 林将光, ディラック半金属における円偏光誘起起電流. 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月 14 日, ハイブリッド開催 (東京工業大学大岡山キャンパス).

[42] 松本啓岐, 川田拓弥, 河口真志, 浅野元紀, 畑中大樹, 林将光, 人工反強磁性体における表面弾性波フォノンーマグノン結合. 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月 12 日, ハイブリッド開催 (東京工業大学大岡山キャンパス).

招待講演

[43] T. Kawada, H. Matsumoto, M. Kawaguchi, H. Kohno, M. Hayashi, The origin of the acoustic spin Hall effect. 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 2023 年 3 月 18 日, ハイブリッド開催 (上智大学四谷キャンパス).

[44] 林 将光, 非磁性金属における電流誘起磁気光学効果, 新世代研究所 (ATI) 2022 年度第 1 回スピントロニクス研究会, 2022 年 10 月 13 日, 御茶ノ水トライエッジカンファレンス.

[45] 林 将光, スピントロニクスとフォノニクス, 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 2022 年 9 月 21 日, 仙台.

[46] 川田 拓弥, 河口 真志, 林 将光, 薄膜ナノ構造における振動-スピン変換起電力, 日本磁気学会第 237 回研究会, 2022 年 7 月 20 日, オンライン.

(セミナー)

[47] 林 将光, Spintronics 3.0, -Perspectives on the physics of spins-, 東北大学物理学科コロキウム, 2022 年 5 月 19 日, オンライン.

4.6 小林研究室

1980 年代以降のナノテクノロジーの発展により、メゾスコピック系の物理学という分野が生まれてきた。この分野は、半導体や金属、超伝導体や強磁性体などから作られる極小の電子回路（メゾスコピック系）を用いて物質の様々な性質の制御を目指す。この分野の発展は様々な量子テクノロジーの可能性をもたらしてきた。その一つが量子力学の原理を用いた精密測定技術=量子計測（量子センシング）である。我々のねらいは量子計測を用いた精密物性物理学の構築にある。

我々は結晶に存在する色中心を量子センサとして用いる量子計測に注力している。代表例がダイヤモンドにおける NV 中心である（図 4.6.7)。NV 中心とはダイヤモンド結晶の中に安定して存在する格子欠陥の一種であり、となり同士の 2 個の炭素原子が窒素（Nitrogen）と原子空孔（Vacancy）のペアに置き換わった構造を持つ。ダイヤモンドには 100 種類以上の色中心が知られているが、NV 中心は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点でユニークである。この性質を利用すれば単一の NV 中心の電子スピン状態を光学的に読み出せることが 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。長年の研究により NV 中心内の電子スピンや原子核スピンの量子状態が室温においても極めて長く保持されることがわかっている。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。

我々の目的は、この手法をもとに単一量子スピン顕微鏡を開発し様々な物性計測に適用することである。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、この先には、非平衡輸送・スピングラス・トポロジカル端状態・永久電流など、重要で魅力的な数多くのテーマが横たわっている。

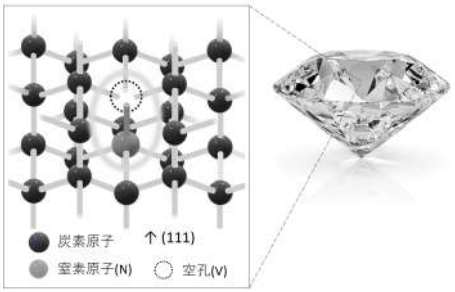

図 4.6.7: ダイヤモンド結晶中の NV 中心の模式図。

2022 年度は、小林研介教授、佐々木健人助教、大学院博士課程 1 年生の小河健介氏、塚本萌太氏、修士課程 2 年生の伊藤秀爾氏、西村俊亮氏、修士課程 1 年生の顧豪氏、山本航輝氏、および慶應義塾大学理工学研究科からの研究指導受託である中村祐貴氏（修士課程 2 年生）のメンバーで研究を行った。伊藤氏 [11]、西村氏 [12] が修士学位を取得した。

研究は (1) 色中心における量子制御と (2) 量子センサの物性計測応用 の二本立てで行っている。またこれまでに行ってきたメゾスコピック系における量子輸送についても成果を得ている。これらを順に紹介する。

4.6.1 色中心における量子制御

量子系の周期駆動：フロケエンジニアリング

外場によって周期的に駆動された量子系は、非平衡量子現象の新しい舞台として注目を集めている。その代表例がフロケ（Floquet）理論によって記述される時間結晶などのフロケ状態である。一方で、現実の系では熱化・ヒーティング・デコヒーレンスなどのため、理想的な状況を検証できるパラメータ領域には制限がある。そのため、二準位系（量子ビット）が強い駆動に対してどの程度まで理論通りに振る舞えるのか、何がそれを阻害するのかなど、完全には理解されていない未解決の問題がある。

我々は理想的な二準位系である NV 中心を用いてフロケ状態を作りだし、強い外場で周期駆動させたときの振る舞いを実験的に調べた。具体的には、NV 中心を大きな磁場と Carr-Purcell シーケンスによって周期的に駆動し、同期読み出し法によってその振る舞いを精密に検出し、さらに理論との定量的な比較を行った。その結果、211 次という非常に高い次数を持つベッセル関数で表されるダイナミクスまで観測できた。しかもその振る舞いが理想的な理論モデルと一致することも確認した。理想的な場合からの僅かなずれについても、パルス長さとエラーを考

慮した数値解析によって完全に理解できることが分かった。本結果はこれまで逐次読み出し法が適用されてきた交流磁場強度の範囲を 100 倍以上拡大するものであり、より広いダイナミックレンジかつ高精度な磁場センシングへの応用を可能とする [5, 12]。

スピン状態の読み出し最適化

NV 中心のスピン状態を高精度に決定する技術は、センシングの高感度化に直結するため盛んに研究されている。多くの研究では NV 中心の状態を発光強度から決定している。レーザーが照射されると、NV 中心は発光を伴いながら 500 nsec 程度で状態が初期化する。この限られた時間中に得られる光子数は 0.02 個程度と少ない。スピン状態の決定に十分な光子数を得るためには、何万回も測定を繰り返す必要がある。先行研究では、繰り返し回数を減少させるために、発光強度の時間分解データに重み付けを行う方法が提案されている。 NV 中心が完全に初期化した状態の発光データを参照用に取得し、重み付け係数として利用する。最近では、機械学習により重み付け係数を調整する手法も提案されている。

我々は参照データをスピン緩和モデルによって滑らかにフィッティングしたものを重み付け係数とする手法を開発し、先行研究との比較を行った。先行研究の手法で精度向上を得るためには 1 分程度の参照データの積算が必要であるのに対し、本手法では 3 秒という短い積算時間で 7%の読み出し精度の向上が得られることを見出した。さらに、ナノスケール核磁気共鳴などの長時間の測定で利用されている核スピンメモリの読み出しに対しても本手法を適用し、従来手法に比べて 11 %高い SN 比を得た [3, 24]。

幾何学的非断熱ダイナミクス

トンネル遷移は基本的な量子ダイナミクスである。1930 年代に示された Landau-Zener（LZ）モデルは、量子状態間のトンネル遷移確率と駆動場の掃引速度を結びつける厳密な物理モデルであり、様々な量子系において実証されている。1990 年には幾何学的効果を取り入れて拡張された twisted Landau-Zener（TLZ）モデルが示された [Berry, *Proc. R. Soc. Lond.* A **430,** 405 (1990)]。TLZ モデルでは、駆動場の幾何学的な掃引が示す Berry 曲率に従ってトンネル遷移確率が変調される。これは断熱的な効果である Berry 位相とは対照的に、非断熱の幾何学的量子ダイナミクスである。Berry のこのアイデアは長年見過ごされてきたが、最近の理論研究で再検討され [Takayoshi, Wu, and Oka, *SciPost Phys.* **11,** 075 (2021)]、よりシンプルなモデルが提案された。従来の LZ モデルとは異なり新しい TLZ モデルでは有限の掃引速度において 100%に近いトンネル遷移確率を得られる（完全トンネル）。しかし、この幾何学的非断熱ダイナミクスを実験的に検証した例はなかった。

我々は、NV 中心の電子スピンを二準位系として利用した実験を行い、駆動場を二次関数的に掃引する TLZ モデルにおける量子ダイナミクスが幅広いパラメータ範囲で堅牢であることを明らかにした。マイクロ波と回転座標系によってギャップ、掃引速度、曲率といった TLZ モデルのパラメータを制御し、駆動場の掃引方向に対する非相反性や完全トンネルを観測した。加えて、トンネルギャップがゼロの場合の TLZ モデルも検証し、ディラック電子系やワイル電子系においても適用できることを明らかにした。この幾何学的非断熱ダイナミクスは様々なエネルギースケールを持つ量子系に適用でき、物性物理、量子計算、核磁気共鳴などの量子制御の新しい基盤として利用できる [43, 51]。

窒化ホウ素量子センサ

2021 年以降、六方晶窒化ホウ素（hBN）中の点欠陥であるホウ素空孔欠陥（V_B^-）を利用した物性測定が行われ始めている。V_B^- はダイヤモンド中の NV 中心と同様に、室温において光学的に初期化・読み出しができるスピン 3 準位系をもつ。hBN は 2 次元ファンデルワールス物質であるため、ダイヤモンドよりも容易に測定対象に密着できる。そのため、V_B^- は NV 中心よりも測定対象からの磁場をさらに感度良く検出でき、高い空間分解能を得られる可能性がある。我々は V_B^- を物性測定に適用するためにその基本的な制御方法から研究を開始した。

V_B^- の ODMR スペクトルは 7 つの小さなディップ構造を持つ。これらの分裂は V_B^- の第 1 近傍の 3 つの窒素の核スピンの超微細相互作用によって生じる。NV 中心のスペクトルにはない特徴であり、幅広いスペクトルは磁場の測定感度を低下させる。我々はこの状況でも精密な交流磁場測定を可能とするプロトコルを開発した。超微細相互作用を取り入れた複数の周波数を含む複合パルスを印加することで、Rabi 振動のコントラストを 2.2 倍向上させた [22, 33, 40]。

4.6.2 量子センサの物性計測応用

機械学習による精密磁場計測

近年、NV 中心を含むナノダイヤモンドを膜状に散布することで磁場や温度 [6] のイメージングを行う手法が提案されている。その利点は、ナノダイヤモンドの調達が容易であることや、任意の表面形状を持つ対象に直接適用できることにある。しかし、ダイヤモンドの結晶方位がランダムになるため ODMR スペクトルが複雑になる。その状況を考慮した物理モデルもあるが推定される磁場は正確ではなかった。

我々は機械学習の一つであるガウス過程回帰を用いることで、物理モデルを用いない磁場推定法を開発した。スペクトルと磁場強度をそれぞれ入力データと出力変数に対応させ、精密測定したナノダイヤモンドのスペクトルの磁場依存性をトレーニングデータとして利用した。得られた関数を利用し、トレーニングデータとして使っていないスペクトルをテス

トデータとして磁場強度を推定し、ヘルムホルツコイルで生成した磁場強度（真の磁場強度）と比較した。物理モデルを用いた従来法で磁場を推定すると、ほとんどの条件において推定精度の範囲が真の磁場強度と整合しなかった。一方で、機械学習を用いる本手法では真の磁場強度と整合する結果が得られた。真の磁場強度と推定の中心値の差を比較すると、本手法では従来法と比較して最大 50 倍程度の正確性の向上が得られた。さらに、導線を流れる電流によって生じる磁場を本手法によって局所的にイメージングすることにより、高い空間分解能も実証した。本手法は、機械学習の利用によって、ナノダイヤモンドを用いた高空間分解能かつ正確な磁場イメージングに初めて成功したものである。ナノダイヤモンドはあらゆる形状の物質に付着させることが可能であるため、磁性体、電子デバイス、生体材料、鉱物などにも利用できる [1, 4, 28, 38, 46, 48, 50, 53]。

ロックインサーモグラフィー

NV 中心は温度測定に用いることもできる。温度変化によって結晶格子が伸縮するため、NV 中心内の準位も変化し、その様子を ODMR スペクトルとして検出できるためである。我々は NV 中心を用いて熱伝導を可視化する研究を行った。具体的には、温度のロックインイメージング測定手法（ロックインサーモグラフィー）を開発し、ガラスおよびテフロンに塗布したナノダイヤモンド膜を測定対象とした原理実証実験を行った。試料の片側から交流的に熱を加え、試料中を熱が伝播する様子を NV 中心を用いてマイクロメートル・サブケルビンの精度で画像として検出した。ロックイン検出の原理を用いて、振幅と位相の情報から測定対象の熱拡散率を定量的に決定し、物質による熱拡散率の違いを測定できることを示した [6] 。さらに精度向上を目指して機械学習と組み合わせた研究も行った [2, 18, 34]。通常の温度計を用いた測定手法に比べ、極小のナノダイヤモンドを用いて光学的に非接触で測定する本手法は非侵襲的であり、熱物性測定に適している。

超伝導体における量子渦の観測

超伝導体に侵入する磁束は量子化する。この量子渦は様々な手法で可視化されてきた。我々は、ダイヤモンド 結晶中で [111] 方向に完全配向した NV 中心を持つ高感度な薄膜センサー層を用いて、典型的な高温超伝導体である YBCO 薄膜中の量子渦を調べた。その結果、量子渦周囲の磁束密度分布を広視野かつ定量的に可視化することに成功した。測定された量子渦からの漏れ磁場は統計誤差 12%で量子化していることを示しており、得られた磁場分布が理論モデルとよく整合することを確認した。本手法は極限環境にも親和性が高いため、様々な超伝導体の量子渦の観測に利用できる。さらに、揺らぎなどこれまで測定が難しかった量子渦のダイナミクスの情報にアクセスできる可能性を持つ [12, 23, 44]。

磁気光学カー効果との同時測定手法の開発

我々は磁気構造の観測手段として一般的な磁気光学カー効果（MOKE）を、NV 中心による磁場イメージングを組み合わせて同時に測定する手法を開発した。両者を組み合わせることで磁化の分布を定量的に決定できる。ただし磁化分布を正しく導出するためには、同じ測定系で同じ観測視野を測定することが必要である。我々は量子スピン顕微鏡に MOKE を組み込み局所的な磁化分布の同時計測を行った。光強度と偏光の 2 つの指標を同時に測定するための技術的要件を明らかにし、磁壁のクリープ現象の実時間測定に成功した [20, 41, 42]。

マイクロ波イメージング

幅広い分野において、局所的なマイクロ波強度のイメージング技術が必要とされている。微小なマイクロ波デバイスの評価や、スピン波など磁性体におけるマイクロ波領域でのダイナミクスの可視化がその例である。しかし、定量的かつ広視野を同時に実現可能な測定手法はほぼ皆無である。NV 中心を用いると Rabi 振動を用いてマイクロ波強度を定量的に測定できる。また、広視野顕微鏡を組み合わせる技術を利用すれば、異なる位置での同時刻のマイクロ波強度をイメージングできる。我々は NV 中心を用いたマイクロ波イメージング測定系を開発し、コプレーナ導波路を伝送するマイクロ波の実空間分布のイメージングに成功した [21, 36]。

励起光強度依存性

最近、低磁場における単一ナノダイヤモンド中の NV 中心の ODMR スペクトルが励起光強度依存性を持つために、温度測定の確度が低下することが報告された。この現象は微弱な磁場測定においても確度を低下させる。特に、CMOS カメラと NV 中心アンサンブルを利用した磁場や温度の広視野イメージングにおいては、視野内の励起光密度の不均一さが磁場や温度のアーティファクトを引き起こす可能性があるため、重要な課題となる。我々は、複数の NV 中心試料を用いてスペクトルの励起光密度依存性を調査した。まず、ナノダイヤモンドにおける NV 中心のスペクトルの励起光密度依存性を調査し、先行研究の結果を再現した。さらに、この振る舞いが指数関数で表され励起光密度が大きくなると飽和することを明らかにした。次に、単結晶ダイヤモンドでも同様の傾向を確認し、この現象が NV 中心の本質的な性質に由来すると結論した。本現象のメカニズムとしては、何らかの局所的な歪み（例えば光励起によって動的に誘起される NV 中心近傍の電場の不均一性）が考えられる [11, 35]。

NV 中心イメージングにおける光学収差

NV 中心を用いるイメージングの際には、透明なダイヤモンド越しに顕微測定を行う構成が用いられる。しかし、ダイヤモンドの高い屈折率（∼ 2.45）によって光学収差が大きくなり、信号強度の減少および分解能の低下が生じる。我々は、イメージング系における光学収差が測定結果にどの程度影響を与えるかを調査した。まず単一 NV 中心の光学形状を測定し、ダイヤモンド表面から深くなるほど点像分布関数（PSF）が広がることと、光量が最大となる位置での発光強度が低下することを確認した。その後、コマ収差や非点収差を含む 5 次までの収差関数を用いて PSF を計算し、収差の大きさを見積もった。回折限界まで分解能を維持して測定を行うための許容収差量には複数の指標があるが、ストレール比を用いたレイリーの 1/4 波長則は有用性が広く認知された基準である。これらを踏まえて、許容収差内に収まる光路差を求めた。光路差を小さくするためには、薄いダイヤモンドが効果的である。1/4 波長則を満足するダイヤモンドの厚みを計算することで、回折限界を達成する条件を求めた [12, 37]。

4.6.3 メゾスコピック系における量子輸送

磁気トンネル接合における非線形伝導

磁気トンネル接合（MTJ）とは、2 層の強磁性体が絶縁体を挟んだ構造を持つ素子である。2 つの強磁性体の相対的な磁化方向によって電気抵抗が大きく変化するという、顕著なスピン依存伝導を示す。MTJ に関しては、電流 I と電圧 V の関係がオームの法則からずれるという非線形性があることが知られている。このような非線形性は磁場センサとしての応用の際に障害となるため、そのメカニズムの解明は重要である。例えば、我々はマグノンが非線形性の原因となっている可能性について実験的に議論した [Iwakiri *et al. Phys. Rev.* B **103,** 245427 (2021)]。今回、我々は磁化容易軸が垂直で様々な接合サイズを持つ MTJ を用いて、低バイアス領域での非線形伝導を調べた。電流電圧特性は、$I = G_1V + G_2V^2 + G_3V^3 + \cdots$ と表される。我々は、G_2 が接合サイズの減少とともに増加すること、G_3 は G_1 と負の相関を持つこと、その係数 $\Delta G_3/\Delta G_1$ は G_2 と正の相関を持つこと、を見出した。非線形伝導にこのような系統的な関係が存在することは、背後に普遍的なメカニズムがあることを示唆する。これらの結果は、電子が接合をトンネルする際のスピン反転や、デバイス端での材料特性の変調を考慮することで説明できた [7]。

量子ドットにおける近藤温度の決定

我々は 10 年以上にわたって近藤効果によって形成された量子液体の性質を平衡状態から非平衡状態まで精密に調査してきた [25, 26]。近藤効果にとって最も重要なエネルギースケールは近藤温度である。我々は、近藤状態にある量子ドットの電気伝導度の磁場依存性に関して普遍的なスケーリング特性があることを理論的・実験的に見出した。SU(2) アンダーソン不純物モデルに対して数値繰り込み群アプローチと Bethe ansatz 厳密解を用いた定式化を行い、線形領域にある電気伝導度の磁場依存性の実験・数値データセットから局所フェルミ液体理論で定義される近藤温度を評価する方法を開発し、実験結果への適用にも成功した [17, 39]。

Bi/Ni 超伝導リングにおける Little-Parks 振動

Bi/Ni は、MgO 基板上に数十ナノメートルの厚さの Bi と数ナノメートルの厚さの Ni を分子線エピタキシー法で積層した二層膜である。Bi は典型的な半金属であるが、Bi/Ni 二層膜は金属的であり、4 K 以下で超伝導を示す。さらに、Ni 層は超伝導状態でも強磁性を保つ。このように Bi/Ni 二層膜では超伝導と強磁性が共存することから、非従来型超伝導体である可能性がある。我々は Bi/Ni 二層膜からメゾスコピックリング素子を作製し Little-Parks（LP）振動を調べた。従来型超伝導体と非従来型超伝導体では、磁束量子の半整数分だけ LP 振動の位相がシフトすることが知られている。我々は、Bi/Ni デバイスの LP 振動の位相を精密に見積もるために、従来型の Nb リング素子の LP 振動を同時に計測し、Bi/Ni 二層膜の超伝導オーダーパラメーターについて議論した [13, 16]。

＜受賞＞

[1] 塚本萌太、日本物理学会 2022 年秋季大会学生優秀発表賞（領域 3）「機械学習によるナノダイヤモンド量子センサの磁場イメージング」（2022 年 10 月）。

[2] 山本航輝、Poster Award at 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS2022), “Nanodiamond quantum thermometer assisted with machine learning”（2022 年 11 月）。

＜報文＞

(原著論文)

[3] Y. Nakamura, H. Watanabe, H. Sumiya, K. M. Itoh, K. Sasaki, J. Ishi-Hayase, and K. Kobayashi, “Optimization of optical spin readout of the nitrogen-vacancy center in diamond based on spin relaxation model”, *AIP Advances* **12** (5), 055215 (2022).

[4] M. Tsukamoto, S. Ito, K. Ogawa, Y. Ashida, K. Sasaki, and K. Kobayashi, “Optimization of optical spin readout of the nitrogen-vacancy center in diamond based on spin relaxation model”, *Scientific Reports* **12** (1), 13942 (2022).

[5] S. Nishimura, K. M. Itoh, J. Ishi-Hayase, K. Sasaki, and K. Kobayashi, “Floquet Engineering Using Pulse Driving in a Diamond Two-Level System Under Large-Amplitude Modulation”, *Physical Review Applied* **18** (6), 064023 (2022).

[6] K. Ogawa, M. Tsukamoto, K. Sasaki, and K. Kobayashi, "Floquet Engineering Using Pulse Driving in a Diamond Two-Level System Under Large-Amplitude Modulation", *Journal of the Physical Society of Japan* **92** (1), 014002 (2023).

[7] M. Shinozaki, J. Igarashi, S. Iwakiri, T. Kitada, K. Hayakawa, B. Jinnai, T. Otsuka, S. Fukami, K. Kobayashi, and H. Ohno, "Nonlinear conductance in nanoscale CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions with perpendicular easy axis", *Physical Review* B **107** (9), 094436 (2023).

(国内雑誌)

[8] 小林研介：「物理学専攻の佐々木健人助教が第 38 回井上研究奨励賞を受賞」、東京大学理学系研究科・理学部ニュース **53** (6), 13 (2022).

[9] 小林研介、村上修一、木村昭夫：「令和 3 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 **77** (5), 324 (2022).

[10] 小林研介：「化研の思い出」、京都大学化学研究所広報誌「黄檗」**57,** 13 (2022).

(学位論文)

[11] 伊藤秀爾：「ダイヤモンド窒素空孔中心における磁気共鳴スペクトルの励起光密度依存性」、修士論文、2023 年 3 月。

[12] 西村俊亮：「ダイヤモンド量子センサを用いた磁性測定技術の開発」、修士論文、2023 年 3 月。

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[13] M. Tokuda, M. Nakao, M. Watanabe, R. Nakamura, M. Maeda, S. Lee, D. Yue, K. Aoyama, T. Mizushima, X.-F. Jin, K. Kobayashi, and Y. Niimi, "Observation of Little-Parks oscillations in Bi/Ni bilayer film", 24th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS2022) (Okinawa, Japan, July 10–15, 2022) [poster].

[14] R. Okaniwa, Y. Matsuzaki, T. Yamaguchi, H. Watanabe, N. Mizuochi, N. Tokuda, Y. Nakano, K. Kobayashi, K. Sasaki, and J. Ishi-Hayase, "Investigation of Electronic Spin Triple-Resonance of Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond for Sensing", CLEO-PR 2022 (Hokkaido, Japan & Online, July 31–August 6, 2022) [oral].

[15] T. Mikawa, K. J. Hallbäck, Y. Matsuzaki, Y. Nakano, N. Tokuda, K. Sasaki, K. Kobayashi, and J. Ishi-Hayase, "Imaging of Magnitude and Phase of AC Magnetic Field Using Continuous-Wave Scheme with Diamond", CLEO-PR 2022 (Hokkaido, Japan & Online, July 31–August 6, 2022) [oral].

[16] M. Tokuda, M. Nakao, M. Watanabe, R. Nakamura, M. Maeda, S. Lee, D. Yue, K. Aoyama, T. Mizushima, X.-F. Jin, K. Kobayashi, and Y. Niimi, "Observation of Little-Parks oscillations in Bi/Ni bilayer film", 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (Sapporo, Japan & Online, August 18–24, 2022) [poster] [**Best Poster Award**].

[17] R. Sakano, T. Hata, K. Motoyama, Y. Teratani, T. Arakawa, M. Ferrier, R. Deblock, M. Eto, K. Kobayashi, and A. Oguri, "Universal Scaling property of Linear Conductance through a Kondo Dot in Magnetic Field and its Application", 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (Sapporo, Japan & Online, August 18–24, 2022) [poster].

[18] K. Yamamoto, K. Ogawa, M. Tsukamoto, K. Sasaki, and K. Kobayashi, "Nanodiamond quantum thermometer assisted with machine learning", 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS2022) (The University of Tokyo, Japan, November 8–11, 2022) [poster][**Poster Award**].

[19] R. Okaniwa, Y. Matsuzaki, T. Yamaguchi, H. Watanabe, N. Mizuochi, N. Tokuda, Y. Nakano, K. Kobayashi, K. Sasaki, and J. Ishi-Hayase, "Frequency-tunable AC Magnetometry by Using Electronic Spin Triple-Resonance of Nitrogen-Vacancy Center in Diamond", MRS Fall 2022 (Boston, USA & Online, November 27–December 1, 2022) [oral].

[20] M. Tsukamoto, K. Yamamoto, M. Kawaguchi, M. Hayashi, K. Sasaki, and K. Kobayashi, "Imaging of domain wall motion using quantum magnetic sensor", FoPM Symposium (The University of Tokyo, Japan, February 6–8, 2023) [oral].

[21] K. Ogawa, M. Tsukamoto, K. Sasaki, and K. Kobayashi, "Microwave imaging using diamond quantum sensor", FoPM Symposium (The University of Tokyo, Japan, February 6–8, 2023) [oral].

[22] H. Gu, Y. Nakamura, K. Sasaki, and K. Kensuke, "Quantum sensor in two-dimensional van der Waals material", FoPM Symposium (The University of Tokyo, Japan, February 6–8, 2023) [poster].

[23] S. Nishimura, T. Kobayashi, D. Sasaki, T. Tsuji, T. Iwasaki, M. Hatano, K. Sasaki, and K. Kobayashi, "Quantitative magnetic imaging of superconducting quantum vortex using solid-state quantum spin sensor", FoPM Symposium (The University of Tokyo, Japan, February 6–8, 2023) [poster].

[24] Y. Nakamura, H. Watanabe, K. M. Itoh, K. Sasaki, J. I. Hayase and K. Kobayashi, "Optimization of optical spin readout of the nitrogen-vacancy center in diamond based on spin relaxation model", APS March Meeting 2023 (Las Vegas, USA, March 5–10, 2023) [oral].

招待講演

[25] K. Kobayashi, “Three-body correlation in nonequilibrium quantum liquid”, 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (Sapporo, Japan & Online, August 18–24, 2022).

[26] K. Kobayashi, “Non-equilibrium behavior of correlated quantum liquid”, the 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) (Seoul, South Korea & Online, August 21–26, 2022).

[27] K. Kobayashi, “Mesoscopic physics and quantum sensing”, the Max Planck–UBC–UTokyo Centre for Quantum Materials Annual Meeting (Vancouver, Canada, September 19–21, 2022).

[28] K. Sasaki, “Accurate magnetic field imaging with nanodiamond quantum sensors enhanced by machine learning”, 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS2022) (The University of Tokyo, Japan, November 8–11, 2022).

(国内会議)

一般講演

[29] 小林研介：「D01 説明」、新学術領域研究「量子液晶の物性科学」第 2 期公募研究キックオフミーティング（東京大学 & オンライン、2022 年 6 月 17–18 日）。

[30] 岡庭龍聖、松崎雄一郎、山口達万、渡邊幸志、水落憲和、中野裕太、徳田規夫、佐々木健人、小林研介、早瀬潤子：「ダイヤモンド中 NV 中心の電子スピン三重共鳴現象を用いた周波数可変な交流磁場センサ」、第 83 回応用物理学会秋季学術講演会（東北大学 & オンライン、2022 年 9 月 20–23 日）。

[31] 小林研介：“Physical properties measurement using diamond quantum sensors”, 令和 4 年度 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会（名古屋大学 & オンライン、2022 年 12 月 8–10 日）。

【日本物理学会 2022 年秋季大会】
（東京工業大学、東京、2022 年 9 月 12–15 日）

[32] 佐々木健人、伊藤公平、阿部英介：「高次スピンダイナミックスとエンタングルメントによる動的核スピン偏極のコヒーレントな抑制」。

[33] 顧豪、中村祐貴、佐々木健人、小林研介：「六方晶窒化ホウ素の欠陥を利用した磁場センシング」。

[34] 山本航輝、小河健介、塚本萌太、佐々木健人、小林研介：「機械学習を用いたナノダイヤモンド量子温度センサ」。

[35] 伊藤秀爾、塚本萌太、小河健介、寺地徳之、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド量子センサの励起光強度依存性」。

[36] 小河健介、西村俊亮、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド量子センサを用いたマイクロ波イメージング測定」。

[37] 西村俊亮、塚本萌太、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド NV 中心を用いたセンシングにおける光学収差の影響」。

[38] 塚本萌太、伊藤秀爾、小河健介、蘆田祐人、佐々木健人、小林研介：「機械学習によるナノダイヤモンド量子センサの磁場イメージング」[学生優秀発表賞]。

[39] 阪野塁、秦徳郎、本山海司、寺谷義道、堤和彦、荒川智紀、Meydi Ferrier、Richard Deblock、江藤幹雄、小林研介、小栗章：「磁気コンダクタンスを用いた近藤温度の見積もりの実験データへの適用」。

【日本物理学会 2023 年春季大会】
（オンライン、2023 年 3 月 22–25 日）

[40] 顧豪、中村祐貴、佐々木健人、小林研介：「六方晶窒化ホウ素（hBN）量子センサの複合パルス制御による感度向上」。

[41] 塚本萌太、山本航輝、河口真志、林将光、佐々木健人、小林研介：「色中心磁場センサと磁気光学カー効果の同時イメージング技術」。

[42] 山本航輝、塚本萌太、河口真志、林将光、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド量子センサによる磁壁の観測」。

[43] 佐々木健人、中村祐貴、寺地徳之、岡隆史、小林研介：「量子状態の幾何学的非断熱制御の実証」。

[44] 西村俊亮、小林拓、佐々木大地、辻趙行、岩﨑孝之、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超伝導体薄膜の磁束量子の定量的観測」。

招待講演

[45] 小林研介：「量子を見る、量子で見る」、さきがけ「トポロジー」領域 第 7 回領域会議（東京、2022 年 8 月 29 日）。

[46] 小林研介：「量子テクノロジーと機械学習」、東京大学 AI センター連続シンポジウム 第 11 回「共進化する物理学と人工知能の現在」（オンライン、2022 年 10 月 3 日）。

[47] 小林研介：「量子液体と量子スピン顕微鏡—量子を見る、量子で見る—」、物理談話会（千葉大学、2022 年 11 月 29 日）。

[48] 佐々木健人：「ダイヤモンド量子顕微鏡の開発と機械学習による高精度化」、固体量子センサ研究会 第 3 回研究会（オンライン、2023 年 1 月 12 日）。

[49] 小林研介：「ダイヤモンド量子センサによる物性研究」、2023 年第 70 回応用物理学会春季学術講演会（上智大学、東京 & オンライン、2023 年 3 月 15–18 日）。

(セミナー)

[50] 佐々木健人：「色中心量子センサによる磁場・温度の精密計測」、第 1 回創発研究交流会（東京大学大学院理学系研究科、2022 年 7 月 15 日）。

[51] 佐々木健人：「ダイヤモンド中窒素空孔中心を用いた量子センシング」、理論インフォーマルセミナー（東京大学物性研究所、2022 年 9 月 29 日）。

(集中講義)

[52] 小林研介、千葉大学理学部物理学科「メゾスコピック物理入門」（千葉大学、2022 年 11 月）。

(プレスリリース)

[53] 「ナノダイヤモンド磁場イメージング—量子計測 × 機械学習の新展開」(東京大学、2022 年 9 月)。

(アウトリーチ)

[54] 小林研介:「ナノテクノロジーと量子力学」、令和 4 年度「東大の研究室をのぞいてみよう！ ～多様な学生を東大に～」プログラム(オンライン、2023 年 3 月 28 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 トポロジカル磁性体における新規量子現象の探索と巨大応答

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、巨大な磁気熱電効果 [Nat. Phys. ('17,'18), Nature ('20), Nat. Commun. ('21), Sci. Adv. ('22)] や、反強磁性スピントロニクス [Nature ('19, '20)] など省エネ・脱炭素を目指した熱電応用や次世代の高速通信・メモリデバイスなどへの応用研究にも繋がっている。

反強磁性体 Mn_3Sn を用いたトンネル磁気抵抗効果の観測

トンネル磁気抵抗 (TMR) 効果は、磁性金属で絶縁体を挟んだ磁気トンネル接合を流れるトンネル電流が、磁性金属層の持つ磁気モーメントの向きによって変化する現象であり、磁気抵抗メモリなどに応用されている。TMR 効果は、強磁性金属層/絶縁体層/強磁性金属層で構成される接合系で主に観測されており、反強磁性体は磁化が補償しているため磁性金属層として用いることは困難であると考えられてきた。本研究では、異常 Hall 効果など強磁性体と類似の応答を示す反強磁性体である Mn_3Sn に着目し、$Mn_3Sn/MgO/Mn_3Sn$ 磁気トンネル接合系を作製した。磁気抵抗効果測定の結果、Mn_3Sn を用いた接合系において室温で TMR 効果を観測することに成功した [4]。反強磁性体は強磁性体よりも高速な THz 帯での応答が可能であるため、本研究は、反強磁性 TMR 効果の学理開拓のみならず、今後、高速動作メモリの開発などの産業応用へも繋がると期待される。

反強磁性秩序がつくる垂直二値状態の電気的スイッチング

THz 帯の超高速応答が可能な情報担体として、巨大な異常ホール効果を示すワイル反強磁性体 Mn_3Sn が注目されており、反強磁性秩序の電気的な制御に関する研究が精力的に進められている。本研究では、高品質な Mn_3Sn エピタキシャル薄膜を作製し、エピタキシャル歪みにより膜面垂直方向にのみ自由度を持つ反強磁性秩序 (垂直 2 値状態) を実現した。この Mn_3Sn 層と重金属層との多層膜からなる反転素子を作製し、書き込み電流によるホール電圧の変化を室温で測定した結果、14 MA/cm^2 程度の書き込み電流によって、素子が出力する信号を 100 % 反転可能であることを確認した [2]。数値計算の結果、スピンホール効果により生じたスピン流のスピン偏極方向に対して、カイラル反強磁性秩序の回転面 (磁気容易面) を垂直に配置することが、Mn_3Sn における高

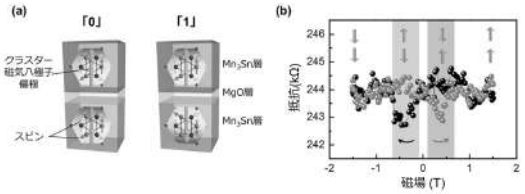

図 4.7.8: 図　(a) 0 と 1 の情報に対応するトンネル磁気抵抗効果の模式図。反強磁性体 Mn_3Sn からなる MTJ 素子のクラスター磁気八極子偏極の平行と反平行状態を示す。(b) 室温において測定した Mn_3Sn/トンネル障壁層（MgO）/Mn_3Sn の MTJ 素子における磁気抵抗効果。図中の矢印は 2 つの Mn_3Sn 層におけるクラスター磁気八極子偏極の方向を示している。

効率な情報記憶の鍵であることを明らかにした。本結果は、省電力・信頼性の高い記録技術として磁気メモリで用いられる「垂直磁気記録」が反強磁性体で可能であることを実証した初めての例である。

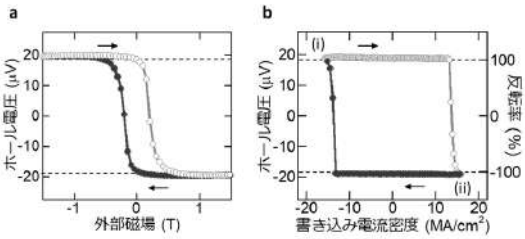

図 4.7.9: 図　(a) W/Mn_3Sn 素子におけるホール電圧の磁場依存性。外部磁場は膜面直方向。(b) W/Mn_3Sn 素子におけるホール電圧の書き込み電流依存性。右側の縦軸が示す様に 100%の反転率を示す。この実験では 0.1 T のバイアス磁場を印加している。

ピエゾ磁気効果を用いたカイラル反強磁性秩序の制御

従来の常識とは異なり、巨大な異常ホール効果等の時間反転操作に対して奇関数の応答を示すワイル反強磁性体 Mn_3Sn では、秩序変数であるカイラル反強磁性秩序の外場による応答に基礎・応用両面から注目が集まっている。外場としては磁場や電場（電流）が一般的であるが、本研究では歪みに着目した。純良な Mn_3Sn 単結晶試料に引張方向と圧縮方向へ一軸性の歪みを高精度、かつ、幅広い範囲で加えることが可能な圧電歪みステージを開発し、歪みによる異常ホール信号の変化を測定した。その結果、Mn3Sn が 0.1%程度の非常に小さな歪みでピエゾ磁気効果を示すことを発見した [3]。ホール信号は大きさのみならず符号まで反転することから、Mn_3Sn では他の磁性体と比べて非常に高効率に歪みにより信号を制御できることが明らかになった。

トポロジカル磁性体の異常ホール効果の超高速ダイナミクス

磁性体に電場を印可すると、それと平行方向だけでなく垂直方向にも電流が生じることが知られている。これは異常ホール効果と呼ばれ、近年では物質の持つトポロジカルな性質とも深く関わりがあることが明らかにされている。一方、不純物由来の散乱による異常ホール効果も存在し、異常ホール効果が観測されるたびにその微視的機構がどちらに起因するものかが必ず議論の対象となっている。本研究ではトポロジカル磁性体 Mn_3Sn にフェムト秒光パルスを照射しそれによって生じる異常ホール効果の変化を、テラヘルツ波パルスの偏光回転を通して調べる実験を行った。その結果、縦伝導は 3%しか変化しないにも関わらず、ホール伝導は 0.5 ps ほどの時間で 40%も変化することが明らかとなった [5]。この実験結果は、トポロジカルな性質が起源だとするとよく説明できる一方、不純物散乱由来だとすると全く説明できない。すなわち、本研究は光パルスを当てた直後の異常ホール効果を調べることで、その微視的機構を解明する新手法を開拓したものである。また、異常ホール効果は磁性体の磁気情報を電流によって読み出す手段としても重要であるが、本研究成果は磁気記録媒体への情報書き込みおよび読み出しの速度限界を決める機構を明らかにするものとしても注目される。

ワイル反強磁性体 Mn_3Sn の微小構造の作成及び熱安定性の確認

ワイル反強磁性体の Mn_3Sn は非常に小さな磁化を持つにもかかわらず異常ホール効果 (AHE) や異常ネルンスト効果などの大きな応答を示すことから、次世代メモリデバイスの材料として注目されている。Mn_3Sn のエレクトロニクスへの統合に向けた重要なステップの一つとして、微小構造の機能性を確立することが挙げられる。本研究では、高温に保たれた Si/SiO_2 基板上に Mn_3Sn を堆積することで、直径 100〜数 100 ナノメートルの Mn_3Sn の孤立した微小構造の作製に成功した [1] 。これらの構造を Al の導電層でつなぎ輸送特性を測定した結果、時間反転対称性の破れた磁気構造に起因する AHE を観測した。この輸送測定より常温での磁気構造の安定性が確認され、Mn_3Sn を用いた微小デバイスの進展が期待される。

4.7.2 多体系における量子エンタングルメント状態

個々の量子状態の直積に分解できない状態は量子もつれ（Quantum entanglement）と呼ばれ、非局所性を始めとする量子力学特有の現象をもたらす。量子コンピュータにおいてはいかにそのような量子ビットを増やすかが一つの課題であるが、固体中ではアボガドロ数個のマクロな数の粒子が量子もつれ状態になる事がある。そのスピン系での例が量子スピン液体 (Quantum spin liquid) であり、電子系での例が異常金属 (Strange Metal) である。

スピンと軌道の量子もつれの巨視的効果の発見と制御

３次元系の磁性体は通常低温で長距離秩序を形成するが、量子もつれを巨視的に観測するためにはそのような秩序を全て抑える必要がある。特にスピンと軌道の両方が揺らいだ状態を作り出すには高い試料の純良性と精密な測定が要求される。本研究では $Pr_2Zr_2O_7$ の純良化に成功し、高精度な超音波、磁歪、熱膨張測定を数十 mK の極低温度まで実施した [17]。その結果、スピンと軌道の量子もつれによるスピン軌道ダイナミクスが量子スピンアイス状態を安定化させていることを発見した。この量子スピンアイス状態は、高エネルギー物理分野で探索が続いている電気モノポール、磁気モノポールと等価な準粒子が固体の中で安定化しているトポロジカルに新しい状態であり、量子もつれの実験的制御を調べるうえで恰好の舞台となる。

異常金属における超低速臨界電子電荷ゆらぎの観測

β-$YbAlB_4$ は常圧ゼロ磁場で外場によるチューニングのいらない異常金属状態と重い電子超伝導を示すことで知られており、その背景には Yb の価数のゆらぎが重要であると考えられてきた。本研究では電子と原子核の相互作用を測定するメスバウアー吸収分光法を用いて電子電荷の揺らぎ（ダイナミックス）を直接調べることに成功した [21]。その結果、異常金属状態において超低速で Yb の価数が揺らいでいることが新たにわかった。この超低速臨界的電子電荷揺らぎの観測は、異常金属状態と超伝導発現の起源に新たな知見を提供する。

＜受賞＞

[1] 酒井明人、令和４年度文部科学大臣表彰 若手科学者賞

[2] 石橋未央、第 39 回井上研究奨励賞

[3] 肥後友也、 令和４年度丸文研究奨励賞

＜報文＞

(原著論文)

[4] L. Smejkal, A.H. MacDonald, J. Sinova, S. Nakatsuji, T. Jungwirth “Anomalous Hall antiferromagnets” Nat. Rev. Materials **7**, 482–496 (2022).

[5] Y. Sakaguchi, S. Ikeda, M. Mizumaki, K. Kuga, S. Suzuki, K. Sone, S. Nakatsuji, and H. Kobayashi “Pressure-induced changes of valence fluctuation in β-$YbAlB_4$ probed by x-ray absorption spectroscopy” Phys. Rev. B **105**, 155129 (2022).

[6] M. Grbic, E. O’Farrell, Y. Matsumoto, K. Kuga, M. Brando, R. Kuchler, A. Nevidomskyy, M. Yoshida, T. Sakakibara, Y. Kono, Y. Shimura, M. Sutherland, M. Takigawa, and S. Nakatsuji “Anisotropy-driven quantum criticality in an intermediate valence system” Nat. Comm. **13**, 2141 (2022).

[7] I. Kapon, C.W. Rischau, B. Michon, K. Wang, B. Xu, Q. Yang, S. Nakatsuji, D. Marel “Magnetic field tuning of the valley population in the Weyl phase of $Nd_2Ir_2O_7$” Phys. Rev. Reserch **4**, 023056 (2022).

[8] F. Theuss, S. Ghosh, T. Chen, O. Tchernyshyov, S. Nakatsuji, B. J. Ramshaw “Strong Magneto-Elastic Coupling in Mn_3X (X = Ge, Sn)” Phys. Rev. B **105**, 174430 (2022).

[9] T. Matsuo, T. Higo, D. Nishio-Hamane, S. Nakatsuji “Anomalous Hall effect in nanoscale structures of the antiferromagnetic Weyl semimetal Mn3Sn at room temperature” Appl. Phys. Lett. **121**, 013103 (2022).

[10] T. Higo, K. Kondou, T. Nomoto, M. Shiga, S. Sakamoto, X. Chen, D. Nishio-Hamane, R. Arita, Y. Otani, S. Miwa, S. Nakatsuji “Perpendicular full switching of chiral antiferromagnetic order by current” Nature **607**, 474–479 (2022).

[11] T.-H. Yang, *et al.*, “Bond ordering and molecular spin-orbital fluctuations in the cluster Mott insulator $GaTa_4Se_8$” Phys. Rev. Research **4**, 033123 (2022).

[12] M. Ikhlas, S. Dasgupta, F. Theuss, T. Higo, Shunichiro Kittaka, B. J. Ramshaw, O. Tchernyshyov, C. W. Hicks, S. Nakatsuji “Piezomagnetic switching of the anomalous Hall effect in an antiferromagnet at room temperature” Nat. Phys. **18**, 1086–1093 (2022).

[13] Satoru Nakatsuji “Topological magnets—their basic science and potential applications” AAPPS Bulletin **32**, 25 (2022).

[14] H. Isshiki, *et al.*, “Determination of spin Hall angle in the Weyl ferromagnet Co_2MnGa by taking into account the thermoelectric contributions” Phys. Rev. Materials **6**, 084411 (2022).

[15] Z. Feng, S. Minami, S. Akamatsu, A. Sakai, T. Chen, D. Nishio-Hamane, S. Nakatsuji “Giant and Robust Anomalous Nernst Effect in a Polycrystalline Topological Ferromagnet at Room Temperature” Adv.Func. Mater. **32**, 2206519 (2022).

[16] E. Ahmed *et al.*, "Superconducting properties of the A15 structure compound V_3Ge" Physica C: Superconductivity and its applications **602**, 1354140 (2022).

[17] N. Tang *et al.*, "Spin–orbital liquid state and liquid–gas metamagnetic transition on a pyrochlore lattice" Nat. Phys. **19**, 92 (2023).

[18] T. Higo, S. Nakatsuji "Thin film properties of the non-collinear Weyl antiferromagnet Mn_3Sn" J. Mag. Mag. Mater. **564**, 170176 (2022).

[19] X. Chen *et al.*,"Octupole-driven magnetoresistance in an antiferromagnetic tunnel junction" Nature **613**, 490-495 (2023).

[20] M. Ishibashi *et al.*,"Reversal of current-induced domain wall motion in TbFeCo ferrimagnetic thin films across the magnetization compensation point" J. J. Appl. Phys. **62**, 013001 (2023).

[21] H. Kobayashi *et al.*, "Observation of a critical charge mode in a strange metal" Science **379**, 908-912 (2023).

[22] N. Budai *et al.*, "High-resolution magnetic imaging by mapping the locally induced anomalous Nernst effect using atomic force microscopy" Appl. Phys. Lett. **122**, 102401 (2023).

[23] T. Matsuda *et al.*, "Ultrafast Dynamics of Intrinsic Anomalous Hall Effect in the Topological Antiferromagnet Mn_3Sn" Phys. Rev. Lett. **130**, 126302 (2023).

[24] M. Wu, K. Kondou, T. Chen, S. Nakatsuji, and Y. Otani" "Temperature-induced anomalous magnetotransport in the Weyl semimetal Mn3Ge AIP Advances **13**, 045102 (2023).

(学位論文)

[25] 朝倉　海寛 "カイラル反強磁性薄膜における層間交換結合に関する研究"（東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・修士論文）(2023).

[26] 黒沢　駿一郎 "ワイル反強磁性体 Mn_3Sn における磁気輸送特性"（東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・修士論文）(2023).

[27] 磯前 貴央 "四極子近藤格子系 $PrTi_2Al_{20}$ の磁場中輸送現象の実験的研究"（東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻・博士論文）(2023).

[28] 中村 紘人 "コバルト系金属間化合物におけるトポロジカル強磁性状態による横熱電効果"（東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻・博士論文）(2023).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[29] A. Sakai, "Heavy fermion multigap superconductivity in the ferroquadrupole ordered state of $PrTi_2A1_{20}$" The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) 2022/8/23

[30] H. Peng, "Large magneto-optical Kerr effect in polycrystalline thin films of the non-collinear antiferromagnet Mn3Sn" The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) 2022/8/23

[31] T. Matsuo, "Preparation and evaluation of polycrystalline Mn_3Sn/Ta bilayers" The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) 2022/8/23 "

[32] S. Kurosawa, "Magneto-transport and chiral anomaly in the Weyl antiferromagnet Mn_3Sn" The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) 2022/8/25"

[33] S. Minami, "Large anomalous Nernst effect in the iron-based Kagome ferromagnet Fe_3Sn" The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) 2022/8/25

[34] Takachika Isomae, "Nonlinear transport properties under magnetic field in the quadrupole Kondo lattice system $PrTi_2A1_{20}$" The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) 2022/8/25

[35] Hiroto Nakamura, "Logarithmic criticality in the transverse thermoelectric conductivity of the ferromagnetic topological semimetal CoMnSb" The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) 2022/8/26

[36] Y. Wang, "Anomalous Nernst effect in the topological $Fe_3Ga_{1-x}Al_x$ polycrystls" The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) 2022/8/26

[37] R. Uesugi, "Composition dependence of anomalous Nernst effect in the Weyl magnetic material Co2MnGa thin film" The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) 2022/8/26 "

[38] M. Fu, "Strange universe in correlated quantum matter driven by entanglement between multipoles and conduction electrons" 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS2022) 2022/11/9"

[39] T. Higo, "Detection and manipulation of topological responses in the Weyl antiferromagnet Mn_3Sn" 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS2022) 2022/11/10 "

[40] A. Sakai, "Giant Anomalous Nernst Effect in Topological Ferromagnets" Tsinghua U. - U. Tokyo The 7th Joint Workshop on Trans-scale Materials Science: Physics & Materials 2022/12/13

招待講演

[41] S. Nakatsuji, "Correlation effects and their manipulation in the magnetic Weyl semimetal Mn_3Sn" MPI International Focus Workshop: Topological Materials: From Weak to Strong Correlations 2022/4/13

[42] T. Higo, "Electrical manipulation of an antiferromagnetic Weyl metal " 24th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS-2022) 2022/7/10

[43] S. Nakatsuji, “Electrical manipulation of large transverse responses in antiferromagnetic Weyl semimetals” The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) 2022/8/23

[44] M. Fu, “Magnetic Field-Tuning Quantum Criticality and Fermi Surface Reconstruction in the Multipolar Kondo System PrV_2A1_{20}” Quantum Materials/AMO seminar 2022/9/14

[45] S. Nakatsuji, “Electrical and strain control of a magnetic Weyl semimetallic stat” UBI-MPG-UTokyo Annual-Meeting 2022/9/20

[46] S. Nakatsuji, “Electrical and Strain Manipulation of Large Transverse Responses in Topological Antiferromagnets” Condensed Matter Seminar Series 2022/9/26

[47] T. Higo, “Perpendicular switching of chiral antiferromagnetic order by spin-orbit torque” 2022 Pan-Pacific Workshop on Topology and Correlations in Exotic Materials conference 2022/10/24

[48] S. Nakatsuji, “Topological Weyl Antiferromagnets and their Spintronics” 2022 Pan-Pacific Workshop on Topology and Correlations in Exotic Materials conference 2022/10/25

[49] S. Nakatsuji, “Electrical and Strain Manipulation of Large Transverse Responses in Topological Antiferromagnets” InterAcademy Workshop on Quantum Materials 2022/12/8

(国内会議)

一般講演

[50] 梶原悠人, “遷移金属ダイカルコゲナイド TiS2 における異方的輸送特性の測定” 日本物理学会 2022 年秋季大会 2022/9/14

[51] M. Ishibashi, “Error rate of a ferrimagnetic spin shift resister” 2022 年第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 2022/9/20

[52] T. Matsuo, “Fabrication and characterization of polycrystalline Mn3Sn/Ta structures” 2022 年第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 2022/9/23

[53] T. Higo, “Perpendicular and 100% switching of noncollinear antiferromagnetic order in the chiral antiferromagnet Mn_3Sn by electric current ” 2022 年第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 2022/9/23

[54] R. Uesugi, “Observation of large anomalous Nernst effect and quantum-critical scaling in the Weyl ferromagnet Co2MnGa thin films” 2023 年第 70 回応用物理学会春季学術講演会 2023/3/17

[55] 黒沢駿一郎, “カイラル反強磁性体 Mn3Sn におけるカイラル異常の検証” 日本物理学会 2023 年春季大会 2023/3/25

[56] 磯前貴央, “四極子近藤格子系 PrTi2Al20 の巨大線形磁気抵抗とその異方性” 日本物理学会 2023 年春季大会 2023/3/23

[57] 中村紘人, “低温異常ネルンスト効果測定による磁気トポロジカル状態の検証” 日本物理学会 2023 年春季大会 2023/3/22

[58] 酒井明人, “磁歪・熱膨張測定による PrV2Al20 多極子秩序相の研究” 日本物理学会 2023 年春季大会 2023/3/23

[59] Y. Wang, “Anomalous Nernst effect in the topological Fe3Ga1-xAlx polycrystals” 日本物理学会 2023 年春季大会 2023/3/25

[60] 酒井明人, “外因性機構による異常ネルンスト効果” トポロジカル熱電変換物性の最前線 2023/3/16

[61] 田中克大, “反強磁性金属を用いたトンネル磁気抵抗効果” トポロジカル熱電変換物性の最前線 2023/3/15

[62] 中村紘人, “コバルト系金属間化合物における巨大異常ネルンスト効果” トポロジカル熱電変換物性の最前線 2023/3/16

招待講演

[63] 中辻知, “トポロジーが創る新しい磁性とその機能” 東京大学統合物質・情報国際卓越大学院統合物質科学リーダー養成プログラム「統合物質科学俯瞰講義 II」 2022/6/9

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

広領域輝線マッピング模擬観測データの高速生成手法の開発

輝線マッピング観測では、銀河の大規模分布を測ることができる。我々は、ダークマターのみのシミュレーションデータから輝線マッピングの模擬観測データを生成する手法を開発した。得られた輝線銀河サンプルの統計的な性質は宇宙論的流体シミュレーションやこれまでの観測と整合することを示した。本手法によって得られる大量の模擬観測データは将来の広領域観測のデータ解析において重要となる。

酸素輝線を用いた遠方銀河の化学進化

2022 年 7 月から NASA の宇宙望遠鏡 JWST の運用が開始され、最遠方銀河からの輝線が観測されつつある。最新の観測結果と比較・検証するべく、銀河形成シミュレーションを用いて水素電離領域からの輝線放射モデルを考案し、酸素輝線の放射強度を計算した。輝線強度を基に再電離期の銀河の星質量-金属量関係を調べたところ、宇宙誕生後わずか 8 億年で近傍銀河のもつ金属量に匹敵する程すでに化学進化している銀河が存在することがわかった。

5.1.2　宇宙の構造形成

Fuzzy Dark Matter ハローのコア・ハロー質量関係

FDM ハローの中心にはソリトンコアが形成されることが知られており、コア・ハロー質量関係が FDM ハローの構造を特徴づける重要な関係となっている。しかし、この関係に関する一意の解釈はなされていないため、我々が物理的解釈をもとに理論モデルを構築した。我々は、ソリトンコアが NFW プロファイルからの質量再分布により構成されるものと仮定した。その結果、質量再分布が起きる半径を緩和時間条件を用いて決めることによって、シミュレーション結果を再現できることを明らかした。またこのモデルでは、NFW プロファイルの質量集中度の分散によって、コア・ハロー質量関係の分散が説明できることも明らかにした。

銀河団に含まれる星の割合と強重力レンズ効果に関する統計量の相関

強重力レンズ効果における critical curve 付近では増光率が非常に大きくなり、通常では観測できない遠方の暗い星や銀河が観測される程度まで明るくなることがある。この増光率の具体的な値や増光が起きる頻度といった統計量は、レンズ天体の構造に依

存する。本研究では、glafic ソフトウェアを用いて銀河団中の星の割合と統計量の関係を調べている。

5.1.3 ブラックホール 3 体系

階層的重力３体系の力学的安定性

系外惑星及びブラックホール連星の形成・進化において３体系力学は本質的である。特にその力学的不安定性は、３体系が多様な天体現象を引き起こす起源としても重要な基礎過程である。我々は３体系のニュートン力学的不安定時間スケールの、軌道パラメータに対する依存性を調べる系統的シミュレーションを実行した。その結果、従来の研究とは異なり、安定と不安定には明確な境界はなく連続的に変化することを発見した。さらに、２つの公転軌道のなす角度が、長時間の古在効果を通じて、系の安定性に重要な影響を与えることを、数値計算と摂動的理論モデルを通じて明らかにした [16, 24, 90, 111]。

5.1.4 高エネルギー天体現象

高速回転や磁場を伴った天体の構造と重力波

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様々な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る。コンパクト天体の多くは非常に高速な回転や強力な磁場を伴っており、様々な高エネルギー現象と密接に関わっている。そこで、このような高速回転するコンパクト天体を考えるために、ラグランジュ座標に基づく新しい回転星の定式化と計算をニュートン重力 [28] と一般相対論 [23] でそれぞれ行いその構造を計算した。また、そのために必要な数値計算手法の開発も行った [22]。さらに、高速回転するコンパクト天体からの自己相似的なアウトフローの解の構築 [18] も行った。また、中性子星は非常にコンパクトであるため、回転軸に対して非軸対称的に歪み高速回転していると重力波を放出すると考えられている、有力な重力波候補天体である。そこで、磁場による中性子星の歪みの新しい解を計算し、理論的に求めた [14, 21]。

対消滅生成型超新星の探索法

欧州宇宙機関が 2023 年に打ち上げを予定している Euclid 宇宙望遠鏡は、数週間おきに同一の領域を観測して超新星などの時間変動天体を探索することを一つの科学目標に据えている。本研究では Euclid により遠方の対消滅生成型超新星 (PISN) を検出すべく、理論的に得られた星生成率や光度曲線を用いて現実的な検出数を計算した。質量ギャップとよばれる、超新星爆発をおこす親星の質量範囲の推定のために必要な炭素燃焼の反応率の不定性を考慮し、比較的小さな質量の親星でも PISN を起こす場合には赤方偏移 2 以上で検出数が数個におよぶことを示した。本研究では最近の LIGO-VIRGO による重力波検出による大質量星生成率の推定と合致するモデルを用いており、上記の見積もりも観測的に矛盾のない範囲で超新星発生数を計算した。[26]。

5.1.5 星・惑星系の形成と進化

原始惑星系円盤の長期進化計算

恒星系は分子雲の重力収縮によって星周円盤を伴って誕生する。星が前主系列段階まで進化すると円盤は原始惑星系円盤と呼ばれるようになる。赤外線観測から円盤は数百万年ほどで消失し、円盤寿命は中心星質量が大きくになるにつれて短くなることが明らかになっているが、その原因となる物理過程の詳細は未だ解明されていない。惑星は円盤内部で円盤物質 (ガス・ダスト) から形成されるため、円盤進化の詳細を解明することは惑星形成過程の理解に直接貢献する。

そこで、円盤散逸過程として有力視されている降着、円盤風、光蒸発全てを整合的に取り入れた円盤進化シミュレーションを開発した。特に光蒸発過程については世界で初めて 2 次元輻射流体計算の結果を取り入れた。中心星質量をパラメータとして円盤散逸まで 10Myr に渡って円盤進化を追った。その結果、どの中心星質量を持つ星周りでも初期は円盤風、数 Myr 以降は光蒸発が主な散逸過程であった。特に質量の大きい $7M_{\odot}$ の星周りでは星光度が高いことから円盤ガスが高温に温められ、光蒸発による質量損失率が高くなることで円盤寿命が 2Myr と短くなっていた。本研究で得られた円盤散逸の中心星質量依存性は観測された円盤寿命の傾向を説明可能である。

EUV が駆動するホットジュピターの大気散逸及びそのトランジットシグナルの理論的理解

主星のすぐ近くを公転するガス惑星であるホットジュピターの大気は主星からの強い極端紫外線 (EUV) によって加熱され散逸することが知られている。散逸した大気による主星の Lyman-α の吸収が観測される。大気散逸過程は重力、ガス膨張、及び光加熱によって決まる。物理的なタイムスケール等を用いて系を特徴付ける臨界 EUV フラックスを定義できた。Lyman-α の吸収が検出されない惑星系について物理的に場合分けをすることで EUV フラックスが弱いため散逸が弱い系と EUV フラックスが強いにも関わらず散逸大気が検出されない系が存在することが明らかになった [46, 55, 77]。後者の場合は EUV フラックス強度以外の影響、例えば強い恒星風によって散逸した大気が押し込められて吸収シグナルが小さくなることが考えられる。そこで多次元輻射流体シミュレーションを行い、恒星風が観測されるトランジットシグナルに与える影響を調べた。恒星風強

度が太陽の 100 倍以上の場合、強い恒星風によって Lyman-α の吸収が強く抑制されることが明らかになった [31, 46]。

黒点による星の光度変化の解析的モデル

ケプラー探査機に代表される高精度光度関数によって数多くの星の自転周期が推定されている。そのほとんどは、表面上の黒点が自転にともなって見かけ上の光度変動を生み出すためであると考えられている。しかし今までその光度曲線の解析的モデル化はなされていなかった。今回、黒点のサイズが星に比べて十分小さいという近似のもとで、星の微分回転の効果をとりこんだ上で複数の黒点による光度曲線の解析的表式を導出した [9]。

ケプラー探査機の精密測光データと星震学を用いた星の自転周期推定値の信頼性

ケプラー探査機の測光観測データから数万個の星の自転周期が推定されている。これとは独立に、星の脈動を用いる星震学から数百個の主系列星に対する自転周期が推定されている。星の表面活動と黒点の運動、さらには表面と内部の微分回転の効果を考えれば、前者の測光的周期と後者の星震学的周期とは必ずしも一致する必要はない。そこで、今回は星震学的周期が推定されている 92 個の主系列星に対して、Lomb-Scargle periodogram、自己相関関数、wavelet を用いてそれらの測光的周期を再解析し、星震学的周期と系統的に比較することで、お互いの推定値の信頼性を評価するとともに、微分回転に対する制限を議論した。この結果は、特に惑星をもつ系の自転公転角、自転傾斜角の決定とその起源の議論において重要となることが期待される [20]。

大局的非一様性を持つ白色矮星の光度曲線の理論モデル

複数の白色矮星は、ほぼ正弦曲線で近似できる光度曲線を示すことが知られている。これを自転軸とずれた位置に温度の非一様性を持つスポットが回転するモデルによって説明することに成功した。このモデルを観測データに適用することで、そのスポットの温度、サイズ、自転軸とのずれの角度を推定できることを示した [19]。

5.1.6 系外惑星

原始惑星系円盤に埋もれた惑星から生まれる多重惑星系

ALMA 望遠鏡による高解像度観測によって、原始惑星系円盤に多くのギャップ構造が存在することが明らかとなっている。それらは形成途上の惑星によって生まれたとするのがもっとも有力な可能性である。我々はそこに埋もれた惑星の質量を推定する従来の方法論を精査し、その質量に応じて 2 つの異なる解が存在する場合があることを発見し、それらから予想される多重惑星系のアーキテクチャーとその力学的安定性を議論した [7]。

5.1.7 量子計算

量子コンピューターによる無衝突ボルツマン方程式の高速化

無衝突ボルツマン方程式は 6 次元の方程式であり、今までの古典的な方法では時間ごとに空間 6 次の計算量がかかったところを新たに開発した量子アルゴリズムによって 3 次まで軽減することに成功した。また、同量子アルゴリズムの proof of concept での古典シミュレーションによりテスト計算を行い、正しく計算できているかの検証を行った。

＜受賞＞

[1] Hiroki Kawai, Poster award, Tonale Winter School 2022, 2022/12/09

[2] Moriwaki K., Springer Thesis Award, 2022

[3] 仲里佑利奈, 宇宙地球フロンティア国際卓越大学院プログラム Qualifying Exam 優秀賞, 理学系研究科, 2023 年 2 月 24 日

[4] 仲里佑利奈, 東京大学総長賞, 東京大学, 2023 年 3 月 15 日

[5] 仲里佑利奈, 研究奨励賞, 理学系研究科物理学専攻, 2023 年 3 月 23 日

＜報文＞

(原著論文)

[6] Chen L. *et al.* (incl. Hartwig T.), 2022, MNRAS, 513(1), L934

[7] Wang S., Kanagawa K. D., and Suto Y., 2022, ApJ, 932:31, L26

[8] Magg M. *et al.* (incl. Hartwig T.), 2022, MNRAS, 514(3), LL4433

[9] Suto Y., Sasaki S., Nakagawa Y., and Benomar O., 2022, PASJ, 74, L857

[10] Takahashi I., Hamasaki R., Ueda N., Tanaka M., Tominaga N., Sako S., Ohsawa R., Yoshida N., 2022, PASJ, 74, L946

[11] Tokuoka T. *et al.* (incl. Moriwaki K. and Yoshida N.), 2022, ApJL, 933, L19

[12] Aizawa M., Kawana K., Kashiyama K. *et al.* (incl. Fujisawa K.), 2022, PASJ, 74(5), L1069

[13] Hartwig T. *et al.*, 2022, ApJ, 936:45, L25

[14] Fujisawa K., Kisaka S., Kojima Y., 2022, MNRAS, 516, L5196

[15] Shafqat R. *et al.* (incl. Hartwig T.), 2022, ApJL, 937, L6

[16] Hayashi T., Trani A. A., and Suto Y., 2022, ApJ, 939:81, L20

[17] Chen L. *et al.* (incl. Hartwig T.), 2022, MNRAS, 517(4), L6140

[18] Ko T., Fujisawa K., Shigeyama T., 2022, ApJ, 941:1, L38

[19] Suto Y., Sasaki S., Aizawa M., Fujisawa K., and Kashiyama K., 2023, PASJ, 75, L103

[20] Lu Y., Benomar O., Kamiaka S., and Suto Y., 2022, ApJ, 941:175, L39

[21] Fujisawa K., Kojima Y., Kisaka S., 2023, MNRAS, 519, L3776,

[22] Okawa H., Fujisawa K. *et al.*, 2023, Applied Numerical Mathematics, 183, L157

[23] Okawa H., Fujisawa K. *et al.*, 2023, MNRAS, 520, L24

[24] Hayashi T., Trani A. A., and Suto Y., 2023, ApJ, 943:58, L7

[25] Lake W. *et al.* (incl. Nakazato Y.), 2022, ApJ, 943:2, L132

[26] Tanikawa A., Moriya T., Tominaga N., Yoshida N., 2023, MN Letters, 519, L32

[27] Williams C. *et al.* (incl. Nakazato Y.), 2022, ApJ, 945, L6

[28] Ogata M., Okawa H., Fujisawa K. *et al.*, 2023, MNRAS, 521, L2561

[29] Sartorio N. S. *et al.* (incl. Hartwig T.), 2023, MNRAS, 521(3), L4039

[30] Hartwig T. *et al.*, 2023, ApJ, 946:20, L18

(会議抄録)

[31] Mitani H., Nakatani R., Yoshida N., Proceedings of the International Astrophysical Union, Volume 16, Symposium S362, Cambridge University Press (2022)

[32] Nakazato Y. *et al.*, Proceedings of the International Astrophysical Union, Volume 16, Symposium S362, Cambridge University Press (2022)

(国内雑誌)

[33] 須藤靖, "宇宙人はいますか？ ", 大修館書店 高等学校教科書『新編 現代の国語』 読書の広場 2022 年 4 月, pp.108–111.

[34] 須藤靖, "注文の多い雑文 その五十八：フラットアーサーの言い分", 東京大学出版会 UP **596**(2022)6 月号, pp.26–32.

[35] 森脇可奈, "敵対的生成モデルを用いた輝線強度マッピングデータからのシグナ ル抽出", 天文月報 2022 年 7 月号

[36] 森脇可奈, 吉田直紀, "深層学習を用いた宇宙論", サイエンス社, 数理科学 2022 年 7 月号

[37] 須藤靖, "加速する宇宙“論”の進化", 数理科学 **709**(2022) pp.7–13.

[38] 須藤靖, "注文の多い雑文 その五十九：世界を切り刻む科学とありのままに愛でる科学", 東京大学出版会 UP **596**(2022)9 月号, pp.32–39.

[39] 須藤靖, "宇宙は数式でできている", 東京大学理学系研究科・理学部ニュース 2022 年 11 月号, 理学の本棚 第５４回, p.12.

[40] 須藤靖, "相対論とブラックホール", 数研出版『フォトサイエンス 物理図録』(2022) pp.102-103.

[41] 須藤靖, "単純な素粒子の寄せ集めと基本法則からこの世界の不思議さが生まれる根本原理", 週刊新潮 書評 (フランク・ウィルチェック著 吉田三知世訳『すべては量子でできている　宇宙を動かす１０の根本原理』), 2022 年 12 月 8 日号, p.93.

[42] 須藤靖, "注文の多い雑文 その六十: ボルツマン脳曰く「我思う、ゆえに世界あり」", 東京大学出版会 UP **602**(2022)12 月号, pp.1–9.

[43] 須藤靖, "ランダウ・リフシッツの『力学』", ミネルヴァ通信「究」2023 年 1 月号、巻頭言.

[44] 須藤靖, "我が人生最高の 10 冊", 週刊現代 2023 年 2 月 4 日号, pp.114–115.

[45] 須藤靖, "注文の多い雑文 その六十一: 地球のデジタル化とその発信", 東京大学出版会 UP **605**(2023)3 月号, pp.24–31.

(学位論文)

[46] Hiroto Mitani, "Understanding Atmospheric Escape of Hot Jupiters Using Radiation Hydrodynamics Simulations" (博士論文)

[47] Yuta Tarumi, "Neutron-capture element enrichment of early galaxies" (博士論文)

[48] Yurina Nakazato, "Formation and evolution of star clusters and galaxies in the early Universe" (修士論文)

(著書)

[49] Moriwaki K., "Large-Scale Structure of the Universe – Cosmological Simulations and Machine Learning", Springer Theses. Springer Singapore, 2022

[50] 吉田直紀監修, "文系のためのめっちゃやさしい相対性理論", ニュートンプレス (2022 年 7 月 6 日)

[51] 須藤靖 (編), "20 世紀科学論文集：現代宇宙論の誕生", 岩波文庫 (2022 年 8 月 10 日)

[52] 吉田直紀監修, "文系のためのめっちゃやさしい時間", ニュートンプレス (2022 年 9 月 29 日)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[53] Fujisawa K., "A magnetically confined mountain on a neutron star with multipole magnetic fields & GR rotating star with arbitrary rotation law"; Symposium on Gravitational wave physics and astronomy: Genesis, Kyoto University (April 25-29, 2022)

[54] Nakazato Y., "The formation of gas-rich structure through baryon-dark matter streaming motion"; National Astronomy Meeting (NAM) 2022, The University of Warwick (July 11-15, 2022)

[55] Mitani H., "Physics of the atmospheric escape driven by EUV photoionization heating: Classification of the hydrodynamic escape in close-in planets"; IAU Symposium 370 Winds of Stars and Exoplanets, Busan, Korea (August 8-11, 2022)

[56] Nakazato Y., "[OIII] emission lines from high-z galaxies in the Epoch of Reionization"; Resceu Summer School 2022, Online (August 17-19, 2022)

[57] Kawai H., "The core-halo mass relation in fuzzy dark matter halos"; RESCEU Summer School, Online (Aug 17-19, 2022)

[58] Nakazato Y., "Effect of streaming motion of baryons relative to dark matter and the formation of star clusters"; Star Formation in Different Environments (SFDE) 2022, Vietnam (August 21-27, 2022)

[59] Komaki A., Nakatani R., Yoshida N., "Evolution of proto-planetary disks"; 1-day Kyoto-Tokyo joint workshop with Prof.R.Kuiper , Kyoto University (September 21, 2022)

[60] Nakazato Y., "The formation of star clusters in the early universe through supersonic gas streams"; The 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM9), Okinawa (September 26-30, 2022)

[61] Yoshida N., "Cosmological Vlasov-Poisson Simulations with Relic Neutrinos"; 9th EANAM, Naha (September 27, 2022)

[62] Hayashi T., Trani A. A., Suto Y., "The disruption timescales of triple systems: dependence on orbital configuration"; The 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting, Okinawa (September 26-30, 2022)

[63] Yamazaki S., Fumio U., Fujisawa K., and Yoshida N., "Quantum algorithm for the collisionless Boltzmann equation of self-gravitating systems"; Challenges and Innovations in Computational Astrophysics IV, Online (November 21-23, 2022)

[64] Komaki A. *et al.*, "Photoevaporation of protoplanetary disks"; One-day workshop on star-planet systems, The University of Tokyo (November 22, 2022)

[65] Kawai H., (Poster) "An analytic model for the the core-halo mass relation in fuzzy dark matter halos"; Kashiwa Dark Matter Symposium 2022, Kashiwa Library Media Hall of the University of Tokyo, Kashiwanoha Campus (Nov 29 - Des 2, 2022)

[66] Kawai H., (Poster) "An analytic model for the the structures in fuzzy dark matter halos"; Tonale Winter School on Cosmology 2022, Passo del Tonale Italy (Des 4-10, 2022)

[67] Komaki A. *et al.*, "Dispersal processes of protoplanetary disks"; FoPM Symposium, The University of Tokyo (February 6, 2023)

[68] Kawai H., "Probing the dark matter nature from caustic crossing event"; Hongo conference 2023, Hongo campus of the University of Tokyo (Mar 20, 2023)

招待講演

[69] Yoshida N., "3D density field reconstruction with a sparsity prior"; Cosmology with Weak Lensing: Beyond the Two-point Statistic, Kyoto University (April 15, 2022)

[70] Yoshida N., "Early structure formation and dynamical evolution of star clusters"; Gravitational Wave Constraints on Dark Compact Objects, Pennsilvania State University, USA (May 19, 2022)

[71] Yoshida N., "First star formation under the influence of baryonic streaming motions"; From Stars to Galaxies II, Chalmers University of Technology, Sweden (June 24, 2022)

[72] Suto Y., "Lagrange and Liapunov stabilities of hierarchical triple systems"; the 10th KIAS workshop on Cosmology and Structure Formation, Korean Institute of Advanced Study, Seoul, Online (October 25, 2022)

[73] Suto Y., "Signatures of an inner binary black hole with a tertiary orbiting star"; the World Copernican Congress, Torun, Poland (February 20, 2023)

(国内会議)

一般講演

[74] 仲里佑利奈, "[OIII] line ratio for high-z galaxies"; 銀河・銀河間ガス研究会 2022, 北海道 (2022 年 8 月 8 日-12 日)

[75] 山崎壮一郎, 内田経夫, 藤澤幸太郎, 吉田直紀, "量子コンピューターで解く無衝突ボルツマン方程式"; 2022 年度第 52 回天文・天体物理若手夏の学校, オンライン (2022 年 8 月 23 日-26 日)

[76] 河合宏紀, "Fuzzy Dark Matter ハローにおけるコア・ハロー質量関係"; 日本物理学会 2022 年秋季大会, 岡山理科大学 (2022 年 9 月 6 日-8 日)

[77] 三谷啓人, 仲谷崚平, 吉田直紀, "短周期惑星大気の光蒸発過程の物理的理解 "; 日本天文学会 2022 年秋季年会, 新潟大学 (2022 年 9 月 13 日-15 日)

[78] Rui Lan Z., "Fast method for generating mock line intensity maps based on hydrodynamical simulations"; 日本天文学会 2022 年秋季年会, 新潟大学 (2022 年 9 月 13 日-15 日)

[79] 藤澤幸太郎, " 任意の角速度分布を持つ一般相対論的回転星の新しい平衡形状" ; 日本天文学会 2022 年秋季年会, 新潟大学 (2022 年 9 月 13 日-15 日)

[80] 林利憲, Alessandro Trani, 須藤靖, "階層的三体系の不安定時間スケールの軌道要素依存 II"; 日本天文学会 2022 年秋季年会, 新潟大学 (2022 年 9 月 13 日-15 日)

[81] 山崎壮一郎, 内田経夫, 藤澤幸太郎, 吉田直紀, "量子コンピューターによる無衝突ボルツ マン方程式の数値シミュレーション"; 日本天文学会 2022 年秋季年会, 新潟大学 (2022 年 9 月 13 日-15 日)

[82] 仲里佑利奈, "ALMA & JWST の [OIII] 観測とシミュレーションから探る遠方銀河進化" ; 初代星・初代銀河研究会 2022, 徳島大学 (2022 年 11 月 10-12 日)

[83] 駒木彩乃 *et al.*, "原始惑星系円盤進化の中心星質量依存性"; 太陽系天体若手研究会 (SSBW2022), オンライン (2022 年 11 月 18 日)

[84] 藤澤幸太郎, "中性子星の磁場構造"; コンパクト星研究会 2023, 沖縄県立美術館 (2023 年 3 月 1 日-3 日)

[85] 山崎壮一郎, 内田経夫, 藤澤幸太郎, 吉田直紀, "Reservoir method による無衝突ボルツマン方程式の量子コンピューターを用いた数値シミュレーション"; 情報処理学会第 8 回量子ソフトウェア研究発表会, 慶應義塾大学 (2023 年 3 月 13 日-14 日)

[86] 藤澤幸太郎, "クラストの弾性力によって支えられた比較的強いトロイダル磁場を持つ中性性星"; 日本天文学会 2023 年春季年会, 立教大学 (2023 年 3 月 13 日-16 日)

[87] 駒木彩乃 *et al.*, "原始惑星系円盤の散逸過程：中心星質量依存性"; 日本天文学会 2023 年春季年会, 立教大学 (2023 年 3 月 13 日-16 日)

[88] 仲里佑利奈, "遠方銀河シミュレーションを用いた [OIII] 輝線強度計算と輝線比診断" ; 日本天文学会 2021 年秋季年会, 立教大学 (2023 年 3 月 13 日-16 日)

[89] Rui Lan Z., "Fast semi-analytical method for generating mock line intensity maps"; 日本天文学会 2023 年春季年会, 立教大学 (2023 年 3 月 13 日-16 日)

[90] 林利憲, Alessandro Trani, 須藤靖, "階層的三体系における Lagrange 的安定性の軌道要素依存性"; 日本天文学会 2023 年春季年会, 立教大学 (2023 年 3 月 13 日-16 日)

[91] Nakazato Y., "Emission line calculation of high-redshift galaxies for JWST & ALMA observation"; 本郷若手研究会, 東京大学 (2022 年 3 月 20 日)

招待講演

[92] 吉田直紀, "バリオンの揺らぎは何を生み出したのか"; The Future of Observational Cosmology, KMI, 名古屋大学, (2022 年 6 月 11 日)

[93] 藤澤幸太郎, "超新星爆発と中性子星からの連続重力波"; 重力波天文学時代における超新星研究, 石垣市立図書館 (2022 年 10 月 18 日-21 日)

[94] 森脇可奈, "IGM at High Redshifts Probed by 21cm Line"; 銀河銀河間ガス研究会, 釧路ロイヤルインホテル (2022 年 8 月 9 日)

[95] 須藤靖, "階層的三体問題とブラックホール三体系"; 第 35 回理論天文学・宇宙物理学懇談会シンポジウム, コラッセふくしま (2022 年 12 月 21 日)

(セミナー)

[96] 吉田直紀, "最大の望遠鏡と最速のコンピューターで挑む宇宙の謎"; 東京大学宇宙線研究所合同一般講演会, アミュゼ柏 (2022 年 4 月 9 日)

[97] 須藤靖, "物理学は世界をどのように記述するか"; 物理学概論, 高知工科大学 (2022 年 4 月 12, 15, 19 日)

[98] 須藤靖, "138 億年の宇宙史における天体・地球・生命の共進化"; 新しい科学の世界 I 宇宙の誕生から日本列島まで 第 2 回 かわさき市民アカデミー (2022 年 4 月 19 日)

[99] Moriwaki K., "Deep Learning Application for Reconstruction of Large-Scale Structure of the Universe"; Yunnan University, SWIFAR (21, April, 2022)

[100] 須藤靖, "宇宙物理学から宇宙生物学へ：必然と偶然の間"; オムニバスセミナー, 千葉大学 先進科学センター (2022 年 4 月 22 日)

[101] 林利憲, 汪士傑, 須藤靖, "連星ブラックホールを含む三体系の探査法提案とその検証"; 弘前大学 (2022 年 5 月 18 日)

[102] Kawai H., "An analytic model for the structures in fuzzy dark matter halos"; Japan-Germany Joint Seminar on cosmology and astroparticle physics, Online (May 25, 2022)

[103] Suto Y., "Different cultures, Same Science"; Orientation for new fellows of the Japan Society for Promotion of Science, (June 16, 2022)

[104] Yoshida N., "Formation of the First Stars in the Universe"; Astronomy on Tap, Haket, Gothenburg, Sweden (June 21, 2022)

[105] 須藤靖, "見えないはずのブラックホールを見る"; 理工学のフロンティア 第 4 回, 高知工科大学　オンライン (2022 年 6 月 21 日)

[106] 須藤靖, "宇宙は物理法則に支配されている"; 追手前ゼミナール, 高知県立追手前高校 (2022 年 6 月 25 日)

[107] 駒木彩乃, "原始惑星系円盤の散逸過程"; 東京大学相川研, オンライン (2022 年 6 月 28 日)

[108] Moriwaki K., "Deep Learning Application for Reconstruction of Large-Scale Structure of the Universe"; the University of Tokyo, ipi seminar (19, October, 2022)

[109] 須藤靖, "太陽系外惑星の先にある worlds"; 日本物理学会四国支部講演会, 高知大学朝倉キャンパス (2022 年 8 月 29 日)

[110] 吉田直紀, "科学 x AI"; 三井住友 Pre-EMP プログラム, 東京大学 (2022 年 9 月 18 日)

[111] 林利憲, 汪士傑, 須藤靖, ”階層的三体系崩壊時間スケールの軌道要素依存性”; 京都大学 (2022 年 11 月 14 日)

[112] Komaki A., ”Photoevaporation of protoplanetary disks : stellar mass dependence”; University of Duisburg-Essen(Germany), Online (December 1, 2022)

[113] 須藤靖, ”地平線の先に広がる世界：マルチバースと人間原理”; 日本物理学会四国支部講演会, 高知大学朝倉キャンパス (2022 年 12 月 6 日)

[114] 藤澤幸太郎, ”マグネターの磁場進化”; Bi-monthly meeting, オンライン (2022 年 12 月 10 日)

[115] 須藤靖, ”世界はゆらぎでできている？ ボルツマン脳とボルツマン宇宙”; 理工学のフロンティア 第 12 回, 高知工科大学　オンライン (2022 年 12 月 13 日)

[116] 須藤靖, ”「茶碗の湯」の世界の中と外”; 東京大学全学自由研究ゼミナール「茶碗の湯」から最新の科学を考える 第 10 回, 東京大学 駒場キャンパス (2022 年 12 月 15 日)

[117] Suto Y., ”Lagrange instability timescales of three-body systems”; Colloquiuum at Niels Bohr Institute, Copenhagen (February 13, 2023)

[118] Suto Y., ”Dynamical signature of triple systems including inner binary black-holes”; Theoretical astrophysics group seminar at Niels Bohr Institute, Copenhagen (February 15, 2023)

[119] Nakazato Y., ”Formation and evolution of star clusters and galaxies in the early Universe”; invited seminar at UCLA, (February 23, 2023)

[120] 須藤靖, ”階層的三体系の力学的安定性と ZKL 効果”; 天文学談話会 鹿児島大学 (2023 年 2 月 24 日)

[121] 須藤靖, ”宇宙が数式にしたがっている理由”; 早稲田大学 オープンカレッジ (2023 年 3 月 4 日, 11 日)

[122] 須藤靖, ”学問と政治の適切な距離感”; 軍学共同反対連絡会 シンポジウム「加速する軍事研究への動員」, 衆議院第一議員会館 (2023 年 3 月 6 日)

[123] Suto Y., ”Spin-orbit architectures of transiting planetary systems: Rossiter-McLaughlin effect and asteroseismology”; Physics Colloquium at National Taiwan University, Taipei (March 14, 2023)

[124] Suto Y., ”Radial velocity modulation of a tertiary star orbiting an inner binary black hole”; Seminar at Academia Sinica of Astronomy and Astrophysics, Taipei (March 15, 2023)

[125] Nakazato Y., ”H2 cooling of gravitational collapse of SIGOs with high-resolution simulations”; Supersonic Project: Collaboration meeting, UCLA (March 27, 2023)

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。

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コンピュータをとらえ、量子コンピュータ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り、量子情報理論の分野の発展に貢献する基盤的成果をあげている。国内外の多彩な背景を持つ研究者との共同研究や研究協力を実施し、研究を遂行していることも特色である。

今年度は、村尾美緒教授、山崎隼汰助教、日本学術振興会外国人研究員の Bartosz Regula 博士、Philip Taranto 博士、博士研究員の Hlér Kristjánsson 博士、博士課程大学院生の横島亘氏、田中雄氏、橋本豊氏、Timothy Forrer 氏、修士課程大学院生の吉田智治氏、大嶽竜樹氏のメンバーで、多角的な視点から量子情報の理論的研究を進めた。

5.2.1 量子機械学習・量子学習

二分決定図を用いた量子状態生成アルゴリズム

与えられた古典的データの経験分布を確率振幅とする量子重ね合わせ状態を生成する方法として、量子ランダムアクセスメモリと Grover-Rudolph の手法に基づく量子状態生成アルゴリズムが知られている。しかしこの手法は量子ランダムアクセスメモリの構成の仕方に応じて、N をデータサイズとしたときに、$O(N)$ の量子ビット数もしくは $O(N)$ の量子回路長を必要とするというトレードオフがあった。これに対し本研究では、二分決定図 (BDD) を用いて経験分布を表現するデータ構造を提案し、その BDD を用いて経験分布の量子重ね合わせ状態を生成する量子アルゴリズムを開発することで、経験分布が効率的に表現できる場合に量子ビット数や量子回路長が N に陽に依存しない量子状態生成手法を示した。(担当：田中、山崎、村尾)

コヒーレントな制御を活用した量子ニューラルネットワーク

量子ニューラルネットワークとは、ニューラルネットワークの各パーセプトロンを量子ゲートに置き換え、重ね合わせを保ったまま入力量子状態を変換して

出力するできるようにした変分量子回路である。本研究では、量子状態だけでなく各パーセプトロンに対応する量子ゲート操作自体についても、コヒーレントな制御により異なる操作の重ね合わせができるように拡張を行い、新しい量子機械学習のパラダイムとして定式化した。また量子状態を入力データとする量子機械学習タスクにおける提案手法の性能解析を進めた。(担当：Kristjánsson、山崎、村尾)

ユニタリ比較アルゴリズムの IBM Q による実装

量子学習は、未知の量子系の性質を効率よく学習するための枠組みである。我々は、量子コンピュータを用いることで、量子系から不必要な古典情報を取り出さずに知りたい性質の情報のみを取り出すことを目的とする完全量子学習について研究を進めてきた。昨年度までに、完全量子学習のタスクの一つとして、量子回路のブラックボックスが複数与えられた際に、与えられた量子回路が実装するユニタリ演算同士が同じか違うかを判定する「ユニタリ比較」を定式化し、このタスクを最適な成功確率で解く量子アルゴリズムを開発した。今年度は、Qiskit での実装を通じて、量子コンピュータの実機 IBM Q を使った実験での性能検証を行なった。実験の結果、小規模な回路ではノイズによる成功確率の低下は小さく、実用的であることがわかった。これにより、量子コンピュータを用いて未知の量子系から特定の情報を抽出する「完全量子学習」が実現可能であることが、ユニタリ比較について示された。(担当：橋本、村尾)

量子リッジレット変換による量子機械学習

量子機械学習における重要な課題の１つに、ニューラルネットワークを用いた学習などの一般的な機械学習タスクの中で、量子計算を適用すると大幅な高速化が達成できるような応用先を発見することがある。本研究では、量子状態のリッジレット変換を高速に実行する量子アルゴリズムを開発し、さらにその応用先として、大規模なニューラルネットワークが与えられた際に、学習可能で疎なサブネットワークを探索する問題を効率的に解く量子アルゴリズムを構築した。これにより、ニューラルネットワークを用いた学習を高速化する量子機械学習の枠組みを明らかにした。本研究は Sathyawageeswar Subramanian 博士 (英国 University of Warwick)、早川知志氏 (英国 Univeristy of Oxford)、園田翔博士 (RIKEN AIP) との共同研究である。(担当：山崎)

5.2.2 分散型量子情報処理アルゴリズム

量子コンピュータのネットワーク上での非局所ゲートの分散実装

量子コンピュータの量子ビット数が増えるにつれ、量子コンピュータ内の多数の量子ビットを精密に制御することは困難になる。そのため大規模な量子計算を実行するためには、複数の量子コンピュータで分散処理を行うことが有用である。本研究では、与えられた量子回路を複数の量子コンピュータで最小のエンタングルメントコストで分散実行するタスクを解析し、またこの解析を実行する Python パッケージを作成した。本研究は、Quantinuum(旧名称：Cambridge Quantum Computing) の Quantum Software 部門および Jun-Yi Wu 博士 (台湾 Tamkang University) との共同研究である。(担当：Forrer、村尾)

エンタングルメントに補助されたパッキングプロセスを用いたエンタングルメント効率の高い二者間分散量子計算

本研究では、Eisert らの先行研究で提案された非局所制御ユニタリゲートを分散実装するプロトコルを一般化し、複数の非局所制御ユニタリゲートの列を一度に実装するアルゴリズムを与えた。昨年度に得られた分散実装に必要となるエンタングルメントコストを削減する問題を二部グラフの最小頂点被覆問題に帰着させるアルゴリズムを「埋め込み」などの他の戦略を包含するように拡張し、また最適解の形について外部から課せられる制約も考慮できるようにした。本研究は、Quantinuum(旧名称：Cambridge Quantum Computing) の Quantum Software 部門および Jun-Yi Wu 博士 (台湾 Tamkang University) との共同研究である。(担当：Forrer、村尾)

5.2.3 高階量子演算

新しい側面からの量子情報処理へのアプローチとして、ブラックボックスとして与えられた未知の量子演算を入力として、量子演算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、量子プロセス、量子超写像、量子超チャネルとも呼ばれる) に注目し、その実装可能性や実装アルゴリズム、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への応用を進めた。

ハミルトニアンダイナミクスに対するユニバーサルな変換アルゴリズム

ハミルトニアンシミュレーションの既存手法では、シミューレートしたいハミルトニアンの古典的記述が与えられていることを仮定していた。 これに対し本研究では、未知のハミルトニアンの正時間ダイナミクスが与えられた場合に、エルミート性を保存する線形変換で記述される任意のハミルトニアンのダイナミクスをシミュレートする量子アルゴリズムを提案し、その精度について解析を行った。この量子アルゴリズムは、相関を持つランダムネスを用いることが特徴である。さらに、この量子アルゴリズム

を用いて、未知ハミルトニアンダイナミクスの逆時間発展や時間反転のシミュレーション、および、多パラメータを持つハミルトニアンの１パラメータを効率的に推定する方法を見出した。本研究は添田彬仁博士（国立情報学研究所）との共同研究である。(担当：大嶽、Kristjánsson、村尾)

単一量子ビットユニタリ演算を決定論的かつ正確に反転するアルゴリズム

本研究では、未知の単一量子ビットユニタリ演算を決定論的かつ正確に時間反転する量子アルゴリズムを構成した。まず、ユニタリ反転アルゴリズムを探索する問題を半正定値計画法 (SDP) として記述し、問題のユニタリ群対称性に着目することで SDP の簡約化を行った。入力として与えられるユニタリ演算が量子ビットに作用する場合、簡約化された SDP の数値計算の結果から決定論的かつ正確なユニタリ反転アルゴリズムの存在を示した。さらにこの数値計算の結果を用いて、ユニタリ反転アルゴリズムを実際に解析的に構成した。また、本アルゴリズムにおいて、補助系の出力状態に入力ユニタリ演算の情報が保存されていることを示し、この情報をユニタリ反転アルゴリズムにおける触媒として用いることができることを示した。本研究は添田彬仁博士（国立情報学研究所）との共同研究である。(担当：吉田、村尾)

触媒的量子超写像

量子チャネルを量子チャネルに変換する量子超写像 (=高階量子演算) は、補助系を適切に加えることで、常にユニタリ超写像に純粋化することができる。本研究では、補助系の出力状態が、入力チャネルの一つを復元するのに十分な情報を含んでいるような量子超写像を考察し、このような複数の例が存在することを発見した。補助系の出力状態から復元された入力チャネルは本質的に触媒として働くので、純粋化により得られたユニタリ超写像を触媒的量子超写像 (catalytic quantum supermaps) と呼ぶ。リソース理論の枠組みを用いて触媒的量子超写像を定式化し、量子情報処理における応用可能性について解析を進めている。本研究は、Jessica Bavaresco 博士（スイス Universitè de Genève)、Marco Túlio Quintino 博士（フランス Sorbonne Universitè）との共同研究である。(担当：Kristjánsson、吉田、Taranto、村尾)

ユニタリ拡張可能な N 者間高階量子演算の分解

近年、事象の因果順序が一意に決まらない高階量子演算が関心の対象となっているが、こうした不定因果順序の現れる高階量子演算をどのような条件下で単純な操作に分解できるかは未解決である。本研究では、[A. Vanrietvelde, et al., arXiv:2206.10042, 2022] で提起された次の予想を証明（または反証）することを目指して解析を進めた。「N 者間高階量子演算がユニタリ拡張可能ならば、ルーティングされた量子回路に分解できる」(この命題は物理的に実現可能な高階量子演算に対応するように予想されたものである)。この研究は、2021 年度に得られた我々の結果 [W. Yokojima, et al., Quantum 5, 441 (2021)] の一般化と見ることができる。本研究は、Augustin Vanrietvelde 博士 (フランス Inria Saclay Centre) との共同研究である。(担当：横島、Kristjánsson、村尾)

量子回路を用いた量子スイッチのシミュレーション

量子スイッチは、不定因果順序の現れる代表的な高階量子演算の１つである。量子スイッチに 2 つのユニタリ演算を入力した場合に得られる演算は、片方のユニタリを 2 回使用することで因果順序を持つ量子回路でシミュレート可能であることが知られているが、ユニタリ演算の代わりに一般の量子チャネルが入力となった場合について同様のシミュレーションが可能かは不明であった。本研究では、入力の量子チャネルを任意の整数回使用できる条件の下であっても、2 つの一般の量子チャネルを入力とする量子スイッチの演算は因果順序を持つ量子回路ではシミュレートできないことを示した。本研究は、Jessica Bavaresco 博士 (スイス Universitè de Genève)、Marco Túlio Quintino 博士 (フランス Sorbonne Universitè) との共同研究である。(担当：Kristjánsson、Taranto、村尾)

5.2.4 量子エラー訂正

パウリノイズに対するランダム量子符号とテンソルネットワークデコーダーの開発

近年の研究 [M. J. Gullans et al., Phys. Rev. X 11, 031066 (2021)] により、１次元・n 量子ビット・$O(\log n)$ 回路長のランダムクリフォード量子回路で定義される量子エラー訂正符号を用いると、正の符号化レートを達成できることが示された。しかし先行研究の結果の適用範囲は、シンプルなイレーサーエラーモデルの下のレートに限定されていた。これに対し本研究では、テンソルネットワークの手法を用いて、１次元・n 量子ビット・$O(\log n)$ 回路長のランダムクリフォード量子回路に対し効率的に動作する最尤デコーダーを構築することで、より一般的なパウリノイズモデルについてもこうした正の符号化レートが達成されることを数値的に実証した。本研究は Andrew S. Darmawan 氏 (京都大学)、中田芳史博士 (京都大学)、 田宮志郎氏 (東京大学) との共同研究である。(担当：山崎)

時間オーバーヘッドが短い定数空間オーバーヘッド誤り耐性量子計算

誤り耐性量子計算に必要な量子ビット数を減らす手法として量子 low-density parity-check (LDPC) 符

号を用いた定数空間オーバーヘッド誤り耐性量子計算プロトコルが注目されている。しかし既存の定数空間オーバーヘッドプロトコルには、時間オーバーヘッドが多項式的にかかるという問題があった。これに対し本研究では量子 LDPC 符号ではなく連接符号を用いる手法を開発することで、時間オーバーヘッドが短い定数空間オーバーヘッド誤り耐性量子計算プロトコルを構築した。本研究は小芦雅斗博士 (東京大学) との共同研究である。(担当：山崎)

5.2.5 量子熱力学と量子リソース理論

量子系の冷却コスト

物理過程における制御の重要性を表す例として、熱力学第 3 法則である「ネルンストの達成不可能性原理」が挙げられる。この法則は、ある系を絶対零度まで冷却するためには無限のリソースが必要であることを示す。しかし、このリソースとは何であり、どのように利用すべきなのだろうか？ また、情報と熱力学を結びつけるランダウアーの原理とどのような関係があるのだろうか？ 本研究ではこれらの疑問に答えるために、純粋量子状態を作り出すために必要なリソースを特定するための枠組みを構築した。無限に長い時間、あるいは無限に複雑な制御をかけることで、ランダウアーのエネルギーコストで完全な冷却が可能であることを示した。本研究は Faraj Bakhshinezhad 博士 (オーストリア TU Wien)、 Andreas Bluhm 博士 (フランス CRNS Grenoble)、 Ralph Silva 博士 (スイス ETH Zürich)、 Nicolai Friis 博士 (オーストリア TU Wien)、 Maximilian Lock 博士 (オーストリア TU Wien)、 Giuseppe Vitagliano 博士 (オーストリア TU Wien)、Felix Binder 博士 (アイルランド Trinity College Dublin)、Tiago Debarba 博士 (ブラジル University of Paraná)、 Emanuel Schwarzhans 氏 (オーストリア TU Wien)、Fabien Clivaz 博士 (ドイツ Universität Ulm)、 Marcus Huber 博士 (オーストリア TU Wien) との共同研究である。(担当：Taranto)

量子エンタングルメント変換の不可逆性

量子エンタングルメントの特徴づけにおいて長い間解かれていなかった重要な問題の 1 つに、熱力学でのマクロスコピックな状態変換が可逆であるのと同様に、エンタングルメントの漸近的変換は可逆にできるかという問題があった。本研究ではエンタングルメント変換は本質的に不可逆であることを示した。すなわち、エンタングルメントを生成しないどのようなクラスの操作を考えても、その操作で可逆に実行できない量子状態変換が存在することを示した。本結果は、熱力学第二法則と同様の法則がエンタングルメントのリソース理論では一般に成立し得ないことを示すものである。こうした結果を得るための手法として「テンパードネガティヴィティ」という効率的に計算可能な量を導入することで、量子状態のエンタングルメントコストに関する新たなバウンドを構成し、量子相対エントロピーなどに基づく既存のバウンドを改善した。さらに本結果を量子チャンネルにも拡張し、量子通信の理論においても同様の不可逆性が現れることを示した。本研究は Ludovico Lami 博士 (オランダ University of Amsterdam) との共同研究である。(担当：Regula)

量子状態の確率的変換に関するタイトな制約

本研究では、量子リソース理論によって課される物理的な操作の制約のもとで、量子状態間の確率的な変換がいつ可能であるかを解析するための一般的な理論的手法を開発した。定量的なバウンドや制約の導出に加え、特に本研究では「プロジェクティブロバストネス」という新しいリソース尺度を解析することで既存の結果を改善し、量子状態変換の背後にある新たな制約を明らかにした。こうした結果により、エンタングルメント蒸留やマジック状態蒸留などの重要な量子プロトコルの性能に関してより強力なバウンドが導出された。本研究は 2021 年度の研究 [B. Regula, Phys. Rev. Lett. 128, 110505 (2022)] の結果を拡張するものである。(担当：Regula)

＜受賞＞

[1] 吉田智治、理学系研究科研究奨励賞、東京大学理学系研究科、2023 年 3 月

[2] S. Yoshida, Poster Award in 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science, TSQS2022 Organizing Committee, Nov. 2022.

＜報文＞

(原著論文)

[3] B. Regula, *Tight constraints on probabilistic convertibility of quantum states*, Quantum **6**, 817 (2022)

[4] J. Bavaresco, M. Murao and M. T. Quintino, Unitary channel discrimination beyond group structures: Advantages of sequential and indefinite-causal-order strategies, J. Math Phys. 63, 042203 (2022)

[5] L. Lami and B. Regula, *No second law of entanglement manipulation after all*, Nat. Phys. **19**, 184 (2023)

[6] L. Lami and B. Regula, *Computable lower bounds on the entanglement cost of quantum channels*, J. Phys. A: Math. Theor. **56**, 035302 (2023)

[7] S. Yoshida, A. Soeda and M. Murao, *Universal construction of decoders from encoding black boxes*, Quantum **7**, 957 (2023)

[8] P. Taranto, F. Bakhshinezhad, A. Bluhm, R. Silva, N. Friis, M. P. E. Lock, G. Vitagliano, F. C. Binder, T. Debarba, E. Schwarzhans, F. Clivaz, M. Huber, *Landauer vs. Nernst: What is the True Cost of Cooling a Quantum System?,* accepted in Phys. Rev. X Quantum (2023)

(学位論文)

[9] S. Yoshida, *Higher-order quantum algorithms for universally inverting unitary and isometry operations* (ユニタリ変換およびアイソメトリ変換を普遍的に反転する高階量子アルゴリズム), 修士論文

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[10] H. Yamasaki, M. Koashi, "Time-Efficient Constant-Space-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation", *26th Conference on Quantum Information Processing (QIP2023)*, Ghent, Belgium, Feb. 2023 (short plenary talk)

[11] S. Yoshida, A. Soeda and M. Murao, "Probabilistic exact construction of decoders from encoding black boxes", *Quantum Physics and Logic 2022 (QPL 2022)*, Oxford, UK, Jul. 2022 (talk)

[12] Y. Hashimoto, A. Soeda and M. Murao, "Comparison of unknown unitary channels with multiple use", *15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15)*, Seoul, Korea, Aug. 2022 (talk)

[13] B. Regula, L. Lami and M. Wilde, "Overcoming entropic limitations on asymptotic state transformations through probabilistic protocols", *Beyond IID in Information Theory (BIID) 2022*, Shenzhen, China, Sep. 2022 (talk)

[14] S. Akibue, M. Owari, G. Kato and M. Murao, "Entanglement-assisted classical communication simulates "classical communication'' without causal order", *Time in Quantum Theory 2022*, Vienna, Austria, Sep. 2022 (talk)

[15] H. Yamasaki, K. Kuroiwa, "General Quantum Resource Theories: Maximal Resources, Catalytic Replication and Asymptotically Consistent Measures", *Quantum resources workshop*, Singapore, Dec. 2022 (talk)

[16] H. Kristjánsson, Giulio Chiribella, Sina Salek, Daniel Ebler, Matt Wilson, Yan Zhong and Anthony Munson, "General Resource theories of communication and coherent routing of information", *Quantum resources workshop*, Singapore, Dec. 2022 (talk)

[17] M. Berta, F. G. S. L. Brandão, G. Gour, L. Lami, M. B. Plenio, B. Regula and M. Tomamichel, "On generalised quantum Stein's lemmata and the reversibility of quantum resources", *26th Conference on Quantum Information Processing (QIP 2023)*, Ghent, Belgium, Feb 2023 (talk)

[18] S. Yoshida, A. Soeda and M. Murao, "Probabilistic exact construction of decoders from encoding black boxes", *5th Seefeld Workshop on Quantum Information*, Seefeld, Austria, Jun. 2022 (poster)

[19] S. Yoshida, A. Soeda and M. Murao, "Reversing unknown qubit-unitary operation, deterministically and exactly", *2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science*, Tokyo, Japan, Nov. 2022 (poster)

[20] W. Jun-Yi, K. Matsui, T. Forrer, A. Soeda, P. Andrés-Martın, D. Mills, L. Henaut and M. Murao, "Bipartite Distributed Quantum Computing with Entanglement-Assisting Packing Processes", *2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science*, Tokyo, Japan, Nov. 2022 (poster)

[21] W. Jun-Yi, K. Matsui, T. Forrer, A. Soeda, P. Andrés-Martın, D. Mills, L. Henaut and M. Murao, "Bipartite Distributed Quantum Computing with Entanglement-Assisting Packing Processes", *the JSPS Japan-NUS (Singapore) Joint seminar*, Tokyo, Japan, Feb. 2023 (poster)

[22] S. Yoshida, A. Soeda and M. Murao, "Universal decoding of a single qubit information: deterministic and exact protocol", *26th Conference on Quantum Information Processing (QIP2023)*, Ghent, Belgium, Feb. 2023 (poster)

[23] W. Jun-Yi, K. Matsui, T. Forrer, A. Soeda, P. Andrés-Martın, D. Mills, L. Henaut and M. Murao, "Entanglement-efficient bipartite-distributed quantum computing with entanglement-assisted packing processes",*26th Conference on Quantum Information Processing (QIP2023)*, Ghent, Belgium, Feb. 2023 (poster)

招待講演

[24] M. Murao, "Controlled quantum operations and combs, and their applications to universal controllization of divisible unitary operations", *5th Seefeld Workshop on Quantum Information*, Seefeld, Austria, Jun. 2022

[25] H. Kristjánsson, "On the practical realisability of indefinite causal order and its applications", *Causalworlds*, Zürich, Switzerland, Sep. 2022

[26] B. Regula, "Projective divergences and limitations of probabilistic state transformations", *Workshop on Quantum Information, Computation, and Foundations 2022 (QICF22)*, Kyoto, Japan, Oct. 2022

[27] M. Murao, "Fully-quantum learning: Comparison of unknown unitary channels with multiple uses", *Workshop on Quantum Information, Computation, and Foundations 2022 (QICF22)*, Kyoto, Japan, Oct. 2022

[28] M. Murao, "Universally superposing quantum operations toward quantum functional programming", *2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS2022)*, Tokyo, Japan, Nov. 2022

[29] S. Yoshida, "Universal inversion of unitary and isometry operations: deterministic and exact algorithms", *the JSPS Japan-NUS (Singapore) Joint seminar*, Tokyo, Japan, Feb. 2023

[30] H. Yamasaki, “Quantum Machine Learning with Optimized Random Features: Applications of Exponential Speedup without Sparse and Low-Rank Matrices”, *the JSPS Japan-NUS (Singapore) Joint seminar*, Tokyo, Japan, Feb. 2023

[31] H. Yamasaki, “Time-Efficient Constant-Space-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation”, *Quantum Error Correction Workshop*, Kyoto, Japan, Mar. 2023

[32] M. Murao, “Fully-quantum learning: Comparison of unknown unitary channels with multiple uses”, *Near-term quantum computing 2020(+3)*, Warsaw, Poland, Mar. 2023

(国内会議)

一般講演

[33] S. Yoshida, A. Soeda and M. Murao, “Universal decoding of a single qubit information: deterministic and exact protocol”, 第 *47* 回量子情報技術研究会 *(QIT47)*, Tokyo, Japan, Dec. 2022 (talk)

[34] S. Yoshida, A. Soeda and M. Murao, “Reversing unknown qubit-unitary operation, deterministically and exactly”, 第 *32* 回量子情報関東 *Student Chapter*, Kanagawa, Japan, Oct. 2022 (poster)

招待講演

[35] 村尾美緒, “量子力学から量子コンピュータまで”, 日本学術会議　公開シンポジウム「日本の物理学研究—過去・現在・未来」, 東京 (オンライン), 日本, Oct. 2022

[36] 村尾美緒, “量子系をプログラミングする”, 東京大学 AI センター連続シンポジウム 第 11 回「共進化する物理学と人工知能の現在」, 東京 (オンライン), 日本, Oct. 2022

[37] H. Yamasaki, “Outlook for Photonic Quantum Computing and Quantum Machine Learning”, *Session CI-3* 機械学習と光・*ICT* 技術*, IEICE (The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers) General Conference 2023*, Saitama, Japan, Mar. 2023

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

Yang-Lee 量子臨界現象の開放量子系への埋め込み

分配関数の零点として定義される Yang-Lee の零点は物理量の解析的性質を完全に特徴付け、それに伴い物理量やパラメータを複素平面へ解析接続する必然性が生じる。パラメータの実軸に最も近い、ゼロ点の分布の端は物理量の分岐点となっており、Yang-Lee 端特異性と呼ばれる非ユニタリー臨界現象を示す。この臨界現象は磁場の複素平面へ解析接続された物理量において実現するが、複素数の磁場が実現する状況や複素数の物理量の観測方法は未解明だった。また、物理的な直感に反する異常なスケーリング則が生じるが、その物理的意味も未解明だった。本研究では、量子古典対応に基づき、虚数磁場を伴う古典系と等価な臨界現象を示す非エルミートな量子系に着目した。はじめに、複素平面へと解析接続された物理量を拡大されたエルミート系に埋め込むと共に異常なスケーリング則の物理的意味を明らかにした。次に、有限温度量子系におけるスケーリング則を議論し、Yang-Lee の臨界指数との整合性を確認すると共に、虚時間方向の新奇なスケーリング則を発見した（図 5.3.1)。最後に、解析接続された物理量の実部と虚部をそれぞれ実験的に観測する方法を考案した。本研究成果により、非ユニタリー臨界現象の量子開放系における物理的実現について洞察が与えられる [6]。

散逸下の朝永-Luttinger 液体の普遍的性質

量子スピン系や電子系で見られる多くの量子臨界現象は一次元系では普遍的に朝永-Luttinger 液体理論で記述される。一方で、これはユニタリな量子場の理論であるため、散逸の存在により時間発展が非ユニタリとなったとき、量子臨界現象の普遍性クラスがどのような変更を受けるかは明らかではない。

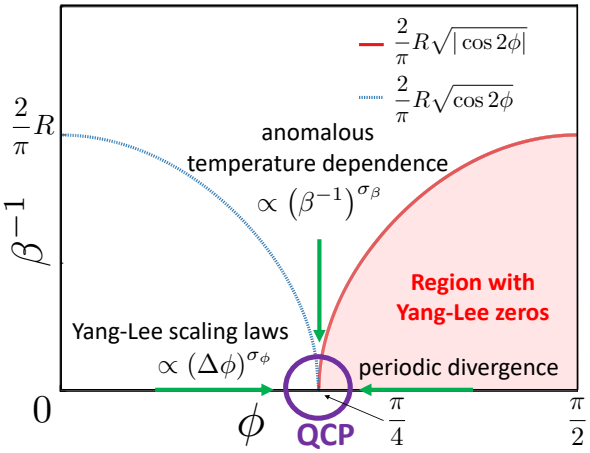

図 5.3.1: Yang-Lee 量子臨界現象の有限温度相図 [6]。量子臨界点（QCP）に横軸（ハミルトニアンの制御パラメータ）上の左側から近づく場合、Yang-Lee 端特異性に起因するスケーリング則が現れる。一方、縦軸（温度）側から近づく場合、古典系には現れない新奇なスケーリング則が現れる。

我々は、非弾性衝突による粒子ロスのある 2 成分冷却ボソン原子系で実現される非エルミート XXZ スピン鎖を用いて、散逸下の朝永-Luttinger 液体の普遍的性質を検証した。その結果、この系の量子臨界現象は朝永-Luttinger パラメータが複素数へと拡張された非ユニタリな朝永-Luttinger 液体理論で記述されることが明らかになった。まず、一次元非エルミート XXZ 模型を Bethe 仮設法を用いて厳密に解くことにより、複素朝永-Luttinger パラメータの厳密な表式を得た。さらに、ボソン化による場の理論と非エルミート系に拡張された密度行列くりこみ群による数値計算を用いて、朝永-Luttinger 液体理論の予言を定量的に確かめた。この結果は、中心電荷 $c = 1$ の共形場理論の非ユニタリ拡張を与える [2]。

長距離相互作用系における固有状態熱化仮説の成否

相互作用の大きさが系を構成する要素間の距離 r について $1/r^\alpha$ のように冪的に減衰する長距離相互作用系は、負の比熱や相関の異常伝播など多数の興味深い現象を示す熱・統計力学的に重要な対象である。イオントラップ系は、長距離相互作用系の研究に適した実験系であり、冪 α を 0 から 3 まで連続的に変化させることができる。この特性を活かし、長距離相互作用する孤立量子多体系における緩和ダイナミクスが調べられたが、実験の時間スケール内では熱平衡状態への緩和は観測されなかった。また、この結果が有限サイズ効果によるものなのか、それとも長距離相互作用は典型的に熱平衡化を妨げるのかは未解明だった。典型的な孤立量子多体系は、固有状態熱化仮説（Eigenstate Thermalization Hypothesis, ETH）によって熱平衡化すると広く信じられている。そこで本研究では、冪的 ($\sim 1/r^\alpha$) に減衰する 2 体長距離相互作用を含む 1 次元スピン系からなるランダム行列集団を構成し、その集団における ETH の典型性を厳密対角化による数値実験で検証した。その結果、少なくとも $\alpha \geq 0.6$ のとき ETH が典型的に成立することを実証した。一方、有限サイズ系においては、長距離相互作用によって物理量の平衡値が、(短距離系の場合と比べ) 熱平衡値から大きくずれることを発見した。このことは、前述の実験において熱平衡化が観測されなかったことは、実験系の有限サイズ効果によるものであることを示唆している [4]。

5.3.2 量子論・統計力学と情報理論・人工知能の融合

深層ネットワークを学習させる基礎理論

現代の人工ニューラルネットワークには何十億ものパラメータがあり、ニューラルネットワークの学習には対称性とその破れが自然に存在する。我々は最近の一連の研究で、ニューラルネットワークの損失ランドスケープにおける対称性が、崩壊として知られる深層学習における重要なクラスの現象をどのように引き起こすのかを明らかにした [8, 9, 12]。[8] では、ベイズ深層学習における posterior collapse の問題の理解を進めた。[12] では、自己教師あり学習の損失ランドスケープにおける回転対称性の役割を調べ、それが自己教師あり学習の設定でよく見られる dimensional collapse と関連していることを示した。

非平衡ダイナミクスにおける普遍的な熱力学的不確定性関係

非平衡統計力学の最近の進展は、ダイナミクスのエントロピー生成とこれらのダイナミクスにおける統計的観測量の揺らぎとの間に密接な関係があることを示している。様々な制限のある系において、ダイナミクスのエントロピー生成が、熱力学的変数の期待値をその分散で割った値の上界を与えることが見出されてきた。我々の最近の研究は、これらの上界が任意のマルコフ的な力学系に存在し、任意の種類の観測量に適用されることから、このような熱力学的不確定性関係が普遍的であることを示した [10]。この結果の普遍性により、確率熱力学と数理ファイナンスの基本法則の間に等価な関係があることを明らかにした。

強化学習による量子剛体の制御

ナノテクノロジーの発展に伴い、最近では、ナノ粒子をトラップすることで、十分に外界から孤立させ、重心自由度を冷却して基底状態に近づけ、量子

領域に入るように制御することが可能になった。しかし、ナノ粒子の回転自由度は、重心自由度の冷却に比べ制御がはるかに難しく、未だ冷却に成功した例はない。そこで、我々はトラップされたナノ粒子の冷却の問題を、ナノ粒子を量子力学的な剛体として扱うことで考察した [15]。まず、回転自由度に着目し、捕捉・測定・制御された回転剛体の量子力学モデルを構築し解析した。そして、冷却タスク、すなわち系のエネルギーを減らすことに、深層強化学習を応用した。深層強化学習は、この多次元連続空間における量子系の制御問題をうまく処理し、強化学習が連続空間における複雑な量子力学の問題を解決できること、量子力学的回転体はその量子的性質にもかかわらず、多くの場合にうまく制御可能であることを示した。

＜受賞＞

＜報文＞

(原著論文)

[1] Takumi Yoshino, Shunsuke Furukawa, and Masahito Ueda: Vortex lattices in binary Bose-Einstein condensates: Collective modes, quantum fluctuations, and intercomponent entanglement, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **55**, 105302 (2022).

[2] Kazuki Yamamoto, Masaya Nakagawa, Masaki Tezuka, Masahito Ueda, and Norio Kawakami: Universal properties of dissipative Tomonaga-Luttinger liquids: Case study of a non-Hermitian XXZ spin chain, Phys. Rev. B **105**, 205125 (2022).

[3] Takashi Mori, Liu Ziyin, Kangqiao Liu, and Masahito Ueda: Power-law escape rate of SGD, Proceedings of the 39th International Conference on Machine Learning, PMLR **162**, 15959, (2022) (ICML 2022).

[4] Shoki Sugimoto, Ryusuke Hamazaki, and Masahito Ueda: Eigenstate Thermalization in Long-Range Interacting Systems, Phys. Rev. Lett. **129**, 030602 (2022).

[5] Lennart Dabelow and Masahito Ueda: Three learning stages and accuracy-efficiency tradeoff of restricted Boltzmann machines, Nat. Commun. **13**, 5474 (2022).

[6] Norifumi Matsumoto, Masaya Nakagawa, and Masahito Ueda: Embedding the Yang-Lee quantum criticality in open quantum systems, Phys. Rev. Research **4**, 033250 (2022).

[7] Kohei Kawabata and Masahito Ueda: Nonlinear Landauer formula: Nonlinear response theory of disordered and topological materials, Phys. Rev. B **106**, 205104 (2022).

[8] Zihao Wang* and Liu Ziyin*: Posterior Collapse of a Linear Latent Variable Model, Neural Information Processing Systems (NeurIPS2022) [Oral].

[9] Liu Ziyin, Botao Li, and Xiangming Meng: Exact Solutions of a Deep Linear Network, Neural Information Processing Systems (NeurIPS2022).

[10] Liu Ziyin and Masahito Ueda: Universal thermodynamic uncertainty relation in nonequilibrium dynamics, Phys. Rev. Research **5**, 013039 (2023).

[11] Kantaro Honda, Shintaro Taie, Yosuke Takasu, Naoki Nishizawa, Masaya Nakagawa, and Yoshiro Takahashi: Observation of the Sign Reversal of the Magnetic Correlation in a Driven-Dissipative Fermi Gas in Double Wells, Phys. Rev. Lett. **130**, 063001 (2023).

[12] Liu Ziyin, Ekdeep Singh Lubana, Masahito Ueda, and Hidenori Tanaka: What shapes the loss landscape of self-supervised learning?, To be published in International Conference on Learning Representations 2023 (ICLR 2023).

(国内雑誌)

[13] 中川大也: 冷却原子と量子多体系 孤立系から開放系へ、数理科学 2022 年 12 月号、サイエンス社 (2022).

(学位論文)

[14] Norifumi Matsumoto: Theoretical study on non-unitary critical phenomena in the quantum Ising model （博士論文）.

[15] Zhikang Wang: Control of Continuous Quantum Systems with Many Degrees of Freedom based on Convergent Reinforcement Learning （博士論文）.

[16] Koki Shiraishi: Locality of the Quantum Master Equation in Open Quantum Many-Body Systems（修士論文）.

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[17] Masahito Ueda: Universal Thermodynamic Uncertainty Relation in Non-Equilibrium Dynamics, The 3rd Workshop on Stochastic Thermodynamics (WOST III), The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2022.5.30.

[18] Masaya Nakagawa: Exact Bethe-ansatz solutions for open quantum many-body systems, Workshop on Non-Hermitian Quantum Mechanics, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2022.7.4.

[19] Masahito Ueda: Non-Hermitian Physics, International Conference on Atomic Physics Summer School 2022, University of Waterloo, Waterloo, Canada, 2022.7.11.

[20] Masahito Ueda: Quantum Thermalization, International Conference on Atomic Physics Summer School 2022, University of Waterloo, Waterloo, Canada, 2022.7.12.

[21] Masahiato Ueda: Universal Thermodynamic Uncertainty Relation in Non-Equilibrium Dynamics, Entropy and the Second Law of Thermodynamics – The past, the present, and the future, Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung, Bad Honnef, Germany, 2022.7.15.

[22] Masahito Ueda: Spinor Bose-Einstein Condensates, International School of Physics “Enrico Fermi” on Quantum Mixtures with Ultra-Cold Atoms, International School of Physics “Enrico Fermi”Villa Monastero, Varenna, Italy, 2022.7.18-23.

[23] Masahito Ueda: Information Thermodynamics, Nobel Symposium NS166: Emerging quantum technologies, High Court, Malmo, Sweden, 2022.8.25.

[24] Masahito Ueda: Symmetry Breaking and Topological Excitations in Spinor Condensates, 2022 Pan-Pacific Workshop on Topology and Correlations in Exotic Materials, Gump Station Berkley, Moorea, Tahiti, 2022.10.24.

[25] Masahito Ueda: Non-Hermitian Quantum Physics, Physics Colloquium, University of Luxembourg Campus Limpertsberg, Luxembourg, 2023.2.22.

[26] Masahito Ueda: Beyond-Hermitian Quantum Physics, APCTP Spring Colloquium, Asia Pacific Center for Theoretical Physics, Pohang, Korea, 2023.03.17.

一般講演

[27] Masaya Nakagawa: Exact eigenstates of multicomponent Hubbard models: SU(N) magnetic η pairing and weak ergodicity breaking, Novel Quantum States in Condensed Matter 2022, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 2022.11.25.

[28] Hongchao Li, Xiehang Yu, Masaya Nakagawa, and Masahito Ueda: Yang-Lee Singularity in BCS Superconductivity, FoPM International Symposium, the University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2023.2.07

[29] Koki Shiraishi, Masaya Nakagawa, Takashi Mori, and Masahito Ueda: Fundamental equations for open quantum many-body systems, FoPM International Symposium, the University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2023.2.07

(国内会議)

招待講演

[30] 中川大也: 冷却原子系における近藤効果、冷却原子気体における少数量子系の普遍的性質、京都大学基礎物理学研究所、2022.8.23.

[31] 中川大也: 冷却原子気体における開放量子多体系の物理、KEK 素核研・物構研連携研究会、オンライン、2023.2.17.

一般講演

[32] 白石航暉、中川大也、上田正仁: Lieb-Robinson 限界と開放量子多体系の量子マスター方程式の局所性、日本物理学会 2022 年秋季大会、東京工業大学、2022.9.12.

[33] 中川大也、桂法称、上田正仁: 多成分 Hubbard 模型の部分可積分性：散逸によって誘起される非エルゴード的ダイナミクス、日本物理学会 2022 年秋季大会、東京工業大学、2022.9.13.

[34] 杉本昇大、濱崎立資、上田正仁: 量子多体系における連続スペクトル中の束縛エネルギー固有状態、日本物理学会 2022 年秋季大会、東京工業大学、2022.9.14.

[35] 杉本昇大、濱崎立資、上田正仁: 測定量に対する物理的制限が固有状態熱化仮説の成立に及ぼす影響、日本物理学会 2023 年春季大会、オンライン、2023.3.25.

(セミナー)

[36] Liu Ziyin: Does the Refractory Period Help Learning? A Spiking Neural Network Perspective, Harvard-LMU Young Scientists' Forum, 2022.7.

[37] Liu Ziyin: Collapse and Phase Transition in Deep Learning, NeuroTheory Seminar, Harvard University, 2022.10.11.

[38] Liu Ziyin: Collapse and Phase Transition in Deep Learning, Tomaso Poggio Lab, Massachusetts Institute of Technology, 2022.11.7.

[39] Hongchao Li: Yang-Lee Singularity in BCS Superconductivity, Department of Physics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, China, 2022.12.08.

[40] Liu Ziyin: Two Low-Rank Mechanisms in Deep Learning, Haim Sompolinsky Lab Seminar, Harvard University, 2023.1.16.

[41] Liu Ziyin: The Probabilistic Stability and Low-Rank Bias of SGD, Math Machine Learning seminar, Max Planck Institute/UCLA, 2023.1.26.

[42] Liu Ziyin: What shapes the loss landscape of Self-Supervised Learning?, NTT Japan, Musashino R& D Center, 2023.2.

[43] Shoki Sugimoto: Typicality of the eigenstate thermalization hypothesis in realistic systems with local interactions, MathPhys Analysis Seminar, IST Austria, 2023.3.2.

[44] Liu Ziyin: Collapse and Phase Transition in Deep Learning, 統計数理研究所, Japan, 2023.3.7.

5.4 横山 (順) 研究室

当研究室はビッグバン宇宙国際研究センターを本拠として、一般相対性理論、場の量子論、素粒子物理学等の基礎物理学理論に基づいて宇宙論と重力理論の理論的研究を幅広く行うとともに、理学部物理学教室の教育と研究に参画しています。また、大型低温重力波検出器 KAGRA の本格稼働を迎え、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。横山は 2021 年 9 月から KAGRA 科学会議議長を務めるとともに [45, 48, 51, 52]、2022 年末まで 3 年間アジア太平洋物理学会連合会長として域内の物理学の振興に務めました [46, 47, 49]。

5.4.1 宇宙論: 時空構造

真空相転移のローレンツ経路積分による考察

真空相転移はユークリッド化された時空での経路積分により定式化されてきたが、終状態の曖昧さや重力存在下での負モードの唯一性の破れといった問題がある。そこで本研究では、実時間において真空相転移の確率をローレンツ経路積分で直接定式化し、鞍点法により評価することを試みた。その結果、重力を背景時空として扱った場合、ローレンツ経路積分による解析は、従来のユークリッド経路積分で予言される相転移確率を再現した。さらに、ユークリッド経路積分では評価できなかった、臨界半径とは異なる大きさを持つ真空泡の生成についても、その生成確率を評価した [5, 30, 54]。

単一場インフレーション模型における高次量子効果

我々は、単一場インフレーション模型における曲率揺らぎの 2 点相関関数に対する 3 点相互作用からの 1 ループ補正を計算し、それが古典的な寄与より十分小さくなることを要請することにより、原始非ガウス性揺らぎに上限を与えた。特に、観測的に許される非ガウス性の範囲はこの制限を満たすが、1 ループ補正が古典的な寄与の $1 \sim 10$ % 程度になる領域もあるので、将来観測がそのような値を示唆した場合、高次のループ補正を考慮することが重要になる [6, 28, 33, 35, 39, 61, 105, 107]。

原始ブラックホール (PBH) 生成機構として最も研究されているものに、単一場インフレーションにおいて作られた大きな振幅を持つ小スケール密度揺らぎの崩壊が挙げられる。我々は、大スケールにおける密度揺らぎのパワースペクトルへの 1 ループ補正を計算し、大量の PBH を作るような小スケール揺らぎは CMB スケールに大きな補正を与え、矛盾を来すことを示した [55, 56, 66, 74, 78, 92, 109, 113, 114, 108]。

初期宇宙の一次相転移と重力波

初期宇宙の一次相転移は音波・乱流等の流体の運動を引き起こし、それによって生成した重力波が宇宙空間干渉計で将来的に観測される可能性がある。我々は音波からの重力波生成のシミュレーションを提案した [84] ほか、相互作用の弱い粒子がこのプロセスに関与した場合に特徴的な重力波シグナルが出現する可能性を指摘し [77, 85, 111]、重力の影響を考慮した場合の原始ブラックホール生成の可能性も議論した [87]。また物理学会で概説を行った [91]。

数理解析と宇宙論

LIGO/Virgo によるブラックホール連星からの重力波初観測以降、連星系の運動を解析的に理解する post-Newtonian 或いは post-Minkowskian 理論が発展している。この際必要となるファインマン積分において、展開の高次になると解析的計算が難しくなるという問題を回避するには、積分を数値的に高精度で評価した結果から解析的表式を推測すると良い。この数値評価に、機械学習を活用した normalizing flow という手法でモンテカルロ積分を行った結果、通常のモンテカルロ積分と比べてどのような改善が見られるか報告した [80, 86]。

Stochastic inflation において、相関関数の e-folding 展開が一般に発散級数となることが知られている。そこで本研究では、発散級数に解析的意味付けを与える Borel 総和の手法を用いてこれを処理し、相関関数の正しい時間発展が得られることを示した。また Borel 空間における特異点の解析から、本研究で扱った $\lambda\phi^4$ 模型では非摂動効果の非存在が示唆された [83, 89]。

我々はグラディエントフローを空間方向に 4 階微分へと拡張した方程式が、場の量子論における鞍点解へ自動的に収束する振る舞いをすることを発見し、報告した [89]。

宇宙複屈折の精密計算

宇宙複屈折とは、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) が伝播中にその偏光面が回転する現象を指し、近年 CMB の観測データからその存在が示唆されている。本研究では、これまで考慮されていなかった重力レンズ効果を取り入れた理論計算を実現し、将来の高精度観測では、その効果が必ずしも無視できないことを示した [7, 22, 25, 37, 41, 43, 75, 81]。

5.4.2 宇宙論: 物質の起源と進化

インフレーション後の宇宙再加熱と物質生成

インフレーション後の宇宙が運動項優勢になるような模型では、宇宙再加熱をどう実現するかに問題があったが、我々はインフラトンが U(1) ゲージ場と

Chern-Simons 結合をしている場合、ゲージ場がまず増幅され、そこからシュウィンガー効果により物質粒子が生成されることにより、放射優勢のビッグバン宇宙が再現されることを示した [8] 。

インフレーション後場が振動せず運動項優勢となる理論での再加熱機構として、ヒッグス場に時空曲率との結合を与え、インフレーション後にスピノーダル不安定性を実現する方法も考えられる。われわれは、このような理論に階層的な質量を持つ三世代の右巻きニュートリノを導入することにより、宇宙再加熱、ダークマター、バリオン非対称生成を同時に実現するシナリオを構築した [9]。

また、こうした重い右巻きニュートリノを導入することにより、観測との相性がとても良い R^2 インフレーション理論の再加熱機構がどのように変化し、それがスペクトル指数やバリオン非対称などの観測量にどのような影響を与えるのかを仔細に研究し、定量的に明らかにした [40, 64, 73]。

アクシオンインフレーション

Axionic inflaton と U(1) ゲージ場の間に Chern-Simons 結合があると、偏極に依存したタキオン不安定性によってゲージ場が成長することが知られている。我々はこの系に対する準解析的なアプローチを提案し [10, 29, 57, 58]、荷電粒子生成による反作用を取り入れた場合の電磁場の強度の推定に成功した。この結果は初期磁場やバリオン数、原始重力波や原始ブラックホールの生成等の現象論的帰結に重要な示唆を与えるものである。

また、この Chern-Simons 結合により、インフレーション終了後にヘリシティを持った磁場とバリオン非対称が既に生成されている状況が実現される。その後の時空の発展とともに、磁場とバリオン非対称が対消滅する可能性があるが、我々は、右巻きニュートリノの存在下において完全な対消滅を回避し、最終的に現在の宇宙のバリオン非対称が説明できるシナリオを構築することに成功した [11, 53, 90, 93, 94, 97, 99]

宇宙論におけるカイラル効果

カイラル量子異常に代表されるカイラル効果は、宇宙論においても重要な役割を果たしうる。このテーマに関する総説を書く [12] とともに、我々は、カイラル効果によりエネルギー的にも安定化されるカイラルソリトン格子と呼ばれるドメインウォールの宇宙における量子トンネルによる生成率を南部後藤作用を用いて評価することに成功した [13, 44]。また、宇宙にレプトンの存在量の世代間に大きな非対称があった場合、高温においてカイラルプラズマ不安定と呼ばれる機構によって強い磁場生成が起こることを示し、レプトン非対称にこれまでより強い制限がかかることを明らかにした [79, 100, 102, 103]。

スファレロン脱結合によるバリオン非対称生成機構

近年、素粒子標準模型内で実現できるバリオン数非対称生成のシナリオが新しく提案された。宇宙膨張によるスファレロン脱結合で熱平衡からのずれができると主張し、CP の破れはスファレロン性質のため、従来思われたより多く稼げるという定性的な評価があった。しかし、このシナリオでは、まだ脱結合していないスファレロンによる、できたバリオン数を消す効果を考慮しなかった。本研究でその効果を入れて、このシナリオで生成できるバリオン数が僅少にとどまることを示した [21, 72, 82]。

条件付き確率を用いた原始ブラックホール形成条件

原始ブラックホールの形成判定を行なうにあたって、曲率揺らぎで表される圧縮関数と呼ばれる指標を用いた判定方法がある。圧縮関数は揺らぎの平均的なプロファイルが与えられて具体的に調べられるのが常であるが、本研究では、平均プロファイル近似に頼らない定式化の構築を目的として、条件付確率分布関数を用いる方法を考察した [26, 59, 65]。

初期磁場の時間発展とバリオン等曲率揺らぎ生成

初期宇宙における磁場の時間発展を理解することは、初期磁場研究における定量的な議論の基礎となる。本研究では、近年提案された保存量 Hosking integral に基づいて磁場の時間発展の理論を再構築し、数値計算と整合的に初期磁場の時間発展を記述した [27, 31, 36, 60, 63, 69, 110, 112, 115]。

また、宇宙磁場の起源に関して、とくに電弱対称性が回復した相における磁場生成シナリオについて一般的な議論を行なった。$U(1)_Y$ 磁気ヘリシティがカイラル量子異常を通じて物質反物質非対称性と結びついていることから、磁場のゆらぎに由来するバリオン等曲率揺らぎ生成が帰結される。バリオン等曲率揺らぎに対する宇宙論的制限から、このようなシナリオは観測的に示唆されるボイド磁場の強度を説明できないことを示した [34, 104, 106]。

5.4.3 重力波検出器 KAGRA データ解析

環境モニターを用いた雑音除去手法の開発

我々は独立成分解析 (ICA) と呼ばれる信号処理手法を用いた独自の雑音除去手法の開発に長らく取り組んできた。KAGRA 初の観測データに対して独立成分解析 (ICA) と呼ばれる信号処理手法を用いた独自の雑音除去手法を適用することで、重力波の観測周波数帯域において影響が顕著であった音響雑音等の削減に成功した [14]。また、この研究を通して培われた解析手法を用いて、2022 年 1 月のフンガ・トンガ噴火時の環境モニターの応答が調べられた [15]。

現在は非線形雑音の除去手法を実装し、雑音を人工的に注入した試験データの解析に取り組んでいる。

粒子放射と重力波を用いた宇宙ひもの観測的制限

宇宙ひものループが重力波の放射と素粒子の放射のどちらによって崩壊するかについては決定的な結論は出ていない。そこで本研究では、素粒子と重力波双方の放出を仮定した上での解析を可能とする定式化を行い、近年のパルサータイミングアレイの観測結果等を用いた制限を導出した [16, 24, 32, 38, 88]。

軽量ダークマター探索

サファイア鏡を使っている KAGRA では、干渉計の補助チャンネルを利用した軽量ベクトル場ダークマターのユニークな探索が可能であり、10^{-13} eV 程度以下の質量を持つ B-L ゲージボゾンを、既存の上限値を 1 桁以上上回る感度での探索が可能となる見込みである。現在、KAGRA 初の観測データからの制限を算出するため、軽量ベクトル場ダークマターの統計的性質を明らかにした我々の研究に基づいた解析パイプラインを開発中である [42]。

KAGRA 全著者論文, LVK 論文

KAGRA プロジェクトの認定著者として横山、粂、上野は全著者論文の著者に名を連ねている [17, 18]。また、LIGO, Virgo と KAGRA は協定を結んでいるため、第三観測期の論文は LVK 論文として KAGRA の認定著者は著者になっている。後者については掲載を省略する。

5.4.4 時間領域天文学

Tomo-e Gozen カメラによる赤色矮星フレアの観測

東京大学木曽観測所の 105 センチシュミット望遠鏡に取り付けられた Tomo-e Gozen カメラを用いて、毎秒 2 フレームという高速撮像で取得した多数の天体データを解析し、これまでに観測されたことの無かった高速なものを含む赤色矮星のフレアを 22 件検出することに成功した [19, 118]。

＜受賞＞

[1] J. Kume, 26th International Summer Institute on Phenomenology of Elementary Particle Physics and Cosmology, Best Poster Award, September 2022.

[2] J. Kristiano, Poster award, 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS), The University of Tokyo, 2022/11/11.

[3] 鄭玄, 優秀発表賞, Joint workshop on General Relativity and Cosmology, 2023/3/13-14.

[4] 直川史寛, 理学系研究科研究奨励賞, 理学系研究科, 2023 年 3 月 23 日.

＜報文＞

(原著論文)

[5] T. Hayashi, K. Kamada, N. Oshita and J. Yokoyama, “Vacuum decay in the Lorentzian path integral”, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **05** (2022) 041.

[6] J. Kristiano and J. Yokoyama, “Perturbative region on non-Gaussian parameter space in single-field inflation”, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **07** (2022) 007.

[7] K. Murai, F. Naokawa, T. Namikawa, E. Komatsu,“Isotropic cosmic birefringence from early dark energy” , Physical Review D **107**(2023) L041302.

[8] S. Hashiba, K. Kamada, H. Nakatsuka, “Gauge field production and Schwinger reheating in runaway axion inflation”, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **04** (2022) 058.

[9] K. Fujikura, S. Hashiba, and J. Yokoyama, “Generation of neutrino dark matter, baryon asymmetry, and radiation after quintessential inflation”, Physical Review D **107** (2023) 063537.

[10] T. Fujita, J. Kume, K. Mukaida and Y. Tada, “Effective treatment of U(1) gauge field and charged particles in axion inflation”, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **09** (2022), 023.

[11] V. Domcke, K. Kamada, K. Mukaida, K. Schmitz, and M. Yamada, “Wash-in leptogenesis after axion inflation”, Journal of High Energy Physics **01** (2023) 053.

[12] K. Kamada, N. Yamamoto, and D-L. Yang, “Chiral effects in astrophysics and cosmology”, Progress in Particle and Nuclear Physics **129** (2023) 104016.

[13] T. Higaki, K. Kamada, and K. Nishimura, “Formation of a chiral soliton lattice”, Physical Review D**106** (2022) 9, 096022.

[14] H. Abe et al. (incl. J. Kume, K. Ueno, J. Yokoyama), “Noise subtraction from KAGRA O3GK data using Independent Component Analysis”, Class. Quant. Grav. **40** (2023) 085015.

[15] T. Washimi *et al.* (incl. J. Kume, J. Yokoyama) “Response of the underground environment of the KAGRA observatory against the air pressure disturbance from the Tonga volcanic eruption on January 15, 2022”, PTEP **2022** (2022) no.11, 113H02.

[16] M. Hindmarsh and J. Kume, “Multi-messenger constraints on Abelian-Higgs cosmic string networks”, [arXiv:2210.06178 [astro-ph.CO]], Journal of Cosmology and Astroparticle Physics in press.

[17] KAGRA collaboration, "Input optics systems of the KAGRA detector during O3GK", PTEP **2023** (2023) no.2, 023F01.

[18] KAGRA collaboration with LIGO Scientific and Virgo collaborations, "First joint observation by the underground gravitational-wave detector KAGRA with GEO 600", PTEP **2022** (2022) no.6, 063F01.

[19] M. Aizawa *et al.* (incl. F. Naokawa), "Fast optical flares from M dwarfs detected by a one-second-cadence survey with Tomo-e Gozen", Publications of the Astronomical Society of Japan, **74**, 5, pp.1069-1094, 2022.

(学位論文)

[20] 粂潤哉, "Consequences of gravitational parity violation in particle cosmology" (博士論文).

[21] 洪木子, "スファレロン脱結合によるバリオン非対称生成機構の考察" (修士論文).

[22] 直川史寛, "重力レンズ効果を取り入れた宇宙マイクロ波背景放射の旋光現象の精密計算" (修士論文).

(著書)

[23] 横山順一（監修）『文系のための東大の先生が教える宇宙の終わり』(ニュートンプレス)　2023 年 3 月。

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[24] J. Kume, "Abelian-Higgs cosmic string model and its multi-messenger signals", RESCEU Summer School 2022, Online, 2022/8/17-19.

[25] F. Naokawa, "Gravitationally Lensed Cosmic Birefringence", 同上。

[26] K. Tokeshi, "Two-point correlation in primordial black hole formation", 同上。

[27] F. Uchida, "Magneto-hydrodynamic evolution of the cosmological magnetic fields", 同上。

[28] J. Kristiano, "Perturbative region on non-Gaussian parameter space in single-field inflation", The 15th Asia-Pacific Physics Conference (APPC15), Online, 2022/08/22-26.

[29] J. Kume, "A new treatment of U(1) gauge field and charged particles in the axion inflation", 同上。

[30] T. Hayashi, "Lorentzian analysis of vacuum decay", 同上。

[31] F. Uchida, "The scaling evolution of the cosmological magneto-hydrodynamic system", 同上。

[32] J. Kume, "Towards the multi-messenger constraint on the Abelian-Higgs cosmic string model"(poster), The 26th Summer Institute, Fuji-Yoshida, Japan, 2022/9/18-22.

[33] J. Kristiano, "One-loop perturbativity bound in single-field inflation", 同上。

[34] F. Uchida, "Baryon isocurvature constraints about the origin of the cosmological magnetic field" 同上。

[35] J. Kristiano, "One-loop perturbativity bound in single-field inflation", JGRG31, The University of Tokyo, 2022/10/24-28.

[36] F. Uchida, "The magneto-hydrodynamic evolution of the cosmological magnetic fields", 同上。

[37] F. Naokawa,"Gravitationally Lensed Cosmic Birefringence for the precise prediction", 同上。

[38] J. Kume, "Multi-messenger constraints on the Abelian-Higgs cosmic string model", 同上。

[39] J. Kristiano, "One-loop perturbativity bound in single-field inflation" (poster), 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS), The University of Tokyo, Japan, 2022/11/10.

[40] H. Jeong, "R^2 inflation with the baryogenesis scenario", FoPM International Symposium, The University of Tokyo, Japan, 2023/2/6-8.

[41] F. Naokawa,"Weak lensing effect on cosmic birefringence and its tomographic analysis", FY2022 "What is dark matter? -Comprehensive study of the huge discovery space in dark matter-", Kavli IPMU, Japan, 2023/03/07.

[42] J. Kume, "Vector Dark Matter Search with KAGRA -updates for O3GK data analysis-", 同上。

[43] F. Naokawa,"Weak lensing and cosmic birefringence", Workshop on Very Light Dark Matter 2023, Nagano, Japan, 2023/03/27.

[44] K. Kamada, "Quantum Nucleation of Chiral Soliton Lattice", 同上。

招待講演

[45] J. Yokoyama, "Introduction to KAGRA experiment", Synergies at new frontiers at gamma-rays, neutrinos and gravitational waves, ICRR, The University of Tokyo, 2022/3/24 （昨年度の未掲載分）.

[46] J. Yokoyama, "Cooperation in physics in the Asia Pacific Region", IUPAP centennial symposium, Trieste, Italy, 2022/7/12.

[47] J. Yokoyama, "Cooperation in physics in the Asia Pacific Region through AAPPS", Global Physics Summit, Yonsei University, Korea 2022/8/22.

[48] J. Yokoyama, "Status of KAGRA in September 2022", LIGO-Virgo-KAGRA meeting, Cardiff University, UK, 2022/9/14.

[49] J. Yokoyama, "Mid-to-long term future through Asia Pacific physics cooperation", APCTP basic science forum, Korea, 2022/10/25.

[50] J. Yokoyama, "Closing remarks", 2nd international symposium on trans-scale quantum science, Trans-Scale Quantum Science Institute, The University of Tokyo, 2022/11/11.

[51] J. Yokoyama, “Status of KAGRA in September 2022”, LIGO-Virgo-KAGRA meeting, Northwestern University, USA, 2023/3/15.

[52] J. Yokoyama, “KAGRA toward O4 and beyond”, 15th Asia Pacific Physics Conference, Korea, online 2022/8/22-25.

[53] K. Kamada, “Wash-in Leptogenesis in the axion inflationary magnetogenesis scenario”, 同上。

[54] K. Kamada, “Lorentzian Description of the 1st Order Phase Transition”, Online Workshop “Physics of the Early Universe”, Online, 2022/6/16.

[55] J. Kristiano, “Primordial black holes from single-field inflation?”, Cosmology and Particle Astrophysics (CosPA 2022), Online, 2022/11/30.

[56] J. Kristiano, “Ruling out primordial black hole formation from single-field inflation”, Workshop on Dynamics of primordial black hole formation, Rikkyo University, 2023/03/10.

(国内会議)

一般講演

[57] 粂潤哉, “Production of gauge field and charged particles during axion inflation”(ポスター), 素粒子物理学の進展 2022, 京大基研, 2022/8/29-9/2.

[58] 粂潤哉, “axion inflation 中の U(1) ゲージ場生成と荷電粒子による反作用の帰結”, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 岡山理科大学, 2022/9/6.

[59] 渡慶次孝気, “二点相関による原始ブラックホール質量関数の補正”, 同上。

[60] 内田経夫, “宇宙磁場の磁気流体力学的発展の包括的記述”, 同上。

[61] J. Kristiano,“Perturbative region on non-Gaussian parameter space in single-field inflation”, 同上。

[62] 横山順一, “My back page 2022”, JGRG31 サテライト会、小柴ホール 2022/10/28.

[63] 内田経夫, “初期磁場発展の記述の精密化”, 第 35 回理論懇シンポジウム, 福島市, 2022/12/21-23.

[64] 鄭玄, “R^2 インフレーション理論におけるバリオン数生成”(ポスター), 同上。

[65] 渡慶次孝気, “原始ブラックホール質量スペクトルが持つ系統的バイアス”(ポスター), 同上。

[66] J. Kristiano, “Ruling out primordial black hole formation from single-field inflation”, Early Universe Mini-Workshop, Kobe RIKEN, 2023/01/31.

[67] J. Yokoyama, “Postscript 2019 or: How I learned to continue worrying and got involved in KAGRA”, Workshop on “Fundamental Cosmology: from Beginning to End”, 富士河口湖町, 2023/3/4-5.

[68] J. Kume, “Noise subtraction in Kagra data analysis”, 同上。

[69] F. Uchida, “On the evolution of the primordial magnetic field”, 同上。

[70] R. Jinno, “Gravitational waves from first-order phase transitions”, 同上。

[71] K. Kamada, “Chiral effects in cosmology”, 同上。

[72] 洪木子, “スファレロン脱結合によるバリオン非対称生成機構の考察”, Joint workshop on General Relativity and Cosmology, 奥多摩町福祉会館, 2023/3/13.

[73] 鄭玄, “R^2 インフレーション理論におけるバリオン数生成”, 同上。

[74] J. Kristiano, “Ruling out primordial black hole formation from single-field inflation”, 同上。

[75] 直川史寛、“宇宙複屈折に対する弱重力レンズ補正”, 日本天文学会 2023 年春季年会, 立教大学, 2023/3/15.

[76] 粂潤哉, “宇宙論的一次相転移における流体の自己重力の影響について”, 日本物理学会第 78 回年次大会, オンライン開催, 2023/3/22-25.

[77] 神野隆介, “Gravitational waves from feebly-interacting particles”, 同上。

[78] J. Kristiano, “Ruling out primordial black hole formation from single-field inflation”, 同上。

[79] K. Kamada, “A new constraint on lepton flavor asymmetry in the early Universe through the chiral plasma instability”, 同上。

[80] 神野隆介, “Machine learning post-Minkowskian integrals”, 同上。

[81] 直川史寛, “宇宙複屈折に対する重力レンズ効果”, 同上。

[82] 洪木子, “スファレロン脱結合によるバリオン非対称生成機構の考察”, 同上。

[83] 渡慶次孝気, “Stochastic Inflation における Borel 総和法の適用”, 同上。

[84] 神野隆介, “Higgsless simulations of cosmological phase transitions and gravitational waves”, 同上。

招待講演

[85] R. Jinno, “Gravitational waves from feebly interacting particles in a first order phase transition”, 新ヒッグス勉強会第 35 回定例会, 大阪大学, 2022/11/18.

[86] 神野隆介, “Machine learning Post-Minkowskian integrals”, オンラインセミナー「機械学習と物理学」, オンライン開催, 2022/12/22.

[87] R. Jinno, “Self-gravitation and possible PBH formation in first-order phase transitions”, 新ヒッグス勉強会第 36 回定例会, 大阪大学, 2023/2/14.

[88] 粂潤哉, “Gravitational wave observations as a probe of particle cosmology”, Joint workshop on General Relativity and Cosmology, 奥多摩町福祉会館, 2023/3/13.

[89] R. Jinno, “Quartic Gradient Flow / Borel Resummation in Stochiastic Inflation”, Kobe Workshop on Cosmology and Fundamental Physics 2023, 神戸大学, 2023/3/18.

[90] 鎌田耕平, “磁 Baryogenesis、または磁気ヘリシティの減衰によるバリオン数生成”, NITEP 素粒子現象論研究会 2022, 大阪公立大学, 2023/3/18.

[91] 神野隆介, “一次相転移からの重力波観測に向けて”, 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023/3/22.

[92] J. Kristiano, “Bispectrum and one-loop correction in PBH formation from single-field inflation”, 国内モレキュール型研究会「原始密度ゆらぎの非線形成長とその観測的帰結」, 京大基研, 2023/03/27.

(セミナー)

[93] K. Kamada, “Wash-in leptogenesis – a natural way to rescue $B+L$ genesis –”, 東京工業大学, 2022/4/13.

[94] K. Kamada, “Magnetogenesis, Baryogenesis, and Wash-in Leptogenesis in Pseudoscalar Inflation”, The Uni Melbourne Theoretical Particle Physics seminar, University of Melbourne, 2022/4/27.

[95] J. Kume, “Chiral asymmetry and gravitational waves”, CosmoCoffee, Helsinki Institute of Physics, 2022/5/12.

[96] J. Kume, “Gravitational Chiral Anomaly and Gravitational Waves”, GW-CERN-UNIGE meeting, University of Geneva(online), 2022/6/14.

[97] K. Kamada, “Cosmology with Chiral Effects”, APEC seminar, Kavli IPMU, University of Tokyo, 2022/6/24.

[98] J. Kume, “Gravitational Chiral Anomaly and Gravitational Waves”, Aarhus University, 2022/6/28.

[99] 鎌田耕平, “ Conserved Charges in the Early Universe and Wash-in Leptogenesis”, 慶應義塾大学高エネルギー物理研究室, オンライン, 2022/7/15.

[100] K. Kamada, “Large Lepton Flavor Asymmetry induced Chiral Plasma Instability”, Rice University, 2022/9/13.

[101] J. Yokoyama, “Generation of neutrino dark matter, baryon asymmetry, and radiation after quintessential inflation”, Portsmouth University, 2022/9/16.

[102] K. Kamada, “Chiral Plasma Instability Constrains Large Lepton Flavor Asymmetries”, University of Minnesota, 2022/9/23.

[103] K. Kamada, “Chiral Magnetic Effect, Chiral PlasmaInstability, and Baryon (Over)Production from Large Lepton Flavor Asymmetry”, University of California at Irvine, 2022/9/30.

[104] 内田経夫, “初期磁場に対するビッグバン元素合成からの制限”, 埼玉大学素粒子論研究室, 2022/11/18.

[105] J. Kristiano, “One-loop perturbativity bound in single-field inflation”, 東京大学素粒子論研究室, 2022/11/28.

[106] F. Uchida, “BBN constraint on the origin of the cosmological magnetic field”, 東京工業大学, 2022/11/30.

[107] J. Kristiano, “One-loop perturbativity bound as a constraint on single-field inflation and primordial black hole formation”, The University of Athens, Online, 2022/12/06.

[108] K. Kamada, “Baryon asymmetry of the Universe induced from Axion Inflation”, 神戸大学, 2022/12/21.

[109] J. Kristiano, “Ruling out primordial black hole formation from single-field inflation”, 名古屋大学物理 C 研, 2023/01/19.

[110] F. Uchida, “Toward the description of the evolution of the primordial magnetic field”, Cosmology Initiative, Arizona State University, 2023/2/3.

[111] 神野隆介, “Gravitational waves from feebly-interacting particles”, 富山大学理論物理学研究室, 富山大学, 2023/2/6.

[112] F. Uchida, “Analytic description of the evolution of the primordial magnetic field”, 慶應義塾大学高エネルギー物理研究室, オンライン, 2023/2/24.

[113] J. Kristiano, “Ruling out primordial black hole formation from single-field inflation”, 中国科学院理論物理学研究所 オンライン 2023/02/28.

[114] J. Kristiano, “Ruling out primordial black hole formation from single-field inflation”, KEK 理論センター 2023/03/02.

[115] F. Uchida, “On the description of the evolution of the primordial magnetic field”, internal seminar at Astrophysics and Cosmology groups, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 2023/3/6.

[116] J. Yokoyama, “Imprints of quantum physics on the universe”, Physics Colloquium, University of Wisconsin, Madison, 2023/3/7.

(アウトリーチ)

[117] 鎌田耕平, “素粒子と重力の理論で迫る宇宙の始まり”, 宇宙の「はじまり」に迫る, 朝日カルチャーセンター横浜教室, 2022/7/2.

[118] 逢澤正嵩, 樫山和己, 直川史寛, 大澤亮, 酒向重行, “広視野動画撮影でとらえた赤色矮星たちの短時間閃光現象”, プレスリリース, 東京大学大学院理学系研究科, 2022/8/9.

[119] 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 85-108 回 上毛新聞社。

6　一般物理実験

6.1　江尻研究室

当研究室では、核融合エネルギー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 装置を用いた実験的研究を行うと共に、量子科学技術研究開発機構、核融合科学研究所、九州大学、筑波大学等との共同研究を進めており、英国トマカクエナジー社等の海外機関との共同研究も実施している。TST-2 では強力な波動加熱により、プラズマ中に高エネルギー電子を発生させ、電流を駆動し、極めて自律的で非線形性の大きいプラズマを生成している。当研究室では、波動や高エネルギー電子が生み出す多彩な物理に取り組んでいる。

6.1.1　TST-2 実験の概要

TST-2 は球状トカマク（ST）型の装置であり、プラズマの主半径、小半径はおよそ 0.36、0.23 m、電磁誘導、高周波波動を用いた最大プラズマ電流はそれぞれ 120、27 kA であり、国内の大学の一研究室規模としては、もっとも高温のプラズマを生成することが可能な装置である。TST-2 では、主として低域混成波（Lower-Hybrid Wave, LHW）を用いて高エネルギー電子を生成し、それにより電流を駆動する研究を行っている。2022 年度は、新たにオフミッドプレーンから LHW を入射するアンテナを TST-2 に設置し、実験を開始した。低パワーでの初期実験では、当初目的であった中心部での加熱効率改善が見られた。アンテナで励起した LHW は進行方向や波長を変えながらプラズマ中を伝搬し、ランダウ減衰によって電子を加速すると考えられるが、測定されるその効率（電流駆動効率）は、シミュレーションの予測値よりも低いことがあり、その違いが未解明であった。これまでの研究でいくつかの要因がリストされ、それらの要因の検証、シミュレーションへの反映を進めている。要因の一つは非線形波動生成であり、これまでよりも広い範囲を探索した結果、新たな周波数掃引モードを発見した。また、これまで知られていたパラメトリック崩壊不安定性によって生成された波動がイオン加熱を引きこすことが新たにわかった。電流駆動効率を悪化させる要因の一つは高エネルギー電子の軌道の広がりによる損失であり、損失をより詳細に調べるための硬 X 線計測システムを拡充させ、アンテナによる違い、空間分布情報を得た。これまでの研究から磁場配位のわずかな違いが波動伝搬や電流駆動効率に大きく影響することがわかり、磁場配位を直接測定する手段として、マイクロ波偏光計の開発を行っている。2022 年度は、既知の磁場の測定が可能であることを実際のプラズマを使って検証した。プラズマの状態を知るための計測の開発は重要であり、上述の偏光計に加えて、ダブルパストムソン散乱法、小型磁気プローブ、分光計測の開発を行っている。

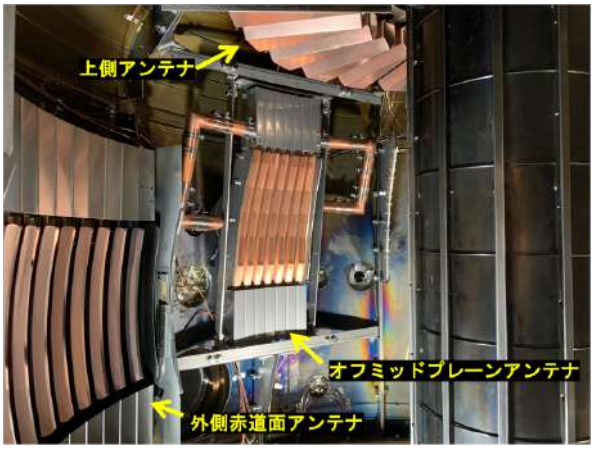

図 6.1.1: 新しく TST-2 に設置されたオフミッドプレーンアンテナ及び外側赤道面アンテナと上側アンテナ。

6.1.2　低域混成波によるトカマクプラズマの非誘導生成

オフミッドプレーン入射シナリオ

プラズマ中心での波の吸収を改善するために、昨年度から設計を進めていた屈折率 $N_{\parallel} \sim 13$ を持つオフミッドプレーンアンテナを制作・設置し、プラズマ生成実験を行った。図 6.1.1 に TST-2 装置へ設置された 3 台のアンテナを示す。TST-2 装置へ設置後の新オフミッドプレーンアンテナの透過率は 81 % で、反射率は 5 %であった。同程度のプラズマ電流値、入射パワーにおいて新オフミッドプレーン入射では外側赤道面入射に比べて低密度が実現された。また、オフミッドプレーン入射では上側入射に比べて X 線の放射強度が小さいことから、軌道損失が低減していることが示唆された。中心の電子温度は外側赤道面入射 6 eV、上側入射 3 eV に対してオフミッドプレーン入射 17 eV となり、プラズマ中心での波の吸収を改善できたと考えられる。

パラメトリック崩壊による非線形イオン加熱

LHW は線形には電子にのみ吸収され、電流を駆動する。このため、線形理論の範囲ではイオン加熱は

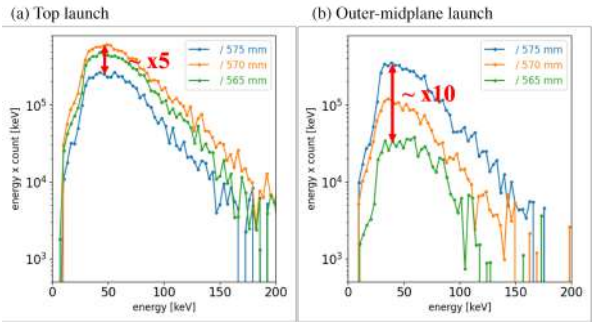

図 6.1.2: (a) 上側入射時 (b) 外側入射時に観測されたターゲット板からの X 線放射。

電子との衝突のみによって起こる。一方、TST-2 の LHW 立ち上げプラズマにおいては、パラメトリック崩壊不安定性 (PDI) によるイオンサイクロトン準モード (ICQM) の励起がしばしば観測されており、ICQM によるイオン加熱のチャンネルも存在する。このような非線形イオン加熱を調べるため、可視分光器を用いてイオン温度を、高周波用の磁気プローブを用いて LHW (200 MHz) 付近の磁気揺動を測定した。LHW のパワー変調実験を行ったところ、イオン温度は LHW パワーの変調に対して 1 ms よりも短い時間スケールで応答し、これは電子による衝突加熱から期待されるよりも速かった。LHW のパワーを 0.4-50 kW まで変化させたところ、PDI の強度は LHW のパワーに伴い大きくなった。PDI の発生には閾値が存在するが、今回の実験では 0.4 kW 程度でも PDI の発生が確認された。また、PDI の強度とイオン温度には正の相関が確認され、ICQM によるイオン加熱の可能性が示された。

高速電子の軌道損失

TST-2 での LHW 立ち上げ実験においては、波による高速電子の径方向輸送が高速電子の主要な損失機構になっていると考えられている。そこで可動ターゲットリミタを設置し、高速電子がターゲットリミタに衝突した際の制動 X 線放射を計測することで、高速電子の軌道損失を詳しく調べた。ターゲットリミタとして、幅 10 mm、長さ 90 mm の Mo 板を挿入し、ターゲットに衝突する高速電子によって生成される HXR を測定した。LHW による加速が強磁場側のプラズマ周辺部で起こっているとすると、より大きなエネルギーを持った高速電子が SOL (Scrape-Off Layer) のより外側に存在することが予想される。そこで、外側及び上側入射の LHW 放電下で、ターゲット板を主半径方向に 565 mm から 575 mm までスキャンした。結果を図 6.1.2 に示す。外側入射ではターゲット板を外側に引くと X 線放射強度が大きく増加したが、上側入射では少し増加したのち逆に減少した。今後はこのような依存性を説明できる高速電子輸送モデルを構築していく。

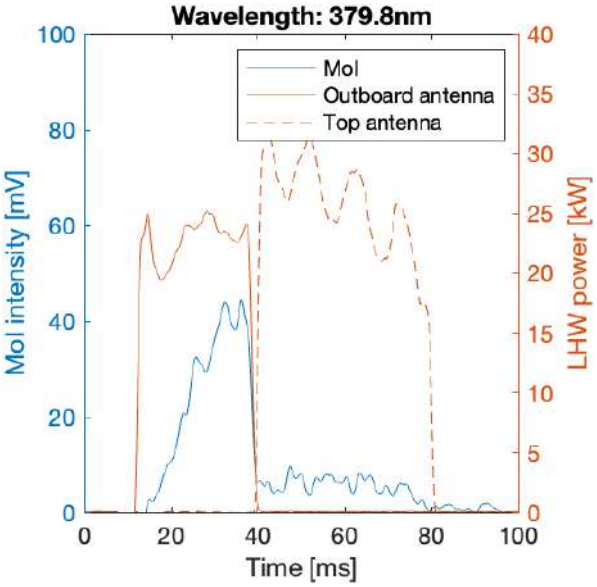

図 6.1.3: 静電結合進行波アンテナ使用時の MoI 線スペクトル強度。

静電結合進行波アンテナによる不純物生成

ループアンテナを用いた LHW の励起においては、アンテナからプラズマへの不純物混入によって放射損失が増大したり、意図せず密度が増加することが問題となる。そこでリミタでの Mo 生成を分光器を用いて調べた。図 6.1.3 に観測された MoI 放射を示す。MoI の線スペクトル放射は外側入射と上側入射シナリオ両方で観測されたが、外側アンテナ近傍では、外側アンテナ使用時に強い放射が確認された。Mo 放射は電力入射時間と共に 20 ms にわたって線形に増加し、入射停止時には即座に (<1 ms) 放射が減少した。Mo 生成原理としてはアンテナでのシース生成によるイオンのスパッタリングと軌道損失高速電子によるリミタ加熱が考えられ、今後は詳しい原因の究明を行なっていく。

有限要素法による熱いプラズマ誘電率テンソルの計算

LHW の伝播を評価するには全波計算が有用である。従来全波計算に用いられているスペクトル法に比べ、有限要素法を用いた全波計算は複雑な形状の取り扱いが効率的である。これは実際のアンテナにおける LHW の励起効率を定量的に評価する上では特に大きな利点である。しかし、プラズマの応答を表す誘電率が微分・積分演算子となり、代数的になるスペクトル法に比べて実装が単純でない。

トーラス主半径方向に密度・温度分布の依存性を持った 2 次元の計算領域に対して、有限要素法において積分形誘電率テンソルを用いて計算を行った。この際、非局所的な熱いプラズマの寄与は反復計算を用いることで取り入れた。単純な反復計算では収束

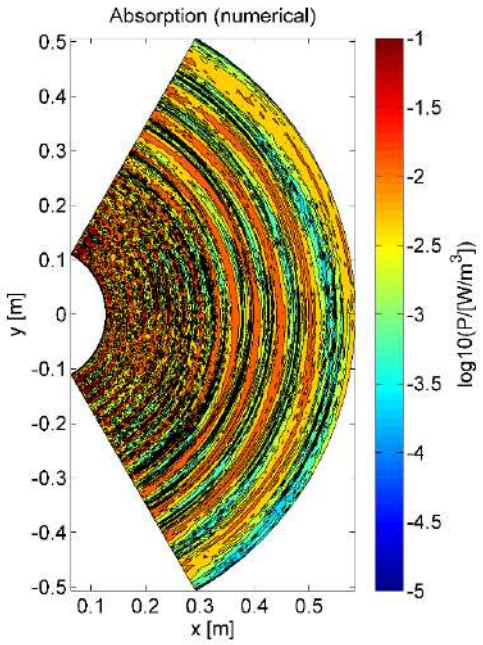

図 6.1.4: 積分形誘電率テンソルを用いて評価した波動の吸収電力分布。外側境界で電場を励起している。トロイダル方向には周期境界を仮定しており、内側境界は完全導体である。

性が悪かったため、積分計算のアルゴリズムの修正や微小な散逸を導入することで収束性を改善し、数値ノイズの増加を抑制した。図 6.1.4 は収束解から求まった吸収の分布であり、反復計算により吸収の誤差は 0.1 %程度に収束した。

6.1.3 高速電子に起因する内部励起波動の観測

トカマク方式の核融合において逃走電子の診断と抑制が重要な課題となっている。そこで、高速電子に起因して励起する波動の励起課程を理解することができれば波動を用いた逃走電子の診断や制御が期待できる。TST-2 においてもプラズマが消滅する際に発生する高速電子による波動が観測された。図 6.1.5 は TST-2 に設置された磁気プローブで計測した磁場揺動であり、プラズマはオーミック加熱により 10 ms 頃から生成され 40 ms までに維持される。40 ms 以降ではプラズマ電流や発光はほとんど見られず、X 線計測の信号だけが見られたことから、高速電子のみが残っていることが示唆される。その時間帯において数十 MHz から数百 MHz までの広い範囲において強い磁場揺動が観測され、この特性を調べることで高速電子による波動励起について議論できる。

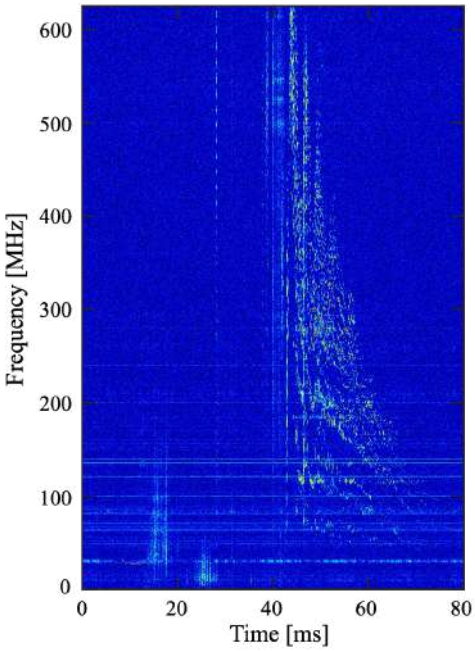

図 6.1.5: プラズマが消滅する際に磁気プローブで計測された磁場揺動。

6.1.4 電子サイクロトロン波補助オーミック立ち上げ

超伝導トカマクの立ち上げ信頼度を改善するために、捕捉粒子配位 (TPC: Trapped Particle Configuration) における EC (Electron Cyclotron) 波補助オーミック立ち上げを研究している。2022 年度は、TPC 立ち上げ特性を定量的に理解するために、無衝突運動論方程式による高速電子輸送のモデリングを行い、立ち上げの成否のパラメータ依存性を推定した。その結果、EC 波のみによる立ち上げにおいては高電力で中性ガスの低圧限界が上昇すること、垂直磁場を強めることで低圧限界が下がること、また、想定される低い周回電場を加えてもこの特性は大きく変わらないことが予想された。これらのパラメータ依存性は TST-2 実験結果と整合した。

6.1.5 計測器開発

ダブルパストムソン散乱計測

電子温度非等方性を計測するために、ダブルパストムソン散乱計測を開発した。図 6.1.6 はオーミックプラズマに対する温度計測結果である。前方 (forward) と後方 (backward) ビームによる計測結果はそれぞれ磁場に対して垂直および平行な方向の温度に対応している。中心密度 1×10^{19} m^{-3}、中心電子温度 200 eV の放電において、周辺部で後方 (平行) 方向の温度が前方 (垂直) 方向の温度より高く観測された。

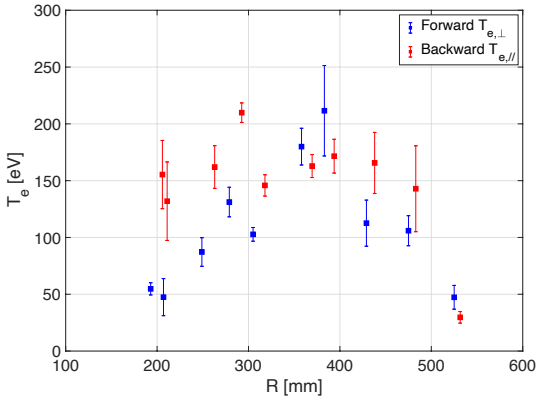

図 6.1.6: TST-2 オーミックプラズマにおけるダブルパストムソン散乱計測結果。

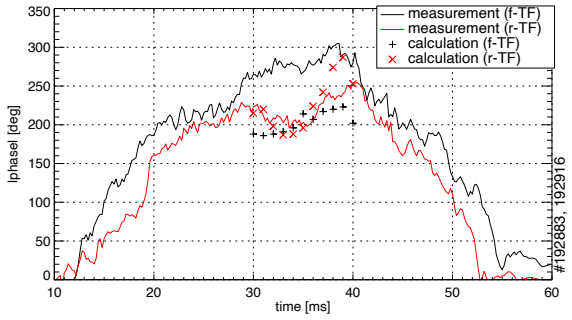

図 6.1.7: 偏光計の計測値と平衡計算再構成からの推測値の比較。

偏光計による内部磁場計測

プラズマの内部電流密度は一般に周辺部磁気計測から計算により推定されるが、精度が限られているため、プラズマの内部磁場を直接計測可能なマイクロ波偏光計を開発している。プローブ光としては 27 GHz の回転直線偏光を用い、直線偏光電力を計測することで、Faraday 角のみを変調信号の位相として検出することができる。2022 年度は偏光計を構成するマイクロ波回路素子などの性能評価を卓上試験で実施した結果、円形導波管の持つ伝送特性により、偏光子の位置が回路全体の偏光特性に対して無視できない影響を与えることがわかった。また、計測原理検証のため、トロイダル磁場に感度を持つ接線方向視線の測定系で測定を行なったところ、平衡再構成とトムソン散乱計測、干渉計による偏光信号の推測値と比較して誤差 30 %の精度で Faraday 角の計測に成功した (図 6.1.7)。また、偏光子の位置によっては入射光が楕円偏光になるため、測定値に Cotton-Mouton 角が含まれる可能性があることが判明した。

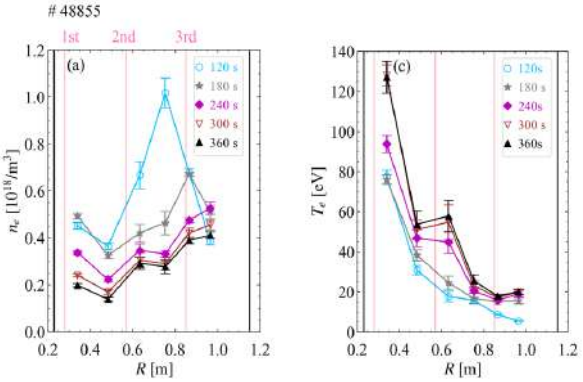

図 6.1.8: QUEST における 120 秒から 360 秒までの電子密度（左）温度（右）分布。

小型磁気プローブ開発

LHW プラズマの周辺部電流密度を測定することを目的に、可動小型磁気プローブを開発した。過去に電流計測に用いられたロゴスキープローブは直径が 21 mm でプラズマに対する擾乱が大きかった。そこで、小型ピックアップコイルを並べた円筒状の可動プローブを開発した。直径 8 mm のステンレス管内に外径 5 mm、高さ 3 mm、巻き数 300 ターンのピックアップコイルを配置した。制作したコイルの感度は $NS = 3.6 \times 10^{-3}$ m^{-2} であり、幾何形状から予測される値にほぼ一致した。TST-2 装置に取り付けて、真空磁場が計測できることを確認した。

6.1.6 共同研究

QUEST におけるトムソン散乱計測

九州大学の QUEST 球状トカマク装置での研究テーマの一つは、超長時間での粒子の振る舞いであり、長時間運転する核融合炉では非常に重要な項目である。2022 年度は、トムソン散乱計測の制御系とデータ収集系を改造することで超長時間放電での測定に初めて成功した。図 6.1.8 は電子サイクロトン波加熱で維持された 1000 秒放電の前半で測定された電子密度、電子温度分布である。この結果から、プラズマが定常状態になるまでに 300 秒程度かかることがわかった。この時間スケールは、プラズマ中の粒子が、金属壁に吸蔵されたり、金属壁から放出される時間スケールを表していると考えられる。

強磁場球状トカマクにおける ICRF 加熱検討

トカマクエナジーとの共同研究として、強磁場球状トカマクにおけるイオンサイクロトロン加熱特性を数値計算を用いて解析した。1 億度に達する核融合炉級プラズマでは電子吸収が強くなるため、イオ

ン加熱のためには低いトロイダルモード数を持つ波の入射が必要であること、また、有限ラーマー半径効果が大きいため、現行トカマクで必要な少数イオンは必ずしも必要ではないことがわかった。

ENN との表面波アンテナ開発

ENN での LHW 電流駆動のために開発している金属コルゲート上の表面波を用いる 2.45 GHz フィンラインアンテナを TST-2 上部に設置し、LHW 励起実験を行った。その結果、高速電子生成によると考えられる X 線放射の増加が観測され、LHW の励起に成功していることが確認できた。

＜受賞＞

[1] 高竜太, 若手学会発表賞, プラズマ・核融合学会, 2022 年 11 月 25 日.

＜報文＞

(原著論文)

[2] T. Tokuzawa, S. Inagaki, M. Inomoto, A. Ejiri, T. Nasu, T.I. Tsujimura and K. Ida, Applied Sciences **12**, 4744 (2022)

[3] A. Ejiri, H. Yamazaki, Y. Takase, N. Tsujii, O. Watanabe, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Aoi, Y. Ko, K. Matsuzaki, J.H.P. Rice, Y. Osawa, C.P. Moeller, Y. Yoshimura, H. Kasahara, K. Saito, T. Seki and S. Kamio, Plasma and Fusion Res. **17**, 1402037 (2022).

[4] Y.T. Lin, A.Ejiri, K. Shinohara, Y. Peng and S.Jang, Plasma and Fusion Research **17**, 1405098 (2022).

[5] T. Nasu, T. Tokuzawa, T.I. Tsujimura, K. Ida, M. Yoshinuma, T. Kobayashi, K. Tanaka, M. Emoto, S. Inagaki, A. Ejiri and J. Kohagura, Rev. Sci. Instrum. **93**, 113535 (2022).

[6] T. Tokuzawa, T. Nasu, S. Inagaki, C. Moon, T. Ido, H. Idei, A. Ejiri, R. Imazawa, M. Yoshida, N. Oyama, K. Tanaka and K. Ida, Rev. Sci. Instrum. **93**, 113535 (2022).

[7] K. Kono, T. Ido, A. Ejiri, K. Hanada, Q. Yue, M. Hasegawa, Y. Peng, S. Sakai, R. Ikezoe, H. Idei, S. Kawasaki, K. Kuroda, T. Onchi, Y. Nagashima and S. Jang, Plasma Fusion Res. **8**, 1405012 (2023).

(学位論文)

[8] 高竜太: “Development of the Outer-Off-Midplane Lower Hybrid Wave Launch Scenario for Improved Current Drive on a Spherical Tokamak”

[9] 白澤唯汰: 「TST-2 装置における内部磁場計測のためのマイクロ波偏光計の開発」

[10] 飛田野太一: 「TST-2 球状トカマク装置における高周波磁気プローブと可動磁気プローブを用いた低域混成波維持プラズマの研究」

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[11] A. Ejiri and Measurement and Control WG, “Activity of Measurement and Control WG for JA DEMO”, 41st Meeting of the ITPA Topical Group on Diagnostics, online, May 30–June 2, 2022.

[12] Y. Lin, “Feasibility study of a line integrated Thomson scattering for pedestal measurements in DEMO”, 41st Meeting of the ITPA Topical Group on Diagnostics, online, May 30–June 2, 2022.

[13] Y. Ko, N. Tsujii, A. Ejiri, K. Shinohara, O. Watanabe, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Lin, G. Yatomi, I. Yamada, Y. Shirasawa, T. Hidano, R. Tsubata, Y. Tian and C.P. Moeller, “Development of an off-midplane launch lower-hybrid antenna for improved core current drive in non-inductive start-up plasmas on TST-2”, 24th Topical Conference on Radiofrequency Power in Plasmas, Annapolis, Sep. 26–28, 2022.

[14] N. Tsuji, A. Ejiri, K. Shinohara, O. Watanabe, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Ko, Y. Lin, G. Yatomi, I. Yamada, Y. Shirasawa, T. Hidano, R. Tsubata, Y. Tian and C.P. Moeller, “Improved modeling of a lower-hybrid wave driven plasma using an extended MHD equilibrium reconstruction on the TST-2 spherical tokamak”, 24th Topical Conference on Radiofrequency Power in Plasmas, Annapolis, Sep. 26–28, 2022.

[15] N. Tsujii, A. Ejiri, K. Shinohara, S. Jang, O. Watanabe, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Ko, Y. Lin, T. Hidano, Y. Shirasawa, Y. Tian, F. Adachi and C.P. Moeller, “Studies of fast electron dynamics in rf start-up plasmas on the TST-2 spherical tokamak”, 21st International Spherical Torus Workshop (ISTW 2022), Tsinghua University, Beijing, China (online), Oct. 31–Nov. 4, 2022.

[16] Y. Peng, A. Ejiri, N. Tsujii, K. Shinohara, O. Watanabe, S. Jang, K. Iwasaki, Y. Ko, Y. Lin, T. Hidano, Y. Shirasawa, Y. Tian and F. Adachi, “Investigation on anisotropic temperature in Ohmic plasmas in TST-2”, 21st International Spherical Torus Workshop (ISTW 2022), Tsinghua University, Beijing, China (online), Oct. 31–Nov. 4, 2022.

[17] K. Iwasaki, A. Ejiri, N. Tsujii, K. Shinohara, O. Watanabe, S. Jang, Y. Peng, Y. Ko, Y. Lin, Y. Shirasawa, T. Hidano, Y. Tian and F. Adachi, “Properties of anomalous ion heating in lower hybrid wave sustained plasmas”, 21st International Spherical Torus Workshop (ISTW 2022), Tsinghua University, Beijing, China (online), Oct. 31–Nov. 4, 2022.

[18] K. Shinohara, O. Watanabe, A. Ejiri, N. Tsujii, S. Jang, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Lin, Y. Ko, Y. Shirasawa, T. Hidano, Y. Tian and F. Adachi, “Design of probe to investigate energetic electrons in

lower hybrid wave plasmas in the TST-2 spherical tokamak", 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (ITC31), Toki, Gifu, Japan, Nov. 8–11, 2022.

[19] A. Ejiri, Y. Lin, S. Jang, Y. Peng, K. Shinohara, T. Ido, K. Kono, Y. Nagashima, "Design study of a multi-chord line integrated Thomson scattering system for TST-2 spherical tokamak device", 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (ITC31), Toki, Gifu, Japan, Nov. 8–11, 2022.

[20] N. Tsujii, R. Seki, J. Wang, H. Kasahara, K. Saito, T. Seki, "Simulation of ICRF heating in LHD with AORSA-3D", US-Japan Workshop on RF Heating Physics, Nagoya, Mar. 8–10, 2023.

[21] K. Iwasaki, A. Ejiri, N. Tsujii, K. Shinohara, O. Watanabe, S. Jang, Y. Peng, Y. Ko Y. Lin, Y. Shirasawa, T. Hidano, F. Adachi and Y. Tian, "Studies of parametric decay instability in the TST-2 spherical tokamak", US-Japan Workshop on RF Heating Physics, Nagoya, Mar. 8–10, 2023.

招待講演

[22] A. Ejiri, "Interferometry and reflectometry", 10th Korea-Japan Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State Fusion Plasmas, Soul, Korea (online), Sep. 15–16, 2022.

(国内会議)

一般講演

[23] K. Iwasaki, A. Ejiri , N. Tsujii, K. Shinohara, O. Watanabe, S. Jang , Y. Peng, Y. Ko, Y. Lin, Y. Shirasawa, T. Hidano, F. Adachi, Y. Tian, "Ion temperature response of the lower hybrid wave sustained plasma on TST-2", 第 14 回核融合エネルギー連合講演会，オンライン, 2022 年 7 月 7–8 日.

[24] T. Hidano, A. Ejiri, N. Tsujii, K. Shinohara, O. Watanabe, S. Jang, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Ko, Y. Lin, Y. Shirasawa, Y. Tian, F. Adachi, "Analysis of wave-induced instabilities in Lower-Hybrid wave-maintained plasmas of the TST-2 spherical tokamak device", 第 14 回核融合エネルギー連合講演会, オンライン, 2022 年 7 月 7–8 日.

[25] Y. Shirasawa, N. Tsujii, A. Ejiri, K. Shinohara, O. Watanabe, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Ko, Y. Lin, R. Tsubata, T. Hidano, Y. Tian, "Development of a Tangential Sight Line Microwave Polarimeter on TST-2", 第 14 回核融合エネルギー連合講演会, オンライン, 2022 年 7 月 7–8 日.

[26] 江尻晶, 辻井直人, 篠原孝司, 渡邉理, ジャンソウォン, 彭翊, 岩崎光太郎, 高竜太, 林彧廷, 白澤唯汰, 飛田野太一, 田一鳴, 安立史弥, 吉村泰夫, 高瀬雄一,「TST-2 球状トカマクにおける低域混成波電流立ち上げの研究」, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京工業大学, 2022 年 9 月 12–15 日.

[27] ジャンソウォン, 飛田野太一, 江尻晶, 辻井直人, 篠原孝司, 渡邉理, 彭翊, 岩崎光太郎, 高竜太, 林彧廷, 白澤唯汰, 田一鳴, 安立史弥, 「TST-2 球状トカマクにおける磁気プローブを用いた内部励起波動の計測」, 第 39 回 プラズマ・核融合学会年会，富山，2022 年 11 月 22–25 日.

[28] 安立史弥, 「有限要素法における積分形誘電率テンソルを用いた低域混成波の吸収評価」, 第 39 回 プラズマ・核融合学会年会，富山，2022 年 11 月 22–25 日.

[29] 高竜太, 「2 系統低域混成波の相乗効果による電流駆動改善を目指したオフミッドプレーンアンテナの開発」, 第 39 回 プラズマ・核融合学会年会, 富山, 2022 年 11 月 22–25 日.

[30] 林彧廷, 江尻晶, 辻井直人, 篠原孝司, 渡邉理, ジャンソウォン, 彭翊, 岩崎光太郎, 高竜太, 白澤唯汰, 飛田野太一, 田一鳴, 安立史弥,「TST-2 球状トカマクのスクレイプオフ層における硬 X 線計測 (Hard X-ray measurement in the scrape off layer in the TST-2 spherical tokamak)」, 第 39 回 プラズマ・核融合学会年会，富山，2022 年 11 月 22–25 日.

[31] 江尻晶，林彧廷，彭翊，ジャンソウォン，篠原孝司，井戸毅，河野香，永島芳彦,「TST-2 球状トカマク装置における多視線線積分トムソン散乱システムの設計研究」, 第 39 回 プラズマ・核融合学会年会，富山，2022 年 11 月 22–25 日.

[32] 篠原孝司, 渡邉理, 江尻晶, 辻井直人, ジャンソウォン, 彭翊, 岩崎光太郎, 高竜太, 林彧廷, 白澤唯汰, 飛田野太一, 田一鳴, 安立史弥, 「TST-2 球状トカマク装置における低域混成波プラズマ研究のための高速電子プローブの設計」, 第 39 回 プラズマ・核融合学会年会，富山，2022 年 11 月 22–25 日.

[33] 江尻晶，辻井直人，篠原孝司，渡邉理，ジャンソウォン，彭翊，岩崎光太郎，高竜太，林彧廷，白澤唯汰，飛田野太一，田一鳴，安立史弥，吉村泰夫，「TST-2 球状トカマクにおける低域混成波電流立ち上げの研究」, 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン, 2023 年 3 月 22–25 日.

招待講演

[34] 江尻晶,「核融合研究と計測の開発」, 計測自動制御学会第 39 回センシングフォーラム, 東京大学本郷キャンパス, 2022 年 9 月 21 日.

[35] 辻井直人, 山田巌, 高竜太, 江尻晶, 篠原孝司, TST-2 グループ,「トカマクの捕捉粒子配位における電子サイクロトロン加熱補助オーミック立ち上げ特性の運動論的解析」, 第 39 回 プラズマ・核融合学会年会，富山，2022 年 11 月 22–25 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 は他の同様の観測装置よりも 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。また、WCCC 天体でありながら内部にホットコリノを含むハイブリッド天体も見出されている。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や紫外線環境によると考えられ、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。

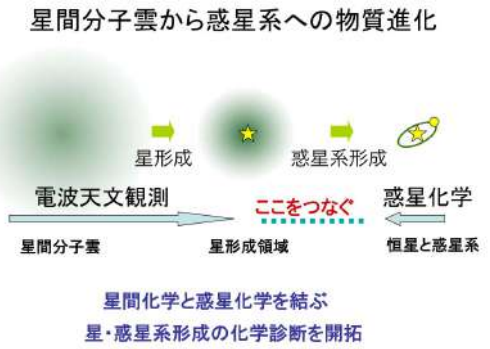

図 6.2.9: A schematic illustration of our goal

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しつつある。

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、機械学習の方法を本格的に取り入れている。

6.2.3 観測成果

【回転 · 落下ガスの速度構造の三次元力学モデル】
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 (図 6.2.10)。これらの速度構造をもつガス円盤の三次元モデルを構築した (FERIA; Flat Envelope Model with Rotation and Infall under Angular momentum conservation)[1]。

このモデルを用いて作成した三次元の擬似観測データと、ALMA による実際の分子輝線観測データを比較[2]することで、原始星質量や天体の傾き角などのパラメータが制限される。また、擬似観測データを教師データとして、機械学習/深層学習による解析を適用することで、観測された速度構造の判別を行う手法を開発した。深層学習の一種である 3DCNN (3-Dimensional Convolutional Neural Network; 三次元畳み込みニューラルネットワーク) を用いて、速度構造 (図 6.2.10b, c) を判別する学習器を作成した。学習機を低質量原始星天体 IRAS 16293−2422 Source A での ALMA 観測データに適用することで、18 本の分子輝線の速度構造を分類した。学習器とその適用方法をさらに改良していくことで、観測データが持つ情報を従来とは異なる視点から捉えられることが期待される。この成果を学術論文としてまとめ、出版した。[1]

このモデルは、若い原始星天体を取り巻く円盤/エンベロープガスの速度構造の他、活動銀河核を取り巻くコンパクトなトーラス構造など、回転を伴うガス運動の解析に広く適用できる可能性がある (図 6.2.11)。

【FAUST の初期成果】
日米欧の協働による国際共同研究プロジェクト FAUST (Fifty AU STudy of the chemistry in the disk/envelope system of Solar-like protostars) では、若い低質量原始星天体に対して ALMA による化学サーベイ観測を実施した。13 個のターゲット天体において、共通の感度 · 空間解像度で、多種多様な分子輝線を観測した。その結果、複雑な飽和有機分子を豊富に含む天体と、それらがほとんど検出されない天体が見出された。このことは、原始星を取り巻くガスの化学組成に、天体間で多様性があることを示している (図 6.2.12)。

また、一つの天体の中でも、ガスの化学組成が空間的に変化することがわかった。Class 0 の若い低質量原始星天体 CB68 での、FAUST で観測された分子輝線の分布の様子を図 6.2.13 に示す。不飽和な炭化水素分子の輝線は広がって分布 (∼1,000 au) し、複雑な飽和有機分子の輝線は原始星に集中したコンパクトな分布 (<100 au) をしていることがわかった。分子種の違いによる分布の違いは、FAUST で観測された他の天体でも同じ傾向が確認された。この現象の概念図を図 6.2.12 に示す。この描像は、従来いくつかの天体で個別に報告されてきた [6] が、FAUST で取得された均質な観測データを用いて、より多くの天体と多くの分子種での結果に基づいて確立することができた。

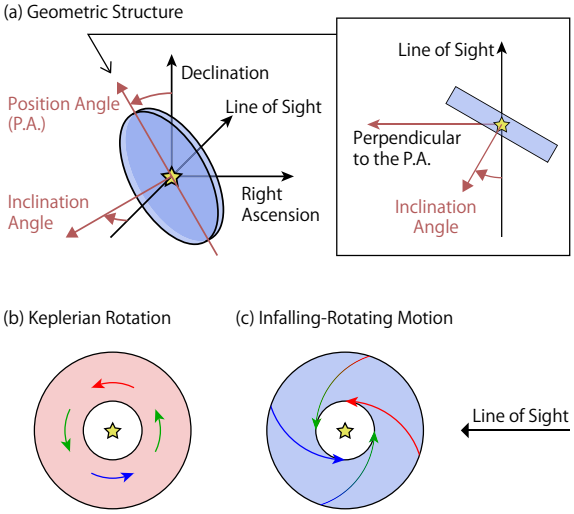

図 6.2.10: (a) Schematic illustration of the three dimensional (3D) dynamical model of a disk/envelope system. (b) Velocity structure of the disk with a Keplerian rotation. (c) Velocity structure of the infalling-rotating gas.

【IRAS 15398-3359 における飽和有機分子の検出】
FAUST プログラムで観測した天体の一つである IRAS 15398-3359 において、CH_3OH の高励起スペクトル線や $HCOOCH_3$ のスペクトル線を原始星方向のコンパクトな領域で検出した。この天体は、1000 au スケールで炭素鎖分子などの不飽和有機分子に恵まれる WCCC(Warm Carbon-Chain Chemistry) 天体として知られていたが、原始星の極近傍にはホットコリノ化学を示す複雑な飽和有機分子を伴っていることが明らかになった。即ち、この天体は WCCC とホットコリノ化学の両方が異なる空間スケールで共存するハイブリッド天体であることが示された。そのような天体は B335, L483, CB68 でも見られており、原始星天体の化学組成の「標準形」であると考えられる。IRAS 15398 では CH_3OH の高励起線はディスク方向に僅かに広がっていた。このことと スペクトル解析から得られるビームフィリングファクターから、その放射領域はディスク表面の薄い領域と見られ、ディスク面への降着衝撃波による加熱が示唆される。[3]

6.2.4 研究室を閉じるにあたって

山本は 2023 年 3 月 31 日をもって東京大学を定年退職しました。1993 年からちょうど 30 年の長きにわたり、理学系研究科および同物理学専攻にお世話になったことになります。その間、宇宙の物質に着

[1] https://github.com/YokoOya/FERIA
[2] https://github.com/YokoOya/cubechi2

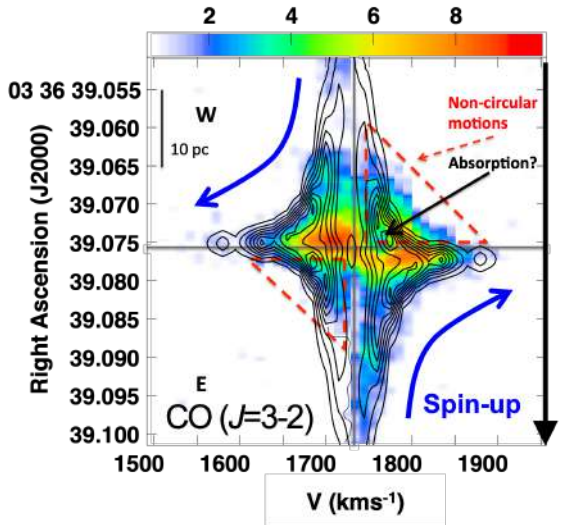

図 6.2.11: Velocity structure of the gas surrounding the AGN of NGC1377. Color represents the observation result of the CO emission, while black contours show the result of the 3D dynamical model. The observed CO emission reveals “Non-circular motions”. It can be explained by the dynamical model involving an infall motion. [2]

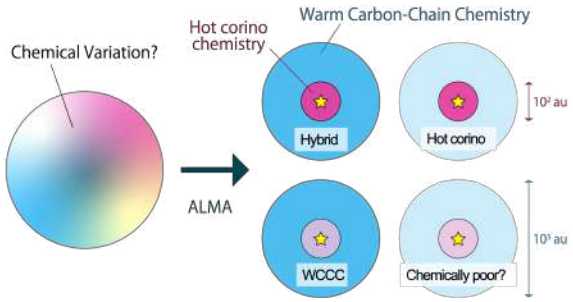

図 6.2.12: Conceptional view of the chemical structure and its diversity of young protostellar sources revealed by the ALMA large program FAUST. Hot corino chemistry characterized by rich existence of saturated organic molecules is seen in a hot region (>100 K) near the protostar, while warm carbon-chain chemistry (WCCC) characterized by rich existence of unsaturated hydrocarbon molecules is seen in a warm region (> 25 K) surrounding the hot region. This is a typical chemical structure of young protostellar sources. Relative appearance of these two distinct chemical features is different from source to source: some only show hot corino chemistry and some only WCCC. [6]

目して、星間雲から星・惑星形成に至る化学進化の観測研究を楽しみました。国立天文台野辺山 45 m 望遠鏡や ALMA など先端電波望遠鏡による観測研究、富士山頂サブミリ波望遠鏡の建設と運用、テラヘルツ帯の検出器の開発など、様々なことに取り組みました。定年退職にあたり、これまでの研究生活を支えていただいたすべての方に感謝申し上げます。なお、大屋助教は 2022 年 10 月 1 日付けで京都大学基礎物理学研究所に講師として異動しています。

在職中、多くの大学院生、助教、そして共同研究者の皆さんと研究を共にしました。理学系研究科において、23 名の博士取得者、42 名の修士取得者を見てきましたが、彼ら彼女らが常に研究を引っ張ってくれて、その中で私自身も多くを学びました。自然の前では、学生も教員も平等です。実際、大学院生や共同研究者から、自分では考え付かないアイデアや方法、結果が出されることもしばしばでした。若い優秀な人たちと一緒に研究できたことは幸せで、素晴らしい思い出とともに感謝の気持ちで一杯です。

それとともに、天文学と化学の境界をやっている私を受け入れて育てていただいた物理学教室およびビッグバン宇宙国際研究センターの大きな包容力には感謝の言葉もありません。皆様との交流で、研究についても直接、間接に大きな刺激をいただきました。教室の皆様の期待に十分応えられたとは思いませんが、宇宙物理学の世界を 1 ミリくらい拡げられたのではないかと思っています。研究・教育に加えて、ここ 8 年くらいは副研究科長や専攻長を務めましたが、その中で、物理学教室のみならず、理学系研究科の事務職員、技術職員の皆様にも大変お世話になりました。理学系研究科が持続的に成長を続けているのは、すべての構成員の力によるものだと実感しました。物理学教室、ビッグバン宇宙国際研究センター、そして、理学系研究科の益々のご発展を祈念しています。

最後に、研究生活を支えてくれた家族にもこの場を借りて感謝したいです。研究第一の生活の中で、十分に時間を取ってこなかったことを後悔しています。これからは、総合研究大学院大学での業務とともに、そのような時間を増やして楽しみたいと思います。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Oya, Y., Kibukawa, H., Miyake, S., *et al.*, 2022, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, **134**, 094301.

[2] Aalto, S., Falstad, N., Muller, S., *et al.*, 2020, Astronomy & Astrophysics, **640**, A104.

[3] Okoda, Y., Oya, Y., Yamamoto, S.（19 人中 19 番目）他, ”FAUST VII. Detection of a Hot Corino in the Prototypical Warm Carbon-Chain Chemistry Source IRAS 15398-3359”, Astrophys. J., in press.

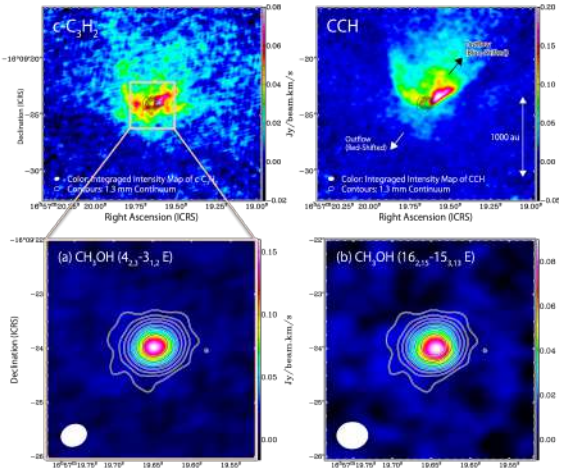

図 6.2.13: Molecular distribution of the young (Class I) low-mass protostellar source CB68. Color represents the integrated intensity maps of four molecular species observed with ALMA, while contours show the distribution of the 1.3 mm continuum emission. Emission of the unsaturated hydrocarbons (upper panels; c-C_3H_2, CCH) is extended over the 1000 au scale. On the other hand, emission of the saturated organic molecule (lower panels; CH_3OH) is concentrated within a 100 au area around the protostar. [5]

[4] Okoda, Y., Oya, Y., Imai, M., Sakai, N., Watanabe, Y., Lopez-Sepulcre, A., Saigo,K., and Yamamoto, S., "Chemical Differentiation and Temperature Distribution on a Few au Scale around the Protostellar Source B335", Astrophys. J., 935, 136 (20 pages) (2022).

[5] Imai,M., Oya, Y. et al. "Chemical and Physical Characterization of the Isolated Protostellar Source CB68: FAUST IV", Astrophys. J., 934, 70 (18 pages) (2022).

(書籍)

[6] Oya, Y., "A Few Tens au Scale Physical and Chemical Structures Around Young Low-Mass Protostars", Springer (2022)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[7] Oya, Y., "Protostellar Source Elias 29: Deficiency in Organic Molecules and Richness in Sulfur-Bearing Species", Molecules in Extreme Environment, Tokyo (Japan), November 2022 (Online)

[8] Oya, Y., "Rotation Motion of the Envelope/Disk/Outflow in IRAS 16293-2422 Source A", A half century of millimeter and submillimeter astronomy: Impact on astronomy/astrophysics and the future, Miyako (Japan), December 2022

[9] Okoda, Y., "Physics and Chemistry in the Beginning of Low-Mass Star Formation", 241st AAS meeting, Seattle (USA), January, 2023

[10] Okoda, Y. et al., "Detection of A Hot Corino in the Prototypical Warm Carbon-Chain Chemistry Source IRAS 15398 − 3359", East Asia ALMA Meeting, New Taipei City (Taiwan), February, 2023

(国内会議)

【天文学会 2022 年秋季年会、 新潟大学、2022 年 9 月】

[11] 大小田結貴、小山貴裕, 坂井南美, 渡邉祥正, Ana Lopez-Sepulcre, 大屋瑶子, 今井宗明, 山本智, 「低質量原始星 B335 における CH_3OH の重水素化物」、P119a

【天文学会 2023 年春季年会、オンライン、2023 年 3 月】

[12] Okoda, Y. et al.,「非常に若い低質量原始星 IRAS 15398 − 3359 の物理・化学構造」、Z110a

【次世代アストロケミストリー、Hybrid、 2022 年 11 月】

[13] 小山貴裕、坂井南美、渡邉祥正, Ana Lopez-Sepulcre、大屋瑶子、今井宗明、 山本智、「若い低質量原始星天体 B335 周りの化学組成」

[14] 大小田結貴、小山貴裕、坂井南美、 渡邉祥正、Ana Lopez-Sepulcre、大屋瑶子、今井宗明、山本智、「Deuterated CH_3OH in the Low Mass Class 0 protostellar source B335」

招待講演

[15] Yoko Oya, "Chemical Diagnostics for Embedded Disk/Torus Structures in Protostellar Sources: Any Analogies with AGN Cases?", Behind a Curtain of Dust IV, Sesto (Italy), July 2022

[16] Yoko Oya, "Chemical Differentiation and its Relation with the Physical Structures in Disk-Forming Regions: This and the Next Decade", Symposium on Next Generation Astrochemistry, Tokyo (Japan), November 2022

[17] Yoko Oya, "Chemical Diagnostics for Tracing the Physical Structures in Disk-Forming Regions of Young Low-Mass Protostellar Sources", East Asia ALMA Science Workshop 2023, New Taipei City (Taiwan), February 2023

[18] Satoshi Yamamoto, "Chemical View of Star and Planet Formation", Second International Symposium on Trans-Scale Quantum Science, Tokyo (Japan), November, 2022

[19] Satoshi Yamamoto, ”50 Years of Astrochemistry: My Personal View”, A Half Cen- tury of Millimeter and Submillimeter Astronomy, Miyakojima (Japan), December 2022

(国内会議)

一般講演

【天文学会 2022 年秋季年会、新潟大学 (新潟)、2022 年 9 月】

[20] 大屋瑶子、山本智、「Class I 低質量原始星天体 Elias 29 の円盤構造における落下運動の可能性」、P110a

[21] 大小田結貴、小山貴裕、 坂井南美、 渡邉祥正、Ana Lopez-Sepulcre)、大屋瑶子、今井宗明、 山本智、「低質量原始星 B335 における CH3OH の重水素化物」、P119a

【天文学会 2023 年春季年会、立教大学 (東京)、2023 年 3 月】

[22] 大小田結貴、大屋瑶子、Logan Francis、Doug Johnstone、犬塚修一郎、Cecilia Ceccarelli、Claire Chandler、Claudio Codella、坂井南美、山本 智、FAUST Team、「FAUST: 非常に若い低質量原始星 IRAS 15398 − 3359 の物理・化学構造」、Z110a

招待講演

【天文学会 2023 年春季年会、立教大学 (東京)、2023 年 3 月】

[23] Yoko Oya, Cecilia Caccarelli, Claudio Codella, Claire J. Chandler, Nami Sakai, Satoshi Yamamoto, and FAUST team members, “ALMA Large Project FAUST (Fifty AU STudy of the chemistry in the disk/envelope system of Solar-like protostars)”, Z109r (review talk)

【その他の国内講演】

[24] 大屋瑶子、「若い太陽型原始星の原始星円盤形成領域における化学組成分布と物理構造の関係」、次世代アストロケミストリー領域研究会、東京大学 (東京)、2023 年 3 月

一般向け講演

[25] 大屋瑶子、「巨大電波望遠鏡で見上げる星空 ～ 太陽系の昔の姿とは？ ～」、湯川博士の贈り物 3、京都大学 (京都)、2023 年 1 月

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 波長レーザー電場のみ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))。さらに、静電場と楕円偏光したレーザー電場の併用により、レーザー電場の遮断直後にレーザー電場の存在しない条件下での 3 次元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 波長レーザー電場のみ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。上記の配向度 $|\langle\cos\theta\rangle| \sim 0.34$ の妥当性は、χ^2 検定と最小二乗法により慎重に検証した。この成果は、The Journal of Chemical Physics の Communication (Md. Maruf Hossain, Xiang Zhang, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Stronger orientation of state-selected OCS molecules with relative-delay-adjusted nanosecond two-color laser pulses," J. Chem. Phys. **156**, 041101(7 pages) (2022)) に発表した。

6.3.2 最近の進展

実験

非共鳴 2 波長レーザー電場のみを用いる全光学的分子配向制御法についても次の 3 条件を満たす「完成形」の実現を目指している。(1) 高い配向度の達成。(2) 気体分子の向きの完全な制御である 3 次元的配向制御。(3) フィールドフリーな条件下での配向制御。

全光学的配向制御では、静電場も存在しない完全にフィールドフリーな条件下での配向制御が可能となる。この目標を達成するための課題は、2波長間の相対位相を乱さないプラズマシャッター技術の開発である。主として空調機から出る空気の流れの影響によるエチレングリコールジェットシートの揺らぎを回避するとともに、プラズマシャッター動作時に光路中に残留するエチレングリコール由来のデブリを除去することを目的として、エチレングルコールのジェットシートを真空チェンバー内で生成することとした。図 6.3.14 に本年度、この目的のために設計・試作した真空チェンバーの写真を示す。エチレングリコールの回収とデブリの除去、及び、真空引きはダイヤフラムポンプで行っている。

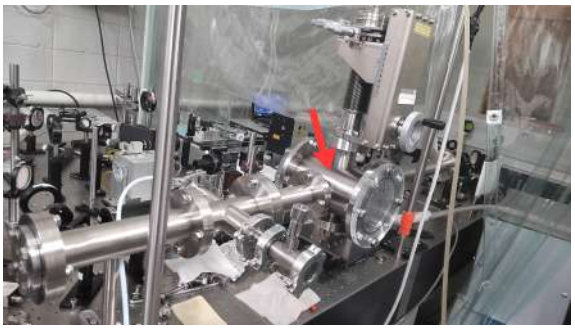

図 6.3.14: 2波長間の相対位相を乱さないプラズマシャッター技術を開発するため、エチレングリコールジェットシートを真空中で生成することとした。写真はこの目的のために設計・試作した真空チェンバー。3次元マニピュレータ内部の矢印部分にエチレングリコールのジェットシートを生成するためのノズルが装着されている。詳細は本文参照。

最近、ナノ秒2波長レーザーパルスとプラズマ生成用のフェムト秒 Ti:sapphire レーザーパルスをエチレングリコールジェットシートに同軸上に集光する位置や角度をチューニングした結果、2波長間の相対位相を数時間程度安定に維持できることが明らかになった。ナノ秒レーザーパルスを立下り ~150 fs 程度で急峻に遮断した後の残留電場成分をレーザー光と分子線の相互作用領域で無視できる程度に抑制できることは確認済みである (J. H. Mun *et al.*, Opt. Express **27**, 19130 (2019))。したがって、次年度以降、2波長間の相対位相を乱さないプラズマシャッター技術を開発した上で、OCS 分子などを試料とした1次元的配向制御の実験を行い、さらに、3,4-dibromothiophene 分子などの非対称コマ分子を試料として3次元的配向制御を実現し、上記の3条件を満たす「完成形」の実現を目指す。なお、2波長間の相対位相を乱さないプラズマシャッター技術は、項目 6.3.3 で述べる、マクロな3回対称性をもつ分子アンサンブルをレーザー電場の存在しない条件下で生成するためにも必要な技術である。

数値計算

–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 3 次元的配向制御–

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、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 (Md Maruf Hossain and Hirofumi Sakai, J. Chem. Phys. **153**, 104102 (2020))。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り、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。

そこで、昨年度から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ダイナミクスを調べるため、数値計算コードの開発を進めて来た。具体的には、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を開発した。開発した計算コードを利用して、非対称コマ分子 C_6H_5I を試料とし、3 次元的配向制御のダイナミクスを数値的に調べ、以下の知見を得た。(1) 3次元配向のダイナミクスは、立ち上がりが比較的長いパルス、具体的には基本波の半値半幅 (HWHM) $\tau_\omega = 12$ ns、第 2 高調波の半値半幅 (HWHM) $\tau_{2\omega} = 9$ ns を用いた場合でも非断熱的であることが確認できた。(2) 本研究室が提案した直線偏光の基本波パルスと楕円偏光の第 2 高調波パルスを用いる手法は、2 波長の直線偏光パルスを交差させる手法よりも高いオーダーパラメータを達成することができ、その優位性は配向のダイナミクスが非断熱的であるときにより顕著となる。(3) 配向のダイナミクスとは対照的に、配列のダイナミクスと第 2 高調波パルスの楕円偏光面への配列のダイナミクスは、基本波の半値半幅 (HWHM) $\tau_\omega = 12$ ns、第 2 高調波の半値半幅 (HWHM) $\tau_{2\omega} = 9$ ns に対して断熱的であることが明らかになった。数値計算コードの開発にあたり、昨年度の特別実験 II で配属された江崎蘭世君が貢献した。近日中に江崎君を共著者とする以下の論文を投稿予定である。Md. Maruf Hossain, Nanse Esaki, and Hirofumi Sakai, “All-optical three-dimensional orientation of asymmetric top molecules with combined linearly and elliptically polarized two-color laser fields,” to be submitted to J. Chem. Phys.

6.3.3 マクロな3回対称性をもつ分子アンサンブルの生成

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、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して観測する装置は既に開発済みである。さらに、元の第2高調波と基本波から KD*P 結晶で発生させた第2高調波との干渉信号を PID フィードバック制御することにより、2波長間の相対位相として ± 6度以内の安定度、3回対称性をもつ電場トラジェクトリーの各ローブの角度の安定度として ± 2度以内を維持する技術も開発済みである。

昨年度に引き続き、本年度も3回対称な分子アンサンブルの生成実験に挑戦した。本年度は特に、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を注意深く行うとともに、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) も行った。また、本年度は、1,3,5-triiodobenzene を試料とし、3回対称性をもつ分子アンサンブルの生成実験に挑戦したが、生成の明確な証拠となるデータは得られなかった。原因は基本波と第2高調波の強度不足にあると考えられる。実際、現状では基本波強度 $\sim 3\times10^{11}$ W/cm^2、第2高調波強度 $\sim 3\times10^{11}$ W/cm^2 であるが、上記の Phys. Rev. A の論文では、十分なオーダーパラメータを達成するためには、それぞれ 1×10^{12} W/cm^2 程度の強度が必要であることが示唆されている。そこで、次年度はナノ秒 Nd:YAG レーザーから出力される基本波と第2高調波のビーム径を拡大率2倍程度のテレスコープで拡大し、集光強度を4倍程度以上に増大させて再度目的の達成にチャレンジしたいと考えている。

6.3.4 PAL-XFEL 施設の軟 X 線自由電子レーザーを用いた光電子角度分布の計測

本研究室では、フェムト秒スケールで進行する超高速光化学反応ダイナミクスを探究するため、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 I2p 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、~1 ps のジッターをもつことが分かった (S. Minemoto *et al.*, J. Phys. B **51**, 075601 (2018))。また、Ti:sapphire パルスにより二酸化炭素 CO_2 分子を非断熱的に配列させ、光子エネルギー 55.4 eV の EUV-FEL パルスによって生成される光電子の角度分解スペクトルを測定した。この実験では、光電子の角度分布と同時にフラグメントイオンの角度分布も観測することによりショットごとの配列状態を評価した。光電子スペクトルと配列状態の対応付けをすることにより、光電子スペクトルの時間発展を追うことができた。その結果、FEL パルスの偏光方向に分子軸の向きを固定した光電子角度分布 (Molecular-Frame Photoelectron Angular Distribution: MF-PAD) を得ることに成功した (S. Minemoto *et al.*, J. Phys. Commun. **2**, 115015 (2018))。

一方、超高速X線光電子回折実験を行うには光子エネルギー 200–1000 eV 程度の軟X線領域のパルスが最適であるが、SACLA では軟 X 線 FEL パルスが供給されていない。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、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 2019 年度より始めている。これまでに、SACLA で開発を行ってきた X 線光電子回折装置を PAL-XFEL のビームラインに接続できるように一部を改造して設置し、Xe 原子から生成される Xe3d 光電子の角度分布測定によって、十分高いエネルギー・角度分解能をもって観測できることを確認した。ただし、現状では軟 X 線 FEL パルス の集光径が大きいため (直径 50–80 μm 程度)、分子試料の配列用 YAG レーザーパルスとの良好な空間的重なりを確保するに至っていない。

本年度、超高速 X 線光電子回折の対象となる反応系の候補として、ジヨードエタン $C_2H_4I_2$ のヨウ素脱離反応のシミュレーションを行った。この分子は、266 nm 付近の紫外光を吸収すると ∼200 fs の速い時間スケールで 1 つ目の I 原子を脱離し、その後 ∼25 ps かけて I 原子と C_2H_4 分子を生成する。I 原子一つが脱離した C_2H_4I 中間体に対して、構造をそのまま保った古典的構造と I 原子が大きく移動して構造変化したブリッジ構造が考えられるが、従来の分光学的実験ではどちらの中間体を経て反応が進行するか判別できていない。この分子に対して、楕円偏光した Nd:YAG パルスによる 3 次元的配列の度合をシミュレーションし、得られた配列度における光電子回折パターンを調べたところ、古典的構造とブリッジ構造とで回折パターンがなまることなく十分判別可能であることを明らかにした。すなわち、化学反応途中の中間体の構造を明らかにするという目的に適した反応系の一つであることが分かった。これら光化学反応の超高速 X 線光電子回折を実現すべく、現在は、FEL パルス の集光径を小さくすること、光学レーザーパルスと軟X線パルスを精度よく同期させることなどビームラインの詳細を PAL-XFEL のスタッフと議論を進めている。

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、寺本高啓氏 (大阪大学)、間嶋拓也准教授 (京都大学)、水野智也氏 (東京大学物性研究所)、Dr. Je Hoi Mun (韓国、Max Planck Korea/POSTECH) との共同研究である。

6.3.5 その他

昨年度の S セメスターの特別実験 I で本研究室に配属されて活躍した原直樹君が修士課程に進学した。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 (ルール大学ボーフム、後、理化学研究所) の活躍によるものである。なお、項目 6.3.2–実験–と項目 6.3.3 の研究課題については、科学研究費補助金、挑戦的研究 (萌芽)、研究課題「マクロな回転対称性をもつ分子アンサンブルの生成技術の開拓」(課題番号：22K19005、研究代表者：酒井広文) の支援を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

＜受賞＞

[1] 酒井広文、令和 5 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰、科学技術賞 (研究部門)、「高強度レーザー電場を用いた気体分子の配向制御技術の研究」、2023 年 4 月 19 日.

＜報文＞

(原著論文)

[2] Je Hoi Mun, Shinichirou Minemoto, Dong Eon Kim, and Hirofumi Sakai, “All-optical control of pendular qubit states with nonresonant two-color laser pulses,” Commun. Phys. **5**, 226 (7 pages) (2022).

[3] S. Minemoto, J. H. Mun, T. Teramoto, A. Yagishita, and S. Tsuru, “Ultrafast X-ray photoelectron diffraction from free molecules: Simulations of diffraction profiles from transient intermediates in the elimination reaction of $C_2H_4I_2$,” J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **258**, 147221 (7 pages) (2022).

[4] T. Teramoto, S. Minemoto, T. Majima, T. Mizuno, J. H. Mun, A. Yagishita, P. Decleva, and S. Tsuru, “Basic studies toward ultrafast soft x-ray photoelectron diffraction; its application to probing local structure in iodobenzene molecules,” Struct. Dyn. **9**, 024303 (12 pages) (2022).

＜国際会議＞

(一般講演)

[5] Shinichirou Minemoto, Naoki Hara, and Hirofumi Sakai, “Challenge to form a molecular ensemble with macroscopic threefold symmetry,” presented in 37th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (online), 1P11, June 1st, 2022.

[6] Naoki Hara, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Development of a plasma shutter technique applicable to intense nanosecond two-color laser pulses,” to be presented in 38th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, June 2023.

＜国内会議＞

(一般講演)

[7] Maruf Hossain, Nanse Esaki, and Hirofumi Sakai, “Dynamics of all-optical three-dimensional molecular orientation with a linearly polarized fundamental pulse and an elliptically polarized second harmonic pulse,” 2022 年第 83 回応用物理学会秋季学術講演会、オンライン、2022 年 9 月 23 日 (金).

＜セミナー＞

[8] 峰本紳一郎、「レーザー光による分子配列・配向技術の高度化と X 線光電子回折法への応用」、東北大学多元物質科学研究所マテリアル・計測ハイブリッド研究センター講演会、2022 年 9 月 28 日 (水).

6.4 五神 研究室

本研究室では、光と物質の物理学の新たな側面を探ることを狙いとした研究を進めてきた。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きた。本研究室では、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 (∼100 mK) まで励起子ガスの温度を下げることに成功している。この低温領域で BEC の直接的観測法を開発し、3 次元半導体中の励起子 BEC の観測を世界で初めて実現した。我々はこれまで、アインシュタインが初めに提唱した粒子間の相互作用を伴わない相転移、という量子統計性が顕著に現れた現象を励起子系及び極低温 ^{7}Li ボース · ^{6}Li フェルミ混合原子気体系で実現しその特徴の研究を進めてきた。

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を開発した。

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きた。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求してきた。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きた。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観測されることを発見した。発光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によって、この特徴的な励起パワー依存性が生じることを明らかにし、極低温領域での BEC 転移を示唆していることを見出した。[5]

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、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た。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、励起子密度が BEC 転移密度近傍に到達すると特徴的な励起パワー依存性が生まれることが確かめられた。

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を用いてイメージングを行い、希釈冷凍機温度でのトラップポテンシャル中パラ励起子の実空間密度分布を測定した。励起パワーを系統的に変化させて密度分布を取得したところ、BEC 転移密度を超える励起子を生成した励起パワーの条件で、トラップポテンシャルの底に局所的な高密度信号が現れることを発見した (図 6.4.15)。出現する励起子密度、温度の条件を抽出することで、この局所的高密度信号は BEC 転移条件で現れる凝縮体であることを明らかにした (図 6.4.16)。さらに凝縮体の空間広がりが励起子密度の上昇とともに大きくなることを発見し、粒子間の斥力相互作用を取り込んだ Gross-Pitaevskii 方程式を適用することで励起子間の相互作用が斥力であること、そしてその散乱長が 4 nm と推定されることを明らかにした。さらに Condensate fraction に着目すると、ゼロ温度で 1 になる理想ボース気体とは大きく異なり、最大でも 0.016 にとどまることを明らかにした。これは熱浴と接触した非平衡開放系という励起子系のボース・アインシュタイン凝縮の特徴を反映しているものと言える。[5]

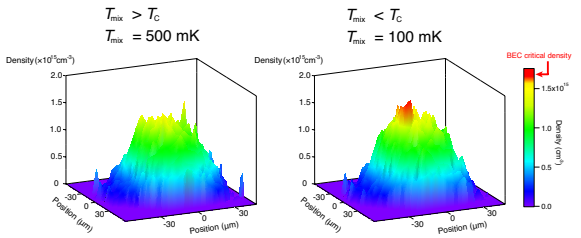

図 6.4.15: 誘導吸収イメージングの結果、観測された励起子ボース・アインシュタイン凝縮体。励起パワー 1.6 mW、mixing chamber 温度 400 mK 以下で 1s パラ励起子の実空間分布に生じたボース・アインシュタイン凝縮体が観測された。左 (右) は mixing chamber 温度 500 mK(100 mK) の時の励起子密度の空間分布を示している。縦軸が、空間各点でのパラ励起子の密度を表している。右図において BEC 転移密度を超えたところに局所的な高密度領域として凝縮体が現れている。

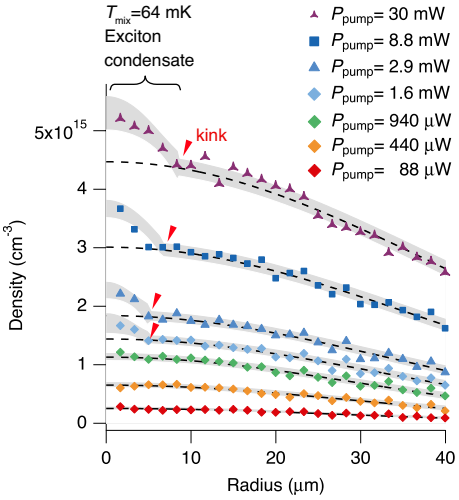

図 6.4.16: トラップされたパラ励起子の動径方向密度分布。mixing chamber 温度 64 mK での測定結果を表す。励起パワー 1.6 mW 以上で密度分布がガウス分布 (破線) から外れて、kink が生じていることが分かる。局所的な高密度信号が現れる境界条件である励起パワー 940 μW(1.6 mW) では中心の密度が 1.2(1.9) $\times$ 10^{15} cm^{-3} であった。この境界条件の二つの密度は BEC 転移密度 (1.7 $\pm$ 0.6 $\times$ 10^{15} cm^{-3}) と誤差の範囲内で一致する。

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。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ている [4]。我々は、ボース粒子系とフェルミ粒子系の混合物がボース粒子の性質を大きく変えないことを示し、フェルミ粒子は単純な熱浴とみなすことができることを明らかにした。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。これらは、アインシュタインが初めに提唱した、粒子間の相互作用を伴わない相転移という特異な相転移現象である BEC 転移の裏付けとなる実験的証拠である。

6.4.2 フェムト秒レーザー加工穴径の定量的予測を可能にするシミュレーション手法の開発

フェムト秒レーザーは近年、旧来の加工法では難しかった高精細かつ高品質な加工を実現できる手段として注目を集めている。フェムト秒レーザー加工では、波長、パルス幅、パルスエネルギー、繰り返し周波数など、レーザーパラメーターが膨大であり、加工対象物に合わせた最適なパラメーター探索が簡単ではないという点が実用上の大きな課題である。この課題を解決するために、フェムト秒レーザー加工の結果をサイバー空間で予測するためのシュレーターの開発が重要となっている。最近、ロボットによって取得した加工データをもとに、深層学習やベイズ推計などの帰納的なアルゴリズムを利用したシミュレーション手法の研究も活発に進められるようになってきた。

フェムト秒レーザー加工では、パルス幅が極めて短く、尖頭値の高いパルス光を空気中で集光するため、空気中で生じる様々な非線形効果によってビームのプロファイルがガウスビームから大きく変わることが予想される。機械学習によるシミュレーションを行う場合においてもこの影響は内在しており、計算負荷が増大する要因となっている可能性がある。一方、空気中のパルス光の非線形伝播については、大気中におけるフィラメンテーション現象の研究などがこれまでに研究されてきており、物理現象の理解は進んでいる。この知見を適切に取りこむことが重要であるが、レーザー加工の状況に適合する詳しい検討はこれまで行われていなかった。

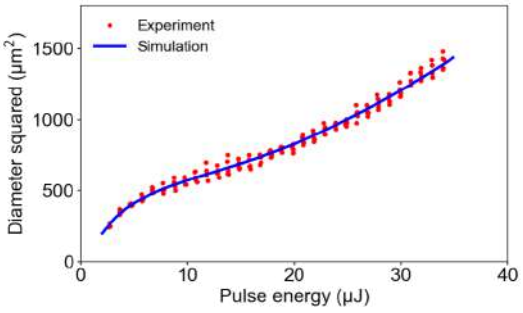

図 6.4.17: 銅に対してフェムト秒レーザーによって作製した加工穴の穴径のパルスエネルギー依存性についてのシミュレーションと実験結果の比較。実験は各パルスエネルギーにおいて 5 回ずつ行った結果を示す。

我々は、このような空気中を伝搬する光において生じる複雑な非線形現象の物理をレーザー加工の状況に即して明らかにすることで、フェムト秒レーザー加工の予測精度を高め、技術の汎用化とさらなる高性能化の実現に取り組んできた。これまで、特定のパルスエネルギーでの数値計算と実験の比較は報告されていたが、幅広いパルスエネルギー範囲でビームの非線形伝搬を系統的に捉えた報告はなく、加工形状のパルスエネルギー依存性の振る舞いを統一的に説明できるかは明らかではなかった。そこで本研究では、非線形伝搬が生じる条件での加工穴径のパルスエネルギー依存性を定量的かつ実用的な計算時間内で予測可能な計算手法を提案し、レーザー加工実験の結果と比較することでその有効性を示した [1]。

まず、3 次の非線形効果による自己収束、気体のイオン化、プラズマによるエネルギー吸収、ビーム発散の効果を組み込んだ非線形伝搬方程式を用いて、フェムト秒レーザーパルス (波長 800 nm、パルス幅 40 fs) の空気中での伝搬過程をシミュレートし、ビームの電場強度分布のパルスエネルギー依存性を調べた。ここで、特にプラズマ密度を決める空気のイオン化レートを正しく導入することが重要であることを見出した。その結果得られる集光点におけるビームプロファイルの計算結果と、銅のレーザー破壊閾値フルエンスから、銅の加工穴径を予測した結果を図 6.4.17 に示す。一方、シミュレーションと同じ条件で実際に銅に対してフェムト秒レーザー加工を行い、形成された加工穴径の測定結果も図 6.4.17 に示した。これらの結果から、2 桁におよぶ広いパルスエネルギー範囲で、シミュレーション結果と実験結果がよく一致していることがわかる。金やアルミニウムを対象とした場合でも、同様の結果を得ること

ができた。本手法は、非線形伝搬が生じるような比較的強い励起条件下でのフェムト秒レーザー加工について、幅広いパルスエネルギー領域において加工結果を定量的に予測可能な手法であり、レーザー加工結果の演繹的予測を実現にむけた重要な知見である。

本研究は、三尾研究室との共同研究の成果である。

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

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きた。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んできた。そのため我々は従来の半球型ではなく Time of Flight（ToF）形式の角度分解光電子分光装置を採用した。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 ToF 型の光電子分光装置が高い収率を有することに着目して、トポロジカル絶縁体の非占有バンド構造を高いエネルギー分解能で測定することを試みた。この結果、従来の手法では長時間での測定を必要とする非占有バンド構造測定を短時間で実現し、なおかつ 2 次元波数空間上での電子分布も一挙に取得できることを示した。

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 月に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。本組織では、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る。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ものである。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Ryohei Yamada, Wataru Komatsubara, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Norikatsu Mio, Junji Yumoto, and Makoto Kuwata-Gonokami: “Simulation of nonlinear propagation of femtosecond laser pulses in air for quantitative prediction of the ablation crater shape”, *Optics Express* **31**, 7363 (2023).

[2] Masataka Kobayashi, Yusuke Arashida, Kanta Asakawa, Keisuke Kaneshima, Masashi Kuwahara, Kuniaki Konishi, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami, Jun Takeda and Ikufumi Katayama: “Pulse-to-pulse ultrafast dynamics of highly photoexcited $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films”, *J. Appl. Phys.* **62**, 2 (2023).

[3] H. Yuyuan, K. Kuniaki, M. Deura, Y. Shimoyama, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami, Y. Shimogaki, T. Momose: “Suitability of metallic materials for constructing metal-coated dielectric terahertz waveguides”, *J. Appl. Phys.* **131**, 105106 (2022).

[4] Y. Chen, M. Horikoshi, M. Kuwata-Gonokami, K. Yoshioka: “Creating a noninteracting Bose gas in

equilibrium at finite temperature",*Phys. Rev. A* **105**, 043312 (2022).

[5] Y. Morita, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami: "Observation of Bose-Einstein condensates of excitons in a bulk semiconductor",*Nature Communications* **13**, 5388 (2022).

[6] J. Omachi, N. Naka, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami: "Mid-infrared dielectric response of Fermi-degenerate electron-hole droplets in diamond",*Phys. Rev. B* **106**, 235205 (2022).

(解説記事)

[7] 森田　悠介、吉岡　孝高、五神　真:「極低温で励起子のボース・アイン シュタイン凝縮体の可視化に成功」理学部ニュース 1 月号 (2023)

(プレスリリース)

[8] 森田　悠介、吉岡　孝高、五神　真:「世界最低温の励起子に生じたボース・アインシュタイン凝縮体を可視化することに成功」(2022 年 9 月 16 日プレスリリース; 東京大学大学院理学系研究科・理学部 広報室、東京大学大学院工学系研究科・工学部 広報室)

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[9] Kuniaki Konishi, Makoto Kuwata-Gonokami: "Metamaterials for controlling and generating circular polarization", EPS symposium on the third generation metamaterials (METAMATERIALS 3.1) (2022/8/3, Italy)

一般講演

[10] Mizuho Matoba, Kuniaki Konishi, Norikatsu Mio, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami: "Simulation Of Selective Excitation Of Dark Plasmon Modes In Single Metal Rods By Focused Terahertz Radial Beams", 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) 2022, Tu-AM-3-4 (2022/8/30, Delft, The Netherland, Oral)

[11] Ryohei Yamada, Wataru Komatsubara, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Norikatsu Mio, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami: "Modeling of Nonlinear Propagation of Femtosecond Laser Pulse in Air for Laser Ablation", Conference on Lasers and Electro-Optics 2022 (CLEO 2022) (2022/5/19, Poster)

[12] Ryota Takaku, Qi Wen, Scott Cray, Mark Devlin, Simon Dicker, Shaul Hanany, Takashi Hasebe, Teruhito Iida, Nobuhiko Katayama, Kuniaki Konishi, Makoto Kuwata-Gonokami, Tomtoake Matsumura, Norikatsu Mio, Haruyuki Sakurai, Yuki Sakurai, Ryohei Yamada, Junji Yumoto: "Large diameter millimeter-wave low-pass filter made of alumina with laser ablated anti-reflection coating", 16th International Conference on Laser Ablation (COLA2021/2022) (2022/4/28, Shimane, Oral)

(国内会議)

一般講演

[13] 櫻井 治之、小西 邦昭、田丸 博晴、湯本 潤司、五神 真:「シングルパルスレーザー加工における局所フルーエンスと加工深さの直接相関」第 7 回フォトニクスワークショップ、1-P-40、2022 年 11 月

[14] 山田 涼平、小松原 航、櫻井 治之、小西 邦昭、三尾 典克、湯本 潤司、五神 真:「レーザー加工穴形状の定量的予測を可能とする空気中でのフェムト秒光パルスの非線形伝搬シミュレーション」第 7 回フォトニクスワークショップ, 1-P-28, 2022 年 11 月

[15] 的場 みづほ、小西 邦昭、三尾 典克、湯本 潤司、五神 真:「テラヘルツラディアル偏光パルスを用いたダークプラズモンモード選択励起の数値計算解析」第 7 回フォトニクスワークショップ, 1-P-22, 2022 年 11 月

[16] 山田 涼平、小松原 航、櫻井 治之、小西 邦昭、三尾 典克、湯本 潤司、五神 真: 「レーザー加工穴径の定量的予測を可能とする空気中でのフェムト秒光パルスの非線形伝搬シミュレーション」第 83 回応用物理学会　秋季学術講演会, 2022 年 9 月 22 日

[17] 黄 昱源、小西 邦昭、出浦 桃子、下山 裕介、湯本 潤司、五神 真、霜垣 幸浩、百瀬 健:「THz 波デバイス用高アスペクト比構造への超臨界流体薄膜堆積法による Cu 被覆の検討」第 83 回応用物理学会　秋季学術講演会, 2022 年 9 月 22 日

[18] 川野 将太郎、戸田 圭一郎、櫻井 治之、小西 邦昭、井手口 拓郎:「サブピコ秒から数ナノ秒時間遅延領域における超短パルスレーザー加工の時間分解複素透過率イメージング」第 83 回応用物理学会　秋季学術講演会, 2022 年 9 月 21 日

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などを進めている．

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．2020 年 3 月に終了した O3 と呼ばれる最新の長期共同観測運転以降，LIGO，Virgo，KAGRA の各望遠鏡は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．2023 年 5 月から約 1 年半の観測運転 O4 を共に開始する

予定であり，これまで以上に密接な連携を取っている．KAGRA は O4 の初めには連星中性子星の観測可能レンジとして 1 Mpc 以上の感度で運転を行い，O4 の終わりまでに 10 Mpc 程度まで感度を向上させるための作業を行う予定である．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，一般相対性理論が予言するテンソルモードとは異なる偏極モードが初めて明確に分離できるようになり，一般相対性理論に代わる重力理論の検証が可能となると期待されている．さらに，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．

6.5.1 重力波望遠鏡 KAGRA

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．2020 年 4 月には 1 Mpc の連星中性子星観測可能レンジを実現し，ドイツの GEO との共同観測運転を実施した．観測運転の休止以降，O4 観測に向けて鏡の懸架系や干渉計の調整が行われている．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，KAGRA の将来計画の検討などを行っている．本年度は特に，重力波信号に混入する他自由度の長さ信号をあらかじめ除去するためのフィードフォワードの設計と実装や，他自由度のフィードバック制御によって混入する雑音を低減するために制御フィルターの改良を行なった．これにより数 100 kpc 程度観測可能レンジが向上し，短時間ではあるものの 1 Mpc のレンジを達成している．今後は干渉計動作の安定化および自動化に取り組みつつ，さらなる感度向上を目指す．また他にも，サファイア鏡の複屈折が干渉計に与える影響についてのシミュレーションを進めた．

Birefringence calibration of sapphire mirrors

The birefringence effect of KAGRA’s sapphire test masses is currently an important factor that influences the interferometer’s stable control. This year, we calibrated birefringence properties of sapphire mirrors using transmission wavefront error measurements. We successfully estimated the energy coupling from s-polarization to p-polarization and compared it with on-site measurements. We also designed a tabletop experiment which will demonstrate new real-time alignment control schemes for future KAGRA.

長基線信号増幅共振器

近年の LIGO-Virgo-KAGRA コラボレーションによる重力波観測を経て，連星ブラックホール・中性子星に関する数多くの知見が得られた．一方で観測された重力波の周波数は 10 Hz から 1 kHz 程度と限定的であるため，今後はより広い周波数帯での重力波観測が求められる．特に，数 kHz 帯の重力波は連星中性子星合体時に放出されるため，その観測は中性子星の状態方程式決定に重要である．数 kHz に特化した重力波望遠鏡が計画されており，そこで用いられるのが長基線信号増幅共振器と呼ばれる技術である．当研究室ではこの技術がテーブルトップスケールでさえ未実証であることに着目し，その原理実証を目指している．本年度は光学系や干渉計の構築が完了し，様々な干渉計自由度の同時制御に取り組んだ．

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．また，DECIGO の感度を制限する量子雑音の低減手法の検討に関する共同研究も進めた．本年度は特に，量子ロッキングと呼ばれる量子雑音低減手法において最適な信号処理を実現するフィルターの原理実証を行なった．

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．SILVIA は複数の宇宙機で構成され，その間の長さを精密測定・制御することでサブ um

級の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．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．本年度は，さらなるミッション構成の具体化とコスト評価等の検討を進め，2022 年 11 月に行われたプリプロジェクト候補移行審査を通過した．また，国立天文台とも共同で SILVIA 光学系の詳細設計にも取り組んでいる．

DECIGO/SILVIA のための地上実証実験

当研究室では，DECIGO, B-DECIGO のレーザー干渉計を構成する双方向 Fabry-Perot 光共振器の制御手法を確立するために，地上での検証実験を行っている．

本年度は特に角度方向の制御に着目し，地上検証用の実験セットアップを完成させた．また，wavefront sensor 法，beam pointing control 法によって双方向 Fabry-Perot 共振器の角度制御の全 12 自由度の制御に成功した．現在は，制御の最適化や残留変動の評価を行っている．

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新しい重力波検出器である．地上でも低周波数帯 (0.1 Hz 前後) の重力波に感度を持ち，中間質量ブラックホール連星合体の観測が可能になり，銀河中心の超巨大ブラックホールの形成過程に知見を与えることなどが期待できる．重力波観測以外にも地球活動による重力場変動を計測することで将来の地上重力波望遠鏡の低周波感度向上に貢献したり，地震の早期アラートに応用するなどの研究も進められている．

現在は長さ 35 cm の棒状の試験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．Phase-III における目標感度は，0.1 Hz においてひずみ換算で $10^{-15}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ となっている．

Phase-III TOBA の特徴の 1 つは，雑音の低減のために試験マスを 4 K にまで冷却することである．これまでに試験マスの冷却には既に成功しており，現在はさらなる高感度化に向けて次に述べる低温下での要素開発や光学系の改良などを行っている．

低温モノリシック光学系の開発

目標感度を妨げる雑音の 1 つに，読み取り光学系の変動に起因する雑音がある．この雑音の低減のため，Phase-III TOBA では基材に光学素子を直接接着するモノリシック光学系を用いて試験マスの変位を測定する．Phase-III TOBA の試験マス及び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のセンサー部分について，光学上盤上に通常の光学系を組み，特性評価を行った [66]，またモノリシック光学系の光学設計を行い，光学系の構築を始めた．今年度は特に干渉計の入射部分についてアセンブリを行った (図 6.5.18) [56]．今後は，モノリシック光学系のアセンブリを進め，低温下での測定を行う予定である．

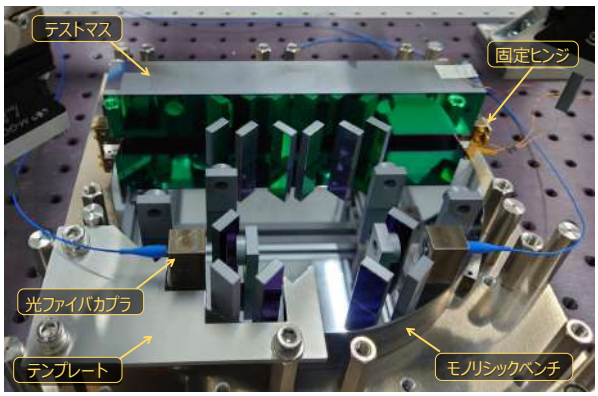

図 6.5.18: シリコン製モノリシック光学系．

改良型角度センサ

TOBA の回転を高精度に読み取る角度センサとして，wavefront sensor の後ろに鏡をもう 1 枚置いて補助共振器を構成する改良型角度センサを考案した．補助共振器による位相補償によって角度信号を増幅できることに加えて，ビームジッター雑音が小さいという利点がある．本年度は，共振器制御の安定化のため，テストマスを懸架するセットアップへの変更を行った．

Fiber Q measurement

Research was focused on characterising and lowering the suspension noise for torsion pendulums, focusing on two main key technologies: cryogenic temperatures, and crystalline fibres. This is in order to ensure that the noise floor of TOBA is low enough for its intended sensitivity. The key measurement metric is the Q factor, which we measure via the ringdown method with a torsion pendulum setup.

We have succeeded in achieving $Q = 2.2 \times 10^5$ at cryogenic temperatures for a torsion pendulum with a 1 mm sapphire fibre, which is a record for this setup. This was achieved by changing the length of the fibre for the torsion pendulum. This suggests that the limiting noise source for the current setup is coupling between the torsion modes and the other

resonant modes, and further characterisation is underway to quantify and reduce this coupling.

Tilt meter

To achieve the desired sensitivity of TOBA, the Active Vibration Isolation Table (AVIT) must effectively suppress ground vibrations. However, the tilt-horizontal coupling of seismometers on AVIT can affect its performance. To mitigate this, a highly sensitive tilt meter that is not influenced by translation is required. We have developed a beam balance type tilt meter as a proof of concept, with a 20 cm long beam balance and a resonance frequency of approximately 0.8 Hz. An optical level is used for readout, and feedback control is implemented to maintain the operating point. We have measured several tilts using this tilt meter and are currently investigating its noise sources and improving the design.

6.5.4 アクシオンダークマター探索

数々の宇宙観測によって宇宙に存在する物質の 8 割以上がダークマターという未知の物質で占められていることが明らかになっている．ダークマターは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おり，その存在は確実視されているが，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のダークマター候補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分類されるアクシオンに着目し，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偏光面を周期的に変化させる性質に着目し，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ている．KAGRA に必要な偏光光学系の導入は完了しており，2023 年 5 月に開始予定の O4 観測では重力波観測データに加え，アクシオン探索データが取得できる見込みである．

DANCE

DANCE 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 程度以下の軽量アクシオンを広帯域にわたって探査

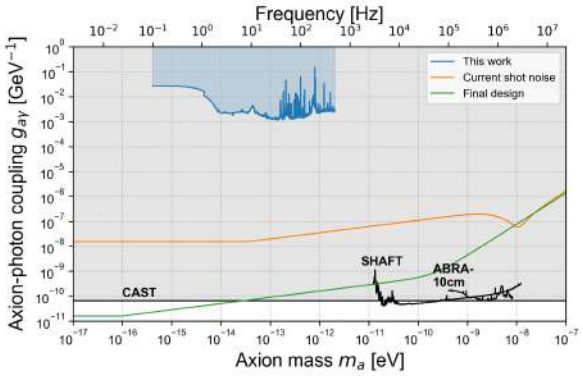

図 6.5.19: 光リング共振器を用いたアクシオン-光子結合定数の上限値.

することを目指した実験である．本年度は 2021 年 5 月にプロトタイプを用いて取得した 12 日間のデータの解析を完了し，光リング共振器を用いた初のアクシオン-光子結合定数の上限値を設けた (図 6.5.19)．また，s/p 偏光が共振器に同時に共振しないと感度が大幅に低下してしまうという問題が明らかになっており，現在は同時共振のための機構を備えた装置の開発も進められている．昨年度には補助共振器を利用した同時共振の実現に成功しており，本年度は光学素子の改良とオフライン解析によって約一桁の雑音低減に成功した．また，波長可変レーザーを用いて s/p 偏光の反射位相差をキャンセルすることにより同時共振を実現する手法も提案されている．本年度は V 字型の光共振器を作成し，ミラー 1 枚あたりの s/p 偏光間の反射位相差測定を行った．今後は，s/p 偏光間の反射位相差の時系列データを取得し，制御量についての調査を行った後．波長可変レーザーを用いた同時共振の実現を目指す．

6.5.5 相対論・量子光学実験

オプトメカニクス研究

重力波望遠鏡における最も原理的な雑音として，レーザー光の量子雑音が挙げられる．また巨視的な機械振動子を用いて量子雑音に制限された変位感度を観測することで，巨視的重ね合わせ状態を実現することが可能となる．当研究室では，その最初のステップとして 10 mg 程度のねじれ振り子を用いて量子輻射圧雑音を観測することを目指している．ねじれ振り子は両端に曲率のついた鏡を固定したダンベル型である．本年度は，鏡を固定するためのダンベル型のスペーサの制作を企業と共同で進め，設計通りのものが完成した．来年度は，鏡を固定して光共振器を構築し，量子輻射圧雑音観測を行う予定である．また，レーザー光によって共振器内の光学結晶が熱膨張する光熱効果をモデル化し，実験的に実証する共同研究も行った．

B-L 相互作用探査

超軽量ダークマターの候補の一つとして，標準理論に含まれていないゲージ対称性である $U(1)_{B-L}$ ゲージボソンが提案されている．このモデルでは，レプトン数とバリオン数の差である B-L に比例する力が存在するため，異なる原子で構成された機械振動子が異なる力を受ける．当研究室では，このような異なる機械振動子の変位差を光共振器で測定し，ダークマターを探査することを目指している．本年度は，探査可能なパラメータ範囲の設計，入射光学系の構築，機械振動子を防振するための懸架系の準備を行った．

＜受賞＞

[1] 高野哲: 2022 年秋季大会 日本物理学会 学生優秀発表賞，日本物理学会 (2022 年 10 月)

[2] Yuka Oshima: 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science Poster Award (November 2022).

＜報文＞

(原著論文)

[3] T. Ishikawa, *et al.*: First-step experiment for sensitivity improvement of DECIGO: Sensitivity optimization for simulated quantum noise by completing the square, Phys. Rev. D 107, 022007 (2023).

[4] M. Croquette, *et al.*: Recent advances toward mesoscopic quantum optomechanics, AVS Quantum Sci. 5, 014403 (2023).

[5] T. Kawasaki, *et al.*: Angular trapping of a linear-cavity mirror with an optical torsional spring, Phys. Rev. A 106, 013514 (2022).

[6] T. Shimoda, *et al.*: Coherent angular signs amplification using an optical cavity Appl. Opt. 61, 3901-3911 (2022).

[7] S. Otabe, *et al.*: Photothermal effect in macroscopic optomechanical systems with an intracavity nonlinear optical crystal, Opt. Express 30, 42579-42593 (2022).

[8] Yuta Michimura, *et al.*: Ultralight dark matter searches with KAGRA gravitational wave telescope, J. of Phys.: Conf. Ser. 2156, 012071 (2022).

[9] Yuka Oshima, *et al.*: First Results of Axion Dark Matter Search with DANCE, arXiv:2303.03594 (2023).

[10] Yuka Oshima, *et al.*: Wavefront Sensing with a Coupled Cavity for Torsion-Bar Antenna, arXiv:2207.13847 (2022).

[11] R. Abbott, *et al.*: Population of Merging Compact Binaries Inferred Using Gravitational Waves through GWTC-3, Phys. Rev. X 13, 011048 (2023).

[12] R. Abbott, *et al.*: First joint observation by the underground gravitational-wave detector KAGRA with GEO 600, PTEP 2022, 063F01 (2022).

[13] H. Abe, *et al.*: Performance of the KAGRA detector during the first joint observation with GEO600 (O3GK), PTEP ptac093 (2022).

[14] H. Abe, *et al.*: The Current Status and Future Prospects of KAGRA, the Large-Scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope Built in the Kamioka Underground, Galaxies 10, 63 (2022).

[15] R. Abbott, *et al.*: Search for Subsolar-Mass Binaries in the First Half of Advanced LIGO's and Advanced Virgo's Third Observing Run, Phys. Rev. Lett. 129, 061104 (2022).

[16] R. Abbott, *et al.*: All-sky, all-frequency directional search for persistent gravitational waves from Advanced LIGO's and Advanced Virgo's first three observing runs, Phys. Rev. D 105, 122001 (2022).

[17] R. Abbott, *et al.*: Search for Gravitational Waves Associated with Gamma-Ray Bursts Detected by Fermi and Swift during the LIGO–Virgo Run O3b, ApJ 928, 186 (2022).

[18] R. Abbott, *et al.*: Searches for Gravitational Waves from Known Pulsars at Two Harmonics in the Second and Third LIGO-Virgo Observing Runs, ApJ 935, 1 (2022).

[19] R. Abbott, *et al.*: All-sky search for gravitational wave emission from scalar boson clouds around spinning black holes in LIGO O3 data, Phys. Rev. D 105, 102001 (2022).

[20] R. Abbott, *et al.*: Narrowband Searches for Continuous and Long-duration Transient Gravitational Waves from Known Pulsars in the LIGO-Virgo Third Observing Run, ApJ 932, 133 (2022).

[21] R. Abbott, *et al.*: All-sky search for continuous gravitational waves from isolated neutron stars using Advanced LIGO and Advanced Virgo O3 data, Phys. Rev. D 106, 102008 (2022).

[22] R. Abbott, *et al.*: Search for gravitational waves from Scorpius X-1 with a hidden Markov model in O3 LIGO data, Phys. Rev. D 106, 062002 (2022).

[23] R. Abbott, *et al.*: Search for continuous gravitational wave emission from the Milky Way center in O3 LIGO-Virgo data, Phys. Rev. D 106, 042003 (2022).

[24] R. Abbott, *et al.*: Model-based Cross-correlation Search for Gravitational Waves from the Low-mass X-Ray Binary Scorpius X-1 in LIGO O3 Data, ApJL 941, L30 (2022).

(国内雑誌)

[25] 安東正樹: 重力波望遠鏡のための光・量子技術, 光学, 51, 7 (2022 年 7 月).

(学位論文)

[26] 小野将矢: 宇宙重力波望遠鏡に向けたレーザー干渉計の角度制御, 修士論文 (2023 年 3 月).

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[27] Masaki Ando: KAGRA: Large Cryogenic Gravitational Wave Telescope, International Conference on the Physics of Two Infinites (March 30th, 2023, Kyoto, Japan).

[28] Hiroki Fujimoto, *et al.*: Recent Upgrades of Optical System and Data Analysis in DANCE, Workshop on Very Light Dark Matter 2023 (Mar. 2023, Chino, Japan).

[29] Yuka Oshima, *et al.*: First Results of DANCE from Long-Term Observation, Workshop on Very Light Dark Matter 2023 (Mar. 2023, Chino, Japan).

[30] Masaki Ando: DECIGO: a space gravitational-wave antenna, KIW9: KAGRA International Workshop (June 6, 2022, Online).

一般講演

[31] Yuka Oshima, *et al.*: First Results of Axion Dark Matter Search with DANCE, FY2022 "What is dark matter? - Comprehensive study of the huge discovery space in dark matter" (Mar. 2023, Kavli IPMU and online).

[32] Hiroki Fujimoto, *et al.*: Axion dark matter search with optical ring cavity, FoPM International Symposium (Feb. 2023, University of Tokyo).

[33] Hiroki Fujimoto, *et al.*: Latest Status and Sensitivity of DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity experiment, KASHIWA DARK MATTER SYMPOSIUM 2022 (Dec. 2022, University of Tokyo and online).

[34] Ching Pin; Ooi, *et al.*: Development of a cryogenic suspension system for TOrsion-Bar Antennae (TOBA), The 5th International Forum on Quantum Metrology and Sensing (November 29th,2022, online).

[35] Yuka Oshima, *et al.*: Torsion-Bar Antenna for Early Earthquake Alert, The 5th International Forum on Quantum Metrology and Sensing (November 29th,2022, online).

[36] Masaki Ando: Future Strategy Committee, KAGRA F2F (Nov 30th, 2022, Online).

[37] Yuka Oshima, *et al.*: Angular Measurement with a Coupled Cavity for Torsion-Bar Antenna, KAGRA Future Working Group 2nd open meeting (November 2022, University of Tokyo and online).

[38] Masaki Ando, *et al.*: FWG Open Meeting, KAGRA Future Working Group 2nd open meeting (November 2022, University of Tokyo and online).

[39] Haoyu Wang, *et al.*: Mirror birefringence in KAGRA, LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration Meeting (September 2022, Cardiff and online).

[40] Haoyu Wang, *et al.*: Current status of birefringence characterization and simulation of KAGRA ITMs, The 29th KAGRA Face-to-Face meeting (August 2022, University of Tokyo and online).

[41] Yuka Oshima, *et al.*: Wavefront Sensing with a Coupled Cavity for Torsion-Bar Antenna, GRAvitational-wave Science & technology Symposium 2022 (June 2022, Padova, Italy).

[42] Masaki Ando: Gravitational Waves: VIRGO-KAGRA and Future R&Ds, ILANCE Meeting (June 8, 2022, ICRR Kashiwa, Chiba).

[43] Masaya Ono, Control of Dual-Pass Fabry-Perot cavity for space gravitational antennas:DECIGO and B-DECIGO The 9th KAGRA International Workshop (June 2022, online).

[44] Haoyu Wang, *et al.*: Birefringence characterization of KAGRA ITMs and simulation with Finesse, GWADW2022 (May 2022, online).

[45] Hiroki Fujimoto, *et al.*: Recent Upgrades and Future Prospects of DANCE, FY2022 "What is dark matter? - Comprehensive study of the huge discovery space in dark matter" (Mar. 2023, Kavli IPMU and online).

ポスター発表

[46] Yuka Oshima, *et al.*: Torsion-Bar Antenna for Low-Frequency Gravity Gradient Observation, 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (November 2022, University of Tokyo).

[47] Masaya Ono, *et al.*: Control of Dual-Pass Fabry-Perot Cavity for space gravitational wave antennas: DECIGO and B-DECIGO, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop 2022 (May 2022, online).

[48] Yuka Oshima, *et al.*: Angular Signal Amplification with a Coupled Cavity for Torsion-Bar Antenna, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop 2022 (May 2022, online).

[49] Satoru Takano, *et al.*: The Current Status of Torsion-Bar Antenna (TOBA) Experiment, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop 2022 (May 2022, online).

[50] Masaki Ando: Space GW Antennae: DECIGO/B-DECIGO, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop 2022 (May 2022, online).

(国内会議)

招待講演

[51] 安東 正樹: 重力波観測による時空の探査, KMI 分野横断セミナー 時空の漸近構造, 赤外発散, 重力波 (2022 年 12 月 18 日, 名古屋大学).

一般講演

[52] 小森健太郎, 他: 高周波重力波望遠鏡のための長基線信号増幅共振器の実証, 日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月, オンライン).

[53] 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 (9)：コミッショニングおよび最新の感度, 同上.

[54] 瀧寺陽太, 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 (10): ミラー 1 枚あたりの s/p 偏光の反射位相差測定, 同上.

[55] 大島由佳, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (37)：ねじれ振り子と読み取り光学系の開発, 同上.

[56] 高野哲, 他: ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA (Phase-III) の開発 (38): 低温モノリシック干渉計の開発と観測, 同上.

[57] Mengdi Cao, *et al.*: Development of Phase-III TOBA for Gravitational Wave Observation (39): Development of Tiltmeter 同上.

[58] Ching Pin; Oo, *et al.*: Development of Phase-III TOBA for Gravitational Wave Observation (40): Current Status on the Measurement of Q Value for Torsion Pendulums using Sapphire Fibres at Cryogenic Temperatures, 同上.

[59] 安東 正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (157)： B-DECIGO の概要, 同上.

[60] 小野將矢, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (160): 双方向 Fabry-Perot 共振器のアライメント制御, 同上.

[61] 小野將矢: 双方向 FP 共振器の角度方向制御, 第 21 回 DECIGO ワークショップ (2022 年 12 月, オンライン).

[62] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO の実現に向けて同上.

[63] 安東 正樹: 高感度重力勾配センサによる 地震早期アラート手法の確立, 光・量子飛躍フラッグシッププログラム 第 8 回領域会議 (2022 年 12 月 14 日, 東京工業大).

[64] 安東 正樹: 重力波望遠鏡 B-DECIGO, 第 66 回 宇宙科学技術連合講演会 (2022 年 11 月 1 日, 熊本城ホール, 熊本).

[65] 大島由佳, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (34), 日本物理学会 2022 年秋季大会 (2022 年 9 月, 岡山理科大学).

[66] 高野哲, 他: ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA (Phase-III) の開発 (35): 低温モノリシック干渉計の開発同上.

[67] Ching Pin; Ooi, *et al.*: Development of Phase-III TOBA for Gravitational Wave Observation (36): Development and characterisation of cryogenic suspension system, 同上.

[68] 小野將矢, 他: DECIGO, B-DECIGO のための双方向 Fabry-Perot 共振器の制御, 同上.

[69] 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 (8)：長時間測定に向けた制御法の開発, 同上.

ポスター発表

[70] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 第 23 回宇宙科学シンポジウム (2023 年 1 月 5-6 日, オンライン).

(セミナー・アウトリーチ講演)

[71] 小森健太郎: 宇宙にこだまする残響を聴く〜重力波観測の現在と未来〜, 第 35 回 東京大学 理学部 公開講演会 (2023 年 3 月, 小柴ホール).

[72] 藤本拓希: Axion dark matter search with laser interferometry, 重力波交流会 (2023 年 1 月).

[73] 大島由佳: 重力波望遠鏡でダークマターを探す, 第 73 回 東京大学 駒場祭 10 分で伝えます！ 東大研究最前線 (2022 年 11 月).

[74] Kentaro Komori: Precise measurement by laser interferometer: from macroscopic optomechanics to gravitational wave observation, QUP Project Q (B) 7th meeting (Sep. 21st, 2022, online).

[75] Kentaro Komori: Revival of 20-m interferometer or TAMA 300 as GW detectors, 2nd GWSP Future Strategy Meeting (Aug. 4th, 2022, NAOJ).

[76] 安東 正樹: 宇宙物理学の挑戦, 令和 4 (2022) 年度 物理学科 進学ガイダンス (2022 年 5 月 18 日, 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、2023 年度打ち上げ予定の XRISM 衛星や GRAMS 計画など、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。本年は特に中性子星や超新星残骸、中性子星-中性子星合体の観測的研究と、XRISM 衛星・GRAMS 計画・cipher 計画の開発研究を行った。

6.6.1 宇宙物理現象観測に関する研究

中性子星

中性子星はブラックホールを除いて宇宙空間で最も密度の高い天体であり、強重力、高密度、強磁場下での特異な物理現象を実現する宇宙で唯一の実験室である。伴星からの物質が降着する中性子星 (降着駆動型中性子星) は、最も明るい宇宙 X 線源の一つであり、中性子星磁場などの幾何構造を知る上でも重要である。しかし降着駆動型中性子星からの X 線放射は、中性子星自身と 10^{12} G にものぼる超強磁場による磁気圧・降着物質・伴星が公転する複雑な幾何構造をもつ系であるため、スペクトルは激しく

時間変動する。これを解くことで降着駆動型中性子星の幾何構造を理解することが重要となっている。

我々は、明るい降着駆動型中性子星 Cen X-3 の公転周期 2 周期分を覆う長時間観測を NuSTAR に提案、採択された。このデータから中性子星の自転周期と連星系の公転周期を分離し、中性子星への降着流は一定であり、スペクトル変動は伴星の星風による X 線の吸収と散乱に起因することを示唆した [14]。同様の解析を別の降着駆動型中性子星 Her X-1 についても行っている。また、中性子星の自転に伴う位相変化を 3 次元放射モデルと比較し、いずれの天体でも (1) 降着柱は半径より高さが大きい形状をしている、(2) 放射は降着柱上面からの放射 (”pencil beam”) はほとんどなく降着柱側面からの放射 (”fan beam”) が主である、(3) fan beam が直接観測者に届く成分と中性子星表面で反射した成分がある、という特徴を持つことを示した [20]。これらは降着駆動型中性子星の幾何構造に共通する特徴である可能性があり、サンプルを増やしたさらなる解析が期待される。また、IXPE をはじめとする X 線偏光観測による情報と併せることで、降着駆動型中性子星の幾何構造にさらなる制限をつけられると考えている。

また、我々は energetic なパルサー星雲の広帯域 X 線系統解析を NuSTAR データを用いて初めて行った。その結果、4 天体中 3 天体で X 線スペクトルに有意な折れ曲がりを発見した [6]。この折れ曲がりは放射の空間構造を考えない場合には再現できず、起源の解明が必要である。また折れ曲がりの形状が中心パルサーの進化に伴って進化する兆候も発見した。パルサー星雲が銀河宇宙線電子成分の主な起源と考えられており、今後理論面でもこのスペクトル形状を再現し宇宙線電子成分の加速に関する知見を広げていきたい。

超新星残骸

超新星残骸は星が死ぬ際の大爆発であり、そのエネルギーは 10^{51} erg にものぼる。爆発時には星が核融合で作っていた重元素をばらまき、また衝撃波で宇宙線を加速する。いわば超新星残骸は宇宙の多様性の源である。

超新星残骸衝撃波は、銀河宇宙線加速源の最も有力な候補であるものの、衝撃波からのエネルギー注入率や衝撃波からの逃亡タイムスケールなど、定量的理解はまだ進んでいない。我々は今年度も特に超新星残骸での宇宙線加速に特に注目した研究を続けている。

我々は宇宙線加速がどのような環境下でより効率よく起こるかを観測的に明らかにしようとしている。(a) 密度が薄い環境で減速されない衝撃波の方が加速効率が良くなるのか、(b) 密度が高い領域で乱流磁場が増幅されることで加速効率が良くなるのか、どちらが有利なのかを調べるため、我々は西暦 1604 年に爆発の記録の残る Kepler の超新星残骸衝撃波で加速された電子からのシンクロトロン X 線を XMM 衛星と NuSTAR 衛星で観測した。その結果、星周物質との衝突が見られない超新星残骸南部では (a) の傾向が強いものの、星周物質との衝突が示唆される北部では (b) の傾向が強くなることを示した [3]。この問題の解明にはさらなるサンプルが必要で、我々は RCW 86 など複数の天体で同様の解析を始めている。また XRISM 衛星の高分光観測を活かしたプラズマ診断を本問題に応用する手法を開発し [5]、XRISM での観測に備えている。

また、加速された粒子が如何に加速現場の増幅磁場から逃亡し宇宙線となるかも未解決問題のままである。我々は古い超新星残骸 G298.6-0.0 を Fermi (GeV ガンマ線)、Chandra (X 線)、NANTEN (電波 CO 輝線) などの多波長解析を行った。その結果、この超新星残骸の GeV ガンマ線は非常に soft であり、ジャイロ半径の大きい高エネルギー宇宙線は既に逃亡して比較的低エネルギーの粒子のみが残っていること、特に逃亡の様子が分子雲と衝撃波が衝突しているところでよくみられることを示した [13]。この天体からの GeV ガンマ線は超新星残骸としては最も soft な部類であり、G298.6-0.0 が GeV ガンマ線超新星残骸の中で最も古い天体である可能性を示唆している。我々は本天体の詳細解析を続け、宇宙線がこの天体から逃亡するタイムスケールを測定する予定である。

このほか、超新星残骸の X 線放射の進化のモデル計算 [4]、特性 X 線ドップラー偏移を利用した超新星残骸 0509-67.5 の膨張測定 [23] なども行っている。

中性子星-中性子星合体残骸

中性子星-中性子星合体は、重力波イベントとして重要なだけでなく、宇宙の超重元素の起源として高い注目を浴びている。しかし現在までに重力波観測で検出されたのは 1 イベントのみで、その頻度分布などは全く明らかになっていない。中性子星-中性子星合体では多くの中性子過剰原子核が生成され、その beta 崩壊から多くの核ガンマ線が放出される。しかし中性子星-中性子星合体は頻度が低く近傍で起こることはほとんどなく、宇宙ガンマ線観測の感度の低さから核ガンマ線検出はほぼ不可能とされてきた。

そのような中、我々は中性子星-中性子星合体の残骸に着目した。合体時に生成された中性子過剰核の中には寿命が比較的長く合体から長時間経っても核ガンマ線を放射するものがある。フラックスは下がるが観測可能なものがあるかもしれないという着想である。我々は様々な原子核からの核ガンマ線放射計算を行い、X 線望遠鏡で集光が可能な 100 keV 以下にも有力な核ガンマ線が複数あることを示した [2]。現在稼働中の衛星での現実的な検出は残念ながら難しいが、いくつかの核ガンマ線については、我々の銀河系内で中性子星-中性子星合体が 10^4 年以内に起こっていれば、アメリカで計画されている X 線宇宙衛星 HEX-P で検出可能なことを見出した 6.6.20。具体的には、^{126}Sn や ^{243}Am からの輝線が特に有力である。現在、HEX-P チームとより詳細な観測予想について議論を始めている。

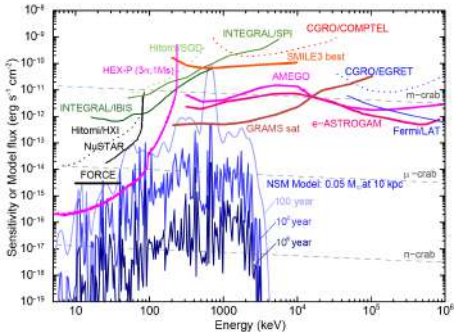

図 6.6.20: 中性子星-中性子星合体残骸からの核ガンマ線予測と X 線・ガンマ線衛星感度曲線の比較 [2]。残骸は 10 kpc の距離にあると仮定し、年齢は 100-10^4 年で計算している。いくつかの輝線が HEX-P(観測時間 1Ms) の感度より上に来ており、観測可能であることが分かる。

図 6.6.21: XRISM 衛星の振動試験の様子 ((c) JAXA)。

6.6.2 将来宇宙計画に関する開発

XRISM 計画

我々は JAXA-NASA 共同ミッションである XRISM に参加している。衛星は 2023 年度打ち上げに向け、最終調整が進んだ。衛星機器は全て正常に機能することが確認されてから衛星に搭載され、2022 年 11 月に熱真空試験、2022 年 12 月に振動試験 (図 6.6.21) を完了し、2023 年 3 月に種子島に移動して打ち上げを待っている。

サイエンス検討では、他波長や理論を専門とする外部メンバーを観測予定天体ごとに選定し、共同研究を始めている。2022 年 12 月にはコロナ禍以来初の対面国際会議を開催し、今後の研究方針を確認した。また、較正天体の選定も進めている。

6.6.3 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。

今年度は、LArTPC 中でのイベント再構成に機械学習を取り入れることでエネルギー分解能や位置分解能をあげられることをシミュレーションで示した [15]。また、LArTPC 中の光検出器は光電子増倍管が予定されているが、代わりに Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) を用いることで小型化・低電力化・検出効率向上が可能か検討を行った。まず採用候補の MPPC が液体アルゴン温度に近い液体窒素温度中でも正常に動作することを確認した。また液体窒素温度下での時定数は 250 ns という要求値を満たしており、MPPC は LArTPC の光検出器として有用であることを示した [21]。

LArTPC は上空での運用実績がないため、実際に上空で正常に運用できるか実証する実験が必要である。我々は大樹町で行われている JAXA 気球プラットフォームを利用した LArTPC の工学実証実験を申請し、2023 年度の実験として採用された。2023 年夏期の放球を目指しており、現在その準備を急ピッチで進めている。

6.6.4 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帯域での偏光測定である。X 線偏光観測は、X 線天文学の中心的手法である撮像分光観測に比べて、大きく遅れており今後の発展が期待される分野である。偏光観測がもたらす情報は極めて強力であり、等方的な熱的放射には偏光は生じないため、偏光は天体の放射機構を区別し、物理系のジオメトリを含む非等方性に関する重要なプローブとなる。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。我々は、特に 10 keV 以上の硬 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、その基礎技術開発を行い、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—30 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。

今年度は、主に現実的な観測に向けた実験と解析手法の開発を行った。今までの偏光解析には、CMOS センサで入射 X 線が作った電子雲が 2 ピクセルにまたがったイベントのみを用いて偏光能を測定してきた。しかし、10 keV を超える X 線の場合多くは 2 ピクセル以上に拡がった電子雲を形成し、2 ピクセル以内に留まるイベントは数%しか存在しない。そこで我々は、2 ピクセル以上に拡がったイベントでも入射 X 線の偏光方向を測定できるよう、イベントの波高値分布の 2 次モーメントを最大とする主軸方向を電子雲の拡がり方向と定義することで偏光測定が出来ないか検証した。その結果、100%偏光 X 線が入射した時の偏光測定能 modulation factor は従来手法の 70%程度に落ちるものの偏光検出が可能なことを見出した。さらに検出光子数も考慮に入れた偏光測定能を比較できる quality factor を導入し、20 keV では従来手法に比べ quality factor が 4 倍近くにあがることを示した。また、実際に cipher でブラックホール連星 Cygnus X-1 を観測するために必要な検出器条件を求めた。その結果、現実的な観測時間で有意な結果を得るためには、X 線望遠鏡など集光系が必要なことを明らかにした [22]。

＜受賞＞

[1] 岩田季也、”Unveiling the origin of the iron emission line of Centaurus A with high-resolution X-ray spectroscopy”, 最優秀ポスター賞、XRISM core-to-core office、2022 年 10 月 21 日

＜報文＞

(原著論文)

[2] Terada, Y., Miwa, Y., Ohsumi, H., Fujimoto, S., Katsuda, S., Bamba, A., Yamazaki, R. ”Gamma-Ray Diagnostics of r-process Nucleosynthesis in the Remnants of Galactic Binary Neutron-star Mergers”, 2022, Astrophys.J., 933, 111. doi:10.3847/1538-4357/ac721f

[3] Sapienza, V., Miceli, M., Bamba, A., Katsuda, S., Nagayoshi, T., Terada, Y., Bocchino, F., Orlando, S., Peres, G. ”A Spatially Resolved Study of Hard X-Ray Emission in Kepler’s Supernova Remnant: Indications of Different Regimes of Particle Acceleration”, 2022, Astrophys.J., 935, 152

[4] Katsuragawa, M., Lee, S.-H., Odaka, H., Bamba, A., Matsumura, H., Takahashi, T. ”On the Formation of Over-ionized Plasma in Evolved Supernova Remnants”, 2022, Astrophys.J., 938, 23

[5] Shimoda, J., Ohira, Y., Bamba, A., Terada, Y., Yamazaki, R., Inoue, T., Tanaka, S. J. ”X-ray line diagnostics of ion temperature at cosmic ray accelerating collisionless shocks”, 2022, PASJ, 74, 1022

[6] Bamba, A., Shibata, S., Tanaka, S. J., Mori, K., Uchida, H., Terada, Y., Ishizaki, W. ”Spectral break of energetic pulsar wind nebulae detected with wideband X-ray observations”, 2022, PASJ, 74, 1186

[7] Abe, S., Bamba, A., et al. ” Multi-wavelength study of the galactic PeVatron candidate LHAASO J2108+5157”, 2022, A&A, in press

[8] Jana, A., Ricci, C., Naik, S., Tanimoto, A., Kumari, N., Chang, H., Nandi, P., Chatterjee, A., Safi-Harb, S. ”Absorption Variability of the Highly Obscured Active Galactic Nucleus NGC 4507”, 2022, MNRAS, 512, 5942

[9] Yoneda, H., Odaka, H., et al., ”Reconstruction of multiple Compton scattering events in MeV gamma-ray Compton telescopes towards GRAMS: The physics-based probabilistic model”, 2023, Astroparticle Physics, 144, 102765

[10] Tsuji, N., Inoue, Y., Yoneda, H., Mukherjee, R., Odaka, H., ”MeV Gamma-Ray Source Contribution to the Inner Galactic Diffuse Emission”, 2023, ApJ, 943, 48

[11] Fukushima, A., Ezoe, Y., Odaka, H., ”Suzaku and Chandra study of diffuse X-ray emission from the massive star-forming region RCW 38”, 2023, PASJ, 75, 187

[12] Tanimoto, A., Ueda, Y., Odaka, H., Yamada, S., Ricci, C. ”NuSTAR Observations of 52 Compton-thick Active Galactic Nuclei Selected by the Swift/BAT All-sky Hard X-Ray Survey”, 2022, ApJS, 260, 30

[13] Yeung, P. K., Bamba, A., Sano, H. ”Multiwavelength studies of G298.6-0.0: An old GeV supernova remnant interacting with molecular clouds”, 2023, PASJ, in press

[14] Tamba, T., Odaka, H., Tanimoto, A., Suzuki, H., Takashima, S., Bamba, A., ”Orbital- and Spin-phase Variability in the X-Ray Emission from the Accreting Pulsar Centaurus X-3”, 2023, ApJ, 944, 9

[15] Takashima, S., Odaka, H., Yoneda, H., Ichinohe, Y., Bamba, A., Aramaki, T., Inoue, Y. ”Event reconstruction of Compton telescopes using a multi-task neural network”, 2022, NIMA, 1038, 166897

[16] Nagasawa, S., Minami, T., Watanabe, S., Takahashi, T. ”Wide-gap CdTe Strip Detectors for High-Resolution Imaging in Hard X-rays”, 2023, NIMA, in press

(会議抄録)

[17] Hasan, P., Pandey-Pommier, M., Vargas Domínguez, S., Piccialli, A., Saad Hassanin, A., Lazzaro, D., Norman, D. J., Wilkes, B. J., Leibacher, J., Lagos, C. a. D. P., Masegosa, J., Yang, L., Valls-Gabaud, D., Bamba, A., Nastula, J. "The IAU-Women in Astronomy Working Group and Inclusivity", 2022, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, 54, 129

[18] Mori, K., Bamba, A., et al. "A broadband x-ray imaging spectroscopy in the 2030s: the FORCE mission", 2022, Proc. of SPIE, 12181, 1218122

[19] Eguchi, S., Odaka, H., et al. "Xappl: software framework for the XRISM pre-pipeline", 2022, Proc. of SPIE, 12181, 1218161

(学位論文)

[20] 丹波翼, "X-ray study of the accretion flow onto highly magnetized neutron stars", Ph.D. thesis

[21] 市橋正裕,「宇宙 MeV ガンマ線観測実験 GRAMS のためのシンチレーション光検出器の開発」, 学位修士論文

[22] 岩田季也,「微小ピクセル半導体検出器を用いた X 線偏光計の応答関数の構築とブラックホール連星観測の検討」, 学位修士論文

[23] 南木宙斗,「超新星残骸 0509-67.5 の爆発機構解明に向けた X 線輝線のドップラー偏移による非等方膨張の測定」, 学位修士論文

(著書)

[24] 馬場 彩 (著), 衛宮紘 (訳),「世界第一簡單物理數學」(マンガでわかる物理数学台湾語版), 2022, 世茂 (ISBN：9789865408961)

(国際会議)

一般講演

[25] Bamba, A., Sano, H., Yamazaki, R., Vink, J.,"Understanding shock-cloud interaction on the supernova remnant RCW86 with Athena", "The third scientific conference dedicated to the Athena X-ray observatory", Madrid/Hybrid, 2022, Nov. 7-10 (oral)

[26] Odaka, H., "X-ray Imaging Polarimetry using a Fine Pixel CMOS Imager", NDIP20 (Conference on New Development in Photodetection), Troyes, France, 2022, July 4-8 (poster)

[27] Odaka, H., "Unveiling accretion disc winds from supermassive black holes with Monte Carlo X-ray radiative transfer modeling", What Drives the Growth of Black Holes?, Reykjavik, Iceland, 2022, September 26-30 (poster)

[28] Yeung, P.K., Bamba, A., Sano, H., "Gamma-ray and X-ray study of possibly oldest GeV supernova remnant G298.6 − 0.0", "Particle Acceleration in Astrophysical Objects", Rome/Hybrid, 2022, Sep. 5-7 (oral)

[29] Yeung, P.K.,"Multiwavelength studies of G298.6-0.0: Possibly one of the oldest GeV supernova remnants", "XRISM Core-to-Core Science Workshop", Saitama, 2022, Octobar 19-21 (poster)

[30] Tamba, T., Odaka, H., Bamba, A., Murakami, H., Mori, K., Hayashida, K., Teradam Y., Nobukawa, M., MIzuno, T., Yoneyama, T., XRISM MOPT, "Development of a new analysis framework for pile-up data of X-ray CCDs based on Monte-Carlo simulation", IACHEC 2022 Spring Virtual Workshop, online, 2022, May 23-25 (oral)

[31] Takashima, S., Odaka, H., Bamba, A., Yoneda, H., Ichinohe, Y., Aramaki, T., Inoue, Y., "A multi-task neural network model for event reconstruction of large effective area Compton cameras", "ADASS Conference XXXII", online, 2022, October 30-November 4 (poster)

[32] Minami,T., Bamba, A., Terada, Y., "XRISM と NuSTAR の同時観測による強磁場白色矮星の非熱的放射の探査","XRISM Core-to-Core Science Workshop 2022", Saitama, 2022, October19-21 (poster)

[33] Minami,T.,Katsuragawa,M,Nagasawa,S.,Takeda,S., Takahashi,T.,Tsuzuki,Y.,Watanabe,S., "Study of performance and response of thick CdTe double-sided strip detectors for various fields", "The 4th workshop on quantum beam imaging", Riken Wako, 2022, September26-27 (oral)

[34] Ichihashi, M., Kasuga, T., Odaka, H., Bamba, A., Kato, Y., Katsuda, S., Suzuki, H., Nakazawa, K., "The discovery of spatial variation of electron temperature in the northwestern region of SN1006", "Supernova Remnants and their Progenitors", Harvard/Hybrid, 2022, August 16-18 (oral)

[35] Ichihashi, M., Kasuga, T., Odaka, H., Bamba, A., Kato, Y., Katsuda, S., Suzuki, H., Nakazawa, K., "Understanding the heating mechanism of collisionless shocks with XRISM observations of supernova remnants", "XRISM Core-to-Core Science Workshop", Saitama, 2022, Octobar 19-21 (poster)

[36] Ichihashi, M., Kasuga, T., Odaka, H., Bamba, A., Kato, Y., Katsuda, S., Suzuki, H., Nakazawa, K., "The observation and future prospect of temperature gradient in the shock of SN1006", "Third Athena Scientific Conference 2022: Exploring the Hot and Energetic Universe", Saitama, 2022, November 7-10 (poster)

[37] Iwata, T., Tanimoto, A., Odaka, H., Bamba, A., Inoue, Y., "Unveiling the origin of hard X-ray emission of Centaurus A with multi-epoch NuSTAR observations: disk or jet?", "What Drives the Growth of Black Holes: A Decade of Reflection", Reykjavik, 2022, September 26-30 (poster)

[38] Iwata, T., Tanimoto, A., Odaka, H., Bamba, A., Inoue, Y., “Unveiling the origin of the iron emission line of Centaurus A with high-resolution X-ray spectroscopy”, “XRISM Core-to-Core Science Workshop 2022”, Saitama, 2022, October19-21 (poster)

[39] Arai, S., Odaka, H., Bamba, A., ”Hunting for jet/wind interactions in Cygnus X-3 with XRISM”, “XRISM Core-to-Core Science Workshop 2022”, Saitama, 2022, October19-21 (poster)

招待講演

[40] Odaka, H., “X-ray Polarimetry for Astrophysics with CMOS imaging sensors”, Pixel22 (10th International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging), Santa Fe, USA, 2022, December 12-16

(国内会議)

一般講演

[41] 馬場 彩、佐野栄俊、山崎了、Jacco Vink、「RCW 86 東部の X 線・分子雲観測を用いた衝撃波-分子雲相互作用と宇宙線加速の関係の検証」、日本天文学会春季年会、立教大学/ハイブリッド、2023 年 3 月 13-16 日 (oral)

[42] 小高裕和, GRAMS コラボレーション,「GRAMS 実験 9: ステータス報告」, 日本物理学会 2022 年秋季年会, 岡山理科大学, 2022 年 9 月 7 日 (oral)

[43] 小高裕和, “A new concept of a large-area MeV gamma-ray Compton telescope using liquid argon & the GRAMS project”, Ukakuren-RNCP Conference on Astronuclear Physics (ANP2022), 大阪大学, 2022 年 7 月 20-21 日 (oral)

[44] 小高裕和, 他,「FF-LAGRAN: Formation Flying が実現する高分解能・高感度の宇宙 MeV ガンマ線観測」, 第 66 回宇宙科学技術連合講演会, 熊本城ホール, 2022 年 11 月 1 日 (oral)

[45] 小高裕和,「MeV ガンマ線の高感度観測への挑戦とその展望」, 2040 年代のスペース天文学研究会, 名古屋大学, 2022 年 11 月 14-15 日 (oral)

[46] 丹波翼, 小高裕和, 谷本敦, 鈴木寛大, 高嶋聡, 馬場彩,「NuSTAR 衛星の長時間観測による大質量 X 線連星 Cen X-3 のスペクトル変動機構の解明」, 日本天文学会 2022 年秋季年会, 新潟大学, 2022 年 9 月 13–15 日 (oral)

[47] 丹波翼, ”X-ray study of the accretion flow onto highly magnetized neutron stars”, SXI 修士論文発表会, 大阪大学, 2023 年 2 月 14 日 (oral)

[48] 丹波翼, ”X-ray study of the accretion flow onto highly magnetized neutron stars”, 第 22 回高宇連研究会・博士論文発表会, 関東学院大学, 2023 年 3 月 6–8 日 (oral)

[49] 丹波翼, 小高裕和, 谷本敦, 鈴木寛大, 高嶋聡, 馬場彩,「降着 X 線パルサーのパルスプロファイル解析を用いた 降着円柱からの放射異方性の解明」, 日本天文学会 2023 年春季年会, 立教大学, 2023 年 3 月 13–16 日 (oral)

[50] 高嶋聡、新井翔大、市橋正裕、小高裕和、馬場彩、青山一天、櫻井真由、田中雅士、中曽根太地, 寄田浩平、米田浩基、渡辺伸、GRAMS コラボレーション、「GRAMS 実験 11: 液体アルゴンコンプトンカメラ実証機の開発状況」、日本物理学会春季大会、オンライン、2023 年 3 月 22–25 日

[51] 南喬博, 桂川美穂, 長澤俊作, 武田伸一郎, 都築豊, 渡辺伸, 高橋忠幸,「硬 X 線・MeV ガンマ線撮像分光観測に向けた厚型 CdTe 両面ストリップ検出器の性能評価及び応答の研究」, 宇宙科学シンポジウム, オンライン, 2023 年 1 月 5 日-6 日 (poster)

[52] 南喬博, 寺田幸功, 高橋忠幸, 馬場彩,「スペクトル・時間変動解析に基づく強磁場白色矮星 AE Aquarii の非熱的放射の性質の探査, 日本天文学会 2023 年春季年会, 立教大学, 2023 年 3 月 13-16 日 (oral)

[53] 市橋正裕, 小高裕和, 高嶋聡, 馬場彩, 一戸悠人, 八幡和志, 米田浩基, GRAMS コラボレーション,「GRAMS 計画 6: 低温環境下での光検出系の開発」, 日本天文学会 2022 年秋季年会, 新潟大学, 2022 年 9 月 13–15 日 (oral)

[54] 市橋正裕, 高嶋聡, 新井翔大, 丹波翼, 南木宙斗, 馬場彩, 青山一天, 櫻井真由, 清水虎冴, 田中雅士, 谷口日奈子, 中曽根太地, 寄田浩平, 一戸悠人, Dmitry Khangulyan, 小高裕和, 井上芳幸, 内田悠介, 須田祐介, 高橋弘充, 深沢泰司, 辻直美, 廣島渚, 八幡和志, 米田浩基, 渡辺伸, Tsuguo Aramaki, Georgia Karagiorgi, Reshmi Mukherjee, GRAMS コラボレーション,「GRAMS 実験 12： シンチレーション光検出器系の開発 」, 日本物理学会 2023 年春季年会, オンライン, 2023 年 3 月 22–25 日 (oral)

[55] 岩田季也、小高裕和、丹波翼、馬場彩、谷本敦、高嶋聡、南木宙斗、市橋正裕、新井翔大、神谷好郎、「CMOS イメージャを用いた X 線偏光撮像システムの開発 XI: 検出器応答の測定」、日本物理学会秋季大会、岡山理科大学、2022 年 9 月 6–8 日 (oral)

[56] 岩田季也、新井翔大、小高裕和、高嶋聡、南喬博、丹波翼、南木宙斗、市橋正裕、馬場彩、高橋忠幸、長澤俊作、渡辺伸、成影典之、「CMOS イメージャを用いた X 線偏光撮像システムの開発 XII: X 線偏光検出感度の評価」、日本物理学会春季大会、オンライン、2023 年 3 月 22—25 日 (oral)

[57] 新井翔大,「公転による変動の解析による Cyg X-3 の鉄輝線の放射起源の推定」, 第 52 回天文・天体物理若手夏の学校, オンライン, 2023 年 8 月 23-26 日 (oral)

[58] 新井翔大, 小高裕和, 高嶋聡, 馬場彩, 寄田浩平, 田中雅士, 青山一天, 内海和伸, 中島理幾, 深沢泰司, 高橋弘充, 須田祐介, 荒牧嗣雄, Karagiorgi Georgia, GRAMS コラボレーション, 「GRAMS 計画 8: 工学気球実験に向けた準備」, 日本天文学会 2023 年春季年会, 立教大学, 2023 年 3 月 13-16 日 (oral)

招待講演

[59] 丹波翼, 「Xtend を使い倒す: 明るい点源の観測と解析」, XRISM core-to-core workshop, 埼玉大学, 2022 年 10 月 19–21 日

(セミナー)

[60] 馬場 彩, 「多様性の源・超新星残骸」, 京都大学集中講義 (大学院), 2022 年 7 月 11 日-13 日

[61] 馬場 彩, 「X 線宇宙物理学とその検出技術」, 第 3 回創発研究交流会, オンライン 2023 年 2 月 3 日

[62] 馬場 彩, 「女性限定公募へ応募しづらさはありますか？ ざっくばらんに話してみよう」、「女性天文研究者の会・オンライン交流会」、オンライン 2023 年 3 月 16 日

[63] 小高裕和, 「コンパクト天体の物理：宇宙進化の駆動源として」, 宇宙地球科学セミナー, 大阪大学, 2022 年 7 月 14 日

[64] Yeung, P.K., Supernova Remnant Kes 79”, U.Tokyo/Hybrid, open to Department of Astronomy & Institute of Astronomy of The University of Tokyo Japan, June 2022

[65] Yeung, P.K., “High-Energy Studies of Two Intermediate-Aged/Old Supernova Remnants Kes 79 & G298.6-0.0”, Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Gifu University, Gifu, Japan, August 2022

[66] Yeung, P.K., “Multiwavelength studies of G298.6-0.0: Possibly one of the oldest GeV supernova remnants”, Department of Physics, Kindai University, Higashiosaka, Japan, September 2022

[67] Yeung, P.K., “Multiwavelength studies of G298.6-0.0: Possibly one of the oldest GeV supernova remnants”, Department of Astronomy, Kyoto University, Japan, September 2022

[68] Yeung, P.K., “Multiwavelength studies of G298.6-0.0: Possibly one of the oldest GeV supernova remnants”, Department of Physical Sciences, Aoyama Gakuin University, Japan, October 2022

[69] Yeung, P.K., “Multiwavelength studies of G298.6-0.0: Possibly one of the oldest GeV supernova remnants”, The University of Hong Kong, Hong Kong, November 2022

[70] Yeung, P.K., “Multiwavelength studies of G298.6-0.0: Possibly one of the oldest GeV supernova remnants”, Kagoshima University, Kagoshima, Japan, November 2022

[71] Yeung, P.K., “Multiwavelength studies of G298.6-0.0: Possibly one of the oldest GeV supernova remnants”, Core of Research for the Energetic Universe (CORE-U), Hiroshima University, Higashihiroshima, Japan, November 2022

[72] Yeung, P.K., “Hadronic gamma-rays from the radiative shell & molecular clouds of the old GeV supernova remnant G298.6–0.0”, Department of Physics, Nagoya University, Nagoya, Japan, March 2023

(一般向け講演)

[73] 馬場 彩,「BossB トーク第１弾「宇宙がアツい」w 馬場彩」、オンライン (2022 年 5 月 26 日)

[74] 馬場 彩, 「目には見えない激しく熱い宇宙を探る -X 線天文学-」、新宿高校分野別模擬講義、オンライン 2022 年 10 月 21 日

[75] 馬場 彩, 「熱い星の声を聴くと」、「第 7 回 やっぱり物理が好き！ ～物理に進んだ女子学生・院生のキャリア～」、東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU), 2022 年 11 月 19 日

[76] 山口弘悦, 馬場 彩, 492. 「X 線で観る激動の宇宙」、「アストロノミー・パブ」、三鷹ネットワーク大学、オンライン, 2022 年 11 月 19 日

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、2023 年の観測開始へ向けた設計・開発を進めている。

CMB を通した物理探索に加えて、自前の実験系を用いた暗黒物質探索も目指している。アクシオンや暗黒光子といった比較的エネルギーの低い暗黒物

質の探索では、標準量子限界によって感度が制限され得る。本研究では、標準限界に制限されることなく暗黒物質の探索を行うためにマグノンと量子ビットを用いた測定系の構築を進めている。

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いる。Polarbear 実験は 2012 年から 2016 年末まで観測を行い、これまでに 10 報以上の科学論文を出版してきた。データ解析の進展としては、2020 年に報告したインフレーション測定に特化したワイド観測データの再解析を行った結果、統計量を約 80%向上させることに成功した。その他現在までに、CMB 偏光データの AC oscillation を使った Axion-like particle (ALP) への制限解析、ワイド観測データによる宇宙論的複屈折解析や宇宙論的円偏光への制限解析が進められている。

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。

すでに運用を開始した 1 台目望遠鏡の較正観測や科学観測を継続する中で、日下研究室はデータ解析を中心となって率いてきた。データ較正手法を確立・改善した他、Planck 衛星による観測結果との cross-correlation や null-test といった CMB 解析の肝となる枠組みも開発した。

さらに、2022 年度は 2 台目望遠鏡の運用開始に向けた作業も大きく前進した。望遠鏡の目である超伝導ボロメータ、データを読み出す電子回路、系統誤差削減の鍵となる連続回転式半波長板などを望遠鏡にインストールし、人工光源や月・木星といった天体光源の観測に成功した。日下研究室からも学生がチリのサイトに赴き、現地での作業に大いに貢献した。現在は、テスト観測で得られたデータを解析し、サイトでの作業へフィードバックすることで科学観測実現に向けた準備を推し進めている。ここでも、1 台目望遠鏡のデータ解析の経験をもとに日下研究室のメンバーたちが中心的な役割を担っている。

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。

図 6.7.22: チリサイトでの 2 台目望遠鏡建設作業の様子。検出機較正装置の導入やデータ読み出し回路の準備作業などを行った。

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。本研究室では、これまでに開発してきた光学鏡筒に加えて細い金属線を偏光光源とした校正装置を開発した (図 6.7.24)。本研究室と京都大学の修士学生が主体となって共同開発を行い、遠隔かつ自動で較正が可能なシステムを構築した。昨年度はカリフォルニア大学サンディエゴ校にて試験中の小口径望遠鏡にて統合試験を行い偏光信号を取得することに成功した。

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、岡山大学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、2 台の望遠鏡システムへの統合・評価を進めている。2022 年度には 3 台目の半波長板システムを完成させ (図 6.7.25)、本研究室大学院生がローレンスバークレー国立研究所に一ヶ月間滞在し、望遠鏡との統合を行なった。大口径サファイアを 3 枚積層し、防反射加工を施した半波長板光学素子についても、Kavli IPMU および KEK との共同で開発を進め、1 台目分の光学素子作成を完了した。現在、3 台目の作成を順調に進めると共に、非接触による位置・温度計測システムや、位相補償によりモーターの効率を大きく向上する仕組みの開発など、観測開始に向けた性能向上を進めている。

データ解析においては、2023 年の観測開始と早期の結果報告を目標に、パイプラインの開発を進めてきた。特に小口径望遠鏡群にによるインフレーション測定データを解析する「B モードパイプライン」の開発を、共通する要素を多く含む Simons Array の

パイプライン開発と連携させながら進めている。また、パイプライン開発、及びシカゴ大学やカリフォルニア大学サンディエゴ校での試験データの解析を行うために、計算機 (64 コア CPU、1TB メモリ) を新たに導入した。

図 6.7.23: KEK および KavliIPMU と共同で Simons Observatory 実験用の低温反射防止膜を開発し、光学特性を KavliIPMU にて測定した。

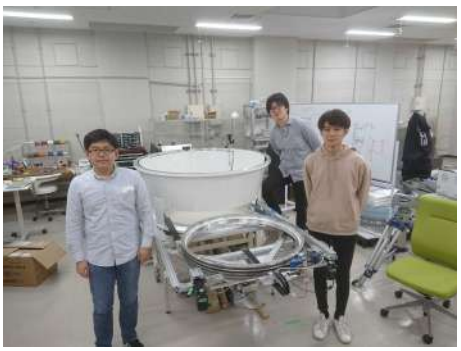

図 6.7.24: 京都大学と共同で Simons Observatory 実験用に偏光校正装置を開発した。自動で校正する機構を有している。

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。これまでに、希釈冷凍機を利用した検出器の試験環境を構築し超伝導検出器の測定・評価を行ってきた。超伝導検出器はその低い検出閾値からミリ波の検出が可能であるが、そのためにはミリ波回路を検出器に統合する必要がある。2022 年度はこのミリ波回路の

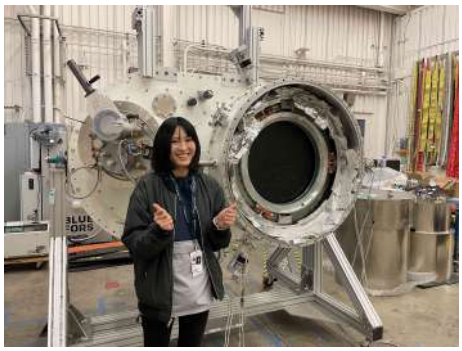

図 6.7.25: ローレンスバークレー国立研究所の望遠鏡受信機に統合された 3 台目半波長板システム。

開発を行っており、設計・試作を行った。超伝導検出器との統合試験に向けて理解を進めている。

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二層防反射加工を確立し、90~160 GHz 帯に加えて 200~300 GHz 帯についても開発を進めた他、低温での誘電損失の評価も行なった。また、30~40 GHz 帯のための三層の防反射加工の開発も進めている。

6.7.5 マグノンを用いたアクシオン探索

強い CP 問題を解決するために導入されたアクシオンは、宇宙の物質の 80%を構成する暗黒物質の有力な候補でもある。アクシオンのような低エネルギー暗黒物質を探索する上で、不確定性関係に起因する標準量子限界が感度を制限する要因になり得る。そこで、本研究室では工学系研究科物理工学専攻中村研究室と共同でマグノン (強磁性結晶における集団電子スピン励起) と量子ビットのハイブリット量子系の研究開発を進め、標準量子限界を超えた感度でアクシオン探索を行うことを目指している。

2022 年度は R&D として小サイズでの開発を進めた。有限要素シミュレーションで強磁性結晶を導入するキャビティを設計, 作成した。キャビティを 2 mm サイズの強磁性結晶とともに希釈冷凍機内へインストールすることでマグノン励起による共鳴ピークを観察することができた。さらに、より一様性の高い磁場を目指したキャビティの改良や 400 倍の大きさの強磁性結晶を用いた測定に向けて準備を進めている。

＜報文＞

(原著論文)

[1] The Polarbear Collaboration, “Improved Upper Limit on Degree-scale CMB B-mode Polarization

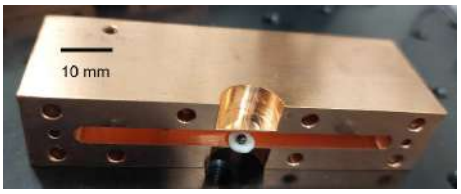

図 6.7.26: キャビティ内に直径 2mm の強磁性結晶（YIG）の球を導入したキャビティ-マグノンハイブリッド系

Power from the 670 Square-degree POLARBEAR Survey," *ApJ*, **931** 101 (2022)

[2] The POLARBEAR Collaboration, "Constraints on axion-like polarization oscillations in the cosmic microwave background with POLARBEAR," arXiv.2303.0841 (2023)

[3] Yume Nishinomiya *et al.*, "Development of the Characterization Methods Without Electrothermal Feedback for TES Bolometers for CMB Measurements," *Journal of Low Temperature Physics*, **209** 1079-1087 (2022)

[4] Kana Sakaguri *et al.*, "Broadband multi-layer antireflection coatings with mullite and duroid used for half wave plate and alumina filter for CMB polarimetry," *Journal of Low Temperature Physics*, **209** 1264–1271 (2022)

[5] Tomoki Terasaki *et al.*, "Development of Al-Nb hybrid Lumped-Element Kinetic Inductance Detectors for infrared photon detection," *Journal of Low Temperature Physics*, **209** 441-448 (2022)

[6] The POLARBEAR Collaboration, "Constraints on axion-like polarization oscillations in the cosmic microwave background with POLARBEAR," arXiv:2303.08410 (Mar 2023)

[7] Kevin D. Crowley, *et al.*, "The Simons Observatory: A large-diameter truss for a refracting telescope cooled to 1 K," *Review of Scientific Instruments* **93**, 055106 (May 2022)

(学位論文)

[8] 飯島健五, "Simons Observatory 実験に用いる偏光角度較正手法の開発と性能評価," 修士論文 (2023/01)

[9] 杉山純菜, "CMB 偏光観測のための低温半波長板を用いた偏光変調器の開発," 修士論文 (2023/01)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[10] Masaaki Murata *et al.*, "Development of the Calibration System with a sparse wire grid for Small Aperture Telescope of Simons Observatory," SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, Montreal, Quebec, Canada (2022/7)

[11] Kana Sakaguri for POLARBEAR Collaboration, "Preparation for the second telescope of the Simons Array CMB polarization experiment," International Conference on the Physics of the Two Infinities, Kyoto University (2023/3)

[12] Junna Sugiyama for Simons Observatory collaboration, "Development of a Cryogenic Half-wave Plate for Simons Observatory," International Conference on the Physics of the Two Infinities, Kyoto University (2023/3)

[13] Atsuto Takeuchi for POLARBEAR Collaboration, "Status of the Simons Array Experiment," International Conference on the Physics of the Two Infinities, Kyoto University (2023/3)

[14] Kana Sakaguri for POLARBEAR Collaboration, "Preparation fot the Simons Array CMB polarization experiment and development of optical elements," 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (TSQS) 2022, The University of Tokyo (2022/11)

[15] Kana Sakaguri、他 POLARBEAR Collaboration, "Preparation for the Simons Array second telescope for CMB polarimetry," FoPM international symposium, The University of Tokyo (2023/2)

[16] Yaman Singh Shrestha 他, "Development for axion search using quantum non-demolition detection of magnons," FoPM international symposium, The University of Tokyo (2023/2)

[17] Tomoki Terasaki、他 Simons Observatory Collaboration, "The Simons Observatory," FoPM international symposium, The University of Tokyo (2023/2)

[18] Akito Kusaka, "Quantum Sensing & Magnons for Particle Detection," QUP Workshop toward Project Q, Online / KEK, Tsukuba (2022/11)

[19] Akito Kusaka, "The next generation of CMB observation that will realize the neutrino mass measurement and the exploration of super-TeV physics," International Conference on the Physics of the Two Infinities , Kyoto, Japan (2023/3)

招待講演

[20] Akito Kusaka, "Cosmic Microwave Background - challenges and future prospect," Frontiers in Cosmology, Bangalore, India (2023/2)

[21] Akito Kusaka, "Exploration of Inflation and Dark Universe through Cosmic Microwave Background," 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science, Tokyo, Japan (2022/11)

(国内会議)

一般講演

[22] 山田恭平, 他 POLARBEAR コラボレーション, "Simons Array 実験, POLARBEAR 実験の蟹星雲の観測による Axion 探索," 日本天文学会 2022 年秋季年会, オンライン (2022/9)

[23] 山田恭平, 他 POLARBEAR コラボレーション, “Simons Array 実験, POLARBEAR 実験のかに星雲の観測による Axion 探索,” 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン (2023/3)

[24] 竹内敦人, 他 POLARBEAR コラボレーション, “CMB 偏光観測に向けた Simons Array 実験の解析の現状,” 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン (2023/3)

[25] 村田雅彬、他 POLARBEAR コラボレーション, “Simons Array 実験におけるデータ選別手法の開発,” 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン (2023/3)

[26] 坂栗佳奈, “CMB 偏光観測に用いる反射防止膜の開発,” 日本物理学会 2022 年秋季大会 企画講演, 岡山理科大学 (2022/9)

[27] 坂栗佳奈、他 POLARBEAR コラボレーション, “Simons Array 実験の概要と 2 台目望遠鏡の準備状況,” 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン (2023/3)

[28] 西ノ宮ゆめ, 他 POLARBEAR コラボレーション, “Simons Array 実験における検出器応答および視線方向の評価,” 日本物理学会 2022 年秋季大会, 岡山理科大学 (2022/9)

[29] 西ノ宮ゆめ, 他 POLARBEAR コラボレーション, “Simons Array 実験における検出器応答の非線形性の評価,” 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン (2023/3)

[30] 杉山純菜, 他 Simons Observatory コラボレーション, “Simons Observatory 実験に用いる低温偏光変調器の効率化と性能評価,” 日本物理学会 2022 年秋季大会, 岡山理科大学 (2022/9)

[31] 杉山純菜, 他 Simons Observatory コラボレーション, “Simons Observatory 実験に用いる低温偏光変調器の運転試験および望遠鏡との統合試験,” 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン (2023/3)

[32] 寺崎友規, 他 Simons Observatory コラボレーション, “Simons Obeservatory 実験小口径望遠鏡の統合試験の現状報告,” 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン (2022/9)

[33] 飯島健五, 他 Simons Observatory コラボレーション, “Simons Observatory 実験に用いる偏光角装置の光学測定に向けた準備,” 日本物理学会 2022 年秋季大会, 岡山理科大学 (2022/9)

[34] シン シュレスタ ヤマン、日下暁人、木内健司、中村泰信、砂田佳希, “マグノン量子非破壊測定を用いたアクシオン探索の検討,” 日本物理学会 2022 年秋季大会, 岡山理科大学 (2022/9)

[35] シン シュレスタ ヤマン、日下暁人、木内健司、中村泰信、砂田佳希, “量子非破壊検出を用いたアクシオンダークマター探索への応用に向けた YIG 結晶の特性評価 ,” 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン (2023/3)

[36] 木内健司、他、Simons Observatory, “Simons Observatory 小口径望遠鏡用光学鏡筒の開発と統合試験,” 日本物理学会 2022 年秋季大会, 岡山理科大学 (2022/9)

[37] 木内健司、Simons Observatory, “Simons Observatory 実験小口径望遠鏡に用いる低温光学鏡筒の開発と統合試験,” 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン (2023/3)

[38] 佐藤澪、寺崎友規、木内健司, “単一赤外線光子検出に向けた集中定数型力学的インダクタンス検出器の性能評価,” 日本物理学会 2022 年秋季大会, 岡山理科大学 (2022/9)

[39] 佐藤澪、木内健司, “両偏波感度を有する超伝導検出器に向けたミリ波回路の開発,” 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン (2023/3)

[40] 茅根 裕司 他, “POLARBEAR 実験による CMB 偏光を用いた Axion 探査の現状,” 日本天文学会 2023 年春季大会, 立教大学 (2023/3)

[41] シン シュレスタ ヤマン 他, “マグノン量子非破壊測定を用いたアクシオン探索の検討,” QEd サマースクール 2022, OIST (2022/9)

[42] Akito Kusaka, “Exploration of Inflation and Dark Universe through CMB Polarization,” Astronomy Colloquium at Tohoku University, Sendai (2022/6)

[43] 日下暁人 他, “量子計測による新しい宇宙・素粒子物理学,” 日本物理学会 秋季大会 シンポジウム「2020 年代のヨタスケールへの挑戦」, オンライン開催 (2022/9)

[44] 日下暁人 他, “量子計測による新しい宇宙・素粒子物理学,” 日本大学 素粒子論研究室セミナー, オンライン開催 (2023/1)

＜受賞＞

[45] 坂栗佳奈、測定器開発優秀修士論文賞、KEK 測定器開発室 (2022/05)。

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。これらは皆、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する典型例である。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。

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。2022 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://labjp.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 次元ダイナミクス観測

液晶は、流動性がありながら分子の長軸を揃える配向秩序をもつが、配向が整合しない領域が存在することがある。そのような領域はトポロジカル欠陥と呼ばれ盛んに研究されてきたが、3 次元の線欠陥の運動を観測することは容易でなかった。我々は蛍光色素の静止した欠陥への吸着という先行研究を応用し、共焦点イメージングによる線欠陥の 3 次元ダイナミクス測定に成功した（図 6.8.27）。2 本の線欠陥が繋ぎ替わる再結合というトポロジカル欠陥特有の現象のうち、同一平面内で起こるものに着目して解析を行った。その結果、欠陥間距離のスケーリングを確認するとともに、2 次元欠陥にはない 3 次元欠陥ならではの対称性を明らかにし、その対称性が現れるメカニズムを議論した [5, 22, 26, 38, 41, 42, 46, 57]。より一般的な配置の再結合（図 6.8.27）についても解析を進め、理論との比較を行っている。

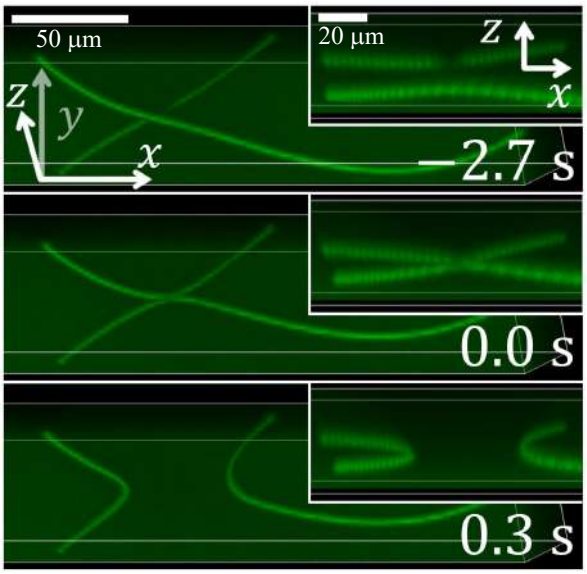

図 6.8.27: 液晶トポロジカル欠陥の共焦点観察 [5]。2 本の線欠陥が近づき、ぶつかり、組み変わる（再結合）。

液晶乱流の負粘性と自発流動

電圧印可によって駆動される液晶乱流は、条件により、実効的な粘性が負となる特異な物性を示す [17]。我々は、負粘性が生む顕著な現象である自発流動に着目し、平行平板間や微小流路において生じる自発流動パターンの計測に取り組んでいる。また、レオロジー測定と対流観察を同時に行うため、レオメーターの顕微鏡化にも着手した。

スポンジ状の粉体

多孔質土壌や雪などの圧縮性の高い媒体は、剪断を受けると突然、壊滅的な流動不安定を起こすことがある。このような不安定性の発生と大きな圧縮性の関わりを探求するため、我々は、リング状の弾性粒子の集団からなるモデル実験系を構築した。リングは、砂の中の粒のように配置を変えながら、スポンジのように大変形を示すこともできる（図 6.8.28）。このようなハイブリッド材料を用い、形状のゆらぎが不可逆的な変位にどのようにつながるかを明らかにし、定量化することを目指している [18, 19, 24, 50]。本研究は、ソフトマテリアルが示す興味深い力学特性 [8, 9, 12, 35, 45, 58, 72, 63] の一例と位置付けられる。

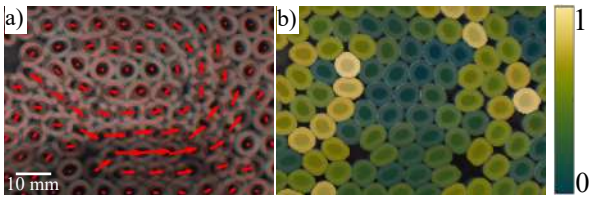

図 6.8.28: スポンジ状粉体。(a) 1 回の剪断サイクルによる不可逆変位。(b) リングの変形（離心率）。

確率的な粒子輸送のモデル実験

確率的な粒子輸送を記述するモデルとして、また非平衡多体問題の代表的な可解模型として、非対称単純排他過程（asymmetric simple exclusion process, ASEP）がよく知られている [54]。ASEP は、理論的・数学的研究が大いに進んでいる一方で、その特徴的指数が確率的粒子輸送の実験で報告された例はなく、ASEP の普遍的性質が出現する実験条件の探求は重要な課題である。そこで我々は、ビーズ粒子を収めるチャネル付き基板（図 6.8.29）を垂直加振することで確率的粒子輸送を実現し、その輸送特性を明らかにするモデル実験に取り組んでいる。

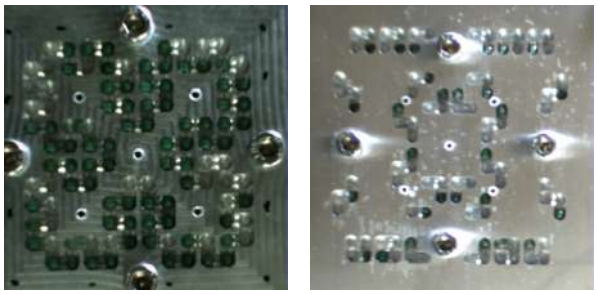

図 6.8.29: 確率的な粒子輸送のモデル実験

6.8.2 微生物系の非平衡実験

バクテリア集団内の不均一性を生む物理機構

単細胞生物であるバクテリアも多細胞生物の如く細胞集団を形成する。その集団はバイオフィルムとして知られ、細胞と彼らを繋ぐ細胞外マトリクスで構成される立体的な構造である。細胞とマトリクス、これら柱梁の時空間的な配置が規定する集団構造の理解のために、細胞集団におけるマトリクス生産の時空間的なパターンとその機構を調べている [47]。ハイドロゲル製ウェルに棒状の細胞が二次元的に詰められたとき、彼らはその長軸方向に向きが揃ったドメインを形成する（図 6.8.30 左）。この集団を飢餓条件下で培養すると、集団内の一部の細胞がマトリクス生産を開始する（図 6.8.30 右）。我々は、この不均一なマトリクス生産が、細胞配向ドメインと関係する可能性を見出している。また、液晶のパターン配向技術や微細加工技術などを活用し、マトリクス遺伝子の発現パターンや細胞集団形態の制御を目指す。細胞の配向という微小環境の不均一性が集団の形態形成に与える影響に迫る。

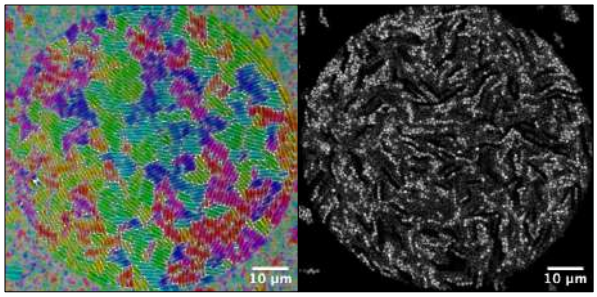

図 6.8.30: ウェル内に閉じ込められたバクテリア細胞（左、色は配向を表す）と不均一な細胞外マトリクス遺伝子発現（右）。

バクテリア集団のガラス転移

一般に流体は、密度の増大や過冷却によって、非晶質固体への動的な状態変化を起こす。これは「ガラス転移」と呼ばれ、構成粒子の運動停止、緩和の急激なスローダウン、動的不均一性などの特徴を伴う。近年は、アクティブマターなど、非平衡ソフトマターにおいてもガラス状態やガラス転移の探求が行われている。そこで我々は、一種の自己駆動粒子である運動性大腸菌を用い、独自の微小流体デバイスで長時間培養し高密度相を実現することで、大腸菌集団のガラス状態の探索を行った。結果、図 6.8.31 に示すように、充填密度の増大に伴い、アクティブ流体相からガラス相への転移を発見した [1, 11, 16, 20, 21, 23, 25, 28, 27, 51, 59, 61]。このガラス転移は、配向自由度の後に重心運動がガラス化する、二段階転移を示す。また、高密度化に伴い、向きの揃った菌集団からなるドメイン構造が形成され、それが集団運動や、動的感受率の異常なふるまいなどの特徴をもたらす。我々は、バクテリアガラスの更なる特徴づけによって、アクティブマターのガラスが何たるかを理解するとともに、高密度バクテリアが示すバイオフィルム形成などの生命現象における役割についても考察を進めたいと考えている。

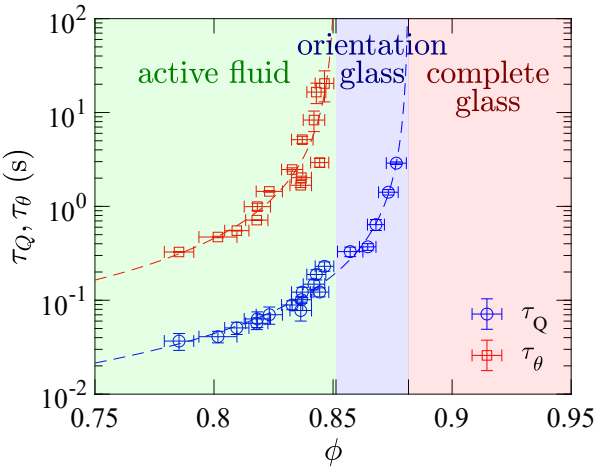

図 6.8.31: バクテリア集団のガラス転移 [11]。充填率 ϕ の増大に伴い、配向自由度の緩和時間 τ_θ と重心自由度の緩和時間 τ_Q が急激に増大する。

バクテリア集団運動の磁気応答

大腸菌や枯草菌などのバクテリアは、排除体積効果等により細胞の配向秩序が生じ、豊かな集団運動を見せる。我々は、細胞そのものが磁気応答を示す磁性細菌を用いて、外場の影響下でバクテリアの配向秩序を探索する実験系を模索している [49, 44]。PDMS 上に円形のウェルを構築し、螺旋形の磁性細菌 *Magnetospirillum magneticum* を閉じ込めて観察したところ、細胞集団に局所的なネマティック配向秩序が生じた。また、ウェル内での細胞集団に磁場を印加したところ、配向秩序は大域的なものに変化した。これらの結果は、バクテリア集団のネマティック配向秩序を磁場により操作し、関係を議論できる可能性

を示している。今後、配向秩序の磁気応答を解析してゆき、秩序形成過程の外場応答の理解を目指す。

6.8.3 非線形動力学によるアプローチ

閉鎖系におけるアクティブ流体模型の乱流化シナリオ

アクティブマターの集団運動において、時空間的に乱れた集団運動であるアクティブ乱流が幅広く観測される [14, 39, 43, 55, 53, 52, 73, 69, 67, 66, 65, 64]。アクティブ乱流を円形閉鎖領域に閉じ込めると、安定した定常な渦を自発形成する。我々は、この渦秩序が如何にして乱れるかを数値的に調べた。極性を持つアクティブ流体模型 (Toner-Tu-Swift-Hohenberg 方程式) を任意形状の閉鎖領域内で高速に計算可能な GPU ベースのコードを開発し、速度場を詳細に解像した。これにより、円形閉鎖領域内の定常な渦は、半径を大きくするに従って亜臨界ホップ分岐により振動する 2 渦へと転移し、さらに複数の振動状態とカオス状態の間を行き来するリエントラント転移を経て最終的な乱流状態へと至る道筋が明らかとなった [3, 29, 30, 32, 34, 37, 40, 48, 55, 62]。任意形状の境界での挙動を高速で予測できる本計算コードは、実験系のデザインに有用である。

非平衡界面の大偏差計測のためのアルゴリズム開発

非平衡界面成長を記述する Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 普遍クラスは、ゆらぎの厳密解が実験的にも検証されるなど、理論、実験の両面から発展が続いている [54]。これらの結果の多くは典型ゆらぎに関するものであり、典型値から大きく外れたゆらぎ（大偏差）については、理論的には盛んに研究されているものの、実験的に計測された例はない。本研究では、KPZ 普遍クラスにおける大偏差法則の実験計測手法の開発を目的とする。KPZ クラスの可解模型の一つである 1 次元完全非対称単純排他過程を例に、実験で実装可能な形式の重点サンプリング法によるシミュレーションを行い、大偏差を記述する特徴量の計測能力を実証するとともに、各種パラメータに対する収束性を調査した [36]。

＜受賞＞

[1] H. Lama, Best poster prize, Artificial and Living Matter Conference, Erice (Italy), Jul. 1, 2022.

[2] K. A. Takeuchi, IOP Trusted Reviewer Status, IOP Publishing, Oct. 17, 2022.

[3] 西口大貴, 第 6 回領域会議発表賞, 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」第 6 回領域会議, ポスター, アクロス福岡, 2023 年 3 月 7 日.

＜報文＞

(原著論文)

[4] A. N. Kato, K. A. Takeuchi, and M. Sano, Active colloid with externally induced periodic bipolar motility and its cooperative motion, Soft Matter, **18**, 5435 (2022).

[5] Y. Zushi and K. A. Takeuchi, Scaling and spontaneous symmetry restoring of topological defect dynamics in liquid crystal, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., **119**, e2207349119 (2022).

[6] T. Shimaya and K. A. Takeuchi, Tilt-induced polar order and topological defects in growing bacterial populations, PNAS Nexus, **1**, pgac269 (2022).

[7] Y. Takaha and D. Nishiguchi, Quasi-two-dimensional bacterial swimming around pillars: enhanced trapping efficiency and curvature dependence, Phys. Rev. E, **107**, 014602 (2023)

[8] A. Douin, S. Poincloux, J. P. Bruneton, and F. Lechenault, Assessing seismic-like events prediction in model knits with unsupervised machine learning, Extreme Mech. Lett., **58**, 101932 (2023).

[9] S. Poincloux, C. Vallat, T. Chen, T. G. Sano, and P. M. Reis, Indentation and stability of woven domes, Extreme Mech. Lett., **59**, 101968 (2023).

[10] H. Lama, L. Pauchard, F. Giorgiutti-Dauphine, and S. Khawas, Salinity induced stiffening of drying particulate film and dynamic warping, Phys. Rev. Mater., **7**, 025604 (2023).

[11] H. Lama, M. J. Yamamoto, Y. Furuta, T. Shimaya, K. A. Takeuchi, Emergence of bacterial glass: two-step glass transition in 2D bacterial suspension, arXiv:2205.10436.

[12] S. Poincloux, P. M. Reis, T. W. de Geus, Stick-slip synchronization in stack of elastically coupled frictional interfaces, arXiv:2301.13745.

(会議抄録・総説)

[13] D. Nishiguchi, Physics of Bait Balls: How Do Schooling Fish Form Rotating Clusters? JPSJ News Comments **19**, 13 (2022).

[14] 西口大貴, アクティブマター物理学：集団運動の秩序とゆらぎ. 物性若手夏の学校テキスト **67**, 304 (2023).

(国内雑誌)

[15] 竹内一将, トポロジカルな点が導く、細胞の集団運動. 細胞 **55**(3), 166 (2023).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[16] H. Lama, M. J. Yamamoto, Y. Furuta, T. Shimaya and K. A. Takeuchi, Glass transition in 2D bacterial suspension, Active and Intelligent Living Matter Conference, poster, Erice (Italy), June 27, 2022.

[17] F. Kobayashi, S. Ujiie, H. Orihara, and T. Nagaya, Search for Negative Viscosity induced by liquid crystal turbulence in various liquid crystal materials, 28th International Liquid Crystal Conference, Lisbon (Portugal), July 25, 2022.

[18] S. Poincloux and K. A. Takeuchi, Mechanics of an assembly of highly compressible grains, Workshop Méphy and Mecafib on "Friction and slender structures", oral, Paris (France), Oct. 10, 2022.

[19] S. Poincloux and K. A. Takeuchi, Sponge-like granular media, Graphyz2: the first Graphics-Physics workshop 2nd edition, oral, Saline Royale d'Arc-et-Senans (France), Oct. 17, 2022.

[20] H. Lama, M. J. Yamamoto, Y. Furuta, T. Shimaya and K. A. Takeuchi, Glassy Phase in Dense Bacterial Population, 13th Annual Symposium by Indian Scientist Association in Japan (ISAJ), oral, Tokyo (Japan), Nov. 17, 2022.

[21] H. Lama, M. J. Yamamoto, Y. Furuta, T. Shimaya and K. A. Takeuchi, Glass transition in dense 2D bacterial population, Active Matter in complex environment, poster, Aspen (USA), Jan. 4, 2023.

[22] Y. Zushi, Three-dimensional dynamics of topological "strings" in liquid crystal, FoPM International Symposium, oral, Tokyo (Japan), Feb. 8, 2023.

[23] K. A. Takeuchi, H. Lama, M. J. Yamamoto, Y. Furuta, T. Shimya, Emergence of bacterial glass: two-step glass transition in 2D bacterial suspension, APS March Meeting 2023, oral, Las Vegas (USA), Mar. 10, 2023.

[24] S. Poincloux and K. A. Takeuchi, Flow and deformation of a sponge-like granular media, Japan-France joint Seminar "Physics of dense and active disordered materials", poster, Kyoto (Japan), Mar. 13-16, 2023.

招待講演

[25] K. A. Takeuchi, Bacterial glass, The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15), invited talk, online, Aug. 22, 2022.

[26] K. A. Takeuchi, Scaling and spontaneous symmetry restoring of topological defect dynamics in liquid crystal, The 12th Dynamics Days Asia Pacific (DDAP12), invited talk, Daejeon (South Korea), Nov. 7, 2022.

[27] H. Lama, Microbial life from physics lens, Workshop on Sustainable Nanotechnology, invited talk, NIT Warangal (India), Oct. 11, 2022.

[28] K. A. Takeuchi, Bacterial glass, Japan-France joint seminar "Physics of dense and active disordered materials", invited talk, Kyoto (Japan), Mar. 15, 2023.

[29] D. Nishiguchi, Route from vortex order to active turbulence. Japan-France joint seminar "Physics of dense and active disordered materials", invited talk, Kyoto (Japan), Mar. 15, 2023.

(国内会議)

一般講演

[30] 西口大貴, アクティブ乱流の 3 次元構造と制御方法の開拓. JST さきがけ「複雑な流動・輸送現象の解明・予測・制御に向けた新しい流体科学」第 2 回領域会議, 講演, AP 市ヶ谷, 2022 年 4 月 15 日.

[31] 横山文秋, André Kling, Petra Dittrich, Extracellular Vesicle Detection of Single-Cell Escherichia coli on a Microfluidic Device. 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」第 5 回領域会議, ポスター, 淡路夢舞台, 2022 年 6 月 20 日.

[32] 竹内一将, 西口大貴, バクテリア集団の統計力学実験, 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」第 5 回領域会議, ポスター, 淡路夢舞台, 2022 年 6 月 20 日.

[33] 高羽悠樹, 西口大貴, 擬 2 次元での遊泳バクテリアと柱の相互作用：トラップ能率の増大と曲率依存性, 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」第 5 回領域会議, ポスター, 淡路夢舞台, 2022 年 6 月 20 日.

[34] 白谷空, 竹内一将, 西口大貴, アクティブ流体モデルが閉鎖領域で示す振動転移と履歴現象, 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」第 5 回領域会議, ポスター, 淡路夢舞台, 2022 年 6 月 20 日.

[35] S. Poincloux, P. M. Reis, T. W. J. de Geus, Stick-slip in a sheared multi-layer system, The Physical Society of Japan 2022 Autumn Meeting, 講演, Tokyo Institute of Technology, 2022 年 9 月 12 日.

[36] 柳橋勇太, 竹内一将, TASEP における KPZ 大偏差の Population Dynamics シミュレーション. 日本物理学会 2022 年秋季大会, 講演, 東京工業大学, 2022 年 9 月 14 日.

[37] 白谷空, 竹内一将, 西口大貴, アクティブ流体モデルが閉鎖領域で示す振動転移と履歴現象. 日本物理学会 2022 年秋季大会, 講演, 東京工業大学, 2022 年 9 月 14 日.

[38] 図司陽平, 竹内一将, ネマチック液晶における欠陥再結合のスケーリングと対称性. 2022 年液晶学会討論会, 講演, オンライン, 2022 年 9 月 15 日.

[39] 西口大貴, アクティブ乱流の 3 次元構造と制御方法の開拓. 第 16 回さきがけ研究者交流会, オンライン, 2022 年 11 月 9 日.

[40] 西口大貴, アクティブ乱流の 3 次元構造と制御方法の開拓へ向けた諸問題. JST さきがけ「複雑な流動・輸送現象の解明・予測・制御に向けた新しい流体科学」第 3 回領域会議, 講演・ポスター, クロスウェーブ梅田, 2022 年 11 月 15 日.

[41] 図司陽平, 竹内一将, 液晶におけるトポロジカル線欠陥再結合のスケーリングと対称性. 第 10 回ソフトマター研究会, 講演, 九州大学 西新プラザ, 2022 年 11 月 23 日.

[42] 図司陽平, 竹内一将, 液晶におけるトポロジカル線欠陥ダイナミクスの 3 次元蛍光イメージング. 第 14 回光塾, ポスター, 大阪大学吹田キャンパス, 2023 年 1 月 18 日.

[43] 西口大貴, アクティブ乱流のトポロジカル制御、そして 3 次元時空間ダイナミクス測定への挑戦. 第 14 回光塾, ポスター, 大阪大学吹田キャンパス, 2023 年 1 月 18 日.

[44] 後藤崇志, 西口大貴, 竹内一将, 環境への応答から探る生物集団運動の秩序形成 - 磁性細菌による探索 -. 第 14 回光塾, 講演, 大阪大学吹田キャンパス, 2023 年 1 月 18 日.

[45] S. Poincloux, Réponse mécanique d'assemblages de structures élancées, 26ème Journée Francophone de la Recherche, 講演, Maison franco-japonaise, Tokyo, 2023 年 2 月 3 日.

[46] 図司陽平, 竹内一将, 液晶におけるトポロジカル線欠陥ダイナミクスの 3 次元観測. 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」第 6 回領域会議, ポスター, アクロス福岡, 2023 年 3 月 6 日.

[47] 横山文秋, 竹内一将, 大腸菌集団内における微小空間依存的な細胞外マトリクスの生産. 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」第 6 回領域会議, ポスター, アクロス福岡, 2023 年 3 月 6 日.

[48] 西口大貴, アクティブ乱流は如何にして乱れるか？ 集団運動秩序の構造予測と制御とキラリティ. 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」第 6 回領域会議, ポスター, アクロス福岡, 2023 年 3 月 6 日.

[49] 後藤崇志, 西口大貴, 竹内一将, Active matter に外場を印加する: 磁性細菌による実験系の構築. 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」第 6 回領域会議, ポスター, アクロス福岡, 2023 年 3 月 6 日.

[50] S. Poincloux and K. A. Takeuchi, Flow and deformation of a sponge-like granular media, The Physical Society of Japan 2023 Spring Meeting, , 講演, オンライン, 2023 年 3 月 23 日.

招待講演

[51] 竹内一将, バクテリア集団のガラス転移. 非平衡ソフトマター・アモルファス物質の 物性解明への力学的自己組織化からの挑戦, 招待講演, 2022 年 6 月 24 日.

[52] 西口大貴, アクティブマター物理学：集団運動の秩序とゆらぎ. 第 67 回 物性若手夏の学校, 集中ゼミ, オンライン, 2022 年 8 月 4 日.

[53] 西口大貴, アクティブマター物理学：集団運動の秩序, ゆらぎ, 波, かたち. 流体若手夏の学校 2022, 紹介講義, 埼玉, 2022 年 8 月 26-27 日.

[54] K. A. Takeuchi, Kardar-Parisi-Zhang universality class, Stat&QuantPhys Autumn School 2022 (SQP2022), invited lecture, Sep. 27, 2022.

[55] 西口大貴, アクティブ乱流の気持ち：如何にして秩序化し、如何にして乱れるか？ . 統計物理学懇談会（第 10 回）, 招待講演, オンライン, 2023 年 3 月 27 日.

(セミナー・集中講義)

[56] 横山文秋, 細菌の細胞外膜小胞分泌とその細胞レベルの個性. UBI lunch-meeting, 講演, オンライン, 2022 年 4 月 20 日.

[57] 図司陽平, 液晶におけるトポロジカル線欠陥再結合のスケーリングと対称性. Young Soft Webinar 第 10 回セミナー, 講演, オンライン, 2022 年 5 月 10 日.

[58] S. Poincloux, Shape and indentation response of weaved domes, Young Soft Webinar 11 回セミナー, 講演, オンライン, 2022 年 5 月 30 日.

[59] H. Lama, Living bacterial glass, invited talk, Wenzhou Institute, UCAS (China), June 17, 2022.

[60] 竹内一将, アクティブマターの物理学. 名古屋大学 大学院理学研究科 理学専攻 物理科学領域 集中講義, 名古屋大学, 2022 年 7 月 4-6 日.

[61] 竹内一将, アクティブマターのガラス転移とバクテリア実験. 名古屋大学 大学院理学研究科 理学専攻 物理科学領域 談話会, 名古屋大学, 2022 年 7 月 5 日.

[62] 西口大貴, アクティブ乱流と境界とトポロジー. JST さきがけ「複雑な流動・輸送現象の解明・予測・制御に向けた新しい流体科学」数学・幾何セミナー, 東北大学 AIMR, 2023 年 1 月 13 日.

[63] S. Poincloux, Mechanics of assemblies of slender structures, Wada Lab seminar, 講演, Ritsumeikan University, Kusatsu, 2023 年 3 月 17 日.

(アウトリーチ)

[64] 竹内一将, 西口大貴, ほのぼの物理キーワード辞典「アクティブマター」動画監修, 2022 年 4 月 18 日公開.

[65] 西口大貴, 微生物の泳ぎと群れの物理学：生物学・化学・物理学がまじわるアクティブマター物理学. 古川学園高等学校高校 1 年生・東大見学における講演, 2022 年 6 月 8 日.

[66] 西口大貴, 微生物の泳ぎと群れの物理学：生物学・化学・物理学がまじわるアクティブマター物理学. 大阪星光学院高等学校・東京ツアーの受け入れおよび講演, 2022 年 7 月 30 日.

[67] 西口大貴, 泳ぐ微生物、泳ぐコロイド、そしてその群れを物理する. 東京大学理学部オープンキャンパス, オンライン, 2022 年 8 月 3 日.

[68] 竹内一将, 熱統計力学と生命の架け橋「アクティブマター物理学」. 灘中学校・高等学校 有志合宿 研究室見学・講演, 東京大学, 2022 年 8 月 10 日.

[69] 竹内一将, 西口大貴, 新学術領域「情報物理学でひもとく生命の秩序と設計原理」第一回実験勉強会, 東京大学, 2022 年 10 月 3-5 日.

[70] 後藤崇志, 柳橋勇太, 図司陽平, 西口大貴, 竹内一将, 茨城県立緑岡高等学校生徒による研究室見学, 東京大学, 2022 年 10 月 26 日.

[71] 竹内一将, トポロジーが決める特別な点：欠陥があやつる自然現象、あやつられる一研究者. MPUF 研究開発プロフェッショナルの流儀 第 21 回, オンライン, 2022 年 12 月 21 日.

[72] S. Poincloux and D. Nishiguchi, From eating pizza to the shape of salad: Geometry and mechanics of plates, JSPS Science dialogue program, 講演, 長野県諏訪清陵高校, 2023 年 2 月 24 日.

[73] 竹内一将, 西口大貴, 統計物理と生命の架け橋「アクティブマター物理学」. 東大の研究室をのぞいてみよう！ ～多様な学生を東大に～, 東京大学, 2023 年 3 月 27 日.

6.9 三尾研究室

三尾研究室では、レーザーとその応用に関する研究を行うことを目的としている。レーザーの発明は 1960 年で、それ以来、基礎から応用まで大変、幅広く利用されている。また、現代社会を支える基盤技術としても極めて重要で、通信、情報処理、加工などでなくてはならないものとなっている。さらに、2015 年に初めて観測された重力波でも、最先端の光技術が駆使されており、学術と社会を結ぶ架け橋である。

当研究室は、理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構 (IPST)[3]に所属しており、上述のように、光を使って学術の深化と産業への展開を目指している。IPST には当研究室以外に多くのメンバーが所属しており、全員が密接に連携して、研究と教育を進めている。

6.9.1 レーザー加工の物理

レーザーを使って、切断、溶接、切削などの加工を行うことをレーザー加工と呼ぶ。この分野はレーザー光源の進歩により、高出力の紫外光が利用できるようになり、また、パルス幅や波長などがかなり自由に制御できるようになってきて、新しい加工が可能になってきた。しかし、実際に起きている現象は、非平衡、開放系で、レーザー光と物質の相互作用も摂動的な考え方では説明できない領域にある。この現象の理解を進めて、応用への展開を進めていくことがこの研究の目的である。この研究は五神研究室、および IPST の小西研究室と共同で進めている。

加工時におけるレーザービームの非線形伝搬の効果

当研究室では、近年産業応用が盛んに進められている、フェムト秒レーザー加工に注目して研究を進めている。フェムト秒レーザーは、パルス幅が電子系から格子系への熱緩和時間 (～ps) よりも短いため、加工領域周辺への熱影響のない「非熱加工」が可能となる。一方、そのようなパルス幅の極めて短いレーザーを空気中で集光すると、非線形効果でビームの伝搬が大きく変わってしまう。これは当然、加工結果にも影響を及ぼすため、高出力のフェムト秒レーザーによる加工を行う上で、応用上の大きな障壁となっている。我々は、このような空気と光との複雑な非線形現象の物理を明らかにすることで、フェムト秒レーザー加工技術のさらなる高性能化に取り組んでいる [1, 22, 23]。

[3]http://www.ipst.s.u-tokyo.ac.jp/

まず、自己収束、気体のイオン化、プラズマによるエネルギー吸収、ビーム発散の効果を組み込んだ非線形伝搬方程式を用いて、ガウシアンビームの光パルス (波長 800 nm、パルス幅 43 fs) の空気中での伝搬を調べた。続いて、計算と同じ条件で銅のレーザー加工実験を行った。そして、線形伝搬領域での加工結果から抽出したレーザー破壊閾値を用いて、計算結果から加工穴直径を求めた。両者を比較した結果を図〇に示す。2 桁に及ぶ幅広いパルスエネルギー範囲で定量的によく一致していることがわかる [1]。さらに、数値計算の結果から、気体のイオン化レートがビームの伝搬に大きく影響する重要なパラメータであることを見いだした。本研究では、過去の詳細な実験データから導かれた Perelomov-Popov-Terent'ev (PPT) モデルを用いているが、先行研究では、PPT モデルを近似したモデルも用いられていた。そこで、PPT モデルと複数の代表的な近似モデルを用いた場合の計算結果をそれぞれ比較した結果、近似モデルを用いた場合には加工結果の予測性能が有意に低下することが明らかとなった。この結果は、空気中での非線形伝搬が生じる場合の加工結果を精度よく定量的に予測する上では、PPT モデルを用いることが重要であることを示している。今後は、本計算を光と物質の相互作用を考慮した計算と組み合わせることで、レーザー加工の物理的な理解を深めるとともに、加工穴深さの定量的な予測の可能性についても検討を進める予定である。

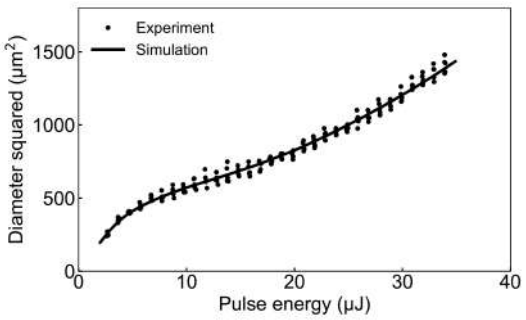

図 6.9.32: 加工穴直径の 2 乗のパルスエネルギー依存性について計算結果 (黒線) と実験結果 (黒丸) を比較した結果。

レーザーによる微細加工技術の応用

フェムト秒レーザー加工技術を、アルミナやサファイアなどの誘電体の 3 次元マイクロ加工へと応用する研究も進めている。例えば高出力レーザー加工を利用して、「モスアイ構造」という、光の波長よりも小さなピラミッド型の微細構造を作製し、反射率を 1%以下に下げることができる。モスアイの名前の通り、蛾の眼を模した構造で、等価的な屈折率が連続的に変化するので界面での反射が起きない、つまり、無反射な状態をつくることができる。

これまで、電波望遠鏡用の大型のモスアイの作製などに成功して来たが、現在は、このモスアイ構造の格子構造の最適化の検討を進めている [17]。通常はモスアイでは正方格子を作る作ることが多いが、これを 3 角形や 6 角形に変更した場合の電磁波に対する応答特性をシミュレーションによって調べた（図 6.9.33）。それによると 6 角形の格子を使うことで、高い周波数の電磁波に対しても透過特性を保つことが判明した（図 6.9.34）。図中の点線は正方格子の場合の透過最大周波数であり、6 角形にすることで帯域が広がることが確認できる。今後、実際の加工を行って透過特性の検証を進める予定である。

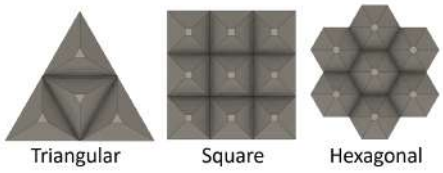

図 6.9.33: いろいろな格子構造のモスアイ

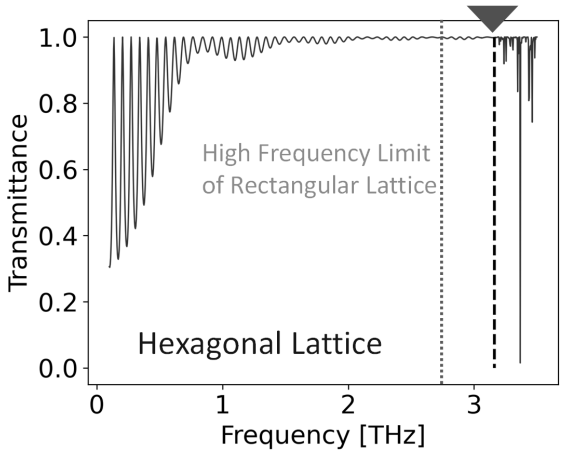

図 6.9.34: 6 角形格子モスアイの透過特性に関するシミュレーション結果

6.9.2 KAGRA project

重力波が実際に検出されてから、すでに、7 年以上の時が過ぎ、現在までに検出されたイベントは 90 となった。その多くは、ブラックホール連星の合体時のものであるが、観測されている質量の範囲は、重力波検出以前に比べて、もっと広い範囲となっている。また、中性子星連星の合体や中性子星とブラックホールの合体なども観測されている。このような天体は重力波観測以前にはまったく存在が知られていなかった。重力波の観測によって、新しい宇宙像が構築されつつある。

日本では、岐阜県神岡鉱山の中に、KAGRA が建設されている。KAGRA は地下の静粛な環境を利用し、また、低温技術を取り入れるなど先進的な技術を導入して、感度の向上を測っている。現在、米国の LIGO, 欧州の VIRGO との協力体制を構築している。KAGRA がこれまで、建設、調整を進めており、O4 と呼ばれる国際共同観測（2023 年 5 月に開始予定）に参加する。今後も、KAGRA プロジェクトの推進に関わっていく予定である。

＜報文＞

(原著論文)

[1] R. Yamada, W. Komatsubara, H. Sakurai, K. Konishi, N. Mio, J. Yumoto, and M. Kuwata-Gonokami: Simulation of nonlinear propagation of femtosecond laser pulses in air for quantitative prediction of the ablation crater shape, *OPTICS EXPRESS*, **941** 7363-7382 (2023) (10.1364/OE.482986).

[2] R. Abbott, *et al.*: Model-based Cross-correlation Search for Gravitational Waves from the Low-mass X-Ray Binary Scorpius X-1 in LIGO O3 Data, *ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS*, **31** (5) L30 (2022) (10.3847/2041-8213/aca1b0).

[3] R. Abbott, *et al.*: All-sky search for continuous gravitational waves from isolated neutron stars using Advanced LIGO and Advanced Virgo O3 data, *PHYSICAL REVIEW D* **106** (10) 102008 (2022)(10.1103/PhysRevD.106.102008).

[4] R. Abbott, *et al.*: Search for gravitational waves from Scorpius X-1 with a hidden Markov model in O3 LIGO data, *PHYSICAL REVIEW D* **106** (6) 62002 (2022) (10.1103/PhysRevD.106.062002).

[5] R. Abbott, *et al.*: Search for continuous gravitational wave emission from the Milky Way center in O3 LIGO-Virgo data, *PHYSICAL REVIEW D* **106** (4) 42003 (2022) (10.1103/PhysRevD.106.042003).

[6] R. Abbott, *et al.*: Search for Subsolar-Mass Binaries in the First Half of Advanced LIGO's and Advanced Virgo's Third Observing Run, *PHYSICAL REVIEW LETTERS* **129** (6) 61104 (2022) (10.1103/PhysRevLett.129.061104).

[7] R. Abbott, *et al.*: Searches for Gravitational Waves from Known Pulsars at Two Harmonics in the Second and Third LIGO-Virgo Observing Runs, *ASTROPHYSICAL JOURNAL* **935** (1) 1 (2022) (10.3847/1538-4357/ac6acf).

[8] R. Abbott, *et al.*: First joint observation by the underground gravitational-wave detector KAGRA with GEO 600, *PROGRESS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL PHYSICS* **2022** (6) 063F01 (2022) (10.1093/ptep/ptac073).

[9] S. Kato, Susumu, S. Kurimura and N. Mio: Influence of thermal stress on continuous-wave second-harmonic generation in periodically poled $LiTaO_3$ crystals, *OPTICS EXPRESS* **30** (12) 21258-21267 (2022) (10.1364/OE.458209).

[10] R. Abbott, *et al.*: All-sky, all-frequency directional search for persistent gravitational waves from Advanced LIGO's and Advanced Virgo's first three observing runs. P*HYSICAL REVIEW D* **105** (12) 122001 (2022) (10.1103/PhysRevD.105.122001).

[11] R. Abbott, *et al.*: Narrowband Searches for Continuous and Long-duration Transient Gravitational Waves from Known Pulsars in the LIGO-Virgo Third Observing Run, *ASTROPHYSICAL JOURNAL* **932** (2) 133 (2022) (10.3847/1538-4357/ac6ad0).

[12] H. Abe, *et al.*: The Current Status and Future Prospects of KAGRA, the Large-Scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope Built in the Kamioka Underground, *GALAXIES* **10** (3) 63 (2022) (10.3390/galaxies10030063).

[13] R. Abbott, *et al.*: All-sky search for gravitational wave emission from scalar boson clouds around spinning black holes in LIGO O3 data, *PHYSICAL REVIEW D* **105** (10) 102001 (2022) (10.1103/PhysRevD.105.102001).

[14] R. Abbott, *et al.*: Search for Gravitational Waves Associated with Gamma-Ray Bursts Detected by Fermi and Swift during the LIGO-Virgo Run O3b, *ASTROPHYSICAL JOURNAL* **928** (2) 186 (2022) (10.3847/1538-4357/ac532b).

[15] R. Abbott, *et al.*: Constraints on dark photon dark matter using data from LIGO's and Virgo's third observing run, *PHYSICAL REVIEW D* **104** (6) 63030 (2022) (10.1103/PhysRevD.105.063030).

(学位論文)

[16] 山田涼平：「レーザー加工におけるファムト秒パルスの空気中での非線形伝搬効果の探求」博士（理学）2023年3月.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[17] K. Soeda, K. Naganuma, K. Konishi, H. Tamaru, N. Mio, H. Ito,and J. Yumoto: "3D-Printed Waveguide for 220 GHz-325 GHz Band," 2022 47TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFRARED, MILLIMETER AND TERAHERTZ WAVES (IRMMW-THZ 2022) (August 31, 2022).

[18] M. Matoba, K. Konishi, N. Mio, J. Yumoto and M. Kuwata-Gonokami:"Simulation of Selective Excitation of Dark Plasmon Modes in Single Metal Rods by Focused Terahertz Radial Beams," 2022 47TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFRARED, MILLIMETER AND TERAHERTZ WAVES (IRMMW-THZ 2022) (August 30, 2022).

[19] R. Takaku,*et al.*: "Large diameter millimeter-wave low-pass filter made of alumina with laser ablated anti-reflection coating," 16th International Conference on Laser Ablation (COLA2021/2022), Th-O-67, Shimane, April 2022.

(国内会議)

一般講演

[20] 小池 陸生、川野 将太郎、櫻井 治之、小西 邦昭、三尾 典克：「モスアイ反射防止構造の透過スペクトルの格子構造依存性」[18a-A405-3] 第70回応用物理学会春季学術講演会、2023年3月18日、上智大学四谷キャンパス.

[21] 的場 みづほ, 小西 邦昭, 三尾 典克, 湯本 潤司, 五神 真: 「テラヘルツラディアル偏光パルスを用いたダークプラズモンモード選択励起の数値計算解析」第7回フォトニクスワークショップ, 1-P-22, 2022年11月25日.

[22] 山田 涼平、小松原 航、櫻井 治之、小西 邦昭、三尾 典克、湯本 潤司、五神 真：「レーザー加工穴形状の定量的予測を可能とする空気中でのフェムト秒光パルスの非線形伝搬シミュレーション」、第7回フォトニクスワークショップ、1-P-28、沖縄県青年会館、2022年11月 (ポスター賞受賞).

[23] 山田 涼平、小松原 航、櫻井 治之、小西 邦昭、三尾 典克、湯本 潤司、五神 真：「レーザー加工穴径の定量的予測を可能とする空気中でのフェムト秒光パルスの非線形伝搬シミュレーション」、第83回応用物理学会秋季学術講演会、22p-C301-8、東北大学 川内キャンパス、2022年9月.

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。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、英国ケンブリッジ大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。一方、2022 年 4 月に赴任した松永光幸助教が中心となり神経回路の進化に関する研究も開始した。

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だが、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。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、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。一方、深層学習を用いてガン組織病理学の診断を効率化することも試みている。

運動制御回路におけるシナプス集団活動の時空間構造の解明（福益一司、能瀬聡直、高坂洋史）

動物の運動における筋収縮の時空間パターンは、中枢神経系（CNS）において運動神経細胞の上流に存在する神経回路、中枢パターン生成器（CPG）によって調整される。CPG では多数の介在神経細胞が相互作用し、それによって生じた様々な波形の信号を運動神経細胞が統合することで、洗練された運動パターンが筋肉へと伝えられる。膨大な数の細胞が相互作用しながら時間発展する CPG の運動生成は非常に複雑なため、そのプロセスの解明には至っていない。

そこで本年度は、CPG において運動パターンを生成する経時プロセスを明らかにするため、回路内のシナプス集団活動における時空間構造の解析に取り組んだ。一般に神経系は、様々な感覚・認知情報を表現する脳内マップに神経突起を適切に配線することで、効率的に情報処理を行う。同様に、運動制御回路における運動神経細胞は、それらが制御する筋肉の配置を反映した樹状突起の分布を示す。従って、CPG におけるシナプスの空間配置とその活動の時間構造が、運動における筋収縮の時空間パターンの起源であることが予想される。これを確かめるため、幼虫の運動生成に関わる腹部神経節（VNC）を用いて、シナプス集団活動を解析した。まず、前年度までに開発を進めていた、カルシウムイメージングデータからブトン（シナプス前部）を自動検出するアルゴリズムを完成させた。この手法によって VNC のイメージングデータから取り出されたブトン集団活動を分析し、ブトン集団において運動生成時に生じる活動伝搬の詳細な時空間構造を抽出した。

解析の結果、運動生成時のブトン集団活動には、活動伝搬が局所的に周囲に拡散する点（発散点）と、そこに向かって収束する点（収束点）が、システム内に複数存在することを突き止めた。さらに、これらの点は、いくつかの列に沿って規則的に配置されていた。このような特徴的な活動伝搬の時空間構造に対して、神経活動の興奮性・抑制性に関わる神経伝達物質の分布、そして運動生成に関わることが知られる特定の神経回路の空間構造を比較解析したところ、活動伝搬の発散・収束点がこれらの構造と相関することが示され、これまでの研究と整合することが明らかとなった。従って、発散・収束点を含むシナプス集団の活動伝搬場に対して神経細胞を適切に配線することで、運動パターン生成が実現している

可能性が高い。実際、得られたシナプス集団の活動データに対して神経細胞の配置を最適化する、人工ニューラルネットを用いたシミュレーションを実行したところ、同様の活動伝搬を再現することに成功した。これらの成果は、イメージングデータからブトン集団活動を抽出する新たな手法によって初めて得られたものであり、神経系の回路機構解明のためにシナプス集団の活動解析が極めて重要であることを示す。

Expansion Microscopy を用いた幼虫中枢神経系の微細構造解析（伊達隆久、能瀬聡直、高坂洋史）

脳神経系では膨大な数の神経細胞がネットワークを形成しており、各神経細胞が動物の行動生成に果たす機能を理解することは神経科学の重要な課題である。これまでに我々は Expansion microscopy (ExM) という技術を用いてショウジョウバエ幼虫の中枢神経系の高解像度画像を取得し、神経系全体の構造を細胞レベルで解析してきた。ExM は、サンプルを吸水性ポリマーに埋め込んで等方的に膨張させ、蛍光プローブ同士を引き離すことで回折限界以下の構造を可視化する技術である。今年度は、全神経細胞を染色した ExM サンプルの画像から、神経細胞の情報伝達を担う軸索の束の配向を抽出することで、その細胞群の系譜が推定できることを明らかにした。また、主要な神経伝達物質であるアセチルコリン、GABA の免疫染色を ExM と組み合わせることで、興奮性と抑制性のシナプスの分布を高解像度で明らかにした。これらの神経回路の物理的基盤に関する知見が、動物行動という時空間パターンを生み出す回路機構の解明に貢献できると考えられる。

光変換型カルシウムセンサーによる自由行動中の神経活動の解析（伊達隆久、能瀬聡直、高坂洋史）

個々の動物は多様な運動パターンを駆使することで、複雑な環境下で活動している。異なる活動パターンが神経回路によってどのように生み出されるのかは、神経科学において重要な問題である。本研究では、自由行動中のショウジョウバエ幼虫において、異なる運動が生み出されるときに、中枢神経系のどの神経細胞が活動するのかを明らかにすることを目指した。この目的のために、幼虫の神経活動を光変換型カルシウムセンサー CaMPARI で記録する実験を開始した。CaMPARI は、神経活動に伴うカルシウムイオン濃度上昇と紫外線照射によって蛍光波長が緑から赤へ不可逆的に変化する。CaMPARI を全神経細胞に発現させた幼虫の自由行動時に紫外線を照射することで、その行動時に活動していた神経細胞・シナプスの形態と分布を赤色蛍光として読み取ることに成功した。今後この手法を用いることで、前進・後退・方向転換といった幼虫の様々な行動と相関する神経細胞とその形態・系譜を網羅的に明らかにしていく予定である。

深層学習モデルの病理画像データへの適用によるイメージングバイオマーカーの探索（パク　ジョンヒョク、能瀬聡直）

組織病理学の診断や遺伝子変異に関連するイメージングバイオマーカーを探索する深層学習基盤の方法論は大きく 2 つのカテゴリに分類することができる。深層学習モデルを End-to-end で使用する方法 (高レベル方法論) と、多数の深層学習モデルと特徴量のデザイン、そして機械学習モデルを組み合わせる方法 (低レベル方法論) である。本研究では The Cancer Genomic Atlas（TCGA）において公開されている病理イメージデータを使用して、マイクロサテライト不安定性（MSI）予測と MSI に関係があるイメージングバイオマーカーの探索における二つの方法論の比較を行なった。その結果、高レベル方法論と低レベル方法論両方が臨床の知見とも一致するイメージングバイオマーカーを探索できることを発見した。この研究成果は韓国 Seegene Medical Foundation の Yul Ri Chung 博士との共同研究として Scientific Reports に出版された。さらに、この研究に基づき、高レベル方法論を用いて予後を予測するイメージングバイオマーカーの探索を現在行なっている。がん細胞の局所的な密度をバイオマーカーの候補として見出しており、今後 TCGA の多数の臓器のデータを用いて検証を行う予定である。

7.1.2 運動出力ダイナミクスの定量的解析

神経回路の最終的な出力は、筋収縮による動物の体の局所的変形である。多数の筋収縮が協調的に生じることにより、動物の行動が生成される。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、開発した手法を用いて種分化における運動の多様化の仕組みや行動制御を担う神経修飾を探っている。

遠隔触覚刺激によるショウジョウバエ幼虫への行動介入技術基盤の開発（張旭、能瀬聡直、高坂洋史）

動物が示す洗練された行動は、進化の過程で、不均一で多様な環境に適応した産物である。この動物の適応性の高さを調べるには、多彩な環境を自在に生み出せる実験系の開発が不可欠であり、これにより神経回路、及び動物行動が高い環境適応性を備える機構を明らかにすることが期待できる。本研究では、ショウジョウバエ幼虫の運動に対して、高い自由度での物理的な介入を実現するために、超音波フェーズドアレイにより生成される局所圧力場を用いた行動介入実験系の開発を行なった。このシステムを用いることにより、従来の手法では難しかった可変な時空間障壁パターンでの幼虫行動への介入が可能になった。本研究は、新領域創成科学研究科の牧野泰

才博士、南山大学の藤原正浩博士らのグループとの共同研究である。

ショウジョウバエ幼虫の行動制御を担う神経修飾物質の探索（OSNATO Nicodemo、張旭、能瀬聡直、高坂洋史）

動物の運動パターンは、単位となる運動（歩行であれば一つのステップ）より長い時間スケールにおいても、制御されていることが知られている。例えば、ショウジョウバエ幼虫において飢餓状態になると運動速度が上昇する。このメタ時間スケールでの運動制御に関わると考えられるのが神経修飾物質である。神経修飾物質は、通常の神経伝達物質に比べて、広範囲でかつ長い時間スケールで作用することが知られている。しかし、神経修飾物質がどのように運動制御に関わっているかは、まだ不明な点が多い。

本研究では、ショウジョウバエ幼虫の探索行動をモデルとして、神経修飾物質が運動に及ぼす効果の定量的な解析を進めた。RNA 干渉法を用いて、ショウジョウバエゲノムで同定されている各神経ペプチド遺伝子の発現を全神経細胞で抑制し、幼虫の運動をマシンビジョンを用いて解析し、昨年度までに幼虫の運動スピードや方向転換頻度の制御に関わる候補遺伝子を同定した。今年度は、これらの候補遺伝子の飢餓状態での行動に与える効果を解析した。その結果、インシュリン様ペプチドなどの神経修飾物質の発現を阻害した個体で、飢餓状態における運動速度上昇がみられなくなった。このことから、これらの神経修飾物質が、動物の内的状態の情報を長い時間スケールの運動制御につなげる役割をもつことが示唆される。

7.1.3 行動制御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。そこで我々は光遺伝学的手法、及びコネクトミクスを効果的に用いることで、運動パターン生成や行動選択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運動速度制御における transverse 筋肉群の機能解析（劉英涛、能瀬聡直、高坂洋史）

ショウジョウバエ幼虫は、ぜん動運動によって移動する。ぜん動運動を行なう動物においては、各体節に存在する筋が体軸に沿って順次収縮することによって、移動を実現している。骨格を持たない多くの柔らかい動物の体表筋組織は、主に longitudinal（体軸方向）と transverse（体軸に垂直な方向）の筋肉群から構成されている。Longitudinal 筋は体節長の収縮を担うため、動物の推進力を生み出すが、一方の transverse 筋の機能には不明な点が多い。本研究は、ショウジョウバエ幼虫の運動速度制御における transverse 筋の機能解析を行なった。まず、自由行動中の transverse 筋の収縮の様子を明らかにするために、筋を蛍光標識した個体の高速撮影を行い、transverse 筋の長さの変化とぜん動運動との関係を解析した。その結果、longitudinal 筋の局所的な収縮が体軸上を伝播するぜん動運動中においては、transverse 筋はあまり収縮せず、ぜん動運動の合間に transverse 筋が収縮することが分かった。このとき、興味深いことに、全ての体節の transverse 筋が同時に収縮することが観察された。次に、transverse 筋の機能を理解するため、これを制御する介在神経細胞を同定し、光遺伝学を用いてこれらの神経細胞の活動を人工的に制御することによって、transverse 筋の活動に摂動を与え、その影響を調べた。その結果、transverse 筋の過剰収縮によって、体の長さの増加、運動速度の低下が確認された。一方、transverse 筋収縮の抑制によって運動速度の上昇が観察された。以上から、transverse 筋の収縮は、運動速度に影響を与えることが明らかになった。このことは、ぜん動運動を行なう動物において、ぜん動運動を行なっていない時間幅を調整することが速度制御において重要であることを示しており、動物の運動速度制御における新しい機構を示唆するものである。この研究は英国セントアンドリュース大学の Maarten Zwart 博士との 共同研究である。

行動選択を担う神経回路の構造機能解析（橋本裕作、石津大我、能瀬聡直）

触覚刺激は動物にとって潜在的な脅威である。そのため、動物はその刺激から反対方向に逃げる能力を有することが知られているが、どのような神経回路がこの過程を制御しているかについては、いまだ明らかにされていない。本研究ではショウジョウバエ幼虫を用いてこの問題に迫っている。幼虫は、頭部と尾部へ触覚刺激を受容すると、それぞれ後退運動、速い前進運動を伴う逃避行動を引き起こす。当研究の以前の研究においてこのような部位特異的な逃避行動において重要な役割を担うコマンドニューロンとして Wave ニューロンが同定されている。Wave ニューロンは、A2-A7 の神経分節で左右 1 組ずつ存在するが、前方（A2、3 分節）の Wave ニューロン (以降、a-Wave) は体前方への触覚刺激に関する感覚入力を受け後退運動を誘発するのに対し、後方（A4-7 分節）の Wave ニューロン (以降、p-Wave) は体後方への触覚刺激の入力を受取り速い前進運動を誘発する。このように、Wave ニューロンは触覚刺激の位置に応じて、適切な方向への運動を駆動する役割を果たすが、その下流でどのような回路がこの分節特異的な行動誘発を実現しているのかについては不明であった。

そこで本研究では、過去のコネクトミクス解析からWaveと実行ニューロン (運動を実行する介在ニューロン) の間にあることが分かっていた介在ニューロンbilateral thoracic (以降、BLT; a-Waveの下流ニューロン) とA19d(p-Waveの下流ニューロン) に着目し、これら2つのニューロンに対して機能解析を行った。はじめに、機能解析を可能にするため両ニューロンを遺伝学的に標的とするGal4系統の同定を試みた。約6000のGal4系統の発現パターンが蓄積されたFlylightデータベースを利用し、まずこれらニューロンを標的する可能性のある22系統を選び、さらに実際に実験的に確認することにより、 最終的にBLTとA19dニューロン両方を標的とするGal4系統R72E03-Gal4を同定した。

続いて、Gal80系統などを用いてR72E03-Gal4の発現をさらに限局することでBLT、A19dそれぞれを特異的に活性化・不活性化する実験を行った。まず、a-Waveの下流であるBLTの特異的な活性化では後退運動が誘導され、反対にその不活性化時には頭部触覚刺激呈示による後退運動の発生が阻害されることが分かった。一方、p-Waveの下流であるA19dの活性化は早い前進運動を誘導し、反対にp-A19d（および他のR72E03-Gal4標的ニューロン）の不活性化時には熱刺激呈示による速い前進運動の誘導が阻害されることが明らかとなった。したがって、BLTの活動は後退運動、A19dの活動は早い前進運動の誘導に必要かつ十分であることが示唆された。以上の結果は、Waveニューロンが BLT、A19dを介して、それぞれ後退、速い前進運動を誘発することを示唆している。現在、さらなる行動選択の回路機序解明に向け、a-Wave-BLTやp-Wave-A19d間の機能的なつながりやBLT/A19dの下流ニューロンについて調査している。

7.1.4 機能的神経回路の発生と進化

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、これ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。さらに、進化の過程で、どのように神経回路の構造と機能が変化することで、種特異的な行動が生み出されるのかを探っている。

行動選択を担う神経回路の構築原理（石津大我、橋本裕作、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機能するのか、また個体発生や進化の過程でどのように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 (VNC) の各節に 1 対ずつ存在し、節ごとにその軸索の形状が異なる。また、尾部に近いものを刺激すると前進を、頭部に近いものを刺激すると後退を惹起するというように、体節特異的な機能を持つ。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、Drosophila Wnt4(DWnt4) と、その受容体 Drosophila Frizzled 2(DFz2)、Drosophila Frizzled 4 (DFz4) が同定された。しかし DWnt4 変異体の表現型には DFz2 および DFz4 の機能欠失だけでは再現されない部分があり、DFz2、DFz4 以外の受容体の関与が示唆されていた。そこで本研究では、そのような DWnt4 の受容体を探索している。胚発生の時期から Wave ニューロンを標的とする GAL4 系統 R60G09-GAL4 を用いて、候補となる受容体に対して RNAi 法を用い Wave ニューロン特異的に機能欠失させ、その形状を免疫組織化学で確認するスクリーニングを計画しているが、この GAL4 系統は、VNC において Wave ニューロン以外の或る求心性のニューロンをも標的とする。そこでまず、このニューロンと Wave ニューロンの重なりを、透明化試薬と 3 次元レンダリングツールを用いて見分ける手法を現在探索している。

運動回路の発達初期における自発神経活動の分子及び細胞基盤 （関　崇貴、曾祥孫澤、能瀬聡直）

多くの動物は、子宮や卵の中で動き始める。この発生初期の運動は、局所的で協調性のないものであるが、動物が成長するにつれて成熟した運動パターンを示すようになる。この現象は様々な動物種で見られるにも関わらず、その意義や分子基盤はまだ十分に解明されていない。研究室の以前の研究において、運動経験からの感覚フィードバックが運動回路の発達に必要であることを明らかにし、感覚フィードバックの標的として M/A27h 神経回路（M ニューロンと A27h ニューロンから構成される）を同定した。M ニューロンは発生の最初期には散発的な運動を行うが、次第に体節間での同時発火を起こすようになり、最終的には尾側から頭側へ伝わる波状の活性を示すようになる。この M ニューロンの活動は他のニューロンからの入力に依るものではなく、IP3 シグナルに依存した自発的なものであることも明らかにし、「M/A27h 回路は自発活動により引き起こした未熟な出力のフィードバックを介して自身および他の構成細胞を再編成する」という運動回路の自己構築モデルを報告した。

今年度は、この IP3 シグナルを誘導する G タンパク共役受容体 (GPCR) とそのリガンドの起源の同定を目標とした。M と A27h の両方を標的とする Gal4 系統を用いて候補の GPCR を RNA 干渉法によりノックダウンし、その際の M ニューロンの神経活動をカ

ルシウムイメージングする実験により、PdfR と LkR が自発活動と運動回路の発達に影響のある GPCR の候補であることが明らかになった。現在、M ニューロン特異的な Gal4 系統を用いた同様の実験を行うことで、M と A27h のどちらにおける GPCR が重要であるかを探っている。また、PdfR のリガンドである Pdf の抗体を用いた免疫染色により、自発活動に関わる Pdf の起源は腹部神経節尾端に存在する Pdf 発現細胞のクラスターである可能性が示唆された。

さらに、今年度は体節間の同時発火から波状の活性へと” 回路の” 神経活動が発達する機構も調査した。M ニューロンで RNA 干渉法を用いて GABAA 受容体をコードする遺伝子（Rdl）をノックダウンすると、M ニューロンの波状の活性は消失したが同時発火への影響は見られなかった。ここから、M/A27h 回路は GABA 作動性ニューロンからの入力を新たに組み込み、協調的な波状の活性を生み出す成熟した回路に再編成しているという仮説を立てた。現在、コネクトミクス解析を用いて M ニューロンに入力している上流のニューロンの候補を絞り込み、それらのニューロンの機能解析を行っている。また、新領域創成科学研究科の郡宏博士、渡邊絵美理氏と共同でこの回路再編成過程の理論モデル解析も進めている。本研究により、発生期における運動回路の自己組織化機能についての普遍的な原理を報告できると期待している。

匂い選好性の脳内表現の解明（松永光幸）

食べ物、または毒物質が近くにあるか、さらには魅力的なパートナーがいるかなど、生存または生殖上における判断をする上で嗅覚は動物にとって不可欠である。匂い源物質が個体にとって”良いもの”であると判断した場合、個体は匂い源に近づこうとするが、”悪いもの”と判断した場合は匂い源から離れる行動をとる。このように動物の匂いに対する応答を記録することで快・不快の匂いを定義することができる。上記のように動物は匂い選好性を持つが、どのように匂い選好性が脳内で符号化されているのかについては不明な点が多い。この点に関して、これまでに大きく二つの仮説が考えられてきた。1. 特定の匂いに対応する嗅覚受容体は、好きまたは嫌い、どちらかの行動を 1 対 1 で符号化している。2. 複数の嗅覚受容体の特定の組み合わせが好きまたは嫌いの行動を符号化しており、単一の嗅覚受容体が好き嫌いを符号化するわけではない。これまでの研究では、ショウジョウバエの嗅覚受容体のいくつかは、特定の匂いのみに明確に反応性を示し、好き嫌いは単一受容体にラベルされているとする、1 の仮説が支持されてきた。一方で、多くの嗅覚受容体は、一つの匂いだけでなく、様々な匂い物質に反応することが知られている。このことは 2 の可能性を支持するが、嗅覚受容体を組み合わせるという実験の困難さから研究は進んでいなかった。本研究では 2 の仮説の検証を行った。不快物質としてはマスタードオイル、快物質としては、果物から生成される gamma-hexalactone (以下 g-hex) を用い、これら両方の匂い物質の反応を媒介する嗅覚受容体を探索し、2 の仮説を検討した。

まず昨年までに不快物質と快物質の両方に反応する嗅覚受容体のスクリーニングを、電気生理学的手法を用いて行った。その結果 Odorant receptor 42a (Or42a) はマスタードオイルと g-hex の両方に反応性を持つことを明らかとした。続いて、マスタードオイル、g-hex に対して、ショウジョウバエはそれぞれどのような行動を示すかを解明するために行動アッセイを行った。その結果、ショウジョウバエはマスタードオイルを嫌い、g-hex に近づくことを明らかとした。さらに Or42a はこれらの行動の表現型に必要であるかを調べるために、Or42a の機能喪失変異体を用いて同様の行動アッセイを行った。実験の結果、変異体はマスタードオイルに対する忌避、g-hex に対する誘引の両方の行動が失われたことから、Or42a はこれら両方の表現型に必要であることが明らかとなった。

本年ではこれらの行動を促す脳内表現を調べるために、CaMPARI2 を用いて、マスタードオイルと g-hex によって活性化された神経細胞群をそれぞれラベルした。すると予想通り、Or42a 発現細胞はマスタードオイルでも g-hex どちらでも活性化されていたが、興味深いことに、それぞれ互いに別々のニューロン群も活性化していることを明らかとした。これらの結果から、ニューロンの活動の組み合わせが匂いの好き嫌いを符号化しており、必ずしも 1 つ 1 つのニューロンが個々に好き嫌いをコードしているわけではないことが示唆された。今後は、CaMPARI2 で明らかにした、マスタードオイルと g-hex それぞれで活動するニューロン群を、人為的に活性化させることで、これらのニューロン群の活動がそれぞれ忌避と誘引にとって十分であるかを解明する。これによって好き嫌いがどのように脳内で表現されているのかを解明し、個体間の選好性の差または種間での行動の違いを生み出す神経基盤の解明に貢献することができる。本研究は米国 University of California、Berkley の Noah Whiteman 博士 と University of California、Davis の Santiago Ramirez 博士と共同で進められている。

(原著論文)

[1] CNG. Giachello, I. Hunter, T. Pettini *et al.*, Electrophysiological validation of monosynaptic connectivity between premotor interneurons and the aCC motoneuron in the Drosophila larval CNS. Journal of Neuroscience, **42**, 6724-6738 (2022)

[2] X. Sun, Y. Liu, C. Liu *et al.*, A neuromechanical model for Drosophila larval crawling based on physical measurements. BMC Biology, **20**, 130 (2022)

[3] J. Park, YR. Chung, A. Nose, Comparative analysis of high- and low-level deep learning approaches in microsatellite instability prediction. Scientific Reports, **12**, 12218 (2022)

[4] K. Fukumasu, A. Nose, H. Kohsaka, Extraction of bouton-like structures from neuropil calcium imaging data. Neural Networks, **156**, 218-238 (2022)

(学位論文)

[5] パクジョンヒョク：Deep learning-based analyses of neural activities and histopathological images（博士論文）

[6] 福益一司：Structure estimation of motor pattern-generating neural circuits from calcium imaging data of synapse population（博士論文）

[7] AOKI Nicodemo Akiro：RNAi-based screening of neuromodulators involved in the motor control in Drosophila larvae（修士論文）

[8] 橋本裕作：Identification of homologous neurons mediating motor commands for diverse aversive behaviors in Drosophila larvae（修士論文、新領域創成科学研究科）

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[9] Teruyuki Matsunaga. Olfactory avoidance of toxic volatile electrophiles is mediated by a broadly tuned olfactory receptor in Drosophila, APS Comparative Physiology Meeting, 2022. 10. 28-31, San Diego, USA

[10] Yingtao Liu, Akinao Nose, Maarten Frans Zwart, Hiroshi Kohsaka. Synchronous multi-segmental activity controls the speed of axial locomotion by modulating the interval between peristaltic waves in Drosophila larvae. SfN Neuroscience meeting 2022, 2022.11.12-16, San Diego, USA

[11] Takahisa Date, Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka. Comprehensive characterization of behavior specific neurons in fruit fly larvae with a photoconvertible calcium sensor, Adaptive Circuit Census (ACC) International Symposium 2023, 2023.2.21-22, Saitama, Japan

[12] Takaki Seki, Yuko Komanome, XiangSunZe Zeng, Akinao Nose. Motor-experience dependent reorganization of central circuits and its critical period. IRCN-iPlasticity International Symposium, 2023.1.10, Tokyo, Japan

招待講演

[13] XiangSunZe Zeng, Yuko Komanome, Hokto Kazama, Akinao Nose. Molecular and cellular mechanisms underlying the emergence of spontaneous patterned activity crucial for motor development in Drosophila. NEURO2022, 2022.7.2, Okinawa, Japan

[14] Akinao Nose. Functional development of neural circuits that regulate animal behaviors. The Neurophysics of Locomotion, 2022.7.28, California, USA

(国内会議)

一般講演

[15] Jeonghyuk Park, Junya Fukuoka, Wataru Uegami, Akinao Nose. Analysis of image features related to survival prediction across multiple cancer types. 日本デジタルパソロジー・AI 研究会総会 20th Annual Meeting of Japanese Society of Digital Pathology, 2022.8.28, 東京

[16] Xu Zhang, Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka. Automated real-time Quantitative analysis of behavior in Drosophila larvae. 第 45 回日本神経科学大会, 2022.6.30-7.3, 沖縄

[17] Xu Zhang, Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka. Automated real-time Quantitative analysis of behavior in Drosophila larvae. 第 15 回日本ショウジョウバエ研究集会，2022. 9.12-14, 名古屋

[18] Kazushi Fukumasu, Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka. Module structures in spatial distribution of activity timing and transmitters of synapse population in motor generating circuits. 第 45 回日本神経科学大会, 2022.6.30-7.3, 沖縄

[19] Takahisa Date, Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka. Comprehensive characterization of the axon bundles in the Drosophila larval motor circuits with expansion microscopy. 第 15 回日本ショウジョウバエ研究集会, 2022.9.12-14, 名古屋

[20] Takahisa Date. Dissecting active neuronal population in moving fly larvae. Forefront Physics and Mathematics Program to Drive Transformation (FoPM) Symposium, 2023.2.6-8, 東京

[21] 橋本裕作, 高野詩菜, 高木優, 能瀬聡直, Searching of neural circuits regulating segment-specific touch responses in Drosophila larvae. 第 45 回日本分子生物学会年会, 2022.11.30-12.2, 幕張

[22] Akiro Aoki, Xu Zhang, Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka. RNAi-based screening of neuromodulators involved in motor patterns of foraging behavior in Drosophila larvae. NEURO2022, 2022.6.30-7.3, Okinawa

招待講演

[23] Yingtao Liu, Akinao Nose, Maarten F Zwart, Hiroshi Kohsaka. Synchronous multi-segmental activity between metachronal waves controls the crawling speed in fly larvae. 第 45 回日本分子生物学会年会 (MBSJ2022), 2022.11.30-12.2, 幕張

(講義等)

[24] 医学共通講義 III 機能生物学入門（東京大学・医学系研究科）

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、生体分子の種類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 弱体化した細胞における細胞内小胞拡散の定量

細胞を生育に適さない環境に晒すと、細胞は弱体化し、一定時間後の生存確率が低下する。弱体化した細胞では元気な時に比べ収縮などの状態変化が観察され、そうした細胞状態の変化が細胞の生存確率に寄与していると考えられる。しかし弱体化した細胞が元気な細胞と比べ、どのように状態が異なるのかは詳しくわかっていない。本研究では細胞が弱体化した時の状態変化を定量するパラメーターとして細胞内小胞拡散に注目した。また、細胞を弱体化させる方法として細胞内での活性酸素発生、ATP 枯渇環境への細胞の曝露という二種類の方法を用いた。まず細胞内で活性酸素発生させた時、細胞の位相差像において、細胞内の“光揺らぎ値”が低下することから、“光揺らぎ値”が細胞損傷度の指標となることが本研究室の研究成果として既に報告されていたが、光揺らぎ値の実態についての知見はなかった。そこで光揺らぎ値が低下した細胞において、細胞内小胞を追跡し拡散係数を算出したところ、小胞拡散の低下率が光揺らぎ値の低下率のおよそ二乗になっていることがわかり、小胞拡散の低下が光揺らぎ値低下の要因の一つであることが明らかとなった。次に ATP 枯渇環境への細胞の曝露についても同様に小胞の拡散係数を算出したところ、大きく低下し、 さらに生存確率と相関を持つことがわかった。したがって、小胞の拡散係数は弱体化した細胞の特徴的な量になっていることがわかった。さらに小胞の拡散係数が低下したメカニズムを解明するため、小胞と細胞骨格の位置関係を蛍光観察によって調べたところ、動きが極端に遅くなった小胞の近くに細胞骨格がある様子が見て取れたことから、小胞の拡散係数低下に対して細胞骨格が関与していることが示唆された。

7.2.3 低温から培養温度に至る過程における細胞の形態や発生力の変化

細胞の形態変化と運動は生命維持のための様々な機能と直結している。細胞運動は、細胞骨格タンパク質であるアクチンの重合力による細胞膜の押し出し、及び、接着タンパク質の細胞外基質と相互作用が協調的に起こることで生じる。この細胞の運動はさまざまな刺激や環境変化によって活性化される。例えば、細胞を低温下に置くと、細胞骨格が消失し、細胞接着もがほぼ消失し細胞の形態及び運動能が劇的に変化する。本研究では、細胞の形態変化と運動との関係を明らかにするために、細胞を 4 ℃の低温環境におき、再び 37 ℃の通常の培養環境に戻した際に生じる形態変化と細胞の運動を調べた。その結果、低温ではアクチンフィラメント及び微小管などの細胞骨格タンパク質の構造が消失し、また接着面積も大幅に減少し、丸く小さな形態をとっていた、低温から 37 ℃の培養温度に戻すと骨格タンパク質が 30 分程度の短い時間で再び重合する様子や、細胞の接着面積が急速に拡大していく様子が観察された。この細胞接着面積の拡大や、細胞の運動能の回復は、細胞が接着する基盤の種類や表面処理の状態によって影響を受けることが判明した。細胞が移動する際に細胞外基質へと発揮する力を直接測定するという目的から、牽引力顕微鏡という手法が開発されている。この方法を用いて細胞が冷却効果から復帰してくる際に牽引力がどのように変化するのかを解析した。その結果、細胞が接着面積を等方的に拡大させていく過程において、細胞膜周辺における力の局在位置が頻繁に入れ替わる様子が確認された。以上のことから、低温から 37 ℃培養温度に移された細胞は、急激に細胞骨格を重合することで等方的な接着面積の拡大を示し、面積の増加は細胞膜周辺のランダムな分布の牽引力により引き起こされていることが明らかとなった。また、十分に細胞骨格の重合がなされた後には細胞の運動に極性が生じ、力も極性を持った分布を示すようになることも推察された。

7.2.4 精子鞭毛振動のメカニズム解明

精子鞭毛は、高次構造をもつが、各階層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、また力振動のメカニズムはわかっていない。そこで、軸糸そのもの、あるいは bundle またはダブレット上のダイニン列と平行に結合させた重合微小管を利用し、ダイニンの発する力を光ピンセットによって測定した。これら intact な状態に近い 3 つの階層のダイニン集団に加え、精製したダイニンを用いて、鞭毛内でのダイニン集団が発生する力の特性やダイニン分子自体の特性を明らかにした。更に、モンテカルロシミュレーションを行うことによりダイニン分子小集団による振動のメカニズムを提案した。軸糸の長さと発生力の関係、bundle およびダブレットでは相互作用している重合微小管の長さと力の関係を解析した。その結果、軸糸では力は長さに比例し、1 μ m あたり約 14 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、14 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 %程度であることが示唆された。一方でダブレット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 の力が最頻値

であった。このことから、ダブレットで測定された力は 1 分子程度のダイニンによるものと考えられる。測定された単位長さあたりの力が小さいことは、ダイニン分子の duty ratio（力を出す割合）が低い可能性を示す。このことを検証するため、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を、Sakakibara らの式（Sakakibara et al., 1999）でフィットして得られた duty ratio は約 7 %となった。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。軸糸、bundle、ダブレットの全ての階層で力の振動が観察され、振動数は 10〜234 Hz であった。この内何例かは 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それぞれ 8〜10 nm であった。さらに、振動数が高くなると 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。反応モデルを用いてシミュレーションを行った結果、振動を再現することに成功した。ステップ解析により得られたステップサイズは約 8 nm であり、dwell time とあわせ実験結果と非常に近い値となった。このモデルから、振動のメカニズムとして次の仮説を提案する：力の増加フェーズでは、パワーストロークを行うダイニン分子数が増加する。力のピークを迎えると解離やリバーススストロークが起こる頻度が上昇し力が減少する。粘性により力の減少はゆっくりとなり、その間に再結合やパワーストロークを行うダイニンの割合が増加し再び力が増加に転じる。　以上の結果から、軸糸では同時に力を発生するダイニンは全体のわずか数%程度で、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。また、軸糸からダブレットまでの 3 階層でダイニンの振動を測定することに成功し、ステップサイズが 8〜10 nm であったことから、振動時には、少数のダイニン分子が微小管の周期 8.2 nm に沿ってステップ運動を行うことが明らかとなった。さらに、シミュレーションにより力の振動が起こるメカニズムを提唱した。

7.2.5 鞭毛振動運動を再現できる最小モデルシステムの構築

繊毛や鞭毛の屈曲は、軸糸の片側にある軸糸ダイニン分子が力を発生し、微小管マイナス端に向かうことで起こる。軸糸が反対方向に曲がるときに、このダイニンは引き戻される。つまり、繊毛・鞭毛の屈曲を繰り返す際にダイニンが振動的に往復運動する。ダイニンの活動を制御する要因としては、ネキシン・ダイニン制御複合体、中心体から放射状に伸びるスポーク、中央装置など、様々なものが考えられる。ダイニンの振動運動の基本的なメカニズムを理解するために、我々は、微小管、外腕ダイニン、および DNA 折り紙で作られた微小管間の架橋からなる単純なモデル系を構築した。その尾部は微小管のどちらに結合するかによって、2 つの異なる向きに結合していることがわかったため、微小管の極性が同じであれば、反対向きのダイニンは反対の力を発揮することが期待される。2 本の微小管の片方をガラス表面に固定し、もう一方の微小管の上にビーズを結合した。このビーズを光トラップし、Caged-ATP の光分解後にダイニン-微小管-DNA-オリガミ複合体が実際に往復振動することが示された。興味深いことに、複合体の一端を保持すると、反復的な屈曲運動が見られた。この結果は、反対向きのダイニン、微小管、微小管間架橋体の集合体からなる単純なシステムが、追加の制御構造を持たずに、振動と反復的な屈曲運動を引き起こす本質的な能力を持っていることを示すものである。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Seohyun Lee, Hyuno Kim, Hideo Higuchi. Automation of detecting and tracking 3D vesicle transport using dual-focus optics. Image Acquisition and Processing XXX 12385, 80-83 (2023).

[2] Shimaa A. Abdellatef, Hisashi Tadakuma, Kangmin Yan, Takashi Fujiwara, Kodai Fukumoto, Yuichi Kondo, Hiroko Takazaki, Rofia Boudria, Takuo Yasunaga, Hideo Higuchi, and Keiko Hirose*. Oscillatory movement of a dynein-microtubule complex crosslinked with DNA origami. elife. e76357 (2022.6)

[3] Seohyun Lee, Hyuno Kim, Hideo Higuchi, Masatoshi Ishikawa. Deep learning approach for metastatic cancer cell classification using live-cell imaging data. Imaging, Manipulation, and Analysis of Biomolecules, Cells, and Tissues XX. 11964, 15-20 (2022).

＜学術講演＞

(招待講演)

[4] Hideaki Ota, M. Sakuma and H. Higuchi. Quantitative evaluation of cell damages by motility of intercellular organelles. Symposium on Internatinal Nanomedicine. Tokushima, Japan (2022.12)

[5] 樋口秀男「宇宙の普遍性と生命の普遍性」　東京大学理学系研究科　名誉教授の会 (2022. 10)

[6] Motoshi Kaya.Autonomous characteristics of skeletal and cardiac myosin ensembles are essential for contractile functions of skeletal muscle and heart,Symposium:Autonomous Characteristics of Molecular and Cellular Ensembles: Toward an Understanding of Biological Functions, 第 60 回日本生物物理学会 函館アリーナ (2022.9)

[7] 樋口秀男, 太田英暁.「細胞の元気さを測る」遺伝子・デリバリー研究会　第 21 回シンポジウム　東京大学 (2022.8)

[8] Motoshi Kaya.Unique Molecular Properties of Cardiac Myosin Essential for Heart Contraction. Symposium on 9th World Congress of Biomechanics, Taipei, Taiwan　(2022.7)

一般講演

[9] 樋口秀男, 藤原貴史, 茅元司, 鷲尾巧. 精子鞭毛ダイニンは少数分子でも振動を起こせるのはなぜか？ 生体運動研究合同班会議 東京大学 (2023.1)

[10] 太田英暁, 樋口秀男. ATP 枯渇時の細胞内小胞運動にもとづく細胞損傷度の定量. 生体運動研究合同班会議 東京大学 (2023.1)

[11] カシムチェティ亜瑠夢, 樋口秀男, 茅元司. 情報理論からミオシン分子集団機能を考える. 生体運動研究合同班会議 東京大学 (2023.1)

[12] Seohyun Lee, Hyuno Kim, Hideo Higuchi. An automatic detection and tracking method for the 3D reconstruction of vesicle movement in a living cell 第 60 回日本生物物理学会. 函館アリーナ (2022.9)

[13] Hideaki Ota, Hideo Higuchi. Quantitative evaluation of the decrease in intracellular mobility of cells in which ATP synthesis is inhibited, 第 60 回日本生物物理学会. 函館アリーナ (2022.9)

[14] Yuta Sekiguchi, Hideo Higuchi, Motoshi Kaya. Understanding of robustness in cancer morphology in cold temperature、第 60 回日本生物物理学会. 函館アリーナ (2022.9)

[15] 篠原 健一, 大貫 祐河, 堀 諒雅, 樋口 秀男 ポリマー 1 分子の直視：イオン性分子モーターの高速 AFM イメージングとレーザートラップ法による力学計測 高分子学会高分子討論. 北海道大学 (2022.9)

[16] 太田英暁, 樋口秀男. 細胞運命に関わる細胞内運動低下率の定量化, 第 21 回東京大学生命科学シンポジウム 東京大学 (2022. 6)

[17] 篠原健一, 大貫佑河, 堀諒雅, 樋口秀男. ポリマー 1 分子の直視-イオン性ポリマー鎖による力発生- Polymer, Japan Vol. 71, No. 1 (2022.5)

社会貢献

[18] 樋口秀男「地球外にどのような生物が存在するか」東京大学オープンキャンパス& YouTube 対象：高校・中学生 (2022.8)

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 ナノ流路を用いたタンパク質動態計測

蛍光一分子計測では、通常 100 ミリ秒程度の撮影時間が必要である。タンパク質分子の拡散係数は $10-100\,\mu\mathrm{m}^2/\mathrm{s}$ であり、100 ミリ秒の間に $1\,\mu\mathrm{m}^2$ 以上の範囲を動いてしまうため、溶液中で自由拡散するタンパク質分子を観察することは困難であった。そのため、これまでタンパク質分子の一分子計測では、カバーグラス表面などに固定する必要があった。

私たちは、高強度励起光を輪環状に成形する独自の照明光学系と高速低ノイズな cMOS カメラを組み合わせることで、1 ミリ秒程度の撮影時間で蛍光一分子を撮影できる高速蛍光一分子イメージングシステムを構築してきた。これを用いることで溶液中でタンパク質分子が自由拡散する様子を観察することが可能となったが、全反射照明で照明される範囲はカバーグラス表面から 100 nm 程度であるため、深さ方向の拡散により個々のタンパク質分子を追跡することは困難であった。

そこで、理化学研究所の田中陽研究室との共同研究により、カバーグラス表面に 100 nm 以下の深さ・幅のナノ流路を形成し、タンパク質分子の拡散できる範囲を制限することで、この問題を解決した。ナノ流路に閉じ込められた蛍光分子は常に視野内に留まり (図 7.3.1)、これを追跡し定量的に解析できることが実証された (図 7.3.2)。

図 7.3.1: ナノ流路に閉じ込めたタンパク質分子の一分子イメージング

7.3.2 耐光性蛍光タンパク質 StayGold

蛍光色素や蛍光タンパク質などの蛍光分子は、基底状態 (S_0) と一重項励起状態 (S_1) の間を遷移することで蛍光を発するが、低い確率で三重項状態 (T_1) へと遷移することがある (系間交差)。三重項状態から基底状態への遷移は禁制遷移であるため確率は低く、一重項励起状態の寿命がナノ秒程度であるのに対して、三重項状態の寿命はミリ秒程度と桁違いに長い。また、三重項状態の蛍光分子が、電子を授受すると、アニオンないしカチオンといったイオン状態へと遷移する。イオン状態の寿命は、数秒〜数分と非常に長い。この三重項状態およびイオン状態の蛍光分子は、励起蛍光のサイクルから外れて蛍光発光を起こさない状態であるため、暗状態と総称される。この暗状態が存在するため、蛍光分子 1 分子を経時的に

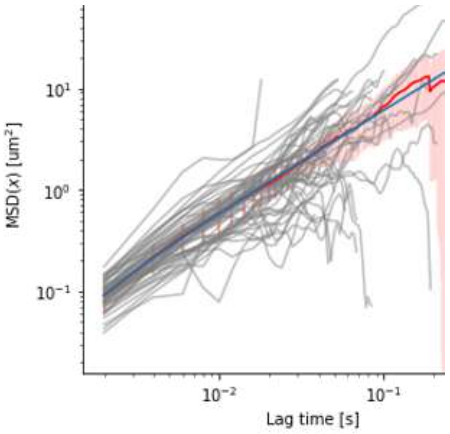

図 7.3.2: ナノ流路に閉じ込めたタンパク質分子の拡散計測

観察すると、ときどき光らなくなり、しばらくすると再び光るようになるという明滅現象 (ブリンキング) がみられる。　また、暗状態はエネルギー準位が高く化学的に不安定である。特に、溶液中の溶存酸素分子と反応しやすいため、不可逆的な化学反応を経て蛍光を発しない分子へと変化しやすい。これを蛍光褪色と呼ぶ。

生きた細胞などを経時的に蛍光顕微鏡で観察する際、多くの場合は、この蛍光褪色が大きな制約となる。観察している間に、蛍光褪色が進行して試料が光らなくなってしまうため、観察できる時間が限られてしまう。特に、蛍光一分子イメージングや、これを応用した超解像蛍光ライブセルイメージングにおいては、通常の蛍光顕微鏡観察よりも強い励起光を用いる必要があるため、如何に褪色を防ぐかが重要となる。たとえば *in vitro* での実験系では、溶液中の溶存酸素濃度を下げるなどの工夫で蛍光褪色を遅らせることができるが、これを生きた細胞の観察に応用することは難しい。

私たちはこれまで、蛍光色素および蛍光タンパク質の研究者との共同研究を通じて、蛍光一分子イメージングや超解像蛍光ライブセルイメージングに適した蛍光分子の開発と応用に取り組んできた。2022 年度には、理化学研究所の宮脇敦史研究室で発見・開発されたタマクラゲというクラゲ由来の緑色蛍光タンパク質 StayGold について、宮脇研究室と共同で、このタンパク質の一分子レベルでの光化学的性質の検討と蛍光一分子イメージングおよび超解像蛍光ライブセルイメージングへの応用を行った ([2])。

精製した StayGold タンパク質およびスペクトルの類似した既存の緑〜黄緑色の蛍光タンパク質 3 種類 (EGFP, mNeonGreem, mClover3) について、精製タンパク質を用意し、蛍光一分子イメージングで褪色速度を比較した。蛍光タンパク質によって、励起光として用いた 488 nm のレーザー光による励起効率 (モル吸光係数×量子収率) が異なるため、実用的に意味がある比較として、カメラに到達する光子数が 2,000 photons/秒 となる条件に揃えて比較を行った (図 7.3.3)。その結果、StayGold は、標準的な蛍光タンパク質として広く用いられている EGFP の 10 倍以上の褪色しにくいことが、一分子レベルで確認された。

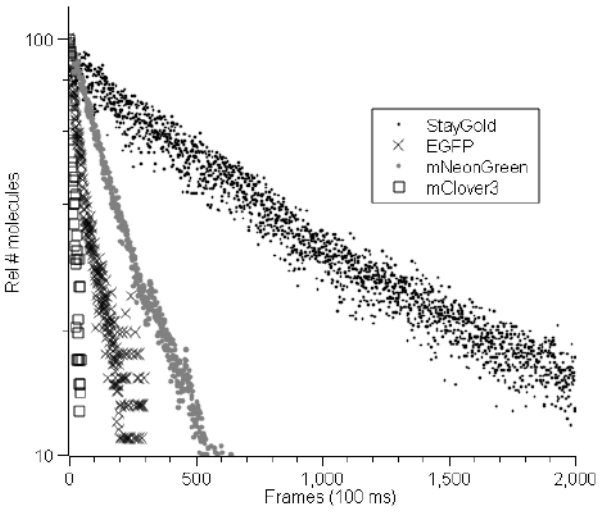

図 7.3.3: 新規蛍光タンパク質 StayGold と既存の緑 黄緑色蛍光タンパク質の褪色速度の比較

さらに、この一分子レベルの解析によって、StayGold の暗状態の寿命が短いことが示された。このことから、StayGold では、三重項状態からイオン状態に遷移する確率が低く、このことにより褪色しづらいのではないかと考えられる。

このように、従来の蛍光タンパク質より 10 倍以上褪色しにくい StayGold は、超解像ライブセルイメージングにも適した蛍光分子であることが示された (図 7.3.4)。特に、私たちが開発したスピニングディスク超解像顕微鏡 ([?]) との組合せに適しており、長時間の 3 次元超解像ライブセルイメージングなど多様なアプリケーションが可能となった。

7.3.3 超解像蛍光顕微鏡の生物学研究への応用

脊椎動物の左右軸決定機構

私たちの身体は、表面から観ると概ね左右対称であるが、内臓は左右非対称に配置されていて、たとえば心臓は左側に、盲腸は右側にある。この左右非対称性を決定する機構として、私たちは脊椎動物の発生初期に胚表面での線毛運動により生じる左向きの水流の向きが「左側」を決定することで左右非対称性が生じることを示した。

しかし、この水流を細胞がどのように感知して左側の決定に至るかについては、水流により、左側を決定する化学物質が下流に濃縮するというモデルと、

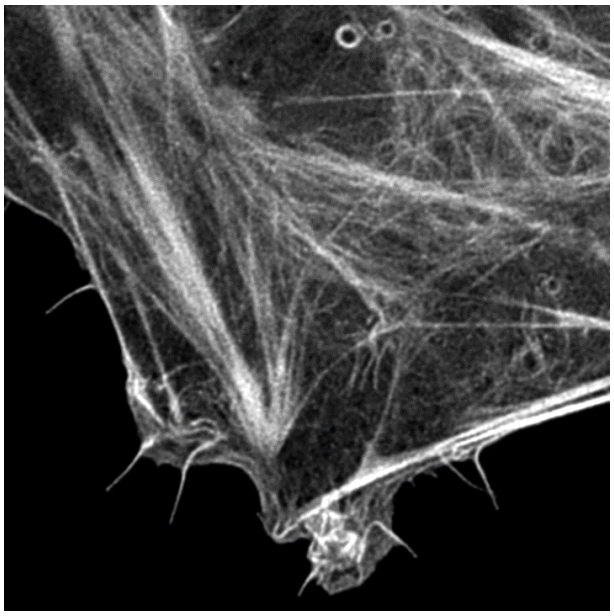

図 7.3.4: 新規蛍光タンパク質 StayGold を用いた蛍光ライブセルイメージング (アクチン線維)

水流による線毛の変形が重要であるというモデルが提唱され、論争が続いていた。

前者については、閉鎖環境での水流で濃度勾配が形成されるのかという疑問が提起されている。一方、水流による線毛の変形だけでは、細胞は水流の向きは感知できても、その細胞が水流の下流側にいるのか上流側にいるのかを区別することはできないとも指摘されている (図 7.3.5A)。

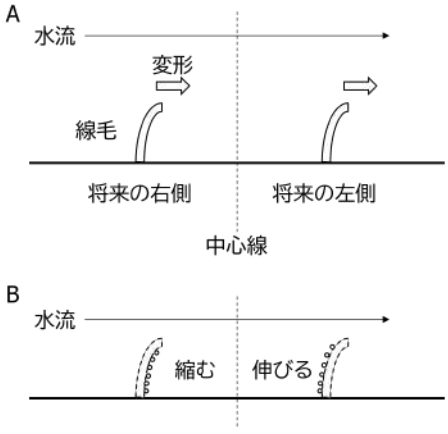

図 7.3.5: 水流による左右非対称性決定機構のモデル

この問題に取り組んできた理化学研究所の濱田研究室と共同研究で、私たちは、線毛表面で変形を感知する受容体タンパク質の分布を解析した。線毛の太さは 100 nm 程度で光学顕微鏡の回折限界より小さいため、通常の光学顕微鏡での解析は困難である。そこで、私たちは、超解像顕微鏡を用いた 3 次元的な計測が行った。その結果、水流を感知する線毛では、身体の中心線側に受容体タンパク質が集積していることが示された (図 7.3.6)。

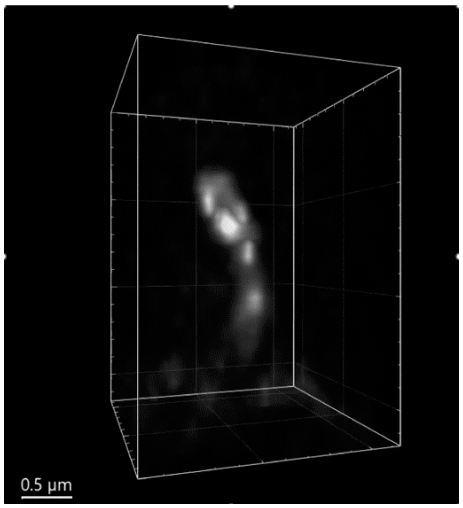

図 7.3.6: 超解像顕微鏡で観察した線毛表面の受容体タンパク質の非対称分布 ([3])

この結果から、水流の上流側か下流側かは、線毛の変形で受容体タンパク質が縮められるか伸ばされるかで区別できると考えられる (図 7.3.5B)。濱田研究室では、光ピンセットを用いて線毛に変形を加えることでこのモデルを検証し、左右非対称性の決定機構の理解が進展した ([3])。

高分解能 3 次元ライブセルイメージング

倒立型の高分解能ライトシート顕微鏡を用いた 3 次元ライブセルイメージングにより、図 7.3.7 のように生きた細胞を高い時空間分解能で 3 次元観察することが可能になった。2022 年度には、この手法を応用して、がん細胞の浸潤突起の 3 次元観察を行った。がん細胞は、基底膜を浸潤することで上皮から脱出し、転移する。したがって、がん細胞がどのように基底膜を浸潤していくかは、転移の初期過程の理解としても重要である。

しかし、通常の顕微鏡観察では、がん細胞が顕微鏡の光軸方向に突起を伸ばして浸潤するため、この浸潤突起を観察することは困難であった。そこで、本手法を用いた 3 次元観察を行った結果、がん細胞が基底膜側に突起を伸ばす様子を観察することができた ([1])。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Saji T, *et al.*, J. Biol. Chem. **298**, 102090 (2022).

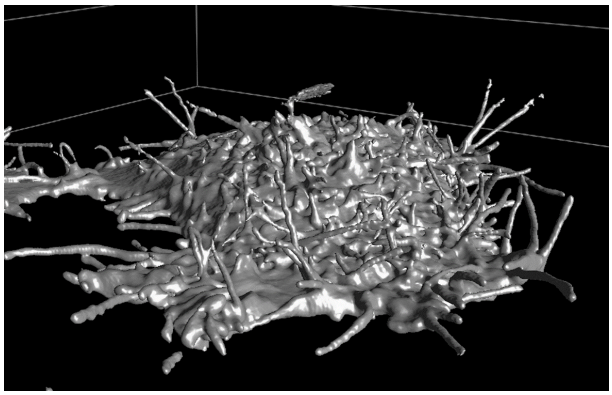

図 7.3.7: 倒立型ライトシート顕微鏡で観察した HeLa 細胞表面の糸状仮足)

[2] Hirano M, *et al.*, Nat. Biotechnol. **40**, 1132-1142 (2022).

[3] Katoh TA, *et al.*, Science **379**, 66-71 (2023).

[4] Nozaki T, *et al.*, Science Adv **9**, eadf1488 (2023).

(国内雑誌)

[5] 岡田康志、「超解像顕微鏡法への誘い」、BIO Clinica **11**, 982-983 (2022)

(学位論文)

[6] 向井智哉、細胞の力学センサー実現へ向けた評価系の構築 (修士論文)

[7] Andre Lee, Screening for fluorescent proteins for the development of lifetime-based biosensors (修士論文)

(著書)

[8] 岡田康志、「超解像顕微鏡技術の開発と軸索輸送研究への応用」in『ブレインサイエンス・レビュー 2022』, 17-39 アドスリー、(2022)

[9] 岡田康志、「イメージングによるオミクス状態の推定」in 『空間オミクス解析スタートアップ実践ガイド』, 196-202 羊土社、(2022)

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[10] 秋の学会 15. Yasushi Okada, “Toward super spatiotemporal resolution fluorescence microscope for live imaging of molecules and cells”, OPIC, ALPS, 2022, パシフィコ横浜、2022 年 4 月 18 日

(国内会議)

招待講演

[11] 岡田康志、実験自動化からバイオ DX へ、情報計算化学生物学会第 433 回講演会「生命科学の理解を飛躍させるデジタルな研究環境革新」オンライン、2022 年 5 月 13 日

[12] 岡田康志、分子・細胞のライブイメージングからバイオ DX へ、生物工学懇話会、オンライン、2022 年 5 月 24 日

[13] 岡田康志、エピゲノム状態・転写・代謝など細胞状態を可視化する蛍光プローブ技術、AMED 難治性疾患実用化研究事業成果報告会、オンライン、2022 年 7 月 11 日〜8 月 10 日

[14] 岡田康志、4 次元イメージング、第 33 回細胞生物学ワークショップ、大阪大学、2022 年 8 月 5 日

[15] 岡田康志、シン・ライブセルイメージング、健都イメージングサポート拠点キックオフシンポジウム『シン・ミクロの世界』、国立循環器病研究センター、2022 年 9 月 7 日

[16] 岡田康志、超解像技術と蛍光寿命を用いた最新バイオイメージング、ライカオンラインセミナー、オンライン、2022 年 9 月 15 日

[17] 岡田康志、細胞内で RNA を見て、操作する技術の開発と応用、第 1 回 CREST・さきがけ領域横断シンポジウム、オンライン、2022 年 10 月 14 日

[18] 岡田康志、超解像・一分子顕微鏡技術を用いた細胞内分子動態の計測、薬物動態学会第 37 回年会ライカランチョンセミナー、パシフィコ横浜、2022 年 11 月 9 日

[19] 岡田康志、ライブイメージングの限界を超える、順天堂大学イメージングセンターキックオフシンポジウム、順天堂大学、2022 年 11 月 13 日

[20] 岡田康志、ライブイメージングの限界を超える、北海道大学ニコンイメージングセンター学術講演会、北海道大学、2022 年 11 月 22 日

[21] 岡田康志、蛍光ライブセルイメージングの限界への挑戦、光塾、2023 年 1 月 18 日

[22] 岡田康志、標準量子限界への挑戦、量子生体さきがけ領域会議特別講演、2023 年 1 月 25 日

[23] 岡田康志、蛍光ライブセルイメージングの限界への挑戦、大阪大学微研セミナー、2023 年 2 月 9 日

[24] 岡田康志、機械学習・人工知能を活用したライブセルイメージング、日本解剖学会シンポジウム、2023 年 3 月 20 日

(セミナー)

[25] 岡田康志、細胞や分子を見て、判るためのイメージング、奈良県立医大特別講義、奈良県立医大、2022 年 9 月 14 日

[26] 岡田康志、基礎研究と製品開発のニーズとシーズ、T-Gex 研究成果エキシビション、名古屋大学、2022 年 11 月 7 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 環境応答に基づく表現型進化の予測

ある環境に対する適応進化が、別の環境に対する適応度をどのように変化させるかを理解することは、その進化ダイナミクスが持つ性質を明らかにする上で重要な意味を持つ。例えば病原性バクテリアにおいて、ある抗生物質に対する耐性獲得が別の薬剤への耐性能を変化させる現象は、交差耐性・感受性と呼ばれ盛んに研究が進められている。この問題に対して、内部に化学反応ネットワークを持つ細胞モデルを用いた理論研究により、複数の環境変化に対する応答と、その環境に対する交差耐性との間に相関関係が存在することが示された。この相関関係は、環境変化に対する応答と、その環境下での表現型進化が表現型空間において同一の低次元構造に拘束されていることに起因する。この理論を検証するために、大腸菌の実験データを用い、抗生物質を添加したときの遺伝子発現プロファイルの変化（応答）と、その抗生物質の下で数百世代の進化実験を行ったときの発現量変化に有意な相関があることを確認した。これらの結果は、環境変化に対する応答を解析することにより、その環境下での表現型進化をある程度は予測可能であること意味している。

7.4.2 選択圧にフィードバック制御をかけた進化実験による進化能の定量

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。この耐性能空間においてターゲットとする表現型を指定し、現在の表現型からそのターゲット表現型へ向けた進化過程を実現する手法を構築した。具体的には、単純なフィードバック制御のアルゴリズムにより複数薬剤の濃度勾配を適切に組み合わせることにより、進化軌跡の制御を実現している。この手法を用い、様々に異なるターゲット表現型へ向けた進化実験を実施したところ、その進化ダイナミクスに履歴依存性が多く見られることが示された。例えば、ある親株の状態 P から表現型 A へ向けた進化軌跡と、同じ表現型 A へと到達する制御をかけるが一旦別の表現型 B を介して A に到達させる進化軌跡を比較したところ、迂回路を介した後者の方がより速く表現型 A に到達する場合があることを見出した。こうした履歴依存性を調べることにより、その表現型空間における進化のしやすさを定量的に理解することが可能となり、その背後にある進化的拘束が出現するメカニズムの理解につながると期待している。今後は、様々なターゲットへ向けた進化実験を系統的に行い、高次元の表現型空間における進化可能性を定量する予定である。

7.4.3 代謝モデルを用いた共生進化過程の解析

細胞内共生をしている微生物は、縮小したゲノムを持つことが多い。このゲノム縮小が生じるメカニズムについて、有効集団サイズが小さいことによる有害変異の蓄積などの仮説が考えられるが、その実証は進んでいないのが現状である。この問題に対して本研究では、単純化した代謝モデルを用い、宿主と共生体の対立的な多階層進化過程を考えることにより、共生体の代謝自由度が減少する選択圧が生じることを見出した。このモデルでは、宿主内部に共生体があるとし、それぞれが代謝ネットワークを持ちそれによって増殖速度が決まるとしている。このとき、宿主の増殖速度で選択圧をかける進化シミュレーションを行ったところ、結果として共生体の代謝自由度が減少することが見出された。これは、共生体の代謝自由度が減少することにより、宿主が共生体の代謝状態をコントロールすることが可能になることに起因する。この共生体の代謝自由度の減少は、実際の宿主と共生している微生物のゲノム縮小の要因の一つになる可能性がある。今後は、このモデルを実際の微生物の代謝ネットワークに基づくものに変え、どのようなゲノム縮小の過程が生じやすいかを計算機シミュレーションにより探索し、さらにその理論からの予測と実際の共生進化実験のデータとの対応を議論する予定である。

7.4.4 数理モデルを用いた無細胞翻訳系の最適化

PURE（Protein synthesis Using Recombinant Elements）システムは、細胞外でのタンパク質合成を可能にする無細胞翻訳系の一つであり、大腸菌由来のタンパク質をコードする遺伝子を含むプラスミド DNA と、その遺伝子産物であるタンパク質の合成に必要な酵素、タンパク質因子、および ATP などの補

因子を含む混合物で構成される。この PURE システムでは、投入した成分はすべて精製されたものであり、内部で生じている化学反応はすべて既知であるにもかかわらず、その反応ダイナミクスの振る舞いには不明な点が多く残されている。例えば、ある基質の初期濃度を変化させ、最終生成物であるペプチドの生成量を定量する実験を行ったところ、その生成量はある基質濃度で最大値を持つ単峰性の依存性を示したが、どのようにしてその非線形の依存性が出現するか、そのメカニズムは不明である。

この PURE システム内部で生じている化学反応は既知であり、その振る舞いを記述した数百の自由度からなる微分方程式で構成された ePURE と呼ばれる数理モデルが存在する。この ePURE において化学反応のパラメータは実験値や文献値から収集されたものを用いているが、その計算結果と実験データの間には大きな差異が残されている。そこで本研究では、PURE システム内部で生じている高次元の化学反応ダイナミクスが持つ性質を理解することを目的として、実験データを再現できる ePURE のパラメータ探索を行った。遺伝的アルゴリズムを用い、実験データと ePURE による計算結果の差異を小さくするパラメータの探索を行ったところ、実験データと近い振る舞いを生み出すパラメータセットを得ることに成功した。また、その最適化されたパラメータセットを用いたときの化学反応ダイナミクスを詳細に解析することにより、様々な律速反応が存在し、それらによって実験データで見出されている初期基質濃度への非線形な依存性が出現することが示唆された。今後は、実験データを再現できる複数のパラメータセットのパターンをさらに詳細に解析することにより、現実の PURE システムが持つ複雑なダイナミクスが持つ性質の理解を試みる。

7.4.5 代謝動力学モデルにおける恒常性の乱れ

『恒常性』は変動する環境下で生命システムが持続的に存在し、繁殖していくために必須の機構である。恒常性を支えるひとつのメカニズムとして生命システムにおける頑健性の研究は広く行われてきたが、どのような状況下で生命システムの恒常性が乱れるのかという逆方向の問いは、頑健性に比べればあまり注目されていない。本研究では細胞の代謝状態における恒常性の乱れがどのように起こるのかを調べた。生命機能のなかでもとりわけ代謝状態に着目した理由は、転写翻訳などの高分子合成や、細胞の環境適応を支えるシグナル伝達経路を稼働させるために必要なエネルギー分子が、煎じ詰めれば代謝系を通じて生成されているためである。フラックスバランス解析などの静力学モデルでは恒常性の乱れを扱うことは出来ないため、代謝の動力学モデル、なかでも最も単純な大腸菌の中心代謝経路モデルを研究対象とした。

３つの異なる大腸菌中心代謝経路動力学モデルを用いて、代謝物質の濃度を定常状態の値から 20∼40%程度摂動するという数値計算を行った。この 20∼40%という値は、反応を触媒する酵素の転写翻訳プロセスにおける確率性を考慮することで見積もられる、細胞内であり得る代謝物質濃度の揺らぎの大きさである。ランダムにさまざまな摂動を行った結果、多くの場合代謝状態は元の定常状態へと単調に緩和した。しかし一定の割合で、最終的には元の定常状態に戻るものの、その過程で多くの代謝物質の濃度が大きく（100 倍近く）変化することがあることが分かった。摂動への応答の強さについて定量的な差はあるものの、この現象自体は調べた 3 つのモデル全てに見られる現象であった。代謝物質濃度の大きな変化は細胞機能の阻害や、場合によっては細胞死を誘発し得るものであるため、これを数理モデルにおける代謝状態恒常性の乱れと捉え、そのメカニズムを調べた。

機械学習やネットワーク拡張を用いた数値解析の結果、代謝状態恒常性の乱れには①ATP などの補酵素のダイナミクスと②代謝反応ネットワークが疎なネットワークであることの 2 点が重要な役割を果たしていることが分かった。これらの観察をもとに、上述の 2 要素を持つ単純な化学反応ネットワークモデル（ミニマルモデル）を構築し、その数値計算を行った。その結果、補酵素と共役している反応が多く、代謝反応ネットワークが疎であるときに、摂動に対する応答性が高くなることが分かった。

7.4.6 実験室進化における遺伝子の配列進化速度と発現量の逆相関

遺伝子配列の進化速度は、その発現量によって制約を受けており、発現量の多い遺伝子は相対的に進化が遅いと一般に信じられている。その根拠として、発現量と配列進化速度の間には負の相関関係（E-R 逆相関と呼ばれる）があることが、少なくとも過去の種間進化においては広く認められている。しかしながらこの法則が、同一種内の進化や、さらには新規に生じる進化をも支配するような、より高い一般性をもった法則であるかは、これまで検証されてこなかった。我々は、新規に生じる進化を含めたより一般的な進化の法則の理解を目指しており、この未検証課題に取り組んだ。

発現量が分子進化に与えるユビキタスな影響を探り、これまでに提案されている E-R 逆相関の分子メカニズムの妥当性を検証するために、我々は約 100 株の大腸菌のゲノム配列を解析し、自然界で過去に生じた大腸菌種内の配列進化と発現量の関係を調べた。また、新規に生じる進化（de novo 進化）のモデルとして、実験室で長期間継代した大腸菌のゲノム変異を解析した。これらの 2 つの解析の結果、大腸菌の過去の種内進化と de novo 進化の両方において、統計的に有意な E-R 逆相関が成り立つことがわかった。また、いずれの進化においても、高い発現量をもつ遺伝子の配列に対して純化選択がかかっており、それによって、配列進化が相対的に遅いことが確認された。検出された純化選択には、コドンレベルの純化選択も含まれており、発現量が相対的に高い遺伝子では新規にレアコドンを獲得することが純

化選択によって制限されていることが明らかとなった。このことは、E-R 逆相関を生む分子メカニズムとして予想されているコドンレベルの純化選択の妥当性を支持するものである。一方で、コドンレベルの純化選択が種内進化に与える影響は、予想よりも小さく、E-R 逆相関が生じる主たる分子メカニズムは、その大部分が未知であることが示唆された。

7.4.7 長期定常期の大腸菌の遺伝子発現状態の推定

増殖の停止は、利用可能な栄養素や資源が限られている自然界において、微生物の生存戦略の一つとして広く観察されている。実験室の培養系では、一定の飢餓条件の下で、大腸菌は長期定常期と呼ばれる増殖期を示し、増殖停止状態で何年も生き延びることができる。これまでに我々は、長期定常期では、生存個体が、非生存細胞から放出される資源を再利用することで、生き延びていることを実証している。一方で、生存個体がどのような生理状態を形成することで、長期の飢餓に適応しているかについては、ほとんど明らかとなっていない。その原因は、長期定常期が、生存個体と非生存個体の混在によって成立しているため、非生存個体の混入によって、生存個体だけの生理状態を解析することが困難であることが一因である。この技術的な課題を突破するため、近年我々は、長期定常期の培養液の上清を用いて大腸菌を比較的短時間培養する実験手法を提案しており、この培養系（長期定常期模倣培養）を活用することで、長期定常期の生存個体の生理状態に迫ろうと試みている。

今年度は、30 日間の長期定常期を経た培養液の上清を用い、その上清にさらされた大腸菌の網羅的発現解析を行った。その結果、長期定常期上清中の細胞は、短期定常期中の細胞に比べて、ファージショックプロテイン（psp）などのストレス応答遺伝子の発現が高く、リボソームプロテインなどの増殖関連遺伝子の発現が低いことが明らかになった。これらの結果は、長期定常期における増殖停止が、細胞のメンテナンスにより傾いた生理状態によってもたらされていることを示唆している。実際に、psp 遺伝子群を欠損した変異体を用いて詳細に調べたところ、この欠損変異体は、長期定常期培養の上清において生存率と増殖率がいずれも低下することが確認された。このように、本研究によって、長期定常期の遺伝子発現状態が推定され、増殖停止中の細胞のメンテナンスにおける psp 遺伝子群の重要性が示唆された。

＜受賞＞

[1] 金井雄樹, ゲノム微生物学会ポスター賞, 日本ゲノム微生物学会, 2023 年 3 月.

＜報文＞

(原著論文)

[2] Potential contribution of intrinsic developmental stability toward body plan conservation. Uchida Y, Shigenobu S, Takeda H, Furusawa C, Irie N. BMC Biol. 2022 Apr 11;20(1):82.

[3] Distinct Survival, Growth Lag, and rRNA Degradation Kinetics during Long-Term Starvation for Carbon or Phosphate. Himeoka Y, Gummesson B, Sørensen MA, Svenningsen SL, Mitarai N.mSphere. 2022 Jun 29;7(3):e0100621.

[4] Development of a device that generates a temperature gradient in a microtiter plate for microbial culture. Shibai A, Kotani H, Kawada M, Yokoi N, Furusawa C. SLAS Technol. 2022 Jul 29;27(5):279-283.

[5] Single mutation makes Escherichia coli an insect mutualist. Koga R, Moriyama M, Onodera-Tanifuji N, Ishii Y, Takai H, Mizutani M, Oguchi K, Okura R, Suzuki S, Gotoh Y, Hayashi T, Seki M, Suzuki Y, Nishide Y, Hosokawa T, Wakamoto Y, Furusawa C, Fukatsu T. Nature Microbiol. 2022 Aug;7(8):1141-1150.

[6] Purifying selection enduringly acts on the sequence evolution of highly expressed proteins in Escherichia coli. Shibai A, Kotani H, Sakata N, Furusawa C, Tsuru S.G3 (Bethesda). 2022 Nov 4;12(11):jkac235.

[7] Experimental evidence for the correlation between RNA structural fluctuations and the frequency of beneficial mutations. Maeda Y, Mizuuchi R, Shigenobu S, Shibai A, Kotani H, Furusawa C, Ichihashi N.RNA. 2022 Dec;28(12):1659-1667.

[8] Analysis of the evolution of resistance to multiple antibiotics enables prediction of the Escherichia coli phenotype-based fitness landscape. Iwasawa J, Maeda T, Shibai A, Kotani H, Kawada M, Furusawa C.PLoS Biol. 2022 Dec 13;20(12):e3001920.

[9] Wickerhamiella bidentis sp. nov., a novel yeast species isolated from flowers and insects in Japan. Seike T, Takekata H, Uchida Y, Sakata N, Furusawa C, Matsuda F. Int J Syst Evol Microbiol. 2023 Mar;73(3). doi: 10.1099/ijsem.0.005739.

[10] Stability in gene expression and body-plan development leads to evolutionary conservation. Uchida Y, Takeda H, Furusawa C, Irie N.Evodevo. 2023 Mar 14;14(1):4.

[11] Common and distinctive transcriptome signatures of E. coli between short- and long-term stationary phase environments. Takano S, Takahashi H, Yama Y, Miyazaki R, Furusawa C, Tsuru S. Sci. Rep. 2023 Apr 6;13(1):5647.

[12] Rare-Event Sampling Analysis Uncovers the Fitness Landscape of the Genetic Code. Omachi Y, Saito N, Furusawa C, PLOS Comp. Biol. in press.

(国内雑誌)

[13] 津留三良: 実験室で分子進化を再現する, 生物工学会誌 100(11):621 (2022).

(学位論文)

[14] 宮内優綺: 神経細胞内の高分子ネットワークが情報処理に与える影響：ニューラルネットワークモデルによる解析（修士論文）

[15] 一井俊介: 細胞内部の空間構造による代謝機能の分業化進化（修士論文）

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[16] Masato Tsutsumi, Nen Saito, Daisuke Koyabu, Chikara Furusawa: A Deep learning approach for the shape analysis of the primates mandible, Euro Evo Devo 2022, 2022 年 6 月

[17] Yui Uchida, Shuji Shigenobu, Hiroyuki Takeda, Chikara Furusawa, Naoki Irie: Potential contribution of intrinsic developmental stability toward body plan conservation, Euro Evo Devo 2022, 2022 年 6 月

[18] Yoshiyuki Nakamura, Yusuke Himeoka, Nen Saito, Chikara Furusawa: Evolution of hierarchy and irreversibility in theoretical cellular differentiation model, Euro Evo Devo 2022, 2022 年 6 月

[19] Yusuke Himeoka, Namiko Mitarai: Emergence of growth and dormancy from a kinetic model of the Escherichia coli central carbon metabolism, Major ideas in quantitative microbial physiology: Past, Present and Future, 2022 年 6 月

[20] Yusuke Himeoka: Emergence of growth and dormancy from a kinetic model of the Escherichia coli central carbon metabolism, Roles of Heterogeneity in Nonequilibrium Collective Dynamics 2022 (RHINO2022), 2022 年 9 月

[21] Yusuke Himeoka: Disruption of metabolic homeostasis : Sensitivity due to the network structure, Quantitative Biology of Non-growing Microbes, 2022 年 10 月

招待講演

[22] Chikara Furusawa: Toward prediction and control of microbial evolution: Analysis of phenotypic constraints in laboratory evolution, OIST workshop “Cell, Energetics, and information: New perspectives on nonequilibrium systems”, 2022 年 6 月

[23] Chikara Furusawa: Toward prediction and control of microbial evolution: Analysis of phenotypic constraints in laboratory evolution, ELSI Symposium on Evolution and Emergence of Living Systems:from Geochemistry to Synthetic Biology, 2022 年 10 月

(国内会議)

一般講演

[24] Yuri Yasuoka, Chikara Furusawa, Yasushi Okazaki: Fluctuation of gene expression levels in early embryos is correlated to environmental and evolutionary responses, 第 55 回日本発生生物学会, 2022 年 6 月

[25] 芝井厚, 古澤力: 細菌の薬剤耐性空間上の進化軌跡を自動フィードバック制御する, 日本進化学会第 24 回大会, 2022 年 8 月

[26] 清家泰介, 阪田奈津枝, 小谷葉月, 松田史生, 古澤力: pH 変化によるフェロモン活性の変動と種分化に与える影響, 酵母遺伝学フォーラム第 55 回研究報告会, 2022 年 9 月

[27] 芝井厚, 古澤力: 細菌の複数薬剤耐性実験進化をラボオートメーションでフィードバック制御する, 2022 年日本バイオインフォマティクス学会年会, 2022 年 9 月

[28] 金井雄樹, 津留三良, 古澤力: 挿入配列活性によるオペロン構造形成の大腸菌を用いた実証実験, 日本遺伝学会第 94 回大会, 2022 年 9 月

[29] 姫岡優介, 古澤力: 代謝ネットワークの構造と緩和ダイナミクスの定性的特徴, 日本物理学会 2022 秋季大会, 2022 年 9 月

[30] 伊與田裕大, 古澤力, 姫岡優介: Bow-tie 型代謝ネットワークの出現条件, 日本物理学会 2022 秋季大会, 2022 年 9 月

[31] Yuki Kanai, Chikara Furusawa: Does Genome Reduction Accelerate Evolution of Endosymbiosis?, 第 60 回日本生物物理学会年会, 2022 年 9 月

[32] 一井俊介, 姫岡優介, 古澤力: 触媒反応ネットワークにおけるコンパートメントの進化的獲得, 第 60 回日本生物物理学会年会, 2022 年 9 月

[33] 堤真人, 斉藤稔, 小薮大輔, 古澤力: A method for morphological feature extraction based on variational auto-encoder: an application to mandible shape, 第 60 回日本生物物理学会年会, 2022 年 9 月

[34] 村上茉奈美, 川井隆太郎, 三吉健太, 芝井厚, 前田智也, 堀之内貴明, 古澤力, 戸谷吉博, 清水浩: 異なる炭素源を消費する 2 種類の大腸菌株を用いた共培養によるイソプレノール生産, 第 74 回日本生物工学会大会, 2022 年 10 月

[35] 金井雄樹, 津留三良, 古澤力: オペロン構造が組み上がる過程を実験的に再構成する, 第 45 回日本分子生物学会年会, 2022 年 11 月

[36] 武藤愛, Suzanne Hingley-Wilson, 古澤力, Johnjoe McFadden, 森浩禎: ハイスループット bar-seq 解析およびラボラトリーオートメーションシステムを用いた抗生物質環境下における大腸菌パーシスター集団動態の観察, 第 45 回日本分子生物学会年会, 2022 年 11 月

[37] 芝井厚, 古澤力: マイクロタイタープレート上のウェル間に温度勾配を生じさせる微生物培養装置の開発, 第 45 回日本分子生物学会年会, 2022 年 12 月

[38] 堤真人, 斉藤稔, 小薮大輔, 古澤力: 変分オートエンコーダを用いた霊長目の下顎形態特徴量抽出, 定量生物学の会第十回年会, 2022 年 12 月

[39] 中村能之, 姫岡優介, 斉藤稔, 古澤力: 細胞分化の階層性と不可逆性に関する理論, 定量生物学の会第十回年会, 2022 年 12 月

[40] 一井俊介, 姫岡優介, 古澤力: 細胞内部の空間構造による反応の最適制御の変化, 定量生物学の会第十回年会, 2022 年 12 月

[41] 西田慧, 姫岡優介, 古澤力: ホスト・パラサイト分子複製ネットワークのダーウィン進化による複雑化, 定量生物学の会第十回年会, 2022 年 12 月

[42] 金井雄樹, 津留三良, 古澤力: 挿入配列活性によるオペロン構造形成の実証実験, 第 17 回日本ゲノム微生物学会年会, 2023 年 3 月

[43] 永野有佳理, 小谷葉月, 吹谷智, 古澤力, 前田智也: 他の腸内細菌存在下における大腸菌の薬剤耐性進化実験, 第 17 回日本ゲノム微生物学会年会, 2023 年 3 月

[44] 山上晃汰郎, 小谷葉月, 吹谷智, 古澤力, 前田智也: 実験室進化による大腸菌のエネルギーおよび酸化還元バランスの不均衡化に対する適応機構の解明, 第 17 回日本ゲノム微生物学会年会, 2023 年 3 月

[45] 清家泰介, 武方宏樹, 古澤力, 松田史生: ショウジョウバエ体内に存在する酵母叢の多様性解析, 第 17 回日本ゲノム微生物学会年会, 2023 年 3 月

[46] 前田智也, 田邊久美, 芝井厚, 小谷葉月, 古澤力: 9 種細菌の薬剤耐性進化実験による薬剤耐性進化ダイナミクスの比較解析, 第 17 回日本ゲノム微生物学会年会, 2023 年 3 月

[47] 戸谷吉博, 三吉健太, 川本優一, 芝井厚, 古澤力, 清水浩: モデルベース指向性進化による中枢代謝の各経路における律速の解放, 化学工学会第 88 年会, 2023 年 3 月

招待講演

[48] 古澤力: 生きている状態をどのように理解するか〜理論と実験からのアプローチ〜, 第 34 回 南部コロキウム, 2022 年 6 月

[49] 金井雄樹: オペロンの進化的起源を実験的に再構成する, 日本進化学会第 24 回大会, 2022 年 8 月

[50] 姫岡優介: 細胞の休眠ダイナミクスと代謝ネットワーク構造, ネットワーク科学研究会 2022, 2022 年 8 月

[51] 古澤力: 微生物の大規模進化実験〜進化の予測と制御へ向けて〜, 第 16 回バイオ関連化学シンポジウム, 2022 年 9 月

[52] 坂本健作, 大竹和正, 芝井厚, 古澤力, 田谷千歳: 非アミノ酸をコード化した遺伝暗号の下での大腸菌進化, 第 45 回日本分子生物学会年会, 2022 年 11 月

[53] Tomoya Maeda, Chikara Furusawa: Laboratory evolution of bacterial multispecies community for antibiotic resistance, 第 45 回日本分子生物学会年会, 2022 年 11 月

[54] 内田唯, 重信秀治, 武田洋幸, 古澤力, 入江直樹: 発生システムの安定性がもたらす遺伝子発現パターンの進化的な保存性, 第 45 回日本分子生物学会年会, 2022 年 12 月

[55] 古澤力: 微生物の大規模進化実験〜進化の予測と制御へ向けて〜, 第 5 回分子サイバネティクス・第 49 回分子ロボティクス定例研究会, 2022 年 12 月

[56] 姫岡優介: ネットワークの構造と代謝状態の恒常性, 日本生物物理学会サブグループ 人工細胞モデル&分子ロボティクス 第 4 回研究会, 2022 年 1 月

(セミナー)

[57] Saburo Tsuru: Environmental plasticity constrains and directs evolution, ELSI Seminar, 2022 年 7 月

[58] 姫岡優介: 大腸菌中心代謝ネットワークから生じる休眠状態様のダイナミクス, 理論合成インシリコ生物学セミナー, 2022 年 10 月

[59] 古澤力: 普遍生物学は宇宙生物学にどのように貢献できるか?, 宇宙普遍生物学セミナー, 2022 年 11 月

[60] Chikara Furusawa, "Super-high-throughput E. coli experimental evolution ", 琉球大学熱帯生物圏研究センター・ランチョンセミナー, 2022 年 11 月

[61] 堤真人: 機械学習を用いた様々な生物形態の定量化, 広島大学数理生命科学プログラムセミナー, 2022 年 11 月

[62] Yusuke Himeoka: Emergence of growth and dormancy from a kinetic model of the Escherichia coli central carbon metabolism, RIKEN iTHEMS Seminar, 2022 年 11 月

[63] 姫岡優介: 大腸菌代謝動力学モデルにおける恒常性の崩壊と死, 大阪大学代謝情報工学セミナー, 2023 年 3 月

[64] Chikara Furusawa: Toward Prediction and Control of Microbial Evolution: Analyzing Phenotypic Constraints through High-Throughput Laboratory Evolution, ICTP/Spring College on the Physics of Complex Systems, 2023 年 3 月

(アウトリーチ)

[65] 内田唯, 重信秀治, 武田洋幸, 古澤力, 入江直樹: 動物の形態進化は、「体づくり過程の変化しにくさ」に制限されてきた, 東京大学プレスリリース, 2022 年 4 月

[66] 金井雄樹, 津留三良, 古澤力: 実験室で細菌ゲノムの進化を捉える, 学部生に伝える研究最前線, 理学部ニュース 2022 年 5 月号

[67] 岩澤諄一郎, 前田智也, 古澤力: 微生物の薬剤耐性進化を大規模データから予測—適応度地形を用いた微生物進化の予測手法を開発—, 東京大学プレスリリース, 2022 年 12 月

[68] 古澤力: 「生きている状態」をどのように理解するか? 〜理論と実験からのアプローチ〜, 東京大学 高校生と大学生のための金曜特別講座, 2023 年 1 月

8 技術部門

(下澤、佐伯、大塚 *)

∗ 技術補佐員

技術部門では、実験装置試作室、学生実験、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、日下准教授、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

2022 年 2 月から 2022 年 12 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。

- 内部製作図面数：389 枚、総製作個数 815 個
- 加工依頼

  依頼元別の加工時間数の割合：物理 66.4%、化学：7.4%、地殻化学：6.0%、フォトンサイエンス：5.0%、素粒子センター：7.0%、地球惑星：5.5%、生物：2.7%、主な依頼者（物理：安東研、島野研、日下研、村川研、中辻研、素粒子センター：浅井研、化学：岩崎研）

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、メール送付での 3D-CAD データの図面受付を開始し、マシニングセンタを用いた加工を推進している。

8.2 技術室 (佐伯)

8.2.1 学生実験

学部 3 年生向けの物理学実験 I、II のグループ編成、スケジューリング、解説書の編集と発注など学生実験全般の運営を行った。今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。(佐伯)

- 物理学実験 II (A セメスタ)
  「生物物理学」の指導 [3] (佐伯)

8.2.2 各種委員会

- 理学系技術部運営委員会 (下澤)

＜報文＞

[1] 技術部報告集 2022 (東京大学大学院理学系研究科 · 理学部技術部、2023 年 3 月).

＜学術講演＞

(国内会議)

[2] 八幡和志、佐伯喜美子、金長正彦、非物理系の物理学実験教材開発 (I), 日本物理学会 2022 年秋季大会, (オンライン、2022 年 9 月).

[3] 佐伯喜美子、物理学科における生物物理学生実験、実験・実習技術研究会 2023 広島大学 (オンライン、2023 年 3 月).

[4] 八幡和志、佐伯喜美子、金長正彦、非物理系の物理学実験教材開発 (II), 日本物理学会 2023 年春季大会, (オンライン、2023 年 3 月).

II

Summary of group activities in 2022

1 Fukushima Group

Research Subjects: QCD phase diagram, Confinement, 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, lattice gauge simulations with classical and quantum computing, matter under extreme conditions, neutron stars, etc.

Highlights in research activities of this year are listed below:

1. New confinement mechanism with imaginary rotation
2. Quantum sampling in lattice gauge theories
3. Lattice gauge theory at nonzero baryon density
4. Neutron star equation of state and the gravitational wave signals
5. Trace anomaly and the speed of sound in dense nuclear/quark matter

2 Liang Group

Research Subjects: Quantum many-body theories in nuclear and cold-atom physics

Member: Haozhao Liang and Hiroyuki Tajima

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. To this end, a cold atomic gas can be regarded as an ideal testing ground for many-body theories because of its controllability. In this regard, we are also interested in investigating novel many-body phenomena and developing quantum many-body theories through the comparisons with cold-atom experiments.

Highlights in research activities of this year include:

1. Charge symmetry breaking force in nuclear DFT
2. Functional renormalization group approach to DFT
3. Neutron-star properties and nuclear structure
4. Nuclear mass predictions with machine learning
5. A systematic calculation of β-decay half-lives
6. A Kohn-Sham scheme based neural network for nuclear systems
7. Cooper multiplet correlations
8. Density-induced BCS-BEC crossover and its three-body counterpart
9. Polarons and clusters in ultracold atoms and their applications to nuclear systems
10. Non-Hermitian topological unitary p-wave Fermi superfluid
11. Multi-particle tunneling transport in strongly-correlated systems
12. Andreev reflection through nonlinear radio-frequency transport

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. Vacuum stability in SUSY models [1]
   - 1.2. Vacuum stability in inflation models [2]
   - 1.3. Axion detection at the ILC [3]
   - 1.4. Dark matter searches in compact stars [4, 5, 6]
   - 1.5. New physics searches at the MUonE experiment [7]
   - 1.6. Supersymmetric Grand Unified Theories [8]
   - 1.7. Electric dipole moments in supersymmetric standard model [9]
   - 1.8. Dipole moments in vector-like lepton models [10]
   - 1.9. Muon anomalous magnetic dipole moment at the ILC [11]
2. Superstring theory and formal aspects of quantum field theories
   - 2.1. AGT correspondence of supergroup gauge theories [12]
   - 2.2. Bethe equations of 2d conformal field theory [13]
   - 2.3. Generalized symmetry [14, 15, 16, 17]
   - 2.4. Defect/boundary conformal field theories [18, 19, 20]
   - 2.5. Narain CFTs and error-correcting codes [21]

References

[1] S. Chigusa, T. Moroi and Y. Shoji, "Upper bound on the smuon mass from vacuum stability in the light of muon g − 2 anomaly," Phys. Lett. B **831** (2022), 137163 [arXiv:2203.08062 [hep-ph]].

[2] Q. Li, T. Moroi, K. Nakayama and W. Yin, "Instability of the electroweak vacuum in Starobinsky inflation," JHEP **09** (2022), 102 [arXiv:2206.05926 [hep-ph]].

[3] H. Fukuda, H. Otono and S. Shirai, "Searching for the QCD axion with the proposed International Linear Collider beam facility," Phys. Rev. D **106**, no.5, 055029 (2022) [arXiv:2203.06137 [hep-ph]].

[4] M. Fujiwara, K. Hamaguchi, N. Nagata and J. Zheng, "Capture of electroweak multiplet dark matter in neutron stars," Phys. Rev. D **106**, no.5, 5 (2022) [arXiv:2204.02238 [hep-ph]].

[5] K. Hamaguchi, N. Nagata and M. E. Ramirez-Quezada, "Neutron star heating in dark matter models for the muon g − 2 discrepancy," JHEP **10**, 088 (2022) [arXiv:2204.02413 [hep-ph]].

[6] M. E. Ramirez-Quezada, "Constraining dark matter interactions mediated by a light scalar with white dwarfs," [arXiv:2212.09785 [hep-ph]] accepted for publication in Phys. Rev. D.

[7] K. Asai, K. Hamaguchi, N. Nagata, S. Y. Tseng and J. Wada, "Probing the Lμ-Lτ gauge boson at the MUonE experiment," Phys. Rev. D **106** (2022) no.5, L051702 [arXiv:2109.10093 [hep-ph]].

[8] K. Hamaguchi, S. Hor and N. Nagata, "Minimal Nambu-Goldstone-Higgs model in supersymmetric SU(5) revisited," Phys. Rev. D **107**, no.3, 035016 (2023) [arXiv:2210.09333 [hep-ph]].

[9] K. Kaneta, N. Nagata, K. A. Olive, M. Pospelov and L. Velasco-Sevilla, "Quantifying Limits on CP Violating Phases from EDMs in Supersymmetry," JHEP **03**, 250 (2023) [arXiv:2303.02822 [hep-ph]].

[10] K. Hamaguchi, N. Nagata, G. Osaki and S. Y. Tseng, "Probing new physics in the vector-like lepton model by lepton electric dipole moments," JHEP **01**, 100 (2023) [arXiv:2211.16800 [hep-ph]].

[11] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto, S. i. Kawada, T. Kitahara, T. Moroi and T. Suehara, "Stau study at the ILC and its implication for the muon g-2 anomaly," Contribution to Snowmass 2021 [arXiv:2203.07056 [hep-ph]].

[12] G. Noshita, "5d AGT correspondence of supergroup gauge theories from quantum toroidal gl_1," JHEP **12** (2022) 157 [arXiv:2209.08313[hep-th]].

[13] T. Procházka and A. Watanabe, "On Bethe equations of 2d conformal field theory," [arXiv:2301.05147 [hep-th]].

[14] T. C. Huang, Y. H. Lin, K. Ohmori, Y. Tachikawa and M. Tezuka, "Numerical Evidence for a Haagerup Conformal Field Theory," Phys. Rev. Lett. **128** (2022) no.23, 231603 [arXiv:2110.03008 [cond-mat.stat-mech]].

[15] C. Cordova, K. Ohmori and T. Rudelius, "Generalized symmetry breaking scales and weak gravity conjectures," JHEP **11** (2022), 154 [arXiv:2202.05866 [hep-th]].

[16] Y. Choi and K. Ohmori, "Higher Berry phase of fermions and index theorem," JHEP **09** (2022), 022 [arXiv:2205.02188 [hep-th]].

[17] C. Cordova and K. Ohmori, "Noninvertible Chiral Symmetry and Exponential Hierarchies," Phys. Rev. X **13** (2023) no.1, 011034 [arXiv:2205.06243 [hep-th]].

[18] T. Nishioka, Y. Okuyama and S. Shimamori, "Method of images in defect conformal field theories," Phys. Rev. D **106** (2022) no.8, L081701 [arXiv:2205.05370 [hep-th]].

[19] T. Nishioka, Y. Okuyama and S. Shimamori, "Comments on epsilon expansion of the O(N) model with boundary," JHEP **03** (2023), 051 [arXiv:2212.04078 [hep-th]].

[20] T. Nishioka, Y. Okuyama and S. Shimamori, "The epsilon expansion of the O(N) model with line defect from conformal field theory," JHEP **03** (2023), 203 [arXiv:2212.04076 [hep-th]].

[21] S. Yahagi, "Narain CFTs and error-correcting codes on finite fields", JHEP **08** (2022) 058 [arXiv:2203.10848 [hep-th]].

4 Nakamura Group

Research Subjects: Spectroscopic study of hypernuclei and related hadron/nuclear physics

Member: Satoshi N. Nakamura and Sho Nagao

Nuclear Experimental Group (NEX) started research activities under a new structure with the arrival of Prof. Nakamura in April 2022 and Assistant Prof. Nagao in September.

We are performing experimental research in modern nuclear physics to understand quantum many-body systems interacting with the strong interaction. To this end, we are conducting experiments of hypernuclei which are composed of nucleons (protons and neutrons) and hyperons (with strange quarks), by making full use of particle accelerators in Japan and abroad.

Quantum many-body systems in which the strong interaction plays an important role include; baryons, which consist of quarks including protons and neutrons; (hyper)nuclei as baryonic many-body systems; and neutron stars, the densest objects in the universe, which are gravitationally bound baryon many-body systems and may be described as "giant nuclei" whose masses are supported by the baryon interaction. Those quantum many-body systems have size scales from 1 fm (10^{-15} m) to 10 km (10^4 m), spanning 19 orders of magnitude. In order to understand these in a unified manner based on the baryon interaction, which extends the nuclear force, we have been conducting experiments at 1) Jefferson Laboratory (JLab) in the United States, 2) Johannes Gutenberg University Mainz, Germany (MAMI), and 3) Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University (ELPH). These facilities have high-energy, high-intensity electron accelerators capable of producing strange quarks. In addition to the above, we are leading hypernuclear experiments using the next-generation π meson beams at the High-Intensity High-Resolution beamline (HIHR), which is being prepared as a next-generation flagship project at the hadron experimental facility of J-PARC in Tokai.

Currently, there are four key issues to be solved in hypernuclear research: 1) the hyperton puzzle, 2) the existence or non-existence of atomic number zero hypernuclei (nnΛ), 3) charge symmetry breaking of Lambda hypernuclei, and 4) the hyperon puzzle (why heavy neutron stars exist). We are promoting research to solve these puzzles through the following experiments.

- Spectroscopic study of Λ hypernuclei at Jefferson Lab
  - Search of a neutral hypernuclei, nnΛ
  - Electro-production of hyperons
  - Electro-production of η' mesons
  - High-precision spectroscopy of Λ hypernuclei with the $(e, e'\mathrm{K}^+)$ reaction
- Decay π^- spectroscopy of electro-produced hypernuclei at MAMI
  - Precise measurement of mass of hypertriton
  - Precise measurement of electron beam energy
- Study of light hypernuclei at ELPH
  - Lifetime measurement of hypernuclei
  - Study of the Λn interaction by the Final State Interaction measurement
- Design of the next generation experiment with the (π, K) reaction at HIHR, J-PARC

5 Yokoyama(M)-Nakajima Group

Research Subjects: Experimental Particle Physics and Particle Astrophysics

Member: Masashi Yokoyama, Yasuhiro Nakajima, and Kota Nakagiri

The main focus of our group is the study of neutrino properties and research using neutrinos as a probe. We are leading experiments using Super-Kamiokande and Hyper-Kamiokande detectors and the J-PARC accelerator.

T2K long-baseline neutrino oscillation experiment

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. Our current major research goal is the search for a new source of CP symmetry violation in neutrino oscillations.

We have been leading the project to upgrade near neutrino detectors for the reduction of uncertainties associated with understanding of neutrino interactions. This year, we finished the mechanical assembly of a new neutrino detector named SuperFGD. The SuperFGD detector will be installed in the experimental hall and start taking data by the end of 2023.

Super-Kamiokande experiment

Super-Kamiokande is the world's largest underground detector for neutrino physics and nucleon decay. In the summer of 2022, we added 27 tons of $Gd_2(SO_4)_3$ to increase the Gd concentration in Super-Kamiokande from 0.011% achieved in 2020 to 0.033%. The addition of gadolinium improves the detection efficiency of neutrons. Utilizing this new capability, we aim for the world's first observation of supernova relic neutrinos.

Hyper-Kamiokande

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 is under construction. The Hyper-Kamiokande will be a large water Cherenkov detector with a cylindrical tank 68 meters in diameter and 71 meters deep, filled with 260,000 tons of ultrapure water. Our group is leading the design and construction of the Hyper-Kamiokande detector system. We are also testing the performance of the photomultiplier tubes and developing calibration methods.

R&D of particle detectors for future experiments
We have been developing new particle detectors for future experiments. One example is a Time Projection Chamber (TPC) using an organic liquid as a medium for precise measurement of reactor neutrinos and supernova neutrinos. Another is the search for neutrinoless double-beta decay with ^{160}Gd, utilizing ultra-high purity Gd technology developed for the SK-Gd project.

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 (5) Quantum Technology and Artificial Intelligence (AI)

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:
  - Dark matter indirect search with multi-wavelength photons.
  - Search for Photon-Photon scattering with XFEL.
  - Search for WISPs in various wavelengths with high-power light sources.
  - Basic study for Bose-Einstein condensation of positronium.
  - Search for vacuum birefringence.
  - Search for vacuum diffraction with an XFEL and high power laser beams.
  - Precision measurement of the energy spectrum in the orthopositronium decay.
  - Measurement of Positronium Hyper-fine splitting.
  - Search for weakly coupling neutral particles with ortho-positronium.
  - Search for CP violation with ortho-positronium.
  - Search for the invisible decay of ortho-positronium.
  - Lifetime measurement of ortho-positronium.
  - Search for solar axions with Fe-57 resonant absorption.
- (3) Quantum Technology and Artificial Intelligence (AI) for application to fundamental physics.
  - Optimization problems (database search and gradient estimation).
  - Performance evaluation and improvement of quantum machine learning model with repetitive structure.

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 [1]
- Thermal transport phenomena [2-6]
- Theories on superconductivity [7,8]
- Orbital magnetic effects [9-11]
- Theories on organic conductors [12,13]
- Physics of chirality [14,15]

[1] T. Mizoguchi, H. Matsuura, and M. Ogata: Phys. Rev. B **105**, 205203 (2022). "Thermoelectric transport of type-I, II, and III massless Dirac fermions in a two-dimensional lattice model"

[2] H. Matsuura, M. Ogata, N. Tujii, and T. Mori: in preparation. "Theory of thermoelectric effect based on antiferromagnetic magnon drag in natural chalcopyrite $Cu_{1+x}Fe_{1-x}S_2$"

[3] H. Maebashi and C. M. Varma: arXiv:2207.11982. "Quantum-critical transport of marginal Fermi-liquids"

[4] T. Hirosawa, F. Schafer, H. Maebashi, H. Matsuura, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 114603 (2022) (Editors' choice). "Data-Driven Reconstruction of Spectral Conductivity and Chemical Potential Using Thermoelectric Transport Properties"

[5] K. Takahashi, H. Matsuura, H. Maebashi, and M. Ogata: Phys. Rev. B **107**, 115158 (2023). "Thermoelectric properties in semimetals with inelastic electron-hole scattering"

[6] M. Hosoi, I. Tateishi, H. Matsuura, and M. Ogata: Phys. Rev. B **105**, 085406 (2022). "Thin films of topological nodal line semimetals as a candidate for efficient thermoelectric converters"

[7] J. Endo, H. Matsuura and M. Ogata: Phys. Rev. B **107**, 094521 (2023). "Theoretical analysis of anisotropic upper critical field of superconductivity in nodal-line semimetals"

[8] H. Yokoyama, K. Kobayashi, T. Watanabe, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 124705 (2022). "Excited States beyond Mott Gap in Half-Filled-Band Hubbard Model"

[9] S. Ozaki, and M. Ogata: Phys. Rev. B **107**, 085201 (2023). "Topological contribution to magnetism in the Kane-Mele model: An explicit wave-function approach"

[10] S. Ozaki, I. Tateishi, H. Matsuura, T. Koretsune, and M. Ogata: in preparation. "Dia- to paramagnetic anisotropy of the orbital magnetic susceptibility emerging from the nodal line with energy variation"

[11] M. Wallerberger, S. Badr, S. Hoshino, S. Huber, F. Kakizawa, T. Koretsune, Y. Nagai, K. Nogaki, T. Nomoto, H. Mori, J. Otsuki, S. Ozaki, T. Plaikner, R. Sakurai, C. Vogel, N. Witt, K. Yoshimi, and H. Shinaoka: Software X **21**, 101266 (2023). "sparse-ir: Optimal compression and sparse sampling of many-body propagators"

[12] K. Kitayama, M. Ogata, M. Mochizuki, and Y. Tanaka: J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 104704 (2022). "Predicted novel type of photoinduced topological phase transition accompanied by collision and collapse of Dirac-cone pair in organic salt α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$"

[13] Y. Suzumura and M. Ogata: arXiv:2211.00966. "Seebeck Coefficient of Two-dimensional Dirac Electrons in Organic Conductor under Pressure"

[14] K. Ohe, H. Shishido, M. Kato, H. Matsuura, and Y. Togawa: submitted. "Chirality-Induced Selectivity of Phonon Angular Momenta in Chiral Quartz Crystals"

[15] R. Hirakida, J. Fujimoto, and M. Ogata: Phys. Rev. B **106**, 085127 (2022). "Chirality-dependent second-order spin current in systems with time-reversal symmetry"

8 Tsuneyuki Group

Research Subjects: Theoretical Condensed-Matter Physics

Member: Shinji Tsuneyuki and Takahiro Ishikawa

Computer simulations from first principles enable us to investigate the properties and behavior of materials beyond the limits of experiments or predict them before experiments. Our main subject is to develop and apply such computational physics techniques to investigate fundamental problems in condensed matter physics. We primarily focus on predicting 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). We are also developing new methods that go beyond the limitation of classical MD and DFT to study the electronic, structural, and dynamical properties of materials.

One such new method is first-principles lattice dynamics calculations considering the anharmonicity. We have developed a scheme for modeling the phonon Hamiltonian with third and higher-order anharmonicity from the first principles and applied the self-consistent-phonon method to calculate the lattice thermal conductivity and thermal expansivity. This year, we improved and used the method for calculating the complex permittivity of crystals in the THz region.

Another important method is the so-called data assimilation for crystal structure exploration. We newly applied the method to amorphous materials and successfully accelerated its precise structural simulation.

Major research topics in FY 2022 are as follows.

- First-principles study of dielectric functions in rutile TiO_2
- Dielectric function calculations for molecular condensed systems by machine learning of dipole moments
- Theoretical calculations of laser ablation considering electronic entropy effects
- Data assimilation method for crystal structure exploration
- Data assimilation method for amorphous structure exploration
- Structure search using evolutionary algorithms
- Exploration of trinitrotoluene (TNT) degradation process
- Search for superconducting phases in the lanthanum-boron-hydrogen and lanthanum-boron-nitrogen systems
- Superconductivity in hydride perovskites
- Electronic structure calculation with explicitly correlated wave functions

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; Thermalization and non-equilibrium dynamic of quantum many-body systems; Quantum computing and quantum algorithms; Development of open-source software for next-generation parallel simulations

Member: Synge Todo, Tsuyoshi Okubo, Hidemaro Suwa, and Shinichiro Akiyama

To know the state of matter, one can solve the many-body Schrödinger equation and obtain the partition function of statistical mechanics. However, even with the computational power of modern supercomputers, the many-body Schrödinger equation cannot be solved exactly. Therefore, an essential key in computational physics is to re-express the original equations in a form that facilitates simulation without losing physically critical properties in the original equations, such as symmetry and quantum correlations.

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, statistical machine learning, etc. By entirely using these powerful numerical methods, we aim to elucidate various exotic states, phase transitions, and dynamics in 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 developing and releasing open-source software for next-generation large-scale simulations.

[1] Masaki Gen, Hidemaro Suwa, Nematicity and fractional magnetization plateaus induced by spin-lattice coupling in the classical kagome-lattice Heisenberg antiferromagnet, Phys. Rev. B **105**, 174424 (10pp) (2022).

[2] Yuichi Motoyama, Tsuyoshi Okubo, Kazuyoshi Yoshimi, Satoshi Morita, Takeo Kato, Naoki Kawashima, TeNeS: Tensor Network Solver for Quantum Lattice Systems, Comp. Phys. Comm. **279**, 108437 (10pp) (2022).

[3] Junyi Yang, Hidemaro Suwa, Derek Meyers, Han Zhang, Lukas Horak, Zhaosheng Wang, Gilberto Fabbris, Yongseong Choi, Jenia Karapetrova, Jong-Woo Kim, Daniel Haskel, Philip J. Ryan, M. P. M. Dean, Lin Hao, and Jian Liu, Quasi-Two-Dimensional Anomalous Hall Mott Insulator of Topologically Engineered Jeff=1/2 Electrons, Phys. Rev. X **12**, 031015 (11pp) (2022).

[4] Yuichi Motoyama, Kazuyoshi Yoshimi, Takeo Kato, Synge Todo, MateriApps LIVE! and MateriApps Installer: Environment for starting and scaling up materials science simulations, Software X **20**, 101210 (8pp) (2022).

[5] Shinichiro Akiyama, Bond-weighting method for the Grassmann tensor renormalization group, J. High Energy Phys. **11**, 030 (2022).

[6] Hidemaro Suwa, Lifted directed-worm algorithm, Phys. Rev. E **106**, 055306 (9pp) (2022).

[7] Seiji Yoshikawa, Ryuhei Sato, Ryosuke Akashi, Synge Todo, Shinji Tsuneyuki, A Noise-Robust Data Assimilation Method for Crystal Structure Prediction Using Powder Diffraction Intensity, J. Chem. Phys. **157**, 224112 (8pp) (2022).

[8] Xizhi Liu, Sayan Mukherjee, Stability theorems for some Kruskal–Katona type results, Eur J. Combin. **110**, 103666 (20pp) (2022).

[9] Dhruv Mubayi, Sayan Mukherjee, Triangles in graphs without bipartite suspensions, Discrete Math. **346**, 113355 (19pp) (2023).

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. 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) quantum magnetism, (iii) dissipative quantum many-body systems, and (iv) 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 2022 are the following:

- Topological phases of matter
  - Symmetry-protected quantization of complex Berry phases in non-Hermitian systems [1]
  - Duality, criticality, anomaly, and topology in quantum spin-1 chains [2]
- Quantum magnetism
  - CP^2 skyrmion crystals in an SU(3) magnet with a Dzyaloshinskii-Moriya type interaction [3]
  - Semi-classical simulation of spin-1 quantum magnets [4]
- Nonequilibrium quantum dynamics
  - Quantum many-body scars of spinless fermions in higher dimensions [5]
  - Liouvillian gap and single spin-flip dynamics in the dissipative Fermi-Hubbard model [6]
- Mathematical and statistical physics
  - Spontaneously broken supersymmetric fracton phases with fermionic subsystem symmetries [7]
  - Flat-band ferromagnetism in the SU(N) Hubbard and Kondo lattice models [8]

[1] S. Tsubota, H. Yang, Y. Akagi, and H. Katsura, Phys. Rev. B **105**, L201113 (2022).
[2] H. Yang, L. Li, K. Okunishi, and H. Katsura, Phys. Rev. B **107**, 125158 (2023).
[3] Y. Amari, Y. Akagi, S. B. Gudnason, M. Nitta, and Y. Shnir, Phys. Rev. B **106**, L100406 (2022).
[4] K. Remund, R. Pohle, Y. Akagi, J. Romhanyi, and N. Shannon, Phys. Rev. Research **4**, 033106 (2022).
[5] K. Tamura and H. Katsura, Phys. Rev. B **106**, 144306 (2022).
[6] H. Yoshida and H. Katsura, Phys. Rev. A **107**, 033332 (2023).
[7] H. Katsura and Y. Nakayama, J. High Energ. Phys. **2022**, 72 (2022).
[8] K. Tamura and H. Katsura, Preprint, arXiv:2303.15820 [cond-mat.str-el] (2023).

11 Kabashima Group

Research Subjects: Statistical mechanics of disordered systems and its application to information science

Member: Yoshiyuki Kabashima, Takashi Takahashi, Xiangming Meng

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 2022:

1. Performance analysis of ℓ_1-reguralized linear regression for Ising model selection
2. Average case analysis of Lasso under ultra-sparse conditions
3. Statistical mechanics analysis of general multi-dimensional knapsack problems
4. Replicated simulated annealing with a global-best reference for efficient hardware implementation
5. Performance analysis of iterative self-training with linear classifier
6. Analysis of ensemble learning
7. Analysis of eigenspace of sample covariance matrices
8. Compressive sensing using diffusion models

12 Tsuji Group

Research Subjects: Theory of condensed matter physics, nonequilibrium quantum many-body systems

Member: Naoto Tsuji and Kazuaki Takasan

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 2022, we worked on the following projects:

- Dynamics of superconductors
  - Higgs mode in superconductors and nonlinear responses [1]
  - Optical amplification of third harmonic generation in superconductors [2]
  - Floquet states in superconductors [3, 4]
- Dynamics of open quantum many-body systems
  - Analysis of energy current based on quantum master equations
  - Feedback control of quantum many-body systems
  - Quantum active matter
- DC-electric-field- and current-induced quantum phases [5, 6]
- Nonlinear response of quantum many-body systems [7]
- Dynamics of topological phases [8]

[1] Naoto Tsuji, "Collective modes in superconductors: a new perspective from nonlinear terahertz responses", CCES seminar (online), IBS Center for Correlated Electron Systems (CCES), Seoul National University, March 2023.

[2] Naoto Tsuji, "Higgs-mediated nonlinear optical response and its amplification in superconductors", Novel Quantum States in Condensed Matter 2022 (NQS2022), YITP, Kyoto, November 2022.

[3] Huanyu Zhang, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, "Floquet Many-body Theory for Driven BCS Superconductors: With Potential Application to the Nonlinear Responses", FoPM Symposium 2023, University of Tokyo (Tokyo, Japan), February 2023.

[4] Youichi Yanase, Akito Daido, Kazuaki Takasan, and Tsuneya Yoshida, "Topological d-wave superconductivity in two dimensions", Physica E **140**, 115143 (2022).

[5] Kazuaki Takasan, Shuntaro Sumita, and Youichi Yanase, "Supercurrent-induced topological phase transitions", Phys. Rev. B **106**, 014508 (2022).

[6] Shuntaro Sumita, and Kazuaki Takasan, "Supercurrent-induced Weyl superconductivity", J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 074703 (2022).

[7] Kazuaki Takasan, Masaki Oshikawa, and Haruki Watanabe, "Drude weights in one-dimensional systems with a single defect", Phys. Rev. B **107**, 075141 (2023).

[8] Ryo Mori, Samuel Ciocys, Kazuaki Takasan, Ping Ai, Kayla Currier, Takahiro Morimoto, Joel E. Moore, and Alessandra Lanzara, "Spin-polarized spatially indirect excitons in a topological insulator', Nature **614**, 075141 (2023).

13 Ashida Group

Research Subjects: Condensed matter theory, Theoretical quantum optics

Member: Yuto Ashida and Kazuki Yokomizo

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, including field theory, renormalization group, topology, and variational approach. In addition, we are interested in physical phenomena in the corresponding classical systems and their potential applications. We have also been doing studies related to machine learning and physics. We list research/review papers published in the academic year of 2022 below.

- Non-Hermitian physics, open quantum systems [1, 2, 4]
- Strongly interacting quantum light-matter systems [3, 5, 8]
- Statistical physics, machine learning [6, 7]

[1] K. Yokomizo, T. Yoda, and S. Murakami, Non-Hermitian waves in a continuous periodic model and application to photonic crystals, Physical Review Research **4**, 023089 (May 2022).

[2] K. Sone, Y. Ashida and T. Sagawa, Topological synchronization of coupled nonlinear oscillators, Physical Review Research **4**, 023211 (June 2022).

[3] Y. Ashida, T. Yokota, A. Imamoglu and E. Demler, Nonperturbative Waveguide Quantum Electrodynamics, Physical Review Research **4**, 023194 (June 2022).

[4] K. Sone, Y. Ashida and T. Sagawa, Exceptional Topological Surface Laser, Physical Review B **105**, 235426 (June 2022).

[5] K. Masuki, H. Sudo, M. Oshikawa, and Y. Ashida, Absence versus Presence of Dissipative Quantum Phase Transition in Josephson Junctions, Physical Review Letters **129**, 087001 (17 Aug. 2022).

[6] M. Tsukamoto, S. Ito, K. Ogawa, Y. Ashida, K. Sasaki and K. Kobayashi, Machine-learning-enhanced quantum sensors for accurate magnetic field imaging, Scientific Reports **12**, 13942 (Sep. 2022).

[7] S. Baba, N. Yoshioka, Y. Ashida and T. Sagawa, Deep reinforcement learning for preparation of thermal and prethermal quantum states, Physical Review Applied **19**, 014068 (Jan. 2023).

[8] T. Yokota, K. Masuki and Y. Ashida, Functional Renormalization Group Approach to Circuit Quantum Electrodynamics, accepted for publication in Physical Review A.

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 transport and magnetism:
- soft-magnetic skyrmions at interfaces/heterostructures at ferromagnetic topological insulators and magnetic interaction therein.
- 2D superconductivity at α-Sn layers on a topological crystalline insulator
- non-reciprocal photocurrent at Rashba surfaces induced by irradiation of circularly polarized light
- surface transport of $SrTiO_3$ influenced by electron beam irradiation
- Ferromagnetic states at Yb-intercalated graphene

(2) Surface phases and atomic-layer materials:
- Epitaxial growth of ultra-flat SnTe and PbTe films on $SrTiO_3$(001)

(3) New methods:
- Fabrication of a four-point probe UHV system with tunneling-spectroscopy capability
- Fabrication of a UHV-MBE system with polarization-controlled mid-infrared irradiation

[1] R. Akiyama, R. Ishikawa, K. Akutsu-Suyama, R. Nakanishi, Y. Tomohiro, K. Watanabe, K. Iida, M. Mitome, S. Hasegawa, S. Kuroda: *Direct probe of ferromagnetic proximity effect at the interface in SnTe/Fe heterostructure by polarized neutron reflectometry*, The Journal of Physical Chemistry Letters **13**, 8228-8235 (Aug, 2022).

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.

   We have studied nonreciprocal charge transport in superconducting ultrathin films. For ultrathin Pb and Al films grown on the cleaved surface of GaAs (110), the antisymmetrized second harmonic magnetoresistance was observed, which suggests that rectification effect occurs in the superconducting ultrathin films. Moreover, to clarify the origin of the rectification effect, we made the observation of the cleaved GaAs surface using a scanning electron microscope. We found that an asymmetric edge structure causes the rectification effect, which is called vortex ratchet.

3. Formation of Dirac cones in ultrathin Bi films
   Magnetotransport measurements have been performed on ultrathin Bi films grown on GaAs(110). While large positive magnetoresistance is observed at low temperatures, the Hall resistance is found to be extremely small. This is explained by the cancellation of contributions of electrons and holes, which are estimated to have close density and mobility values. By analogy with graphene near the charge neutral point, magnetotransport properties are discussed in relation to the formation of Dirac cones.

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 highlights in FY2022 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 through the observation of collective modes. In La-based compounds, $La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO_4$, the signature of light-induced superconductivity was identified though the emergence of light-induced plasma edge was observed above T_c upon the near-infrared optical pulse excitation, with the plasma frequency almost identical to that of Josephson plasma frequency in the superconducting phase. The induced-plasma edge was identified up to the onset temperature of the charge stripe order, indicating the intimate interplay between the stripe order and superconductivity.

2. **Nonequilibrium dynamics of charge density wave system:** 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. The dynamics of the CDW order parameter was studied by time-resolved measurements of amplitude mode oscillation. Nonthermal melting of the CDW order induced by the intense THz pulses was revealed with the injected THz pulse energy far below the thermal energy required to heat the system up to the CDW onset temperature.

3. **Floquet engineering of Dirac electron systems:** Floquet states in Dirac electron system in Bi were investigated by irradiating the circular polarized mid infrared light pulses. In particular, we discovered that a new type of Weyl nodes appears at the one photon resonance position, which dominates the light-induced anomalous Hall effect in three-dimensional Dirac electron system.

4. **All optical switching of chirality and magnetization in a ferromagnetic Weyl semimetal:** $Co_3Sn_2S_2$, which has a kagome lattice, is a Weyl semimetal in which the electrons behave as massless Weyl particles due to the characteristic band structure. By irradiating $Co_3Sn_2S_2$ with circularly polarized light, we succeeded in all optical switching of the magnetization and the chirality of Weyl cones.

References

[1] Kota Katsumi, Morihiko Nishida, Stefan Kaiser, Shigeki Miyasaka, Setsuko Tajima, Ryo Shimano: Absence of the superconducting collective excitations in the photoexcited nonequilibrium state of underdoped $YBa_2Cu_3O_y$, arXiv.2209.01633.

[2] Naotaka Yoshikawa, Yoshua Hirai, Kazuma Ogawa, Shun Okumura, Kohei Fujiwara, Junya Ikeda, Takashi Koretsune, Ryotaro Arita, Aditi Mitra, Atsushi Tsukazaki, Takashi Oka, Ryo Shimano: Light-induced chiral gauge field in a massive 3D Dirac electron system, arXiv.2209.11932.

[3] Naotaka Yoshikawa, Kazuma Ogawa, Yoshua Hirai, Kohei Fujiwara, Junya Ikeda, Atsushi Tsukazaki and Ryo Shimano: Non-volatile chirality switching by all-optical magnetization reversal in ferromagnetic Weyl semimetal $Co_3Sn_2S_2$, Communications Physics **5**, 328 (2022).

[4] Yoshua Hirai, Naotaka Yoshikawa, Masashi Kawaguchi, Masamitsu Hayashi, Shun Okumura, Takashi Oka, Ryo Shimano: Anomalous Hall effect of light-driven three-dimensional Dirac electrons in bismuth, arXiv.2301.06072.

[5] Morihiko Nishida, Kota Katsumi, Dongjoon Song, Hiroshi Eisaki, Ryo Shimano: Light-induced coherent interlayer transport in stripe-ordered $La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO_4$, arXiv.2303.01961.

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 FY2022 included, $3d$-electron superconducting materials under high pressure, $4f$ lanthanoide honeycomb-lattice compounds with interplay of electron correlations and strong spin orbit coupling, spin liquids, and instrumental development of ultrahigh-pressure magnetometry devices.

Realization of spin liquid, where quantum spins fluctuates at absolute zero, should be a milestone in the field of quantum spin physics. After a theoretical achievement of the exactly solvable spin liquid state on a honeycomb lattice, by Alexei Kitaev, a materialization of this Kitaev Honeycomb Model (KHM) has been intensively 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-dimensional 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.

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 pseudo spins of Ir eighther on two-dimensional honecomb lattice or on three-dimensional hyper-honeycomb lattice would be a main route. Two kinds of Majorana fermions represent KHM and they are particles on the exactly solved ground state. Since our discovery is an only spin liquid on Kitaev system, and no report was given to proof two Majorana particles. We will pursuit realization of the "true" Kitaev material. For this purpose, we are exploring a new route to Kitaev physics, by exploring Lanthanoid honeycomb materials. For example, α, β-type Na_2PrO_3 are newly suggested candidates for a platform having an antiferromagnetic Kitaev-type interaction. We have clarified α-Na_2PrO_3 (two-dimensional) exhibits metamagnetic behavior which would be related to the theoretically expected behavior for the antiferromagnetic Kitaev spin liquid and its proximate. We further clarified that β-Na_2PrO_3 shows a significant short-range ordering above the antiferromagnetic transition temperature, implying that frustration takes place in this three-dimensional hyperhoneycomb compound. We further explore other $4f$ Lanthanoid honeycomb materials as a new field for quantum magnetism in combination with Material Informatics and traditional crystal growth techniques.

To further accelerate quantum magnetism research in different ways, we apply ultrahigh pressure on such candidate materials to modify the ground state. However, it has been difficult to evaluate magnetic samples above a few giga pascals. We have recently developed a highly sensitive technique to conduct magnetometry

under very high pressures up to 9 GPa using an opposed-anvil type cell, which can detect a weak volume susceptibility as small as $\sim 10^{-4}$. The high-pressure cell has an optimized geometry to yield a reduced background in the magnetic response, one order of magnitude smaller than those for previously reported high-pressure cells in a commercial SQUID magnetometer. This year, we started making a redesigned Moissanite anvil cell realizing even better resolutions and/or higher pressure. Using this state-of-the-art experimental technique, we pursue novel magnetism under pressure.

18 Hayashi Group

Research Subjects: Quantum spintronics/optics

Member: Masamitsu Hayashi, Masashi Kawaguchi

In solids, it is understood that the spin angular momentum of electrons plays an important role in, for example, magnetism, superconductivity, electrical transport and optical properties of solids. In addition to electrons and photons, magnons (magnetic excitation), phonons (lattice vibration), and other excitations in solids possess spin angular momentum. We want to understand the dynamics of particles and waves with spin and how they influence the physical properties of solids.

- Spin current generation
  - Spin magnetic moment current in Dirac materials[4]
  The spin transport properties of Dirac Hamiltonian systems is studied using Bismuth as a model case. We find the spin Hall conductivity takes a maximum near the Dirac point and decreases with increasing carrier density. The sign of the spin torque conductivity is the same regardless of the position of the Fermi level. These features can be accounted for quantitatively using a Dirac Hamiltonian model if spin current is defined as a flow of spin magnetic moment. The results demonstrate that the giant spin magnetic moment, with an effective g factor that approaches 100, is responsible for the spin Hall effect in Bi.

- Chiral magnetism
  - Current induced domain walls in ferrimagnetic TbFeCo alloy[2]
  The direction to which domain walls move in a ferrimagnetic TbFeCo alloy changes when the Tb concentration crosses the magnetization compensation point. Interestingly, the domain walls move along (against) the current flow for FeCo-rich (deficient) films. These results suggest that two competing torques act on the domain walls in the Tb-based ferrimagnets (TbFeCo), causing the domain wall velocity to be more than one order of magnitude smaller than that of Gd-based ferrimagnets.

- Magnon-phonon coupling
  - Highly non-reciprocal transmission of surface acoustic waves[5]
  We find the transmission of surface acoustic waves (SAWs) in ferromagnetic/non-magnetic/ferromagnetic tryilayers is non-reciprocal. The SAW transmission amplitude depends on its propagation direction when the two ferromagnetic layers are coupled antiferromagnetically. The degree of such SAW non-reciprocity increases with increasing exchange coupling strength. These results show the potential of interlayer exchange coupled synthetic antiferromagnets for viable acoustic nonreciprocal transmission devices, such as circulators and isolators.

[1] Large intrinsic spin Hall conductivity in orthorhombic tungsten. T Ishikawa, R Akashi, K Kubo, Y Toga, K Inukai, I Rittaporn, M Hayashi, S. Tsuneyuki. Phys. Rev. Mater. 7, 026202 (2023).

[2] M. Ishibashi, K. Yakushiji, M. Kawaguchi, A. Tsukamoto, S. Nakatsuji, M. Hayashi, Reversal of current-induced domain wall motion in TbFeCo ferrimagnetic thin films across the magnetization compensation point. Jpn. J. Appl. Phys. 62 013001 (2023).

[3] T. Taniguchi, S. Isogami, Y. Shiokawa, Y. Ishitani, E. Komura, T. Sasaki, S. Mitani, M. Hayashi, Magnetization switching probability in the dynamical switching regime driven by spin-transfer torque. Phys. Rev. B 106 104431 (2022).

[4] Z. Chi, G. Qu, Y.-C. Lau, M. Kawaguchi, J. Fujimoto, K. Takanashi, M. Ogata, M. Hayashi, Spin Hall effect driven by the spin magnetic moment current in Dirac materials. Phys. Rev. B 105, 214419 (2022).

[5] H. Matsumoto, T. Kawada, M. Ishibashi, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Large surface acoustic wave nonreciprocity in synthetic antiferromagnets. Appl. Phys. Express 15, 063003 (2022).

19 Kobayashi Group

Research Subjects: quantum sensing and mesoscopic physics

Member: Kensuke Kobayashi and Kento Sasaki

The development of nanotechnology since the 1980s has given rise to mesoscopic physics. This field aims to control various properties of matter using tiny electronic circuits (= mesoscopic systems) made from semiconductors, metals, superconductors, and magnetic materials. Developments in this field have led to the possibilities of various quantum technologies. One of these is quantum sensing, a precision measurement technique based on the principles of quantum mechanics. Our goal is to construct precise condensed matter physics based on quantum sensing.

Using color center quantum sensors, we are developing a single quantum spin microscope for diverse quantum sensing applications. This technique can quantitatively image the distribution of magnetic fields and temperature on a sub-micron scale in various environments. Such a technique has never existed in condensed matter physics. Many essential and fascinating topics, such as non-equilibrium transport, spin glass, topological edge states, and persistent currents, lie ahead.

In FY2022, we addressed the following research topics:

- Floquet engineering using pulse driving in a diamond two-level system
- Spin state readout optimization in a diamond quantum sensor
- Demonstration of geometric non-adiabatic dynamics
- Development of hexagonal boron-nitride quantum sensors
- Accurate magnetic field imaging using nanodiamond quantum sensors using machine learning
- Lock-in thermography using diamond quantum sensors
- Observation of quantum vortices in superconductors
- Magneto-optic Kerr effect measurement in a quantum spin microscope
- Microwave imaging

- Nonlinear conduction in magnetic tunnel junctions
- Determination of the Kondo temperature in quantum dots

Published papers:

[1] Y. Nakamura, *et al., AIP Advances* **12** (5), 055215 (2022).

[2] M. Tsukamoto, *et al., Scientific Reports* **12** (1), 13942 (2022).

[3] S. Nishimura, *et al., Physical Review Applied* **18** (6), 064023 (2022).

[4] K. Ogawa, *et al., Journal of the Physical Society of Japan* **92** (1), 014002 (2023).

[5] M. Shinozaki, *et al., Physical Review* B **107** (9), 094436 (2023).

20 Nakatsuji-Sakai Group

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 2022

1. Room-temperature tunneling magnetoresistance in an all-antiferromagnetic memory device [4]
Magnetoresistive random access memory (MRAM) has the potential to revolutionize computer memory by offering ultrafast, high-density, and energy-saving data storage and processing. A critical step to realizing such a possibility is to improve MRAM's operation speed and integration density; both factors are currently limited by the ferromagnetic materials used for this technology. Antiferromagnets have recently emerged as promising constituents for future ultrahigh-speed on-chip MRAM, owing to their thousandfold faster spin dynamics and lack of a stray field. However, a critical challenge to address is demonstrating the tunneling magnetoresistance (TMR) in all-antiferromagnetic MRAM, which is essential as a reading protocol. In this study, we report the observation of a finite room-temperature TMR in all-antiferromagnetic spintronics devices comprising Mn_3Sn, which breaks the common belief that TMR is directly related to interfacial spin polarization, and thus is restricted to ferromagnetic materials. This first-of-its-kind demonstration not only pushes the boundaries of operation speed in magnetic memory but also lays a firm foundation for advancing all-antiferromagnetic MRAM toward commercialization.

2. Full electrical switching of antiferromagnet unlocks unprecedented speed and capacity for spintronic devices [2]
Spintronic applications make a great leap forward by turning to antiferromagnets. Antiferromagnetic memories are insensitive to stray fields and can operate hundreds of times faster than their ferromagnetic counterparts. These unique characteristics open the door to high-speed, high-density, and low-power data processing. A major obstacle, though, is the difficulty in controlling the antiferromagnetic spin structure, which limits the device' s performance. In this study, we achieved full electrical switching of the antiferromagnetic Mn_3Sn for the first time, enabled by applied 0.2% tensile strain owing to the lattice mismatch with the substrate. Such switching maximizes the device's operating speed and dramatically simplifies the device configuration, setting down a vital milestone in antiferromagnetic spintronics.

3. Large piezomagnetic effect allows strain control of antiferromagnet [3]
Identifying effective control knobs for antiferromagnets is key to pushing forward their spintronic applications. In this study, we found sizable piezomagnetic effect in the topological antiferromagnet Mn_3Sn, famous for its nearly magnetization-free anomalous Hall effect. This piezomagnetic effect enables an applied strain as small as about 0.1% to reverse the sign of the anomalous Hall signal by rotating the underlying spin structure. The effective strain control of the anomalous Hall effect complements the conventional means, such as a magnetic field and electric current, and will be indispensable for widening the scope of topological antiferromagnetic spintronics.

4. Ultrafast dynamics of the Anomalous Hall effect in the topological antiferromagnet Mn_3Sn [5]
The large, magnetization-free anomalous Hall effect in Mn_3Sn makes the material highly promising for achieving all-antiferromagnetic memory devices with unprecedented operation speed and minimal energy consumption. Previous research using THz time-domain spectroscopy found that the nonequilibrium AHE in the THz-regime resembles the static AHE and is nearly dissipation-free at room temperature. This result suggests that the observed THz-scale AHE could be used for the electrical readout of high-speed magnetic memory. To realize this perspective, a sub-picosecond time-resolved investigation is necessary to clarify the origin of the nonequilibrium AHE and its interplay with the time evolution of the underlying magnetic order. Our new study investigates the dynamics of AHE in Mn_3Sn using ultrashort optical pulses with sub-100fs time resolution. By comparing the experimental results with microscopic calculations, we conclude that the intrinsic Berry-curvature mechanism is responsible for the nonequilibrium AHE. This work demonstrates that nonequilibrium dynamics can provide essential clues to the microscopic mechanism of anomalous transport.

5. Fabrication and thermal stability of nanoscale grains of the Weyl antiferromagnet Mn_3Sn [1]
A key step towards the integration of Mn_3Sn into electronics is to establish the functionality of the material with nanoscale dimensions. In this study, we fabricated isolated island-like structures of Mn_3Sn with diameters of one to several hundred nanometers through deposition of Mn_3Sn on a Si/SiO_2 substrate kept at a high temperature [1]. By connecting the islands using an extra aluminum conducting layer, we were able to measure the transport properties of the grains in series, confirming that they exhibit the large anomalous Hall effect indicative of the time-reversal symmetry breaking magnetic structure. The stability of the magnetic orientations of these islands under ambient temperature was confirmed through the transport measurements, indicating promise for functional nanoscale devices based on Mn_3Sn.

[1] T. Matsuo, T. Higo, D. Nishio-Hamane, S. Nakatsuji "Anomalous Hall effect in nanoscale structures of the antiferromagnetic Weyl semimetal Mn_3Sn at room temperature" Appl. Phys. Lett. **121**, 013103 (2022).

[2] T. Higo, K. Kondou, T. Nomoto, M. Shiga, S. Sakamoto, X. Chen, D. Nishio-Hamane, R. Arita, Y. Otani, S. Miwa, S. Nakatsuji "Perpendicular full switching of chiral antiferromagnetic order by current" Nature **607**, 474–479 (2022).

[3] M. Ikhlas, S. Dasgupta, F. Theuss, T. Higo, Shunichiro Kittaka, B. J. Ramshaw, O. Tchernyshyov, C. W. Hicks, S. Nakatsuji "Piezomagnetic switching of the anomalous Hall effect in an antiferromagnet at room temperature" Nat. Phys. **18**, 1086–1093 (2022).

[4] X. Chen *et al.*,"Octupole-driven magnetoresistance in an antiferromagnetic tunnel junction" Nature **613**, 490-495 (2023).

[5] T. Matsuda *et al.*, "Ultrafast Dynamics of Intrinsic Anomalous Hall Effect in the Topological Antiferromagnet Mn_3Sn" Phys. Rev. Lett. **130**, 126302 (2023).

21 Theoretical Astrophysics Group

Research Subjects: Observational Cosmology, Extrasolar Planets, Star Formation, high-energy astrophysics, and Artificial Intelligence

Member: Yasushi Suto, Naoki Yoshida, Kotaro Fujisawa , Kana Moriwaki & 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;

2022

- Formation and evolution of star clusters and galaxies in the early Universe
- Understanding Atmospheric Escape of Hot Jupiters Using Radiation Hydrodynamics Simulations
- Neutron-capture element enrichment of early galaxies

2021

- Study on the effect of supernova fallback on the neutron star diversity
- Gravitational hierarchical three-body systems with an invisible inner binary: application to binary black-hole search and their dynamical stability
- Analysis of the Large-Scale Structure of the Universe Using Cosmological Simulations and Machine Learning
- Planetary systems predicted from the ALMA disks: planet-disk evolution and long-term orbital stability of multi-planets
- Structure Formation of the Universe with Fuzzy Dark Matter
- Dispersal mechanism of proto-planetary disks

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

22 Murao Group

Research Subjects: Quantum Information Theory

Member: Mio Murao and Hayata Yamasaki

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 that 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.

This year, our group consisted of faculty members, Mio Murao (Professor), Hayata Yamasaki (Assistant Professor), postdoctoral researchers, Bartosz Regula (JSPS foreign postdoctoral fellow), Philip Taranto (JSPS foreign postdoctoral fellow), Hlér Kristjánsson (Postdoctoral researcher), graduate students, Wataru Yokojima (D3), Yutaka Hashimoto (D1), Yu Tanaka (D1), Timothy Forrer (D1), Satoshi Yoshida (M2) and Tatsuki Odake (M1). Our projects engaged in the academic year of 2022 were the following:

- Distributed quantum information processing
  - Distribution of non-local gates between networks of quantum computers (By Forrer, Murao)
  - Distributed quantum computing with entanglement-assisted packing processes (By Forrer, Murao)
- Quantum machine learning and Quantum learning
  - Quantum state generation via binary decision diagram (By Tanaka, Yamasaki, Murao)
  - Quantum neural networks with coherent control (by Kristjánsson, Yamasaki, Murao)
  - Quantum simulation of unitary comparison (By Hashimoto, Murao)
  - Quantum ridgelet transform (by Yamasaki)
- Higher-order quantum computation
  - Algorithm for transforming Hamiltonian dynamics (By Odake, Kristjánsson, Soeda, Murao)
  - Deterministic exact algorithm for inverting qubit-unitary operations (By Yoshida, Murao)
  - Catalytic supermaps (by Kristjánsson, Yoshida, Taranto, Murao)
- Indefinite causal order
  - Decomposition of unitarily extendable n-partite processes (by Yokojima, Kristjánsson, Murao)

  - Simulatability of quantum switch using definite causal order (by Kristjánsson, Taranto, Murao)

- Quantum thermodynamics
  - Landauer vs. Nernst: what is the true cost of cooling a quantum system (By Taranto)

- Quantum resource theories
  - Irreversibility of quantum entanglement (By Regula)
  - Tight constraints on the probabilistic convertibility of quantum states (By Regula)

- Quantum error correction
  - Low-depth random Clifford circuits for quantum coding against Pauli noise (By Yamasaki)
  - Time-efficient constant-space-overhead fault-tolerant quantum computation (By Yamasaki)

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 FY2022 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms, nonequilibrium open systems
  - Embedding of the Yang-Lee quantum criticality in open quantum systems [1]
  - Universal properties of dissipative Tomonaga-Luttinger liquids [2]
  - Eigenstate thermalization in long-range interacting systems [3]
- Unification of quantum physics, statistical mechanics, information theory, and machine learning
  - Fundamental theory for training deep neural networks [4, 5, 6]
  - Universal thermodynamic uncertainty relation in nonequilibrium dynamics [7]
  - Control of a quantum rigid body using reinforcement learning [8]

[1] Norifumi Matsumoto, Masaya Nakagawa, and Masahito Ueda, Phys. Rev. Research **4**, 033250 (2022).

[2] Kazuki Yamamoto, Masaya Nakagawa, Masaki Tezuka, Masahito Ueda, and Norio Kawakami, Phys. Rev. B **105**, 205125 (2022).

[3] Shoki Sugimoto, Ryusuke Hamazaki, and Masahito Ueda, Phys. Rev. Lett. **129**, 030602 (2022).

[4] Zihao Wang* and Liu Ziyin*, Neural Information Processing Systems (NeurIPS2022) [Oral].

[5] Liu Ziyin, Botao Li, and Xiangming Meng, Neural Information Processing Systems (NeurIPS2022).

[6] Liu Ziyin, Ekdeep Singh Lubana, Masahito Ueda, and Hidenori Tanaka, To be published in International Conference on Learning Representations 2023 (ICLR 2023).

[7] Liu Ziyin and Masahito Ueda, Phys. Rev. Research **5**, 013039 (2023).

[8] Zhikang Wang, Doctoral Thesis, the University of Tokyo (2022).

24 Yokoyama (J) Group

Research Subjects: Theoretical Cosmology and Gravitational Waves

Member: Jun'ichi Yokoyama, Kohei Kamada, and Ryusuke Jinno

This group being a part of Research Center for the Early Universe (RESCEU) participates in research and education of Department of Physics in close association with Theoretical Astrophysics Group of Department of Physics. We are studying various topics on cosmology of the early universe, observational cosmology, and gravitation on the basis of theories of fundamental physics such as quantum field theory, particle physics, and general relativity. We have also been working on gravitational wave data analysis to prepare for completion of KAGRA. Below is the list of topics studied during the academic year 2021.

Early Universe Cosmology

- Vacuum decay in the Lorentzian path integral
- One-loop correction on the primordial curvature perturbation from single-field inflation
- Schwinger reheating through the helical gauge field amplification
- Backreaction on the axion inflation from the charged particle production
- Chiral effects in cosmology

- Baryogenesis in the axion inflationary scenario
- Precise calculation of the cosmic birefringence
- Baryogenesis from sphaleron decoupling
- Condition of the PBH formation with conditional probability
- Time evolution of the primordial magnetic field
- Baryon isocurvature perturbation from primordial magnetic field
- Production of radiation, dark matter, and baryon asymmetry in quintessential inflation with hierarchical right-handed neutrinos
- Reheating in the R^2 inflation model with massive right-handed Majorana neutrinos
- Ruling out PBH formation in the single-field inflation models
- Machine learning post-Minkowskian integrals
- Borel resummation in stochiastic inflation
- First order phase transition in the early Universe
- Gradient flow method for the construction of saddle-point solutions

Gravitational wave analysis

- Noise removal method with environmental monitors
- Observational constraints on cosmic string with particle and gravitational wave emission
- Exploration of light dark matter

Time-domain astronomy

- Observation of the flare from red dwarf stars with Tomo-e Gozen camera

25 Ejiri 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: Akira Ejiri, Naoto Tsujii

In our laboratory, we conduct research on magnetically confined torus plasma with the goal of realizing nuclear fusion energy. In addition to conducting experimental research using the TST-2 device at the Kashiwa Campus, we are also conducting joint research with National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST), National Institute for Fusion Science (NIFS), Kyushu University, and the University of Tsukuba. We are also conducting joint research with overseas institutions such as Tokamak Energy. In TST-2, we use powerful wave heating to generate a highly non-linear self-organized plasma through fast electron generation and current drive. Our laboratory is working on various physics of waves and fast electrons.

TST-2 is a spherical tokamak (ST) with the major radius of 0.36 m and the minor radius of 0.23 m. The maximum plasma current is 120 kA for inductive operation and 27 kA for non-inductive operation using radio frequency waves. At TST-2, we mainly use the Lower-Hybrid Wave (LHW) to study non-inductive current drive. In 2022, we started experiments using a new off-midplane launch LHW antenna. Initial experiments showed improvement in the heating efficiency at the plasma core as it was designed. The x-ray radiation was also observed to be small compared to the previously studied top launch scenario, which indicated that LHW driven fast electron losses were reduced. The efficiency for LHW current drive can be also limited by parasitic LHW loss mechanisms at the edge. Ion heating was observed in correlation with parametric decay activities. Fast electron losses were studied by measuring thick-target x-ray radiation at the target limiter. Theoretically, fast electron energy is expected to increase with major radius around the low-field side scrape-off layer (SOL) if the electrons are accelerated at the high-field side. During the outer-midplane antenna pulse, the x-ray flux increased by an order of magnitude when the target limiter was moved outward across the SOL. In contrast, during the top antenna pulse, the intensity increased slightly before it decreased by a factor of five. Fast electron transport model is being developed to explain the observed characteristics. Impurity generation at the LHW antenna can be a problem since radiation by high-Z impurities may cool the plasma and density may increase in an uncontrolled way. Mo radiation was observed to increase linearly during the outer-midplane antenna pulse near the antenna and drop promptly when the power was turned off. Hot plasma finite element full-wave simulation was developed to perform realistic simulation of LHW excitation.

Diagnosis and suppression of runaway electrons are important issues in a tokamak fusion reactor. The fast electron characteristics may be studied by measuring the instabilities driven by fast electrons. We have observed instabilities with magnetic probes during the plasma current ramp-down in TST-2. During the period when instabilities were observed, no visible radiation was observed and only x-ray radiation was observed, suggesting that only fast electrons remain. Coherent magnetic fluctuations were observed over a wide range of frequencies from several tens of MHz to several hundreds of MHz, which may help understand fast electron transport during this time.

To improve the startup reliability of superconducting tokamaks, we study EC (Electron Cyclotron) wave-assisted Ohmic startup in the Trapped Particle Configuration (TPC). In FY2022, to quantitatively understand the TPC start-up characteristics, we modeled the fast electron transport using the collisionless kinetic equation and estimated the parameter regime for successful start-up. It was predicted that the low neutral pressure limit increased at high power for pure EC start-up and that the low pressure limit decreased at stronger vertical magnetic field strength. Introduction of small loop voltage did not significantly alter this parametric dependence. The predictions were consistent with TST-2 experimental results.

Microwave polarimeter is developed to measure directly the internal current profile of LHW driven plasmas. In 2022, the diagnostic principle was verified by measuring the known toroidal magnetic field. We

have also developed a double-pass Thomson scattering system, a compact magnetic probe and spectroscopy.

Particle transport over a very long period of time is studied in QUEST at the Kyushu University. In 2022, we have upgraded the Thomson scattering diagnostic to measure the discharge for tens of minutes. We found that it took about 300 seconds for the EC driven plasma to reach a steady state. This time scale is thought to represent the time scale for the particles to interact with the wall.

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.

Note: Our group is closed on March 31, 2023 due to formal retirement of Satoshi Yamamoto. Yoko Oya already moved Kyoto University on Oct.1, 2022.

[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. and 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, 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).

[4] Okoda, Y. et al. Molecular Distributions of the Disk/Envelope System of L483: Principal Component Analysis for the Image Cube Data, Astrophys. J, **923**, 168 (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 control of pendular qubit states with nonresonant two-color laser pulses [1]

Practical methodologies for quantum qubit controls are established by two prerequisites, i.e., preparation of a well-defined initial quantum state and coherent control of that quantum state. Here we propose a new type of quantum control method, realized by irradiating nonresonant nanosecond two-color (ω and 2ω) laser pulses to molecules in the pendular (field-dressed) ground state. The two-color field nonadiabatically splits the initial pendular ground state $|\tilde{0},\tilde{0}\rangle$ to a superposition state of $|\tilde{0},\tilde{0}\rangle$ and $|\tilde{1},\tilde{0}\rangle$, whose relative probability amplitudes can be controlled by the peak intensity of one wavelength component (ω) while the peak intensity of the other component (2ω) is fixed. The splitting of the quantum paths is evidenced by observing degrees of orientation of ground-state selected OCS molecules by the velocity map imaging technique. This quantum control method is highly advantageous in that any type of polar molecules can be controlled regardless of the molecular parameters, such as rotational energy, permanent dipole moment, polarizability, hyperpolarizability, and hyperfine energy structures.

(2) Ultrafast X-ray photoelectron diffraction from free molecules: Simulations of diffraction profiles from transient intermediates in the elimination reaction of $C_2H_4I_2$ [2]

We have performed the simulations of C1s X-ray photoelectron diffraction (XPD) profiles from $C_2H_4I_2$, bridged and classical anti-forms of C_2H_4I intermediates and C_2H_4 products to capture structures of transient intermediates in the elimination reaction of $C_2H_4I_2$, under our ultrafast X-ray photoelectron diffraction (UXPD) scheme for free molecules using soft X-ray free-electron laser (SXFEL). In the UXPD scheme, the sample molecules are aligned in advance by near-infrared (NIR) laser with ns pulse duration before applying a pump-probe method. Then, we have considered alignment control of $C_2H_4I_2$ by using the elliptically polarized NIR laser to realize the UXPD experiments for the free molecules. As the results of simulations of XPD profiles from the laser-aligned $C_2H_4I_2$ molecules, we have demonstrated the two-dimensional (2D) color maps of the C1s XPD profiles from $C_2H_4I_2$, C_2H_4I, and C_2H_4. The 2D color maps have revealed that the transient C1s XPD profiles from the bridged-form and classical anti-form C_2H_4I intermediates exhibit remarkable differences, reflecting different intra-molecular scattering pathways of C1s photoelectrons within the intermediates. Thus, the present result has proved that UXPD for the free molecules has an advantage, compared with other traditional diffraction methods.

[1] Je Hoi Mun, Shinichirou Minemoto, Dong Eon Kim, and Hirofumi Sakai, "All-optical control of pendular qubit states with nonresonant two-color laser pulses," Commun. Phys. **5**, 226(7 pages) (2022).

[2] S. Minemoto, J. H. Mun, T. Teramoto, A. Yagishita, and S. Tsuru, "Ultrafast X-ray photoelectron diffraction from free molecules: Simulations of diffraction profiles from transient intermediates in the elimination reaction of $C_2H_4I_2$," J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **258**, 147221(7 pages) (2022).

[3] T. Teramoto, S. Minemoto, T. Majima, T. Mizuno, J. H. Mun, A. Yagishita, P. Decleva, and S. Tsuru, "Basic studies toward ultrafast soft x-ray photoelectron diffraction; its application to probing local structure in iodobenzene molecules," Struct. Dyn. **9**, 024303(12 pages) (2022).

28 Gonokami 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 Bose-Einstein condensate of dark excitons at the low temperature. We also study lthe mechanism

of laser ablation by femtosecond lasers. 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. Exploring the mechanism of laser ablation by femtosecond lasers
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 Kentaro Komori

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

Reference

[1] T. Ishikawa, *et al.*: First-step experiment for sensitivity improvement of DECIGO: Sensitivity optimization for simulated quantum noise by completing the square, Phys. Rev. D 107, 022007 (2023).

[2] M. Croquette, *et al.*: Recent advances toward mesoscopic quantum optomechanics, AVS Quantum Sci. 5, 014403 (2023).

[3] T. Kawasaki, *et al.*: i Angular trapping of a linear-cavity mirror with an optical torsional spring, Phys. Rev. A 106, 013514 (2022).

[4] T. Shimoda, *et al.*: Coherent angular signs amplification using an optical cavity Appl. Opt. 61, 3901-3911 (2022).

[5] M. Croquette, *et al.*: Photothermal effect in macroscopic optomechanical systems with an intracavity nonlinear optical crystal, Opt. Express 30, 42579-42593 (2022).

[6] Yuta Michimura, *et al.*: Ultralight dark matter searches with KAGRA gravitational wave telescope, J. of Phys.: Conf. Ser. 2156, 012071 (2022).

[7] Yuka Oshima, *et al.*: First Results of Axion Dark Matter Search with DANCE, arXiv:2303.03594 (2023).

[8] Yuka Oshima, *et al.*: Wavefront Sensing with a Coupled Cavity for Torsion-Bar Antenna, arXiv:2207.13847 (2022).

[9] R. Abbott, *et al.*: Population of Merging Compact Binaries Inferred Using Gravitational Waves through GWTC-3, Phys. Rev. X 13, 011048 (2023).

[10] R. Abbott, *et al.*: First joint observation by the underground gravitational-wave detector KAGRA with GEO 600, PTEP 2022, 063F01 (2022).

[11] H. Abe, *et al.*: Performance of the KAGRA detector during the first joint observation with GEO600 (O3GK), PTEP ptac093 (2022).

[12] H. Abe, *et al.*: The Current Status and Future Prospects of KAGRA, the Large-Scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope Built in the Kamioka Underground, Galaxies 10, 63 (2022).

30 Bamba Group

Research Subjects: High-energy astrophysics, mainly utilizing X-ray/Gamma-ray observatories in orbit. Targets are, supernova remnants, black-holes, neutron-stars, magnetars, white dwarfs, active galactic nucleus, and so on.

Member: Associate Prof: Aya Bamba, Assistant Prof: Hirokazu Odaka (– December), Kouichi Hagino (January –)

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, thus we observe such high energy photons using balloons and satellites. This year we focused our research specifically on neutron stars (NSs), supernova remnants, and NS-NS merger remnants, as well as the development of coming missions, XRISM, GRAMS, and cipher.

Neutron stars are compact stars, as dense as nuclei, and have quite large dipole magnetic field of $\sim 10^{12-15}$ Gauss. Neutron stars accreted from companion stars are ideal to study with high X-ray luminosities. We have made wide band spectroscopy of the bright accreting neutron star, Cen X-3, and succeeded to resolve the orbital and rotational variabilities. With this analysis, we found that the original emission from

the neutron star is stable and the absorption partially cover the neutron star make the complicated time variability. We have made similar analysis to another accreting pulsar, Her X-1, and derived the geometric structure of emission column. We also made the first systematic study of wide-band spectroscopy of nebulae of pulsars. Supernova remnants distribute heavy elements and cosmic rays into the space, and makes the diversity of the universe. It is unknown which environmental parameters changes the spectrum and acceleration efficiency of cosmic rays. We have made spatially resolved spectroscopy of the young SNR, Kepler's remnant, and found that there are two regime to determine the acceleration efficiency; the low medium environment with high shock speed and strong magnetic field due to the interaction between shocks and interstellar medium.

We will launch our next generation satellite, XRISM on Japanese fiscal year 2023, and now in preparation. We also have a plan to launch balloon experiment for engineering demonstration experiments of GRAMS.

Selected Papers

[1] Terada, Y., Miwa, Y., Ohsumi, H., Fujimoto, S., Katsuda, S., Bamba, A., Yamazaki, R. "Gamma-Ray Diagnostics of r-process Nucleosynthesis in the Remnants of Galactic Binary Neutron-star Mergers", 2022, Astrophys.J., 933, 111. doi:10.3847/1538-4357/ac721f

[2] Sapienza, V., Miceli, M., Bamba, A., Katsuda, S., Nagayoshi, T., Terada, Y., Bocchino, F., Orlando, S., Peres, G. "A Spatially Resolved Study of Hard X-Ray Emission in Kepler's Supernova Remnant: Indications of Different Regimes of Particle Acceleration", 2022, Astrophys.J., 935, 152

[3] Shimoda, J., Ohira, Y., Bamba, A., Terada, Y., Yamazaki, R., Inoue, T., Tanaka, S. J. "X-ray line diagnostics of ion temperature at cosmic ray accelerating collisionless shocks", 2022, PASJ, 74, 1022

[4] Bamba, A., Shibata, S., Tanaka, S. J., Mori, K., Uchida, H., Terada, Y., Ishizaki, W. "Spectral break of energetic pulsar wind nebulae detected with wideband X-ray observations", 2022, PASJ, 74, 1186

[5] Yoneda, H., Odaka, H., et al., "Reconstruction of multiple Compton scattering events in MeV gamma-ray Compton telescopes towards GRAMS: The physics-based probabilistic model", 2023, Astroparticle Physics, 144, 102765

[6] Tanimoto, A., Ueda, Y., Odaka, H., Yamada, S., Ricci, C. "NuSTAR Observations of 52 Compton-thick Active Galactic Nuclei Selected by the Swift/BAT All-sky Hard X-Ray Survey", 2022, ApJS, 260, 30

[7] Yeung, P. K., Bamba, A., Sano, H. "Multiwavelength studies of G298.6-0.0: An old GeV supernova remnant interacting with molecular clouds", 2023, PASJ, in press

[8] Tamba, T., Odaka, H., Tanimoto, A., Suzuki, H., Takashima, S., Bamba, A., "Orbital- and Spin-phase Variability in the X-Ray Emission from the Accreting Pulsar Centaurus X-3", 2023, ApJ, 944, 9

[9] Takashima, S., Odaka, H., Yoneda, H., Ichinohe, Y., Bamba, A., Aramaki, T., Inoue, Y. "Event reconstruction of Compton telescopes using a multi-task neural network", 2022, NIMA, 1038, 166897

[10] Nagasawa, S., Minami, T., Watanabe, S., Takahashi, T. "Wide-gap CdTe Strip Detectors for High-Resolution Imaging in Hard X-rays", 2023, NIMA, in press

31 Kusaka Group

Research Subjects: Observational Cosmology, Cosmic Microwave Background (CMB) Observation, Dark Matter Search. (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; (4) Dark matter search using Magnon.

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.
- Dark matter accounts for about 80% of the matters in the Universe. Axion is one of the candidates of the dark matter. In searching for relatively light dark matters such as axion, detectors free from standard quantum limit (SQL), which constrains the sensitivity of conventional methods, play an important role. We are developing Magnon Q-bit hybridized system to overcome SQL aiming at the axion dark matter search.

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 2022:

(1) Non-equilibrium phenomena in soft matter systems
(1-1) Observation of 3D dynamics of topological defect lines in nematic liquid crystal [2]
(1-2) Negative viscosity and spontaneous flow formation of liquid crystal turbulence
(1-3) Sponge-like granular media
(1-4) Model experiment of stochastic particle transport

(2) Non-equilibrium phenomena in living systems

(2-1) Physics underlying heterogeneity of bacterial community

(2-2) Glass transition of bacterial populations [8]

(2-3) Magnetic response of collective motion of bacteria

(3) Approaches based on nonlinear science

(3-1) Route to turbulence in an active fluid model under confinement

(3-2) Algorithm to measure large deviations in non-equilibrium interfaces

More detailed information can be found at the group's website, `https://lab.kaztake.org/`

References

[1] A. N. Kato, K. A. Takeuchi, and M. Sano, Active colloid with externally induced periodic bipolar motility and its cooperative motion, Soft Matter, **18**, 5435 (2022).

[2] Y. Zushi and K. A. Takeuchi, Scaling and spontaneous symmetry restoring of topological defect dynamics in liquid crystal, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., **119**(41), e2207349119 (2022).

[3] T. Shimaya and K. A. Takeuchi, Tilt-induced polar order and topological defects in growing bacterial populations, PNAS Nexus, **1**, pgac269 (2022).

[4] Y. Takaha and D. Nishiguchi, Quasi-two-dimensional bacterial swimming around pillars: enhanced trapping efficiency and curvature dependence, Phys. Rev. E **107**, 014602 (2023)

[5] A. Douin, S. Poincloux, J. P. Bruneton, and F. Lechenault, Assessing seismic-like events prediction in model knits with unsupervised machine learning, Extreme Mech. Lett., **58**, 101932 (2023).

[6] S. Poincloux, C. Vallat, T. Chen, T. G. Sano, and P. M. Reis, Indentation and stability of woven domes, Extreme Mech. Lett., **59**, 101968 (2023).

[7] H. Lama, L. Pauchard, F. Giorgiutti-Dauphine, and S. Khawas, Salinity induced stiffening of drying particulate film and dynamic warping, Phys. Rev. Mater., **7**, 025604 (2023).

[8] H. Lama, M. J. Yamamoto, Y. Furuta, T. Shimaya, K. A. Takeuchi, Emergence of bacterial glass: two-step glass transition in 2D bacterial suspension, arXiv:2205.10436.

[9] S. Poincloux, P. M. Reis, T. W. de Geus, Stick-slip synchronization in stack of elastically coupled frictional interfaces, arXiv:2301.13745.

33 Mio Group

Research Subjects: Application of lasers

Member: Norikatsu Mio

Mio Group is conducting research on lasers and their applications. Since the laser was invented in 1960, the laser technology has been widely used in various fields as a fundamental technology that supports modern society, thus is extremely important and indispensable for communication, information technology, material processing and so on. In addition, state-of-the-art photon technology was used in the first observation of a gravitational wave in 2015; photon science and technology work as an important bridge between academia and society.

Our laboratory belongs to Institute for Photon Science and Technology (IPST), where various researches are conducted to deepen science and to promote collaboration with industry. IPST has many members

in addition to our laboratory; all of them are working closely together to promote research and education(http://www.ipst.s.u-tokyo.ac.jp).

Physics on laser material processing

The processes such as cutting and welding, using lasers are called laser processing. Since advances in laser sources have made it possible to use high-power ultraviolet light and to control pulse widths and wavelengths more freely, the development of new processing has become possible.

However, the actual phenomena are non-equilibrium, open systems, and the interaction between laser light and materials is in a region that cannot be explained by a perturbative approach. The goal of this project is to advance our understanding of this phenomenon and to develop its application.

We are now investigating the non-linear effects on laser beam propagation for laser material processing and the applications of the fine-processing using femto-sesond laser pulses.

KAGRA project

More than seven years have already passed since gravitational waves were actually detected. The number of events detected to date reaches 90 and observations of gravitational waves become important to build a new picture of the universe.

In Japan, KAGRA is being constructed in the Kamioka Mine in Gifu Prefecture. KAGRA takes advantage of the quiet underground environment and incorporates cryogenic technology. to improve its sensitivity.

Currently, we are cooperating with LIGO in the U.S. and VIRGO in Europe. KAGRA is being improved to join international joint observation called O4 (scheduled to start in May 2023). Our group is involved in developing the laser source of KAGRA. Now, a new solid-state laser that has higher power and stability is being evaluated for replacing the current laser source.

34 Nose Group

Research Subjects:Formation and function of neural networks

Member:Akinao Nose and Teruyuki Matsunaga

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.Extraction of bouton-like structures from neuropil calcium imaging data.

The neuropil, the plexus of axons and dendrites, plays a critical role in operating the circuit processing of the nervous system. Revealing the spatiotemporal activity pattern within the neuropil would clarify how the information flows throughout the nervous system. However, calcium imaging to examine the circuit dynamics has mainly focused on the soma population due to their discrete distribution. Here, we propose a new method to decompose calcium imaging data of the neuropil into populations of bouton-like synaptic

structures with a standard desktop computer. To extract bouton-like structures from calcium imaging data, we introduced a new type of modularity, a widely used quality measure in graph theory, and optimized the clustering configuration by a simulated annealing algorithm, which is established in statistical physics. To assess this method' s performance, we conducted calcium imaging of the neuropil of *Drosophila* larvae and established artificial neuropil imaging datasets. We applied the decomposition procedure to the artificial and experimental calcium imaging data and extracted individual bouton-like structures successfully. Based on the extracted spatiotemporal data, we analyzed the network structure of the central nervous system of fly larvae and found it was scale-free. These results demonstrate that neuropil calcium imaging and its decomposition could provide new insight into our understanding of neural processing.

2. A neuromechanical model for *Drosophila* larval crawling based on physical measurements.

Animal locomotion requires dynamic interactions between neural circuits, the body (typically muscles), and surrounding environments. While the neural circuitry of movement has been intensively studied, how these outputs are integrated with body mechanics (neuromechanics) is less clear, in part due to the lack of understanding of the biomechanical properties of animal bodies. Here, we propose an integrated neuromechanical model of movement based on physical measurements by taking *Drosophila* larvae as a model of soft-bodied animals. We first characterized the kinematics of forward crawling in *Drosophila* larvae at a segmental and whole-body level. We then characterized the biomechanical parameters of the larvae, namely the contraction forces generated by neural activity, and passive elastic and viscosity of the larval body using a stress-relaxation test. We established a mathematical neuromechanical model based on the physical measurements described above, which succeeded in quantitatively reproducing the kinematics of larval locomotion that were obtained experimentally and the observation of optogenetic studies reported previously. Furthermore, the model predicted a significant contribution of intersegmental connections in the central nervous system, which contrasts with a previous study. In conclusion, we generated a neurochemical model based on physical measurement to provide a new foundation to study locomotion in soft-bodied animals and soft robot engineering.

References

[1] Fukumasu, K., Nose, A., Kohsaka, H. . Extraction of bouton-like structures from neuropil calcium imaging data. *Neural Networks*, 156, 218–238 (2022)

[2] Sun, X., Liu, Y., Liu, C., Mayumi, K., Ito, K., Nose, A., Kohsaka, H. A neuromechanical model for *Drosophila* larval crawling based on physical measurements. *BMC biology*, 20(1), 130 (2022)

35 Higuchi Group

Research Subjects:Protein dymamics in vitro,cells and mice

Member:Hideo Higuchi and Motoshi Kaya

35.1 Oscillation by the minimum model system of flagella

Bending of cilia and flagella occurs when axonemal dynein molecules on one side of the axoneme produce force and move toward the microtubule minus end. These dyneins are then pulled back when the axoneme bends in the other direction, meaning oscillatory back and forth movement of dynein during repetitive bending of cilia/flagella. There are various factors that may regulate the dynein activity, e.g. the nexin-dynein regulatory complex, radial spokes, and central apparatus. In order to understand the basic mechanism of dynein' s oscillatory movement, we constructed a simple model system composed of microtubules, outer-arm dyneins, and crosslinks between the microtubules made of DNA origami. Electron microscopy showed pairs of parallel microtubules crossbridged by patches of regularly arranged dynein molecules bound in two different orientations, depending on which of the microtubules their tails bind to. The oppositely oriented dyneins are expected to produce opposing forces when the pair of microtubules have the same polarity. Optical trapping experiments showed that the dynein- microtubule -DNA-origami complex actually oscillates back and forth after photolysis of caged ATP. Intriguingly, the complex, when held at one end, showed repetitive bending motions. The results show that a simple system composed of ensembles of oppositely oriented dyneins, microtubule s, and inter- microtubule crosslinkers, without any additional regulatory structures, has an intrinsic ability to cause oscillation and repetitive bending motions.

35.2 Quantitative evaluation of intracellular vesicle diffusion in weakened cells.

When cells are exposed to an unsuitable environment for growth, they become weakened and the survival rate after a period decreases. Weakened cells show changes in their state, such as shape contraction, compared to healthy cells, and these changes in cell state are considered to contribute to the survival rate of the cells. However, it is not known in detail how the state of weakened cells differs from that of healthy cells. In this study, we focused on intracellular vesicle diffusion as a parameter to quantify the change in state when cells are weakened. Two methods were used to weaken cells: intracellular generation of reactive oxygen species (ROS) and exposure of cells to an ATP-depleted environment. First, when ROS is generated in cells, the "fluctuation value" in the cell decreases in the phase contrast image of the cell, and the "fluctuation value" is an index of the degree of cellular damage, which has already been reported in our laboratory. However, the actual meanings of the fluctuation value have not been reported. We have therefore tracked intracellular vesicles in cells which have decreased fluctuation values and calculated the diffusion coefficient, and the decrease rate in vesicle diffusion was found to be approximately the square of that in the fluctuation value, indicating that the decrease in vesicle diffusion is one of the causes of the decrease in fluctuation value. Next, we also calculated the vesicle diffusion coefficient for cells exposed to ATP-depleted environment and found that it decreased significantly and was correlated with the survival rate. Thus, the vesicle diffusion coefficient was found to be a characteristic quantity of ATP-depleted cells. To further elucidate the mechanism by which the diffusion coefficient of vesicles decreased, we examined the positional relationship between vesicles and the cytoskeleton by fluorescence observation and found that the cytoskeleton was located near the extremely slow-moving vesicles, suggesting that the cytoskeleton was involved in the decrease in the diffusion coefficient of vesicles.

36 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.

This year, we had progress in development of several microscope-related technologies. For example, we have collaborated with Miyawaki-lab in RIKEN for the development and application of a new, highly photostable green fluorescent protein, StayGold. This enabled a three-dimensional super-resolution live cell imaging for longer period without photobleaching.

We also applied our superresolution imaging technologies to solve various biological quesitons. One example is the analysis of the distribution of the force sensor protein Pkd1 on the surface of the nodal immotile cilia. The asymmetric distribution of this protein solved the long-lasting mystery of the mechanism of the left-right symmetry breaking in the development of our body.

37 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] Potential contribution of intrinsic developmental stability toward body plan conservation. Uchida Y, Shigenobu S, Takeda H, Furusawa C, Irie N. BMC Biol. 2022 Apr 11;20(1):82.

[2] Distinct Survival, Growth Lag, and rRNA Degradation Kinetics during Long-Term Starvation for Carbon or Phosphate. Himeoka Y, Gummesson B, Sørensen MA, Svenningsen SL, Mitarai N.mSphere. 2022 Jun 29;7(3):e0100621.

[3] Development of a device that generates a temperature gradient in a microtiter plate for microbial culture. Shibai A, Kotani H, Kawada M, Yokoi N, Furusawa C. SLAS Technol. 2022 Jul 29;27(5):279-283.

[4] Single mutation makes Escherichia coli an insect mutualist. Koga R, Moriyama M, Onodera-Tanifuji N, Ishii Y, Takai H, Mizutani M, Oguchi K, Okura R, Suzuki S, Gotoh Y, Hayashi T, Seki M, Suzuki Y, Nishide Y, Hosokawa T, Wakamoto Y, Furusawa C, Fukatsu T. Nature Microbiol. 2022 Aug;7(8):1141-1150.

[5] Purifying selection enduringly acts on the sequence evolution of highly expressed proteins in Escherichia coli. Shibai A, Kotani H, Sakata N, Furusawa C, Tsuru S.G3 (Bethesda). 2022 Nov 4;12(11):jkac235.

[6] Experimental evidence for the correlation between RNA structural fluctuations and the frequency of beneficial mutations. Maeda Y, Mizuuchi R, Shigenobu S, Shibai A, Kotani H, Furusawa C, Ichihashi N.RNA. 2022 Dec;28(12):1659-1667.

[7] Analysis of the evolution of resistance to multiple antibiotics enables prediction of the Escherichia coli phenotype-based fitness landscape. Iwasawa J, Maeda T, Shibai A, Kotani H, Kawada M, Furusawa C.PLoS Biol. 2022 Dec 13;20(12):e3001920.

[8] Wickerhamiella bidentis sp. nov., a novel yeast species isolated from flowers and insects in Japan. Seike T, Takekata H, Uchida Y, Sakata N, Furusawa C, Matsuda F. Int J Syst Evol Microbiol. 2023 Mar;73(3). doi: 10.1099/ijsem.0.005739.

[9] Stability in gene expression and body-plan development leads to evolutionary conservation. Uchida Y, Takeda H, Furusawa C, Irie N.Evodevo. 2023 Mar 14;14(1):4.

[10] Common and distinctive transcriptome signatures of E. coli between short- and long-term stationary phase environments. Takano S, Takahashi H, Yama Y, Miyazaki R, Furusawa C, Tsuru S. Sci. Rep. 2023 Apr 6;13(1):5647.

[11] Rare-Event Sampling Analysis Uncovers the Fitness Landscape of the Genetic Code. Omachi Y, Saito N, Furusawa C, PLOS Comp. Biol. in press.

III

2022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：横山 将志

1. 特殊相対性理論

1.1 光の伝播とエーテル

1.2 Michelson-Morley の実験

1.3 Lorentz 変換

1.4 種々の相対論的効果

1.5 時空の構造

2. 2. 相対論的力学

2.1 ４元ベクトル

2.2 相対論的エネルギーと運動量

2.3 相対論的運動学

2.4 相対論的力学

3. 電磁気学と特殊相対論

3.1 相対論効果と磁気

3.2 電磁場の変換

3.3 一定速度で運動する点電荷がつくる電磁場

3.4 電磁場テンソル

3.5 電磁場テンソルと Maxwell 方程式

4. 電磁場中の粒子の運動

4.1 一様な静電場中の運動

4.2 一様な静磁場中の運動

4.3 非一様な静磁場中での運動

4.4 一様な静電磁場中の運動

5. 電磁場のエネルギーと運動量

5.1 電磁場のエネルギーと Poynting の定理

5.2 電磁場の運動量と Maxwell の応力テンソル

5.3 電磁場のエネルギー・運動量テンソル

5.4 電磁場のラグランジアン

1.1.2　解析力学：常行 真司

1 ニュートンの法則からラグランジュ形式へ

1.1 ニュートンの法則

1.2 ガリレイ変換

1.3 オイラー-ラグランジュ方程式

1.4 一般化座標と拘束条件

1.5 ダランベールの原理

1.6 ホロノーム系の E-L 方程式の導出

2 最小作用の原理

2.1 最小作用の原理

2.2 変分法

2.3 自由粒子のラグランジアン

2.4 相互作用する質点系のラグランジアン

2.5 ラグランジュ未定乗数法と拘束条件

3 対称性と保存則

3.1 保存量

3.2 エネルギー保存則

3.3 運動量保存則

3.4 角運動量保存則

3.5 循環座標と保存則

3.6 ネーターの定理

4 さまざまなラグランジアン

4.1 回転座標系とコリオリ力

4.2 速度に比例する摩擦力（抵抗力）

4.3 電磁場中の荷電粒子

5 ハミルトニアンと正準方程式

5.1 ルジャンドル変換

5.2 ハミルトニアン

5.3 正準方程式

5.4 ポアソン括弧と保存量

5.5 ポアソン括弧の諸性質

6 正準変換

6.1 正準変換

6.2 正準変数と母関数

6.3 正準変換の具体例

6.4 無限小変換

6.5 正準変換とポアソン括弧

6.6 リウヴィルの定理

6.7 ハミルトン-ヤコビの方程式

7 相対論と解析力学

1.1.3 量子力学 I：日下 暁人

1. イントロダクション

1.1 古典論とその綻び

1.2 量子力学的効果の例

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. 量子力学の基本的な性質

5.1 波動関数を用いた方法まとめ

5.2 エルミート演算子と物理量

5.3 測定値と期待値

6. 形式的な体系

6.1 ディラックの記法と演算子を用いた定式化

6.2 ハイゼンベルグ表示

6.3 正準量子化

7. 調和振動子

7.1 調和振動子の量子論的扱い：波動関数

7.2 調和振動子の量子論的扱い：演算子法

7.3 量子ビット

1.1.4 物理実験学 : 安東 正樹, 中島 康博

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 物理学演習 II : 常行 真司, 日下 暁人, 鎌田 耕平, 松浦 弘泰

1 解析力学

1.1 運動エネルギー、位置エネルギーと仮想仕事

1.2 一般化座標

1.3 振り子の運動

1.4 汎関数の極値問題

1.5 二重振り子

1.6 拘束問題

1.7 ビリアルの定理

1.8 ばねの振動

1.9 ラグランジュ未定乗数法

1.10 保存量

1.11 時間に陽に依存するラグランジアン

1.12 戸田格子

1.13 分子振動

1.14 対称性と保存量

1.15 電磁場中の荷電粒子の運動（サイクロトロン共鳴等）

1.16 正準変換

1.17 ポアソン括弧

2 量子力学

2.1 ハミルトン-ヤコビ方程式

2.2 コンプトン効果/光の二重性

2.3 黒体放射

2.4 黒体放射の性質

2.5 断熱不変量

2.6 ボーアの原子模型

2.7 アインシュタイン模型

2.8 デバイ模型

2.9 波動方程式から Schrödinger 方程式の導出

2.10 波動関数と波束

2.11 2 重スリットを通過する電子線

2.12 確率の保存・物理量の期待値の時間変化

2.13 波動関数のガリレイ変換

2.14 井戸型ポテンシャル

2.15 デルタ関数型ポテンシャル

2.16 エネルギー固有状態

2.17 線形ポテンシャルとエアリー関数

1.1.6 物理数学 I：濱口 幸一

1. 複素関数

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 べき級数展開による 2 階斉次微分方程式の解法

2.2 定義と分類

2.3 線形微分方程式

2.4 一階微分方程式の解法の例

1.1.7 物理数学 II：辻 直人

1. 偏微分方程式

1.1 導入

1.2 線形と非線形

1.3 重ね合わせの原理

1.4 2 階の線形偏微分方程式の分類

1.5 境界条件

1.6 波動方程式

2. フーリエ級数

2.1 実フーリエ級数

2.2 フーリエ級数の収束

2.3 複素フーリエ級数

2.4 ベクトル空間としての見方

3. フーリエ変換

3.1 周期 L の周期関数

3.2 非周期関数のフーリエ変換

3.3 デルタ関数

4. 熱伝導方程式

4.1 初期値問題

4.2 初期境界値問題

4.3 熱の発生がある場合

5. グリーン関数

5.1 ポアソン方程式

5.2 ラプラス方程式

5.3 鏡像法

6. ベッセル関数

6.1 ベッセルの微分方程式

6.2 級数展開

6.3 ベッセル関数の諸性質

6.4 関連する諸関数

7. 直交多項式

7.1 ルジャンドル多項式

7.2 古典直交多項式

7.3 ラゲール多項式

7.4 エルミート多項式

8. 超幾何関数

8.1 ガウスの超幾何関数

8.2 リーマンスキーム

8.3 積分表示

8.4 合流型超幾何関数

9. 球面調和関数と回転群

9.1 球面調和関数

9.2 回転操作

9.3 無限小回転

9.4 球面調和関数との関係

10. スツルム・リウビル理論

10.1 スツルム・リウビル型微分方程式

10.2 自己随伴演算子

10.3 固有値、固有関数の性質

10.4 量子力学との関係

1.1.8 物理学演習 I : 横山 将志, 濱口 幸一, 辻 直人, 永田 夏海, 高三 和晃

1.

1.1 Julia 集合・Mandelbrot 集合

1.2 リーマン球面

1.3 Galilei 変換

1.4 Michelson–Morley の実験

2.

2.1 収束判定

2.2 正則関数の性質

2.3 Lorentz 変換

3.

3.1 複素微分と吸引的不動点・周期点

3.2 コーシーの積分公式の応用

3.3 速度の合成と超光速運動

3.4 Lorentz 収縮に関するパラドックス

4.

4.1 Laurent 展開

4.2 実績分への応用 I

4.3 実績分への応用 II

4.4 光のドップラー効果

5.

5.1 定積分の計算

5.2 粒子の崩壊

5.3 相対論的散乱問題と MUonE 実験

6.

6.1 定積分計算（branch cut がある場合）

6.2 相対論的力学

6.3 Lorentz 変換の一般論

7.

7.1 ベータ関数

7.2 斜交座標系における反変・共変ベクトル

7.3 相対論的質点の運動と作用汎関数

8.

8.1 解析接続

8.2 ラプラス変換と微分方程式

8.3 電磁場の Lorentz 変換

8.4 電磁ポテンシャルと対称性

9.

9.1 2次元 Laplace 方程式の境界値問題

9.2 Gibbs の現象

9.3 電磁場テンソル，4元電流

10.

10.1 Fourier 変換の応用

10.2 空洞共振器と Bessel 関数

10.3 Larmor の定理，Zeeman 効果

11.

11.1 Airy 関数

11.2 合流型超幾何関数

11.3 電磁場と粒子の相互作用，暗黒光子

1.1.9 物理学のための科学英語基礎 : 小野 義正

1. 科学・技術英語とは、日本人英語の欠点と改善策；動詞の適切な時制；What Is Physics

2. 直接翻訳はするな、和文和訳せよ、物主構文; 句読点の使い方； Science and Technology

3. 英語の基本は三拍子、パラグラフ・ライティング; 文頭・数字の書き方；Why We Should Learn Science and Technology

4. パラグラフ・リーディング; 関係代名詞と前置詞の使い方； What is Science

5. 読みやすい英語（論文）を書く、論文用英文の組み立て; 並列構造で書く； Questions about the Universe

6. 起承転結はやめよう、日本語の構造 vs. 英語の構造、結論を先に、理由を後に；数字・記号の表現法； Slowing Down of the Earth

7. わかってもらえる英語は「英語の発想で書く」(Leggett's Trees)、英語活用メモを作り、英借文する名詞； Fuel Cells

8. 否定形を避けて、肯定形で書く、あいまいな表現をさけ、きっぱりと書く；冠詞； Hydrogen for Cars

9. 辞書の使い方、参考文献; 短い簡潔な文を書く； Hurricanes and Global Warming

10. 通じる英語のしゃべり方 1; レポート課題: Self Introduction; 受動態を避けて能動態で書く; Global Warming

11. 通じる英語のしゃべり方 2；連結語を使う；The Internet

12. 通じる英語のしゃべり方 3；不必要な単語は省く； Micro-Nano Technology

13. 英語口頭発表での注意点; 日本人に多い間違いを直す； Nanoscience's Benefits and Risks

14. 元素記号・化学用語発音の仕方：実験ノート（研究ノート） の書き方; Scientific Fraud

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

4.5 誘電関数の模型と性質

4.6 導波路

4.7 幾何光学

1.2.2 物理学実験 I: 全実験担当教員

1. 放射線： 横山 将志、中桐 洸太

2. 真空技術：岡本 徹、枡富 龍一

3. X 線回折：高木 英典、北川 健太郎、平岡 奈緒香

4. エレクトロニクス I：三尾 典克、中島 康博、小貫 良行

5. エレクトロニクス II：馬場 彩、小高 裕和、大屋 瑶子

1.2.3 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

1.2.4 物理学演習 III：福嶋 健二, 島野 亮, 中川 大也, 田島 裕之

1. 量子力学

1.1 量子力学 I の復習, Gauss 波束, 不確定性関係

1.2 対称性と保存則

1.3 角運動量の合成

1.4 極座標系と角運動量, スピン演算子, 球面調和関数

1.5 極座標表示での Schrödinger 方程式の解法, 合流型超幾何関数

1.6 時間に依存しない摂動

1.7 時間に依存しない摂動（縮退のある場合）

1.8 時間に依存する摂動

1.9 変分法

1.10 WKB 近似

2. 電磁気学

2.1 Maxwell 方程式の性質, ベクトル解析

2.2 Poisson 方程式, 鏡像法

2.3 Laplace 方程式, Green 関数, 多重極展開

2.4 静電場, 誘電体中の境界値問題

2.5 静磁場, 定常電流, 磁性体

2.6 準定常電流, 導体内の電磁波

2.7 電磁波の反射・屈折

2.8 物質中の電磁波

1.2.5 現代実験物理学 I：江尻 晶, 酒井 明人

1. 電気回路
フィルター、インピーダンス、雑音、演算増幅器

2. 光計測
光源、検出器、光の性質、回折・干渉、レーザー

3. 歴史的実験
重力定数、流体実験、ブラウン運動

4. X 線による試料の同定
X 線の発生、構造解析、元素分析　等

5. 極限環境技術
真空、低温、磁場　等

6. 低温測定技術
比熱、磁化、電気抵抗、ホール効果、熱膨張　等

7. 電子構造及び磁気構造の決定手法
光電子分光、量子振動、中性子散乱 、核磁気共鳴、ミューオンスピン回転　等

1.2.6 計算機実験Ⅰ：藤堂 眞治, 高橋 昂, 藤澤幸太郎

1. 講義・実習の概要

1.1 講義・実習目的

1.2 講義・実習内容

1.3 計算機実験に必要な環境整備

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 行列と LAPACK

2.6 疑似乱数

2.7 複素数

2.8 ライブラリの利用

2.9 グラフの描画

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 物理の問題にあらわれる行列演算

5.2 行列の性質・べき乗・指数関数

5.3 密行列の対角化

5.4 疎行列に対する反復法

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

1.2.7 量子コンピューター実習 : 浅井 祥仁, 寺師 弘二

1. 量子コンピュータに触れる

1.1 量子計算の流れ

1.2 量子計算の概念

1.3 CHSH 不等式の検証

2. 量子回路を書く

2.1 Qiskit の基本構造を学ぶ

2.2 量子回路シミュレータ

2.3 回路の実装と実習

3. 量子コンピュータでの並列計算

3.1 さまざまな量子状態を作る

3.2 量子フーリエ変換

3.3 量子ダイナミクスシミュレーション

4. ショアのアルゴリズム

4.1 量子位相推定

4.2 位数を発見する量子回路

4.3 アルゴリズムの実装と実習

5. グローバーのアルゴリズム

5.1 非構造化データの探索

5.2 グローバー探索の量子回路

5.3 アルゴリズムの実装と実習

6. 変分法と変分量子固有値ソルバー

6.1 量子力学における変分法

6.2 変分量子固有値ソルバー法

6.3 変分量子回路を使った実習

7. 量子・古典ハイブリッド機械学習

7.1 機械学習とニューラルネットワーク

7.2 変分量子回路を使った機械学習

7.3 素粒子現象の探索への応用

7.4 アルゴリズムの実装と実習

8. 超伝導量子コンピュータの仕組み

8.1 回路 QED の基礎を学ぶ

8.2 超伝導量子ビットとは

8.3 マイクロ波パルスによる制御

9. 超伝導量子コンピュータを操作する

9.1 基本ゲートを実行する

9.2 量子ビットを読み出す

9.3 ソフトウェアによる実習

10. 光量子系

10.1 光学系の基礎を学ぶ

10.2 量子もつれ状態を作る

10.3 HOM 干渉による CNOT 実装

11. 核磁気共鳴（NMR）

11.1 NMR の基礎を学ぶ

11.2 状態準備と量子ゲートの実行

11.3 量子アルゴリズムの実装と測定

1.2.8 統計力学 I：小林 研介

0. 熱力学 再訪

0.1 熱力学

0.2 熱力学第 0 法則

0.3 熱力学第 1 法則

0.4 カルノーサイクル

0.5 熱力学第 2 法則

0.6 エントロピー

0.7 熱力学関数

0.8 平衡条件

1. 統計力学とは

1.1 統計力学の考え方

1.2 確率分布

2. ミクロカノニカル分布

2.1 状態数

2.2 熱平衡と微視的状態

2.3 ミクロカノニカル分布の導入

2.4 ボルツマンの原理

2.5 理想気体

2.6 二準位系

2.7 ミクロカノニカル分布のまとめ

3. カノニカル分布：導入

3.1 カノニカル分布の導出

3.2 カノニカル分布の性質

3.3 ヘルムホルツの自由エネルギー

3.4 二準位系

4. カノニカル分布：古典近似

4.1 量子論と古典論

4.2 古典統計力学近似

4.3 振動子系

4.4 理想気体

4.5 エネルギー等分配則

4.6 エルゴード仮説

5. カノニカル分布：量子効果

5.1 熱力学第 3 法則

5.2 黒体放射

5.3 格子比熱

6. グランドカノニカル分布

6.1 グランドカノニカル分布の導出

6.2 グランドカノニカル分布の性質

6.3 ラングミュアの等温吸着式

7. フェルミ統計とボース統計

7.1 フェルミ粒子とボース粒子

7.2 フェルミ分布とボース分布

7.3 理想フェルミ気体

7.4 理想フェルミ気体の比熱

7.5 理想フェルミ気体の帯磁率

7.6 フェルミ気体の例

7.7 理想ボース気体

8. まとめと展望

1.2.9 流体力学 : 吉田 直紀

1. 流体力学の基礎方程式

1.1 流れを表す物理量

1.2 保存則とエネルギー方程式

2. 二次元の流れ

2.1 流れ関数と複素ポテンシャル

2.2 解析関数による流れの表現

2.3 渦の運動

3. 圧縮性流体

3.1 音波と特性曲線

3.2 準一次元流

3.3 衝撃波

4. 粘性流体の力学

4.1 ナビエ-ストークス方程式

4.2 ポアズイユの法則

4.3 乱流の生成

5. 波

5.1 重力波と表面張力波

5.2 非線型波動とソリトン

6. 流体の不安定性

7. プラズマ・電磁流体力学

8. ボルツマン方程式と運動論

8.1 速度分布関数と局所熱平衡

8.2 運動量輸送とストレステンソル

8.3 モーメント方程式

1.2.10 物理学演習 IV: 小林 研介, 竹内 一将, 赤城 裕, 諏訪 秀麿

1. 統計力学モデル

1.1 ミクロカノニカルアンサンブル

1.2 カノニカルアンサンブル

1.3 理想気体

1.4 エントロピー

1.5 グランドカノニカルアンサンブル

2. 波の振動

2.1 格子振動

2.2 黒体輻射

2.3 電磁場の量子化

3. 量子理想気体

3.1 理想フェルミ気体

3.2 理想ボース気体

4. スピン系

4.1 Ising 模型

4.2 Heisenberg 模型

4.3 転送行列

5. 相転移

5.1 平均場近似

5.2 Landau 理論

5.3 繰り込み群

1.3 3年生 A セメスター

1.3.1 物理学実験 II: 全実験担当教員

1. パルス技術： 浅井 祥仁、石田 明
2. メスバウア効果：日下 暁人、木内 健司
3. 原子核散乱：中村 哲、永尾 翔
4. 分光測定：島野 亮、吉川 尚孝
5. 低温：小林 研介、佐々木 健人
6. 自動計測制御： 林 将光、河口 真志
7. 電子回折：長谷川 修司、秋山 了太
8. 量子演算入門：中辻 知、酒井 明人
9. 相転移：竹内 一将、西口 大貴
10. レーザー：酒井 広文、峰本 紳一郎
11. 生物物理：樋口 秀男、茅 元司、佐伯 喜美子
12. 顕微鏡光学系：岡田 康志、池崎 圭吾、榎 佐和子
13. ブラウン運動：安東 正樹、小森 健太郎

1.3.2 光学 : 井手口 拓郎, 三尾 典克

1. イントロダクション
2. 真空中の光の性質
3. 等方媒質中の光の伝搬
4. 結晶光学
5. 回折
6. 干渉
7. 幾何光学
8. レーザー
9. ビーム光学
10. 光共振器
11. 光計測：分光、イメージングなど

1.3.3 量子力学 III : 諸井 健夫

1. 同種粒子系の量子力学的扱い
   - **1.1** 多体系の量子力学
   - **1.2** 同種粒子の多体系
   - **1.3** 同種粒子系の波動関数
   - **1.4** 第２量子化
2. 電磁場中での荷電粒子
   - **2.1** 電磁場中の荷電粒子を記述するハミルトニアン
   - **2.2** ゲージ対称性
   - **2.3** ランダウ順位
3. ３次元の散乱問題
   - **3.1** 散乱断面積
   - **3.2** 光学定理
   - **3.3** グリーン関数を用いた散乱の記述
   - **3.4** ボルン近似
   - **3.5** 部分波展開

1.3.4 現代実験物理学 II：安東 正樹, 中島 康博

1. イントロダクション

2. 物質と粒子の相互作用と粒子検出器
- 素粒子実験の例
- 粒子と物質の相互作用
- 粒子測定器の原理
- 素粒子実験で使われている測定器

3. 粒子加速器
- 粒子加速の歴史
- 現代の加速器施設
- 将来計画と課題

4. 統計の基礎・実験データの解析
- 確率分布
- パラメーター推定

5. その他の宇宙素粒子実験
- 低バックグラウンド実験
- 暗黒物質探索
- 二重ベータ崩壊探索
- ニュートリノ実験

6. 宇宙観測における物理量の求め方
- 宇宙の観測
- 距離、質量、温度の導出方法

7. 望遠鏡とその仕組み
- 解像度を決める要因
- 光・赤外線望遠鏡
- 電波望遠鏡の仕組み
- 集光と光検出器
- 干渉計と開口合成

8. 重力波の観測
- 望遠鏡の仕組み
- 連星合体の観測
- 宇宙論的観測

1.3.5 物理学演習 V：諸井 健夫, 竹内 一将, 浅井 祥仁, 大森 寛太郎, 山本 新

1. 量子力学

1.1 調和振動子と摂動論

1.2 平面回転子

1.3 時間に依存する摂動

1.4 スピンの相互作用

1.5 結晶場分裂

1.6 同種類のスピン 1/2 フェルミ粒子 2 個からなる系

1.7 フェルミ粒子と Kramers 縮退

1.8 球対称調和振動子型ポテンシャルのもとでの N 粒子系

1.9 同種粒子の多体系と第二量子化

1.10 合流型超幾何関数

1.11 電磁場中での荷電粒子の運動

1.12 コヒーレント状態

1.13 磁場中の原子

1.14 水素分子

1.15 Aharonov-Bohm 効果

1.16 平面波の展開公式

1.17 一様磁場中の荷電粒子の縮退度

1.18 放物線座標

1.19 Coulomb 散乱

1.20 散乱断面積

1.21 同種粒子の散乱

1.22 Born 近似

1.23 共鳴散乱

1.24 GHZ 状態

2. 電磁気学

2.1 波動方程式の Green 関数

2.2 真空中の Maxwell 方程式と対称性

2.3 原子の電気双極子モーメント

2.4 古典的な原子・分子模型と光ピンセット

2.5 同軸ケーブル

2.6 Lienard-Wiechert ポテンシャル

2.7 振動する電荷からの放射

2.8 Larmor の公式

2.9 複素誘電率とファラデー効果

2.10 磁気双極子放射とパルサー

2.11 電磁波の境界面での反射と屈折

2.12 ロンドン方程式

2.13 導波管

3. 統計力学

3.1 Boltzmann 方程式

3.2 線形応答理論

3.3 Langevin 方程式

1.3.6 生物物理学 : 樋口 秀男, 岡田 康志

1. 生命とは何か、生命誕生と遺伝情報

2. タンパク質の構造と安定性

3. タンパク質の 1 分子機能

4. 筋肉運動と制御の分子論

5. エネルギー生産系

6. 細胞内で働く分子たち

7. 分子による人体の制御

8. 神経科学概論、細胞膜の電気的性質

9. 神経細胞の生物物理学

10. 活動電位の生成

11. 活動電位の伝搬

12. イオンチャネル・ポンプ

13. シナプス伝達・可塑性と学習

14. 神経回路網

1.3.7 物理数学 III : 小形 正男

1. 群と対称操作

2. 群論の基本概念

3. 有限群の表現

4. 既約表現の指標、物理への応用

5. 回転群

6. 点群、結晶群

7. リー群

8. リー群からリー代数へ

9. リー代数の表現

10. ルート系とウエイト

1.3.8 固体物理学 I : 林 将光

0. 固体物理学とは

1. 固体の電子構造

1.1 一電子近似

1.2 分子軌道法

1.3 並進対称性とブロッホの定理

1.4 周期的境界条件

1.5 強結合モデル

1.6 ブラベー格子

1.7 逆格子

1.8 自由電子モデル

1.9 結晶面と結晶方位

1.10 回折現象

1.11 状態密度

1.12 フェルミ面

2. 輸送特性

2.1 ドルーデモデル

2.2 半古典近似

2.3 ボルツマン輸送方程式

2.4 磁場中の電子の運動

2.5 量子振動

2.6 半導体

2.7 pn 接合

1.3.9 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

1.3.10 統計力学 II：竹内 一将

1. 相互作用がある系の平衡統計力学 - 相転移を中心に -

1.1 相転移とは何か？

1.2 相転移と自由エネルギー、分類

1.3 磁性体モデル：相転移の代表的舞台

1.4 相転移のメカニズムと空間次元

1.5 平均場近似

1.6 Landau の理論（平均場）

1.7 Ginzburg-Landau の理論

1.8 平均場の破綻と空間次元

1.9 臨界現象

1.10 スケーリング仮説

1.11 くりこみ群の考え方

2. 線形応答理論：非平衡統計力学への序論

2.1 現象

2.2 Boltzmann 方程式

2.3 線形応答理論

3. Brown 運動と確率過程

3.1 現象

3.2 Langevin 方程式

3.3 Fokker-Planck 方程式

1.3.11 計算機実験 II：藤堂 眞治, 高橋 昂, 藤澤 幸太郎

1. モンテカルロ法

1.1 乱択アルゴリズム

1.2 物理過程のシミュレーション

1.3 モンテカルロ積分

1.4 多体系の統計力学

1.5 マルコフ連鎖モンテカルロ

2. 偏微分方程式と多体系の量子力学

2.1 偏微分方程式の初期値問題

2.2 横磁場イジング模型

2.3 多体量子系の時間発展

2.4 量子コンピュータ

3. 少数多体系・分子動力学

3.1 少数多体系・分子動力学

3.2 シンプレクティック積分法

3.3 長距離ポテンシャルの計算

3.4 ビリアル定理

3.5 温度の制御

4. 最適化問題

4.1 最適化問題

4.2 最急降下法・勾配降下法

4.3 共役勾配法

4.4 勾配の計算

4.5 Nelder-Mead の滑降シンプレックス法

4.6 シミュレーテッドアニーリング

1.4 4年生 Sセメスター

1.4.1 機械学習概論 : 樺島 祥介

1. 導入

2. 数理基礎 **(1)**

3. 数理基礎 **(2)**

4. 回帰と分類 **(1)**

5. 回帰と分類 **(2)**

6. 統計的信頼性 **(1)**

7. 統計的信頼性 **(2)**

8. カーネル法 **(1)**：ガウス過程

9. カーネル法 **(2)**：サポートベクトルマシン

10. 多層ニューラルネット **(1)**

11. 多層ニューラルネット **(2)**

12. 主成分分析と因子分析

13. クラスタ分析

14. 敵対的生成ネットワーク

1.4.2 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

1.4.3 サブアトミック物理学 : 中村 哲

1. はじめに

物質の構成、相互作用、歴史、加速器、元素合成、サブアトミック物理を俯瞰する

2. 原子核の基本的性質
   質量と結合エネルギー
3. ミクロの世界を観る
   電子散乱実験、加速器技術、原子核や核子の大きさと形
4. 核子の内部構造
   電子-核子散乱、核子共鳴、クォーク
5. クォーク、グルーオン
   ハドロン、構造関数
6. 核力
   パイオン交換ポテンシャル、格子 QCD
7. 原子核構造
   フェルミガス模型、殻模型、魔法数、ハイパー原子核

1.4.4 計算科学概論：6名によるオムニバス講義・実習

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. 並列 FEM と CAE（Computer Aided Engineering）
4. 高性能プログラミングと性能測定
5. 第一原理計算による物質科学研究
6. 大規模疎行列ソルバー入門

1.4.5 統計力学特論：押川 正毅

1. **Phase transitions and spontaneous symmetry breaking**
2. **Landau-Ginzburg model and scalar field theory**
3. **Scaling and concept of renormalization group**
4. **Perturbative renormalization group equation and epsilon expansion**
5. **Large-N expansion**
6. **Lower critical dimensions and Mermin-Wagner theorem**
7. **Classical and quantum critical phenomena**

1.4.6 現代物理学入門：蘆田 祐人, 中村 哲

1. 開放系の物理の概観
2. 量子不純物系
3. ボソン化法と臨界現象
4. 繰り込み群と近藤効果
5. 量子散逸相転移
6. ストレンジネス核物理
7. ハイパー核
8. 中性子星とハイペロンパズル
9. エキゾティック原子
10. 原子核、素粒子実験技術

1.4.7 一般相対論：横山 順一

1. **Introduction: Equivalence principle and General Relativistic Principle**

2. Tensor Calculus

3. Physics in curved spacetime

4. The Einstein Equation

5. Spherically Symmetric Space

6. Black Holes

7. Gravitational Waves

8. Application to Cosmology

1.4.8 系外惑星 : 相川 祐理, 河原 創

1. 系外惑星検出法

1.1 視線速度法

1.2 トランジット惑星

1.3 直接撮像

1.4 マイクロレンジング

1.5 アストロメトリ

2. 系外惑星キャラクタリゼーション法

2.1 透過光分光

2.2 放射分光

2.3 反射分光

3. 惑星からの光 I

3.1 放射伝達

3.2 吸収と散乱

3.3 分子原子吸収

4. 惑星からの光 II

4.1 二流近似

4.2 散乱を含む解法

5. 惑星大気構造 I

5.1 理想気体

5.2 等温静水圧平衡モデル

6. 惑星大気構造 II

6.1 放射平衡大気モデル

6.2 放射対流平衡モデル

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

8. 原始惑星系円盤

8.1 輻射輸送の基礎事項

8.2 円盤の組成と質量分布

8.3 円盤の温度分布

8.4 質量降着円盤

9. 微惑星仮説

9.1 ダスト粒子の opacity

9.2 ダストの沈殿と合体成長

9.3 Radial Drift

9.4 微惑星形成

9.5 微惑星集積

9.6 ガス惑星形成

10. 円盤観測と惑星系形成理論

10.1 リング-空隙構造

10.2 ガス散逸過程

10.3 円盤質量分布と惑星系の多様性 t

1.4.9 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

1.4.10 固体物理学 II : 中辻 知

1. 強束縛近似とバンド構造

1.1 Bloch 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 Berry 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 Berry 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. Mott 絶縁体と Hubbard 模型

4.1 Mott 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 Cooper pair

1.4.11 プラズマ物理学：江尻 晶

1. 様々なプラズマ

1.1 様々なプラズマ

1.2 プラズマを特徴づける量

1.3 サハの熱電離平衡

1.4 衝突時間

1.5 電気抵抗

1.6 プラズマ中のスケール

1.7 デバイ遮蔽

2. 単一粒子の軌道

2.1 サイクロトロン運動、ラーマ運動

2.2 各種のドリフト

2.3 ミラー配位と断熱不変量

2.4 種々の磁場配位と粒子軌道

3. 衝突と拡散

3.1 衝突時間

3.2 電気抵抗

3.3 拡散とランダムウォーク

3.4 拡散係数と閉じ込め時間

4. 電磁流体としてのプラズマ

4.1 電磁流体方程式

4.2 MHD 方程式のまとめ

4.3 抵抗の役割と磁力線の凍結

4.4 MHD 発電，MHD 加速

4.5 磁気再結合

5. 平衡と安定性

5.1 プラズマの圧力と磁場の圧力

5.2 円柱プラズマの平衡

5.3 トーラスプラズマの平衡

6. 不安定性

6.1 不安定性の分類

6.2 不安定性の例

6.3 交換不安定性の成長率の導出

6.4 トマカクにおける良い曲率、悪い曲率

7. プラズマ中の波

7.1 波動の分類と取り扱い方

7.2 電磁場中の粒子の運動

7.3 誘電率と誘電テンソル

7.4 屈折率と分散式

7.5 分散式の解と様々な波

8. 波と粒子の相互作用

8.1 ランダウ減衰

8.2 トランジットタイム減衰

8.3 サイクロトロン減衰

9. プラズマ物理と核融合

1.4.12 宇宙物理学 : 馬場 彩

1. 万有引力の法則から見る宇宙と天体
2. 電磁波の法則から見る宇宙と天体
3. 星の基礎物理
4. 星の進化と終末
5. 縮退星（白色矮性と中性子星）とブラックホール
6. 膨張宇宙の性質
7. 初期の宇宙
8. 宇宙の超高エネルギー現象
9. 宇宙観測の今

1.4.13 生物物理学特論 II : 能瀬 聡直, 酒井 邦嘉, 新井 宗仁

1. 脳情報処理の素子としてのニューロンの機能
2. 神経活動の測定と操作
3. 神経ネットワーク研究の方法論
4. 感覚情報処理と運動制御
5. 脳 – 心 – 言語の関係
6. 普遍文法と言語獲得装置
7. 再帰性が生み出す構造
8. 人工知能と人間の創造性
9. 脳イメージングの原理
10. タンパク質はどのようにして立体構造を形成するのか
11. タンパク質の動きと機能
12. タンパク質と疾患の関わり
13. タンパク質の進化とデザイン

1.4.14 化学物理学 : 高木 英典

1. 原子（イオン）の電子状態
   - **1.1** 水素原子の 1 電子波動関数
   - **1.2** 多電子原子（イオン）の電子状態と周期表
   - **1.3** 電子間相互作用と多重項
   - **1.4** 孤立イオンの磁性
   - **1.5** Hartree -Fock 近似
   - **1.6** 群論
   - **1.7** 配位子場とイオンの電子状態
2. 分子の電子状態
   - **2.1** 水素分子
   - **2.2** 分子軌道
   - **2.3** 分子振動

1.5 4年生 A セメスター

1.5.1 素粒子物理学 : 田中 純一, 大谷 航

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 : 伊部 昌宏

1. 場の量子論の基礎

1.1 場の量子論

1.2 場の量子論に基づく模型

1.3 対称性

1.4 相対論的場の量子論

1.5 SO(1,3) 群の表現

1.6 スピン統計定理

2. 自由場の量子化

2.1 自由粒子の量子化

2.2 場の正準量子化

2.3 反粒子

3. 経路積分による量子化

3.1 遷移関数

3.2 Green 関数

3.3 分配関数

3.4 相互作用のある理論

3.5 Feynman Rule

3.6 Connected Green 関数の分配関数

3.7 S 行列

3.8 反応断面積

3.9 Fermion 場の経路積分

3.10 質量のある Vector 場の経路積分

3.11 質量のない Vector 場の経路積分

3.12 Connected Green 関数および Transition Amplitude のまとめ

4. Quantum Electrodynamics (QED)

4.1 Introduction to QED

4.2 QED の構成

4.3 Ward-Takahashi 恒等式

4.4 Compton Scattering

4.5 高次補正

4.6 QED のパラメータ決定

4.7 波動関数繰り込み

4.8 紫外発散

4.9 正則化

4.10 繰り込まれた摂動論

4.11 Power counting

4.12 赤外発散

1.5.3 原子核物理学 : Haozhao Liang

1. Introduction of atomic nuclei

1.1 Basic properties

1.2 Creations and decays

1.3 Outstanding features

2. Nuclear bulk properties

2.1 Nuclear masses and liquid drop model

2.2 Nuclear saturation and Fermi-gas model

2.3 Magic numbers and shell model

3. Nucleon-nucleon interactions

3.1 Symmetries and basic properties

3.2 Non-perturbative nature and effective interactions

4. Nuclear structure and its understandings

4.1 Global descriptions and Hartree-Fock vs density functional theory

4.2 Pairing correlations and BCS vs Bogoliubov

5. Nuclear radioactivity and its understandings

5.1 Alpha decays

5.2 Beta decays

5.3 Gamma decays

6. Selected advanced topics and discussion

1.5.4 現代物理と機械学習 : 蘆田 祐人

1. Introduction

2. Quantum mechanics review

2.1 Fundamental concepts

2.2 Ensembles

2.3 Distance measures

3. Theory of quantum measurement and open systems

3.1 Positive operator-valued measure

3.2 Kraus operators

3.3 Bayesian inference and quantum measurement

3.4 Continuous quantum measurement

4. Foundations of quantum optics

4.1 Quantization of the electromagnetic field

4.2 Bosonic Gaussian states

4.3 Fermionic Gaussian states

4.4 Superconducting qubits

5. Quantum light-matter interaction

5.1 Quantized electrodynamics Hamiltonian

5.2 Long wavelength approximation

5.3 Introduction to Cavity/Waveguide QED

6. Machine learning and quantum science

6.1 Supervised learning

6.2 Unsupervised learning

6.3 Black-box optimization

7. Reinforcement learning

7.1 Motivating example

7.2 Markov decision process

7.3 Value-based search

7.4 Deep Q-learning

7.5 Policy-based search

7.6 Black-box optimization in deep RL

1.5.5 電子回路論 : 北川 健太郎

0. 令和時代の信号処理・装置制御

1. 回路図の書き方、シミュレーション

2. 線形システムとフィルタ

3. 離散信号とデジタル信号処理

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. デジタル回路

8. パワー回路

9. 基板実装

1.5.6 固体物理学 III : 酒井 明人

1. 電子相関を考慮した固体中の電子

1.1 相互作用の無い電子系

1.2 フェルミ液体

1.3 ハバードモデルにおける電子相関

1.4 アンダーソンモデルにおける電子相関

1.5 重い電子系

2. 超伝導

2.1 超伝導の性質

2.2 GL 理論

2.3 BCS 理論

2.4 非 BCS 超伝導

3. 磁性

3.1 磁性の起源

3.2 量子磁性

1.5.7 非平衡科学 : 伊藤 創祐

1. 序論

定常と非定常、確率のダイナミクス、定常状態と平衡状態

2. 確率過程

Markov 連鎖 、Chapman-Kolmogorov 方程式、マスター方程式、Fokker-Planck 方程式、Onsager-Machlup 関数、Langevin 方程式

3. ゆらぎの熱力学

流れと力、熱力学第二法則、overdamped な Fokker-Planck 方程式における熱力学第二法則、非平衡定常状態での熱力学と Kirchhoff の法則、線形不可逆熱力学と Onsager 相反関係

4. 情報量とゆらぎの熱力学

Shannon エントロピーと微分エントロピー、Kullback-Leibler ダイバージェンス、エントロピー生成と Kullback-Leibler ダイバージェンス、詳細釣り合い条件におけるエントロピー生成率と Kullback-Leibler ダイバージェンス、熱力学第二法則と平衡状態の安定性

5. 力学系と安定性

キュムラントとモーメント、Fokker -Planck 方程式とキュムラントの力学系、キュムラントの固定点と安定性

6. 熱力学的トレードオフ関係

Fokker-Planck 方程式と最適輸送理論、熱力学的速度限界、熱力学的不確定性関係、定常状態熱力学

1.5.8 普遍性生物学 : 古澤 力

1. Introduction
Universal properties of biological systems

2. Universal properties in steady growing systems
growth laws, phenomenological theory of dormant state

3. Adaptation
attractor selection dynamics for environmental adaptation

4. Robustness of development
dynamical system model of cell differentiation, morphogenesis

5. Evolution (I)
fluctuation-response relationship in evolution, genetic variance and fluctuation

6. Evolution (II)
emergence of evolutionary constraint, experimental evolution studies

7. Ecosystem
mechanisms for coexistence, symbiosis

8. Summary and perspectives
toward phenomenological theories for universal biology

1.5.9 重力波物理学 : Kipp Cannon, 都丸 隆行

1. Introduction to General Relativity

1.1 Motivation

1.2 Spaces

1.3 Linear Gravity

2. Orbiting Binary System

2.1 Metric Perturbation

2.2 Time Evolution

2.3 Energy Balance

2.4 Time to Coalescence

2.5 Newtonian Chirp

2.6 Extra Comments

3. Detection of Gravitational Waves (Tomaru)

3.1 Philosophical Introduction

3.2 Various Methods of Gravitational Wave Detection 1 – Doppler Tracking & Pulsar Timing

3.3 Various Methods of Gravitational Wave Detection 2 – Resonant Mass Detector & CMB Polarization

3.4 Laser Interferometric Gravitational Wave Detector

3.5 Noises in Gravitational Wave Detector

4. Gravitational-Wave Signal Identification

4.1 Choosing a Detector

4.2 Neyman-Pearson Criterion

4.3 Neyman-Pearson Lemma

4.4 Time Series as a Vector

4.5 The Fourier Transform as a Unitary Linear Operator

4.6 Gaussian Random Variables

4.7 Karhunen-Loève Theorem

4.8 Matched Filter

5. Gravitational-Wave Astronomy

5.1 Parameter Estimation and Bayes' Theorem

5.2 Compact Object Merger Rates

1.5.10 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・技術英語とは、論文審査報告（英文が悪い）：理由と対策、わかってもらえる英語論文は「英語の発想で」(Leggett’s Trees)、日本人英語が通じない理由と対策（脱日本的発想)、直接翻訳 j はするな⇒「和文和訳して、簡潔な物主構文へ」

2. 英語論文作成の概要 2

結論を先に理由を後に、英語の基本は三拍子（パラグラフ構造)、「起承転結」から「結論が先」（序論・本論・結論）のエッセイへ、否定文を避けて肯定文で書く、「英語活用メモ」を作り英借文する、本文を直接英文で書けない場合には Two Steps 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、日本人英語の脱却ポイント、英語論文執筆の基本的な注意、英語論文の構成（IMRAD 方式)、英語論文のフローチャート、英語論文の校正項目の書き方 1（表題、著者と所属、抄録、略語の使用方法）

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、短い簡潔な文 (Simple Sentences) を書く、受動態を避け能動態を使う、修飾する節や句は修飾対象のすぐ近くに、文意を明確にする言葉（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、動名詞と不定詞の使い方、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

前置詞の使い方、注意すべき句読法、数字・数式の表現法、記号の読み方、元素記号の読み方、参考書、レポートのフォーマット

9. 論文投稿と査読者対策

10. 英語プレゼンの概要

プレゼンテーションとは、プレゼンテーション（口頭発表）の心構え、プレゼンテーションのプランニング、英語プレゼンテーションの構成、スライドの効果的な使い方、標準スライド

11. 英語の構造としゃべり方

英語の構造（わかりやすい英語表現)、講演用英語表現 vs. 論文用英語表現、わかってもらえる英語のしゃべり方、うまく聞こえる発音のコツ、カタカナ英語 (False Friends) に注意、わかってもらえる英語のしゃべり方（事前準備）

12. 発表のマナー・テクニック

原稿は読むべきか読んではならないか、聞いてわかる原稿・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、プレゼンテーション当日のコツ（まとめ）

13. 英語プレゼンの実際

口頭発表の決まり文句：最初の挨拶、プレセンの流れと決まり文句、ここのスライドの説明、具体的な図表の説明、数字・数式・記号の読み方、グラフ表現、図形、言い回しの工夫

14. 質疑応答・ポスターセッション・チェックリスト・まとめ

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・質問に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、補遺 1．国際会議用アブストラクトの執筆手順、Professional Self Introduction

2　各賞受賞者紹介

2.1　牧島 一夫 名誉教授

— 瑞宝中綬章 —

2022 年春の叙勲において、牧島一夫名誉教授が、公務等に長年にわたり従事し、優れた業績を挙げた方に授与される瑞宝中綬章を受章されました。牧島先生は、X 線天文学の黎明期から飛翔体搭載 X 線検出器の開発と高エネルギー天体物理の観測的研究の両面で世界を牽引してこられ、日本の X 線天文学分野が「お家芸」と言われるまでに発展する上で中心となって貢献されました。その業績で特筆すべき点は、白色矮星や中性子星・ブラックホールといったコンパクトな高密度天体から銀河団のような宇宙最大の構造まで、種族や規模を問わず天体に共通する物理現象を見抜き、その理解を極められた点です。牧島先生の下からは、様々な高エネルギー宇宙物理学分野の専門家が数多く巣立っています。

2.2　辻 直人 准教授

— 令和 4 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞 —

辻直人准教授が、「超伝導体におけるヒッグスモードの光共鳴現象の理論研究」の業績により 2022 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞されました。超伝導体中では電子が位相の揃った一つの波として振る舞い、その振幅の振動はヒッグスモードと呼ばれています。ヒッグスモードは超伝導体に普遍的に存在する基本的な現象と考えられてきたにも関わらず、理論的な予言から 50 年以上の間、純粋な超伝導体において実験的に観測されていませんでした。辻氏はこの超伝導のヒッグスモードと光が非線形相互作用を介して結合することを理論的に明らかにしました。さらに超伝導体に光を照射した際に、その周波数の 2 倍が超伝導ギャップエネルギーに一致するときヒッグスモードと光が共鳴し、ヒッグスモードの振幅が発散的に増幅すること、それに伴って超伝導体から入射周波数の 3 倍の周波数の光が共鳴増大して放射されることを理論的に示しました。辻氏の研究は超伝導体におけるヒッグスモードという新分野の発展に大きく貢献し、非従来型超伝導体の研究や、光誘起超伝導現象への応用などに研究が広がっています。

2.3　肥後 友也 特任准教授

— 丸文研究奨励賞（令和 4 年度） —

物理学専攻の肥後友也特任准教授が「トポロジカル反強磁性体 Mn3Sn における機能物性開拓」に関する研究により、第 26 回丸文研究奨励賞を受賞されました。本賞は、科学技術の進歩ならびに次世代の産業創出に資する創造的産業技術の向上に対して最も貢献が期待される顕著な研究業績、将来的に貢献が期待される研究業績、または成果を挙げつつある研究を表彰するもの」です。肥後特任准教授は、磁気抵抗メモリなどの強磁

性体からなるデバイスの超高速・高集積化を目指し、ワイル点と呼ばれるトポロジカル電子構造を有する反強磁性体 Mn3Sn を舞台に、反強磁性体の表面・膜界面における電子機能の開拓を進めており、反強磁性金属において初めて巨大な磁気光学カー効果の観測に成功されました。また、Mn3Sn 薄膜と重金属から構成される多層膜を用いて、スピン軌道トルクにより、反強磁性秩序を介してワイル点・ベリー曲率由来の応答を制御可能なことを実証しました。より最近では、Mn3Sn からなるトンネル接合素子においてトンネル磁気抵抗効果を共同で観測するなど世界的に注目される研究を進められており、今後の益々のご活躍が期待されます。

2.4 酒井 明人 講師

— 令和４年度文部科学大臣表彰若手科学者賞 —

酒井明人講師が「強相関電子系およびトポロジカル磁性体を用いた量子物性研究」により令和４年度文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞しました。ホール効果は電流に垂直方向に電圧が生じる現象であり、そのトポロジカルな性質はこれまでの様々な研究で明らかになってきました。例えば整数量子ホール効果はベリー曲率（波数空間の仮想磁場）の積分値がチャーン数と呼ばれるトポロジカル数になることで生じると理解されています。一方、熱流に垂直方向に起電力が生じるネルンスト効果は理解が進んでおらず、実験・理論双方からのアプローチによる解明が必要な状況でした。酒井氏はホイスラー合金 Co_2MnGa や Fe_3X (X = Ga, Al) 系が室温で巨大異常ネルンスト効果を示すことを発見し、多角的な実験と共同で行った数値計算との比較からトポロジカルな電子構造がその起源として重要であることを明らかにしました。本研究成果は、トポロジカル電子物性の理解を進めただけでなく、革新的熱電変換技術としてセンサーや発電モジュール等で利用され、省エネ・超スマート社会において不可欠な技術へと発展することが期待されます。

2.5 和田 有希 氏（馬場研、現大阪大学大学院工学研究科）

— 第 39 回（2022 年度）井上研究奨励賞 —

元馬場研大学院生和田有希さんが第 39 回井上研究奨励賞を受賞されました。和田氏は在学時から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を続け、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など重要な気象現象を発見しました。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す。現在は気象学にも守備範囲を広げ、物理学の融合研究も進めています。今後の益々の活躍が期待されます。

2.6 赤城 裕 助教（桂研）

— 第 17 回（2023 年）日本物理学会若手奨励賞 —

桂研究室助教の赤城裕氏が「トポロジカルな磁性とその発現機構・創発現象に関する理論的研究」により、第 17 回日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。トポロジカルな磁気構造であるスキルミオン結晶は、2009 年にその直接観察に成功したことを契機に世界中で精力的に研究されています。赤城氏らはその黎明期に、スピン電荷結合系において最小サイズのスキルミオン結晶が安定化する相が存在すること、またこの相ではトポロジカルな Hall 効果が発現することを世界で初めて示しました。さらにこの相の発現機構は、フェルミ面

効果により現れる正の双二次相互作用にあることを見出しました。これは現在ではスキルミオン結晶の安定化機構の一つとして認知されるようになっています。また、従来の古典スピンによる磁気スキルミオンの取り扱いを超えて、S=1 の量子スピン系において、創発的反発的相互作用を伴う新しいスピン液晶スキルミオンが現れることも明らかにしました。これらの先駆的な成果が高く評価され、今回の受賞に至りました。

2.7 秋山 進一郎 特任助教（藤堂研）

— 第 17 回（2023 年）日本物理学会若手奨励賞 —

藤堂研の秋山進一郎特任助教が「テンソル繰り込み群法による格子場理論研究の開拓」により、第 17 回日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。通常、場の量子論の非摂動計算はモンテカルロ法で行われますが、有限密度 QCD などでは符号問題が発生し、通常のシミュレーションの実行が極めて困難になります。そこで、近年、テンソルネットワーク（TN）法を使った格子理論の研究が素粒子分野で進められています。秋山氏は一連の研究において、TN 法の一種であるテンソル繰り込み群（TRG）を用いて、4 次元 NJL 模型の極低温高密度下でのカイラル相転移の解析、Hubbard 模型が示す金属-絶縁体転移の臨界指数の決定、4 次元 Z2 ゲージヒッグス理論の臨界終点の決定に成功し、TRG が非常に有効な計算手法であることを示しました。これらの成果は、TRG による 4 次元系の数値研究において障害となる様々な点を世界に先駆けて解決した注目すべきものであると評価され、受賞に至りました。

2.8 田島 裕之 助教（Liang 研）

— 第 17 回（2023 年）日本物理学会若手奨励賞 —

Liang 研助教の田島裕之氏が、第 17 回日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。研究内容は「強相関多成分フェルミ気体の理論研究」であり、冷却原子気体系を中心に様々な物理学分野に現れる量子多体問題に関する理論研究です。2 成分フェルミ粒子系では強相関多体現象の代表例として BCS-BEC クロスオーバーが幅広く研究されてきましたが、3 成分以上を含むフェルミ粒子系における強相関多体現象は、少数多体系の物理と凝縮系多体物理が絡む理論解析の難しさ故に多くの謎が残されている状況にありました。同氏は、両者を包括するような理論的枠組みを開発することで、強相関 3 成分フェルミ気体において 3 体束縛分子の気体からクーパー対の 3 体版に相当するクーパートリプルへのクロスオーバーが現れることを理論的に示しました。こうした新奇な強相関多体現象に関する一連の研究についてその独創性が高く評価されました。

2.9 野辺 拓也 特任助教（浅井研）

— 第 17 回（2023 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、ニュートラリーノだと考えています。このニュートラリーノが、光子、Z 粒子、ヒッグス粒子のどの成分が多いかはモデルに依存するためわかりません。モデルにあまり依存しない点は、ニュートラリーノが Z ボソンに結合するだろうと言う点です。野辺さんは、Z ボソンを効率よく検出する方法を開発し、これまで LHC で２０４０年頃到達可能であろうと考えられていた感度で、２０２０年に探索を行いました。歴史を２０年早めた男です。Z 粒子が高い運動量で放出されると、独特の構造を作るだろうと言う物理的な直感と、それを選び出

す細かなプログラミング技術が可能にした研究です。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。残念ながらニュートラリーノはまだ見つかっていませんが、これからより質量スペクトラムが縮退した場合を探っていきます。野辺さんは、２０２３年度より特任助教から助教になり、現地ジュネーブでの日本の研究者を束ねて、超対称性ばかりでなく様々な研究を推進しています。毎日新しいアイデアを試す充実した日々を送っています。

2.10 吉川 尚孝 助教（島野研）

— 第 17 回（2023 年）日本物理学会若手奨励賞 —

吉川尚孝氏が第 17 回日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。吉川氏は、物質の熱化や破壊を抑えて強い光電場を印加することのできる高強度中赤外光・テラヘルツ（THz）波パルスを用いて、強い光駆動下で現れる電子応答や電子状態の研究を行なってきました。グラフェンに代表される単原子層物質からの高次高調波発生、電荷密度波物質の非熱的光誘起相転移など、周期外場により動的に駆動された量子物質が示す非平衡現象に関する一連の研究が高く評価されました。今後の益々の活躍が期待されます。

2.11 石橋 未央 氏（中辻研）

— 第 39 回（2022 年度）井上研究奨励賞 —

石橋未央特任研究員が第 39 回 (2022 年度) 井上研究奨励賞を受賞されました。石橋氏は京都大学大学院化学専攻での博士課程在学中に磁性体のスピン波の伝搬現象の研究をスピントロニクスの立場から研究に従事されました。その中でも今回受賞対象となったのは、「人工反強磁性体におけるスピン波の研究 」です。この研究は非常に特異な現象である非相反現象を発見され世界的に注目を集めております。受賞おめでとうございます。

2.12 鈴木 寛大 氏（馬場研、現甲南大学）

— 第 17 回日本物理学会若手奨励賞 —

馬場研元大学院生の鈴木寛大氏が、第 17 回日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。鈴木氏は XMM-Newton や Chandra、Fermi といった様々な波長の宇宙X線衛星データを駆使し、超新星残骸プラズマからの熱的 X 線を超新星爆発からのストップウォッチにする画期的な手法で、超新星残骸衝撃波での宇宙線加速効率の時間発展を世界で初めて定量的に示しました。また鈴木氏は本研究のために開発した Chandra 衛星のバックグラウンド定量評価ツールが NASA 推奨となり、2023 年度打ち上げ予定である XRISM 衛星搭載 CCD の開発に深く貢献するなど、ハードウェアソフトウェア共に大きな貢献をしています。今後の益々の活躍が期待されます。

2.13 仲里 佑利奈 氏（吉田研）

— 令和 4 年度 東京大学総長賞 総長賞 —

仲里佑利奈さんが令和 4 年度東京大学総長賞総長賞を受賞されました。仲里佑利奈さんは早期の宇宙に生まれる星団や銀河に関する研究で顕著な業績をあげました。修士論文では最新の宇宙望遠鏡による観測データと自らの 3 次元流体シミュレーションを直接比較して、生まれたての銀河の急速な進化を示すとともに、輝線を用いた新たな化学診断法を提案しました。宇宙初期の超音速ガス流に関する研究では、宇宙の「風」に駆動されて生成する濃い分子ガス雲の例を初めて示し、さらにカリフォルニア大グループとの共同研究をすすめてガス雲からの星団生成過程やその典型的質量などを明らかにしました。現在は日本-スペインの共同観測プロジェクトで理論研究班を牽引し、稼働中の宇宙望遠鏡のための模擬観測データを作成し、新たな観測提案に貢献しています。

2.14 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 4 年度理学系研究科研究奨励賞・理学部学修奨励賞を受賞されました。

- 理学系研究科研究奨励賞（博士課程） 加藤 勢 氏、川田 拓弥 氏、髙久 諒太 氏、杉山 素直 氏
- 理学系研究科研究奨励賞（修士課程） 仲里 佑利奈 氏、吉田 智治 氏、小川 和馬 氏、直川 史寛 氏
- 理学部学修奨励賞 佐々木 大地 氏、高波 海斗 氏、永島 来悟 氏

皆様の今後の更なるご活躍を期待します。

3　人事異動

[物理学教室に来られた方々]

中村 哲	教授	R4/4/1	採用	東北大学
高三 和晃	助教（辻研）	R4/4/1	採用	ローレンス・バークレー国立研究所
福田 朝	助教（諸井研）	R4/4/1	採用	ローレンス・バークレー国立研究所
Tsai Hanshen	特任助教（未来社会）	R4/4/1	採用	本学物性研究所
板橋 浩介	特任研究員（中村研）	R4/4/1	採用	東北大学
小林 史明	特任研究員（竹内研）	R4/4/1	採用	大分大学
竹内 敦人	特任研究員（日下研）	R4/4/1	採用	日本学術振興会特別研究員
藤原 素子	特任研究員（濱口研）	R4/4/1	採用	日本学術振興会特別研究員
横山 文秋	特任研究員（竹内研）	R4/4/1	採用	ETH Zurich
奥澤 浩未	特任専門職員（常行研）	R4/4/1	採用	本学物性研究所
浅野 いずみ	事務補佐員（物理事務分室）	R4/4/1	採用	
大橋 美波	事務補佐員（未来社会）	R4/4/1	採用	
田熊 友加里	事務補佐員（中辻研）	R4/4/1	採用	本学総合文化研究科
佐藤 貴一	上席係長（物理教務）	R4/4/1	配置換え	本学工学系研究科
齊藤 暁子	係長（物理事務）	R4/4/1	転入	国立科学博物館
Fu Mingxuan	特任研究員（未来社会）	R4/5/1	採用	日本学術振興会特別研究員
Gladen Randall Wayne	特任研究員（浅井研）	R4/5/16	採用	University of Texas
甘利 悠貴	特任研究員（桂研）	R4/6/1	採用	Joint Institute for Nuclear Research
千野 夏子	事務補佐員（JSR 包括連携）	R4/6/1	採用	
横溝 和樹	助教（蘆田研）	R4/8/1	採用	日本学術振興会特別研究員
Kristjansson Hler	特任研究員（村尾研）	R4/8/1	採用	University of Oxford
多田 裕子	特任研究員（JSR 包括連携）	R4/8/1	採用	高エネルギー加速器研究機構
石河 孝洋	特任助教（常行研）	R4/8/16	職名変更	本専攻 JSR 包括連携
永尾 翔	助教（中村研）	R4/9/1	採用	東北大学
山崎 隼汰	助教（村尾研）	R4/9/1	採用	IQOQI Vienna
柚木 茉璃奈	事務補佐員（物理事務分室）	R4/9/1	採用	
冨田 崇弘	技術専門職員	R4/10/1	採用	産業技術総合研究所
日向 理華	特任専門職員（中辻研）	R4/10/1	採用	
Feng Zili	特任研究員（中辻研）	R4/10/16	採用	日本学術振興会特別研究員
Taranto Philip Guy	特任研究員（村尾研）	R4/12/1	採用	TU Wien
萩野 浩一	助教（馬場研）	R5/1/1	採用	関東学院大学
鎌田 翔	特任助教（福嶋研）	R5/1/1	採用	National Centre for Nuclear Research
Su Hang	特任研究員（中辻研）	R5/1/1	採用	浙江大学
大沼 若菜	事務補佐員（未来社会）	R5/1/1	採用	
田中 克大	特任助教（JSR 社会連携講座）	R5/2/1	採用	本学先端科学技術センター
福草 加世子	事務補佐員（物理事務分室）	R5/2/1	採用	
Forsyth Perry William Fox	特任研究員（辻研）	R5/3/16	採用	The Australian National University

[物理学教室から移られた方々]

明石 遼介	助教（常行研）	R4/4/30	退職	量子科学技術研究開発機構
山下 麻依	事務補佐員（JSR 包括連携）	R4/4/30	退職	
浅野 いずみ	事務補佐員（物理事務分室）	R4/6/13	退職	
藤本 純治	特任研究員（小形研）	R4/6/30	退職	埼玉大学
板橋 浩介	特任研究員（中村研）	R4/7/15	退職	高エネルギー加速器研究機構
Andraus Robayo Sergio Andres	特任研究員（JSR 包括連携）	R4/7/31	退職	筑波学院大学
大屋 瑶子	助教（山本研）	R4/9/30	退職	京都大学
藤原 素子	特任研究員（濱口研）	R4/9/30	退職	Technical University of Munich
小林 史明	特任研究員（竹内研）	R4/9/30	退職	九州大学
冨田 崇弘	技術専門職員	R4/10/6	退職	
Le Minh Cristian	特任研究員（常行研）	R4/10/15	退職	Max Planck Institute
唐 楠	特任研究員（中辻研）	R4/10/16	退職	University of Augsburg
小高 裕和	助教（馬場研）	R4/12/31	退職	大阪大学
見波 将	特任助教（JSR 社会連携講座）	R4/12/31	退職	京都大学
清水 幸子	事務補佐員（未来社会）	R5/1/31	退職	
Kristjansson Hler	特任研究員（村尾研）	R5/2/13	退職	Perimeter Institute for Theoretical Physics
Taranto Philip Guy	特任研究員（村尾研）	R5/2/28	退職	日本学術振興会特別研究員
佐山 芳恵	主事員（物理事務分室）	R5/2/28	退職	
五神 真	教授	R5/3/31	定年退職	理化学研究所
山本 智	教授	R5/3/31	定年退職	総合研究大学院大学
宮下 哲	特任教授（JSR 包括連携）	R5/3/31	退職	物質・材料研究機構
森田 悠介	助教（五神研）	R5/3/31	配置換え	本学フォトンサイエンス研究機構
HARTWIG TILMAN	助教（吉田研）	R5/3/31	退職	The German Environment Agency
藤澤 幸太郎	特任助教（須藤研）	R5/3/31	退職	東京工科大学
甘利 悠貴	特任研究員（桂研）	R5/3/31	退職	日本学術振興会特別研究員
竹内 敦人	特任研究員（日下研）	R5/3/31	退職	日本学術振興会特別研究員
多田 裕子	特任研究員（JSR 包括連携）	R5/3/31	退職	理化学研究所
中野 湧天	特任研究員（濱口研）	R5/3/31	退職	日本学術振興会特別研究員
前橋 英明	特任研究員（小形研）	R5/3/31	退職	物質・材料研究機構
横山 文秋	特任研究員（竹内研）	R5/3/31	退職	日本学術振興会特別研究員
上田 美樹	特任専門職員（山本研）	R5/3/31	退職	
長島 礼子	特任専門職員（高木研）	R5/3/31	退職	
大塚 茂巳	技術補佐員（試作室）	R5/3/31	退職	
右田 美奈	一般職員（物理事務）	R5/3/31	配置換え	本学社会連携部

4　役務分担

【役務】	【教員】	【職員】
専攻長・学科長	小形	佐藤、齊藤、右田
幹事	浅井、島野	
専攻主任	吉田	物理教務
専攻副主任	福嶋	物理教務
常置委員	髙木、濱口	物理教務
教務	松尾 (理・学部)、馬場 (大学院・学部)、 上田 (学部・学生)、北川 (学部・学生)	物理教務
学生実験	日下、岡本、竹内	佐伯
卓越大学院	浅井・安東（XPS)、山本（FoPM)、 古澤 (IGPEES)、長谷川・常行 (MERIT)、 藤堂 (Q-STEP)	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	横山 (順)、Liang	物理教務
留学	濱口	物理教務
【駒場生進学】		
進学指導/推薦入試アドバイザー	小林、濱口	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	島野	渡辺、右田
就職	長谷川	仁井田、佐藤
部屋割	林	齊藤
安全衛生	酒井 (広)	
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)	日下（学生実験）	佐伯
	酒井 (広)、岡本（安全衛生・低温）	
	藤堂（IT 関連）	物理ネットワーク担当
図書	横山 (順)(理)、岡田、酒井 (明)	総務課図書チーム
コロキウム	古澤、濱口、林	物理事務
年次報告	辻、樺島	仁井田
記録係		物理事務、物理教務
理交会	安東	齊藤
親睦会	竹内	レクリエーション委員
ホームページ、IT	藤堂、蘆田	物理ネットワーク担当
オープンキャンパス	蘆田	物理事務
JSR 東大 包括連携 CURIE	中辻、小形、常行、宮下 (哲)	
緊急対応教職員	酒井 (広)、松尾	

5　教室談話会

- 2022 年 12 月 16 日（金）10:30-12:00

  Carlos Meriles 氏（ニューヨーク市立大学、米国）

  「Controlling the charge state of color centers at the nanoscale:Challenges and opportunities」

- 2023 年 1 月 31 日（火）17:00-18:30

  Valerie Domcke 氏 (CERN Staff Scientist)

  「GWs as a probe of the early Universe」

- 2023 年 3 月 8 日（水）10:30-12:00

  山本 智 教授（最終講義）

  「宇宙に巡らす化学の夢」

6　物理学教室コロキウム

- 第 127 回コロキウム　2022 年 4 月 22 日 (金) 17:00-18:30

  松村 知岳 氏（東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構 准教授)

  「CMB 偏光観測を用いたインフレーション宇宙の探索 Probing the inflationary Universe with measurement of CMB polarization」

- 第 128 回コロキウム　2022 年 6 月 10 日 (金) 17:00-18:30

  中村 哲 氏（東京大学 大学院理学系研究科 教授）

  「ハイパー原子核精密分光：電荷ゼロハイパー核、荷電対称性の破れ、重い中性子星の謎」

- 第 129 回コロキウム　2022 年 6 月 17 日 (金) 17:00-18:30

  塩澤 真人 氏（東京大学 宇宙線研究所 教授）

  「ハイパーカミオカンデ計画〜ニュートリノ研究の次なる挑戦〜」

- 第 131 回コロキウム　2022 年 11 月 18 日 (金) 17:00-18:30

  杉田 有治 氏（理化学研究所・開拓研究本部/計算科学研究センター/生命機能科学研究センター 主任研究員）

  「細胞内環境の生物物理学」

- 第 132 回コロキウム　2022 年 12 月 16 日 (金) 17:00-18:30

  清水 克哉 氏（大阪大学 教授）

  「水素化物高温超伝導研究の現状ー室温超伝導は達成できたのかー」

- 第 133 回コロキウム　2023 年 1 月 13 日 (金) 17:00-18:30

  中山 和則 氏（東北大学 准教授）

  「暗黒物質の発見に向けて」

7　金曜ランチトーク

- 2022 年 6 月 24 日（金）13:00-13:25
  藤澤 幸太郎（須藤研究室 特任助教）
  “Rotating Stars”
  「回転星」
- 2022 年 7 月 8 日（金）13:00-13:25
  高三 和晃（辻研究室 助教）
  “Nonequilibrium quantum phases of matter”
  「非平衡量子物質相」
- 2022 年 7 月 22 日（金）13:30-13:25
  福田 朝（諸井研究室 助教）
  “Physics of axions”
  「アクシオンの物理」
- 2022 年 10 月 14 日（金）13:00-13:25
  森脇 可奈（吉田研究室 助教）
  “Distant galaxies and their distributions”
  「遠方銀河とその分布」
- 2022 年 10 月 28 日（金）13:00-13:25
  小森 健太郎（安東研究室 助教）
  “Precise measurement by laser interferometer: From observation of gravitational waves to realization of macroscopic quantum states”
  「レーザー干渉計による精密計測: 重力波観測から巨視的量子状態の実現まで」
- 2022 年 11 月 11 日（金）13:00-13:25
  横溝 和樹（蘆田研究室 助教）
  “Non-Bloch band theory of non-Hermitian systems”
  「非エルミート系におけるブロッホバンド理論」
- 2022 年 12 月 9 日（金）13:00-13:25
  石河 孝洋（常行研究室 特任助教）
  “Search for hydride superconductors by evolutionary algorithm”
  「進化的アルゴリズムによる水素化物超伝導の探索」

- 2022 年 12 月 23 日（金）13:00-13:25

  永尾 翔（中村研究室 助教）

  “Research for Charge Symmetry of Hypernuclei via High-resolution Spectroscopy and Future Prospects”

  「ハイパー核精密分光によるアイソスピン対称性の研究と今後」

- 2023 年 2 月 10 日（金）13:00-13:25

  萩野 浩一（馬場研究室 助教）

  “Unveiling the nature of ultra-fast black hole outflows with X-ray observations”

  「X 線観測による超高速ブラックホールアウトフローの研究」

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 12 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 2022 年 10 月 7 日 (金) 18:00–19:00
  開催研究室：浜口研究室、小林研究室、古澤研究室、中村研究室
- 第 2 回 2022 年 10 月 12 日 (水) 18:00–19:00
  開催研究室：横山 (順) 研究室、竹内研究室、藤堂研究室
- 第 3 回 2022 年 10 月 17 日 (月) 18:00–19:00
  開催研究室：常行研究室※、上田研究室、馬場研究室
  （※駒場キャンパスにて、17:00–18:00 に実施）
- 第 4 回 2022 年 10 月 26 日 (水) 18:00–19:00
  開催研究室：吉田研究室、小林研究室、横山 (将) 研究室、辻研究室
- 第 5 回 2022 年 11 月 8 日 (火) 18:00–19:00
  開催研究室：横山 (順) 研究室、安東研究室、古澤研究室、中島研究室
- 第 6 回 2022 年 11 月 14 日 (月) 18:00–19:00
  開催研究室：蘆田研究室、林研究室、馬場研究室
- 第 7 回 2022 年 11 月 30 日 (水) 18:00–19:00
  開催研究室：吉田研究室、中村研究室、竹内研究室
- 第 8 回 2022 年 12 月 9 日 (金) 18:00–19:00
  開催研究室：浜口研究室、日下研究室、樺島研究室
- 第 9 回 2022 年 12 月 12 日 (月) 18:00–19:00
  開催研究室：藤堂研究室、岡田研究室
- 第 10 回 2022 年 12 月 22 日 (木) 18:00–19:00
  開催研究室：常行研究室、林研究室
- 第 11 回 2023 年 1 月 10 日 (火) 18:00–19:00
  開催研究室：蘆田研究室、Liang 研究室
- 第 12 回 2023 年 1 月 18 日 (水) 18:00–19:00
  開催研究室：樺島研究室

年次研究報告　2022年度

2023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　　小 形 正 男
編　集　　樺 島 祥 介
　　蘆 田 祐 人
　　仁 井 田 和 子