

Department of Physics
School of Science
The University of Tokyo

Annual Report

2 0 2 4

令和 6 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

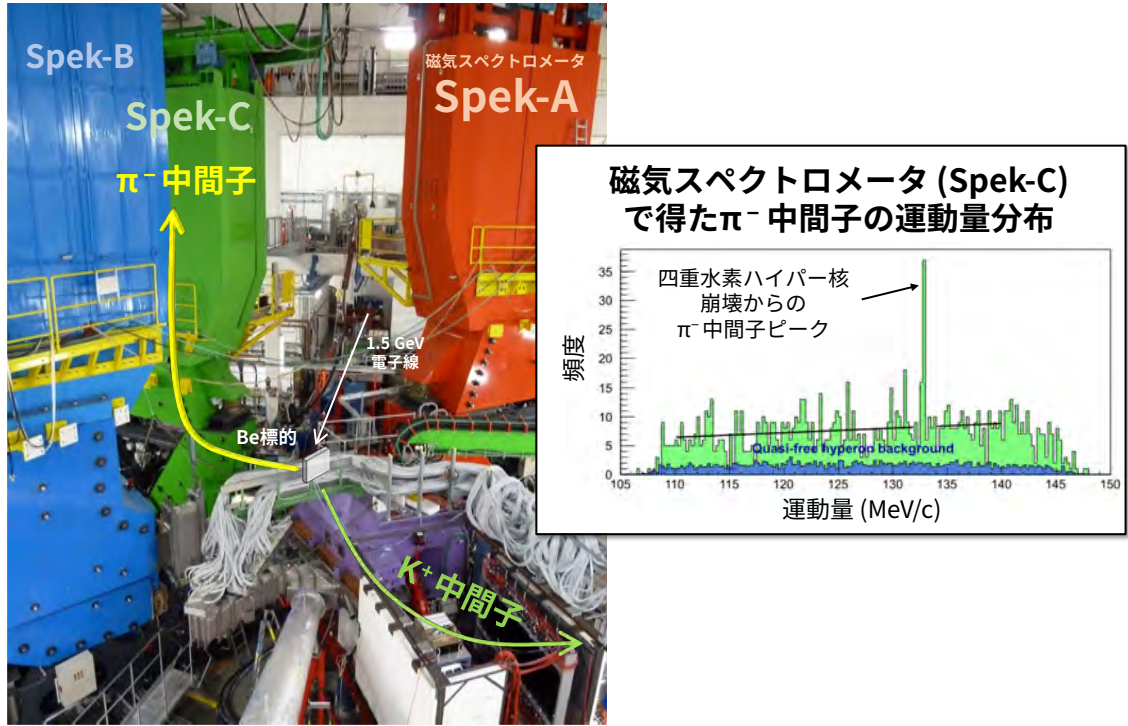


図 1: 写真はドイツ・マインツ大学にある電子加速器施設 MAMI にあるセットアップである。赤、青、緑に彩られた Spek-A, B, C と呼ばれるビルの 4 階ぐらいの高さがある磁気スペクトロメータと手前にある紫色の Kaos スペクトロメータが見える。ベリリウム標的に撃ち込まれた 1.5 GeV の電子によりストレンジクォークと反ストレンジクォークが対生成され、ストレンジクォークを含むラムダハイパー原子核が作られる。この際、反ストレンジクォークは K^+ 中間子となり Kaos スペクトロメータで検出される。生成されたラムダハイパー核が標的内で静止し、二体崩壊することによって放出される π^- 中間子を Spek-A, C で精密測定することにより親であるラムダハイパー核の質量を求めることができる。右図に示す π^- 中間子の運動量分布に見える鋭いピークは ${}^4_\Lambda\text{H}$ (四重水素ラムダハイパー核) に対応し、世界最高分解能、精度の測定に成功した。さらに標的を工夫することにより未だに質量と寿命が同時に理解されていない ${}^3_\Lambda\text{H}$ (三重水素ラムダハイパー核) の測定にも成功しており、最終的な解析を進めている。(中村研究室)

This photo shows the experimental setup at the electron accelerator facility MAMI at Johannes Gutenberg University Mainz in Germany. Visible in the image are the large magnetic spectrometers Spek-A, B, and C —each approximately four stories tall and colored red, blue, and green— and the purple-colored Kaos spectrometer in the foreground. When 1.5 GeV electrons are incident on a beryllium target, strange – antistrange quark pairs are produced. A Λ hypernucleus containing a strange quark is formed, while the accompanying antistrange quark becomes a K^+ meson, which is detected by the Kaos spectrometer. The produced Λ hypernucleus comes to rest in the target and undergoes a two-body decay. By precisely measuring the emitted π^- mesons with the Spek-A and Spek-C spectrometers, the mass of the parent Λ hypernucleus can be determined. The sharp peak observed in the π^- momentum distribution, shown in the figure on the right, corresponds to ${}^4_\Lambda\text{H}$ (hyperhydrogen-4), marking a successful measurement with the world's highest resolution and precision. By optimizing the target design, the experiment also succeeded in measuring ${}^3_\Lambda\text{H}$ (hypertriton), whose mass and lifetime have not yet been simultaneously understood. Final analysis of the data is currently in progress. (Nakamura Group)

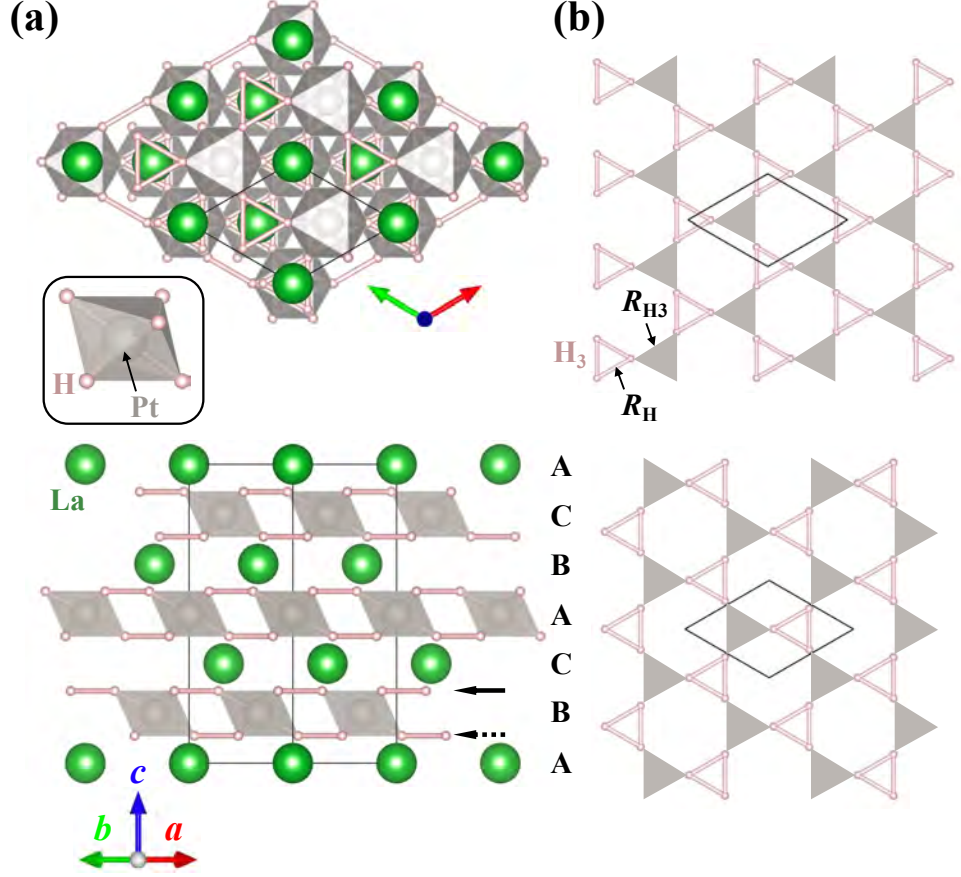


図 2: (a) 進化的アルゴリズム、ニューラルネットワークポテンシャル計算、密度汎関数を用いた第一原理計算の連携によって得られた 20 GPa における新規水素化物超伝導体 LaPtH₆ の結晶構造。Allen-Dynes の式を使って計算した超伝導転移温度は 18.7 K となる。八面体 PtH₆ 層と La 層が c 軸方向に ABCABC で積層した構造となっている。(b) c 軸から見た H 層の様子。上図と下図はそれぞれ (a) の実線矢印と点線矢印に対応する。H₃ ユニットが平面内に配列し、H 原子の 2 次元カゴメ格子が形成されている。(常行研究室)

(a) Crystal structure of the novel hydride superconductor LaPtH₆ at 20 GPa, predicted through a combination of evolutionary algorithms, neural network potential calculations, and first-principles calculations based on density functional theory. The superconducting critical temperature, calculated using the Allen-Dynes formula, is 18.7 K. The structure consists of alternating layers of octahedral PtH₆ units and La atoms, stacked along the c -axis in an ABCABC sequence. (b) Top view of the hydrogen layers along the c -axis, corresponding to the solid and dashed arrows in (a). H₃ units are arranged within the plane, forming two-dimensional Kagome lattices of hydrogen atoms. (Tsuneyuki Group)

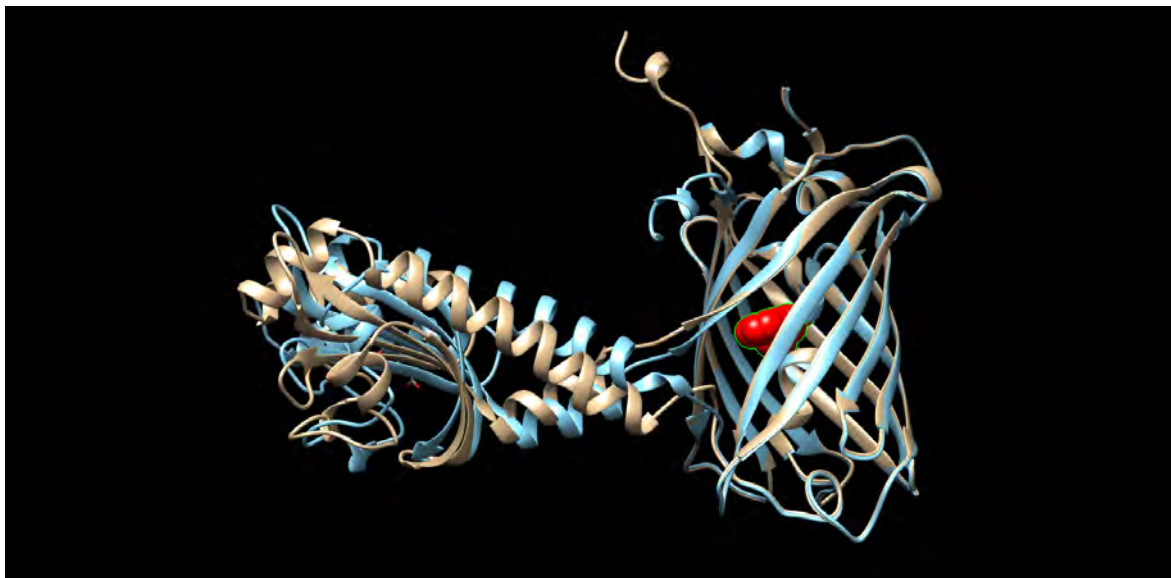


図 3: 蛍光寿命バイオセンサーの設計。蛍光タンパク質は樽型の構造をしており (右側)、中に蛍光色素団 (赤色) を埋め込むことで周囲の水分子との衝突や振動によるエネルギー緩和を防ぎ、明るく蛍光を発することができる。樽の胴板に相当する β シートの一つを、蛍光色素団に直接接している場所で切断し、センサータンパク質 (左側) を挿入した。センサータンパク質は、標的分子と結合することで構造が変化する (水色→薄い金色)。これにより、蛍光色素団周囲の環境が変化し、蛍光寿命が変化する。AlphaFold2 による推定構造。C. Zhong *et al.*, Cell Rep Meth 4, 100902 (2024) (岡田研究室)

Design of fluorescence lifetime biosensor. The fluorescent protein has a barrel-shaped structure (right) with an embedded fluorophore (red) that emits bright fluorescence by preventing both collisional and vibrational energy relaxation. A β -sheet stave directly contacting the fluorophore was cleaved to insert a sensor protein (left). When this sensor binds its target, its conformation changes (cyan to pale gold), altering the fluorophore's environment and its fluorescence lifetime. Structure predicted by AlphaFold2. C. Zhong *et al.*, Cell Rep Meth 4, 100902 (2024) (Okada Group)

序

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・理学部物理学の令和6年度(2024年4月-2025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、有田亮太郎氏(物性理論: 本学先端科学技術研究センター)、山崎雅人氏(素粒子物理学理論: 本学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構)、准教授として、相川清隆氏(量子光学・原子分子物理学: 東京工業大学)、鈴木大介氏(原子核物理学実験: 理化学研究所)、助教として、光山隼史氏(川口研: Max-Planck-Institute of Biochemistry)、川崎拓也氏(相川研: 東京工業大学)、高倉理氏(日下研: 高エネルギー加速器研究機構)、渡邊光氏(有田研: 本学先端科学技術研究センター)、荻田裕也氏(竹内研: Max Planck Institute for Evolutionary Biology)が着任されました。また、高木英典教授が物質・材料研究機構 ICYS センター長(フェロー)、西口大貴助教(竹内研)が東京科学大学准教授、赤城裕助教(桂研)がお茶の水女子大学講師、石田明助教が産業技術総合研究所主任研究員、松浦弘泰助教(小形研)が産業技術総合研究所主任研究員、山崎隼太助教(村尾研)が本学情報理工学系研究科准教授として転出されました。また、木内健司助教(日下研)が退職されました。また、酒井広文教授、小形正男教授、三尾典克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。吉田直紀教授がフィリップ・フランツ・フォン・シーボルト賞を、常行真司教授が第21回本多フロンティア賞を、高木英典教授が米国物理学会(APS) James C. McGroddy Prize for New Materials を、山崎雅人教授が、国際基礎科学会議 Frontiers of Science Award (Mathematics) を、小形正男教授が日本物理学会第30回論文賞を、酒井明人講師、永田夏海助教(濱口研)が第2回 AAPPS-JPS Award を、肥後友也特任准教授が第3回 AAPPS-JPS Award を、森脇可奈助教(吉田研)が第3回羽ばたく女性研究者賞(マリア・スクウォッドフスカ=キュリー賞) 最優秀賞を、大森寛太郎助教(松尾研)が国際基礎科学会議 Frontiers of Science Award (Physics) を、横溝和樹助教(蘆田研)、野下剛氏(松尾研)が第19回日本物理学会若手奨励賞を、山田恭平氏(日下研、現プリンストン大)が第26回高エネルギー物理学奨励賞を、小林研究室の皆様が令和6年度「秀でた利用成果」優秀賞(文部科学省 ARIM)を受賞されました。

また、KRISTIANO Jason 氏、塚本萌太氏、吉村耕平氏、永瀬慎太郎氏、水野るり恵氏が令和6年度理学系研究科研究奨励賞(博士課程)を、中根美七海氏、柳澤登広氏、小川宏太朗氏、吉岡大地氏が同研究奨励賞(修士課程)を、金澤貴弘氏、辻圭汰氏、岡田樹氏が令和6年度理学部学修奨励賞を受賞しました。

ここ2~3年で、定年を迎えられる教員が多く、教室の陣容が急速に変化してきました。昨年度から数えて今年度の終わりまで考えると退職・移動される教授は9名におよび、それと入れ替わる形で多くの新たな先生方が来られております。実に教室全体の約1/4が入れ替わる形になりました。今後新しい変化が様々な形で表れてくると思われます。

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。JSR 社との社会連携は令和7年からさらに3年延長されることが決まりました。これまでの活発な活動が高く評価された形になりました。

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。令和6年度よりは東大基金にも参加し、得られた資金をもとに先輩の先生方、卒業生の皆様、ならびに関係各位との交流をさらに深めていきたいと考えております。皆様には、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、中島康博准教授、酒井明人講師、中村ちか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。

2025年5月1日
物理学専攻 専攻長・物理学学科 学科長
松尾 泰

目次

I	研究室別 2024 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 (福島) 研究室	2
1.2	原子核理論 (Liang) 研究室	6
1.2.1	Quantum many-body physics in nuclear systems	6
1.2.2	Quantum many-body physics in other systems	8
1.3	素粒子論研究室	11
1.3.1	現象論	11
1.3.2	弦理論, 場の理論全般	13
2	原子核・素粒子実験	18
2.1	原子核実験グループ (中村研究室)	18
2.1.1	JLab における Λ ハイパー核電磁生成分光実験	18
2.1.2	MAMI における崩壊 π^- 中間子分光	19
2.1.3	RARiS におけるハイパー核研究	20
2.1.4	J-PARC におけるハイパー核研究	21
2.1.5	国際量子物理ネットワーク	21
2.2	原子核実験グループ (鈴木研究室)	23
2.2.1	エキゾチック原子核	23
2.2.2	核物質	25
2.2.3	天体核	26
2.2.4	RI ビームファクトリー高度化計画	26
2.3	横山将志・中島研究室	28
2.3.1	ニュートリノ振動の研究	28
2.3.2	超新星背景ニュートリノの探索	29
2.3.3	陽子崩壊の探索	30
2.3.4	ハイパーカミオカンデの建設	31
2.3.5	Belle II/SuperKEKB	32
2.3.6	検出器開発	32
3	物性理論	35
3.1	小形研究室	35
3.1.1	熱応答・熱電応答の理論	35
3.1.2	強相関電子系の理論	35
3.1.3	交替磁性体	36
3.1.4	スピン軌道相互作用	36
3.1.5	軌道磁場効果	37
3.1.6	有機伝導体の理論	37
3.1.7	カイラリティの物理	38
3.2	常行研究室	41
3.2.1	データ同化結晶構造探索	41

3.2.2	進化的アルゴリズムとニューラルネットワークポテンシャルによる構造探索	41
3.2.3	液体や高分子材料の THz 帯複素誘電率の計算手法開発	42
3.2.4	相関波動関数理論トランスコレイティッド法の開発	42
3.2.5	水素化物ペロブスカイトの超伝導	42
3.2.6	非熱的レーザー加工の微視的シミュレーション	42
3.2.7	高圧下での水の弾性と水素の量子効果	43
3.2.8	局在関数を基底とした振幅符号化	43
3.3	藤堂研究室	44
3.3.1	強相関係のシミュレーション手法	45
3.3.2	強相関多体系における新奇な状態・相転移現象	45
3.3.3	量子計算と量子アルゴリズム	46
3.3.4	機械学習と統計物理	47
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・ライブラリ	48
3.4	桂研究室	51
3.4.1	強相関係	51
3.4.2	トポロジカル磁性	52
3.4.3	散逸のある量子多体系	52
3.4.4	数理物理学・統計力学	53
3.4.5	その他	54
3.5	樺島研究室	57
3.5.1	回転対称性なランダム相互作用下にあるスピングラスモデルにおける量子効果	57
3.5.2	主成分分析における SGD ダイナミクスの解析	57
3.5.3	反復しきい値アルゴリズムのダイナミクス	57
3.5.4	格子タンパク質における 2 次構造と環境変動に対する頑健性の相関	58
3.5.5	3 体 Hopfield 模型の想起ダイナミクスの解析	58
3.5.6	移動エントロピーを用いた細胞内情報伝達経路の分析	58
3.5.7	アンダーバギング法の分類性能の解析	58
3.5.8	アンサンブル学習に基づく変数選択手法の性能解析	59
3.5.9	線形モデルでの自己蒸留の解析	59
3.5.10	情報量規準の統計力学的導出	59
3.6	辻研究室	61
3.6.1	超伝導体のダイナミクス	61
3.6.2	量子開放系のダイナミクス	62
3.6.3	量子多体傷跡状態	63
3.6.4	量子多体系の動的応答	63
3.6.5	テンソルトレイン法による量子多体系の解法	64
3.6.6	多体励起子と磁気秩序	64
3.7	蘆田研究室	67
3.7.1	開放系・非エルミート物理	67
3.7.2	強結合量子光-物質系の物理	68
3.7.3	統計物理・機械学習	68
3.7.4	冷却原子	69
3.7.5	その他	69
3.8	有田研究室	71
3.8.1	複雑なナノスピン構造に対する第一原理手法の開発	71
3.8.2	磁気構造予測と第三の磁性体 altermagnet の発見	71
3.8.3	有限温度の構造最適化法の開発と応用	72
3.8.4	超伝導体の第一原理計算	72
3.8.5	第一原理計算による有効スピンモデルの導出	72
3.8.6	隠れた交替スピン分裂をもつマルチフェロイック磁性体の提案	73

3.8.7	トポロジカルスピン構造の集団励起が電流応答に対して与える効果	73
3.8.8	スピンレス Dirac 半金属の物質提案	73
4	物性実験	78
4.1	長谷川研究室	78
4.1.1	表面/界面での輸送・磁性特性	78
4.1.2	新しい装置・手法の開発	80
4.2	岡本 研究室	83
4.2.1	劈開表面に形成された2次元電子系	83
4.2.2	金属超薄膜の超伝導	84
4.2.3	半導体劈開表面上に形成された低次元電子系における非相反伝導	85
4.3	島野研究室	86
4.3.1	超伝導体	86
4.3.2	ディラック、ワイル半金属	88
4.3.3	時間分解磁気光学顕微鏡の開発	88
4.4	林研究室	91
4.4.1	スピン流物性とカイラル磁性	91
4.4.2	強結合状態の探索	92
4.5	小林研究室	94
4.5.1	量子計測	94
4.5.2	量子センサの性質と量子制御	94
4.5.3	量子センサの物性計測応用	95
4.6	中辻・酒井研究室	100
4.6.1	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	100
4.6.2	多体系における量子エンタングルメント状態	101
5	一般物理理論	105
5.1	宇宙理論研究室 (吉田)	105
5.1.1	観測的宇宙論	105
5.1.2	量子計算	106
5.1.3	原始惑星系円盤	106
5.1.4	超新星	106
5.2	村尾研究室	110
5.2.1	量子機械学習・量子アルゴリズム	110
5.2.2	高階量子計算・量子学習	111
5.2.3	量子エラー訂正と量子エラー抑制	112
5.2.4	分散型量子情報処理	112
5.2.5	量子リソース理論	112
5.3	上田研究室	116
5.3.1	冷却原子気体・非平衡開放系	116
5.3.2	量子論・統計力学と情報理論・人工知能の融合	117
5.4	横山順一研究室	120
5.4.1	初期宇宙論と重力理論	120
5.4.2	観測的宇宙論	121
5.4.3	重力波検出器 KAGRA データ解析	121
6	一般物理実験	124
6.1	江尻・辻井研究室	124
6.1.1	TST-2 実験の概要	124
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	124
6.1.3	誘導駆動プラズマ	125

6.1.4	ダブルバストムソン散乱による異方的電子温度計測	125
6.1.5	計測器開発	126
6.1.6	共同研究	127
6.1.7	FAST プロジェクトの立ち上げ	127
6.2	酒井広文 研究室	129
6.2.1	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	129
6.2.2	レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展：今年度の成果	131
6.2.3	全光学的手法による鏡像異性体の選択的配向制御技術の提案	131
6.2.4	その他	132
6.3	相川研究室	133
6.3.1	最近の研究成果	133
6.3.2	現在進めている研究課題	133
6.4	安東研究室	134
6.4.1	大型重力波望遠鏡 KAGRA	134
6.4.2	宇宙空間重力波望遠鏡	135
6.4.3	ねじれ型重力波検出器 TOBA	135
6.4.4	アクシオンダークマター探索実験 DANCE	136
6.4.5	基礎物理・量子光学実験	137
6.4.6	量子スクイーミングによるハイゼンベルグ限界への到達実験	137
6.4.7	Balanced Homodyne Detection による重力波検出の実証	137
6.5	馬場研究室	140
6.5.1	宇宙物理現象観測に関する研究	140
6.5.2	将来計画に向けた検出器開発	141
6.5.3	GRAMS 計画	141
6.5.4	XRPIX 検出器の開発	141
6.6	日下研究室	145
6.6.1	POLARBEAR 実験	146
6.6.2	Simons Array 実験	146
6.6.3	Simons Observatory 実験	146
6.6.4	次世代 CMB 実験用 装置開発	147
6.6.5	量子センシング技術を用いた軽量暗黒物質アクシオンおよび GHz 重力波探索	147
6.7	竹内研究室	149
6.7.1	ソフトマター系の非平衡実験	149
6.7.2	生物系の非平衡実験	150
6.7.3	理論的アプローチ	152
6.8	三尾研究室	155
6.8.1	レーザー加工の物理	155
6.8.2	KAGRA project	155
6.9	小西研究室	156
6.9.1	人工ナノ構造の光物理学の探求と光制御への応用	156
6.9.2	レーザーによるマイクロ三次元構造の創成と電磁波制御への応用	158
6.9.3	レーザー加工の原理解明 ～なぜレーザーでもものが壊れるのか～	159
7	生物物理	163
7.1	能瀬研究室	163
7.1.1	神経活動ダイナミクスおよび行動出力の数理統計解析	163
7.1.2	行動制御回路を構成する神経細胞の同定と機能解析	164
7.1.3	機能的神経回路の発生と進化	165
7.2	岡田研究室	169
7.2.1	蛍光タンパク質バイオセンサーの開発	169

7.2.2	超耐光性蛍光プローブ開発と超解像蛍光顕微鏡への応用	170
7.2.3	高速高分解能定量位相差顕微鏡	170
7.2.4	一分子追跡からの分子形状の推定	171
7.3	古澤研究室	172
7.3.1	触媒反応系の可安定性と可制御性に関する一般則の解明	173
7.3.2	突然変異率と薬剤耐性進化速度の関係の定量的解析	173
7.3.3	Feast-Famine サイクル環境下における多様な栄養利用戦略の出現	173
7.3.4	融合遺伝子による酵素構造の収斂進化とその再現性に関する研究	174
7.3.5	遺伝子発現調節領域における変異に対する頑強性の進化的起源	174
7.3.6	発現量が進化しやすい遺伝子の転写制御ネットワーク解析	174
7.4	川口研究室	178
7.4.1	生物物理学・形態進化	178
7.4.2	物理学に着想を得た AI・機械学習	179
7.4.3	非平衡物理と統計物理学	179
8	技術部門	181
8.1	実験装置試作室	181
8.1.1	利用状況	181
8.1.2	設計・加工の自動化の推進	181
8.2	技術室	181
8.2.1	専攻 Web システムの改修 (寺山、簗口)	181
8.2.2	安全衛生 (寺山)	181
8.2.3	寒剤管理 (寺山)	181
8.2.4	IT 関連 (簗口)	181
8.2.5	学生実験 (佐伯)	182
8.2.6	技術交流 (佐伯、寺山、渡辺 (生物科学専攻))	182
8.2.7	各種委員会	182
II	Summary of group activities in 2024	183
1	Fukushima Group	184
2	Liang Group	184
3	High Energy Physics Theory Group	185
4	Nakamura Group	187
5	Suzuki Group	188
6	Yokoyama(M)-Nakajima Group	189
7	Ogata Group	190
8	Tsuneyuki Group	191
9	Todo Group	191
10	Katsura Group	193
11	Kabashima Group	194
12	Tsuji Group	195
13	Ashida Group	196
14	Arita Group	196
15	Hasegawa Group	197
16	Okamoto Group	198
17	Shimano Group	198
18	Hayashi Group	199
19	Kobayashi Group	200
20	Nakatsuji-Sakai Group	201
21	Theoretical Astrophysics Group	203

22	Murao Group	204
23	Ueda Group	205
24	J. Yokoyama Group	206
25	Ejiri-Tsujii Group	207
26	Sakai (Hirofumi) Group	207
27	Aikawa Group	208
28	Ando Group	209
29	Bamba Group	210
30	Kusaka Group	211
31	Takeuchi Group	211
32	Mio Group	212
33	Konishi Group	213
34	Nose Group	214
35	Okada Group	215
36	Furusawa Group	216
37	Kawaguchi Group	217

III 2024 年度 物理学教室全般に関する報告 219

1	学部講義概要	220
1.1	2 年生 A セメスター	220
1.1.1	電磁気学 I: 横山 将志	220
1.1.2	解析力学: 常行 真司	220
1.1.3	量子力学 I: 日下 暁人	221
1.1.4	物理実験学: 北川 健太郎, 中島 康博	221
1.1.5	物理学演習 II (解析力学、量子力学 I): 常行 真司、日下 暁人、田島 裕之、森脇 可奈	222
1.1.6	物理数学 I: 濱口 幸一	222
1.1.7	物理数学 II: 松尾 泰	223
1.1.8	物理学演習 I (電磁気学 I, 物理数学 I, II): 横山将志, 濱口幸一, 松尾泰, 永田夏海, 横溝和樹	223
1.1.9	物理学のための科学英語基礎: 小野 義正	224
1.2	3 年生 S セメスター	225
1.2.1	電磁気学 II: 中辻 知	225
1.2.2	物理学実験 I: 全実験担当教員	225
1.2.3	量子力学 II: 村尾 美緒	225
1.2.4	物理学演習 III (量子力学 II、電磁気学 II): 赤城 裕、高三 和晃	225
1.2.5	現代実験物理学 I: 岡田 康志, 林 将光	226
1.2.6	計算機実験 I: 藤堂 眞治、山崎 隼汰、石河 孝洋	226
1.2.7	量子コンピューター実習: 寺師 弘二	227
1.2.8	統計力学 I: 小林 研介	227
1.2.9	流体力学: 江尻 晶, 馬場 彩	228
1.2.10	物理学演習 IV (統計力学 I、II): 小林 研介、竹内 一将、中川 大也、松浦 弘泰	229
1.3	3 年生 A セメスター	229
1.3.1	物理学実験 II: 全実験担当教員	229
1.3.2	光学: 三尾 典克, 小西 邦昭	229
1.3.3	量子力学 III: 辻 直人	229
1.3.4	現代実験物理学 II: 安東 正樹, 中島 康博	230
1.3.5	物理学演習 V: 辻 直人, 安東 正樹, 竹内 一将, 山本 新, 福田 朝	230
1.3.6	生物物理学: 能瀬 聡直, 川口 喬吾	231
1.3.7	物理数学 III: 小形 正男	231

1.3.8	固体物理学 I : 林 将光	232
1.3.9	電磁気学 III : 安東 正樹	232
1.3.10	統計力学 II : 竹内 一将	232
1.3.11	計算機実験 II : 藤堂 眞治、山崎 隼汰、石河 孝洋	233
1.4	4 年生 S セメスター	233
1.4.1	機械学習概論 : 樺島 祥介	233
1.4.2	場の量子論 I : 福島 健二	233
1.4.3	サブアトム物理学 : 中村 哲	234
1.4.4	計算科学概論 : 6 名によるオムニバス講義・実習	234
1.4.5	統計力学特論 : 川島 直輝	235
1.4.6	現代物理学入門 : 中島 康博, 川口 喬吾	235
1.4.7	一般相対論 : 仏坂 健太	235
1.4.8	量子光学 : 上田 正仁	235
1.4.9	固体物理学 II : 長谷川 修司	236
1.4.10	プラズマ物理学 : 江尻 晶	236
1.4.11	宇宙物理学 : 馬場 彩	237
1.4.12	生物物理学特論 II : 岡田 康志, 新井 宗仁, 古澤 力	237
1.4.13	化学物理学 : 高木 英典	237
1.5	4 年生 A セメスター	238
1.5.1	素粒子物理学 : 田中 純一, 澤田 龍	238
1.5.2	場の量子論 II : 渡利 泰山	238
1.5.3	原子核物理学 : Haozhao Liang	238
1.5.4	現代物理と機械学習 : 蘆田 祐人	239
1.5.5	電子回路論 : 北川 健太郎	239
1.5.6	固体物理学 III : 酒井 明人	239
1.5.7	非平衡科学 : 伊藤 創祐	240
1.5.8	普遍性生物学 : 古澤 力	240
1.5.9	重力波物理学 : Kipp Cannon, 都丸 隆行	240
1.5.10	物理学のための科学英語特論 : 松村 知岳	241
2	各賞受賞者紹介	242
2.1	吉田直紀 教授	242
2.2	常行真司 教授	242
2.3	高木英典 教授 (現物質・材料研究機構)	242
2.4	山崎雅人 教授	243
2.5	小形正男 教授	243
2.6	肥後友也 特任准教授 (現慶應大学)	243
2.7	酒井明人 講師	243
2.8	森脇可奈 助教 (吉田研)	243
2.9	永田夏海 助教 (濱口研)	244
2.10	大森寛太郎 助教 (松尾研)	244
2.11	横溝和樹 助教 (蘆田研)	244
2.12	野下剛氏 (松尾研)	244
2.13	山田恭平氏 (日下研、現プリンストン大)	245
2.14	小林研究室一同	245
2.15	理学系研究科研究奨励賞・理学部学修奨励賞	245
3	人事異動	246
4	役務分担	248

5	教室談話会	249
6	物理学教室コロキウム	251
7	金曜ランチトーク	252

I

研究室別 2024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 (福嶋) 研究室では、福嶋健二教授、山本新助教、鎌田翔特任助教、大学院生らによって世界的なフロンティアを開拓する最先端研究を精力的に行った。福嶋は中性子星の性質を明らかにするための理論研究や強磁場、回転などの極限環境下での高密度原子核クォーク物質の解明に向けた研究を継続的に行うとともに、機械学習と物理学との融合を目指した研究にも力を注いでいる。山本は第一原理計算に基づく数値シミュレーションや量子計算、そのために必要な定式化の整備に関する研究を展開している。鎌田は機械学習を積極的に取り入れた原子核理論研究を行うだけでなく、厳密な WKB 解析手法の開発等、数理物理的な研究にも取り組んでいる。

原子核理論はエネルギーの低い方から高い方へと、原子核構造/反応、ハドロン構造/反応、クォーク・グルーオン量子多体系と3つの研究分野に大別できる。我々は量子色力学 (QCD) に根ざしたクォークとグルーオンの理論を研究している。QCD は一見すると極めて単純なラグランジアンで記述される単純な理論であるが、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。この研究グループでは高温・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、相対論的に高速回転するクォーク・グルーオン物質のカラー閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れなど、現象論からアカデミックな問題まで幅広く様々な難問に挑戦している。とりわけ、原子核という世界観に徒に囚われすぎることなく、より俯瞰して「場の量子論」の現代的な課題に果敢に取り組んでいるのが特色である。

QCD の有効模型としての Z_3 ゲージ理論

QCD のように連続ゲージ対称性を持つ理論を量子コンピュータで計算するためには、膨大な数の量子ビットが必要である。このため、現在の量子計算研究では離散ゲージ対称性を持つ理論を用いることが多い。山本らは、QCD に似た性質を持つ離散ゲージ理論を考案し、量子計算のための有効模型として提案した [4]。また、この有効模型で高密度バリオン物質を解析するための量子回路を設計した [13]。

Z_2 ゲージ理論の量子計算

現在の量子コンピュータは様々なデバイスエラーの影響を受ける。量子ビットに対してゲート操作を繰り返すとエラーが累積していき、正しい結果から大きく離れていく。山本らは、なるべく少ないゲート操作で再現可能な物理現象を考えることで、現在の量子コンピュータの実用可能性を模索した [10]。 Z_2 ゲージ理論の平衡化現象に着目し、156 量子ビットを搭載する IBM の量子コンピュータ上でシミュレーションを実行した。研究の結果、ゲート操作の回数が十分に少なければ、エラー補正をすることで平衡化の過程を再現できることが示された。

PT 対称・エルミート量子力学の Borel 再和法による対応関係の構築

鎌田は Borel 再和理論を用いることで、ある特定のポテンシャルによって定義される PT 対称性量子力学、エルミート量子力学 (あるいはその結合定数が解析接続された負ポテンシャル) のエネルギースペクトラムや分配関数を関係付ける研究を行なった。

非局所演算子によるヒッグス・閉じ込め相転移の数値解析

ヒッグス場と結合したゲージ理論ではヒッグス相と閉じ込め相が同じ対称性を持ち、局所的な秩序変数では両者を区別できない。しかし、理論がトポロジカル秩序を持てば、非局所的な秩序変数によって二相を区別できるとされる。山本、嶋田は電荷 2 のアーベルゲージ・ヒッグス模型を用いて、非局所演算子の格子上的実装可能性と秩序変数としてヒッグス・閉じ込め相転移を検出できるかを検証した。非局所演算子には閉じ込めの秩序変数としてよく知られるポリヤコフループおよびトホフトループ、そして近年注目を集めるトポロジカル渦まわりのアハラノフ・ボーム位相を選び、これらの格子計算が期待される結果を再現することを示した [15]。

虚数回転系におけるカイラル対称性の自発的破れと非等質性

嶋田・福嶋らは回転するクォーク・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、およびカイラル対称性の自発的破れを起こすことを発見した。さらに、虚数の角速度で回転する物質の回転中心からの距離による性質の違いに着目し、中心に近い位置では閉じ込め相が、中心から離れた位置では非閉じ込め相が現れるという空間的な相転移を発見し、高温の純グルーオン物質およびクォーク・グルーオン物質について虚数角速度と回転中心から

の距離を軸とする相図を提唱した。また回転中心から離れた位置に特異的な非閉じ込め相が出現することを発見した [9]。

相対論的重イオン衝突における HBT 干渉測定による非一様相の探索

QCD 相図研究では高密度領域で、カイラル凝縮が空間変調を示すような非一様相の存在が予言されている。このような非一様相は球対称な系では揺らぎによって壊れてしまうことが知られているが、非中心衝突では球対称性が破れるうえに、強磁場も発生するため、磁場方向に擬一次元的な非一様構造が実現するものと期待できる。こうしたエキゾチックな相を原子核実験で検証するためのシグナルとして、福嶋らは原子核実験研究者と共同で、HBT 干渉を用いることを提唱した [3]。HBT 干渉は原子核衝突で熱化された系のサイズを推定するために利用されているのだが、クラスター的な内部構造があればその特徴的な波数に対応するピークを示すはずである。実際、理論シミュレーターである AMPT を用いた評価によって、実験的に同定可能なピークが見えることを理論予言した。

QCD 汎関数繰り込み群による原子核物質の性質の半定性的研究

福嶋らは汎関数繰り込み群を QCD に応用した計算によって、密度と結合するベクトル型の相互作用の運動量依存性を調べ、その詳細な形から密度相関関数の距離依存性を定量化した [8]。これによって核子の平均的な距離を QCD 第一原理計算を基に推定することが可能となり、原子核物質の性質を議論した。

中性子星の質量・半径分布から状態方程式を構築する新しい手法開発

鎌田・福嶋らは、中性子星の質量・半径分布から高密度物質の状態方程式を推定するために、機械学習とモンテカルロ積分を組み合わせる新しい手法を提唱した [7]。それぞれの中性子星の尤もらしい質量・半径の分布は、必ずしも Gauss 分布的に広がっているわけではなく、近年の NICER からのデータのように、しばしば観測技法に特徴的な歪んだ分布を示す。従来の機械学習の推定法では、質量・半径分布に対して周辺化を行って Gauss 分布的な近似により簡略化していたが、元の分布に従ってモンテカルロサンプリングを実行することによって、質量・半径の分布から直接、状態方程式の不定性を引き出すことに成功した。これまで取り入れることが難しかった NICER や Shapiro 時間遅延のデータを含めて解析することによって、より信頼性の高い状態方程式を導いた。

拡散模型による生成過程の経路積分による再定式化と WKB 近似

機械学習における生成過程では、拡散模型が大きな成功を収めている。福嶋らは拡散模型を経路積分表示し、ログ尤度関数を WKB 近似で求める方法を提唱した [5]。拡散模型は通常はノイズを入れた Langevin 方程式で定式化されるが、学習済のスコア関数を使うと、ノイズの強さを変更しても、解の確率分布は全く同じ Fokker-Planck 方程式を満たすことを示すことができる。このノイズの強さを調整するパラメータはちょうど物理学における Planck 定数に対応しており、ノイズをゼロにする操作が古典極限に対応する。この対応関係を利用すると、Planck 定数に対応するパラメータを小さく取って半古典近似である WKB 展開を実行することができる。一般に尤度関数を直接数値計算することは難しいが、WKB 展開でパラメータの 1 次の補正を数値的に求めるアルゴリズムが機能することを具体的なデータにより実証した。

クォーク物質へのクロスオーバー状態方程式を用いた重力波解析

福嶋らは、核物質からクォーク物質へと 1 次相転移することなく連続的にクロスオーバー転移するシナリオに基づいて状態方程式を構築し、重力波の解析を行った [14]。特に連星系の全質量を系統的に変化させたときに、中性子星合体後の重力波の波形にどのような変化が見られるのか、詳しく調べた。全質量が軽い場合にはクロスオーバーあるいは相転移があったとしてもブラックホールに潰れることはない。一方で、全質量が重い場合には相転移シナリオに関係なく直ちにブラックホールに潰れてしまう。相転移に敏感な全質量のウィンドウがあるべきことは容易に想像されるわけだが、それが GW170817 の全質量 $2.75 M_{\odot}$ の周りの狭い幅 ($\sim \pm 0.2 M_{\odot}$) で急速な変化があることを見出した。

強磁場中の回転物質の偏極の反転

相対論的なエネルギー分散関係を持つ Weyl 半金属のような物質に、強磁場を印加したうえでさらに回転させることを考えてみる。磁場はスピンを揃えて偏極が起こり、スピンのマイクロな回転と、外から与えた回転とが、同じ方向を向いている方がエネルギーが低くなる。正電荷を帯びた粒子が同じ方向を向いているならば、負電荷を帯びた粒子はスピンの逆向きとなって、スピンのマイクロな回転とは逆向きに回転させることになる。この場合、正電荷粒子数の方が、負電荷粒子数よりも大きくなるから、磁場と回転を組み合わせると有限の電荷が生じる。これが先行研究で言われていたことであるが、福嶋らは、強磁場中ではスピンだけでなくサイクロトロン運動からの軌道角運動量による偏極への寄与があって、ス

ピン偏極を凌駕することを見出した [16]。即ち、直感に反して、回転が誘起する偏極は磁場とは反平行を向くことになる。弱磁場では先行研究のシナリオが成立するならば、磁場を強くしていくと、やがては偏極が反転するはずだというのがここで提唱した理論予想であり、実験的検証のための定量的評価も行った。

様々な高密度物質の音速とトレースアノマリーの統一的研究

近年、中性子星のデータから再構築された状態方程式が音速ピークを持つだけでなく、トレースアノマリーが異常に小さくなるということが分かり、その起源を巡っての理論研究が活性化している。湊・福島は、現実的なカラー超伝導クォーク物質だけでなく、高アイソスピン密度でパイ中間子凝縮している物質や、2 カラー高密度 QCD でダイクォーク凝縮している物質について、摂動計算を実行することで、凝縮からの音速とトレースアノマリーへの影響を定量的に評価した [17]。これらの物理系はともすると全然関連性のない別の問題のように見えるが、実はギャップ方程式は同じ形を取っており、違いは数係数のみに現れる。高アイソスピン密度と 2 カラー高密度 QCD については、凝縮を取り入れることで音速はより大きくなり、またトレースアノマリーはより小さくなり、格子ゲージ理論の数値シミュレーションの結果と整合する方向にシフトした。一方で、現実的なカラー超伝導クォーク物質の場合には、ダイクォーク凝縮が小さ過ぎるために全く効果が見えない。そこで摂動計算には原理的に含まれないインスタントン由来の相互作用を加えたところ、音速は大きくなるどころか寧ろ逆に小さくなってしまったことを発見した。これは凝縮だけでなく凝縮の密度微分も音速に効いており、単に凝縮が大きくなっても、密度微分がより速く大きくなってしまおうと、音速が下がってしまうためである。こうした様々な物理系での包括的な比較検討の重要性を強調した。

<受賞>

- [1] 湊修平、学生ポスター賞、熱場の量子論研究会運営、2024 年 9 月 11 日。

<報文>

(原著論文)

- [2] S. Kamata, “Exact WKB analysis for $\mathcal{PT}$ -symmetric quantum mechanics: Study of the Bender-Sarkar conjecture”, *Phys. Rev. D* **109**, 085023 (2024).
- [3] K. Fukushima, Y. Hidaka, K. Inoue, K. Shigaki, Y. Yamaguchi, “Hanbury-Brown-Twiss signature for clustered substructures probing primordial inhomogeneity in hot and dense QCD matter”, *Phys. Rev. C* **109**, L051903 (2024).
- [4] Y. Hidaka, Y. Tanizaki, A. Yamamoto, “ Z_3 lattice gauge theory as a toy model for dense QCD”, *Phys. Rev. D* **109**, 114502 (2024).

- [5] Y. Hirono, A. Tanaka, K. Fukushima, “Understanding Diffusion Models by Feynman’s Path Integral”, *Proceedings of the 41st International Conference on Machine Learning (ICML)*, PMLR235:18324-18351 (2024).
 - [6] S. Kamata, “Exact quantization conditions and full transseries structures for $\mathcal{PT}$ symmetric anharmonic oscillators”, *Phys. Rev. D* **110**, 045022 (2024).
 - [7] Y. Fujimoto, K. Fukushima, K. Murase, “Uncertainty quantification in the machine-learning inference from neutron star probability distribution to the equation of state”, *Phys. Rev. D* **110**, 034035 (2024).
 - [8] K. Fukushima, J. Horak, J.M. Pawłowski, N. Wink, C.P. Zelle, “Nuclear liquid-gas transition in QCD”, *Phys. Rev. D* **110**, 076022 (2024).
 - [9] S. Chen, K. Fukushima and Y. Shimada, “Inhomogeneous confinement and chiral symmetry breaking induced by imaginary angular velocity”, *Phys. Lett. B* **859**, 139107 (2024).
 - [10] T. Hayata, K. Seki, A. Yamamoto, “Floquet prethermalization of Z_2 lattice gauge theory on superconducting qubits”, *Phys. Rev. D* **110**, 114503 (2024).
 - [11] G. Aarts, K. Fukushima, T. Hatsuda, A. Ipp, S. Shi, “Physics-driven learning for inverse problems in quantum chromodynamics”, *Nature Rev. Phys.* **7**, 154-163 (2025).
 - [12] K. Fukushima, S. Kamata, “Stochastic Quantization and Diffusion Models”, *J. Phys. Soc. Jap.* **94**, 031010 (2025).
 - [13] Y. Hidaka, A. Yamamoto, “Quantum circuit for Z_3 lattice gauge theory at nonzero baryon density”, *Phys. Rev. D* **111**, 014510 (2025).
 - [14] Y. Fujimoto, K. Fukushima, K. Hotokezaka, K. Kyutoku, “Signature of hadron-quark crossover in binary-neutron-star mergers”, *Phys. Rev. D* **111**, 063054 (2025).
 - [15] Y. Shimada and A. Yamamoto, “Analyzing the Higgs-confinement transition with non-local operators on the lattice”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* in press [e-Print:2501.10662[hep-lat]].
 - [16] K. Fukushima, K. Hattori, K. Mameda, “Preponderant Orbital Polarization in Relativistic Magnetovortical Matter”, *Phys. Rev. Lett.* in press [e-Print:2409.18652 [hep-ph]].
 - [17] K. Fukushima, S. Minato, “Speed of sound and trace anomaly in a unified treatment of the two-color diquark superfluid, the pion-condensed high-isospin matter, and the 2SC quark matter”, *Phys. Rev. D* in press [e-Print:2411.03781 [hep-ph]].
- (学位論文)
- [18] 奥津明俊, “ホログラフィック QCD 模型による相転移を伴う状態方程式の研究”, 博士論文, 2024.

- [19] 宇治知哉, “Photon polarization tensor at finite temperature and density in a magnetic field”, 修士論文, 2025.
- [20] Matteo Zoccolan, “Study of Polyakov loop in fast imaginary rotating gluonic matter”, 博士論文, 2025.
- (著書)
- [21] 福島健二, “原子核の発見から現代物理へ”, 数理科学 2025 年 2 月号 No.740.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [22] K. Fukushima, “Perturbatively Confined Phase of QCD under Imaginary Rotation”, The 20th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD2024), Lanzhou, China, July 17, 2024.
- [23] Y. Shimada, “Perturbatively Confined Phase of QCD under Imaginary Rotation”, XVIth Quark Confinement and the Hadron Spectrum Conference (QCHSC2024), Cairns Convention Centre, Cairns, Queensland, Australia, August 22, 2024.
- [24] Y. Shimada, “Perturbatively Confined Phase of QCD under Imaginary Rotation”, Avenues of Quantum Field Theory In Curved Spacetime 2025, Institute Denis Poisson, Tours, France, January 23, 2025.
- 招待講演
- [25] K. Fukushima, “Puzzles in density regions from nuclear to quark matter”, Dialogue at the Dream Field 2024, Guiyang, China, May 12, 2024.
- [26] K. Fukushima, “QCD Phase Diagram and Astrophysical Implications”, Aspects of Criticality II, Wroclaw, Poland, July 3, 2024.
- [27] K. Fukushima, “Probing high-density states of QCD matter”, 2nd Symposium on Intermediate-energy Heavy Ion Collisions (iHIC24), Beijing, China, July 15, 2024.
- [28] K. Fukushima, “Phase Diagram under Rotation and Magnetic Field”, The 8th International Conference on Chirality, Vorticity and Magnetic Field in Quantum Matter, Timisoara, Romania, July 23, 2024.
- [29] K. Fukushima, “Dense QCD Matter and Astrophysical Implications”, Fudan Summer School 2024, Fudan Univ., Shanghai, China, August 21, 2024.
- [30] K. Fukushima, “Dense QCD matter constrained by astrophysical observation”, New developments in studies of the QCD phase diagram, ect*, Trento, Italy, Sept. 10, 2024.
- [31] S. Kamata, “Exact WKB analysis for PT - symmetric quantum mechanics: Study of the Ai-Bender-Sarkar conjecture”, Applications of Field Theory to Hermitian and Non-Hermitian Systems, King’ s College, London, U.K., Sep. 10, 2024.
- [32] K. Fukushima, “Spin Hydrodynamics from the Entropy Principle: flaws and remedies”, Spin and quantum features of QCD plasma, ect*, Trento, Italy, Sept. 17, 2024.
- [33] K. Fukushima, “Probing Extreme States of QCD Matter in Compact Stars”, 53rd Heidelberg Graduate Days, Heidelberg, Germany, Oct. 7-11, 2025.
- [34] A. Yamamoto, “ Z_3 lattice gauge theory as a toy model of QCD”, Hadrons and Hadron Interactions in QCD, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, Nov. 15, 2024.
- [35] K. Fukushima, “QCD at finite theta, magnetic field, and rotation”, Avenues in Quantum Field Theory in Curved Spacetime 2025, Tours, France, Jan. 23, 2025.
- [36] K. Fukushima, “Confinement and chiral symmetry breaking in a geometry with imaginary rotation”, Confinement and symmetry from vacuum to QCD phase diagram, Benasque, Spain, Feb. 13, 2025.
- [37] K. Fukushima, “Probing Extreme States of QCD Matter in Compact Stars”, HADRON 2025, Porto Alegre, Brazil, March 10, 11, 13, 2025.
- [38] K. Fukushima, “Controversial Thermodynamics with Spin Potential”, Holographic perspectives on chiral transport and spin dynamics, ect*, Trento, Italy, March 24, 2025.
- (国内会議)
- 一般講演
- [39] 大沼勝弥, 福島健二, 山本新, “Wilson フェルミオンを用いた有限密度 (1+1) 次元 SU(2) 格子ゲージ理論のテンソルネットワークによる数値計算とその非一様相の研究”, 日本物理学会, 第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 16 日.
- [40] Wenhua Cai, Kenji Fukushima, “Non-universality of the maximum mass of rotating neutron stars for equations of state with quark matter”, 日本物理学会, 第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 17 日.
- [41] Shi Chen, 福島健二, 嶋田侑祐, “Perturbatively Confined Phase of QCD under Imaginary Rotation”, 日本物理学会, 第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 18 日.
- [42] 宇治知哉, 福島健二, 日高義将, “マグネター表面などに見られる強磁場中における光子からの粒子反粒子対生成プロセスに関する計算”, 日本物理学会, 第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 18 日.
- [43] 南口誠介, 宇治知哉, 福島健二, “潮汐変形率でクォーク星と中性子星とを区別する.”, 日本物理学会, 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 20 日.

招待講演

- [44] 山本新, “格子 QCD の量子計算に向けて”, EIC で展開する新たな原子核・素粒子物理, 東京大学, 2024 年 5 月 30 日.
 - [45] 福嶋健二, “高エネルギー原子核理論 こしかた、と、ゆくすえ”, QNSI Kickoff Workshop, 東京大学小柴ホール, 2024 年 8 月 29 日.
 - [46] 福嶋健二, “EIC への理論からの期待とグルーオン飽和の物理”, 日本物理学会, 第 79 回年次大会シンポジウム, 北海道大学, 2024 年 9 月 16 日.
 - [47] 山本新, “Toward Lattice Gauge Theory on Quantum Computers”, Tensor Network 2024, 石川県政記念いのき迎賓館, 2024 年 11 月 17 日.
- (セミナー)
- [48] S. Kamata, “Exact WKB analysis for PT symmetric quantum mechanics: Study of the Ai-Bender-Sarkar conjecture”, Joint HEP-TH Seminar at Beijing Institute of Mathematical Sciences and Applications (BIMSA) online, April 10, 2024.
 - [49] 嶋田侑祐, “Perturbatively Confined Phase of QCD under Imaginary Rotation”, 京都大学, 2024 年 5 月 17 日.
 - [50] 山本新, “Lattice Gauge Theory and Quantum Computing”, 東北大学, 2024 年 5 月 24 日.
 - [51] 鎌田翔, “Exact quantization conditions and full transseries structures for PT symmetric anharmonic oscillators”, 東京工業大学, 2024 年 7 月 26 日.
 - [52] K. Fukushima, “Looking into dense states of QCD matter in neutron stars”, Physical colloquium at Brookhaven National Laboratory, August 6, 2024.
 - [53] 山本新, “Quantum simulation of Z_2 lattice gauge theory”, 東京大学素粒子物理国際研究センター, 2024 年 10 月 2 日.
 - [54] K. Fukushima, “Some interpretation of the trace anomaly in dense neutron star matter”, Lunch Club Seminar at Giessen Univ., Oct. 23, 2024.
 - [55] K. Fukushima, “Some interpretation of the trace anomaly in dense neutron star matter”, online seminar (USTC, Arizona State U.), Nov. 21, 2024.
 - [56] 嶋田侑祐, “Perturbatively Confined Phase of QCD under Imaginary Rotation”, 東北大学, 2024 年 12 月 3 日.
 - [57] K. Fukushima, “Messages from the neutron star about the dense QCD matter properties”, Seminar at Saclay in France, Feb. 3, 2025.

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 comparisons with cold atom experiments.

1.2.1 Quantum many-body physics in nuclear systems

Cooper quartet correlations near the surface of $N = Z$ nuclei

Cluster formation has been one of the key issues in nuclear physics. As several light clusters, such as deuteron, triton, and α particle, are known to be formed in the vacuum or dilute environment, it is important to develop many-body theories bridging dilute nuclear matter and nuclei to elucidate cluster formations and associate strong inter-nucleon correlations in these systems.

In particular, an α particle consisting of four nucleons is one of the most stable nuclear clusters with a large binding energy $E_\alpha = 28.29$ MeV. To see its corresponding impact on the nuclear equation of state, Guo, Naito, Tajima, and Liang theoretically investigated Cooper quartet correlations in $N = Z$ doubly-magic nuclei (^{40}Ca , ^{100}Sn , and ^{164}Pb). They first examined the quartet condensation fraction in infinite symmetric nuclear matter by using the quartet Bardeen-Cooper-Schrieffer theory. Together with the total nucleon density profiles of doubly-magic nuclei obtained from the Skyrme Hartree-Fock calculation, they discussed the spatial distribution of quartet correlations in finite nuclei within the local density approximation. Large quartet condensate fractions were found at the surface region of an atomic nucleus due to the strong neutron-proton attractive interactions, which are also responsible for the deuteron formation in vacuum. Moreover, they discussed a possible microscopic origin of the so-called Wigner term in the context of nucleon-quartet scattering in dilute symmetric nuclear matter. The nucleon-quartet scattering effect on the Wigner term was numerically estimated as about one order of magnitude of the

total empirical strength, indicating the importance of multi-nucleon clusters in the symmetry energy and mass formula in addition to the neutron-proton pairing.

Response of asymmetric nuclear matter with finite nucleon numbers

The construction of the energy density functional (EDF) is the essence of the studies on the nuclear DFT. Most existing nuclear EDFs are constructed empirically but they show uncontrollable uncertainties when studying the nuclei far away from the stable valley and are difficult to improve. Therefore, the construction of the nuclear EDF grounded on the *ab initio* calculations, which are expected to have controllable uncertainties and be systematically improvable, is required.

As an important step of the construction the *ab initio* EDFs, Li, Liang, and thier collaborators constructed a finite- A DFT method for the asymmetric nuclear matter (ANM). Hence, properties of the system and external fields in both the isoscalar and isovector channels are considered. The kinetic energy per particle in asymmetric finite- A systems is compared with that in the thermodynamic limit and it is confirmed that the finite-size effects at the ground state can be evaluated with the energy deviations. Moreover, the static response theory in ANM is applied and validated with the calculations of perturbed density and energy. Finally, the equation of state, the energy levels, and the static response in ANM are studied with the finite- A method and the finite-size effects are investigated. In particular, a peculiar peak shows up in the isovector response function, and it is analyzed carefully.

Possibly heaviest $N = Z$ doubly-magic nucleus

According to the upgrade plan of the Radioactive Isotope Beam Factory, RIKEN, more proton-rich nuclei can be synthesised, including the $N = Z$ nuclei. In contrast to the neutron-rich side, an atomic nucleus outside the proton dripline can exist due to the Coulomb barrier.

A question arises: what is a possible heaviest $N = Z$ nucleus that can be experimentally observed? To answer this question, Naito and his collaborators examined properties of ^{164}Pb ($N = Z = 82$) [13]. They confirmed that the $N = Z = 82$ magicity still holds, and due to the Coulomb barrier the proton-emission half-life is long enough to be measured experimentally. Moreover, the α -decay half-life is safely neglected.

Quantum computation for two-valence neutron nuclei

Quantum computers have been developed rapidly, while the algorithms that can be used are different from those of classical computers. In a recent work [7], Naito and his collaborators demonstrated the possibility of performing the shell-model calculations for two-valence neutron nuclei. To reduce the number of qubits used, they used the pair-wise Hamiltonian, which is known to be a geminal in quantum chemistry.

Non-relativistic trace anomaly in dense three-color fermionic matter

The equation of state in dense matter relevant to massive neutron stars has been one of the central subjects in nuclear astrophysics. Recently, the trace anomaly has been regarded as a key quantity to understand many-body correlations on the equation of state. Meanwhile, the trace anomaly is known to appear in several non-relativistic systems such as the two-dimensional two-component Fermi gas with a contact two-body interaction and the one-dimensional three-component Fermi gas with a contact three-body interaction. The latter system may share a similarity with the quark-hadron matter, where the $\text{SU}(3)$ color degree of freedom plays a crucial role.

Tajima, Liang, and their collaborator investigated the impact of the trace anomaly in a one-dimensional three-component Fermi gas by using the G -matrix approach for the three-body attractive interaction [5]. The non-relativistic trace anomaly can be expressed in terms of the three-body contact parameter and the numerical results qualitatively agree with the quantum Monte Carlo simulation. Moreover, they pointed out the importance of fluctuation contributions characterized by finite center-of-mass momentum of three-body clusters.

P -wave Bose polaron picture of neutrons in α matter

α matter and α condensates with residual neutrons are regarded as one of the possible candidates for the many-body state in dilute asymmetric nuclear matter. The α condensate has been discussed in an excited state of finite nuclei as well as in supernova matter. Moreover, the binary quantum mixture of bosonic α particles and fermionic neutrons can be mimicked by a Bose-Fermi mixture realized in ultracold atom experiments. In particular, the

residual neutrons coexisting with α matter are similar to Bose polarons near the P -wave Feshbach resonance.

Motivated by these facts, Tajima, Naito, and their collaborators theoretically investigated the P -wave Bose polarons as a possible state in dilute asymmetric nuclear matter [16]. The P -wave neutron- α interaction leads to the enhancement of neutron effective mass and hence the unbound-to-bound transition of dineutrons. Their results would be useful for further understanding of multi-neutron clusters in α matter and the core-collapsed supernova explosion.

1.2.2 Quantum many-body physics in other systems

Free-field approaches to boundary RCFT₂

Two-dimensional conformal field theories (CFT₂) are the most well-studied type of quantum field theory, with crucial applications in both physics and mathematics.

Liu proposed a method for calculating the genus- g , bulk n -point, b -boundary, c -crosscap functions by expanding them as infinite linear combinations of genus- g , bulk $(n+b+c)$ -point functions [11]. To obtain the linear coefficients in this expansion in rational CFT₂ (RCFT₂), Liu applied the free-field approaches of those RCFT₂s.

Liu applied the free-field resolution conjectures and vertex operator constructions to boundary states and disk correlation function calculations of Wess-Zumino-Witten (WZW) models with simple Kac-Moody conformal algebra $\hat{g} \otimes \hat{g}$, and their parafermionic theories. Liu is currently working on applying the free-field approaches to minimal models with the quantum Hamiltonian reduction $\mathcal{W}$ chiral algebras.

Probing supersymmetry-like transport of Goldstino in an ultracold Bose-Fermi mixture

The Goldstino, which is a type of fermionic Nambu-Goldstone mode, has been predicted in a Bose-Fermi mixture when the supersymmetry (SUSY) is broken. In spite of its importance for understanding the SUSY, the existence of Goldstino remains elusive and has yet to be observed. A hint to detect the consequence of the Goldstino is to find its contribution to tunneling transport in Bose-Fermi mixtures, as an analog of magnon modes contributing in spin transport in ferromagnetic systems.

Motivated by this, Zhang, Guo, Tajima, and Liang theoretically investigated the SUSY-like tunneling

transport in a ^{173}Yb - ^{174}Yb mixture [10]. The Goldstino mode has a chemical potential as the bias between fermionic and bosonic chemical potential ($\mu_f - \mu_b$), and is found to contribute to the SUSY-like tunneling current. Zhang also studied the current shot noise to detect the current carriers [15]. A crossover from quasiparticle to Goldstino tunneling is found as the interaction strength increases or the tunneling barrier is tuned. These results provide a promising way to explore Goldstino and SUSY properties in not only mixtures of Bose and Fermi superfluids but also other condensed matter systems with SUSY breaking.

Fluctuations and Fano-Feshbach resonance in a two-band superconductor

Fluctuations beyond the Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) mean-field theory are important for understanding the behavior of the critical temperature T_c in unconventional superconductors. This tendency is rather crucial when the system involves strong correlations. This is true for a two-band superconductor with an incipient quasi-flat band (where “incipient” indicates that the chemical potential is close to the bottom of the band so that the occupation of the band just starts), which can be in the BCS-Bose-Einstein condensate (BEC) crossover regime because of the Fano-Feshbach resonance induced by the interband pair-exchange scattering. Nevertheless, it was unclear how particle-particle and particle-hole fluctuations affect T_c in general two-band superconductors.

Tajima and his collaborators tackled this problem using the fluctuation theory developed in the context of ultracold atomic Fermi superfluids [3]. It is found that an entanglement of particle-particle and particle-hole fluctuations leads to the non-trivial peaked behavior of T_c as a function of two-band effective mass ratio, indicating that the optimal mass ratio exists in a two-band superconductor. Their results pave the way toward understanding high- T_c superconductors from an interdisciplinary point of view.

Non-Hermitian P -wave Fermi superfluid with the inelastic three-body loss

The realization of P -wave Fermi superfluid is a long-standing problem in the field of ultracold atoms. However, the strong three-body loss prevents us from reaching the superfluid regime. On the other hand, the recent theoretical progress of non-Hermitian Fermi superfluid with particle loss may give new insight into such a situation. So far, there is no theoretical framework for the non-Hermitian Fermi

superfluid in the P -wave BCS-BEC transition with three-body losses.

Tajima and his collaborators developed the non-Hermitian BCS-Eagles-Leggett theory with three-body losses and applied it to a one-dimensional spinless Fermi gas near the P -wave Feshbach resonance [4]. It is found that the system exhibits a topological phase transition accompanied by gapless quasiparticle excitations, and the superfluid phase becomes unstable when the exceptional point and gapless excitations appear in the BCS phase and the BEC phase, respectively. They also revealed that reducing the magnitude of the effective range is a feasible way to reach the P -wave Fermi superfluid.

Thermomagnetic spin transport through the magnetic junctions

Thermomagnetic transport phenomena have attracted growing interest in the field of spintronics as well as ultracold atoms. In particular, the latter system provides us with a useful testing ground for non-equilibrium transport theory thanks to its remarkable controllability, such as junction geometry and interaction strength. Recently, by using the ferromagnetic systems realized in ultracold atoms, one may examine the tunneling spin transport across various junction geometries, including the magnetic point contact where the current flows through the single site at the interface.

Tajima and his collaborators studied on the heat and spin transport across the magnetic point contact by using the non-equilibrium Green's function method [12]. It is found that the spin relaxation is extremely slowed down due to the magnonic criticality, resulting in the breakdown of Ohm's law for the spin transport. Their results shed light on the quantum critical behaviors of magnons overlooked in the spintronics studies. Moreover, Tajima and his collaborators also examined the cases with different junction geometries and discussed that the Lorenz number is sensitive to the junction geometry in contrast to the Fermi liquids where the universality of Wiedemann-Franz law holds regardless of the junction geometry [18].

<受賞>

- [1] H. Tajima, Fibonacci Prize, International conference "Superstripes 2024", 2024 年 6 月 29 日.
- [2] T. Naito, PCM2025 Jury Prize, International symposium "Single-particle and collective motions from nuclear many-body correlation (PCM2025)", 2025 年 3 月 7 日.

<報文>

(原著論文)

- [3] H. Tajima, H. Aoki, A. Perali, and A. Bianconi, Phys. Rev. B **109**, L140504 (2024).
- [4] H. Tajima, Y. Sekino, D. Inotani, A. Dohi, S. Nagataki, and T. Hayata, Phys. Rev. Research **6**, 023060 (2024).
- [5] H. Tajima, K. Iida, and H.Z. Liang, Phys. Rev. C **109**, 055203 (2024).
- [6] P. Guo, *et al.*, At. Data Nucl. Data Tables **158**, 101661 (2024).
- [7] S. Yoshida, T. Sato, T. Ogata, T. Naito, and M. Kimura, Phys. Rev. C **109**, 064305 (2024).
- [8] Z.X. Yang, X.H. Fan, Z.P. Li, and H.Z. Liang, Phys. Rev. C **109**, 064312 (2024).
- [9] T.S. Shang, H.H. Xie, J. Li, and H.Z. Liang, Phys. Rev. C **110**, 014308 (2024).
- [10] T.Y. Zhang, Y.X. Guo, H. Tajima, and H.Z. Liang, Phys. Rev. B **110**, 064512 (2024).
- [11] X. Liu, J. High Energ. Phys. **2024**, 108 (2024).
- [12] Y. Sekino, Y. Ominato, H. Tajima, S. Uchino, and M. Matsuo, Phys. Rev. Lett. **133**, 163402 (2024).
- [13] T. Naito, M. Kimura, and M. Sasano, Phys. Rev. Research **7**, 013050 (2025).
- [14] Y.H. Lu, T.S. Shang, P.X. Du, J. Li, H.Z. Liang, and Z.M. Niu, Phys. Rev. C **111**, 014325 (2025).
- [15] T.Y. Zhang, Phys. Rev. B **111**, 054502 (2025).
- [16] H. Tajima, H. Moriya, T. Naito, W. Horiuchi, E. Nakano, and K. Iida, Phys. Rev. C **111**, 025802 (2025).
- [17] J. Geng, Z.H. Wang, P.W. Zhao, Y.F. Niu, H.Z. Liang, and W.H. Long, Phys. Rev. C **111**, 024305 (2025).
- [18] Y. Sekino, Y. Ominato, H. Tajima, S. Uchino, and M. Matsuo, Phys. Rev. A **111**, 033312 (2025).

(会議抄録)

- [19] H. Sagawa, T. Naito, X. Roca-Maza, and T. Hatsuda, PoS **QNP2024**, 201 (2025).

(学位論文)

- [20] Y.X. Guo, "Three-body and four-body clustering in cold quantum many-body systems", 博士論文.
- [21] M.L. Li, "Response of asymmetric nuclear matter studied with a finite number of particles", 修士論文.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [22] H. Tajima, Y. Sekino, D. Inotani, A. Dohi, S. Nagataki, and T. Hayata, "Non-Hermitian p-wave superfluidity in ultracold Fermi gases", Ultracold Atoms Japan 2024, OIST, Okinawa, Japan, April 9-12, 2024.

- [23] H. Tajima, D. Oue, M. Matsuo, and T. Kato, “Correlated transport and shot noise in strongly interacting quantum gases”, YITP Workshop “Quantum Simulation of Novel Phenomena with Ultracold Atoms and Molecules”, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, April 22-25, 2024.
- [24] H.Z. Liang, “Structure learning ansatz for Lipkin model”, N3AS-iTHEMS Meeting on Quantum Information Science in Multimessenger Astrophysics, RIKEN, Wako, Japan, June 16-18, 2024.
- [25] H. Tajima, “Tripling fluctuations and peaked speed of sound in three-color fermions”, Universality of Quantum Systems: From Cold Atoms, Nuclei, to Hadron Physics (UQS2024), Tohoku University, Sendai, Japan, September 4-5, 2024.
- [26] H.Z. Liang, “Nuclear density distributions and machine learning”, The 2nd Workshop on Machine Learning in Nuclear Physics and DFT, Anhui University, Hefei, China, November 21-23, 2024.
- [27] H.Z. Liang, “Pseudospin symmetry in atomic nuclei”, Workshop on Quantum Many-Body Theories, Guiyang, China, January 15-18, 2025.
- [28] H.Z. Liang, “Exploring *ab initio* density functional theory”, Workshop on Chiral Nuclear Forces and Nuclear Physics Based on First Principles, Beihang University, Beijing, China, February 22-24, 2025.
- [35] H. Tajima, “Non-Hermitian p-wave Fermi superfluid,” Beijing-Tokyo-Xi’an Joint Workshop on Quantum Matters, Xi’an China, October 16-20, 2024.
- [36] T. Naito, “Impact of the isospin symmetry breaking on nuclear properties”, SSNET’24 —International Conference on Shapes and Symmetries in Nuclei: from Experiment to Theory—, Laboratoire de Physique des 2 infinis Irène Joliot-Curie (IJCLab), France, November 6, 2024.
- [37] T. Naito, “From Density to Energy Density Functional”, International symposium: TRIP Usecase: Nuclear Transmutation 2025, RIKEN, Japan, March 10-12, 2025.
- [38] H.Z. Liang, “Nuclear mass and beta-decay half-life with Bayesian approaches”, International symposium: TRIP Usecase: Nuclear Transmutation 2025, RIKEN, Japan, March 10-12, 2025.

(国内会議)

一般講演

招待講演

- [29] H. Tajima, “P-wave superfluid in neutron star matter at low and high densities”, QCD theory seminar, online, April 15, 2024.
- [30] H. Tajima, H. Aoki, A. Perali, and A. Bianconi, “Particle-hole fluctuations and enhanced critical temperature in a mass-imbalanced two-band superconductor from a Fano-Feshbach resonance”, Superstripes 2024, Ischia, Italy, June 24-29, 2024.
- [31] H.Z. Liang, “Colorful nuclear physics and the origin of elements”, 2024 International School Program of Zhengzhou University, online, July 15-20, 2024.
- [32] H.Z. Liang, “Research frontiers in nuclear physics”, International Summer School in Mathematics and Physics 2024, Jilin University, Changchun, China, August 11-24, 2024.
- [33] H.Z. Liang, “Attempts for *ab initio* nuclear density functional theory”, The 3rd APCTP-Triumph Joint Workshop: From Nuclei to Neutron Stars, Busan, South Korea, September 23-27, 2024.
- [34] T. Naito, “Quantum multi-body problems using unsupervised machine learning”, 77th OMEG Workshop “Origin of Matter and Evolution of Galaxies Institute”, 崇実大学校, South Korea, October 8, 2024.
- [39] H.Z. Liang, “Theoretical aspects in many-nucleon systems”, Kickoff Workshop for Quark Nuclear Science Institute, 東京大学, 東京, 2024 年 8 月 29 日.
- [40] 土肥明, 猪谷太輔, 関野裕太, 田島裕之, 長瀧重博, 「中性子星 NS 1987A の将来観測を利用したクラスター内部の中性子超流動の調査」, 日本物理学会年次大会, 北海道大学, 札幌, 2024 年 9 月 16-19 日.
- [41] 田島裕之, 青木秀夫, Andrea Perali, Antonio Bianconi, 「質量が重い incipient バンドをもつ 2 バンド超伝導における Fano-Feshbach 共鳴と粒子正孔揺らぎの競合から生じる Tc ピーク」, 日本物理学会年次大会, 北海道大学, 札幌, 2024 年 9 月 16-19 日.
- [42] 関野裕太, 大湊友也, 田島裕之, 内野瞬, 松尾衛, 「マグノン臨界性に由来した異常量子トンネルスピン・熱輸送」, 日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 18 日-21 日.
- [43] 田島裕之, 飯田圭, 古城徹, Haozhao Liang, 「ハドロンのクォーククロスオーバーにおける 3 体クラスター形成に起因した強い揺らぎと音速上昇メカニズム」, 日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 18 日-21 日.
- [44] 田島裕之, 森谷元, 内藤智也, 堀内渉, 仲野英司, 飯田圭, 「アルファ凝縮体中の核子の P 波ボースポーロン描像」, 日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 18 日-21 日.

招待講演

- [45] 内藤智也, 「KISS で目指す究極の原子核密度汎関数」 RIBF mini-workshop “How can laser spectroscopy at KISS contribute valuable insights to nuclear models?”, 理化学研究所仁科加速器科学研究センター, 埼玉, 2024 年 5 月 16 日.

- [46] H.Z. Liang, “Nuclear mass predictions with machine learning reaching the accuracy required by r -process studies”, RIKEN Symposium Evolution of Matter in the Universe, RIKEN, Wako, Japan, June 5-7, 2024.
- [47] 内藤智也. 「Mirror skin and isospin symmetry breaking」第2回「新しいスキンを考える会」, 京都大学大学院理学研究科セミナーハウス, 京都, 2024年11月14日.
- [48] 田島裕之, 「Crossover in quantum many-body systems: Ultracold atomic perspective」, RARiS 研究会「実験・反応・構造計算、格子 QCD で解き明かすハドロン分光」, 東北大学先端量子ビーム科学研究センター, 仙台, 2024年11月20-21日.
- [49] 田島裕之, 「冷却フェルミ原子気体の非エルミート量子多体理論」, 研究会「複素化による量子系に関する研究の発展」, 佐賀大学, 佐賀, 2024年12月23日-27日.
- [50] T. Naito, “What Is The Possible Heaviest Nuclei?” Advancing physics at next RIBF (ADRIB25), 理化学研究所仁科加速器科学研究センター, 埼玉, 2025年1月23日.
(セミナー)
- [51] 田島裕之, 「Many-body crossover in cold atomic and nuclear systems」東北大学 GPPU セミナー, 東北大学, 2024年5月7日.
- [52] 内藤智也. 「Density distribution of Ca」ハドロンセミナー, 東京工業大学, 2024年5月29日.
- [53] T. Naito, “Quantum multi-body problems using unsupervised machine learning”, ICCUB HadNucAtUB Seminar, Universitat de Barcelona, July 17, 2024.
- [54] T. Naito, “Towards First-Principles Energy Density Functionals”, ICCUB HadNucAtUB Seminar, Universitat de Barcelona, November 20, 2024.
- [55] 内藤智也, 「SCRIT のための理論計算」粒子ビーム科学研究領域セミナー, 京都大学, 2025年3月21日.
- [56] 田島裕之, 「Cold atomic perspective to the hadron-quark crossover」, 基礎物理学セミナー, 東京大学, 2025年1月20日.

1.3 素粒子論研究室

1.3.1 現象論

ALP 暗黒物質

濱口、金澤、永田は、D. Y. Cheong (延世大), S. M. Lee (CERN), S. C. Park (KIAS) とともに、Axion-like particle (ALP) の質量が重力インスタントン (ワームホール) によって決まるシナリオを考え、その宇宙論的生成機構を調べたうえで、ALP が暗黒物質として存在しうることを示した [4]。

中性子星温度観測と新物理探索

濱口、永田は、藤原素子 (ミュンヘン工科大) とともに、中性子星の温度観測による新物理探索に関するレビュー記事を日本物理学会誌に寄稿した [40]。

インフレーション宇宙論

諸井は、神野、郡、高橋、羽澄とともに、現在計画中の LiteBIRD 実験によってインフレーションのシナリオをテストする手法を議論した。そして、テンソル・スカラー比とテンソル揺らぎのスペクトル指数を Planck 実験から得られるスカラー揺らぎのスペクトル指数についての情報と組み合わせることで複数の場が関与するインフレーションモデルをテストすることができることを指摘した [26]。

コライダー物理

福田、諸井、仁木、Wei は、将来的なコライダーとして現在議論されている $\mu^+\mu^+$ コライダーによって暗黒物質を検出する手法を議論した。暗黒物質が存在する場合、ミューオン同士の Møller scattering が変更を受けるため、散乱断面積の角度依存性を詳しく見ること、超対称暗黒物質をはじめ電弱相互作用を持つ暗黒物質を検出できることを指摘した [15]。

暗黒物質直接検出

福田、諸井、シッチャヌギリッツは陳、稲田、新田 (東大 ICEPP) とともに、量子干渉と量子ビットを用いて暗黒物質検出の信号を強化する手法を提案した。センサーとしての量子ビット数が増加することで、信号強度が従来の線形増加ではなく二乗に比例して増加することを示した [23]。また、超伝導量子ビットをアクシオン暗黒物質検出のセンサーへと拡張し、量子回路とキャビティ共鳴を組み合わせることで、KSVZ や DFSZ といった QCD アクシオンのパラメータ空間に到達できることを示し、将来の量子コンピューターのハードウェアを用いたアクシオン暗黒物質の直接検出の可能性について議論した [24]。

ニュートリノ振動に対するくりこみ群効果

Pedro Pasquini は、S. F. Ge, C. F. Kong (TDLI) とともに、新物理がある場合にニュートリノ振動に対しくりこみ群の効果がどの程度影響を与えるかを調べた [28]。この際、ニュートリノのエネルギーだけでなく、運動量移行に対する依存性も考慮した。この効果により、基線長がゼロの極限においてすらニュートリノの出現確率がゼロでなくなることから、Dirac 位相の測定において特に重要となりうる。我々はさらに、Dirac 位相測定を確実なものとするため

に、長・短基線実験のデータを組み合わせることでこの効果をどの程度制限しうるかを議論した。この研究成果は [39] においてプロシーディングスとしても発表されている。

宇宙論におけるニュートリノ

Pedro Pasquini は、S. F. Ge, L. Tan (TDLI) とともに、宇宙背景ニュートリノによる重力レンズ効果がダークマターハローに与える影響を調べた [29]。我々の結果は、重力収束効果がニュートリノ質量に対して強い非線形の依存性を持つことを示しており、ニュートリノの質量および質量階層性を探るための新たな宇宙論的手法を提供する。例として DESI を取り上げて、既存の地上実験および宇宙論データとこの手法を組み合わせることで、ニュートリノ質量の測定精度を高めうることを示した。

大統一理論と核子崩壊

濱口、Hor、永田、高橋は、Flipped SU(5) 大統一理論における核子崩壊モードの研究を行った。Flipped SU(5) 大統一模型では、二体崩壊モードの寿命は一部を除き未知のユニタリ行列に依存することが知られている。本研究では、未知の行列に依存する不定性が二つのパラメータによって記述され、それらが $p \rightarrow \pi^0 e^+$ 、 $p \rightarrow \pi^0 \mu^+$ 、および $n \rightarrow \pi^0 \bar{\nu}$ の寿命を測定することによって決定可能であることを示した。そして、これらの寿命の比に対する上限を求め、Flipped SU(5) 模型を検証する方法を提唱した [19]。関連して、核子崩壊モードの寿命の比から大統一理論およびその他の UV の理論を探るというアイデアをより詳細に議論し、特に、寿命の比からバリオン数を破る次元 6 の SMEFT 有効演算子のカイラリティの構造を探り得ることを示した [20]。

レプトジェネシス

福田、シッチャヌギリッツは鎌田（中国科学院大学杭州高等研究院）とともに、初期宇宙でレプトン数を生成する新たなメカニズムを議論した。 $B-L$ 対称性をゲージ化した場合、インフレーションで $B-L$ ゲージ場の磁場が生成される可能性がある。この磁場が初期宇宙で一定期間レプトン数の偏りを作り出すため、この偏りを利用して宇宙のレプトン数を作ることができることを示した [25]。

熱場の理論における相転移

諸井と Fan は、有限温度場の理論における相転移についての研究を行った。特に、相転移率の計算において重要となるバウンスと呼ばれる場の配意を熱場の理論の枠内で計算する新たな手法を提唱し、その手法によってバウンスが計算できることを数値計算の

手法によって確認した。また、thin-wall と thick-wall 極限それぞれの場合におけるバウンスの性質について解析し、二つの場合でバウンスの性質が異なることを明らかにした [27]。

超新星爆発と新物理

秋田は、S. H. Im（韓国基礎科学院）、M. Mehedhi（韓国中央大）、S. Yun（韓国基礎科学院）とともに、超新星爆発のコアで生成される右巻きニュートリノ、 $U(1)_{B-L}$ や $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ ゲージボソンなど多くの新粒子が生成後のニュートリノへの崩壊によって超新星ニュートリノフラックスの高エネルギー側を増強させ、検出器で高エネルギーニュートリノイベントを引き起こしうることを示しました。高エネルギー超新星ニュートリノの未観測によってこれらの新粒子に厳しい制限を課し、将来の超新星ニュートリノの観測によってさらに新粒子の感度を大幅に引き上げることを明らかにしました [16]。

ニュートリノ脱結合と新物理

秋田は、G. Baur（Bonn 大）、M. Ovchinnikov（CERN）、T. Schwetz（Karlsruhe 工科大）、V. Syvolap（Leiden 大）と初期宇宙のニュートリノ脱結合時に新粒子が存在し、この新粒子がミューオンや中間子のような不安定な粒子に崩壊する場合の、ミューオンや中間子の時間発展とそれが宇宙ニュートリノに与える影響を精密に追跡しました。この結果は単純化された計算結果とは大きくことなり、宇宙の観測量に大きな違いを生み出すことを明らかにしました [17, 18]。

低いスケールの $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ の破れにおけるレプトジェネシス

和田は、 $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ 対称性の破れが電弱スケール程度に存在したとしても、自発的レプトジェネシスによって宇宙の物質の起源を説明できることを示した。研究では最小 $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ ゲージ対称性モデルに大域的な $U(1)_{B-L}$ 対称性を加え、初期宇宙におけるこの $U(1)_{B-L}$ 対称性の自発的破れにより生成されるマヨロンの動的発展を通じて、バリオン非対称性とダークマターの存在量の両方を同時に説明できることを示した [31]。

量子アノマリー検出

山崎は Hammad、野尻（KEK）とともに、加速器実験におけるアノマリー検出への量子回路の応用を論じた [5]。

量子パートンシャワー

山崎は Bauer, 千草 (Berkeley) とともに、運動学的データを含めた量子パートンシャワーの量子/古典ハイブリッドアルゴリズムを構成した [11]。

1.3.2 弦理論, 場の理論全般

Calabi–Yau 不変量と BPS/CFT 対応

野下は、木村 (Bourgogne 大) とともに、Nekrasov が提唱するゲージ折紙分配関数を再現する qq -character の一般化を行なって、トーリック Calabi-Yau 4-fold の Donaldson–Thomas 不変量を計算する基本要素である Donaldson–Thomas qq -character を構築した [21, 22]。また、ゲージ折紙の代数的側面についてセミナー発表を行ったとともに、博士論文を執筆した [42]。

一般化対称性

大森は場の理論と格子上の多体系における一般化対称性について、一般化対称性を保つ格子模型の構成 [34] (共著: 稲村 (Oxford 大)), 一般化対称性を用いたニュートリノ質量生成機構の発見 [35] (共著: Cordova (シカゴ大), Koren (Notre Dame 大), Hong (KIAS)), 一般化対称性の高階構造 [36] (Copetti (Oxford 大), Del Zotto (Uppsala 大), Wang (ニューヨーク大)) についての研究を行った。

2 次元 CFT の分類

川畑は従来知られていた $\widehat{su}(2)$ 対称性をもつボソン CFT に関する ADE 分類を、フェルミオンとパラフェルミオンの場合に拡張し、それぞれの分配関数が BCFG 型の Dynkin 図と対応していることを発見した [37]。

フラクトン系の場の理論

島村は、部分系対称性をもつフラクトン系の場の理論における foliated QFT と exotic QFT の対応と部分系対称性のアノマリー流入を組み合わせ、新たな foliated 理論と exotic 理論を構成する手法を開発した [38]。

非可換ホロノミーを持つ可解模型とその対称性

松尾は Bourguin (メルボルン大) と共に非可換ホロノミーをもつ相互作用粒子系を記述する可解模型の研究を行った。特に、スペクトルがレベル＝ランク双対性を用いることにより厳密に導くことができることを示した [30][73]。

スピノル波束のローレンツ共変な表現

和田は尾田 (東京女子大学) とともに、スピノル波束のローレンツ表現を検討した。これまで用いらていたスピノル波束の表現の不自然な点を指摘し、より自然なローレンツ変換性を満たすスピノル波束の表現を提案した。また、この波束の場の量子論への実装を具体的に行なった [32]。

ヤン・ミルズ理論の θ 角とトポロジー

山崎は北野, 山田 (KEK) とともに, $SU(2)$ ヤン・ミルズ理論の T_c の θ 依存性を格子ゲージ理論のシミュレーションにおける新たな手法により調べた [8, 6]。

非可逆対称性

山崎は Cao (東大), Li (Ghent 大) とともに, 格子において新たな非可逆対称性を構成する方法について論じた [7]。

BPS 状態の数え上げ

山崎は Bao (東大), Seong (UNIST) とともに, 複素 4 次元のカラビー・ヤウ多様体の BPS 状態の数え上げを与える統計力学模型を構成した [9]。

ラージ電荷セクターと可積分性

山崎は Dodelson (CERN), ヘラーマン (東大), 渡邊 (名古屋大) とともに, 2 次元 CFT のラージ電荷セクターでの可積分性を議論した [12]。

量子重力の現象論

山崎は King, Roshan, Wang, White (Sounthampton 大) とともに, 量子重力における大域対称性の破れからダークマターや重力波が生成されるシナリオの観測可能性について論じた。[13, 10]

重力における散乱振幅の正值性の現象論的帰結

山崎は青木 (京大), 野海, 佐藤, 白井 (東大), 齋藤 (山口大), 徳田 (IBS) とともに, 重力における散乱振幅の正值性の現象論的帰結について論じた [14]。

<受賞>

- [1] 野下剛, 日本物理学会若手奨励賞, 素粒子論領域 日本物理学会, 2024 年 10 月
- [2] 秋田謙介, Iwate collider school 2025 best poster award, 2025 年 2 月

- [3] 永田夏海, 第2回(2024年) AAPPS-JPS Award, 2024年9月.
- <報文>
- (原著論文)
- [4] D. Y. Cheong, K. Hamaguchi, Y. Kanazawa, S. M. Lee, N. Nagata and S. C. Park, “Wormhole-induced ALP dark matter,” JHEP **02**, 183 (2025) [arXiv:2411.07713 [hep-ph]].
- [5] A. Hammad, M. M. Nojiri and M. Yamazaki, JHEP **02**, 081 (2025) [arXiv:2411.09927 [hep-ph]].
- [6] N. Yamada, M. Yamazaki and R. Kitano, JHEP **02**, 211 (2025) [arXiv:2411.00375 [hep-lat]].
- [7] W. Cao, L. Li and M. Yamazaki, SciPost Phys. **17**, no.4, 104 (2024) [arXiv:2406.05454 [cond-mat.str-el]].
- [8] N. Yamada, M. Yamazaki and R. Kitano, JHEP **07**, 198 (2024) [arXiv:2403.10767 [hep-lat]].
- [9] J. Bao, R. K. Seong and M. Yamazaki, JHEP **03**, 140 (2024) [arXiv:2401.02792 [hep-th]].
- [10] S. F. King, R. Roshan, X. Wang, G. White and M. Yamazaki, JCAP **05**, 071 (2024) [arXiv:2311.12487 [hep-ph]].
- [11] C. W. Bauer, S. Chigusa and M. Yamazaki, Phys. Rev. A **109**, no.3, 032432 (2024) [arXiv:2310.19881 [hep-ph]].
- [12] M. Dodelson, S. Hellerman, M. Watanabe and M. Yamazaki, JHEP **08**, 166 (2024) [arXiv:2310.01823 [hep-th]].
- [13] S. F. King, R. Roshan, X. Wang, G. White and M. Yamazaki, Phys. Rev. D **109**, no.2, 024057 (2024) [arXiv:2308.03724 [hep-ph]].
- [14] K. Aoki, T. Noumi, R. Saito, S. Sato, S. Shirai, J. Tokuda and M. Yamazaki, Phys. Rev. D **110**, no.1, 016002 (2024) [arXiv:2305.10058 [hep-ph]].
- [15] H. Fukuda, T. Moroi, A. Niki and S. F. Wei, JHEP **02** (2024), 214 doi:10.1007/JHEP02(2024)214 [arXiv:2310.07162 [hep-ph]].
- [16] K. Akita, S. H. Im, M. Masud and S. Yun, JHEP **07** (2024), 057 [arXiv:2312.13627 [hep-ph]].
- [17] K. Akita, G. Baur, M. Ovchinnikov, T. Schwetz and V. Syvolap, Phys. Rev. Lett. **134** (2025) no.12, 121001 [arXiv:2411.00892 [hep-ph]].
- [18] K. Akita, G. Baur, M. Ovchinnikov, T. Schwetz and V. Syvolap, Phys. Rev. D **111** (2025) no.6, 063542 [arXiv:2411.00931 [hep-ph]].
- [19] K. Hamaguchi, S. Hor, N. Nagata and H. Takahashi, Universe **10** (2024) 9, 379 [arXiv:2407.11892 [hep-ph]].
- [20] K. Hamaguchi, S. Hor, N. Nagata and H. Takahashi, JHEP **01**, 175 (2025) [arXiv:2409.08747 [hep-ph]].
- [21] T. Kimura and G. Noshita, [arXiv:2404.17061 [hep-th]].
- [22] T. Kimura and G. Noshita, JHEP **03**, 050 (2025) doi:10.1007/JHEP03(2025)050 [arXiv:2411.01987 [hep-th]].
- [23] S. Chen, H. Fukuda, T. Inada, T. Moroi, T. Nitta, T. Sikanugrist, Phys.Rev.Lett. **133** (2024) 2, 021801 [arXiv:2311.10413 [hep-ph]].
- [24] S. Chen, H. Fukuda, T. Inada, T. Moroi, T. Nitta, T. Sikanugrist, Phys.Rev.D **110** (2024) 11, 115021 [arXiv:2407.19755 [hep-ph]].
- [25] H. Fukuda, K. Kamada, T. Sikanugrist, JHEP **02** (2025) 192 [arXiv:2410.04701 [hep-ph]].
- [26] R. Jinno, K. Kohri, T. Moroi, T. Takahashi and M. Hazumi, “Testing multi-field inflation with LiteBIRD,” JCAP **03** (2024), 011 [arXiv:2310.08158 [astro-ph.CO]].
- [27] Z. Fan and T. Moroi, “Metastability of quantum fields in a thermal bath,” Phys. Rev. D **110** (2024) no.5, 056045 [arXiv:2406.11153 [hep-ph]].
- [28] S. F. Ge, C. F. Kong and P. Pasquini, “Neutrino CP measurement in the presence of RG running with mismatched momentum transfers,” Phys. Rev. D **110**, no.1, 1 (2024) doi:10.1103/PhysRevD.110.015003 [arXiv:2310.04077 [hep-ph]].
- [29] S. F. Ge, P. Pasquini and L. Tan, “Neutrino mass measurement with cosmic gravitational focusing,” JCAP **05**, 108 (2024) doi:10.1088/1475-7516/2024/05/108 [arXiv:2312.16972 [hep-ph]].
- [30] J.-E. Bourguin and Y. Matsuo, “Calogero model for the non-Abelian quantum Hall effect”, Phys. Rev. B **109**, 2024, 15.
- [31] J. Wada, “Majoron-driven leptogenesis in gauged $U(1)_{L\mu-L\tau}$ model,” Phys. Rev. D **110** (2024) no.10, 103510 doi:10.1103/PhysRevD.110.103510 [arXiv:2404.10283 [hep-ph]].
- [32] K. y. Oda and J. Wada, “Lorentz-covariant spinor wave packet,” Phys. Rev. D **110** (2024) no.7, 076001 doi:10.1103/PhysRevD.110.076001 [arXiv:2307.05932 [hep-th]].
- [33] C. Cordova and K. Ohmori, “Quantum duality in electromagnetism and the fine structure constant,” Phys. Rev. D **109** (2024) no.10, 105019 doi:10.1103/PhysRevD.109.105019 [arXiv:2307.12927 [hep-th]].
- [34] K. Inamura and K. Ohmori, “Fusion surface models: 2+1d lattice models from fusion 2-categories,” SciPost Phys. **16** (2024), 143 doi:10.21468/SciPostPhys.16.6.143 [arXiv:2305.05774 [cond-mat.str-el]].
- [35] C. Cordova, S. Hong, S. Koren and K. Ohmori, “Neutrino Masses from Generalized Symmetry Breaking,” Phys. Rev. X **14** (2024) no.3, 031033 doi:10.1103/PhysRevX.14.031033 [arXiv:2211.07639 [hep-ph]].

- [36] C. Copetti, M. Del Zotto, K. Ohmori and Y. Wang, “Higher Structure of Chiral Symmetry,” *Commun. Math. Phys.* **406** (2025) no.4, 73 doi:10.1007/s00220-024-05227-9 [arXiv:2305.18282 [hep-th]].
- [37] K. Kawabata, “Fermionic and parafermionic CFTs with $\widehat{su}(2)$ and $\widehat{su}(3)$ symmetry,” *JHEP* **02** (2025) 070 [arXiv:2411.01926 [hep-th]].
- [38] S. Shimamura, “Anomaly of subsystem symmetries in exotic and foliated BF theories,” *JHEP* **06**, 002 (2024) doi:10.1007/JHEP06(2024)002 [arXiv:2404.10601 [cond-mat.str-el]].
- (会議抄録)
- [39] S. F. Ge, C. F. Kong and P. Simoni Pasquini, “Measuring the leptonic Dirac CP phase with DUNE + μ THEIA,” *Nuovo Cim. C* **2024**, no.6, 365 (2024) doi:10.1393/ncc/i2024-24365-7
- (国内雑誌)
- [40] 永田夏海, 濱口幸一, 藤原素子, *日本物理学会誌* **79**, 242 (2024).
- (学位論文)
- [41] 博士論文: S. Hor, “Aspect of Nambu-Goldstone Higgs Grand Unified Theories and Proton Decays.”
- [42] 博士論文: G. Noshita, “Gauge Origami and BPS/CFT correspondence.”
- [43] 博士論文: K. Kawabata, “Fermionic CFTs from classical and quantum error-correcting codes.”
- [44] 博士論文: J. Wada, “Leptogenesis in gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ model.”
- (著書)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [45] K. Hamaguchi, “Exploring Physics Beyond the Standard Model via Temperature Observations of Neutron Stars,” *Nucleosynthesis and Evolution of Neutron Stars*, Jan.27-30, 2025, Kyoto University.
- [46] S. Hor, “Dark Matter Interactions in White Dwarfs: A Multi-Energy Approach to Capture Mechanisms,” 27th New Physics Forum, Nov. 21, 2024, University of Tokyo.
- [47] S. Hor, “Dark Matter Interactions in White Dwarfs: A Multi-Energy Approach to Capture Mechanisms,” *International Conference on Neutrinos and Dark Matter*, Dec. 11-14, 2024, Cairo, Egypt.
- [48] T. Sihanugrist, “Wavelike dark matter detection using qubits,” *PASCOS2024 conference*, Jul. 7-13, 2024, Quy Nhon, Vietnam.
- [49] T. Yokoyama, “Leptogenesis and Neutrinoless Double-Beta Decay,” *KEK-PH2025 winter*, Feb. 18-21, KEK, Japan.
- [50] J. Wada, “Thermal Leptogenesis in the Minimal Gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ Model,” *PLANCK 2024*, Jun. 3-7 2024, Lisbon, Portugal.
- [51] J. Wada, “Thermal Leptogenesis in the Minimal Gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ Model,” Jun. 10-14, 2024, *SUSY 2024*, Madrid, Spain.
- [52] J. Wada, “Lorentz-covariant spinor wave packet,” 27th New Physics Forum, Nov. 21, 2024, University of Tokyo, Japan.
- [53] H. Takahashi, “Constraining coexistence of kinetically mixed dark photons and primordial black holes via superradiance,” *New horizons for PSI*, Jul. 3, 2024, Instituto Superior Técnico, Portugal.
- [54] H. Takahashi, “Spontaneous leptogenesis,” *FoPM international symposium 2025*, Feb. 17, 2025, University of Tokyo, Japan.
- 招待講演
- [55] N. Nagata, “Challenges in the Dark Matter Search with Neutron-Star Temperature Observations”, *The 3rd workshop on Symmetry and Structure of the Universe*, International Convention Center, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea, Jul 28–Aug 2, 2024.
- [56] N. Nagata, “Vortex Creep vs WIMP DM Heating in Neutron Stars”, *DSU2024*, Corfu, Greece, Sep 8–14, 2024.
- [57] N. Nagata, “What will guide our future projects?”, *Workshop for Tera-Scale Physics and Beyond*, KEK, Tsukuba, Dec 19, 2024.
- [58] N. Nagata, “Probing Electroweak New Physics at Future e^+e^- Colliders”, *eeFACT 2025*, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Mar 3–7, 2025.
- [59] M. Yamazaki, “Dynamics Circuits in High Energy Theory and Beyond”, *Workshop on Quantum Computing Towards Utility Era with Quantum+HPC*, University of Tokyo, Mar. 10.
- [60] M. Yamazaki, “Quantum Parton Showers”, *QC4HEP Working Group Annual Meeting*, CERN, Jan. 24.
- [61] M. Yamazaki, “Crystal Melting and Quiver Algebras”, *Strings 2025*, Abu Dhabi, Jan. 7.
- [62] M. Yamazaki, “Ensemble Averaging in Quantum Gravity”, *Hitoshi Fest*, Kavli IPMU, Dec. 19.
- [63] M. Yamazaki, “Classical-Quantum Algorithms for Anomaly Detection”, *QUPosium 2024*, Tsukuba, Dec. 9.
- [64] M. Yamazaki, “Vertex Operator Algebras as Chiralization of Quiver Varieties”, *Seoul-Tokyo Conference in Mathematics 2024*, KIAS, Nov. 30.

- [65] M. Yamazaki, "Combinatorics of Dimers and Plane Partitions", Combinatorics at Sendai, Tohoku University, Nov. 21.
- [66] M. Yamazaki, "Jeffrey-Kirwan Residues and BPS Crystals/Algebras", Quantization in Representation Theory, Derived Algebraic Geometry, and Gauge Theory, SwissMAP Research Station, Les Diablerets, Sep. 18.
- [67] M. Yamazaki, "The Gauge/YBE Correspondence", Boğaziçi University, Sep. 12.
- [68] M. Yamazaki, "Tensor Networks and Renormalization Group Flows", Exact techniques and their applications, Tropea, Italy, Sep. 4.
- [69] M. Yamazaki, "Quantum Parton Shower with Kinematics", The XVIth Quark Confinement at the Hadron Spectrum Conference (QCHSC 2024), Cairns, Aug. 21.
- [70] M. Yamazaki, "From Countings to Algebras: A Tale of Calabi-Yau Geometries" ICBS 2024, BIMSA, China, Jul. 18.
- [71] M. Yamazaki, "3d N=4 Theories, Quiver Varieties and Vertex Operator Algebras", String-Math 2024, ICTP Trieste, Jun. 10.
- [72] M. Yamazaki, "Machine Learning at CMB-S4", CD3 Project Expo, Kavli IPMU, May 10.
- [73] Y. Matsuo, "Some applications of W-infinity/affine Yangian/QTA to physics", Geometry and Physics of Quantum Toroidal Algebra, Hanzhou, September 2-6, 2024.
- [74] K. Hamaguchi, "Dark Matter Heating of Neutron Stars: Advantages and Challenges," New Physics Directions in the LHC era and beyond, 22-26 Apr 2024, Max Planck Institute for Nuclear Physics, Heidelberg.
- [75] K. Hamaguchi, "Dark Matter Heating of Neutron Stars: Advantages and Challenges," FLASY 2024 24-28 June 2024, Irvine.
- [76] K. Hamaguchi, "Dark Matter Heating of Neutron Stars: Advantages and Challenges," The 4th DM-Net symposium 5-7 September 2024, IBS Daejeon.
- [77] K. Hamaguchi, "Dark Matter Heating of Neutron Stars: Advantages and Challenges," The 15th PPP workshop 21-24 October 2024, NTU.
- [78] K. Hamaguchi, "Exploring Physics Beyond the Standard Model via Temperature Observations of Neutron Stars," Hitoshi Fest, Kavli IPMU, Dec. 19, 2024.
- [79] K. Hamaguchi, "Standard Model and BSM," The 4th International Iwate Collider School (ICS2025), Iwate, Feb.24-Mar.1, 2025.
- [80] G. Noshita, "Gauge origami and quiver W-algebras," Geometry and Physics of Quantum Toroidal Algebra, Hangzhou, Sep. 1-6, 2024.
- [81] T. Moroi, "Dark Matter Detection using Qubits," KEK-PH2025 winter (February 18 - 21, 2025), Tsukuba, Japan.
- [82] T. Moroi, "Axion Dark Matter Detection with Superconducting Qubits," Dark World to Swamp-land, (November 5 - 14, 2024), Daejeon, Korea.
- [83] T. Moroi, "Detecting Dark Matter with Superconducting Qubits," Particle Physics Phenomenology Workshop, (October 21 - 24, 2024), Taipei, Taiwan.
- [84] T. Moroi, "Detecting Dark Matter with Superconducting Qubits," Unraveling the Particle World and the Cosmos at Berkeley, (September 26 - 28, 2024), California, U.S.A.
- [85] K. Ohmori, "Chiral Edge States Emerging on Anyon-Net," Generalized symmetries in QFT 2024, Oct. 4, 2024, Kyoto
- (国内会議)
- 一般講演
- [86] 横山達哉, レプトジェネシスとニュートリノレス二重ベータ崩壊, 日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 18-21 日.
- [87] 矢萩慎一郎, 対称群によるオービフォールド上のフェルミオン共形場理論と超対称性, 日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 18-21 日.
- [88] 高橋広季, 核子崩壊から探る大統一理論, 基研研究会素粒子物理学の進展 2024, 基礎物理学研究所, 2024 年 8 月 20 日.
- [89] 高橋広季, 核子崩壊から迫る大統一理論, 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 17 日.
- [90] 高橋広季, Chirality structure of nucleon decay effective interactions and sfermion flavor, Flavor Physics Workshop 2024, 蒲郡, 2024 年 12 月 3 日.
- [91] 高橋広季, Dark photon superradiance and its observational signatures, JOINT WORKSHOP ON GENERAL RELATIVITY AND COSMOLOGY, 秩父, 2025 年 3 月 10-11 日.
- 招待講演
- [92] 永田夏海, 中性子星温度観測を通じた新物理探索, 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 16 日.
- [93] 永田夏海, 次世代コライダーで探る新物理, 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 18 日.
- [94] 永田夏海, "A Review of the Contemporary Value of the Next-Generation e^+e^- Colliders", 高エネルギー物理 将来計画タウンホールミーティング, オンライン, 2024 年 9 月 21 日.
- [95] 山崎雅人, 固有状態熱化仮説の破れと場の理論の量子シミュレーション, JST 領域会議, 大阪, 2024 年 10 月 30 日.

- [96] 山崎雅人, "Topological-Holomorphic Quantum Field Theories", Factorization algebras and related topics, 箱根, 2024 年 8 月 13 日.
 - [97] 山崎雅人, 超弦理論の真空, 量子重力の視点で探る宇宙のダークサイド, 下関, 2024 年 8 月 3 日.
 - [98] 山崎雅人, 固有状態熱化仮説の破れと場の理論の量子シミュレーション, JST 領域会議, 仙台, 2024 年 4 月 17 日
 - [99] Koichi Hamaguchi, 将来のコライダー物理の展望, ワークショップ「将来コライダー実験に向けた共同研究」KEK, 2024-06-12.
 - [100] Koichi Hamaguchi, 標準模型を超える物理、マヨラナニュートリノ、レプトジェネシス, 第 1 回学術変革「地下稀事象」若手研究会富山大学, 2025 年 3 月 6 日 (木)-7 日 (金).
 - [101] 野下剛, 無限次元量子代数を用いた超対称ゲージ理論・超弦理論の数理解的研究, 日本物理学会 2025 年春季大会 若手奨励賞受賞記念講演, 2025 年 3 月 18 日
 - [102] 諸井健夫, 量子ビットを用いた暗黒物質検, 日本物理学会第 79 回年次大会, 札幌, 2024 年 9 月 16 日
 - [103] 諸井健夫, Dark Matter Detection using Qubits, 杜の都素粒子ワークショップ, 仙台, 2025 年 3 月 14 日 (セミナー)
 - [104] N. Nagata, "Axionic Wormholes and Non-Minimal Gravitational Coupling" Ibaraki University, Ibaraki, Jan 31, 2025.
 - [105] N. Nagata, "Electric Dipole Moments as Probes of New Physics: Recent Status" Nagoya University, Aichi, Jul 22, 2024.
 - [106] M. Yamazaki, "Quantum Algorithms for Quantum Parton Showers", ICEPP, University of Tokyo, Oct. 23.
 - [107] 山崎雅人, 量子力学の数学とは何か, 談話会, 東北大学, 2024 年 4 月 22 日.
 - [108] K. Akita, "Limits on heavy neutral leptons, Z' bosons and majorons from high-energy supernova neutrinos" Technical University of Munich, Munich, July 8, 2024.
 - [109] K. Akita, "Limits on heavy neutral leptons, Z' bosons and majorons from high-energy supernova neutrinos" Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, July 10, 2024.
 - [110] K. Akita, "Limits on heavy neutral leptons, Z' bosons and majorons from high-energy supernova neutrinos" KEK, Tsukuba, September 24, 2024.
 - [111] K. Akita, "Limits on heavy neutral leptons, Z' bosons and majorons from high-energy supernova neutrinos" RIKEN, Saitama, January 10, 2025.
 - [112] K. Hamaguchi, "Supernova-scope axion for the Direct Search of Supernova Axions," PRISMA Colloquium, JGU Mainz, April 17, 2024.
 - [113] K. Hamaguchi, "Supernova-scope axion for the Direct Search of Supernova Axions," TUM, April 19, 2024.
 - [114] K. Hamaguchi, "Exploring Physics Beyond the Standard Model via Temperature Observations of Neutron Stars," Hokkaido U. seminar, May 24, 2024.
 - [115] K. Hamaguchi, ニュートリノ、標準模型を超える物理、宇宙の物質反物質非対称性の謎、神奈川大学 理学部 セミナー、2024 年 5 月 10 日.
 - [116] G. Noshita, "Gauge origami and BPS/CFT correspondence," Rikkyo University, Apr. 30, 2024.
 - [117] G. Noshita, "Gauge origami and BPS/CFT correspondence," Nagoya University, Nov. 29, 2024.
 - [118] G. Noshita, "Gauge origami and BPS qq -characters," Tokyo Science University, Dec. 20, 2024.
 - [119] G. Noshita, "Gauge origami and BPS qq -characters," Shanghai Institute for Mathematics and Interdisciplinary Sciences (SIMIS), Feb. 27, 2025.
 - [120] T. Sichanugrist, "Search for the wavelike dark matter with superconducting qubits and quantum circuit," Particle theory group, The University of Chicago, Oct. 9, 2024.
 - [121] T. Sichanugrist, "Search for the wavelike dark matter with superconducting qubits and quantum circuit," Jesse Thaler group, Massachusetts Institute of Technology, Oct. 15, 2024.
 - [122] J. Wada, "Majoron-Driven Leptogenesis in Gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ Model", Kyoto University, Jul. 31, 2024.
 - [123] J. Wada, "Thermal Leptogenesis in the Minimal Gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ Model", Nagoya University, Nov. 26, 2024.
- (集中講義)
- [124] 永田夏海, "素粒子現象論の基礎", 東京科学大学, 2024 年 11 月 18-20 日.
 - [125] 山崎雅人, "場の量子論の数理", 東北大学, 2024 年 4 月 23 日-26 日.

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 physics group; NEX) は中村教授、永尾助教、修士学生 4 名からなる中村研究室と 2024 年 12 月に着任した鈴木准教授が立ち上げた鈴木研究室の 2 研究室体制で研究を進めている。中村、鈴木研究室が取り組んでいる研究テーマは異なるが、大学院生の居居や実験室は共通とし、セミナーなども共同で行っている。また、原子核実験グループは 2024 年 7 月に理学系研究科に新たに設置されたクォーク・核物理研究機構に参画し、国際共同研究を牽引している。

以下、2024 年度の中村研究室の研究活動について報告する。

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) 米国ジェフアーソン研究所 (JLab)、2) ドイツマインツ大学 (MAMI)、3) 東北大学先端量子ビーム科学研究センター (RARiS) 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国際共同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、新たに設置された S-2S スペクトロメータを用いたハイパー核分光実験に参画し、さらに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重要な未解決問題として 1) ハイパートライトンパズル、2) ラムダハイパー核の荷電対称性の破れ、3) 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^+) 反応を用いて研究されてきたが、我々は 2000 年より米国ジェフアーソン国立研究所 (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)。

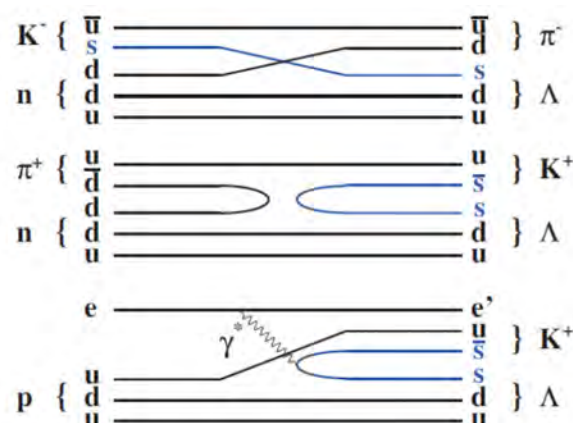


図 2.1.1: 典型的なラムダ粒子生成反応。上から (K^-, π^-), (π^+, K^+), ($e, e'K^+$) 反応

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。

実験データの解析と並行して、チェコ科学アカデミーの理論グループとの共同研究によりアイソバーモデルを用いたハイペロン電磁生成反応の理論計算を遂行した。ハイペロン電磁生成断面積は横成分、縦成分とそれらの干渉項に分離して議論することができるが、今回、我々が得た実験結果と比較することで、本運動学領域においては、実光子ビームを用いた光生成反応では観測することのできない縦成分の寄与が大きいことを見出した。

η' 電磁生成

$p(e, e'K^+)$ 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。現在、実験データの解析と理論的解析を並行して進めている。

$(e, e'K^+)$ 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密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なかったような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}Ca , ^{48}Ca という貴重な同位体濃縮した標的を用意し、 $(e, e'K^+)$ 反応を用いて $^{40}_{\Lambda}\text{K}$, $^{48}_{\Lambda}\text{K}$ 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 $^{208}\text{Pb}(e, e'K^+)^{208}\text{Tl}$ 反応による $^{208}_{\Lambda}\text{Tl}$ 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。

さらに、 $^6_{\Lambda}\text{He}$, $^9_{\Lambda}\text{Li}$, $^{11}_{\Lambda}\text{Be}$ という比較的軽いハイパー核を JLab において精密分光し、J-PARC においてそれらのアイソスピンパートナーを (π^+, K^+) 反応を用いて測定、比較することにより ΛN 相互作用の荷電対称性の破れを詳細に調べることができる実験; ^{27}Mg という三軸非対称性変形が期待されている原子核に p 軌道に入った Λ 粒子を束縛させることにより、 Λ 粒子をプローブとして原子核の変形を内側から測定する実験; さらに次に述べる電磁生成したラムダハイパー核の崩壊 π^- 中間子分光法を JLab の最強電子ビームを用いて発展させる実験等の新しいアイデアを JLab 課題採択委員会に提案し、全ての実験が採択された。

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 $^A_Z \rightarrow ^A_{Z+1} + \pi^-$ 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 $(e, e'K^+)$ 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、 $(e, e'K^+)$ 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 ($^4_{\Lambda}\text{H}$) 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 $^4_{\Lambda}\text{H}$ 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ジェファソン研究所において発展させる準備を進めている。

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 ($^3_{\Lambda}\text{H}$) 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。 $^3_{\Lambda}\text{H}$ は最も単純なハイパー核であり厳密三体計算が可能なることから、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 $^3_{\Lambda}\text{H}$ 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 CERN LHC の ALICE 実験よりまた異なった $^3_{\Lambda}\text{H}$ 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 $^3_{\Lambda}\text{H}$ 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 $^3_{\Lambda}\text{H}$ 質量を測定できる。

この実験を実施するべく 2022 年に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。その後、実験を遂行、データを収集し、これまでの実験で測定した統計量の約 2 倍の物理データを取得し、 $^3_{\Lambda}$ のピークを観測することに成功した。現在、最終的な解析を進めている。

放射光干渉法によ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

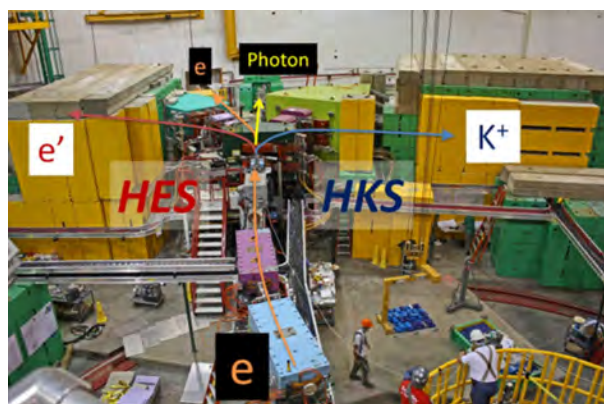


図 2.1.2: JLab Hall-C 実験室に設置した HKS(高分解能 K 中間子スペクトロメータ) と HES(高分解能電子スペクトロメータ)

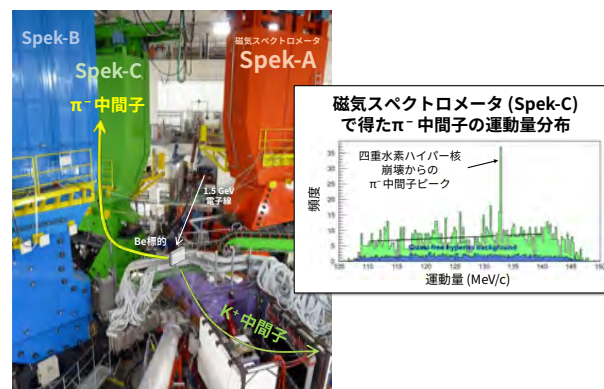


図 2.1.3: (左) MAMI の実験セットアップ。緑色の Spek-C 検出器と紫色の Kaos 検出器で崩壊 π^- と K^+ 中間子を測定する。(右) MAMI で観測した ${}^4\text{H}$ からの π^- 中間子ピーク。世界最高分解能、精度による観測結果。

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」を新たに開発した。

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。

磁気スペクトロメータの高精度較正

磁気スペクトロメータ Spek-A, B, C の運動量較正実験を 2024 年に実施しデータを得ることに成功した。これは、前述の電子ビームエネルギー高精度測定と電子-原子核弾性散乱を組み合わせた実験となっており、取得した ${}^3\text{H}$ 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を凌駕する精度で ${}^3\text{H}$ の質量を決定できると期待される。

2.1.3 RARiS 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、東北大学先端量子ビーム科学研究センター (RARiS, 旧 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 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 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、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 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、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 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、RARiS 三神峯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 $10\ \mu\text{m}$ 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。

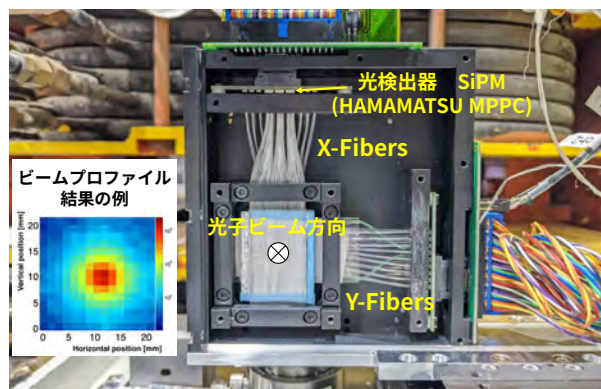


図 2.1.4: 新設した光子ビームプロファイルモニターと測定結果例。背景にあるのは荷電粒子バックグラウンドを除去するための大きな電磁石の一部。

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、実験の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 $\gamma d \rightarrow \Lambda n K^+$ 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 におけるハイパー核研究

大強度陽子加速器施設 J-PARC において、軽いハイパー核の寿命精密測定実験、 Ξ ハイパー核分光実験、および今後、予定している (π^+, K^+) 反応を用いた Λ ハイパー核分光実験に参画している。さらに J-PARC においては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。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 $(e, e'K^+)$ 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することになる。 (π^+, K^+) 反応と $(e, e'K^+)$ 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 国際量子物理ネットワーク

2024 年 7 月 1 日、フェムトメートルスケール (1 兆分の 1mm、ナノメートルの 100 万分の 1)、そしてさらに小さな極微の量子多体系の物性を研究する学問として原子核物理学を革新的進化させる新しい研究組織 クォーク・核物理研究機構 (QNSI) が東京大学理学系研究科に発足した。我々、物理学専攻原子核実験グループは原子核科学研究センター、理論グループと共同して、低、中間、高エネルギーの全エネルギー領域に渡る原子核物理学を国際的に展開する QNSI の研究活動に参画し、国際量子物理ネットワークの構築を牽引している。

<受賞>

- [1] 西幸太郎, 第 79 回年次大会 (2024 年) 日本物理学会学生優秀発表賞 (ビーム物理領域), 日本物理学会, 2024 年 10 月 16 日

<報文>

(原著論文)

- [2] S.N. Sentisteban *et al.*, “Novel Measurement of the Neutron Magnetic Form Factor from $A = 3$ Mirror Nuclei”, *Phys. Rev. Lett.*, **132** (2024) 162501.
- [3] K. Okuyama *et al.*, “Electroproduction of the Λ/Σ^0 hyperons at $Q^2 \sim 0.5(\text{GeV}/c)^2$ in forward angles”, *Phys. Rev. C*, **110** (2024) 025203.

- [4] R. Kino *et al.*, “Development of a real-time beam profile monitor for GeV photons and its application in accelerator facilities”, Nucl. Inst. and Meth. **A 1070** (2024) 169992.

(会議抄録)

- [5] P. Achenbach *et al.*, “The hypernuclear physics program at Jefferson Lab”, Il Nuovo Cimento. **47 C** (2024) 231.
- [6] S. Nagao *et al.*, “High-resolution hypernuclear decay pion spectroscopy at MAMI and future”, Il Nuovo Cimento. **47 C** (2024) 232.
- [7] P. Achenbach *et al.*, Mini-Proceedings of the “Fourth International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (HEF-ex 2024)”, arXiv:2409.00366 [nucl-ex].

(学位論文)

- [8] 西 幸太郎, 「電子ビームエネルギー精密測定のためのアンジュレータ放射光干渉法」 (Undulator radiation interferometry for electron beam energy measurement), 修士 (理学), 2025 年 3 月
- [9] 西田 賢, 「高分解能飛行時間検出器の開発およびハイパー核崩壊 π^- 中間子分光実験への応用」 (Development of high-resolution time-of-flight detector and application to decay pion spectroscopy of hypernuclei), 修士 (理学), 2025 年 3 月

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [10] S. Nagao “Hypernuclear projects of the high-resolution mass spectroscopy at JLab”, SPICE: Strange hadrons as a Precision tool for strongly Interacting systems, May 13-17 (2024) ECT* Toronto, Italy.
- [11] S. Nagao, “High-resolution hypernuclear spectroscopy with the $(e, e'K^+)$ reaction and the decay pion measurement at JLab”, International Workshop on J-PARC hadron physics 2024 (J-PARC Hadron 2024), July 23-25 (2024), J-PARC Ibaraki.
- [12] S.N. Nakamura, “Future High Resolution Spectroscopic Studies of Λ Hypernuclei at J-PARC and JLab”, The 4th J-PARC Symposium, October 14-18 (2024), Mito Ibaraki.
- [13] S. Nagao, “Mass spectroscopy of electro-produced hypernuclei by decay pions at MAMI and JLab”, International Workshop on J-PARC hadron physics 2024 (J-PARC Hadron 2024), July 23-25 (2024), J-PARC Ibaraki.
- [14] S.N. Nakamura, “Future hypernuclear studies at J-PARC and JLab”, 2nd Workshop Science at the Luminosity Frontier: Jefferson Lab at 22 GeV (LNF-INFN 2024), December 9-13 (2024) Frascati Italy.

一般講演

- [15] K. Nishida, “Prospect of Decay-pion-spectroscopy of light Λ -hypernuclei at JLab” SNP-CNS Summer School 2024, August 3 (2024), UTokyo, Hongo Japan.
- [16] K. Higashimoto, “Performance evaluation of Water Cherenkov Counters for the Hypernuclear Experiments at JLab”, SNP-CNS Summer School 2024, August 6 (2024), RIKEN, Wako Japan.
- [17] K. Nishi, “Spectrometer calibration with the Undulator Radiation Interferometry”, SNP-CNS Summer School 2024, August 6 (2024), RIKEN, Wako Japan.
- [18] K. Nishi, “Synchrotron Radiation Profiling in Undulator Synchrotron Radiation Interferometry for Electron Beam Energy Measurement”, KEK Theory Center One-day workshop “Nuclear physics with Strangeness and Clusters”, February 27 (2025), KEK, Japan
- [19] K. Nishi, “Undulator radiation interferometry for electron beam energy measurement”, FoPM International symposium, February 18 (2025), Hongo Japan
- [20] S. Nagao, “High-resolution spectroscopy for new determination of Lambda binding energies in light hypernuclei at JLab”, The 21st International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure (HADRON2025), March 28 (2025), Osaka Japan.

(国内会議)

一般講演

- [21] 西幸太郎, 「原子核実験におけるアンジュレータ放射光干渉法による電子ビームエネルギー測定」, 2024 年 7 月 31 日, 日本加速器学会年会, 秋田
- [22] 東北海旺, 「JLab におけるハイパー核分光実験用水チェレンコフ検出器の最適データ読み出し手法の決定」, 原子核三者若手夏の学校 2024, 2024 年 8 月 22 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター
- [23] 西幸太郎, 「アンジュレータ放射光干渉法による電子ビームエネルギー精密測定を応用したスペクトロメータ校正」, 原子核三者若手夏の学校 2024, 2024 年 8 月 23 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター
- [24] 西幸太郎, 「アンジュレータ放射光干渉法によるサブ GeV 領域電子ビームエネルギー測定 高エネルギー原子核実験への応用」, 2024 年 9 月 16 日, 日本物理学会 2024 年第 79 回年次大会, 北海道大学
- [25] 西田賢, 「JLab における崩壊パイ中間子分光法を用いたラムダハイパー核の質量測定実験の準備状況」, 2024 年 9 月 18 日, 日本物理学会 2024 年第 79 回年次大会, 北海道大学
- [26] 東北海旺, 「JLab におけるハイパー核分光実験用水チェレンコフ検出器の読み出し手法の改良」, 2024 年 9 月 19 日, 日本物理学会 2024 年第 79 回年次大会, 北海道大学

- [27] 西幸太郎, 「アンジュレータ放射光干渉法 -原子核実験における放射光を利用した電子ビームエネルギー精密測定-」, 2025 年 3 月 14 日, ビーム物理研究会・若手の会, けいはんなプラザ
- [28] 西幸太郎, 「アンジュレータ放射光干渉法による電子ビームエネルギー測定 (2)」, 2025 年 3 月 18 日, 日本物理学会 2025 年第 79 回春季大会, オンライン
- [29] 西田賢, 「JLab における崩壊パイ中間子分光実験に用いる高分解能飛行時間検出器の開発」, 2025 年 3 月 21 日, 日本物理学会 2025 年第 79 回春季大会, オンライン
- [30] 東北海旺, 「JLab におけるハイパー核分光実験のための磁気スペクトロメータ角度校正用コリメーターの設計」, 2025 年 3 月 21 日, 日本物理学会 2025 年第 79 回春季大会, オンライン
- [31] 高橋仁, 「JLab ハイパー核分光実験におけるモンテカルロシミュレーターを用いた標的近傍の放射線量の評価」, 2025 年 3 月 21 日, 日本物理学会 2025 年第 79 回春季大会, オンライン
- (セミナー)
- [32] 永尾翔, 「ストレンジネス核物理とは」, 原子核三者若手夏の学校 2024, 2024 年 8 月 22 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター
- [33] S. Nagao, “Hypernuclear Experiment”, KEK Theory Center workshop, February 16 2025, Tsukuba
- (アウトリーチ)
- [34] 中村哲, 「アインシュタインの相対性理論」, 荒川区自然科学フォーラム特別講義, 2024 年 7 月 6 日, 東京大学本郷キャンパス理学部 4 号館 1220 教室
- [35] 中村哲, 「粒子加速器を使って見るフェムトメートルの世界 ~現在の『錬金術師』が挑戦する科学の最前線~」, サイエンスフロント MITAKA, 2024 年 10 月 26 日, 三鷹ネットワーク大学 (教室、オンライン同時開催)
- [36] 中村哲, 「中性子星のミニチュアを地上に作る」, Web Magazine リガクル 理学のフロンティア, 2024 年 7 月 1 日, <https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/rigakuru/research/wICP6czt/>
- [37] 西幸太郎, 『「測定デバイス」を測定する』, Web Magazine リガクル 学生たちの声, 2025 年 1 月 6 日, <https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/rigakuru/students/6f6DeXZM/>
- (国際会議・国際スクール主催)
- [38] School Chairs: S.N. Nakamura, Y. Sakemi, A. Hosaka, K. Miwa and T. Takahashi, SNP CNS Summer School 2024, August 3-8 (2024), Hongo and Wako, Japan.

2.2 原子核実験グループ（鈴木研究室）

鈴木研究室は 2024 年 12 月に鈴木准教授の着任とともに発足した原子核物理（実験）の新しい研究室である。物理学教室の原子核実験グループの一員として中村研究室と緊密に連携している。またクォーク・核物理研究機構 (QNSI) の核子多体系研究部門にも所属し、理化学研究所 RI ビームファクトリーを中心とした国内外の先端加速器施設において国際研究を展開している。

本研究室の専門は核子多体物理である。放射性同位体 Radioactive Isotope (RI) の量子ビームを用いた原子核・核物質・天体核の研究を推進している。特に中性子数・陽子数のアンバランスな非対称原子核の分光・反応実験を軸に、ミクロな超短寿命核からマクロな中性子星・爆発的天体現象まで縦断的に現代核物理学の諸問題に挑戦している。

原子核物理は宇宙のハドロン物質の成り立ちと進化を主題とした非常に広範な学問領域であるが、本研究室の専門領域である核子多体系 (原子核・核物質) は、量子色力学 (QCD) の低エネルギー極限領域に現れる陽子と中性子 (総称して核子) からなる量子多体系である。ハドロン多体系の中では ud セクターのみが関与する一見シンプルな系だが、実際には QCD による直接計算が極めて困難であることが知られている。特に核子間に作用する核力と媒質中における多体相関は非常に複雑であり、未だに謎も多く、予想外の多彩な物理現象を引き起こす源泉となっている。

核子多体物理は古くは地上の安定核の研究に限定されていたが、90 年代に誕生した重イオン RI ビーム (重イオンの核を RI に置換したビーム) 施設の技術革新により、光速の約 10 %~70 %に加速した RI ビームによって地上に存在しない超短寿命な原子核や核物質の疑似状態を人工生成し量子散乱を行うことが可能となった。特に世界初の第三世代施設である RI ビームファクトリー (RIBF) の成功を契機として、現在世界的な RI ビーム施設の建設ラッシュが起こっている。

我々は三つの主題 (1) エキゾチック原子核、(2) 核物質、そして (3) 天体核に関わる様々な問題に、電弱プローブ (電磁気力と弱い力) とハドロン・プローブ (強い力) を駆使した RI ビーム実験により挑戦している。また、中長期プロジェクトとして、RIBF 高度化計画に積極的に参画している。本計画はビーム蓄積リングに基づくビーム・リサイクリング技術を RI ビーム生成に始めて応用する革新的なプロジェクトであり、RI ビームのインテンシティ・フロンティアを開拓する試みである。

2.2.1 エキゾチック原子核

自律的な有限量子系である原子核を対象に、その構造とダイナミクスの創発機構をめぐる研究を行っている。地上に存在しない短寿命エキゾチック原子

核の研究は核子多体論の中でも最もアクティビティの高い分野の一つである。我々はとりわけ原子核の非対称度（アイソスピン）が核内平均場（殻構造）の進化、核変形、量子揺らぎ、非一様性などに与える影響を明らかにすることを目指している。

なお 2025 年は独立粒子運動・集団運動に関するコペンハーゲン学派の理論研究にノーベル賞が与えられた 1975 年から半世紀の記念すべき年にあたる。我々は QNSI の共催で国際シンポジウム Single-particle and collective motions from nuclear many-body correlation (PCM2025) を 2025 年 3 月に会津大学において開催し、本分野における近年の実験・理論研究の成果を振り返り将来の展望を議論した。会議には国内外から 100 名を超える研究者が集まり交流を深めた [18]。

インビーム・ガンマ線核分光法による核変形の研究

ほとんどの原子核は球対称性を破って変形していることが知られている。近年飛躍的に進展した微視的核構造計算では、アイソスピンの変化が多彩な核変形現象を引き起こすことが示唆されており、実験への期待が高まっている。核変形を調べるうえで重要なのはガンマ線による分光情報である。ガンマ線輻射は原子核のもつ対称性に対して強い感度を有するため、遷移確率や角度分布の情報から核構造に迫ることが可能である。そのため RI ビームによるインビーム・ガンマ線核分光法は核変形研究の強力な手法として用いられてきた。我々は次世代実験に向けて、三次元トラッキング型ゲルマニウム半導体検出器に注目している。本検出器では、ゲルマニウム結晶のシグナルを波形解析することにより、結晶内における相互作用点を再構築することが可能である。原子核がビームとして高速で運動している逆運動学実験においてはドップラー効果によるエネルギーシフトが問題となるが、相互作用点の情報から高精度なシフト補正が可能となる。

我々は第一歩として、理研仁科センター・大阪大学核物理研究センター (RCNP)・ケルン大学・米国ローレンス・バークレー国立研究所 (LBNL)・中国科学院近代物理研究所 (IMP) 等と共に国際共同研究 HiCARI プロジェクトを主導した。本プロジェクトでは、RCNP と LBNL が開発したトラッキング検出器を RI ビームファクトリーにおけるインビームガンマ線分光実験に初めて投入し、様々な RI に対し従来に比べてはるかにエネルギー分解能の優れた分光情報を得ることに成功した。2023 年度には HiCARI の後継プロジェクトである GT-5 プロジェクトを立ち上げ、次世代ガンマ線テレスコープの開発を開始した。現在、トラッキング検出器一基を調達し、性能評価試験を進めている [10]。

変形相転移現象の研究

中性子過剰な Zr 同位体では、中性子数が 60 に達すると突如として基底状態の形状が球形から変形状



図 2.2.5: GT-5 プロジェクトにおいて性能評価試験中の三次元トラッキング型ゲルマニウム半導体検出器

態へと転移することが知られている（変形相転移現象）。しかし、核変形の発現にともなう核内の平均場の変化に関する情報は限定的であり、相転移を誘導する微視的な機構は明らかではない。そこで我々は、核子移行反応を用いたガンマ線核分光実験を RI ビームファクトリー減速ビームライン OEDO において計画している。核変形に感度をもつガンマ線と平均場に対して感度を持つ反跳陽子を同時計測することにより、核変形と平均場の関係性を解明する。反跳陽子を測定するために、荷電粒子に対して透過度の高い薄い液体水素標的の開発を開始した。また、ガンマ線検出器として CsI シンチレータ・テレスコープを韓国基礎科学研究院 (IBS) のグループと共同で開発している。

高次変形の探索

核変形の主要なモードは軸対称な四重極だと考えられてきた。一方、近年の高度な理論計算により、高次変形（八重極、十六重極、非軸対称性）の重要性が示唆されている。LHC や RHIC における相対論的重イオン衝突実験においても高次変形の存在を示すデータが出てきており、RI ビームによる分光実験への期待が高まっている。

我々は HiCARI 実験のデータ解析により、中性子過剰なモリブデン同位体で新たな励起状態を発見し非軸対称変形の発達を示唆した [3]。また現在、Xe~Nd 領域において予言されている八重極変形状態を明らかにする実験を RI ビームファクトリー減速ビームライン OEDO において計画している。本実験では、八重極変形の変形度に強い感度をもつ E3 電磁遷移確率を陽子非弾性散乱により評価することを目指している。目的核の準位密度が高いことから、八重極変形した量子状態を識別するためにはガンマ線のエネル

ギーを高い精度で決定することが重要となる。GT-5 プロジェクトで開発中のゲルマニウム半導体検出器を用いることで、この問題を解決することを目指す。

共鳴状態におけるミラー対称性の検証

ミラー対称性（陽子と中性子の入れ替えに対する対称性）は核構造のもつ基本的な対称性である。しかし、原子核の束縛限界であるドリップラインの近傍では、平均場に弱く束縛された核子が散乱状態と結合することによって、核構造のミラー対称性を破ることが予想されている。特に高いアイソスピン $T_z = 2$ をもつ中性子過剰な ${}^8\text{He}$ の対称性は注目を集めている。この問題を明らかにするために、フランス国立重イオン加速器研究所 GANIL で実験を行った。我々は $T_z = -2$ 状態の ${}^8\text{He}$ と対称な ${}^8\text{C}$ ($T_z = 2$) に着目し、これまで観測されていなかった 2^+ 励起状態の分光を行った。 ${}^8\text{C}$ は非束縛な原子核であるため、RI ビームとして直接得ることができない。そこで我々は中性子が1個加わった RI である ${}^9\text{C}$ ビームと液体水素標的を反応させることで、中性子剥離 (p, d) 反応により ${}^8\text{C}$ における 2^+ 励起状態の共鳴を初めて観測することに成功した。 ${}^8\text{C}$ の共鳴エネルギーの測定値が、 ${}^8\text{He}$ とほぼ変わらないことを明らかにした。本結果はドリップライン外側の共鳴領域に至っても、予想に反しエネルギー準位のミラー対称性は破綻しないことを示すものである [12]。

本業績により、小山俊平氏（旧櫻井研出身、現理研基礎科学特別研究員）が第19回（2025年）日本物理学会実験核物理領域：若手奨励賞（第31回原子核 談話会新人賞）を受賞した。



図 2.2.6: フランスの加速器施設 GANIL で行った実験で用いたシリコン半導体テレスコープ MUST2

短距離相関現象の研究

原子核構造は一般的に平均場によって記述される。しかし、核子移行反応・核子ノックアウト反応法を用いた研究により、平均場中に生成される核子の数は、全核子数の6~7割に過ぎないことが知られている（クエンチング問題）。残りの核子がどのような構造を作っているのかは、核構造論の未解明の謎である。

近年米国トーマス・ジェファーソン国立加速器施設の電子散乱実験において、高運動量領域の陽子・中性子が強く相関する現象（短距離相関現象）がクエンチング問題の原因の一つであることが示唆された。本現象は原子核の非対称度に対して依存性をもつことが予想されるため、クエンチングの変化を非対称度の高い原子核で検証することが課題となっている。そこで我々は陽子過剰な ${}^9\text{C}$ および ${}^8\text{B}$ のクエンチングを定量的に評価するために中性子剥離 (p, d) 反応を測定した。本研究では系統誤差のコントロールを注意して実施した。まず目的核のデータとベンチマークである安定核 ${}^{12}\text{C}$ のコントロール・データを共通のセットアップで計測することにより、実験装置に起因する系統誤差を低減した。また誤差評価した光学ポテンシャル・パラメータを用いることで、反応模型起源の誤差を定量的に評価した。これらの手法により、誤差情報が明瞭な信頼度の高いデータを得ることに成功した。本データ解析は最終しており、現在データ解釈の議論を進めている [12]。

2.2.2 核物質

非対称核物質（中性子過剰な核物質）の性質は、中性子星の構造、超新星爆発や中性子星合体の機構、あるいはこれらの天体現象における元素合成に影響を及ぼす。核物質の硬さを表現する状態方程式の非対称項は不定性が大きいと、地上実験において制限を与える研究を行っている。

重イオン衝突実験による状態方程式の研究

重イオン衝突は、スズのような重い元素の高速ビームと標的を衝突させることで、密度の高い核物質を超短時間生成する有力な手法である。RI ビームファクトリーのエネルギー ($\beta \sim 0.6$) のビームを用いると飽和密度（通常原子核密度）の約2倍の核密度を実現することが可能である。SπRIT プロジェクトは、核物質から放射される荷電パイ中間子をプローブとして状態方程式の非対称項の情報を得ることを目指している。SAMURAI 磁気スペクトロメータ内部に三次元飛跡検出器 Time Projection Chamber (TPC) を組みこむことで、衝突点で発生する多重度の高い粒子群の中から荷電パイ中間子を識別し運動量分析することを実現した。2024年度は過去の実験に比べエネルギーの高い核子当たり 320 MeV においてキセノン・ビームを用いたデータ収集を行った。より高密度な状態を実現できることに加え、非共鳴パイ中間子生成を抑制することで系統誤差を低減できることが期待される [11, 13]。

重陽子非弾性散乱による非圧縮率の研究

中性子過剰核の非圧縮率は、状態方程式の対称項を強く反映することが知られている。原子核の非圧縮率を評価する手法として、アイソスカラー型の単

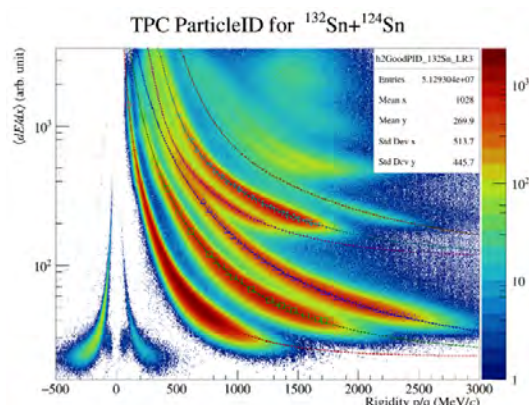


図 2.2.7: S π RIT TPC による荷電粒子の粒子識別図。横軸は磁気剛性、縦軸はエネルギー損失。荷電パイ中間子のイベントが図中左下に見える。

極巨大共鳴（ISGMR）の測定がある。ISGMR を励起するには、アイソスカラー粒子である重陽子を用いた非弾性散乱が有効な手法となるが、RI ビームを用いた ISGMR の測定は実験的な難易度が著しく高く、ニッケル領域の例外的な測定を除けば実現されていない。これは、散乱後の重陽子が極めて低エネルギーにあり、その計測が困難だからである。本研究では、3 次元飛跡検出器 TPC の技術を応用したアクティブ重陽子ガス標的 CAT-M を開発し、この問題を克服した。本装置は、TPC の飛跡媒質である重水素ガスを散乱標的として用いることで、数 100 keV 程度の低エネルギーまで散乱粒子を標的内部で検出することを可能にする。

本装置を用いた原理検証実験を量子科学技術研究開発機構のシンクロトロン加速器施設 HIMAC において実施した。本実験では、安定なクリプトン・ビームを用いることで ^{86}Kr の ISGMR を初めて観測することに成功し、クリプトンの最も中性子過剰な安定同位体における非圧縮率のデータを得た。これにより測定システムの有効性が実証されたので、今後 RI ビームファクトリーにおける RI ビームを用いた系統的な計測を展開してゆく予定である [13]。

2.2.3 天体核

宇宙における元素の起源の解明を目指した研究を行っている。特に太陽では合成できない鉄より重い元素の起源に注目し、その起源天体現象として予想されている超新星爆発・中性子星合体・キロノバ・中性子星-ブラックホール合体等の高温・高密度な環境下で駆動される核反応過程を RI ビーム実験により調べている。

代理法による RI の中性子捕獲断面積の測定

原子核による中性子捕獲は、宇宙における重元素合成機構である s 過程・r 過程の本質的な素過程である。また、原子核の社会実装における役割も多岐に及ぶ。r 過程のように中性子過剰な原子核が駆動する機構や原子炉における放射性廃棄物の反応過程を理解するには、短寿命 RI の中性子捕獲断面積が主要なデータとなる。しかし、実用的な中性子の散乱標的は今現在実現されておらず、RI ビームにより中性子捕獲断面積の直接測定データを得ることは実質的には不可能である。そこで我々は、重陽子標的を用いた代理法を開発した。本手法では重陽子内で緩く束縛された中性子を利用して、RI ビームに中性子を移行する反応（中性子移行 (d,p) 反応）を計測することで、中性子捕獲断面積を間接的に評価するものである。本手法の評価精度を向上するうえで重要になるのは、低エネルギーで反応を誘導することである。我々は RI ビームファクトリー減速ビームライン OEDO において、本手法を始めて RI ビームに応用することに成功した。我々の開発したシリコン半導体テレスコープ TiNA により、(d,p) 反応で反跳した陽子を計測し、断面積の励起関数を得た。また磁気スペクトロメータにより散乱核を識別することで、捕獲後の複合状態の崩壊分岐比を直接測定した。熱中性子炉の主要な放射性廃棄物である長寿命核分裂片 ^{79}Se の断面積を評価することに成功した [11]。

モリブデン元素の起源の研究

モリブデン同位元素は宇宙における合成起源は、天体核物理の大きな謎の一つである。現在、多くの重元素は中性子過剰度の高い環境下における s 過程・r 過程と、これらの過程の合成物の光分解で生成されると考えられている。しかし、モリブデンの最も軽い同位体 ^{92}Mo の存在比（約 14%）は従来の標準的な元素合成シナリオの予想値に比べ異常に大きく、未知の元素合成天体と新たな合成機構の存在が予想されている。近年、超新星爆発のシミュレーションの高度化にともない、ニュートリノ風に暴露された爆発残骸の核物質内における水素燃焼過程が注目されている。ただし本過程は二重魔法核 ^{56}Ni において強力な滞留点をもつことが大きな問題だった。この滞留点を解消するシナリオとして、反ニュートリノにより陽子から転換された中性子を ^{56}Ni が捕獲する反応過程が提案されている。我々は減速ビームライン OEDO に実装した代理法システムを用いて $^{56}\text{Ni}(n,p)$ 反応の断面積を評価する実験を行った。本実験では、核子当たり 15 MeV の ^{56}Ni ビームを用いて代理反応である $^{56}\text{Ni}(d,p)$ 反応の測定を実現した。現在、データ解析を進めている [9, 13]。

2.2.4 RI ビームファクトリー高度化計画

理研仁科センターは現在、RI ビームファクトリー (RIBF) の中長期計画として RIBF 高度化計画を推

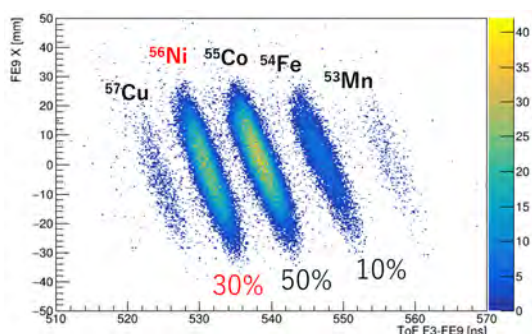


図 2.2.8: 減速ビームライン OEDO における RI ビームの識別図。横軸は飛行時間、縦軸は横方向の位置。本実験の目的核である ^{56}Ni が不純物である他の原子核と分離されていることが分かる。

進している。RIBF は世界初の第三世代 RI ビーム施設として、2007 年の稼働開始以来、最高峰のビーム強度を実現してきた。本計画は、現在のビーム強度のボトルネックとなっている多価状態への変換効率をイオンビーム蓄積リングという技術によって格段に向上し、ビーム強度を一桁以上増強することを目的とする。本研究室は、RIBF 高度化により切り開く物理として、核分裂現象に注目している。核分裂は発見からもうすぐ 1 世紀がたち社会実装も多岐に及ぶ。最近では宇宙における元素合成の終焉や超重元素の合成においても重要であることが分かってきた。しかし、核分裂は多粒子・多次元の量子トンネル・散逸過程であり、未だに原子核物理の最も難易度の高い多体問題である。これまでアイソスピン物理は静的な核構造において展開されてきたが、核分裂のような動的な大振幅運動におけるアイソスピン自由度の機能の解明は、量子論的理解にとどまらず、元素の起源や新元素合成に関わるものである。

本研究室は、高度化後の RIBF における研究展開を見据えて、二次ビームラインの増強や実験装置の高度化に関する議論を行っている。ユーザーコミュニティの中での議論の場として、研究会 ADRIB を 2023 年度に開催し、2024 年度には第 2 回を実施した [17]。

<報文>

(原著論文)

- [1] W. Xian *et al.*, “Mass measurements of neutron-rich $A \approx 90$ nuclei constrain element abundances”, *Phys. Rev. C* **109**, 035804 (2024).
- [2] C.Y. Tsang *et al.*, “Constraining nucleon effective masses with flow and stopping observables from the $S\pi\text{RIT}$ experiment”, *Phys. Lett. B* **853**, 138661 (2024).
- [3] B. Moon *et al.*, “Triaxial deformation of neutron-rich Zr nuclei explored by high-resolution in-beam γ -ray spectroscopy”, *Phys. Lett. B* **858**, 139047 (2024).

- [4] J.T. Li *et al.*, “A mosaic-type array composed of Si photodiodes for charged-particle detection”, *Nucl. Instr. and Meth. A* **1070**, 170019 (2025).
- [5] D. Prajapati *et al.*, “Investigation of the proton radius of the Borromean halo nucleus ^{19}B ”, *Nucl. Phys. A* **1053**, 122977 (2025).
- [6] A. Roy *et al.*, “Measurement of charge-changing cross section of neutron-rich nitrogen isotopes for determining their proton radii”, *Nucl. Phys. A* **1054**, 122983 (2025).

(会議抄録)

- [7] J.T. Li *et al.*, “Development of a mosaic-type array formed by Si photodiodes for charged-particle detection in heavy-ion collisions”, *EPJ Web of Conferences* **306**, 01037 (2024).

(国内雑誌)

- [8] 鈴木大介、上坂友洋、原子核の温故知新「1934 年のグッゲンハイマー II」、原子核研究 第 69 巻 1 号

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [9] D. Suzuki, “Study on molybdenum puzzle at the RI Beam Factory”, 2024 Annual Meeting of A3 Foresight Program “Nuclear Physics in the 21st Century”, July 17 (2024), Daejeon, Korea.
- [10] D. Suzuki, “Gamma-ray tracking project GT-5 at RI Beam Factory”, Joint SUNFLOWER and SHARAQ/OEDO Workshop September 6 (2024), RIKEN Nishina Center, Wako.
- [11] D. Suzuki, “Advances of nuclear science at RI Beam Factory”, International Conference on Nuclear Physics and Applications (ICNPA-2024), October 23 (2024), University of Delhi, Delhi, India.
- [12] D. Suzuki, “Transfer reaction studies from exotic structure to nucleosynthesis”, 3rd CAS-RIKEN symposium, November 8 (2024), RIKEN Nishina Center, Wako.
- [13] D. Suzuki, “Recent progress of nuclear astrophysics at RI Beam Factory”, Nucleosynthesis and Evolution of Neutron Stars (XRB2025), January 28 (2025), YITP, Kyoto University, Kyoto.

(セミナー)

- [14] D. Suzuki, “Single-particle and collective motions in atomic nuclei”, Nuclear physics School for Young Scientists (NUSYS-2024), July 28–29 (2024), Beijing Normal University, Zhuhai, China.

(アウトリーチ)

- [15] 鈴木大介、「原子核物理新 100 年の挑戦～多様性の起源と未来～」、2024 年度理化学研究所和光地区一般公開、2024 年 10 月 5 日、理化学研究所和光キャンパス仁科 RIBF 棟大会議室

- [16] 木村真明、鈴木大介、「祝！量子力学 100 年 夢の原子核工場 RI ビームファクトリーの挑戦」、理研 DAY：研究者と話そう！、2025 年 2 月 28 日、オンライン（国際会議・国際スクール主催）
- [17] Organizers: W. Horiuchi, Y. Ichikawa, M. Kimura, K. Miki, F. Minato, D. Nishimura, T. Onishi, M. Rosenbusch, M. Sasano, D. Suzuki, A. Takamine, K. Yoshida, J. Zenihiro, International workshop “Advancing physics at next RIBF” (ADRIB25), January 23–24 (2025), RIKEN Nishina Center, Wako.
- [18] Co-chairs: D. Suzuki and M. Yamagami, International symposium “Single-particle and collective motions from nuclear many-body correlation” (PCM2025), March 4–7 (2025), University of Aizu, Aizuwakamatsu, Fukushima.

2.3 横山将志・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 T2K 実験を推進しつつ、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。

2.3.1 ニュートリノ振動の研究

素粒子ニュートリノは、電子の仲間（レプトン）であり宇宙中に多数存在するが、電荷を持たず弱い相互作用でしか反応しないため観測が難しく、その性質に未知の部分が多い。1998 年に、スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノの観測データから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」の確実な証拠が発見されて以降、ニュートリノの研究は飛躍的に進展し、素粒子物理学の中心的な課題のひとつとなった。

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。

我々は、スーパーカミオカンデによる様々なニュートリノの測定を通じてニュートリノ振動の研究を進め、ニュートリノの性質を明らかにしようとしている。特に、茨城県東海村の大強度陽子加速器 J-PARC

を用いた人工ニュートリノビームを 295 km 離れたスーパーカミオカンデで観測する T2K (Tokai-to-Kamioka) 実験で中心的な役割を果たしている。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測定し、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。ニュートリノの CP 対称性の破れの研究は、宇宙の始まりには粒子と反粒子が同じ数だけ生成されたはずであるにもかかわらず、現在の宇宙には粒子（物質）しか残っていない謎の解明につながると期待されている。

T2K 実験 前置ニュートリノ検出器 SuperFGD

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、プラスチックシンチレータのキューブを約 200 万個並べ波長変換ファイバーと MPPC で 3 方向から読み出す新構造の検出器 SuperFGD の建設・運用と、事象再構成・事象選別ソフトウェアの開発を行っている。

2023 年度には SuperFGD 検出器を前置検出器ホールに設置し、まず約 7 割の電子回路で試運転を行った。本年度は電子回路を全数インストールし、ニュートリノビームによる本格的なデータ収集を開始した。実験期間中に測定器の状況をリアルタイムで確認するためのオンラインモニターの開発などを進め（新居智将 修士論文 [16]）、安定的なデータ収集を実現したほか、装置の詳細な較正を行う手法の開発を行い、取得したデータの品質確認を主導している。SuperFGD のデータを用いたニュートリノ反応の測定とニュートリノ振動の研究に向けて、モンテカルロシミュレーションとの比較、動作していないチャンネルの影響の見積もり、事象再構成の開発、検出器由来の系統誤差の見積もりなどを進めている。

電子ニュートリノ反応の測定

ニュートリノ振動における CP 対称性の破れは、ミューオン型のニュートリノが電子型に変化する確率をニュートリノと反ニュートリノのそれぞれに対して測定し、比較することで検証する。この測定では信号となる電子ニュートリノと原子核の反応の詳細な理解が必要となるが、T2K 実験のエネルギー領域ではこれまでにこの反応の測定がほとんど存在しない。J-PARC で生成するニュートリノビームはほとんどがミューオン型であり、1%程度しか含まれない電子ニュートリノの測定のためには高性能の粒子識

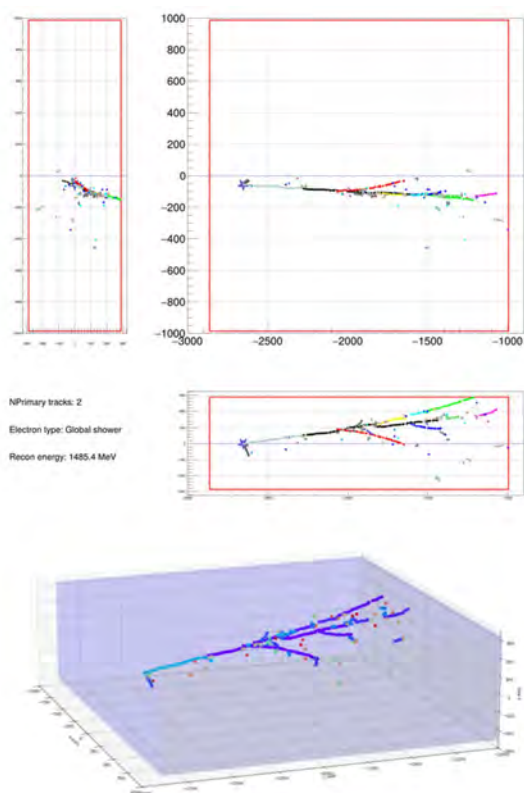


図 2.3.9: SuperFGD 検出器で観測された電子ニュートリノ反応の候補事象のイベントディスプレイ。装置の前面（上左図）、上面（上右図）、側面（中図）でそれぞれ記録された信号から、電子ニュートリノの反応で生成された電子がシャワーを起こす様子と、陽子の短い飛跡の候補が確認できる。下図は、同じ事象を 3 次元的に再構成したもの。

別が必要となる。我々は、細分化された SuperFGD の構造を利用し、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きた。

本年度は、SuperFGD のデータの基礎的な確認と並行して電磁シャワーの再構成や電子と γ 線の識別手法の開発を進め、実データによる電子ニュートリノ反応の観測に向けて研究を進めた。図 2.3.9 に、電子ニュートリノ反応の候補事象のデータから再構成された事象を図示したイベントディスプレイを示す。また、電子ニュートリノ反応識別に機械学習を応用する研究も行っている（新居智将 修士論文 [16]）。

微小電荷を持つ未知粒子の探索

標準模型を超えた物理理論の提案の中には、電子の電荷の $1/1000$ 以下の微小な電荷を持った未知の粒子の存在を预言するものがある。このような未知粒子がもし存在すれば、T2K 実験の標的で生成され

る多数の粒子の崩壊により生成され、前置検出器に飛んできている可能性がある。そこで、高感度で細分化されている SuperFGD 検出器の特性を活かし、微小電荷粒子の飛跡上に生じるデルタ線を捉えることで微小電荷粒子の探索を行う可能性を検討し、シミュレーションに基づく感度の見積もりを進めた。

ニュートリノ振動測定

より精度の高いニュートリノ振動測定を目指し、新たなデータを含む解析の準備を進めている。アップグレードされた前置検出器のデータをニュートリノ振動測定に用いるための系統誤差の見積もりとフレームワークの整備、スーパーカミオカンデの地磁気補償コイルが故障した期間のデータを解析に利用するための較正や系統誤差の検討などを進めている。

大気ニュートリノと加速器ニュートリノの合同解析

スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノの観測と T2K 実験での加速器ニュートリノの測定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。我々は、そ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必要となるさまざまな系統誤差のチェックを完遂し、世界初の合同解析結果を公表した（2023 年度：江口碧 博士論文）。この結果は Physical Review Letter 誌に掲載され [11]、Editor's suggestion にも選ばれた。

ニュートリノ振動のレビュー

Particle Data Group (PDG) により隔年で出版される、素粒子物理学やその関連分野の世界中のデータをまとめ、標準的な世界平均をリストした“Review of Particle Physics(RPP)”は分野で最も引用される文献である。横山は、2020 年から 2024 年まで、RPP のニュートリノ振動に関するレビュー論文“Neutrino masses, mixing, and oscillations”の実験パートの執筆を担当した [13]。2025 年初頭からは、大気および太陽ニュートリノの測定に関するデータを論文から読み取るエンコーダーと呼ばれる役割を担っている。

2.3.2 超新星背景ニュートリノの探索

星が一生の最後に超新星爆発と呼ばれる大爆発を起こすとき、爆発エネルギーの 99% はニュートリノによって放出され、大量のニュートリノが生成される。1987 年、大マゼラン星雲で発生した超新星爆発に伴うニュートリノがカミオカンデで世界で初めて観測され、超新星爆発の基本的なシナリオが正しいことが確認された。しかし、それ以降我々の銀河の近傍では超新星爆発は発生しておらず、爆発時のニュートリノは観測されていない。

一方、宇宙全体を見ると毎秒どこかで超新星爆発が起きており、過去の超新星爆発によって放出されたニュートリノが宇宙空間を漂っている。この超新星背景ニュートリノを観測することで、星の生成や元素合成など宇宙の歴史を明らかにできると期待されている。ただ、ニュートリノの反応率は極端に低いため、スーパーカミオカンデでも予想される反応数は年間数回にとどまり、放射線や他のニュートリノなどによる背景事象の中から信号事象を探し出すのは容易ではない。

スーパーカミオカンデ-ガドリニウム (SK-Gd) フェーズ

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。超新星背景ニュートリノの信号として最も観測しやすい反電子ニュートリノと陽子の反応では、陽電子と中性子が生成される。これまで検出に使ってきた陽電子に加えて中性子の信号を同時計測すれば、背景事象を低減し、超新星背景ニュートリノの探索感度を向上させることが可能となる。

そこで、スーパーカミオカンデでは、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を添加し (ガドリニウム濃度 0.01%)、SK-Gd フェーズ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、ガドリニウムの濃度を 0.03% としてさらなる高感度での観測をスタートさせた [3]。

中性子捕獲の信号は、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。本研究室では、高エネルギーの宇宙線による原子核破碎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手法の開発を行っている。中性子は核破碎反応が起こると最も頻繁に生成される粒子であり、これにより短い期間のデータで統計精度の高いデータが得られる一方、観測できるエネルギーがトリガー閾値に近い場合検出条件による系統誤差が無視できない。この系統誤差の理解や、その影響を抑えるための事象選択手法の開発を進めてきた。ガドリニウム導入後のスーパーカミオカンデでは、電子加速器などを用いた較正が十分に行われていなかった期間があり、中性子を用いた較正は、それを補完する重要な手法と位置付けられている (室朝喜 修士論文 [19])。

ニュートリノ反応を精密に理解するための原子核反応測定実験

超新星背景ニュートリノ探索において、最も問題となる背景事象が大気ニュートリノによる中性カレント準弾性散乱である。この反応では、ニュートリノ反応およびその二次反応により生成された高励起状

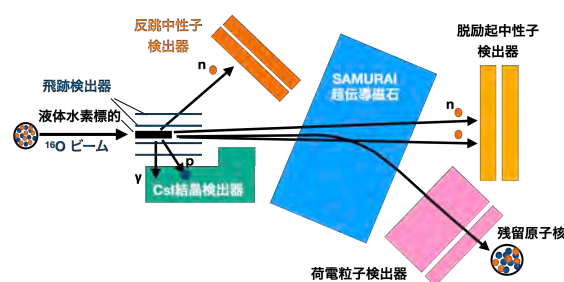


図 2.3.10: 理化学研究所で実施予定の酸素原子核ビーム実験の概略図。加速した酸素原子核を液体水素標的に衝突させ、生成される粒子を網羅的に測定する。

態の酸素原子核が脱励起する際に放出される光子および核子が背景事象を作り出す。このプロセスを精密に理解し不定性を削減することが、超新星ニュートリノ発見の鍵である。そこで、理化学研究所 RI ビームファクトリーにおいて、酸素原子核ビームを用いた原子核反応の精密測定実験を計画している。

本研究の特徴は、調べる対象である酸素原子核を加速して衝突させる、逆運動学法という手法を用いることであり、これにより系全体がブーストされ、脱励起により生成される低エネルギーの粒子を網羅的に測定できることにある (図 2.3.10)。このデータを用い、ニュートリノ反応に付随して生成される中性子や光子の生成数の予測精度を飛躍的に向上させることを目指している。

本年度は、シミュレーションを用いた実験の検討を進め、また関連する原子核実験および理論研究者との情報交換や議論を活発に行ってきた。2024 年 9 月には中島が主催者の一人となり「核反応の時間発展ダイナミクスの解明に向けて」と題した研究会¹を開催した。本実験は、2024 年 12 月に行われた理化学研究所 RI ビームファクトリーの実験課題審査委員会にて採択され (SAMURAI-79 実験)、ビームデータ取得に向けて測定器の準備及びデータ解析手法の開発を進めている (水野裕介 修士論文 [18])。

2.3.3 陽子崩壊の探索

素粒子の標準模型を超えた物理の有力な理論として、4 つの基本的な相互作用のうち、標準模型で統一された電磁相互作用と弱い相互作用に加え、 10^{16}GeV 程度の超高エネルギーでさらに強い力も統一されるとする「大統一理論」がある。大統一理論では、クォークとレプトンも統一的に記述され、陽子の崩壊が予言される。陽子崩壊の探索は、大統一理論の唯一の直接的検証法である。

我々の研究室では、スーパーカミオカンデのデータを用いて陽子崩壊を探索している。陽子が反荷電レプトンと η 中間子に崩壊するモードについて、 η 中間子の原子核内での散乱断面積を見積もり直すこと

¹<https://conference-indico.kek.jp/event/286/>



図 2.3.11: 2024 年 9 月時点の、ハイパーカミオカンデの地下空洞掘削の様子。空洞が巨大なため、重機がミニカーのように見える。

で感度を改善し、世界最高の感度でこの崩壊モードに制限を与えた結果が出版された [10]。

2.3.4 ハイパーカミオカンデの建設

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す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。大規模地下空洞本体の掘削は 2022 年 11 月に開始され、2025 年 3 月現在、円筒部の掘削が終盤に差し掛かっている（図 2.3.11）。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し、光電子増倍管の性能検査や測定器の詳細な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。

50 cm 径光電子増倍管およびカバー

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。大量生産の初期に暗計数率の不安定性が確認されたが、設計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、2025 年 3 月までに 14,000 本以上の光電子増倍管が納入された。

我々は、200 本の光電子増倍管の安定性を同時に評価できるシステムを構築し、合計 2,000 本以上を評価して、ハイパーカミオカンデで要求される性能を



図 2.3.12: 50 cm 径光電子増倍管用カバーの試験の様子。

満たしていることを確認した。さらに、16 本に対して暗計数率と増幅率を 1 年以上にわたり測定し、暗計数率が安定であり、増幅率の変化率がスーパーカミオカンデで使われてきた光電子増倍管と変わらないことを確認した（後藤三四朗 修士論文 [17]）。

また、万が一水中で光電子増倍管が破損した際に連鎖爆縮を防ぐための防爆カバーを、スペイングループと協力して開発してきた。本年度は、光電子増倍管を取り付けた構造体をマヨルカ島の沖合で水深 80 m 以上の海中に沈め、故意に光電子増倍管を破壊して周囲の光電子増倍管やカバーへの影響を確かめる最終試験を行い（図 2.3.12）、カバーの設計が要求を満たすものであることを実証した。

光電子増倍管の事前較正

ハイパーカミオカンデでは、スーパーカミオカンデよりも大きな装置に対し、10 年以上の長期にわたり、系統的不定性のより小さい精密測定を目指す。そのために、チェレンコフ光を観測する光電子増倍管の応答の詳細な較正が鍵となる。運転中にもさまざまなソースを用いて較正を行うが、装置の特性上、水中での光の散乱や吸収、その時間変動や場所に対する依存性などと、光電子増倍管の特性を分離することが難しい場合があり、光電子増倍管の応答を建設前に事前に較正しておくことが重要である。

使用する 2 万本全てを精密に測定することは現実的でないため、詳細に事前較正した 400 本程度の光電子増倍管を装置内に配置して運用中の較正の基準とする予定である。これまで、光電子増倍管のどの特性を事前に較正しなければならないかを決定し、必要な測定が可能なシステムを設計してきた。本年度は、韓国やオーストラリアで開発した測定システムを神岡に移設し、組み上げを行なった。今後、動作試験を経て実際の較正作業を開始する予定である。

解析ソフトウェアの開発

これまで、ハイパーカミオカンデの物理感度の見積もりは主にスーパーカミオカンデで開発されたシミュレーションや事象再構成のソフトウェアを利用して行われてきた。本年度、新たにハイパーカミオカンデ用に開発されたソフトウェアを初めて用いて、陽子崩壊 ($p \rightarrow e + \pi^0$) の探索感度を評価した。基本的な動作の確認ができた一方で、まだ調整が不十分な部分が多く、運動量分解能が本来の想定より悪化しているなど、今後の課題を把握することができた (後藤三四朗 修士論文 [17])。

2.3.5 Belle II/SuperKEKB

1999 年から 2010 年にかけて運転した KEK B ファクトリー (KEKB 加速器/Belle 測定器) は、小林・益川両博士のノーベル賞受賞の決め手になるなど、多大な成功を収めた。この成果を発展させ、標準模型を越えるより根源的な原理の探求を行うために、アップグレードされた装置がスーパー B ファクトリー (SuperKEKB 加速器と Belle II 測定器) である。

本年度は、Belle 実験のデータ 711 fb^{-1} と Belle II 実験のデータ 362 fb^{-1} を合わせて解析し、 $B^+ \rightarrow DK^+$ 、 $B^+ \rightarrow D\pi^+$ 、 $B^+ \rightarrow D^*K^+$ 崩壊を用いた CP 対称性の破れのパラメータ ϕ_3 の測定を行った [14]。また、SuperKEKB 加速器の性能と安定性を向上させるため、突然ビームが失われる現象の原因究明を目指し、ビーム診断とビームアボートのための新たなシステムを開発した [15]。

2.3.6 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。

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索

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言われている。ガドリニウム ^{160}Gd もニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($^{160}\text{Gd} \rightarrow ^{160}\text{Dy} + 2e^-$) 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 を含んだ高純度無機結晶シンチレーターを開発している。Gd を含んだ結晶の候補として、Ce ドープ GAGG 結晶 ($\text{Ce} : \text{Gd}_3\text{Al}_{12}\text{Ga}_3\text{O}_{12}$)、GAGG の Gd の一部をイットリウム (Y) に置き換えたもの、そして、GPS 結晶 ($\text{Ce} : \text{Gd}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) などを製作し、それらのエネルギー分解能や放射性不純物の含有量を評価している。本年度は、Y を含んだ GAGG 結晶のエネルギー分解能および波形弁別性能の評価 [56]、そして GPS 結晶の放射性不純物量の評価を中心に研究を進めた。GPS の放射性不純物量に関しては、

1 cm 角の結晶を用い、高純度ゲルマニウム検出器および結晶内部の発光の遅延同時計測から主要な放射線系列の含有量を評価した結果、GSO 結晶を用いた先行研究と同程度のオーダーの放射性不純物含有量を達成していることを確認した [51]。今後、原料や製造過程の改善などにより、更なる低放射能化を実現することを目指している。

波長変換ファイバーの測定

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た。実験室でのレーザー光を用いたファイバー単独の測定に加え、プラスチックシンチレータと組み合わせた際の特性を KEK の PF-AR テストビームラインで測定し、その結果を出版した [12]。

<報文>

(原著論文)

ニュートリノ実験

- [1] T. Wester *et al.* [Super-Kamiokande], “Atmospheric neutrino oscillation analysis with neutron tagging and an expanded fiducial volume in Super-Kamiokande I–V,” *Phys. Rev. D* **109**, no.7, 072014 (2024).
- [2] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande], “Solar neutrino measurements using the full data period of Super-Kamiokande-IV,” *Phys. Rev. D* **109**, no.9, 092001 (2024).
- [3] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande], “Second gadolinium loading to Super-Kamiokande,” *Nucl. Instrum. Meth. A* **1065**, 169480 (2024).
- [4] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande], “Search for Periodic Time Variations of the Solar B8 Neutrino Flux between 1996 and 2018 in Super-Kamiokande,” *Phys. Rev. Lett.* **132**, no.24, 241803 (2024).
- [5] Y. Kashiwagi *et al.* [Super-Kamiokande], “Performance of SK-Gd’s Upgraded Real-time Supernova Monitoring System,” *Astrophys. J.* **970**, no.1, 93 (2024).
- [6] S. Locke *et al.* [Super-Kamiokande], “New methods and simulations for cosmogenic induced spallation removal in Super-Kamiokande-IV,” *Phys. Rev. D* **110**, no.3, 032003 (2024).
- [7] M. Mori *et al.* [Super-Kamiokande], “Development of a Data Overflow Protection System for Super-Kamiokande to Maximize Data from Nearby Supernovae,” *PTEP* **2024**, no.10, 103H01 (2024).
- [8] S. Abe *et al.* [KamLAND and Super-Kamiokande], “Combined Pre-supernova Alert System with KamLAND and Super-Kamiokande,” *Astrophys. J.* **973**, no.2, 140 (2024).

- [9] H. Kitagawa *et al.* [Super-Kamiokande], “Measurements of the charge ratio and polarization of cosmic-ray muons with the Super-Kamiokande detector,” *Phys. Rev. D* **110**, no.8, 082008 (2024).
- [10] N. Taniuchi *et al.* [Super-Kamiokande], “Search for proton decay via $p \rightarrow e + \eta$ and $p \rightarrow \mu + \eta$ with a 0.37 Mton-year exposure of Super-Kamiokande,” *Phys. Rev. D* **110**, no.11, 112011 (2024).
- [11] K. Abe *et al.* [T2K and Super-Kamiokande], “First Joint Oscillation Analysis of Super-Kamiokande Atmospheric and T2K Accelerator Neutrino Data,” *Phys. Rev. Lett.* **134**, no.1, 011801 (2025).

その他

- [12] S. Kodama, H. Kobayashi, W. Okinaga, K. Nakagiri, Y. Nakajima and M. Yokoyama, “Performance of New Kuraray Wavelength-shifting Fibers with Short Decay Time,” *PTEP* **2024**, no.5, 053H01 (2024).
- [13] S. Navas *et al.* [Particle Data Group], “Review of particle physics,” *Phys. Rev. D* **110**, no.3, 030001 (2024).
- [14] I. Adachi *et al.* [Belle and Belle-II], “Determination of the CKM angle ϕ_3 from a combination of Belle and Belle II results,” *JHEP* **10**, 143 (2024).
- [15] K. Yoshihara, *et al.*, “Development and implementation of advanced beam diagnostic and abort systems in SuperKEKB,” *Nucl. Instrum. Meth. A* **1072**, 170117 (2025).

(学位論文)

修士論文

- [16] Tomochika Arai, “Operation of the New T2K Near Detector SuperFGD and Development of Electron-Neutrino Event Selection” Master’s thesis, March 2025
- [17] Sanshiro Goto, “Evaluation of 50-cm photomultiplier tube stability and proton decay search sensitivity for the Hyper-Kamiokande experiment” Master’s thesis, March 2025
- [18] Yusuke Mizuno, “Study of an inverse-kinematics experiment for measuring nuclear de-excitation process following Oxygen-nucleon reaction for improved neutrino-nucleus interaction prediction” Master’s thesis, March 2025
- [19] Tomoki Muro, “Study of improving the stability and uniformity of the energy scale of the Super-Kamiokande detector with a calibration method using spallation neutron captures by gadolinium” Master’s thesis, March 2025

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [20] Tomochika Arai, “Latest Results from FASER at the LHC,” 29th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology, July 7-13, 2024, Quy Nhon, Vietnam
- [21] Hokuto Kobayashi, “SuperFGD: A high-granularity detector for improved neutrino interaction measurements in T2K,” 23rd International Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN24), Oct. 28 – Nov. 1, 2024, CBPF, Rio de Janeiro, Brazil
- [22] Xiaodong Shi, “Sudden Beam Loss at SuperKEKB and its countermeasures,” The 6th International Workshop on Future Tau Charm Facilities, Nov. 12-21, 2024 Guangzhou, China
- [23] Masashi Yokoyama, “Challenges in Neutrino Physics,” Future of Artificial Intelligence for Science in Japan (FAIRS-Japan 2024), Dec. 3-5, 2024, Nagoya University

一般講演

- [24] Hokuto Kobayashi, “Neutrino cross section measurements with the current and upgraded T2K near detectors,” 2024 Joint Workshop of FKPPN and TYL/FJPPN, May 22-24, 2024, KISTI, Daejeon, Korea
- [25] Sanshiro Goto, “Characterization of the Hyper-Kamiokande 50-cm Photomultiplier Tubes,” 6th International Workshop on New Photon-Detectors (PD24), Nov. 19-21, 2024, Vancouver, Canada

ポスター発表

- [26] Daniel Ferlewicz, “Commissioning and calibration of the Super-FGD in the T2K near detector upgrade,” XXXI International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2024), June 16-22, 2024, Milan, Italy
- [27] Hokuto Kobayashi, “Development of Electron Identification Methods Using Multiple Detectors for Electron-Neutrino Event Selection in The Upgraded T2K Near Detector,” The 4th J-PARC symposium (J-PARC2024), Oct. 14-18, 2024, Mito City Civic Center, Mito, Japan
- [28] Wataru Okinaga, “Development of evaluation method on detector systematic errors for the SuperFGD in the upgraded T2K near detector,” *ibid.*
- [29] Tomochika Arai, “Online monitor and data quality check of the Super-FGD for the T2K off-axis near detector,” *ibid.*
- [30] Tomochika Arai, “Separation between electron and gamma by CNN at SuperFGD in the T2K off-axis near detector for the measurement of the charged-current electron neutrino cross-sections,” Future of Artificial Intelligence for Science in Japan 2024, Dec. 3-5, 2024, Nagoya University

- [31] Tomochika Arai, “CNN method for the charged-current electron neutrino cross-sections measurement at T2K near detector,” 2nd FoPM International Symposium, Feb. 17-19, 2025, The University of Tokyo
(国内会議)
招待講演
- [32] Xiaodong Shi, “Exploring new physics in rare-decay studies at the Belle II experiment,” 日本物理学会 第 80 回年次大会、2025 年 3 月 18-21 日、オンライン
一般講演
- [33] 児玉 将馬, 「新型波長変換ファイバーとプラスチックシンチレータの基礎特性評価 測定器開発テストビームライン研究会」、2024 年 4 月 4-5 日、KEK
- [34] 正木結太, 「水チェレンコフ検出器の作成とテストビームラインでの運用」、第 12 回高エネルギー春の学校、2024 年 5 月 16-18 日、琵琶湖コンファレンスセンター
- [35] 林崎響, 「MWPC の製作」、同上
- [36] Xiaodong Shi, “ γ/ϕ_3 combination at Belle and Belle II,” 日本物理学会 第 79 回年次大会、2024 年 9 月 16-19 日、北海道大学
- [37] Daniel Ferlewicz, “Analysis of early data in the SFGD as part of the T2K near detector upgrade,” 同上
- [38] 小林北斗, 「T2K 実験新型前置検出器における電子識別のための複数検出器による電磁シャワー再構成手法の開発」、同上
- [39] 沖永和平, 「T2K 新型前置検出器における電子のエネルギー再構成手法の開発」、同上
- [40] 児玉 将馬, 「T2K 新型前置検出器 SuperFGD の宇宙線を用いた性能評価」、同上
- [41] 新居智将, 「T2K 新型前置検出器 SuperFGD のオンラインモニターの開発」、同上
- [42] 後藤 三四郎, 「ハイパーカミオカンデ実験に用いる 50 cm 径光電子増倍管の大量測定」、同上
- [43] 室 朝喜, 「SK-Gd における核破砕中性子捕獲事象を用いた検出器全体でのエネルギースケールの連続評価」、同上
- [44] 中島康博, 「ニュートリノ原子核反応予測の精度向上に向けた酸素ビーム実験の概要」、同上
- [45] 水野裕介, 「ニュートリノ原子核反応予測の精度向上に向けた酸素ビーム実験の検出器シミュレーション」、同上
- [46] 中桐 洸太, 「ハイパーカミオカンデ実験に用いる 50 cm 径光電子増倍管の製造・検査状況」、第 5 回 ITDC プラットフォーム A 研究会、2024 年 12 月 26-27 日、名古屋大学
- [47] 水野裕介, 「スーパーカミオカンデでのニュートリノ-原子核反応予測の精密化に向けた逆運動学実験 — 概要および 15N の励起エネルギー再構成 —」、第 31 回 ICEPP シンポジウム、2025 年 2 月 16-19 日、長野県下高井郡山ノ内町志賀高原蓮池 志賀レークホテル
- [48] 林崎響, 「ニュートリノ原子核反応予測の精密化に向けた中性子ノックアウト反応の研究」、同上
- [49] 正木結太, 「スーパーカミオカンデにおけるミューオン崩壊電子を用いたエネルギー較正の研究」、同上
- [50] 水野裕介, 「スーパーカミオカンデでのニュートリノ-原子核反応予測の精密化に向けた逆運動学実験」、第 11 回超新星ニュートリノ研究会、2025 年 3 月 3-4 日、東京大学 駒場キャンパス
- [51] 正木結太, 「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索のための Gd を含んだ結晶の性能評価」、第 10 回「極低放射能技術」研究会、2025 年 3 月 7-8 日、富山大学
- [52] 沖永和平, 「T2K 新型前置検出器における粒子識別性能の評価手法」、日本物理学会 第 80 回年次大会、2025 年 3 月 18-21 日、オンライン
- [53] 正木結太, 「スーパーカミオカンデにおけるミューオン崩壊電子を用いたエネルギー較正の研究」、同上
- [54] 水野裕介, 「ニュートリノ酸素原子核反応予測の精度向上に向けた SAMURAI-79 実験の検出器シミュレーション — 陽子ノックアウト反応の測定 —」、同上
- [55] 林崎響, 「ニュートリノ酸素原子核反応予測の精度向上に向けた SAMURAI-79 実験の検出器シミュレーション — 中性子ノックアウト反応の測定 —」、同上
- [56] 林崎響, 「ニュートリノレス二重 β 崩壊探索のための Gd を含んだ高純度結晶の開発」、同上
- (その他の講演)
- [57] 横山将志, 「長基線ニュートリノ実験の進展と今後の挑戦」、KEK 素核研運営会議 オープンセッション、2024 年 11 月 19 日、高エネルギー加速器研究機構
- [58] Yasuhiro Nakajima, “Status of T2K and Hyper-Kamiokande,” J-PARC International Advisory Committee (IAC) meeting, Feb. 24, 2025, J-PARC

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、巨大応答の熱電物質、フラストレーションやスピン軌道相互作用のある磁性体、有機伝導体などを柱に研究している。凝縮系、とくに量子現象が顕著に現れる多電子系の理論が中心である。

3.1.1 熱応答・熱電応答の理論

カルコパイライト $\text{Cu}_{1+x}\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$ 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 $\text{Cu}_{1+x}\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$ 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。[11, 38, 39]

フォノンドラッグによる Nernst 係数および熱 Hall 伝導度

電子格子相互作用を通じ、電子と格子が運動量を受け渡すことにより生じる輸送現象をフォノンドラッグという。この効果は、Seebeck 効果において数十 K 程度の低温で大きな寄与をもたらすことが知られており、近年その微視的な理論が構築された。一方、希薄金属 $\text{SrTiO}_{3-\delta}$ において大きな Nernst 係数及び熱 Hall 効果が観測され、これがフォノンドラッグによるものであると提案されていた。我々は、線形応答理論を用い、磁場の効果を摂動論的に取り入れることで、フォノンドラッグの Nernst 係数・熱 Hall 伝導度への寄与を計算する一般的な公式を導出した。また、これを $\text{SrTiO}_{3-\delta}$ に適用することで、我々の理論が実験結果を非常によく再現することを確認し、巨大な応答係数がフォノンドラッグによるものであることを示した。[14, 23, 40]

異常 Nernst 係数の増大戦略とその Rashba 型スピン軌道相互作用への適用

Sommerfeld-Bethe 則を基に、異常 Nernst 係数が増大する一般的な条件を導出した。一般的な強磁性体では大きな異常 Nernst 係数が得られないが、このことへの直感的な解釈と増大戦略の指針を示した。加えて、Rashba 型スピン軌道相互作用をもつ系における異常 Nernst 効果を詳しく解析し、前述の条件に合致するために異常 Nernst 係数が大きく向上することを示した。特に、Rashba 相互作用のエネルギーと Zeeman エネルギーのスケールが同程度となる条件下で顕著な増大が起こることが、二乗分散モデルとタイトバインディングモデルの双方で示された。[23, 48]

薄膜・基板系における熱電効果の理論：並列回路模型による解析

近年微細加工技術の発展に伴い、薄膜・基板系での熱電効果の研究が進展している。薄膜・基板系での熱電効果の解析には、薄膜と基板とを並列回路にマッピングする方法がよく用いられるが、最近でも多くの研究が行われている。最近、Si 基板上に Fe-Ga 薄膜を形成した系において、薄膜の膜厚を調節することにより、Fe-Ga のバルク値を超える異常ネルンスト効果が現れることが発見されて注目を集めている。そこで、本研究では並列回路模型を一般的に取り扱い、薄膜・基板系での熱電効果について考察した。結果として、薄膜の膜厚を調節することで、異常ネルンスト効果だけでなく通常のネルンスト効果などの横応答でも、薄膜と基板との協奏効果により増大することが分かった。[6, 26, 45]

3.1.2 強相関電子系の理論

強相関金属の熱電性能に対する運動量散逸の効果

重い電子系のような大きなフェルミ面をもつ強相関金属は、高い熱電出力因子を示すにもかかわらず、ウィーデマン-フランツ (WF) 則が近似的に成立するため、無次元熱電性能指数 (ZT) の値は非常に小さくなる。一方、反強磁性金属 CeRhIn_5 やワイル半金属 WP_2 などの小さなフェルミ面をもつ金属では、WF 則の顕著な破れが観測されており、これにより ZT が増大する可能性が指摘されている。さらに、近年注目を集めている魔法角モアレ・グラフェンでは、強相関電子系に特有の平坦バンドが出現することが報告されており、この種の系における熱電特性にも関心が高まっている。

本研究では、平坦バンドが自由電子と混成する強相関金属の模型を用い、格子点あたりの電子数に対する熱電性能の変化を解析した。フェルミ面が大きく、格子点あたりの電子数が 1 程度の領域では、重い電子系における既存の実験結果と整合する熱電特性が再現された。一方、フェルミ面が小さく、格子点あたりの電子数が 0.1 程度の領域では、ウィーデ

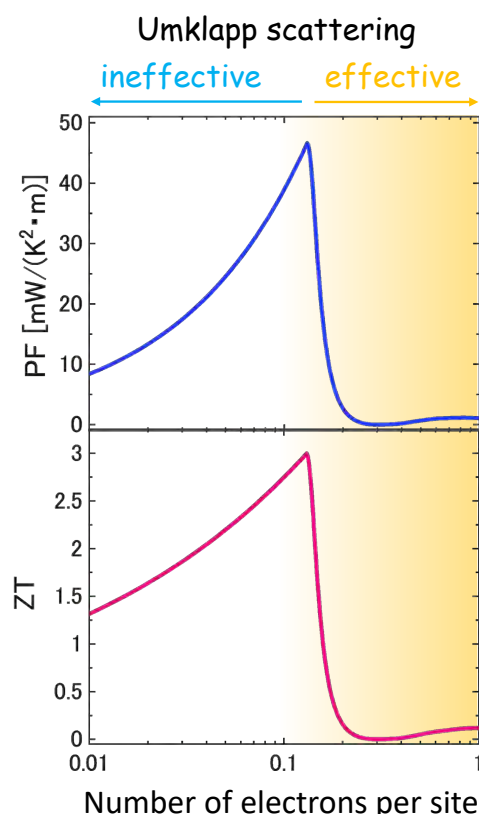


図 3.1.1: 自由電子と混成する平坦バンド模型の熱電出力因子 (PF) と無次元熱電性能指数 (ZT) の格子点あたりの電子数依存性。電子数が 0.1 程度になるとウムクラップ散乱と呼ばれる電子間相互作用による運動量散逸が抑制される。

マン-フランツ (WF) 則の著しい破れが生じ、ZT が 1 を超えるような高い値を示すことを見出した。このような ZT の顕著な増大は、電子数の減少に伴って電子間相互作用による運動量散逸が抑制され、系が近似的に運動量を保存する相互作用系として振る舞うためである。また、運動量を保存する相互作用系の低温におけるゼーベック係数は、フェルミ液体・非フェルミ液体の区別なく、1 電子あたりの比熱に一致することも示した (図 3.1.1)。[27, 60]

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。熱電効果の解析や、磁場下における磁気抵抗のふるまいや Hall Lorenz 比の Wiedemann-Franz 則の破れなどの議論を行った。[21]

運動量を考慮した微視的理論による電子フォノン系の輸送現象

電子とフォノンが相互に運動量を交換し、協調して運動することによる特異な輸送現象が近年実験的に議論されている。一方、フォノンは電子間散乱を媒介し、電子流体の形成に関連することも議論されている。それらのことを踏まえて、運動量保存を保つような電子フォノン系の微視的な輸送現象の理論を構築し、とくにフォノンドラッグとフォノン媒介電子流体のクロスオーバーによる輸送現象の振る舞いを解析した [50]。

3.1.3 交替磁性体

交替磁性体における弾性異常 Hall 伝導度の研究

新たなクラスの磁性体として交替磁性体が提案され、盛んに議論されている。秩序の対称性が自発磁化を許さない場合、異常 Hall 効果は起こらない。しかしピエゾ磁気効果が起こるような応力をかければ、異常 Hall 効果が生じる。秩序検出の方法として、異常 Hall 伝導度の応力依存性が有用であることを、強束縛模型を用いた模型による弾性異常 Hall 伝導度 (異常 Hall 伝導度の応力微分) の解析と、秩序変数の対称性とそれに対応する異常 Hall 効果を誘起する応力の向きを整理することによって示した [19]。

3.1.4 スピン軌道相互作用

原子間スピン軌道相互作用の体系的な整備

スピン軌道相互作用 (SOC) は、従来原子内において電子のスピンと軌道自由度を結合させる働きを持つ。SOC による原子間ホッピングは、スピンと軌道に加えて副格子自由度を交絡させ、トポロジカル物性や多彩な多極子秩序を創発する。本研究では、SOC の一般的なハミルトニアンと原子軌道を用いてスピン依存ホッピング積分をパラメトライズする方法を考案した。本手法は Slater-Koster によるスピンに依存しない二中心ホッピング積分を拡張したものである。さらに、この二中心近似を超えて、ホッピングに関与しない原子の作るポテンシャルからの寄与を取り込んだ場合についても原子間 SOC を記述する三中心の方法を確立した。応用として、螺旋対称性を有するカイラル物質中においてどのような SOC の対称性が生じるか網羅的に調べた [図 3.1.2]。これにより二中心の枠組みでは登場しない対称性の SOC が三中心を考慮することで出現することを示した。特に、三中心の原子間 SOC によってスピンと軌道が反対称に結合する型が得られることを具体的に示し、スピンと軌道自由度の交絡した新たな螺旋秩序を生む可能性を指摘した。[15, 16, 24, 49, 52, 54]

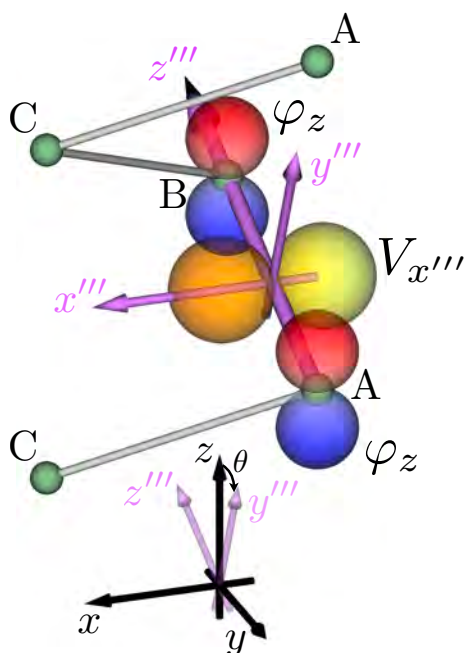


図 3.1.2: 三角螺旋格子における原子間スピン軌道相互作用の模式図。三中心の取り扱いでは、ホッピングに関与しないサイトからの寄与を取り込む。

3.1.5 軌道磁場効果

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。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。[7]

ホール伝導度と軌道帯磁率との厳密な関係

固体中の磁場効果は非常に基本的な問題であるが、未だに理解されていない点も多く残されている。軌道帯磁率はランダウとパイエルスの初期の研究以来調べられているが、ブロッホ・バンドの電子状態に対する軌道帯磁率は複雑な様相を示す。[1] 一方、もう1つの軌道磁場効果であるホール係数については、ブロッホ・バンド電子に対する一般公式が福山によって得られており、軌道帯磁率とかなり近い形となって

いることが知られていた。しかしホール伝導度と軌道帯磁率の厳密な関係は分かっていなかった。我々はまず、遅延グリーン関数と先進グリーン関数を用いて、ホール伝導度に対する新しい公式を導いた。この公式は、散逸を表す寄与と熱力学的な寄与に分けることができるが、後者の寄与は軌道帯磁率と密接な関係があることを見出した。その物理的な意味も明らかになった。さらに、さまざまなモデルにおいて、この関係式を検証した。とくに、キャリア密度が非常に小さいディラック電子系でのバンド端においては、熱力学的な寄与が主たる寄与となることも明らかになった。[44]

3.1.6 有機伝導体の理論

有機伝導体におけるシフト電流の理論研究

バルク光起電力の理論研究を直線偏光照射下の α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ について行った。まず摂動論を用いて、 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ のシフト電流と光の振動数との関係を明らかにした。さらに、光電場の高次の項の影響を明らかにするために Floquet 理論を用いた解析を行い、実現可能な強度のレーザーであっても高次の項が光起電力に大きな影響を与えることを明らかにした。[12, 29, 30, 31, 36]

円偏光照射下の有機伝導体における光電流の理論研究

円偏光ガルバニック効果とは、物質に右または左周りの円偏光を照射すると、その回転方向に依存した電流が生じる現象であり、外部電場を必要としない光電流発生法として注目を集めている。この背景から、我々は有機伝導体に円偏光を照射したときの光電流の理論研究を行った。まず、摂動論を用いた解析により、この物質では電荷秩序に起因して、振動数が小さいときに大きな光電流が流れることを明らかにした。さらに、光電場の高次の項の影響を明らかにするためにフロケ理論を用いた解析を行い、非摂動効果により流れる光電流が強く抑制されることを示した。[13, 32, 33, 34, 35]

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。第一原理計算に基づいたモデルを構成し、そのモデルにおける計算によって電気伝導度およびゼーベック係数の異方性について実験と一致する結果が得られた。また、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取ったのち、低温でゼロに向かうという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。この温度依存性は、有機導体中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。[22]

3.1.7 カイラリティの物理

キラリティ誘起スピン選択性

キラリティ有機スピン選択性と呼ばれる特異な現象を念頭に研究を進めた。キラリティを有する強束縛模型を構築し、それらのスピン密度を評価することで、スピン密度の出現に必要な相互作用の組み合わせを調査した。多極子を用いた議論に基づいて、スピン密度が有限となる必要最小限の模型を構築することができた。スピン軌道相互作用として、3 中心のスピン軌道相互作用は必要ではなく、2 中心で十分であることが明らかとなったため、2 中心のスピン軌道相互作用に基づく模型を構築し、スピン密度の評価を行った。

空間反転と時間反転の対称性を解析する多極子の観点から、ある系で電場に線形なスピン磁化が生じる必要条件として、系のキラリティを表す秩序変数 G_0 が有限であることが知られている。一方、 G_0 を有するにも関わらずスピン磁化が現れない場合があることが明らかとなった。その原因は並進を組み合わせた対称性の存在であることを突き止め、この結果を裏付けるためにスピン磁化の応答係数の模型パラメタによる表式を導出した。その結果スピン磁化の出現には G_0 を含むスピン軌道相互作用だけでなく、 c 軸方向の並進対称性を破るホッピングも必要であることが明らかとなった。[20, 28]

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 3.1.3)。[10, 24]

<受賞>

- [1] M. Ogata and H. Fukuyama: 日本物理学会 第 30 回 (2025 年) 論文賞: J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 124708 (2015). “Orbital Magnetism of Bloch Electrons I. General Formula”

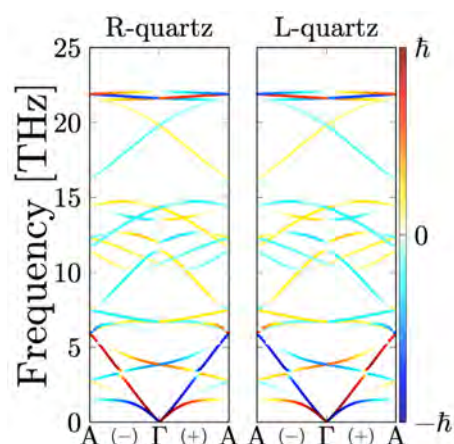


図 3.1.3: α -quartz のフォノンの分散関係。カラーバーはフォノンが持つ角運動量の大きさを表す。

- [2] 加藤将貴、小形正男: アシンメトリ量子領域全体会議・公募研究キックオフ会議ポスター賞最優秀賞
- [3] M. Kato and M. Ogata: Phys. Rev. B **111**, 035137 (2025). “Interatomic spin-orbit coupling in atomic orbital-based tight-binding models” Editor’s suggestion に選出

<報文>

(原著論文)

- [4] J. Fujimoto, T. Matsushita, and M. Ogata: Phys. Rev. B **110**, 174411 (2024). “Microscopic theory of spin Nernst effect”
- [5] V. Könye and M. Ogata: arXiv preprint arXiv:2504.07683. “Effects of Berry Curvature and Orbital Magnetic Moment in the Magnetothermoelectric Transport of Bloch Electron Systems”.
- [6] H. Matsuura, A. Riss, F. Garmroudi, M. Parzer, and E. Bauer: Phys. Rev. Research **6**, 043071 (2024). “Cooperative Nernst effect of multilayer systems: Parallel circuit model study”
- [7] S. Ozaki, H. Matsuura, I. Tateishi, T. Koretsune, and M. Ogata: arXiv preprint arXiv:2406.07281. “Orbital paramagnetism without density of states enhancement in nodal-line semimetal ZrSiS”
- [8] T. Mizoguchi, H. Matsuura, and M. Ogata: arXiv preprint arXiv:2412.19407. “Orbital magnetic susceptibility of type-I, II, and III massless Dirac fermions in two dimensions”
- [9] T. Mizoguchi, S. Ozaki, and H. Matsuura: arXiv preprint arXiv:2502.14194. “Orbital Magnetism in Honeycomb Ladder”
- [10] K. Ohe, H. Shishido, M. Kato, S. Utsumi, H. Matsuura, and Y. Togawa: Phys. Rev. Lett. **132**, 056302 (2024). “Chirality-induced selectivity of phonon angular momenta in chiral quartz crystals”

- [11] H. Matsuura, M. Ogata, N. Tujii, and T. Mori: in preparation. “Theory of thermoelectric effect based on antiferromagnetic magnon drag in natural chalcopyrite $\text{Cu}_{1+x}\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$ ”
- [12] K. Kitayama and M. Ogata: Phys. Rev. B **110**, 045127 (2024). “Nonlinear optical response in multiband Dirac-electron system”
- [13] K. Kitayama and M. Ogata: in preparation. “Charge order induced circular photogalvanic effects in α -type organic conductors”
- [14] J. Endo, H. Matsuura, and M. Ogata: Phys. Rev. B **110**, 205121 (2024). “Phonon drag effect in Nernst and thermal Hall effects: General theory and application to dilute metal $\text{SrTiO}_{3-\delta}$ ”
- [15] M. Kato and M. Ogata: Phys. Rev. B **111**, 035137 (2025). “Interatomic spin-orbit coupling in atomic orbital-based tight-binding models”
- [16] M. Kato and M. Ogata: in preparation. “Microscopic theory of three-center spin-dependent hopping”
- [17] M. Kato and M. Ogata: in preparation. “Spin-orbit coupling-induced spin-lattice coupling and spin-orbit-rotation coupling”
- [18] M. Kato, H. Matsuura, and M. Ogata: in preparation. “Temperature dependence of the thermal transport property of chiral phonons”
- [19] K. Takahashi, C. R. W. Steward, M. Ogata, R. M. Fernandes, and J. Schmalian: arXiv:2502.03517 (2025), to appear in Phys. Rev. B. “Elasto-Hall conductivity and the anomalous Hall effect in altermagnets”
- [20] R. Hirakida, M. Kato, and M. Ogata: Phys. Rev. B **111**, 115150 (2025). “Symmetry requirements for current-induced spin magnetization specific to chiral crystals: Multipole analysis and the hidden spin-glide symmetry”
- [21] K. Takahashi, H. Matsuura, H. Maebashi, and M. Ogata: in preparation. “Electrical and thermal magnetotransport and the Wiedemann-Franz law in semimetals with electron-electron scattering”
- [22] Y. Suzumura, T. Tsumuraya, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 054704 (2024). “Seebeck coefficient of two-dimensional Dirac electrons in an organic conductor under pressure”
- (学位論文)
- [23] 遠藤純矢: “Microscopic Theory of Transverse Thermoelectric Transport” (横熱電輸送の微視的理論) (東京大学大学院理学系研究科・博士論文)
- [24] 加藤将貴: “Microscopic theory of angular momentum transport and angular momentum couplings in chiral materials” (カイラル物質における角運動量輸送と角運動量結合の微視的理論) (東京大学大学院理学系研究科・博士論文)
- (著書)
- [25] 小形正男: 『物性物理のための場の理論・グリーン関数(第2版) — 量子多体系をどう解くか?』臨時別冊・数理科学 SGC ライブラリ 193.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [26] H. Matsuura: The 6th international Conference on Smart Materials and Nanotechnology (Chiang Mai, Thailand, November 5–8, 2024). “Cooperative Nernst Effect of Multilayer (film-substrate) Systems: Parallel Circuit Model Study”
- [27] H. Maebashi, K. Takahashi, H. Matsuura, and M. Ogata: APS Global Physics Summit (Anaheim, USA, March 16–21, 2025). “Effects of momentum dissipation on thermoelectricity in strongly correlated Fermi liquids”
- [28] R. Hirakida, M. Kato, and M. Ogata: International Conference on Magnetism 2024 (Bologna, Italy, June 30–July 5, 2024). “Analysis of current-induced spin magnetizations in chiral tight-binding models with multipoles”
- [29] K. Kitayama and M. Ogata: 36th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS) 2024. “Nonlinear optical responses in α -type organic salt”
- [30] K. Kitayama and M. Ogata: International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM) 2024. “Nonlinear optical responses in α -type organic salt”
- [31] K. Kitayama and M. Ogata: Quantum Extreme Universe: Matter, Information, and Gravity. “Nonlinear optical responses in α -type organic salt”
- [32] K. Kitayama and M. Ogata: The 2nd U-Tokyo ISSP・RIKEN CEMS Collaboration Workshop. “Nonperturbative effects in second harmonic generation”
- [33] K. Kitayama and M. Ogata: APW-RIKEN-Tsinghua-Kavli workshop “Highlights on condensed matter physics”. “Nonperturbative effects in second harmonic generation”
- [34] K. Kitayama and M. Ogata: International School and Symposium on Nanodevices and quantum Technologies (ISNTT). “Nonperturbative effects in second harmonic generation”
- [35] K. Kitayama and M. Ogata: New Trends in Condensed Matter Theory 2024. “Nonperturbative effects in second harmonic generation”
- [36] K. Kitayama and M. Ogata: APS March Meeting 2025 (Anaheim, USA, March 16–21, 2025). “Nonlinear optical responses in α -type organic salt”
- 招待講演

- [37] M. Ogata, H. Maebashi, K. Takahashi, and M. Matsuura: 40th International & 20th European Conference on Thermoelectrics (ICT2024) (Krakow, Poland, June 30–July 4, 2024). “Power factor and Lorenz ratio in strongly correlated electron systems: Effects of Umklapp scattering”
- [38] M. Ogata and H. Matsuura: Conference of Condensed Matter Physics (Yangtze River Delta Physics Research Center, Liyang, China, August 4–9, 2024). “Magnon Drag: A new route for the Enhanced Seebeck effect”
- [39] M. Ogata and H. Matsuura: The 6th international Conference on Smart Materials and Nanotechnology (Chiang Mai, Thailand, November 5–8, 2024). “Magnon Drag: A new route for the Enhanced Seebeck effect”
- [40] M. Ogata: New Zealand-Japan workshop on emerging solid-state technology for low-enthalpy energy harvesting (Wellington, New Zealand, November 11–12, 2024). “Enhancement of Seebeck and Nernst effects due to Phonon-drag at low temperatures”
- [41] H. Matsuura: International Workshop for Energy Storage Developments and Conversion Technologies (BRIN, Indonesia, August 19–20, 2024). “Recent progress in Thermoelectric Theory: focusing on Drag Effects”
- [42] M. Ogata, H. Matsuura, H. Maebashi, J. Endo, and H. Fukuyama: Workshop on Recent Theoretical Advances in Thermoelectrics (NIMS, Tsukuba, December 11, 2024). “Seebeck and Nernst effect by Phonon-drag”
- [43] H. Matsuura, M. Ogata, and H. Fukuyama: Workshop on Recent Theoretical Advances in Thermoelectrics (NIMS, Tsukuba, December 11, 2024). “Theory of phonon drag effect in $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ ”
- (国内会議)
- 一般講演
- [44] 小形正男: 日本物理学会、北海道大学、2024, 9.16–19 (年次大会). “ホール伝導度の新しい定式化と軌道帯磁率との厳密な関係: ディラック系, ラッシュバ系への応用”
- [45] 松浦弘泰, A. Riss, F. Garmroudi, M. Parzer, and E. Bauer: 日本物理学会、北海道大学 (年次大会). “薄膜・基板系における熱電効果の理論: 並列回路模型による解析”
- [46] 尾崎壮駿、松浦弘泰、立石幾真、是常隆、小形正男: 日本物理学会、北海道大学 (年次大会). “ノーダルライン半金属 ZrSiS における状態密度の増大を伴わない軌道常磁性”
- [47] 北山圭亮、小形正男: 日本物理学会、北海道大学 (年次大会). “第二次高調波発生の非摂動効果に関する理論研究”
- [48] 遠藤純矢、松浦弘泰、小形正男、Manfred Sigrist: 日本物理学会、北海道大学 (年次大会). “ラッシュバ型スピン軌道相互作用による異常ネルンスト係数の増大”
- [49] 加藤将貴、小形正男: 日本物理学会、北海道大学 (年次大会). “多軌道スピン依存ホッピングとカイラルスピン軌道相互作用の微視的理論”
- [50] 高橋慶伍、松浦弘泰、前橋英明、小形正男: 日本物理学会、北海道大学 (年次大会). “電子格子系の輸送現象の理論: フォノンドラッグからフォノン媒介電子流体へのクロスオーバー”
- [51] 溝口知成、松浦弘泰、小形正男: 日本物理学会、online 2025, 3.18–3.21 (春季大会). “傾いた 2 次元マッスレディラック電子系の軌道磁化率”
- [52] 加藤将貴、小形正男: アシンメトリ量子領域全体会議・公募研究キックオフ会議 (東広島芸術文化ホール). “多軌道スピン依存ホッピングとカイラルスピン軌道相互作用の微視的理論”
- 招待講演
- [53] 松浦弘泰: 日本磁気学会におけるシンポジウム「磁性を活用した新規熱電材料と新機能」(秋田大学、2024. 9.26). “磁気秩序下における熱電効果の最近の進展: マグノンドラッグ効果を中心に”
- [54] 加藤将貴、小形正男: 分子研研究会「キラリティが関連する動的現象」(分子研、2025, 3.10–12) “多軌道スピン依存ホッピングとカイラルスピン軌道相互作用の微視的理論”
- (セミナー)
- [55] M. Ogata: ETH Zurich, Seminar in Theoretical Group. 2025, 2.18 (ETH, Zurich). “Seebeck effect with phonon- and magnon-drag: Routes to enhance Seebeck”
- [56] 小形正男: 埼玉大学大学院・理工学研究科、藤本研究室セミナー, 2024, 6.11 (埼玉大学) “固体中電子の磁性やホール効果 —基礎から最近のトポロジカル物質まで—”
- [57] 松浦弘泰: 第 7 回創発研究交流会, 2024, 6.25 (東京大学) “多様な熱流に由来した熱電効果”
- [58] 松浦弘泰: 京都大学化学研究所小野研究室セミナー, 2024, 11.12 (京都大学) “多様な熱流に由来した熱電効果”
- [59] 松浦弘泰: 第 5 回新奇二次元デバイス・物質科学ワークショップ 5th Workshop on Novel 2D Device & Materials Physics (2DMAp) (主催: 学術変革領域研究 (B) 14 族ナノシート科学の創成). 2024, 6.11 (名古屋大学) “フォノンドラッグの基礎と最近の進展”
- [60] 前橋英明: 熱電研究会 2024 秋 (熱電塾 2024 秋) (東京理科大学神楽坂キャンパス, 2024, 9.28) “プランキアン散逸体の熱伝導度とゼーベック係数”

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則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 データ同化結晶構造探索

シミュレーション手法を用いた結晶構造予測は、様々な新規物質の発見に貢献してきており、今後も構造探索のために必要不可欠な役割を担うと考えられるが、原子数の増加によって組合せ爆発が起きることの限界が存在する。そこで当研究室では、粉末回折実験で結晶構造由来の回折ピークが多少なりとも観測された場合、その情報をシミュレーションに取り込むことで効率的に構造探索を行うための、データ同化結晶構造探索手法を開発している。

データ同化結晶成長シミュレーション

本年度は、前年度まで開発に取り組んできた多相系材料のためのデータ同化結晶成長シミュレーションの、多段階アプローチの有効性についての検討を行った。その過程で、 SiO_2 の三つの結晶相のピークを同時に含む粉末 XRD データからでも、データ同化結晶成長シミュレーションを多段階で適用することで、全ての結晶構造を再現できることを確認した。この三つの結晶相には、単位胞内に数十原子を含む結晶構造で知られるコーサイトも含まれており、データ同化結晶成長シミュレーションが複雑な結晶構造の決定にも有効であることを示唆する結果となった [6, 13, 18]。

イットリウム高圧相のデータ同化構造探索

イットリウムは圧縮に伴い、原子層の積層順序の変化によって特徴づけられる相転移を示すことが知られている。しかし、高圧側の相については未だ詳細が不明な点が残っており、45 GPa で現れる歪んだ面心立方 (dfcc) 構造についてもコンセンサスの取れた結論は未だに得られていない。そこで本研究では、データ同化結晶構造探索手法を適用することで、これまで見過ごされてきた dfcc 構造の探索を改めて行った、その結果、従来知られていた dfcc-I, II 構造

とは異なる新構造を発見した。この構造は、dfcc-I, II とのエンタルピー差が非常に僅かであり、さらにフォノンが広い圧力領域で安定であることが確認された (図 3.2.4) [26]。

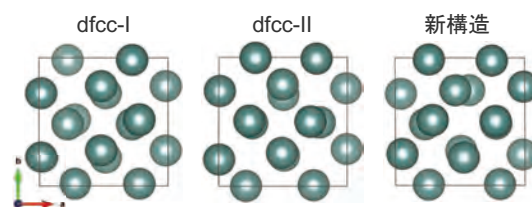


図 3.2.4: イットリウム高圧相の候補構造として既に提案されていた dfcc-I, II 構造と、本研究で発見した新構造。

3.2.2 進化的アルゴリズムとニューラルネットワークポテンシャルによる構造探索

170 GPa におけるランタン水素化物 (La-H) で 260 K の高温超伝導が発見され、室温超伝導の候補として水素化物が注目されている。La-H 系に対して加熱と冷却を繰り返すと超伝導転移温度 (T_c) が更に上昇し、最大で 550 K に到達するという報告があり、hot superconductivity (HSC) と名付けられている。しかし、他の研究グループによる再現は成功しておらず、その真偽について更なる検証が行われている。HSC のメカニズムは明らかになっていないが、加熱・冷却の繰り返しによって La-H がダイヤモンド・アンビル・セル内に含まれる他の物質と反応して多元系の La-H が形成され、それが HSC を引き起こしていると考えられている。

HSC を検証するために、電極由来の Pt が La-H と反応した場合を想定して、20 GPa における La-Pt-H 系の高圧安定相と超伝導相の探索を行なった。まず、進化的アルゴリズム、ニューラルネットワークポテンシャル計算、密度汎関数を用いた第一原理計算を連携させた独自の手法に基づいて安定相・準安定相の高速探索を実施した。得られた化合物が金属だった場合は、Allen-Dynes の式を使って T_c の計算を行い、超伝導相を探索した。その結果、新物質の LaPtH_6 (Fig. 3.2.5) が熱力学的に安定な化合物として得られ、 $T_c = 18.7$ K の超伝導になることを予測した [7, 14, 24]。続いて、Pt を他の白金族元素に置換して同様の探索を行なったところ、 $\text{La}_2\text{Pd}_3\text{H}_{10}$ で $T_c = 10.1$ K などが得られた [19, 23]。一方、今回調べた条件下では HSC の出現は確認できなかったため、真偽について更なる検証が必要となる。現在は、水素供給剤であるアンモニアボラン由来の N と B の両

方が La-H と反応した場合を想定して、20 GPa における La-N-B-H 系の探索にも取り組んでいる [25]。

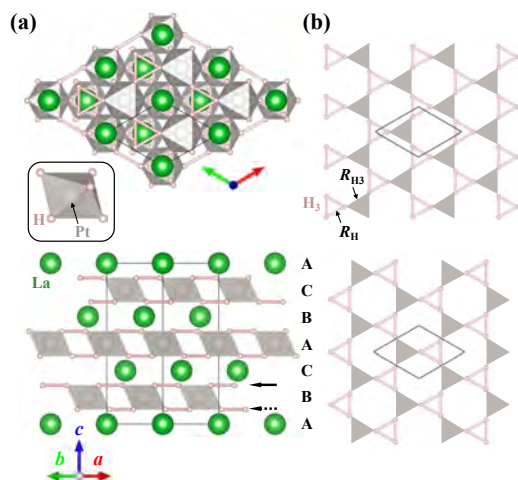


図 3.2.5: (a) LaPtH₆ の結晶構造。(b) 水素原子が H₃ ユニットを組み、カゴメ格子を形成。

3.2.3 液体や高分子材料の THz 帯複素誘電率の計算手法開発

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く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。特に原子変位の大きい液体や高分子材料については、化学結合やローンペアごとの電子分布の重心を表すワニエ中心の機械学習モデル (Machine Learning Wannier Center, MLWC) を開発し、それを用いて計算された分子動力学計算の各ステップでの双極子モーメントから複素誘電率を計算する手法を開発してきた。

本年度はこの手法をアルコール [4]、プロピレングリコールとその重合体 [8] に適用し、論文にまとめた。またこれらの計算に必要なナノ秒程度の分子動力学計算を実現するため、能動学習を用いた堅牢かつ正確なニューラルネットワークポテンシャルの開発グループと共同研究を行い、その検証を行った [9]。

また MLWC の学習に必要なデータ量を減らし未学習の物質への可搬性を高める目的で、遠方の分子からの寄与を双極子電場として取り入れる手法を開発した。これにより、記述子に含める周辺構造情報のカットオフ距離を極端に小さくした場合、MLWC の精度が従来の原子位置だけを記述子としたものに比べて向上することを確認した [12, 29]。

3.2.4 相関波動関数理論トランスコリレイティッド法の開発

第一原理計算には、密度汎関数理論 (DFT) もしくは波動関数理論 (WFT) に基づく手法が用いられる。このうち結晶やアモルファス、表面・界面、大規模分子の計算に利用できるのは、事実上、計算コストと計算精度のバランスに優れた DFT のみである。ところが現状の DFT は強相関電子系の電子状態を記述できないことに加え、系統的な精度向上の方法がない。そこで我々は、電子間距離に依存する項を用いて電子相関効果を取り入れることのできる相関波動関数理論トランスコリレイティッド (TC) 法の開発を続けている。

前年度から TC 法の枠組みにおけるグリーン関数法の定式化を行ってきたが、本年度はグリーン関数を用いて全エネルギー以外の物理量計算を行うための方法論開発を行った。実際にイオン性ハバード模型といくつかの原子・分子にこの手法を適用し、従来の TC 法の結果と比較した結果、電子密度の改善と、従来法では過大評価が目立っていたイオン化エネルギーの改善を確認した [11, 15, 20, 27, 30]。

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 H₃S 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たが、いずれも 100 GPa を超える超高压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 H₃ 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 KMgH₃ に着目し、ドーピングや圧力を変えて立方晶構造の安定性と超伝導転移温度について調べてきた。今年度はこれまでのマクミラン公式に変えて、さらに精度の高い超伝導密度汎関数理論を適用し、特にスピン揺らぎの効果について検討した。その結果、高温超伝導が報告されている水素化物に比べて、このペロブスカイト系はスピン揺らぎによる超伝導転移温度の低下が著しいことが明らかになった [10, 16, 17, 21]。現在、実験で超伝導が観測されている VH₂ についても、同様の検討を行っている [28]。

3.2.6 非熱的レーザー加工の微視的シミュレーション

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行ってきた。特に我々は非熱的レーザー加

工における電子エントロピー効果の重要性を初めて指摘し、その効果を取り入れた分子動力学法や、よりマクロな流体力学的なシミュレーション手法を定式化してきた。本年度は後者の手法を用いて、100fsの超短パルスレーザーを用いた加工の場合、10psの短パルスレーザーに比べて標的の熱的損傷が少ないことを示すことに成功し、論文として発表した [3]。

3.2.7 高圧下での氷の弾性と水素の量子効果

水素原子の核の量子効果 (NQE) が高圧および常温条件下における氷 VII の弾性特性に与える影響を、第一原理経路積分分子動力学計算 (FP-PIMD) を用いて調べ、圧力 40 GPa 以上で氷 VII 相が静的無秩序構造から動的無秩序構造へ移行する要因となることを見出した。この移行は、弾性定数の非線形増加によって特徴付けられる。第一原理分子動力学計算 (FPMD) と FP-PIMD 計算の比較から、NQE は 70 GPa および 300 K において氷の弾性定数を約 20% 増加させることを示した [2]。

3.2.8 局在関数を基底とした振幅符号化

量子計算における重要な汎用技術の一つが振幅符号化である。これまでに複数のアプローチが提案されてきたが、いずれも古典計算機で指数関数の計算コストを要するか、明示的な構築が提供されていないオラクルを必要とする場合がほとんどだった。実践的な量子計算への需要が高まる中、本研究ではローレンツ型の局在複素関数を基底として用いることで任意の量子状態を確率的に生成する、効率的な符号化技術を開発した [5]。

<受賞>

- [1] 常行真司, 第 21 回本多フロンティア賞「材料構造と非調和フォノン物性および電子物性の非経験的予測手法の開発」, 公益財団法人 本多記念会, 2024 年 5 月 24 日.

<報文>

(原著論文)

- [2] J. Tsuchiya, M. Shiga, S. Tsuneyuki, and E.C. Thompson, "Nuclear quantum effect on the elasticity of ice VII under pressure: A path-integral molecular dynamics study", *Phys. Rev. Research* 6, 02330 (2024).
- [3] S. Watanabe, R. Akashi, T. Ishikawa, Y. Tanaka, and S. Tsuneyuki, "Hydrodynamic simulation of laser ablation with electronic entropy effects included", *J. Appl. Phys.* 136, 133104 (2024).
- [4] T. Amano, T. Yamazaki, and S. Tsuneyuki, "Chemical bond based machine learning model for

dipole moment: Application to dielectric properties of liquid methanol and ethanol", *Phys. Rev. B* 110, 165159 (2024).

- [5] T. Kosugi, S. Daimon, H. Nishi, S. Tsuneyuki, and Y. Matsushita, "Qubit encoding for a mixture of localized functions", *Phys. Rev. A* 110, 062407 (2024).
- [6] Y. Kubo, R. Sato, Y. Zhao, T. Ishikawa, and S. Tsuneyuki, "Data-assimilated crystal growth simulation for multiple crystalline phases", *J. Chem. Phys.* 161, 214113 (2024).
- [7] T. Ishikawa, Y. Tanaka, and S. Tsuneyuki, "Superconducting LaPtH₆ with triatomic hydrogen units", arXiv:2502.06821 (2025).
- [8] T. Amano, T. Yamazaki, N. Matsumura, Y. Yoshimoto, S. Tsuneyuki, "Transferability of the chemical bond-based machine learning model for dipole moment: the GHz to THz dielectric properties of liquid propylene glycol and polypropylene glycol", arXiv preprint arXiv:2410.22718, to appear in *Phys. Rev. B*.
- [9] N. Matsumura, Y. Yoshimoto, T. Yamazaki, T. Amano, T. Noda, N. Ebata, T. Kasano, and Y. Sakai, "Generator of Neural Network Potential for Molecular Dynamics: Constructing Robust and Accurate Potentials with Active Learning for Nanosecond-Scale Simulations, to appear in *J. Chem. Theory Comput.* (2025).
- [10] Shaocong Lu, Ryosuke Akashi, Mitsuaki Kawamura, and S. Tsuneyuki, "Assessing the possible superconductivity in doped perovskite hydride KMgH₃: Effects of lattice anharmonicity and spin fluctuations", to appear in *Phys. Rev. B*.

(学位論文)

- [11] 千田拓実, "Green's function approach for computing physical quantities in the framework of the transcorrelated method" (物理量の計算を目的としたトランスコリレイティッド法の枠組みにおける Green 関数法), 東京大学, 2025 年 3 月 博士 (理学) .
- [12] 岡本悠太郎, 「長距離相互作用を考慮した液体における双極子モーメントの機械学習モデル」(Machine Learning Model of Dipole Moments in Liquids Considering Long-Range Interaction), 東京大学, 2025 年 3 月 修士 (理学) .

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [13] Y. Kubo, R. Sato, Y. Zhao, T. Ishikawa, and S. Tsuneyuki, "Crystal Structure Determination by Large-Scale Data Assimilation Simulation", XXXV IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2024), Aristotle University, Thessaloniki, Greece, Jul. 7–12, 2024.

- [14] T. Ishikawa, Y. Tanaka, and S. Tsuneyuki, “Evolutionary Search for Superconducting La-Pt-H Compounds under High Pressure”, XXXV IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2024), Thessaloniki, Greece, July 7–12, 2024.
- [15] T. Chida and S. Tsuneyuki: “Green’s function method in the framework of the transcorrelated method”, XXXV IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2024), Aristotle University, Thessaloniki, Greece, July 7–12, 2024.
- [16] S. Lu, R. Akashi, M. Kawamura and S. Tsuneyuki, “Assessing the possible superconductivity in doped perovskite hydride KMgH_3 under lattice anharmonicity and spin fluctuation”, XXXV IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2024), Thessaloniki, Greece, July 7–12, 2024.
- [17] S. Lu, R. Akashi, M. Kawamura and S. Tsuneyuki, “Assessing the Possible Superconductivity in Doped Perovskite Hydride KMgH_3 under Lattice Anharmonicity and Spin Fluctuation”, From Quantum Materials to Quantum Information: Symposium on Trans-Scale Quantum Science and Quantum Materials Synthesis” (QMQUI 2024), Okinawa Institute of Science and Technology, Nov. 11–15, 2024.
- [25] 石河孝洋, 田中悠太, 常行真司, 「La-N-B-H 系の高圧安定相と超伝導相の予測」, 日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 18 日–21 日.
- [26] 久保祐貴, 石河孝洋, 中本有紀, 常行真司, 「データ同化によるイットリウム高圧相の構造探索」, 日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 21 日.
- [27] 千田拓実, 常行真司, 「Transcorrelated 法とグリーン関数法による原子分子の電子密度分布」, 日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 21 日.
- [28] S. Lu, R. Akashi, M. Kawamura and S. Tsuneyuki, “Exploring the superconducting properties of VH_2 ”, 日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 21 日.
- [29] 岡本悠太郎, 天野智仁, 山崎民雄, 石河孝洋, 常行真司, 「長距離相互作用を考慮した液体における双極子モーメントの機械学習モデル」日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 21 日.
- [30] 千田拓実, “Electron density calculations by the transcorrelated method: Application to the ionic Hubbard model and atomic systems”, Third Workshop on Density Functional Theory: Fundamentals, Developments, and Applications (DFT2025), Auditorium, Integrated Innovation Building (IIB), RIKEN Kobe, 2025 年 3 月 26 日.

(国内会議)

一般講演

- [18] 久保祐貴, 佐藤龍平, 趙元晟, 石河孝洋, 常行真司, 「多相系材料のためのデータ同化結晶成長シミュレーション」, 日本物理学会 第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 16 日.
- [19] 石河孝洋, 田中悠太, 常行真司, 「白金族元素を含むランタン水素化物における超伝導相の進化的探索」, 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学 (札幌キャンパス), 2024 年 9 月 16 日–19 日.
- [20] 千田拓実, 常行真司, 「Transcorrelated 法によるイオン性ハバード模型の電子密度分布と相関関数」, 日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年), 北海道大学 (札幌キャンパス), 2024 年 9 月 16 日.
- [21] S. Lu, R. Akashi, M. Kawamura and S. Tsuneyuki, “Assessing the possible superconductivity in hole-doped perovskite hydride KMgH_3 under lattice anharmonicity and spin fluctuation”, 日本物理学会 2024 年秋季大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 19 日.
- [22] 天野智仁, 山崎民雄, 常行真司, 「高周波誘電特性の第一原理計算 (hp230124)」第 11 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, 東京, 2024 年 10 月 25 日.
- [23] 石河孝洋, 田中悠太, 常行真司, 「白金族元素を含むランタン水素化物における超伝導相の予測」, 第 65 回高圧討論会, いわて県民情報センターアイーナ, 2024 年 11 月 13 日–15 日.
- [24] T. Ishikawa, Y. Tanaka, and S. Tsuneyuki, “Evolutionary Search for Superconducting Phases in the La-Pt-H System”, 第 34 回日本 MRS 年次大会 (横浜), 2024 年 12 月 16 日–18 日.

招待講演

- [31] 常行真司, 「第一原理から探る材料構造と非調和フォノン物性」, 本多フロンティア賞受賞記念講演, 日本学士会館, 東京, 2024 年 5 月 24 日.

3.3 藤堂研究室

物質の状態を理解するためには、多体シュレーディンガー方程式を解き、統計力学における分配関数を求める必要がある。しかし、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、この方程式を完全に解くことは困難である。そこで、元の方程式に内在する対称性や量子相関といった物理的に重要な性質を損なうことなく、シミュレーションしやすい形に再構成することが、計算物理における重要な課題となっている。

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や、経路積分に基づく量子ゆらぎの表現、特異値分解およびテンソルネットワークによる情報圧縮、統計的機械学習手法などを駆使し、量子スピンス系から実在物質、さらには量子コンピュータに至るまで、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、次世代の大規模シミュレーションに向けたオープンソースソフトウェアの開発・公開にも取り組んでいる。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「サステイナブル量子 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および量子機械学習手法の研究開発も精力的に行っている。

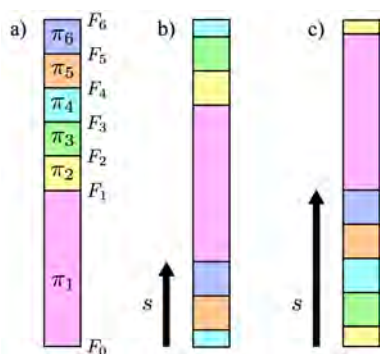


図 3.3.6: 累積分布シフト法

3.3.1 強相関係のシミュレーション手法

テンソルネットワークくりこみ群 (大久保・秋山・Kwok・藤堂)

テンソルネットワークくりこみ群は、スピン系やフェルミオン系など強相関多系の数値計算手法として近年広く使われている。この手法は、大規模な古典系および量子系の物理量を効率的に計算することが可能である。我々は、テンソルネットワークを高次元へ拡張し、精度を向上させるとともに、計算量を削減する新しいアルゴリズムの開発を進めている。特に、フェルミオン系を扱うための Grassmann テンソルネットワーク法や内部自由度が非常に大きな系における初期テンソルの圧縮方法に関する研究を行った。

不可逆マルコフ連鎖モンテカルロ法 (諏訪・藤堂)

マルコフ連鎖モンテカルロ法は高次元積分に有効だが、ランダムウォークの非効率性が課題となる。我々は、詳細釣り合いを破ることで不可逆なマルコフ連鎖を導入し、確率流によって収束速度とサンプリング効率の向上を図った。具体的には、離散状態に対して適用可能な「累積分布シフト法」と、状態空間を拡張する「リフティング法」に基づく有向ワームアルゴリズムを提案。イジング模型において、従来法より高い計算効率を実現した (図 3.3.6)。

量子モンテカルロ法における負符号問題 (室田・藤堂)

量子多体系の解析に有効な量子モンテカルロ法は、負符号問題により一部の量子格子模型で低温領域の統計誤差が指数関数的に増大するという課題を抱える。我々は、この問題を基底変換とリウエイティング手法を統合することで最適化問題として再定義し、特に Frustration-Free 系を仮定することで最適化関数の構造を単純化した。その結果、負符号の影響を効果的に軽減できることを示した。さらに数値シミュレーションにより、提案手法は既知の解析解を持つスピン系だけでなく、解析解のないフラストレーションフリー系でも高い精度と効率を維持できることを確認した。

テンソルネットワーク表現でのマルコフ連鎖モンテカルロ法 (藤堂)

マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) は複雑な確率分布からのサンプリングに広く用いられるが、自己相関や負符号問題により統計誤差の収束が遅れるという課題がある。我々は、テンソルネットワーク表現に基づく新たな MCMC 手法を提案し、確率的射影を導入することで低ランク近似に起因する系統誤差を排除しつつ、高精度を維持することに成功した。2次元イジング模型に対する数値実験により、ボンド次元の増加に伴い統計誤差が指数的に低減されることを確認した。さらに、負符号問題を含む系においても、符号の期待値について著しい改善を実現した。提案手法は高精度な統計推定を可能にする堅牢な枠組みを提供し、計算物理学をはじめとする広範な応用が期待される。

連続空間系における量子モンテカルロ法 (Zhao・藤堂)

経路積分モンテカルロ法 (PIMC) は有限温度でボース系をシミュレーション可能な手法であるが、粒子の交換を効率的に取り扱うことが課題である。従来のワームアルゴリズムは超流動ヘリウムの大規模系で実験と一致する結果を得たが、グランドカノニカル系に限定され、多数のパラメータ調整が必要である。そこで我々は、新たに連続空間 PIMC に適した交換モンテカルロ法を提案し、異なる相互作用条件間でのレプリカ交換によって巻き数セクター間の遷移を促進した。超流動ヘリウムでのベンチマークにより、巻き数推定量の統計誤差を大幅に低減できることを示した。

3.3.2 強相関多体系における新奇な状態・相転移現象

$S = 1$ キタエフスピン液体の安定性 (益子・大久保)

極低温でも秩序化せず量子揺らぎが持続するスピン液体状態に関して、 $S = 1$ のハニカム格子キタエフ模型を無限系のテンソルネットワーク法により解析した。ハイゼンベルグ相互作用や双二次相互作用を加えた場合のキタエフスピン液体の安定性を調査した結果、これらの相互作用が適切に混合され四重極自由度の相互作用とみなせる場合には、スピン液体が安定に保たれることが分かった。また、この条件下では四重極秩序相との間に直接的な相転移が生じることも明らかにした。

反強磁性励起子絶縁体における電子ラマン散乱 (諏訪)

励起子絶縁体は、電子と正孔の対である励起子が凝縮してバンドギャップを形成する量子状態であるが、これまで直接観測された例はなかった。我々は、ラマン散乱によって励起子凝縮の兆候を理論的に検出可

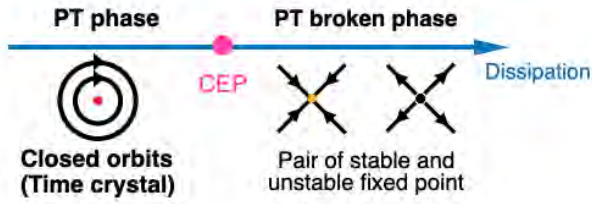


図 3.3.7: 自発的な PT 対称性の破れ

能であることを示し、二層イリジウム酸化物 $\text{Sr}_3\text{Ir}_2\text{O}_7$ の低エネルギーラマンスペクトルを解析した。中間結合領域におけるハバード模型に基づき、観測されたラマンピークが縦スピンモードに由来し、励起子凝縮による量子相転移の証拠であることを明らかにした。本結果は、BCS-BEC クロスオーバーの研究や新物質探索に繋がる重要な知見を提供する。

格子フェルミオン系に対する Grassmann テンソルネットワークの応用 (Kwok, 秋山, 藤堂)

格子フェルミオン系の経路積分を Grassmann テンソルネットワークによって計算する手法を開発した。特に 2 次元有限密度 2 カラー QCD において、非可換ゲージ自由度を効率よく取り扱う情報圧縮手法を導入し、カイラル凝縮やダイクォーク凝縮、粒子数密度などの物理量をゲージ結合定数の変化とともに計算可能とした。従来の方法では強結合極限やゲージ固定に頼っていたが、本研究ではゲージ場を直接扱うことで、符号問題の有無にかかわらず無限体積極限での計算を実現し、高次元非可換ゲージ理論や 3 カラー QCD への応用に向けた足がかりを得た。

負のエネルギー弾性模型 (岩木)

ゲルにおいて観測された負のエネルギー弾性のミクロな起源を明らかにするため、ゴムのエントロピー弾性を記述する 1 次元ランダムウォークにエネルギーコストを導入した模型を提案した。本モデルは 1 次元イジングモデルと対応し、自由エネルギーの解析的導出が可能である。弾性定数の振る舞いは先行研究と定性的に一致し、ゲルの弾性理解に本質的な枠組みを提供する。解析の容易さから教育的価値も高い。

PT 対称な状態としての連続時間結晶 (中西)

開放量子系における時間並進対称性の自発的破れは近年注目されているが、その発現条件は十分に解明されていない。我々は、リンドブラッド形式におけるパリティ-時間 (PT) 対称性が、多様な系で持続的な周期振動を生じる一般的条件であることを示した。集団スピンモデルや二部格子型ボソン系を対象とし、動的相 (時間振動状態) からの転移が例外点に対応し、PT 対称性が自発的に破れることを明らかにした。さらに、線形安定性解析により、この現象がミクロな PT 対称性に起因することを確立した (図 3.3.7)。

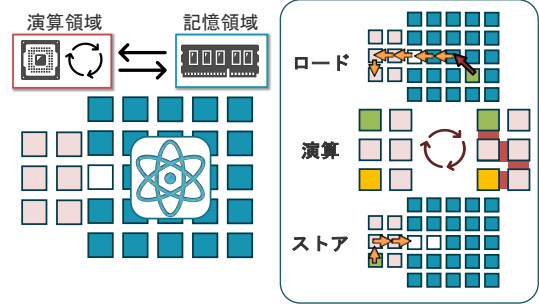


図 3.3.8: ロードストア型誤り耐性量子計算機

長距離相互作用系における有効次元の変化 (白谷・藤堂)

量子臨界現象において、長距離相互作用は空間・時間の異方性を制御する手段として注目されているが、その解析には広大な探索空間と強い有限サイズ効果が障壁となっていた。我々は、「空間軸と虚時間軸の相関比を同一かつ最適にする」という原理に基づき、モデルのパラメータを自動調整する手法を導入し、これらの課題を大幅に克服した。この手法により、一次元横磁場イジング模型の量子相転移において、ユニバーサリティクラスの境界を高精度で決定することに成功した。

3.3.3 量子計算と量子アルゴリズム

パラメータ化量子回路の並列勾配推定 (今村・藤堂)

変分量子アルゴリズム (VQA) は、量子デバイスと古典コンピュータを組み合わせた量子アルゴリズムであり、エラー訂正のない NISQ での有用性が期待されている。我々、従来は複数の量子回路が必要だった各パラメータの勾配推定を、1 種類の量子回路で並列に行う新手法を提案し、計算コストを削減した。シミュレーターによる VQA タスクで検証を行い、学習初期の収束が従来法より速いことを確認した。

ロードストア型誤り耐性量子計算機アーキテクチャの開発 (小堀・藤堂)

従来の誤り耐性量子計算ではレジスタ型アーキテクチャが主流だったが、移植性やメモリ効率に課題があった。そこで本研究では、古典計算機で広く用いられるロードストア方式を量子計算に応用した、ロードストア量子計算機アーキテクチャ LSQCA を提案した。表面符号に基づく誤り耐性量子計算への適用により、計算時間を数%犠牲にするだけで、メモリ効率を 1.8 倍以上向上させることに成功した (図 3.3.8)。

テンソルネットワークの量子回路への埋め込み (菅原・猪俣・室田・大久保・藤堂)

変分量子アルゴリズム (VQA) および量子ニューラルネットワーク (QNN) における主要な課題である barren plateau 問題への対処を目的として、テンソルネットワークを活用した新たな手法を提案した。VQA に対しては、従来の MPS(行列積状態) に代わり、長距離相関や二次元系の表現に適した階層構造を持つツリー型テンソルネットワーク (TTN) を量子回路に効率的に埋め込む方法を開発した。TTN を用いることで、状態の表現力が向上し、barren plateau を回避しやすくなるとともに、回路深さも浅く保てることから、NISQ デバイスに適した構成が実現できる。さらに、この手法は実用的な計算コストで広範な TTN に適用可能であり、二次元系や長距離相関をもつ系への VQA の応用可能性を大きく広げることが期待される。一方 QNN に対しては、あらかじめ古典的に学習した MPS 分類器を量子回路に段階的に変換する adiabatic encoding フレームワークを提案した。これは、量子回路中でポストセクションを徐々に排除しつつ性能を維持できる手法であり、barren plateau や局所最適値による学習の困難性を回避する。人工データセットにおける理論検証に加え、MNIST データセットを用いた数値実験により、本手法の有効性とロバスト性が実証された。これらの成果は、テンソルネットワークと量子機械学習の融合によって、実用的な量子アルゴリズムの構築に新たな道を開くものである。

表面符号のシンδροーム統計に基づくノイズモデル推定 (小堀・藤堂)

誤り耐性量子計算で注目される表面符号では、ノイズモデルの情報を活用することで復号性能が向上するが、事前のトモグラフィや時間変化による性能低下が課題である。我々は、復号中に得られるシンδροーム測定結果を用いてノイズモデルを動的に推定する手法を提案した。テンソルネットワークによる表面符号シミュレータとモンテカルロ法を組み合わせ、パウリノイズを超える複雑なモデルや振幅減衰ノイズにも対応可能とした。推定結果を用いることで復号性能の維持・向上が確認され、実用的な量子計算への応用が期待される。

多量子ビット演算子の分解 (藤堂)

量子アルゴリズムにおける多量子ビット演算子の効率的な分解は、回路深さやゲート数を抑え、計算効率を高める上で極めて重要である。本研究では、CCZ および CCCZ ゲートに対し、量子ビット結合トポロジーに最適化された分解法を提案した。たとえば、正方格子型結合と補助量子ビットを用いることで、CCZ ゲートを CZ 深さ 4 で実現し、CCCZ ゲートについては 14 個の CZ ゲートを維持しつつ、4 つの結合のみで分解可能であることを示した。また、CCCZ ゲートに対しては、T ゲートカウント 6 を維持しながら、CNOT カウント 7、T ゲート深さ 2 の分解を達成し、量子回路の実行効率を向上させた。こ

れらの成果は系統的な分解手法に基づいており、他の量子ゲートへの応用も期待される。

量子特異値変換によるハミルトニアンシミュレーション (大江・大久保・藤堂)

量子コンピュータによるハミルトニアンシミュレーションは、量子優位性の有望な応用の一つである。我々は、従来の鈴木・トロッター分解に代わり、量子特異値変換 (QSVT) を用いた時間発展演算子の実装法に注目し、ノイズの影響とその抑制法を検討した。1 次元フェルミハバード模型を対象とした解析により、長時間シミュレーションにおいて QSVT 法はトロッター法よりノイズに強く、さらに QSVT に伴う補助量子ビットの測定がエラー検出として機能し、誤りの影響を効果的に抑制できることを示した。

グラフ理論を用いたテンソルネットワークの縮約の最適化 (Mukherjee・秋山)

テンソルネットワークの縮約順序は二分木として表現でき、その最適化は一般には NP 困難であるが、木幅が有限なグラフや平面グラフ、量子回路のような特定のクラスでは効率的に解けることが知られている。本研究では、テンソルネットワークの縮約複雑性をグラフの構造的指標 (伝導率、連結性、パス幅など) と関連付けて解析し、縮約の複雑性が基底グラフのラプラシアン固有値と深く関係していることを見出した。さらに量子回路など実用的な応用例に対して最適な縮約アルゴリズムを設計することを目指し研究を進めている。

古典検定と量子単純仮説検定の統合 (坂下)

量子コンピュータにおける高精度な量子状態準備は重要であり、その検証は複合仮説検定問題として定式化される。しかし、この問題を直接扱った先行研究はなく、既存の手法は個別測定と古典的な二項検定を組み合わせたもので、量子相関を取り込めず精度が低い。我々は、古典的手法と量子単純仮説検定を統合し、量子相関を部分的に活用する新たな検定手法を提案した。本手法は真のパラメータに関する事前知識を必要とせず、実用性の高いアプローチである。

3.3.4 機械学習と統計物理

ノイズを含む関数からのテンソルトレイン学習 (櫻井)

Tensor Cross Interpolation (TCI) は関数の評価値にノイズが含まれる場合、過学習のリスクがある。そこで本研究では、TCI によって得られたテンソルトレインを初期状態とし、評価点に対して再フィッティングを行うことで、ノイズの影響を低減する新たな手法を提案した。特に Quantics Tensor Train (QTT)

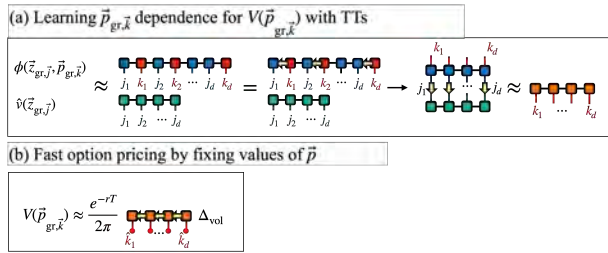


図 3.3.9: テンソルネットワークによるオプション価格計算

形式を採用し、sin 関数や二点相関関数への適用を通じて数値的に検証を行った結果、TCI 単独での近似に比べてノイズに対するロバスト性が向上することを確認した。本手法は、精度と安定性を両立する高次元関数近似への有望なアプローチである。

フーリエ変換に基づくオプション価格計算の新技术法 (櫻井)

フーリエ変換に基づくオプション価格の計算において、パラメータ依存性を圧縮対象の関数に含んだまま多次元積分を行う新たな手法を提案した。このアプローチにより、オプション価格はパラメータを含む関数として明示的に表現され、さまざまな市場条件やモデルパラメータに対する計算が一括して処理可能となる。さらに、得られた関数を用いることで、従来のモンテカルロ法と比較して大幅に高速な価格計算を実現できることが確認され、実務的な金融工学への応用が期待される (図 3.3.9)。

統計力学的なアプローチによる深層ニューラルネットワークの解析 (玉井・大久保・藤堂)

深層学習は多分野で成果を挙げている一方、その動作原理の理解には未解明な点が多く、基礎研究が求められている。本研究では、人工ニューラルネットワークにおける信号伝播の過程を統計力学的手法により解析し、理解を深めることを目的としている。これまで注目してきた信号伝播と吸収状態転移とのアナロジーを、より一般的な活性化関数やネットワークアーキテクチャ、ならびに高次元入力データにも拡張し、理論の適用範囲を広げた。これにより、深層学習の動作理解に向けた基盤的知見が一層強化された。

テンソルネットワークを用いた生成モデルの構造最適化 (大久保)

量子状態と確率分布の対応関係を活用した生成モデル「ボルンマシン」に注目し、量子状態をツリー型テンソルネットワークで表現する手法を提案した。データに応じてネットワーク構造を最適化することで、生成性能の向上に加え、データに潜む関連構造

をテンソルネットワークの形として抽出可能であることを示した。いくつかの具体例を通じてこの有効性を検証し、多様なデータセットへの応用と、隠れた構造の解明に資する手法であることが期待される。

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・ライブラリ

物質科学シミュレーションのポータル MateriApps (藤堂・大久保)

日本国内においても、高性能な物質科学シミュレーションソフトウェアが数多く開発・公開されているが、その知名度は必ずしも高くない。また、ドキュメントの作成やユーザサポートにも問題が多く、普及の妨げとなっている。物質科学アプリケーションのさらなる公開・普及を目指し、物質科学シミュレーションのポータルサイト MateriApps の整備を行った (<https://ma.issp.u-tokyo.ac.jp/>)。また、気軽にシミュレーションを始めることのできる環境構築を目指し、MateriApps アプリケーションがプレインストールされた仮想 Linux システム MateriApps LIVE!、アプリケーションのインストールスクリプト集 MateriApps Installer の開発・公開を続けている。

また、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 $H\Phi$ 、多変数変分モンテカルロ法 mVMC の開発・高度化も進めた。

<受賞>

- [1] D. Watari, H. Tanimoto, T. Okubo, S. Todo, K. Nishiyama, Best Paper Award, 13th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA2024), Nov. 9, 2024.
- [2] 今村宗一郎、ポスターセッション最優秀賞、量子情報関東 Student Chapter、2025 年 3 月 31 日

<報文>

(原著論文)

- [3] N. Yoshioka, T. Okubo, Y. Suzuki, Y. Koizumi, and W. Mizukami, Hunting for quantum-classical crossover in condensed matter problems, npj Quantum Information **10**, 45 (10pp) (2024).
- [4] S. Akiyama, Y. Meurice, R. Sakai, Tensor Renormalization Group for fermions, J. Phys.: Condens. Matter **36**, 343002 (31pp) (2024).
- [5] Y. Alexeev *et al.*, Quantum-centric supercomputing for materials science: A perspective on challenges and future directions, Future Generation Computer Systems **160**, 666–710 (2024).

- [6] K. M. Nakanishi, T. Satoh, S. Todo, Decompositions of multiple controlled- Z gates on various qubit-coupling graphs, *Phys. Rev. A* **110**, 012604 (7pp) (2024).
- [7] R. West, S. Mukherjee, Stylized Rendering as a Function of Expectation, *ACM Trans. Graph.* **43**, 96 (19pp) (2024).
- [8] T. Mashiko, T. Okubo, Quantum phase transition between spin liquid and spin nematics in spin-1 Kitaev honeycomb model, *Phys. Rev. Research* **6**, 033110 (11pp) (2024).
- [9] S. Akiyama, R. G. Jha, J. Unmuth-Yockey, $SU(2)$ principal chiral model with tensor renormalization group on a cubic lattice, *Phys. Rev. D* **110**, 34519 (2024).
- [10] S. Akiyama, Y. Kuramashi, Tensor renormalization group study of $(1+1)$ -dimensional $U(1)$ gauge-Higgs model at $\theta = \pi$ with Lüscher's admissibility condition, *J. High Energ. Phys.* **09**, 086 (2024).
- [11] A. Iwaki, S. Ozaki, Solvable toy model of negative energetic elasticity, *Phys. Rev. E* **110**, L032102 (6pp) (2024).
- [12] H. Suwa, S. Todo, Control of Probability Flow in Markov Chain Monte Carlo—Nonreversibility and Lifting, *J. Chem. Phys.* **161**, 174107 (10pp) (2024).
- [13] A. Iwaki, Truncation error in series expansions linking microcanonical and canonical ensembles, *J. Phys. Soc. Jpn.* **93**, 125001 (2pp) (2024).
- [14] K. Homma, T. Okubo, N. Kawashima, Nuclear norm regularized loop optimization for tensor network, *Phys. Rev. Research* **6**, 043102 (2024).
- [15] S. Shiratani, S. Todo, Stochastic approximation analysis of dynamical quantum critical phenomena in long-range transverse-field Ising chain, *Phys. Rev. E* **110**, 064106 (14pp) (2024).
- [16] F. Duc, *et al.*, Field-driven spin structure evolution in $MnCr_2S_4$: A high-field single-crystal neutron diffraction study, *Phys. Rev. B* **110**, 214416 (2024).
- [17] H. Takahashi, R. Sakurai, H. Shinaoka, Compactness of quantum tensor train representations of local imaginary-time propagators, *SciPost Phys.* **18**, 007 (2025).
- [18] D. Fujiki, F. Tanaka, T. Sakashita, Quantum hypothesis testing for composite alternative hypotheses, *Phys. Rev. A* **111**, 032405 (2025).
- [19] H. P. Kwok, S. Akiyama, S. Todo, Grassmann tensor renormalization group approach to $(1+1)$ -dimensional two-color lattice QCD at finite density, *J. High Energ. Phys.* **2025**, 27 (2025).
- [20] Y. Kato, *et al.*, Spin Seebeck Effect as a Probe for Majorana Fermions in Kitaev Spin Liquids, *Phys. Rev. X* **15**, 011050 (2025).
- [21] D. Nishiguchi, *et al.*, Vortex reversal is a precursor of confined bacterial turbulence, *PNAS* **122**, e2414446122 (2025).
- (会議抄録)
- [22] 玉井敬一, 大久保毅, ヴィン チュオン ズイ チュオン, 名取直毅, 藤堂眞治, 信号伝播過程におけるスケールング則に基づく人工深層ニューラルネットワークの系統的な設計, 人工知能学会全国大会論文集 **JSAI2024**, 3P5OS17a03 (2024).
- [23] 渡大地, 谷本寛樹, 大久保毅, 藤堂眞治, 西山薫, テンソルネットワークを用いた電力需要予測モデルの軽量化に関する研究, 情報科学技術フォーラム講演論文集 (FIT2024) **23**, 527–530 (2024).
- [24] D. Watari, *et al.*, Tensor Network-Based Light-Weight Energy Forecasting for Virtual Power Plant, 13th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA2024) **469**, 474 (2024).
- [25] H. Kanno, S. Akiyama, K. Murakami, S. Takeda, Grassmann Tensor Renormalization Group for two-flavor massive Schwinger model with a theta term, 41st International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2024) **466**, 368 (2025).
- [26] S. Akiyama, Y. Kuramashi, Tensor renormalization group study of the two-dimensional lattice $U(1)$ gauge-Higgs model with a topological θ term under Lüscher's admissibility condition, 41st International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2024) **466**, 361 (2025).
- [27] H. P. Kwok, S. Akiyama, S. Todo, Two-color lattice QCD in $(1+1)$ dimensions with Grassmann tensor renormalization group, 41st International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2024) **466**, 364 (2025).
- [28] S. Sugawara, K. Inomata, T. Okubo, S. Todo, Embedding of Tree Tensor Networks into Shallow Quantum Circuits, Proceedings of the 17th International Conference on Agents and Artificial Intelligence - Volume 1: QAI0 793–803 (2025).
- [29] T. Kobori, *et al.*, LSQCA: Resource-Efficient Load/Store Architecture for Limited-Scale Fault-Tolerant Quantum Computing, 2025 IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA).
- (国内雑誌)
- [30] 尾崎泰助, 加藤岳生, 井戸康太, 福田将大, 藤堂眞治, 物性研の計算物性科学コミュニティ支援活動 (その2: 最終回), 固体物理 **59**, 381–387 (2024).
- (学位論文)
- [31] R. Q. Xu, Antisymmetric Matrix Operations for Fermi Statistics: Algorithm Formulation and Implementations (博士論文)
- [32] T. Oe, Quantum Error Mitigation in Hamiltonian Simulation Using Quantum Singular Value Transformation (修士論文)

- [33] S. Sugawara, Embedding of Tree Tensor Networks into Quantum Circuits of Two-Qubit Gates (修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [34] H. Suwa, “Probability control nonreversible Markov chain Monte Carlo,” Model calculation seminar, April 2024, 柏.
- [35] H. Suwa, “Semiclassical approach to dynamics of correlated electron systems,” Methods for Modeling Transport and Dynamics of Quantum Magnets, May 2024, Los Alamos, USA.
- [36] Y. Nakanishi, R. Hanai, T. Sasamoto, “Continuous time crystals originating from PT symmetry and emergence of critical exceptional points,” StatPhys Seminar, June 2024, 東京・オンライン.
- [37] H. Suwa, “Magnetic excitations of weak Mott insulators,” Trends in the Theory of Quantum Materials, June 2024, Fribourg, Switzerland.
- [38] S. Todo, “Quantum AI Infrastructure through Integration of Quantum Computers and HPC,” Q2B24 Tokyo, July 2024, Tokyo.
- [39] H. Suwa, “Nonreversible Markov chain Monte Carlo in physics,” The Second Workshop of JM-CQMC, September 2024, 東京.
- [40] S. Akiyama, “Tensor network toward the lattice QCD,” Recent Progress in Many-Body Theories (RPMBT22), September 2024, つくば.
- [41] T. Okubo, “Tensor network approaches for condensed matter physics,” 16th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, October 2024, Tsukuba.
- [42] S. Todo, “Tensor Network Algorithms for Quantum-Classical Hybrid Computing,” Quantum-Fall 2024 training session, October 2024, Tokyo.
- [43] Y. Nakanishi, R. Hanai, T. Sasamoto, “Lindbladian PT phase transition: Emergence of time crystals and critical exceptional points,” Rigorous Statistical Mechanics and Related Topics, November 2024, 京都.
- [44] T. Okubo, “Tensor network Approaches to $S=1/2$ and $S=1$ Kitaev spin liquids,” Correlated Quantum Materials + beyond, November 2024, Kashiwa.
- [45] S. Todo, “TensorMC: Markov chain Monte Carlo in tensor network representation,” 9th Workshop on Physics between ENS and Uto, December 2024, Tokyo.
- [46] T. Okubo, “Recent progress in tensor network approaches for condensed matter physics,” KEK-THEORY Workshop 2024,, December 2024, Tsukuba.
- [47] T. Okubo, “Tensor Network for Methods for Quantum Many-Body Problems,” International Workshop on Massively Parallel Programming for Quantum Chemistry and Physics (MPQCP 2025), January 2025, Kobe.
- [48] S. Todo, “Tensor Network Algorithms for Quantum-Classical Hybrid Computing,” Korea-US-Japan Quantum International Collaborative Research Workshop 2025, February 2025, Seoul.
- [49] T. Okubo, “Application of Tensor Network States and Their Embeddings to Quantum Circuits,” Korea-US-Japan Quantum International Collaborative Research Workshop 2025, February 2025, Seoul.
- [50] T. Okubo, “Tensor network approach to quantum spin liquid,” The 38th Annual CSP Workshop,, February 2025, Athens.
- [51] H. Suwa, “Magnetic excitations of intermediate coupling antiferromagnets,” Joint March/April Meeting: APS Global Physics Summit 2025, March 2025, Anaheim, USA.

(国内会議)

招待講演

- [52] 大久保毅, 「テンソルネットワーク法による二次元量子格子モデルの解析」, 物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会「計算物質科学の現在と未来」, 2024 年 4 月, 柏.
- [53] 秋山進一郎, 「高次元格子理論に対するテンソル繰り込み群法の応用」, 基研原子核理論グループセミナー, 2024 年 6 月, 京都.
- [54] 藤堂眞治, 「量子コンピューティングと HPC」, 第 18 回材料系ワークショップ, 2024 年 10 月, 東京.
- [55] 藤堂眞治, 「ポスト富岳にむけた計算科学ロードマップ」, 日本学術会議公開シンポジウム「第 14 回計算力学シンポジウム」, 2024 年 12 月, 東京.
- [56] 藤堂眞治, 「機械学習とテンソルネットワーク」, 革新的シミュレーション研究センターワークショップ: 力学の再構築, 2024 年 12 月, 東京.
- [57] 諏訪秀磨, 「スピネル化合物におけるスピン格子結合誘起磁化プラトー」, 強磁場科学研究会 (第 19 回強磁場フォーラム総会)「パルスマグネット 100 周年」, 2024 年 12 月, 柏.
- [58] 藤堂眞治, 「テンソルネットワーク表現でのマルコフ連鎖モンテカルロ法」, オンライン物性理論セミナー, 2025 年 1 月, オンライン.
- [59] 秋山進一郎, 「テンソルネットワークで切り拓く素粒子・原子核物理の新展開」, 国際基督教大学 Natural Science フォーラム, 2025 年 2 月, 東京.

- [60] 藤堂眞治, 「量子古典ハイブリッドコンピューティングのためのテンソルネットワークアルゴリズム」, NEDO 懸賞金活用型プログラム量子コンピュータを用いた社会問題ソリューション開発量子参入者枠教育プログラム講演, 2025 年 3 月, 東京.
- [61] 秋山進一郎, 「格子場の理論におけるテンソルネットワークと繰り込み群」, 計算物理春の学校 2025, 2025 年 3 月, 沖縄.
- [62] 藤堂眞治, 「物質科学のための量子コンピューティングと HPC」, 「富岳」成果創出加速プログラムシンポジウム, 2025 年 3 月, 東京.
- [63] 藤堂眞治, 「量子コンピュータと HPC の統合による量子 AI 基盤開発」, MCPC 量子コンピュータ推進 WG セミナー, 2025 年 3 月, オンライン.
- [64] 大久保毅, 「量子技術の応用: 量子多体問題と機械学習への展開」, 第三回 Agora 講演会 ー現在の量子技術とその先ー, 2025 年 3 月, 京都.
- [65] 諏訪秀磨, 「テンソルネットワークのモンテカルロサンプリング」, 計算科学の新展開: TN スキームと量子・古典融合, 2025 年 3 月, 大阪.

3.4 桂研究室

本研究室では、物性理論および統計力学における基礎的な問題に関する理論的研究を行っている。特に、相関の強い量子多体系において創発する多彩な相や新奇な現象の理解と予言を目的として、具体的な理論模型に対し解析的手法と数値的手法を組み合わせた多角的なアプローチを行っている。また、開放および孤立量子系における非平衡ダイナミクスの解析や、可解模型の背後にある代数的構造の解明など、数理物理的観点からの研究にも力を入れている。

3.4.1 強相関系

トライマー梯子上の Hubbard 模型のハーフフィリングにおける基底状態相図

バンドの分散が完全あるいはほとんど平坦な電子系では電子の運動が強く抑制されるため、わずかな相互作用や摂動によって多様な相が実現される。桂は S. N. Bose 国立基礎科学センター（インド）の Saha と Kumar と、トライマー梯子と呼ばれる格子上の電子系のハーフフィリングにおける基底状態相図を Hubbard 模型を用いて系統的に調べた [図 3.4.10]。トライマー梯子は三つの格子点からなる単位胞（トライマー）が 1 次元的に並んだ格子構造をもち、トライマー内の最近接ホッピング t_1 が、トライマー内の次近接ホッピング t_2 およびトライマー間のホッピング t_2' に比べて十分大きい場合には、Fermi 面近傍のバンドがほとんど平坦となる。そのような場合に、簡単のため $t_2 = t_2'$ とし、さらにオンサイトの斥力相互作用 U を導入した場合の相図を、厳密対角化法、密度行列くりこみ群法 (DMRG)、摂動論を用いて調べ

た。その結果、次の 5 つの相が現れることが分かった: (i) フェリ磁性相, (ii) 朝永-Luttinger 液体相 I, (iii) 朝永-Luttinger 液体相 II, (iv) up-up-down-down 相, (v) 可変スピン相。

相 (i) は相図上の広い領域に広がる絶縁体相である。 U の大きい強相関領域では局在スピン描像により、 U の小さい弱相関領域では平坦バンド描像によりフェリ磁性の出現を自然に理解することができる。一方、中間的なパラメータ領域の結果は DMRG により確立された。相 (ii), (iii) はともに朝永-Luttinger 液体相であるが、(ii) では電荷とスピンの両自由度がギャップレスであるのに対し、(iii) では電荷自由度のみがギャップレスである。相 (iv) は (i) と (ii) の、相 (v) は (i) と (iii) の間に存在し、パラメータ領域としては狭いが、フェリ磁性相とは異なる磁気的性質を示す絶縁体相である。

実在するトライマー梯子状の物質の多くは絶縁体であるが、本研究の結果は高圧下などにおいて相 (ii), (iii) などの金属的な相が実現する可能性を示唆しており、今後の研究の進展が期待される。これらの結果は原著論文 [9] にまとめられた。

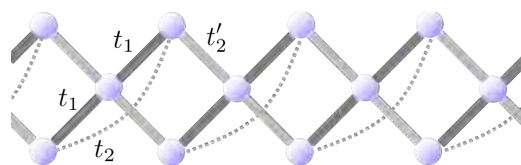


図 3.4.10: トライマー梯子の格子構造。

連続対称性の自発的破れを示す 1 次元量子スピン系

対称性の自発的破れは物理学における重要な概念である。例えば、身の回りの結晶や磁石は、それぞれ並進対称性やスピン空間の回転対称性といった対称性を自発的に破っている例として理解することができる。このように対称性の自発的な破れは、我々の住む 3 次元では身近な現象だが、ゆらぎの効果が顕著となる低次元系では事情が異なる。このことは古くは Mermin と Wagner により指摘されている。彼らは連続対称性を持ち短距離相互作用する 1, 2 次元系において有限温度で連続対称性の自発的な破れが起こらないことを証明している。この定理は絶対零度の量子系に対しては厳密には適用できないが、1 次元反強磁性 Heisenberg 模型など多くの例ではそのままの形で成立することが知られている。ただし、1 次元強磁性 Heisenberg 模型など秩序変数がハミルトニアンと交換する場合には例外的に、1 次元でも自発的対称性の破れが起こることが知られていた。

桂は渡邊（東大理工）と Lee（米国・Illinois 大 Urbana-Champaign 校）と、秩序変数がハミルトニアンと交換しない 1 次元系においても、連続対称性の自発的な破れが起こることを発見した。鍵となるのは、フラストレーション・フリーという条件である。この条件は、系の基底状態が全ての局所ハミルトニアン

のエネルギーを同時に最小化するということを意味する。(強磁性 Heisenberg 模型もこの条件を満たし、かつ秩序変数がハミルトニアンと交換する。) 本研究では、1 次元でも連続対称性の自発的破れを示すフラストレーション・フリーな量子スピン模型が無数に構成できることを示した。これらの模型ではパラメータ空間の特別な点を除いて、秩序変数はハミルトニアンと交換しない。さらに本研究では、このような系の存在が Mermin-Wagner の定理の絶対零度版となぜ矛盾しないかということ、低エネルギー励起の分散関係に着目することにより明らかにした。これらの結果は、原著論文 [6] にまとめられた。

3.4.2 トポロジカル磁性

量子ダイマー磁性体 $XCuCl_3$ ($X = \text{Ti, K}$) におけるトリプロンの熱 Hall 効果の電場による制御

近年、磁性体における熱ホール効果がマグノンなどの素励起の性質の探索、特にバンド構造のトポロジーの検出に有用であることから注目を集めている。スピン二重項が基底状態となる量子ダイマー磁性体においても、トリプロン励起由来の熱ホール効果の理論提案が主に $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ という物質に対して行われてきたが、トリプロンの熱ホール効果はいまだに観測されていない。一方で、格子の対称性による制約から、熱ホール効果を示す物質の探索は一般に難しく、トリプロンの熱ホール効果を示す新たな候補物質の探索はほとんど進んでいなかった。

そこで、江崎・赤城・桂は新たな候補物質として、トリプロンの Bose 凝縮や電気磁気効果の観点から注目されてきた量子ダイマー磁性体 $XCuCl_3$ ($X = \text{Ti, K}$) の Bose 凝縮相を対象に、トリプロンの熱ホール効果の可能性を探索した。その結果、電場が 0 のときには格子の対称性により熱ホール効果が生じないが、電場がダイマー内に Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を誘起し、これによって対称性が破られることで、観測可能な大きさの熱ホール効果が生じることを見出した。さらに、電場の向きや強さを変えることで、熱ホール流の向きや大きさを制御することも明らかにした。

本研究は、トリプロンの熱ホール効果を示す新たな候補物質を理論的に提案しただけでなく、元々熱ホール効果を示さない物質に対しても、電場によって熱ホール効果を誘起・制御できる可能性を示唆しており、本分野の研究の可能性を広げることが期待される。これらの結果は原著論文 [2] として発表された。

トポロジカルスピネクスタ上を運動する電子による高次高調波発生

近年、高次高調波発生 (HHG) に関する研究が精力的になされている。これは入射光に対して数次から数十次の高調波が生じる非線形・非摂動現象であ

り、そのスペクトルには物質の電子構造が反映されることが明らかにされている。この性質に基づく高次高調波発生を用いた新たな分光法がこれまで提案されており、固体結晶においては、そのエネルギーバンド構造のみならず、Berry 曲率などの幾何学的構造をも解析することが可能になりつつある。このような幾何学的構造に着目した研究は、空間反転対称性を持たない半導体やトポロジカル絶縁体・半金属を中心になされてきたが、磁気スキルミオン相などのトポロジカルな磁気秩序相における高次高調波発生に関しては十分な理解が得られていない。

小野 (東北大)、奥村 (東大物工)、今井 (東大物理)、赤城らは、遍歴電子と局在スピンを記述する強磁性近藤格子模型において、トポロジカルなスピネクスタ上を運動する電子からの高次高調波発生を解析した。具体的な磁気構造として、2010 年に赤城と求 (東大物工) により高い安定性が明らかとなった三角格子上の 4 副格子 all-in/all-out 構造を持つスピンスカラーカイラル状態を対象とした。この 4 副格子スピンスカラーカイラル状態は、空間的に最小のトポロジカルな磁気構造として捉えられ、実際に CoTa_3S_6 や CoNb_3S_6 において実現していることが最近報告されている。これらの局在スピン構造を固定することで、光電場で駆動された電子系の実時間ダイナミクスは von Neumann 方程式によって記述される。この状態では、スピンスカラーカイラリティの符号が Berry 曲率の符号を変える一方で、エネルギーバンド構造には変化がないため、幾何学的な効果のみが HHG に影響を与えるという特徴がある。解析の結果、スカラーカイラル状態においては縦応答成分と同程度の大きな横応答成分が現れ、入射偏光角に対する高調波強度依存性にカイラリティの符号が顕著に反映されることが明らかになった。とりわけ、光周波数がエネルギーギャップよりも大幅に低い場合に、縦方向の電流応答がスカラーカイラリティの符号によって大きく影響を受けることがわかった。バンド内電流の異常速度項は横応答成分にしか寄与しないため、本研究で明らかとなった縦方向の大きな応答は、電子と正孔の再結合に由来したバンド間電流に起因した新しい物理現象であることが示唆される。本研究で提案した現象は、 CoTa_3S_6 や CoNb_3S_6 などの実際の物質においても観測される可能性があり、トポロジカルスピネクスタに基づく新しい物理現象の理解が更に進むことが期待される。これらの成果は国際会議 [12, 19] で発表され、論文 [3] にまとめられた。

3.4.3 散逸のある量子多体系

2 体ロスのあるボゾン系の少数系ダイナミクスにおける普遍的な性質

2 体ロスのあるボゾン系は冷却原子系において実現されており、Mott 状態から超流動状態へのクロスオーバー [T. Tomita et al., Sci. Adv. **3**, e1701513 (2017)] などの興味深い現象が観測されている。その

ダイナミクスも実験と理論の両方から調べられているが、理論による解析的な結果は非常に限られている。

そこで、吉田と桂は Paris-Saclay 大学 (フランス) の Marché, Nardin, Mazza と 2 体ロスを受ける 1 次元ボゾン系において、2 粒子の長時間ダイナミクスを Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad 方程式を用いて調べた。初期条件が 2 粒子の場合、ダイナミクスは非エルミート有効ハミルトニアンにより正確に記述され、長時間領域では連続体でも格子上でも解析的に調べることができる。2 粒子が重なる初期条件では粒子の生存確率は時間 t に対して $t^{-3/2}$ に比例して減衰し、2 粒子が離れた初期条件では $t^{-1/2}$ に比例して減衰することを明らかにした。これらの結果は連続体でも格子上でも成り立つが、後者の場合は対数補正が現れることが判明した。これらの結果は国内学会 [35] で発表されたほか、原著論文 [4] で発表された。

3.4.4 数理解物理学・統計力学

Dzyaloshinskii-守谷相互作用を持つスピン鎖における量子多体傷跡状態

近年の量子技術の進歩により、さまざまな量子多体系をシミュレートすることが可能になっている。特に最近では、光ピンセットの技術と Rydberg 原子を組み合わせることで、様々な量子スピン模型が実現されている。このような Rydberg 原子系は、量子多体傷跡状態 (Quantum Many-Body Scars; QMBS) と呼ばれる特異な状態を持つ系をシミュレートできることから注目を集めている。QMBS は非可積分系における非熱的なエネルギー固有状態で、全てのエネルギー状態が熱的な状態であるという仮説 (固有状態熱化仮説) を破る反例として知られている。

桂は國見 (東京理科大)・富田 (分子研)・加藤 (東大総合文化) と、QMBS をもつ量子スピン模型を実験的にシミュレートする新たな手法を提案した。具体的には、この方法は以下の手順からなる: (a) ^{87}Rb 原子を 1 次元的に配置し二種類のレーザーを照射する, (b) 2 光子 Raman 遷移を用いて回転横磁場を生成する, (c) この磁場が一様となるスピン回転座標系に移ることで実効的に Dzyaloshinskii-守谷 (DM) 相互作用を生成する。(ここでスピン自由度は、 ^{87}Rb の 2 つの Rydberg 状態に対応する。) この方法により、固体中では実現が難しい DM 相互作用が支配的となるスピン模型をシミュレートすることが可能となる。このような量子スピン模型の一例として、ハミルトニアンが DM 相互作用と Zeeman 項のみからなる模型 (DH 模型) を理論的に解析した。その結果、DH 模型には QMBS が存在すること、またそれに起因した特徴的なスピンダイナミクスを示すことを明らかにした。さらにこの系には漸近的量子多体傷跡状態 (AQMBs) が存在することも発見した。AQMBs とは、(i) すべての QMBS と直交, (ii) 低いエンタングルメント・エントロピー, (iii) 熱力学極限でエネルギー分散がゼロ、という 3 つの条件を満たす状態である。特に条件 (iii) は、熱力学極限での緩和時間が

無限大となることを意味する。このような AQMBs をあらわに構成した研究は、先行研究 [L. Gotta, S. Moudgalya, and L. Mazza, Phys. Rev. Lett. **131**, 190401 (2023)] を除いて他に類がなく、孤立量子多体系における熱化 (もしくは平衡化) の問題に新たな視点を与えることが期待される。これらの結果は、原著論文 [5] にまとめられた。

多成分 Fermi-Hubbard 模型における一般化 η ペアリング状態とエルゴード性の弱い破れ

強相関電子系の標準的な模型である $\text{SU}(2)$ Fermi-Hubbard 模型の厳密な励起状態として、 η ペアリング状態が知られている。この状態は、非対角長距離秩序 (ODLRO) を持つため、超伝導や超流動との関係で活発に研究が行われている。一方で他成分のフェルミオン系における対応物は知られていなかった。桂は中川・上田 (東大) と $\text{SU}(N)$ Fermi-Hubbard 模型を特別な場合として含む、 N 成分 Hubbard 模型における新しい厳密な固有状態 (一般化 η ペアリング状態) を構成した。

一般化 η ペアリング状態は、ODLRO と磁気的な長距離秩序を兼ね備えている。これは、スピン多重項からなるため磁性を示さない元々の η ペアリング状態とは大きく異なる特徴である。また一般化 η ペアリング状態は、固有状態熱化仮説を満たさない量子多体傷跡状態 (QMBS) であることも明らかにした。これは、この N 成分 Hubbard 模型 ($N \geq 3$) が、エルゴード性を弱く破っていることを意味している。さらに、この一般化 η ペアリング状態や $\text{SU}(N)$ 強磁性状態を初期状態とした場合、非エルゴード的ダイナミクスが現れることおよび、これらの特別な初期状態を散逸を制御することにより準備する方法を議論した。これらの結果は、原著論文 [7] にまとめられた。

可積分模型の埋め込みによるエルゴード性の弱い破れ

近年の量子多体系の研究において、非可積分系でありながら一部の状態が非熱的な振る舞いを示す系の存在が注目されている。特に、系全体としてはエルゴード的でありながら、ごく一部のエネルギー固有状態のみが非熱的であるという「弱いエルゴード性の破れ」は、量子ダイナミクスにおける新たな現象として関心を集めている。

桂は松井 (東大数理), Pozsgay (ハンガリー・Eötvös Loránd 大), Paletta (スロベニア・Ljubljana 大) と共に、可積分なスピン鎖模型を非可積分系の中に選択的に埋め込むことで、弱いエルゴード性の破れを実現する理論的手法を提案した。特に、可積分な部分空間が局所的なベクトル空間のテンソル積では表現できず irreducible string と呼ばれる配列で指定される非局所的な構造によって特徴づけられる点が、従来の単純な埋め込み手法に比べて新しい点である。

具体的には、まずヒルベルト空間の断片化を示す模型、例えばスピン 1 の Maassarani-Mathieu 模型な

どを出発点とし、これに特定の摂動を加えることで系全体としては非可積分となるが、上述の irreducible string で指定された部分空間では可積分性が保たれるという状況を構築した。その結果、系の大多数の状態は熱化する一方で、可積分部分空間に属する状態は非熱的性質を示すという、新しいタイプのダイナミクスをもつ量子スピン模型を系統的に得ることに成功した。

本研究は、可積分性・ヒルベルト空間の断片化・エルゴード性の破れといった量子多体系のダイナミクスに関わる重要な概念を結びつけるとともに、固有状態熱化仮説に対する具体的な反例を構成するものである。これにより、孤立量子系における熱平衡化の理解に新たな視点を提供することが期待される。これらの結果は、以下の原著論文 [10] にまとめられた。

可積分な SYK 派生模型とカオスのダイナミクス

ブラックホールを記述する重力理論の最近の進展により、量子多体系のカオスのダイナミクスへの関心が高まっている。そのような研究において中心的な役割を果たしているのが、カオスの上限を飽和する例として知られる Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) 模型である。SYK 模型はランダムな四体相互作用をもつマヨラナフェルミオン系である。桂は尾崎（東大・総合文化）と SYK 模型からランダム性を取り去った派生形「クリーンな SYK 模型」のダイナミクスを研究し、量子カオスとの関連を調べた。

クリーンな SYK 模型には、ハミルトニアンが相互作用項のみからなるにもかかわらず自由フェルミオン系のハミルトニアンと共通の固有状態をもつ、すばわち可積分であるという特筆すべき特徴がある。この点を利用して、量子カオスに関連する以下の三つの量について解析的および数値的手法を組み合わせ、解析を行った：準位統計、スペクトル構造因子 (SFF)、および非時間順序相関 (OTOC)。このうち、SFF はエネルギースペクトルの二点相関を、OTOC は系内での量子情報の広がりを定量化する指標である。準位統計と SFF にはカオス的な兆候が見られなかった一方で、OTOC には短時間の指数関数的な増大が見いだされた。その増大時間は典型的な量子カオスにおけるものよりも短い、カオス的なダイナミクスに類似している。我々はさらに、超対称性のある SYK 模型からランダム性を取り去った模型についても解析し、同様の結論を得た。一連の結果は、未だ明確に定まらない量子多体系のカオスの判定基準に関する議論に新たな視点を提供するものであると期待される。これらの結果は国際研究会等で発表された [31, 46]。また、原著論文 [8] にまとめられた。

3.4.5 その他

量子スピンネマティック相や冷却原子系における「重力波」

2017 年のノーベル物理学賞の対象となった重力波の観測は、連星ブラックホールの衝突・合体という宇宙の中で最も激しい事象によって初めて可能となった。依然として重力波の観測は困難であり、人の手による実験的な実現への道のりは遙か遠い。しかし、物質において、重力波と類似した現象を観察できる可能性が近年注目されている。特に、磁性体や冷却原子系で見られる量子スピンネマティック相と呼ばれる状態からの励起が、重力波の類似物として機能するかもしれないという理論的な期待がされていた。

赤城と Chojnacki (OIST), Pohle (東北大), Yan (東大物性研), Shannon (OIST) は、量子スピンネマティック相における南部-Goldstone モードが、重力波に対応する質量を持たないスピン 2 ボソンとして振る舞うことを理論的に明らかにした。具体的には、平坦な時空における重力波と、量子スピンネマティック相における低エネルギー励起が一对一に対応することを示した。これにより、量子スピンネマティック相が、重力波によく似た性質を持つ物理的状态であることが明確に示された。また、量子スピンネマティック相ではトポロジカル励起/点欠陥である $\mathbf{Z}_2$ ボルテックスが生じるが、その対消滅放射は連星ブラックホール合体による重力波と似た構造を有する事も、 $S = 1$ bilinear biquadratic 模型の数値シミュレーションにより示した [図 3.4.11]。とりわけ、 ^{23}Na の光格子を利用することで、実験的に制御しながらこの「重力波」の観測が可能であることを示した。このことにより、宇宙の大規模な現象を実験室内で再現し、より深く理解するための道が開かれ、さらなる進展が期待される。これらの成果は、国内外の学会で発表され [29, 39]、論文 [1] にまとめられた。

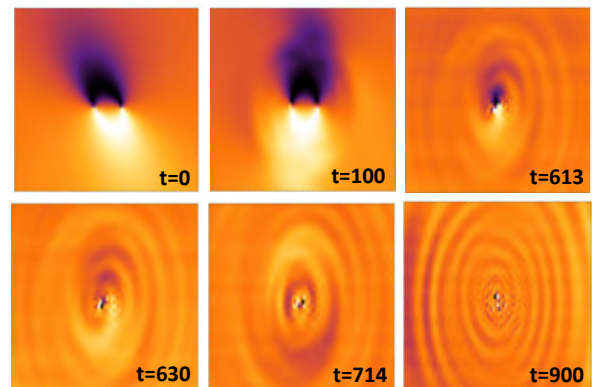


図 3.4.11: 量子スピンネマティック相における $\mathbf{Z}_2$ ボルテックスの対消滅放射。量子スピンネマティック相の秩序変数テンソルと一般相対論の計量テンソルは類似の構造を持つ。

<報文>

(原著論文)

- [1] Leilee Chojnacki, Rico Pohle, Han Yan, Yutaka Akagi, and Nic Shannon: Gravitational wave analogues in spin nematics and cold atoms, *Phys. Rev. B* **109**, L220407 (2024) [Selected as Editors' Suggestion].
- [2] Nanse Esaki, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura: Electric field induced thermal Hall effect of triplons in the quantum dimer magnets $XCuCl_3$ ($X = \text{Ti, K}$), *Phys. Rev. Research* **6**, L032050 (2024).
- [3] Atsushi Ono, Shun Okumura, Shohei Imai, and Yutaka Akagi: High harmonic generation from electrons moving in topological spin textures, *Phys. Rev. B* **110**, 125111 (2024).
- [4] Alice Marché, Hironobu Yoshida, Alberto Nardin, Hosho Katsura, and Leonardo Mazza: Universality and two-body losses: lessons from the effective non-Hermitian dynamics of two particles, *Phys. Rev. A* **110**, 033321 (2024).
- [5] Masaya Kunimi, Takafumi Tomita, Hosho Katsura, and Yusuke Kato: Proposal for simulating quantum spin models with Dzyaloshinskii-Moriya interaction using Rydberg atoms and construction of asymptotic quantum many-body scar states, *Phys. Rev. A* **110**, 043312 (2024).
- [6] Haruki Watanabe, Hosho Katsura, and Jong Yeon Lee: Critical spontaneous breaking of $U(1)$ symmetry at zero temperature in one dimension, *Phys. Rev. Lett.* **133**, 176001 (2024) [Selected as Editors' Suggestion].
- [7] Masaya Nakagawa, Hosho Katsura, and Masahito Ueda: Exact eigenstates of multicomponent Hubbard models: $SU(N)$ magnetic η -pairing, weak ergodicity breaking, and partial integrability, *Phys. Rev. Research* **6**, 043259 (2024).
- [8] Soshun Ozaki and Hosho Katsura: Disorder-Free Sachdev-Ye-Kitaev models: Integrability and a precursor of chaos, *Phys. Rev. Research* **7**, 013092 (2025).
- [9] Sourabh Saha, Hosho Katsura, and Manoranjan Kumar: Phase diagram of a coupled trimer system at half filling using the Hubbard model, *Phys. Rev. B* **111**, 094425 (2025).
- [10] Hosho Katsura, Chihiro Matsui, Chiara Paletta, and Balázs Pozsgay: Weak ergodicity breaking with isolated integrable sectors, *Phys. Rev. Research* **7**, 023099 (2025).

(学位論文)

- [11] 吉田博信: Rigorous Results on the Steady States and Long-Time Dynamics of Open Quantum Many-Body Systems: (博士論文).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [12] Atsushi Ono (Shun Okumura, Shohei Imai, Yutaka Akagi): High harmonic generation from electrons moving on topological spin textures, *Photoinduced Phase Transitions and Cooperative Phenomena 2024 (PIPT8)*, Nijmegen, Netherlands, June 2024.
- [13] Shunta Kitahama: Higher-order exceptional point in many-body unidirectional Hatano-Nelson model, *IIS-LEAP Workshop NH2024*, Kashiwa, Japan, July 2024.
- [14] Hironobu Yoshida (Hosho Katsura): Generalized η -pairing states in extended $SU(N)$ Hubbard models, *Princeton Summer School on Condensed Matter Physics*, IAS, USA, July 2024.
- [15] Hironobu Yoshida: Uniqueness of the non-equilibrium steady state in open quantum many-body systems, *Prospects in Theoretical Physics*, IAS, USA, July 2024.
- [16] Yuki Amari (Yutaka Akagi, Sven Bjarke Gudnason, Muneto Nitta, Yakov Shnir): Skyrmion crystals with spin-nematic order in $SU(3)$ chiral magnets, *$SU(N)$ physics in quantum many-body systems: theory, experiment, and numerics (SUN2024)*, Sendai, Japan, July 2024.
- [17] Hironobu Yoshida: Uniqueness of the non-equilibrium steady state in open quantum many-body systems, *Focus Week on Non-equilibrium Quantum Dynamics*, Tokyo, Japan, Sep. 2024.
- [18] Nanse Esaki (Yutaka Akagi, Hosho Katsura): Spin Nernst and thermal Hall effects of topological triplons in quantum dimer magnets on the maple-leaf and star lattices, *ISSP Theory mini-Workshop*, Kashiwa, Japan, Nov. 2024.
- [19] Atsushi Ono (Shun Okumura, Shohei Imai, and Yutaka Akagi): High harmonic spectroscopy of a topological spin texture, *Correlated Quantum Materials+beyond: Symposium (CQM+b2024)*, Chiba, Japan, Nov. 2024.
- [20] Tetsuya Iwasaki: Exact analysis of nonlinear Drude weights in the Hubbard chain, *New Trends in Condensed Matter Theory 2024*, Kashiwa, Japan, Dec. 2024.
- [21] Xinye Guan: Disorder-free Quantum Breakdown Model: exact solution and dynamics, *New Trends in Condensed Matter Theory 2024*, Kashiwa, Japan, Dec. 2024.
- [22] Hironobu Yoshida: Uniqueness of the non-equilibrium steady state in open quantum many-body systems, *2nd FoPM International Symposium*, Tokyo, Japan, Feb. 2025.
- [23] Shunta Kitahama: Solitons and scars in 1d interacting chiral fermion systems as qKdV equation, *2nd FoPM International Symposium*, Tokyo, Japan, Feb. 2025.

- [24] Tetsuya Iwasaki: Analysis of nonlinear transport properties on the one-dimensional Hubbard model, *2nd FoPM International Symposium*, Tokyo, Japan, Feb. 2025
- [25] Xinye Guan: Quantum Breakdown Model: the Exact Solution and Dynamics, *2nd FoPM International Symposium*, Tokyo, Japan, Feb. 2025
- [26] Nanse Esaki (Yutaka Akagi, Hosho Katsura): Spin Nernst and thermal Hall effects of topological triplons in quantum dimer magnets on the maple-leaf and star lattices, *APS Global Physics Summit 2025*, Anaheim, USA, Mar. 2025.
- [27] Hironobu Yoshida: The Uniqueness of Steady States of the Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad Equation: A Simple Proof, *APS Global Physics Summit 2025*, Anaheim, USA, Mar. 2025.
- [28] William Faugno (Hosho Katsura, Tomoki Ozawa): Quantum Many Body Scars from Emergent Chiral Symmetry in the Density-Difference-Dependent Gauge Field, *APS Global Physics Summit 2025*, Anaheim, USA, Mar. 2025.
- [29] Nic Shannon (Kimberly Remund, Rico Pohle, Leilee Chojnacki, Yukitoshi Motome, Owen Benton, Judit Romhányi, Yutaka Akagi, Han Yan, Geet Rakala, Yuki Amari): Simulation of spin-1 magnets on frustrated lattices, *APS Global Physics Summit 2025*, Anaheim, USA, Mar. 2025.
- [36] 國見昌哉, 富田隆文, 桂法称, 加藤雄介: 漸近的量子多体傷跡状態に由来する perfect revival, 日本物理学会第 79 回年次大会, 2024 年 9 月, 北海道大学.
- [37] 羽田野直道, 桂法称, 川畑幸平: ベーテ格子上的非エルミート系の量子輸送: ランダムネスの効果, 日本物理学会第 79 回年次大会, 2024 年 9 月, 北海道大学.
- [38] 赤城裕: SU(3) 近藤格子模型における CP^2 triple-Q 状態と新奇トポロジカル絶縁相の発現, 日本物理学会第 79 回年次大会, 2024 年 9 月, 北海道大学.
- [39] Rico Pohle, 赤城裕, 甘利悠貴, Owen Benton, Leilee Chojnacki, Yukitoshi Motome, Kimberly Remund, Judit Romhányi, Han Yan, and Nic Shannon, Simulation of spin-1 magnets on frustrated lattices, 日本物理学会第 79 回年次大会, 2024 年 9 月, 北海道大学.
- [40] 江崎蘭世: Maple-leaf/star 格子上の量子ダイマー磁性体におけるトポロジカルトリプルのスピネルンストおよび熱ホール効果, ISSP Workshop 2024 カゴメフラストレート磁性研究の進展, 2025 年 3 月, 東京大学 物性研究所.
- [41] 岩崎哲也, 桂法称: 1 次元 Hubbard 模型における非線形 Drude 重みの解析, 日本物理学会 2025 年春季大会, 2025 年 3 月, オンライン.
- [42] 関欣也, 桂法称: 乱れない量子 breakdown 模型: 厳密解とダイナミクス, 日本物理学会 2025 年春季大会, 2025 年 3 月, オンライン.
- [43] 國見昌哉, 桂法称, 加藤雄介: 漸近的量子多体傷跡状態の系統的な構成法と超対称性量子力学との関係 1, 日本物理学会 2025 年春季大会, 2025 年 3 月, オンライン.
- [44] 國見昌哉, 桂法称, 加藤雄介: 漸近的量子多体傷跡状態の系統的な構成法と超対称性量子力学との関係 2, 日本物理学会 2025 年春季大会, 2025 年 3 月, オンライン.

招待講演

- [30] Yutaka Akagi: CP^2 triple-Q state in the SU(3) Kondo lattice model, *The 14th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics*, Toyama, Japan, July 2024.
- [31] Hosho Katsura: Integrable SYK-like models, *Rigorous Statistical Mechanics and Related Topics*, Kyoto, Japan, November 2024.
- [32] Hironobu Yoshida: A criterion for the uniqueness of the steady state in open quantum systems, *Rigorous Statistical Mechanics and Related Topics*, Kyoto, Japan, Nov. 2024.

(国内会議)

一般講演

- [33] 山田昌彦, 高橋雅大, 三野巧, 赤城裕, 諏訪秀麿, 藤本聡, 宇田川 将文, Matrix Product Renormalization Group Method, Tensor Network 2024, 2024 年 5 月, 石川県政記念 しいのき迎賓館.
- [34] 江崎蘭世, 赤城裕, 桂法称: Maple Leaf/Star 格子上的スピンドイマー系におけるトポロジカルトリプルの熱ホール効果, 日本物理学会第 79 回年次大会, 2024 年 9 月, 北海道大学.
- [35] Alice Marché, 吉田博信, Alberto Nardin, 桂法称, and Leonardo Mazza: 二体ロスのあるボゾン系の二体問題に現れる普遍性, 日本物理学会第 79 回年次大会, 2024 年 9 月, 北海道大学.

招待講演

- [45] 吉田 博信: 開放量子系における定常状態の一意性の判定方法, 第 3 回 金沢大学量子ダイナミクス研究会, 金沢大学, 2024 年 6 月.

(セミナー)

- [46] 桂 法称: Integrable SYK-like models, Budapest Integrability Events, 2024 年 4 月, オンライン.
- [47] 北浜駿太: Higher-order exceptional points of many-body unidirectional Hatano-Nelson model, Informal Quantum Seminar, 2024 年 9 月, LPTMS - Université Paris-Saclay.
- [48] 江崎蘭世: Theoretical Studies of the Electric Field Induced Thermal Hall Effect in the Quantum Dimer Magnets $XCuCl_3$ ($X = \text{TI, K}$), 2024 年 4 月, KAIST.
- [49] 江崎蘭世: 量子ダイマー磁性体 $XCuCl_3$ ($X = \text{TI, K}$) におけるトリプルの電場誘起熱ホール効果の理論, 2024 年 7 月, 京都大学基礎物理学研究所.

- [50] 桂 法称: Frustration-free models and beyond, Ljubljana PhD School on Quantum Physics-2024, 2024 年 6 月, University of Ljubljana.
- [51] 桂 法称: Frustration-free systems and beyond, 極限宇宙循環ミーティング, 2025 年 1 月, オンライン.

3.5 樺島研究室

2024 年度の樺島研の構成メンバーは樺島他、高橋昂助教、PD: 2 名、D3: 1 名、M2: 2 名、M1: 2 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、2024 年度に得られた主な研究成果の概要を記す。

3.5.1 回転対称性なランダム相互作用下にあるスピングラスモデルにおける量子効果

相互作用にランダム性が入った Ising スピン系 (スピングラスモデル) の平均場モデルを解析すると、温度と磁場の大きさに依存して秩序変数のレプリカ対称性が破れる (Replica Symmetry Breaking: RSB)。RSB は古典スピングラスモデルについてはよく理解されているが、このモデルに横磁場を加えた量子スピングラスモデルに関してはその機構の理解は未だ十分とは言えない。

鈴木-Trotter 分解を用いると量子スピングラスモデルは虚時間方向に拡張された古典スピン系として解析できる。これまで代表的な平均場量子スピングラスモデルである量子 SK モデルにおいては、秩序変数の一部が虚時間依存性を持たないと仮定して RSB の機構が調べられてきた。しかしながら、秩序変数は一般に虚時間依存性を持つはずであり、この一様性に関する仮定の妥当性は十分には検討されていない。

そこで、本研究では回転対称性なランダム相互作用下にある平均場 2 体相互作用量子スピングラスモデルに対して量子性が RSB の機構に与える影響を調べた [2, 21, 22]。その結果、以下の知見が得られた。

- このモデルクラスでは一般に虚時間方向に対して一様なレプリカ対称解が常に存在する。
- SK モデル、Hopfield モデルでは、レプリカ対称性を破る臨界的なモードも虚時間方向に対して一様であることが保証される。

3.5.2 主成分分析における SGD ダイナミクスの解析

Stochastic Gradient Descent (SGD) は、大規模なデータセットに対して効率的な最適化手法であり、機

械学習において広く利用されている。しかしながら、ダイナミクスが学習率やデータ数に対してどのように依存するのか、無限回更新した際に到達する結果の性能は最適解と比較してどれほどか、また、そもそも SGD の収束条件は何か、など理論的に不明な点が数多く残されている。学習率が無限小の場合や、データ数が無限大で過去に選んだデータとの相関が無視できる際の解析はなされてきたが、パラメータ数の $O(1)$ 倍程度のサイズの固定されたデータセットが与えられた状況で、かつ、学習率も微小でない場合を考察した研究は少ない。数少ない先行研究として、線形な問題に対するダイナミクスを解析した例が知られているが、規格化を含めた非線形なダイナミクスに対する解析は未だに進んでいない。

本研究では、規格化を含み、かつ理論的な取り扱いが比較的容易な例として固定されたデータセットからの主成分分析に対する SGD のダイナミクスを解析した [15, 18]。これにより、主成分分析が成功するための条件を学習率とデータ数とパラメータ数の比の関係式で得たほか、任意の学習率に対して、パラメータ数に関してスケールされた更新回数が無限大の極限で達成される性能を明らかにした。

3.5.3 反復しきい値アルゴリズムのダイナミクス

反復しきい値アルゴリズムは、主に信号処理や画像処理の分野で使用される手法で、データの疎な表現を得るために用いられる。特に、 L_1 正則化付きの最適化問題である Lasso 回帰の最適化問題を解くための有効な手法の一つであることが知られている。我々はこの反復しきい値アルゴリズムが、非凸問題ではあるがより強力なスパース性をもたらす $L_{1/2}$ ノルム正則化付きの最適化問題に対して、どの程度適用可能であるかを調べた。 $L_{1/2}$ ノルム正則化は、いくつかのスパース回帰問題において L_1 ノルム正則化より復元性能が高いことが知られる。その一方、現在知られている解法アルゴリズムについて、その正則化の効果を十分に発揮できているかについては、調査が不十分である。

これらの問題点を踏まえて、第一に、スピングラス理論を用いたレプリカ対称解析により、ノイズなしスパース回帰問題に対して、 $L_{1/2}$ ノルム最適化問題の解の構造に関する相図を明らかにした。第二に、RSB を考慮することにより、準安定な非最適解の個数に関する議論を行った。第三に、経路積分法を用いた解析により、反復しきい値アルゴリズムのダイナミクスを解析的に追跡する手法を開発し、その結果が数値実験と整合することを確認した [20]。

3.5.4 格子タンパク質における2次構造と環境変動に対する頑健性の相関

ダーウィンの進化論を認めれば、自然選択と遺伝子の変異が生物の進化を駆動する主要因である。しかしながら、生物の機能にとって基本的な形質は進化の歴史の中で大きく姿を変えないと考えられる。こうした予想に対して、タンパク質の2次構造が変異に対して頑健であることを支持する証拠は存在するが、環境変動に対する頑健性に関する数理的かつ定量的研究は十分でない。

我々は2次元のアミノ残基数36のコンパクトな格子タンパク質に対して、環境変動に対する構造の頑健性をベイズ学習および統計力学による定式化によって、環境変動に対する頑健性と構造の数、および2次構造の一つの構造に占める割合との相関を見た[17]。結果的に、環境変動に対する頑健性を増大させていったときにその頑健性以上の頑健性を持つタンパク質における平均的な α -ヘリックスの割合は増加していくが、同様の β -シートの割合は減少していくことが明らかになった。この結果は、タンパク質を構成する基本的な部分構造の中でも、 α -ヘリックスと β -シートでは環境変化に対する頑健性が異なることを示している。

3.5.5 3体 Hopfield 模型の想起ダイナミクスの解析

Hopfield モデルはパターンを記憶し、想起する機能を有するニューラルネットワークとして40年以上前に提案されたモデルである。従来は主に2体相互作用のモデルが研究されてきたが、近年この相互作用を多体に拡張したモデルがトランスフォーマーとの関連性から注目を集めている。本研究では特に3体相互作用の Hopfield モデルに注目し、その想起ダイナミクスを解析した。

3体 Hopfield モデルでは、記憶すべき p 個のパターン $\{\xi^\mu\}_{\mu=0}^p \in \{+1, -1\}^{N \times p}$ に対して、一般化された Hebb 則に基づき、3体の相互作用係数 $J_{ijk} = N^{-2} \sum_{\mu=0}^p \xi_i^\mu \xi_j^\mu \xi_k^\mu$ を定める。これにより適当な条件のもとで p 個の記憶パターンは、2値ニューロン $\sigma \in \{+1, -1\}^N$ に対して定義されたハミルトニアン $H(\sigma; J) = -\sum_{\langle ijk \rangle} J_{ijk} \sigma_i \sigma_j \sigma_k$ の局所最小状態の近くに埋め込まれる。先行研究では、このようにすることで3体 Hopfield モデルが $p = O(N^2)$ 個のパターンを記憶可能であることを示している。しかしながら、初期状態が特定のパターンにどれだけ近ければそのパターンを想起できるかを特徴付ける引き込み領域については十分な知見が得られていない。

本研究では、3体 Hopfield モデルの想起ダイナミクスとして、状態更新が全てのニューロンについて一斉に行われる以下の同期的ダイナミクス $\sigma_i(t+1) = \text{sgn} \left(\sum_{\langle jk \rangle} J_{ijk} \sigma_j(t) \sigma_k(t) \right)$ を考え、経路積分法を用いて解析を行った。ここで $\sigma_i(t)$ は時刻 t における

ニューロン i の状態を表す。これにより想起解に到達可能な想起パターンとのオーバーラップの初期値の範囲を定量的に求め、3体 Hopfield モデルがどの程度機能するのかを調べた[16]。

3.5.6 移動エントロピーを用いた細胞内情報伝達経路の分析

細胞の運命は化学反応を媒介とした生体分子の相互作用によって制御されている。その仕組みを解明するため、これまで基本的な化学反応やその連鎖が網羅的に調べられてきた。生体分子間の相互作用はそれらの活性度の変化として計測される。しかしながら、それだけでは相互作用の重要度はわからない。活性度の変化の大きさは個々の分子や反応に依存し得るからである。

分子や反応の個別性に依存しない、相互作用の重要度に関する統一的な尺度として移動エントロピー (transfer entropy: TE) が知られている。確率過程に従う2つの時系列 $\{X_t\}$, $\{Y_t\}$ を考える。時刻 t における $\{X_t\}$ から $\{Y_t\}$ への TE は

$$T_{X \rightarrow Y}^{(p),(q)}(t) = H(Y_t | Y_{t-1}^{(q)}) - H(Y_t | X_{t-1}^{(p)}, Y_{t-1}^{(q)})$$

で定義される。ただし、 $H(U|V)$ は一般に条件付きエントロピーを、 $X_{t-1}^{(p)}$, $Y_{t-1}^{(q)}$ はそれぞれ時刻 $t-p$, $t-q$ から $t-1$ までの X , Y の値の組をあらわす。TE は時系列が従う分布の汎関数であり、一般の場合、その評価は計算量的に困難である。そのため、従来、その利用は単純な数理モデルに対する理論的分析を目的としたものが多くを占めており、データからの評価は神経系や経済時系列など定常性が期待され同時計測データが大量に入手できる系にほぼ限られてきた。

ところが近年、蛍光蛋白質を用いることで、細胞内化学反応に関する大量データの同時計測が可能になってきた。我々は以前の研究において、ガウス近似の下、同時計測データから TE を実際的な計算量で評価する方法を開発している (Imaizumi, PRE 105, 034403 (2022))。本研究では、その方法を拡張し、細胞内のシグナル伝達系である RBB-RAS-MAPK システムにおける固定された時刻からの情報の流れを TE を用いて分析した[1]。

3.5.7 アンダーバギング法の分類性能の解析

機械学習における分類の問題では、各クラスのデータサイズが不均衡にあるクラス不均衡が生じることが一般的である。そのような場合に標準的に用いられる手法の一つがアンダーバギング法と呼ばれるアンサンブル学習の手法である。これは、サイズが大きい多数クラスのデータをランダムに間引いて学習器を作る手続きを繰り返し、各学習器の出力を平均

する手法である。近年、線形モデルにおいてはバギング等のアンサンブル学習と ℓ_2 正則化がほぼ同等な効果を与えるとされており、計算コストの大きなアンダーバギング法と正則化が異なる結果を与えるのか否かが論点であった。

2成分混合ガウスの分類において線形分類器を学習する設定におけるアンダーバギング法の平均場理論を構築し解析した。その結果、アンダーバギング法で得られる汎化性能はウェイトニング法と呼ばれるコスト関数ベースの、アンサンブル学習を用いないものとはほぼ等価であることが明らかとなった。平均場理論のみならず、実データを用いた実験においても観測され、線形モデルではアンダーバギングはコスト関数の適切な重みづけと ℓ_2 正則化の組み合わせにほぼ等価であることを示唆している。この結果は [5, 11, 25] で報告した。

3.5.8 アンサンブル学習に基づく変数選択手法の性能解析

回帰モデルの変数選択の問題を考える。これは統計学の古典的な問題で、近年はアンサンブル学習に基づく変数選択の手法がたびたび使われている。これらの手法の基本的なアイデアは、ダミー変数をランダムに入れる、データをランダムに再取得するといった、分析者がコントロールできるランダムネスを導入し、そのランダムネスに対する揺らぎから回帰係数の信頼性を評価しようというものである。これは手続き上は簡便で、取得データに対する弱い仮定のもとで適用できるという利点がある。一方、これらの手法の検出力の解析が非自明であるという課題があった。

そこで、本研究ではノックオフ法と安定性選択法という代表的なアンサンブル学習ベースの変数選択手法に着目し、予測子がランダムに生成されているという仮定のもとで、この変数選択手法の平均場理論を構築した。その自己無撞着方程式を数値的に解くことで、単純なスパース推定と比べてこれらのアンサンブル学習手法が圧倒的に高い検出力を持つことを明らかにした。また、素朴なノックオフ法は、安定選択法と組み合わせて使うことで検出力がさらに大きく改善することも明らかとした。これらの結果は [6, 23, 24] で報告した。

3.5.9 線形モデルでの自己蒸留の解析

自己蒸留 (Self-Distillation, SD) は、モデルが自身の予測を用いて精度を向上させる 知識蒸留の手法の一つとして注目されており、機械学習分野で広く利用されている。一方で、自身の出力そのものがいかにしてモデルの性能を改善するのかという点について理論的に明確な回答はなく、したがって、自身の出力どのように活用すべきかという指針も不明確なままである。

そこで本研究では、ラベルノイズを含むガウス混合データにおける線形モデルによる分類のタスクを例に、自己蒸留の平均場理論を構築した。この平均場理論に基づいて、自己蒸留に関するハイパーパラメータを網羅的に探索し、自己蒸留によって性能が改善する際のシナリオとその改善幅を整理した。

解析の結果、以下の点が明らかとなった。(1) データサイズと特徴量の次元の比が有限であっても、SDを用いることでラベルノイズがない場合とほぼ同等の性能が達成できる。(2) ただし、ノイズありのデータを用いた教師有り学習からの相対的な性能改善の度合いは、(1) の状況よりもデータサイズが小さい中規模データで最も顕著である。(3) また、これらの性能向上の主たる要因は疑似ラベルによるノイズの除去にあり、本研究の設定では疑似ラベルとして 0,1 の値に限定されるハードラベルを用いれば十分である。さらに、最適なハイパーパラメータの分析から、早期停止やバイアス固定といったヒューリスティクスが自己蒸留によって得られるモデルの性能向上に有効であることが明らかになった。この結果は [26, 27] で報告した。

3.5.10 情報量規準の統計力学的導出

平均場スピングラス理論の手法であるレプリカ法を用いて統計モデルの推定や学習の問題を扱う場合、その肝は多くの場合、問題が可解となるようなランダムなデータを考察し、それについて平均をとってしまいうことで有効問題を導出することにある。これには細部まで振る舞いを調べられるという利点があるものの、非可解なデータが与えられた際の行動指針を予言するという目的にはあまり適さない。個別のデータに対し、汎化誤差の見積りをデータに依存した推定量として与える情報量規準の考えとは対照的なアプローチであるといえる。

そこでこの研究では、レプリカ法に現れるレプリカ系を、変分推論の枠組みを用いて扱うことを考えた。これにより、データに対する依存性を残したまま有効問題を導出することが可能となる。具体的にガウシアン型の有効ハミルトニアンを用いることで、竹内情報量規準が再導出されること、および特異構造がある場合には有効ハミルトニアンのヘシアン非退化自由度によって汎化誤差が決定される構造が現れることを明らかにした。この結果は [28] で報告した。

<報文>

(原著論文)

- [1] Evaluation of information flows in the RAS-MAPK system using transfer entropy measurements, Nobuhisa Umeki, Yoshiyuki Kabashima, Yasushi Sako, eLife 14, pp. e104432-1-e104432-32, (2025)
- [2] Exact Replica Symmetric Solution for Transverse Field Hopfield Model under Finite Trotter Size, Koki Okajima, Yoshiyuki Kabashima, Journal of

the Physical Society of Japan 94(4), pp. 044005-1-044005-8 (2025)

- [3] Forecasting long-time dynamics in quantum many-body systems by dynamic mode decomposition, Ryui Kaneko, Masatoshi Imada, Yoshiyuki Kabashima, Tomi Ohtsuki, Physical Review Research 7(1), pp. 013085-1-013085-22 (2025)
- [4] Detection of diffusion anisotropy from an individual short particle trajectory, Kaito Takanami, Daisuke Taniguchi, Masafumi Kuroda, Sawako Enoki, Yasushi Okada, Yoshiyuki Kabashima, Physical Review Research 6(3), pp. 033272-1-033272-13 (2024)
- [5] A replica analysis of under-bagging, Takashi Takahashi, Transactions on Machine Learning Research (2024)
- [6] Replica Analysis for Ensemble Techniques in Variable Selection, Takashi Takahashi JJournal of the Physical Society of Japan 94 (3), 031011 (2025)

(会議抄録)

- [7] Diffusion Model Based Posterior Sampling for Noisy Linear Inverse Problems, Xiangming Meng, Yoshiyuki Kabashima, Proceedings of Machine Learning Research 260, pp. 623-638 (2025)

(国内雑誌)

- [8] タンパク質デザインの統計力学, 高橋智栄, 千見寺浄慈, 時田恵一郎, 日本物理学会誌 Vol. 80, No. 3, pp. 116-120 (2025)

(学位論文)

- [9] Statistical Mechanical Analysis of Optimization Problems with Sparse Structures, Koki Okajima (2025)

(著書)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] Path Integral Analysis of Retrieval Dynamics in the Hopfield Model, Yoshiyuki Kabashima, ENS-UT workshop, UT Komaba campus, December 9, 2024
- [11] A replica analysis of under-bagging, Takashi Takahashi, DAIKIN International Symposium on Physics of Intelligence, UT, November 7, 2024

招待講演

- [12] Hopfield model and beyond, Yoshiyuki Kabashima, The Quantum Frontier of Machine Learning, IPMU, March 11, 2025

- [13] Generative Models Potentially Useful for Science, Yoshiyuki Kabashima, Future of Artificial Intelligence for Science in Japan, Nagoya University, December 3, 2024

(国内会議)

一般講演

- [14] 非単調素子を用いた連想記憶モデルの動的平均場解析, 樺島祥介, 学習物理勉強会, 京都大学, 2025 年 2 月 12 日
- [15] 主成分分析における固定された訓練データセットからの SGD ダイナミクス, 樺島祥介, 第 4 回学術変革領域「学習物理」物性関係討論会, 上智大学, 2025 年 1 月 14 日
- [16] 3 体 Hopfield 模型の想起ダイナミクスの解析, 住川勇斗, 樺島祥介, 日本物理学会第 7 9 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 19 日
- [17] 格子タンパク質模型の二次構造と環境変化に対する進化的な頑健性との相関, 高橋智栄, 千見寺浄慈, 時田恵一郎, 樺島祥介, 2024 年 9 月 18 日
- [18] 主成分分析における SGD ダイナミクスの解析, 林碧波, 樺島祥介, 日本物理学会第 7 9 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 17 日
- [19] ノックオフ法の平均場解析, 高橋昂, 樺島祥介, 日本物理学会第 7 9 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 17 日
- [20] 反復しきい値アルゴリズムのダイナミクス, 高波海斗, 樺島祥介, 日本物理学会第 7 9 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 17 日
- [21] 有限ロッター数での横磁場連想記憶モデルの解析, 岡島光希, 樺島祥介, 日本物理学会第 7 9 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 17 日
- [22] 量子スピングラスモデルにおける AT 条件, 原佳範, 樺島祥介, 日本物理学会第 7 9 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 16 日
- [23] アンサンブル学習を用いた変数選択法の性能評価, 高橋昂, 第 3 回 学術変革領域「学習物理」物性関係討論会, 上智大学, 2024 年 8 月 1 日
- [24] ノックオフ法の平均場解析, 高橋昂, 樺島祥介, 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 17 日
- [25] アンダーバギング法の比例的漸近論, 高昂, 第 27 回情報論的学習理論ワークショップ, さいたま, 2024 年 11 月 5 日
- [26] 自己蒸留におけるソフトラベルの役割, 高波海斗, 高昂, 坂田綾香, 第 27 回情報論的学習理論ワークショップ, さいたま, 2024 年 11 月 5 日
- [27] 自己蒸留のノイズ除去効果について, 高波海斗, 高昂, 坂田綾香, 日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 19 日
- [28] 学習の変分解析について, 高昂, 日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 19 日

招待講演

- [29] ホップフィールドモデルとボルツマンマシン, 樺島祥介, 024 年ノーベル物理学賞、ノーベル化学賞、AI で自然科学はどう変わったのか、どう変わるのか, 筑波大学大塚キャンパス, 2024 年 11 月 24 日
- [30] ホップフィールドモデルとその後の展開, 樺島祥介, AI × 物理学: 2024 年ノーベル物理学賞の内容を中心として, オンライン, 2024 年 10 月 27 日

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。

2024 年度は、辻直人准教授、高三和晃助教、今井渉平特任助教、博士課程の高橋慶伍氏、開田亮佑氏、Huanyu Zhang 氏、牛原啓氏、修士課程の永島来悟氏、中本大河氏、松浦修大氏、外国人大学院生の Titouan Mouilleron 氏、Gerrit Niederhoff 氏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、量子多体傷跡状態、量子多体系の動的応答、多体励起子と磁気秩序、テンソルトレイン法を用いた量子多体系の解法などの研究テーマに取り組んだ。なお、高橋氏、開田氏の研究成果については小形研究室の欄に記載されている。

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氣的・磁氣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、物性物理における集団励起モードの研究の最近の発展について招待講演 [24] やセミナー [45]、集中講義 [7, 50] を行った。

また、辻は最近の 2 次元テラヘルツ分光の実験に動機づけられて、3 次の非線形 Kerr 効果とヒッグスモードの関係について研究した。常磁性結合と反

磁性結合のそれぞれのチャネルにおける 3 次の非線形 Kerr 効果の感受率を数値計算し、周波数が超伝導ギャップに一致するところで起こる共鳴の起源について調べた。その結果を学会にて発表した [30]。

リフシッツ不変量を持つマルチバンド超伝導体の集団励起モード

マルチバンド超伝導体はバンド毎に複数の超伝導秩序変数を持ち、それらの位相の差が集団的に振動する集団励起モード (レゲットモード) が存在する。レゲットモードは従来線形応答領域で観測されないと考えられていたが、近年の理論研究により特定の理論模型には線形応答領域にレゲットモードが現れることが指摘された。永島、辻は Tian 氏、Manske 氏 (Max Planck 研)、および Haenel 氏 (British Columbia 大 (当時)) との共同研究で、レゲットモードが光に対して線形に応答するのは熱力学的な自由エネルギーにリフシッツ不変量と呼ばれる対称操作によって変わらない不変量が存在するときであることを見出した。また、この項が現れるのはどのような時かを群論を利用してすべての結晶構造とクーパー対に対して調べ上げ、その分類理論をカゴメ超伝導体に対して適用した。辻はこの結果を含めてリフシッツ不変量を持つ超伝導体の最近の研究についてセミナーを行った [22]。加えて、永島、Mouilleron 氏 (ENS-PSL 大)、および辻はリフシッツ不変量が一般的な超伝導状態の不安定性を引き起こし得ることを指摘し、リフシッツ不変量の効果が十分大きい時にペア密度波状態と呼ばれる、空間的に周期的に超伝導体の秩序変数が振動する特殊な超伝導状態が実現することを見出した。また、リフシッツ不変量によってペア密度波状態が実現する微視的な模型を構築し、その光学応答を調べることで、レゲットモードに加え、超伝導秩序変数の振幅の振動に相当するヒッグスモードが光に対して線形に応答する場合があることを見出した。永島はこの結果を学会 [35] および研究会 [40] で発表し、修士論文にまとめた [8]。

周期的に駆動された超伝導体における非平衡相転移

光などの周期的に振動する電磁場によって駆動された超伝導体は長年研究されてきた。例えばマイクロ波照射によってバンド端近傍の準粒子の非平衡分布が生じ、有効的に温度が下がることで超伝導が増強されることが示されており、Eliashberg 効果として知られている。Zhang、高三、辻は、フロック多体理論を使って、周期的な光電場によって駆動された超伝導体の定常状態を解析した。その結果、光の周波数が超伝導ギャップの半分よりも小さい場合 Eliashberg 型の電子分布が実現するが、電場強度を強くしていくとフロックサイドバンドを介したギャップ間のトンネリング現象により突然分布が不安定になる。それに伴って、多重のヒステリシス挙動を示す不連続な非平衡相転移が起こることがわかった。また、フロックサイドバンドによるスペクトル変化に起因し

て、電場強度が弱い時に有効的な温度減少なしに超伝導が増強する場合があることも明らかにした。これらの結果について研究会等で発表した [15, 17, 34]。

超伝導非線形ホール効果

ホール効果とは、印加した電位差に対して垂直方向に電流が生じる現象である。近年、これを非線形応答へ拡張した「非線形ホール効果」が盛んに研究されてきた。これまでの主な研究の舞台は通常の金属や半導体であったが、高三と辻は、この舞台を超伝導体へと広げ、超伝導体に特有の「超伝導非線形ホール効果」を理論的に提案・解析した。本現象の特徴は、それを特徴づける非線形ホール伝導度が dc 極限で発散するという点である。この特徴により、本来小さくなってしまふことの多い非線形応答であるが、巨大な応答が期待できる。高三と辻は、この現象が生じる条件やその振る舞いを、微視的な数値計算と巨視的な現象論の両面から明らかにした。高三は、本研究に関して国際会議や研究会等で発表を行った [14, 32, 38]。

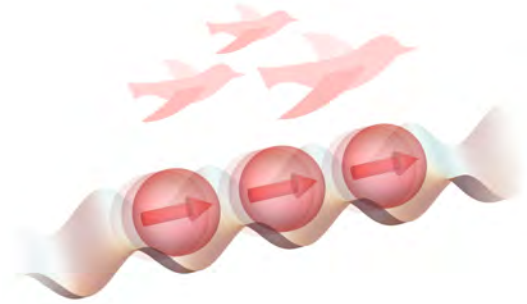


図 3.6.12: アクティブ性誘起強磁性の概念図。鳥の群れが向きを揃えるのと類似のメカニズムで、スピンの向きに運動する量子力学的粒子が向きを揃えることで強磁性が実現される。

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。

量子アクティブマター

鳥や魚などの「自ら動く要素の集団」はアクティブマターと呼ばれ、近年、統計物理学や生物物理学において盛んに研究されている。これまでの研究は、古典系が中心であったが、高三は、足立氏 (理研)・川口氏 (東大) と共に、アクティブマター物理を量子多体系に拡張する研究を推進している。その非平衡性に起因して、平衡では生じない相転移やパターン形成を示すアクティブマターを量子系に拡張することは、新しい非平衡量子現象の発見につながることを期待される。最近の研究では、アクティブマターと類似した非エルミート 1 次元ハードコアボソン系において、アクティブ性に起因する強磁性秩序が発現することを明らかにした (図 3.6.12)。この相転移は、鳥や魚が群れを形成する際に運動方向が揃う相転移 (フロッキング転移) の量子対応物と考えられる。本研究では、数値シミュレーションのみならず、解析的なアプローチも組み合わせることで、強磁性のメカニズムも明らかにすることができた。高三は、本研究に関するプレスリリース [51] を行った他、国際会議や研究会等で発表を行った [12, 19, 23, 43, 46, 48]。

部分可解な境界駆動型量子スピン系の定常状態

熱平衡化する孤立量子系におけるエネルギー固有状態のうち、マクロ変数によって熱平衡状態と区別されるものは量子傷跡状態と呼ばれ、強い固有状態熱化仮説に反する特異な状態として近年注目を集めている。量子傷跡状態の多くはマクロ変数に見られる長時間残る振動や、熱平衡状態と比べて低いエンタングルメント・エントロピーなどで特徴付けられる、可解な状態であることが知られている。辻は松井氏 (数理科学研究科) と共同で、境界に散逸のある開放量子系のうち部分可解な模型について定常状態を解析した。その結果、ハミルトニアンが部分可解性をもつときに、その可解状態のうち境界の散逸に対してロバストなものが存在することがわかった。また、ハミルトニアンのもつヒルベルト空間分割構造がリウビリアンに受け継がれる場合があることを示した。このような開放量子系が、マクロ変数に見られる長時間残る振動や低いエンタングルメント・エントロピーなど、部分可解な孤立量子系の性質を受け継いでいることを明らかにした。この研究を原著論文 [3] にまとめ、研究会で発表した [31]。

量子電磁場と結合した強相関電子系

光子と物質を微小な共振器中に閉じ込めて、光の量子性を保ちながら物質との相互作用を増強することで、光と物質の性質を相互に制御する試みが近年盛んにされている。このような量子電磁場と物質の結合の影響は様々な物理量に現れるが、電子相関も重要になる強相関電子系と量子電磁場が結合した系における物理量への影響は未解明な部分が多い。中本、高三、辻は、一次元拡張ハバード模型と量子電磁場が結合した模型に注目し、光子占有数や励起スベ

クトルを、テンソルネットワークの手法を用いて解析した。スピン密度波相と電荷密度波相の境界領域において、光子占有数は弱結合領域で極小を、強結合領域で極大をとることを明らかにした。また、励起スペクトルは模型の次近接相互作用の大きさによって定性的に異なる構造を持つことを明らかにした。これらの結果を、その解釈も含めて研究会等で発表し [20, 26, 37, 41]、中本は修士論文 [9] にまとめた。

3.6.3 量子多体傷跡状態

孤立量子多体系が熱力学と整合した性質を示すためには、エネルギー固有状態が個々に熱的な振る舞いを示すことが期待される。一方で近年、例外的に非熱的な性質を示す量子多体傷跡状態と呼ばれるエネルギー固有状態が存在できることがわかり、特に η ペアリング状態という、長距離の超伝導相関を示す量子多体傷跡状態の構成法が議論されてきた。今井、辻は、これまで知られていた η ペアリング状態を非従来型のペア対称性を持つ場合に拡張する方法を提案した。そのために三体以上の多体相互作用を導入し、ペアが重なったときに生じる二体相互作用の増加分を多体相互作用によって相殺することで、非従来型の η ペアリング状態をエネルギー固有状態にすることができる。この考えを多体相互作用を持つ 2 次元 Hubbard 模型に応用し、 d 波の η ペアリング状態が厳密な固有状態になることを示した。また、準位統計の数値解析によって模型が非可積分であり、 d 波 η ペアリング状態が量子多体傷跡状態とみなせることがわかった。これらの結果を原著論文にまとめ [5]、研究会で発表した [11, 28, 29, 39, 44]。

3.6.4 量子多体系の動的応答

固体電子系におけるアト秒科学

強い光によって駆動される電子系は、高次高調波発生 (HHG) をはじめとする様々なアト秒スケールの超高速現象を誘起する。従来、アト秒パルスの生成は主に原子ガス系で実現されてきたが、固体中では電子状態の複雑性により、系統的な方法が確立されていない。そこで今井は、小野淳氏 (東北大) と共同で、Sauter ポテンシャル中の massive Dirac 模型から得られる厳密解を拡張することで、バンド絶縁体中の電子波束のダイナミクスを制御する方法を確立し、理論限界に近いアト秒スケールの超短パルスを実現できることを示した。これらの結果について、国際学会招待講演 [10] や学会発表 [18] を行った。また、半導体や Mott 絶縁体における HHG の観測が進む中、今井は小野氏 (東北大)・奥村氏 (東大工)・赤城氏 (東大理) と共同で、トポロジカル磁性体の強電場駆動ダイナミクスについて数値解析を行い、トポロジカルスピントクスチャに由来する特異な HHG が現れることを示し、原著論文にまとめた [4]。さらに今井は、小野氏・辻とともに、巨視的量子光によ

って駆動される量子電子ダイナミクスの有効理論を開発し、学会発表 [33] を行った。

可積分スピン鎖に創発する KPZ 普遍クラス

2019 年に、Heisenberg スピン鎖の相関関数に Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 普遍クラスと関連する挙動が見出された。KPZ 普遍クラスとは、界面成長に代表される非平衡現象のゆらぎに関する普遍クラスである。ノイズを含まず単にユニタリ時間発展する量子多体系において KPZ 的挙動が生じるという新現象は、理論・実験の両面から注目を集めてきた。しかし、ごく最近の数値シミュレーションや実験にもとづく KPZ 普遍クラスとの不一致も報告され、その関連性に疑義が呈されていた。そこで、高三は、竹内 (東大) らと共に、Heisenberg スピン鎖の振る舞いを数値的に調べ、KPZ 普遍クラスの厳密解との詳細な比較を行った。その結果、少なくとも 2 点相関に関する量は KPZ 普遍クラスと定量的に合致することを明らかにした。高三は行列積演算子を利用した量子 Heisenberg スピン鎖のシミュレーションを担当した。本研究について、原著論文 [6] にまとめた他、国際ワークショップ等で発表を行った [13, 16]。

Weyl 半金属における THz 電場パルス駆動ダイナミクス

固体中の電子の非平衡ダイナミクスを理解することは、非平衡状態の物性を研究する上でも、エレクトロニクスを超えたデバイス技術を確立する上でも重要である。しかし、とても高速で、かつ様々な散乱効果でデコヒーレンスしてしまう電子のコヒーレントなダイナミクスを捉えるのは一般に難しい。高三は、池田 (阪大) らと共に、比較的長いコヒーレンス時間を持つ Weyl 半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ を強い THz 電場で駆動したダイナミクスを調べた。その結果、電子のコヒーレントな加速に伴う非散逸的電流を観測することに成功した。光電場駆動系に特徴的な Landau-Zener 遷移が生じていることを示唆している。本実験は、大阪大学の木村真一氏のグループで行われ、高三は理論的なサポートを担当した。その成果は原著論文 [1] として発表された。

ゲージ/重力対応にもとづく非線形応答の計算手法

AdS/CFT 対応に代表される「ゲージ/重力対応」は、強相関量子多体系における物理量を、1 次元高次元の古典重力理論を通じて計算することを可能にしてくれる。ゲージ/重力対応にもとづいて、強相関物質の非平衡物理を調べる研究はこれまでも盛んに行われてきたが、非線形応答の計算方法において、限られたクラスの模型しか取り扱えないアプローチが主流となっていた。そこで高三は、石垣 (上海大)・中村 (中央大) と共に、この課題に取り組み、幅広い系に適用可能な非線形応答の計算手法を確立した。こ

の手法を用いることで、系の作用が特別な構造を持たなくとも、非線形伝導度や非線形摩擦係数を計算することが出来る。本研究の成果は、原著論文 [2] として発表された。

3.6.5 テンソルトレイン法による量子多体系の解法

動的平均場理論は Hubbard 模型といった量子多体系を不純物問題に置き換えることで解析する理論的枠組みである。動的平均場理論に基づいて計算を行う際には不純物問題のグリーン関数を求める必要があり、連続時間量子モンテカルロ法はこの計算に広く用いられている手法である。しかし、この手法は多軌道系、クラスター系や非平衡系への拡張を考えた場合には負符号問題が避けられないという問題点を抱えている。そこで、松浦、辻は品岡寛氏 (埼玉大)、Philipp Werner 氏 (Fribourg 大) と共同でテンソルトレイン分解を用いた不純物問題のソルバーの開発を行った。このソルバーは連続時間量子モンテカルロ法においては負符号問題が避けられない場合でも用いることができるという利点を持っている。このソルバーを厳密に解ける不純物問題、および Hubbard 模型についての動的平均場理論計算に応用し、これらの問題においてはテンソルトレイン分解による計算が効率的に行えることを示した。これらの結果について研究会等で発表した [21, 36, 42, 47]。

3.6.6 多体励起子と磁気秩序

NiPS₃ はジグザグ型の磁性を持つファンデルワールス 2 次元物質であり、X 線共鳴散乱実験において鋭い準粒子ピークを示すことが知られている。この準粒子ピークは励起子に対応するものだと考えられており、その分散関係は NiPS₃ のクーロン相互作用や磁性の情報を反映していることが予想される。しかし、これまでの研究で主に行われてきたのは NiPS₃ の格子全体から取り出した少数のサイトのみを考慮したモデル計算であり、格子の周期性や磁性の影響は考慮されていなかった。そこで、松浦、今井、辻は Hubbard I 近似やクラスター摂動論といった手法を用いて、格子の周期性と磁性の効果を取り入れた計算を行った。これらの結果については研究会で発表した [25, 27]。

<報文>

(原著論文)

- [1] Ryohei Ikeda, Hiroshi Watanabe, Moon Ji Heon, Myung-Hwa Jung, Kazuaki Takasan, Shin-ichi Kimura, “Light-Field-Driven Non-Ohmic Current Generation by an Intense THz Pulse in a Weyl Semimetal”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **93**, 053701 (2024).
- [2] Shuta Ishigaki, Shin Nakamura, Kazuaki Takasan, “Patchwork Conditions for Holographic Nonlinear

Responses: A Computational Method for Electric Conductivity and Friction Coefficient”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2024**, 083B07 (2024).

- [3] Chihiro Matsui, Naoto Tsuji, “Boundary dissipative spin chains with partial solvability inherited from system Hamiltonians”, *Phys. Rev. B* **110**, 224306 (2024).
- [4] Atsushi Ono, Shun Okumura, Shohei Imai, and Yutaka Akagi, “High harmonic generation from electrons moving in topological spin textures”, *Phys. Rev. B* **110**, 125111 (2024).
- [5] Shohei Imai and Naoto Tsuji, “Quantum many-body scars with unconventional superconducting pairing symmetries via multibody interactions”, *Phys. Rev. Research* **7**, 013064 (2025).
- [6] Kazumasa A. Takeuchi, Kazuaki Takasan, Ofer Busani, Patrik L. Ferrari, Romain Vasseur, Jacopo De Nardis, “Partial Yet Definite Emergence of the Kardar-Parisi-Zhang Class in Isotropic Spin Chains”, *Phys. Rev. Lett.* **134**, 097104 (2025).

(国内雑誌)

- [7] 辻直人, 「非平衡超伝導の物理」, 物性若手夏の学校テキスト, Vol. 3, pp. 72-149 (2025).

(学位論文)

- [8] 永島来悟, “Collective modes and optical response in multiband superconductors with Lifshitz invariant”, 修士論文, 2025 年 3 月.
- [9] 中本大河, “Theoretical study of the one-dimensional extended Hubbard model coupled with an optical cavity”, 修士論文, 2025 年 3 月.

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [10] Shohei Imai and Atsushi Ono, “Theoretical proposal of Fourier-limited attosecond pulse generation from electrons in solids”, Conference on Laser and Synchrotron Radiation Combination Experiment 2024 (LSC8), Pacifico Yokohama (Yokohama, Japan), April 2024.
- [11] Naoto Tsuji, “Quantum many-body scars with unconventional superconducting pairings”, Trends in the Theory of Quantum Materials (TTQM2024), Fribourg, Switzerland, June 2024.

一般講演

- [12] Kazuaki Takasan, “Activity-induced quantum phase transitions: A proposal for quantum active matter”, Non-equilibrium Many-body Physics Beyond the Floquet Paradigm, Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems (Dresden, Germany), June 2024.

- [13] Kazuaki Takasan, “Quantitative test of various two-point KPZ correlations in the quantum Heisenberg chain”, Recent developments in Kardar-Parisi-Zhang universality, Yukawa Institute for Theoretical Physics (Kyoto, Japan), September 2024.
- [14] Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Superconducting nonlinear Hall effect from a two-particle geometric phase”, APS Global Physics Summit, Anaheim Convention Center (Anaheim, USA), March 2025.
- [15] Huanyu Zhang, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Nonequilibrium hysteretic phase transitions in periodically light-driven superconductors”, APS Global Physics Summit, Anaheim Convention Center (Anaheim, USA), March 2025.
- [16] Kazumasa A. Takeuchi, Kazuaki Takasan, Ofer Busani, Patrik Ferrari, Romain Vasseur, Jacopo de Nardis, “Partial yet definite emergence of the Kardar-Parisi-Zhang class in isotropic spin chains”, APS Global Physics Summit, Anaheim Convention Center (Anaheim, USA), March 2025.

ポスター発表

- [17] Huanyu Zhang, “Light-induced enhancement of superconductivity in Floquet steady states, Nonequilibrium Many-body Physics Beyond the Floquet Paradigm”, Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems (Dresden, Germany), June 2024.
- [18] Shohei Imai and Atsushi Ono, “Theoretical proposal for attosecond pulse generation in crystalline solids”, Photoinduced Phase Transitions and Cooperative Phenomena 2024 (PIPT8), (Nijmegen, the Netherlands) June 2024.
- [19] Kazuaki Takasan, “Activity-induced quantum phase transitions: A proposal for quantum active matter”, Focus Week on Non-equilibrium Quantum Dynamics, Kavli IPMU (Kashiwa, Japan), September 2024.
- [20] Taiga Nakamoto, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Virtual photons and vacuum Rabi splitting in the extended Hubbard model coupled with an optical cavity”, Topological Nonlinear Optics in Quantum Materials 2025 (TOPONL2025), University of Tokyo (Kashiwa, Japan), February 2025.
- [21] Shuta Matsuura, Hiroshi Shinaoka, Philipp Werner, Naoto Tsuji, “Tensor cross interpolation approach for quantum impurity problems based on the weak-coupling expansion”, FoPM International Symposium, University of Tokyo (Tokyo, Japan), February 2025.

セミナー

- [22] Naoto Tsuji, “Higgs and Leggett modes and Lifshitz invariant in superconductors”, ETH Zürich, Switzerland, June 2024.

(国内会議)

招待講演

- [23] 高三 和晃, 「非平衡物質相を利用した革新的量子デバイス技術の創出」, 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月.
- [24] 辻直人, 「光で見る超伝導体の集団励起モード」, 非平衡固体物性の最前線 2024, 京都大学, 2024 年 11 月.

一般講演

- [25] Naoto Tsuji, “Many-body excitons and collective modes of condensates”, 科研費基盤 A 2024 年度研究会, 沖縄科学技術大学院大学 (OIST), 2024 年 6 月.
- [26] Taiga Nakamoto, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Excitons in one dimensional Mott insulators with an optical cavity”, 科研費基盤 A 2024 年度研究会, 沖縄科学技術大学院大学 (OIST), 2024 年 6 月.
- [27] Shuta Matsuura, Shohei Imai, Naoto Tsuji, “Analysis of a NiS₆ 2-cluster by exact diagonalization”, 科研費基盤 A 2024 年度研究会, 沖縄科学技術大学院大学 (OIST), 2024 年 6 月.
- [28] Naoto Tsuji, “Creation of condensed matter physics of high-energy superconductivity”, JST 創発「創発の場」, 東京, 2024 年 6 月.
- [29] 辻直人, 「高エネルギー超伝導物性物理学の創出」, JST 創発「融合の場」, 京都, 2024 年 7 月.
- [30] 辻直人, 「乱れた超伝導体における 3 次の非線形 Kerr 効果と Higgs モード」, 日本物理学会 第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月.
- [31] 松井千尋, 辻直人, 「量子多体傷跡状態由来の可解な定常状態をもつ境界駆動量子系」, 日本物理学会 第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月.
- [32] 高三 和晃, 辻直人, 「超伝導非線形ホール効果と光電場駆動ダイナミクス」, 日本物理学会 第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月.
- [33] 今井渉平, 小野淳, 辻直人, 「光量子場で駆動される電子ダイナミクスの理論」, 日本物理学会 第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月.
- [34] Huanyu Zhang, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Light-induced enhancement of superconductivity in Floquet steady states”, 日本物理学会 第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月.
- [35] 永島来悟, Titouan Moulleron, 辻直人, 「多バンド超伝導体のペア密度波状態における Higgs モードの線形応答」, 日本物理学会 第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月.

ポスター発表

- [36] 松浦修大, 品岡寛, Philipp Werner, 辻直人, 「Quantics tensor cross interpolation の動的平均場理論への応用」, 第 69 回物性若手夏の学校, 愛知県蒲郡市西浦町, 2024 年 8 月.
- [37] 中本大河, 高三和晃, 辻直人, 「光共振器と超強結合した Mott 絶縁体の理論」, 日本物理学会 第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月.

- [38] 高三 和晃, 「超伝導非線形ホール効果と光電場駆動ダイナミクス」, 非平衡固体物性の最前線 2024, 京都大学, 2024 年 11 月.
- [39] 今井渉平, 辻直人, 「非従来型超伝導ペアリング対称性を持つ量子多体傷跡状態」, 非平衡固体物性の最前線 2024, 京都大学, 2024 年 11 月.
- [40] 永島来悟, Titouan Mouilleron, 辻直人, 「多バンド超伝導体のペア密度波状態における Higgs モードの線形応答」, 非平衡固体物性の最前線 2024, 京都大学, 2024 年 11 月.
- [41] 中本大河, 高三和晃, 辻直人, 「光共振器と超強結合した Mott 絶縁体の理論」, 非平衡固体物性の最前線 2024, 京都大学, 2024 年 11 月.
- [42] 松浦修大, 品岡寛, Philipp Werner, 辻直人, 「Tensor cross interpolation と弱結合展開による量子不純物問題の解析」, 計算物理春の学校 2025, 沖縄県市町村自治会館, 2025 年 3 月.

(セミナー)

- [43] 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」, 立命館大学, 2024 年 8 月.
- [44] 今井渉平, 「非従来型超伝導を示す量子多体傷跡状態 — 三体・四体…多体の相互作用を利用して —」, 北海道大学 山本昌司研究室セミナー, オンライン, 2024 年 8 月.
- [45] 辻直人, 「超伝導体の集団励起モード: 現代の視点から」, 第 441 回物性談話会 (共催 豊田理化学研究所), 名古屋大学, 2024 年 10 月.
- [46] 高三 和晃, 「アクティブ性が誘起する量子相転移: “量子アクティブマター” の提案」, 東京理科大学, 2024 年 11 月.
- [47] 辻直人, 「非平衡量子多体系のための数値解析」, 第 8 回創発研究交流会, 東京大学, 2024 年 12 月.
- [48] Kazuaki Takasan, “Activity-induced quantum phase transitions: A proposal for quantum active matter”, 物理学第一教室 量子光学セミナー, 京都大学, 2025 年 3 月.

(集中講義)

- [49] 高三和晃, 「非平衡物質相の物理」, 立命館大学 夏季集中講義, 2024 年 8 月 5-6 日.
- [50] 辻直人, 「非平衡超伝導の物理」, 第 69 回物性若手夏の学校 講義, 愛知県蒲郡市西浦町, 2024 年 8 月.

(アウトリーチ)

プレスリリース

- [51] 高三 和晃, 足立景亮, 川口喬吾, 「量子の群れが作る秩序 — 非平衡系に生じる磁性の新機構を理論的に発見 —」, 2024 年 4 月 27 日.

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情報/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、これらの分野 - 量子多体物理と量子情報/光学 - の境界領域における理論研究を行っている。特に、摂動の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。

デコヒーレンス環境下のトポロジカル秩序

近年、デコヒーレンス環境下でのトポロジカル秩序の安定性が重要な研究課題となっている。特に、測定ベース量子計算の資源として重要な、2次元クラスター状態などの対称性に保護されたトポロジカル(SPT)相が、局所ノイズ下でどのように変化するかは未解明であった。従来の研究では、純粋状態を仮定したSPT相の理解が主流であった。一方、実際の実験系では不可避なデコヒーレンスの影響を考慮した理論的枠組みが求められている。Guo、蘆田はデコヒーレンス環境下における2次元クラスター状態のSPT相の転移現象を理論的に解明した。局所的なノイズ条件下でSPT秩序が臨界ノイズ強度を境に急激に失われることを示し、この相転移が古典スピンモデルの秩序無秩序転移と対応することを明らかにした。特に、位相ノイズとビット反転ノイズがSPT秩序に及ぼす影響の本質的な違いを指摘し、量子計算リソースとしての有用性がノイズ強度によって質的に変化することを理論的に解明した。またこれらの混合状態相転移と電子格子相互作用系との関連についても、Spin-Holsteinモデルを念頭に置いた解析を通して明らかにした。以上の成果は論文を通じて発表された[2, 10]。

確率過程におけるバルクエッジ対応

トポロジカル物性における重要な概念はバルクエッジ対応である。近年、量子系のみならず様々な古典系においてもバルクエッジ対応が成立することが提案されている。横溝、蘆田は東大工学系の沙川研とともに、1次元古典確率過程においてバルクエッジ対応が成立することを解明した。確率過程を記述する確率分布の時間発展を記述する方程式は非エルミート演算子により形式的に記述されるが、非エルミートトポロジーに由来した巻付き数が系の端に局在する定常状態の出現を予言することが見出された。さらに、このバルクエッジ対応はエルゴード過程のみならず非エルゴード過程においても成立することが示されている。以上の成果は国際会議での一般講演を通じて発表された[14]。

フォトニック結晶における非エルミートブロッホバンド理論

フォトニック結晶とは、屈折率が異なる物質を周期的に配置することで作成された結晶構造のことである。このような周期構造によって、光の伝搬や透過を制御することが可能になる。また、光学的な利得・損失を導入することができるので、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となることが知られている。横溝、蘆田らは連続体における非エルミートブロッホバンド理論を構築し、非エルミート表皮効果を示すフォトニック結晶のバンド構造を調べた。誘電体を用いる場合、誘電率テンソルの異方性と光学的な利得・損失によって非エルミート表皮効果が起きることを明らかにした。また、固有状態の局在長は固有値に依存しない。一方、電気磁気結合を示すメタマテリアルを用いる場合、カイラリティと光学的な利得・損失によって非エルミート表皮効果が起きることを見出した。誘電体を用いたフォトニック結晶とは異なり、固有状態の局在長は固有値に依存する。以上の成果は国際会議の招待講演を通じて発表された[21]。

系-環境エンタングルメントの相転移・臨界現象

近年、測定に伴い量子多体状態のエンタングルメントが示すスケーリング則が質的に変化する現象 - 測定誘起相転移 - が盛んに研究されている。従来の問題設定では、測定結果の事後選択が必要となるため、相転移現象の物理的な意義や観測可能性は必ずしも明らかではなかった。蘆田は慶応大の古川氏、東大物性研の押川氏とともに、多体系と外界環境間のエンタングルメントに着目することで、事後選択を必要としない量子情報量が、測定誘起相転移と類似の現象を起こし得ることを見出した。特に、局所測定下の朝永-Luttinger液体を考え、着目系と測定器間のエンタングルメントを共形場理論を用いて解析し、その普遍的寄与が測定の強さに応じて特異的に変化する相転移現象を示すことを明らかにした。以

上の成果は国際会議での招待講演や出版論文を通じて発表された [6, 20, 22]。

量子スピン鎖におけるエンタングルメントスワッピング

エンタングルメントスワッピングとは、測定を用いることで直接の相互作用なしにエンタングルメントを作る過程のことである。星野、蘆田は東大物性研の押川研とともに量子スピン鎖におけるベル測定によるエンタングルメントスワッピングを共形場理論を用いて解析した。ベル測定を理論の境界条件として記述し、生成するエンタングルメントエントロピーをレプリカ法を用いて計算した。その結果、生成するエンタングルメントが測定回数の対数に比例して増加し、その比例係数が普遍的な定数を持つことを明らかにした。この結果を、具体例として1次元XXZモデルを用いて解析的・数値的に検証した。以上の成果は国際会議での一般講演などを通じて発表された [16, 24, 28]。

自由ボゾン系における測定誘起相転移

測定誘起相転移とは、量子エンタングルメントのユニタリ時間発展による生成と測定による破壊が競合することで起きる非平衡相転移である。これまでに、相互作用の無い自由フェルミオン系における測定誘起相転移の有無を焦点として活発に研究が行われてきた。横溝、蘆田は長距離結合をもつ自由ボゾン系における測定誘起相転移の有無を調べた。長距離結合が強い場合、エンタングルメントエントロピーの増加率が熱力学極限で発散する。そのため、エンタングルメントエントロピーが準体積則に従う相が出現する。局所的な測定では発散するエンタングルメントの生成が抑えられず、測定誘起相転移は起きない。一方、非局所的な測定の下ではエンタングルメントの生成と破壊が競合するため、準体積則相から面積則相への測定誘起相転移が起きることが見出された。また、有限サイズスケールリング解析により、この測定誘起相転移は共形場理論で特徴づけられる新奇なユニバーサリティクラスに属することが明らかになった。以上の成果は国際会議での一般講演などを通じて発表された [17, 26]。

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。

共振器モアレ物質

これまで単一電子レベルでの光物質超強結合は、マイクロ波領域では実験的に達成されているものの、固体物質の制御で重要となるテラヘルツ領域では未達成である。これは従来のFabry-Perot型あるいはプラズモニック型の共振器では集団的な増強なしに超強結合に到達することが困難と考えられているためである。最近、我々のグループによりファンデルワールス物質における双極分散を持つフォノンポラリトンモードを用いることで、テラヘルツ領域の電磁場をナノスケールに閉じ込め単一電子レベルでの超強結合を実現する可能性が提案された。増木、蘆田は六方晶窒化ホウ素(hBN)薄膜で形成される共振器に閉じ込められた捻り二層モアレ物質系を考え、光物質結合強度やツイスト角を変化させることで、スピン液体相を含む多様な多体相が実現できることを理論的に示した。以上の成果は論文や国際会議での招待講演を通して発表された [3, 23]。

共振器によって増強される近藤効果

量子電磁場による真空ゆらぎを利用して物質を制御する共振器物質系の研究が近年盛んに行われている。持田、蘆田は量子電磁場と相互作用する系での近藤効果を理論的に探求した。本研究では、量子電磁場と伝導電子、伝導電子と磁性不純物といった、異なる自由度間の相関を分離するユニタリ変換を積極的に応用することで、共振器中の磁性不純物モデルを解析した。変分計算を通じて、量子電磁場が誘起する伝導電子間の長距離相互作用が近藤効果を増強させることを示した。また、量子電磁場と近藤効果の間に物理量の普遍性関係が存在することを明らかにした。以上の成果は論文や国際会議での招待講演を通じて発表された [5, 23]。

3.7.3 統計物理・機械学習

くりこみ群と生成モデル

複雑な画像・音声等のデータを生成する機械学習モデルを一般に生成モデルと呼ぶ。とりわけ、拡散過程を用いてノイズから徐々にデータを生成する拡散モデルは、その高いデータ生成能力から生成モデル分野において大きな注目を集めており、過去数年に渡って急速な発展を遂げている。現状、拡散モデルをより広い自然科学分野へ応用するにあたっては、生成にかかるデノイジングステップ数や学習・生成での計算コストを抑えることが重要であり、機械学習サイドからは発見的な手法に基づく様々な試みがなされてきた。今回、増木・蘆田は拡散モデルにおける拡散過程を厳密くりこみ群におけるフロー方程式に1対1対応させることで、くりこみ群(粗視化)の逆過程を模してデータを生成する拡散モデル、くりこみ群的拡散モデル、を提案した。そこでは、各々のデータは低次の波数成分(概形)から高次の波数

成分（詳細）に向かって作られる。増木、蘆田は、くりこみ群的拡散モデルを画像生成とタンパク質の構造推定という、二つの異なる応用上重要な分野へと適用し、従来の白色ノイズを用いる拡散モデルに比べてくりこみ群的拡散モデルでは、生成の質と速さにおいて高い性能が出ることを確かめた。以上の成果は国際会議での一般講演や国内会議での一般講演を通じて発表された [12, 13, 25]。

機械学習を用いた量子センシング

蘆田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温度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温度測定が可能となると期待される。以上の成果は出版論文を通じて発表された [9]。

3.7.4 冷却原子

量子縮退気体に浮かべられた不純物間に誘導される複素相互作用

量子多体系中の不純物粒子の振る舞いを解明することは、固体物理や原子核物理、冷却原子系など、エネルギースケールを問わずさまざまな分野において普遍的に現れる問題である。近年、冷却原子系においては、バイポーラロンと呼ばれる2つの不純物の束縛状態の形成を示唆する研究に動機付けられ、媒質によって不純物粒子間に誘導される相互作用が注目を集めている。こうした背景を受け、藤井は、有限温度量子気体中で誘導される相互作用に関する研究を行った。有限温度媒質中では、有限温度効果によって、不純物間の相関が減衰する。この効果は、誘導相互作用の虚部として理解することができ、通常誘導相互作用を実部として、複素数値を取る複素相互作用として統一的枠組みで議論できる。本研究では、冷却原子気体中の不純物に対して、その虚部を計算し、長距離において普遍的なべき乗則的振る舞いを示すことを明らかにした。複素誘導相互作用という観点は、原子核物理、特にクォーク・グルーオン・プラズマ中の重クォークの研究で盛んに研究が進められており、冷却原子系を活用したさらなる応用が見込まれる。以上の成果は論文および国際会議での一般講演を通じて発表され [7, 11]。

冷却原子系における流体力学的アトラクター

従来、流体力学的記述は、散逸補正が局所熱力学量（例えば圧力）に比べて十分に小さい状況にのみ適用可能であると考えられてきた。しかし、こうした条件が成立しない、平衡からかけ離れた状況においても、流体力学が有効であることを示す結果が、重イオン

衝突実験などを中心に多数報告されている。このような非平衡における流体力学的振る舞いは「流体力学的アトラクター」と呼ばれ、盛んに研究が進められている。藤井は、冷却原子系において、Feshbach 共鳴を利用して原子間相互作用を自在に調節できるという特性を活かして、この流体力学的アトラクターを実現し調べる方法について議論した。希薄冷却原子気体においては、原子間相互作用は s 波散乱長のみで特徴付けられ、その時間的な変調は、流体の等方的な膨張収縮と等価であると見做せる。この事実を活用し、流体力学的アトラクターが実現される散乱長の駆動プロトコルを提案した。以上の成果は論文および国際会議での招待講演などを通じて発表された [8, 19, 27]。

2次元 Bose-Einstein 凝縮におけるパターン形成

パターン形成は、最初は均質な系から自発的に構造が形成される現象であり、物理学のみならず、化学や生物など多岐にわたる分野で見られる興味深いトピックである。パターン形成に対しては長年の研究の蓄積が存在するが、冷却原子系の高度な実験的制御性が可能にするパターン形成は、近年の非平衡物理学の進展と共に、この分野に新たな研究の場を提供している。藤井は、2次元 Bose-Einstein 凝縮 (BEC) 中において原子間相互作用を周期的に駆動することによって生じるパターン形成を研究した。周期的な駆動は、2次元 BEC 中においてパラメトリック共鳴を引き起こし、系の様な状態を不安定にする。そして、パラメトリック共鳴による励起モードの増幅と、相互作用による抑制との間の競合により、系は安定な非一様密度パターンを形成する。生じる密度パターンを解析するために、BEC を記述する Gross-Pitaevskii 方程式からパターン形成における Ginzburg-Landau 方程式を導出した。導出した方程式に対する安定性解析により、非一様密度が正方格子パターンを安定な定常状態として実現することを示した。本研究はドイツの実験グループと共同で行われ、本結果は、実験データに一貫した理論的枠組みを提供する。以上の成果はセミナーや国内会議での招待講演などを通じて発表された [18, 30, 31]。

3.7.5 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。持田は東京科学大学の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、論文を通じて発表された [4]。

非線形誘起トポロジカル相転移

バンドトポロジーの概念を古典非線形系にも拡張することで、非線形系における端状態の有無がトポロジカル不変量で特徴付けられることを見出した。チェーン絶縁体を非線形領域に拡張した模型を考え、チェーン数を拡張することで、トポロジカル不変量 - 非線形チェーン数 - を具体的に構成し、その値が端状態の頑健性と密接に関連することを数値的に検証した。以上の成果は国際会議での一般講演を通じて発表された [15]。

<受賞>

- [1] 横溝和樹, 第 19 回日本物理学会若手奨励賞「非エルミート系におけるブロッホバンド理論の構築とその応用」, 日本物理学会, 2025 年 3 月 18 日。

<報文>

(原著論文)

- [2] Y. Guo and Y. Ashida, Two-dimensional symmetry-protected topological phases and transitions in open quantum systems, *Physical Review B* **109**, 115115 (May 2024).
- [3] K. Masuki and Y. Ashida, Cavity moiré materials: Controlling magnetic frustration with quantum light-matter interaction, *Physical Review B* **109**, 195173 (May 2024) [Editors' suggestion].
- [4] J. Mochida and H. Ishizuka, Skew scattering by magnetic monopoles and anomalous Hall effect in spin-orbit coupled systems, *New Journal of Physics* **26**, 063031 (June 2024).
- [5] J. Mochida and Y. Ashida, Cavity-enhanced Kondo effect, *Physical Review B* **110**, 035158 (July 2024) [Editors' suggestion].
- [6] Y. Ashida, S. Furukawa, and M. Oshikawa, System-environment entanglement phase transitions, *Physical Review B* **110**, 094404 (September 2024).
- [7] Y. Akamatsu, S. Endo, K. Fujii, and M. Hongo, Complex-valued in-medium potential between heavy impurities in ultracold atoms, *Physical Review A* **110**, 033304 (2024).
- [8] K. Fujii and T. Enss, Hydrodynamics Attractor in Ultracold Atoms, *Physical Review Letters* **133**, 173402 (October 2024).
- [9] K. Yamamoto, K. Ogawa, M. Tsukamoto, Y. Ashida, K. Sasaki, and K. Kobayashi, Nanodiamond quantum thermometry assisted with machine learning, *Applied Physics Express* **18**, 025001 (February 2025).

- [10] B. Min, Y. Zhang, Y. Guo, D. Segal, and Y. Ashida, Mixed-state phase transitions in spin-Holstein models, *Physical Review B* **111**, 115123 (March 2025).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [11] K. Fujii, Complex-valued in-medium potential between heavy impurities in ultracold atoms, *Quantum Simulation of Novel Phenomena with Ultracold Atoms and Molecules*, Kyoto, Japan, April 22 - 25, 2024.
- [12] K. Masuki and Y. Ashida, Generative diffusion model with inverse renormalization group flows, *DAIKIN International Symposium of Physics of Intelligence*, Tokyo, Japan, November 6 - 8, 2024.
- [13] K. Masuki and Y. Ashida, Generative diffusion model with inverse renormalization group flows, *FoPM International Symposium*, Tokyo, Japan, February 17 - 19, 2025.
- [14] T. Sawada, K. Sone, K. Yokomizo, Y. Ashida, and T. Sagawa, Bulk-Boundary Correspondence in Ergodic and Nonergodic One-Dimensional Stochastic Processes, *APS Global Physics Summit 2025*, California, America, March 16 - 21, 2025.
- [15] K. Sone, M. Ezawa, Y. Ashida, N. Yoshioka, and T. Sagawa, Nonlinearity-induced topological phase transition characterized by the nonlinear Chern number, *APS Global Physics Summit 2025*, California, America, March 16 - 21, 2025.
- [16] M. Hoshino and Y. Ashida, Entanglement swapping in critical quantum spin chains, *APS Global Physics Summit 2025*, California, America, March 16 - 21, 2025.
- [17] K. Yokomizo and Y. Ashida, Measurement-induced phase transition in free bosons, *APS Global Physics Summit 2025*, California, America, March 16 - 21, 2025.

ポスター発表

- [18] K. Fujii, Pattern Formation in Driven Two-Dimensional Bose-Einstein Condensates, *Quantum Simulation of Novel Phenomena with Ultracold Atoms and Molecules*, Kyoto, Japan, April 22 - 25, 2024.

招待講演

- [19] K. Fujii, Hydrodynamics in strongly correlated quantum gases, *Advances in Fluctuating Hydrodynamics: Bridging the Micro and Macro Scales*, Kyoto, Japan, June 17 - 28, 2024.
- [20] Y. Ashida, Universality and phase transitions in system-environment entanglement, *Recent Developments and Challenges in Topological Phases*, YITP, Kyoto, Japan, June 3-14, 2024.

- [21] K. Yokomizo, T. Yoda, Y. Ashida, and S. Murakami, Non-Bloch band theory of photonic crystals, META2024, Toyama, Japan, July 16 - 19, 2024.
- [22] Y. Ashida, Universality and phase transitions in measurement-induced entanglement, Beijing-Tokyo-Xian Joint Workshop on Quantum Matters, Xian, China, Oct. 16-20, 2024.
- [23] Y. Ashida, Cavity control of quantum materials, Quantum Optics of Correlated Electron Systems, KITP, USA, January 13 - February 28, 2025.

(国内会議)

一般講演

- [24] 星野真宏, 押川正毅, 蘆田祐人, 量子スピン鎖におけるエンタングルメントスワッピング, 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道, 2024 年 9 月 16 日 - 19 日.
- [25] 増木貫太, 蘆田祐人, 汎関数くりこみ群の逆変換に基づく生成モデル, 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道, 2024 年 9 月 16 日 - 19 日.
- [26] 横溝和樹, 蘆田祐人, 自由ボゾン系における測定誘起相転移, 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道, 2024 年 9 月 16 日 - 19 日.
- [27] 藤井啓資, Tilman Enss, 冷却原子系における流体力学的アトラクター, 日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 18 日 - 21 日.

ポスター発表

- [28] 星野真宏, 押川正毅, 蘆田祐人, 量子スピン鎖におけるエンタングルメントスワッピング, 第 69 回物性若手夏の学校, 愛知県, 2024 年 8 月 2 日 - 6 日.

招待講演

- [29] 蘆田祐人, 開放系の物理, 創発量子現象のフロンティア, 基礎物理学研究所, 2024 年 5 月 29 日 - 31 日.
- [30] 藤井啓資, 周期的駆動を伴う 2 次元 Bose-Einstein 凝縮におけるパターン生成, アトムの会, 伊豆山研修センター, 2024 年 7 月 30 日 - 8 月 1 日.

(セミナー)

- [31] 藤井啓資, 周期駆動を伴う 2 次元 Bose-Einstein 凝縮におけるパターン形成, 東京理科大, 2024 年 6 月 14 日.
- [32] 蘆田祐人, 開放系の物理, 名古屋大学物性談話会, 名古屋大学, 2024 年 7 月 11 日.

3.8 有田研究室

非経験的手法に基づく物性物理学の研究を行っている。非自明な電子状態に由来する特異物性を理論的に予言することや多様な物質に対する計算結果の蓄積を広く物理学の新原理、新法則、新概念の発見につなげることを目指している。精度の高い物質設計を可能にする新しい計算法論の開発にも積極的に取り組んでいる。

3.8.1 複雑なナノスピン構造に対する第一原理手法の開発

磁性体の第一原理計算においてしばしば問題になるのが、磁気秩序の発生にともなってユニットセルが膨らみ、計算コストが大きくなって Kohn-Sham 方程式を自己無撞着に解くことができなくなってしまうことである。この問題について、Gd 化合物のように、古典スピンでよく表現できるような局在スピンと伝導電子があって系が近藤格子模型でよくマップできる場合について、第一原理電子状態計算を大幅に効率化する方法論の開発を行なった。このアプローチでは 100 種類程度のスピン配置から古典スピンの作る有効磁場を表現するモデル関数を導出し、これによって任意の磁気構造の Kohn-Sham 方程式を one-shot の計算で精度良く導く (図 3.8.13)。開発した手法を Gd_2PdSi_3 に適用した。 Gd_2PdSi_3 ではスキルミオンと呼ばれるナノサイズの巨大なスピンの渦構造が形成され、それに由来してホール効果 (トポロジカルホール効果) が生じる。スピンの渦構造が実空間で非常に大きいため、これまでトポロジカルホール効果の第一原理計算は不可能であったが、本手法によって計算が実行可能になり、実験を定量的によく再現する結果が得られることがわかった。この結果は原著論文 [27] にまとめられ、プレスリリースが行われた。

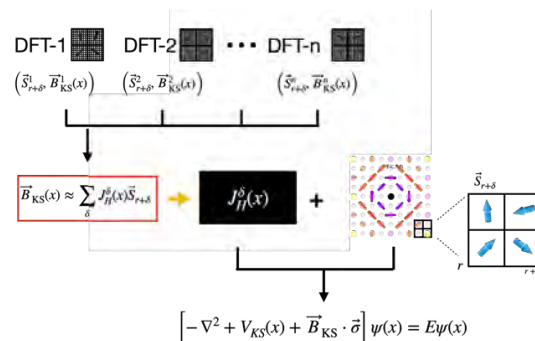


図 3.8.13: 複雑なナノスピン構造に対する第一原理計算法の概念図。

3.8.2 磁気構造予測と第三の磁性体 altermagnet の発見

与えられた結晶構造の情報からそこで実現する磁気構造の予測を行うことは興味深い挑戦課題である。この問題について、クラスター多極子理論に基づく方法論の開発を行ってきたが、磁気転移を起こすことが知られているもののその磁気構造がわかっていなかった 100 種類以上の磁性体についてハイスループット計算を行なった。その結果、FeS、MnAlPt が最近話題になっている第三の磁性体 altermagnet の一種であること、有限の異常横伝導を示すことを示

した。このうち FeS について実際に実験的合成がなされ、室温で異常ホール効果を示す altermagnet であることが示された。この成果は原著論文 [21] にまとめられ、プレスリリースが行われた。altermagnet については Cr をドーブした RuO_2 について、反強磁性体でありながらも有限のトンネル磁気抵抗効果が観測される可能性を指摘し、原著論文 [14] にまとめた。

3.8.3 有限温度の構造最適化法の開発と応用

与えられた温度のもとでどのような結晶構造が実現するかを予測するには格子振動について標準的な調和近似を越えた高度な計算手法を応用することが有効である。我々は有限温度の構造最適化法の開発に取り組んできたがこの問題を金属でありながら極性を持つ物質として興味を集めている LiBO_3 ($B = \text{Ta, W, Re, Os}$) に応用し、その極性-非極性転移を定量的に正しく再現することに成功した。この成果は原著論文 [15] および学位論文 [36](の一部) としてまとめられた。

3.8.4 超伝導体の第一原理計算

最近発見された Sc_6MTe_2 ($M = \text{Fe, Co, Ni}$) は単体では超伝導を示さない Sc と強磁性体である Fe, Co, Ni が化合物を作ると超伝導体になるという点で非常に興味深い物質群である。我々は系統的な第一原理計算を行い、これらの物質群では Sc から磁性元素に電荷が移動し、磁性不安定性を抑制すると同時に電子格子相互作用の強い、ラットリングフォノンと呼ばれる低エネルギーフォノンが形成されることを見出した。さらにこの特徴的なフォノンモードによって、Fe, Co, Ni の超伝導転移の系統的な変化が説明できることを明らかにした。この成果は原著論文 [16] にまとめられた。

超伝導転移温度を第一原理的に計算する上で難しいのがクーロン斥力とフォノン媒介の引力の大きなエネルギー差に由来する遅延効果の取り扱いである。この問題について、我々は松原周波数の効率的なサンプリング法の応用を進めてきた。一方、超伝導のギャップ方程式を低温で解析するためには有限サイズ効果を避けるため、十分に細かい波数メッシュをとらなければならない。この問題についてはワニエ関数を用いた内挿が有効である。波数空間と松原周波数についてこれらの効率的計算法を実装したコード開発を行い、公開すると同時にベンチマーク計算の結果を原著論文 [13] にまとめた。

超伝導転移温度以下の超伝導状態を特徴づける基本的な量としてコヒーレンス長、磁場侵入長がある。これらの長さはしばしば格子定数より遥かに大きなものとなり、巨大なユニットセルをとるなどの対応を考えなければならない。この問題について、一般化されたブロッホの定理にもとづいた効率的な計算

法を開発し、アルカリ金属をドーブしたフラレン超伝導体に適用した。この結果は原著論文 [20] にまとめられた。さらに低温の極限でも適用可能な方法論の開発に取り組んだ。この成果は修士論文 [33] としてまとめられた。

このほか、銅酸化物超伝導体について、その低エネルギー有効モデルのパラメータと化学式の間を機械学習の方法で関連づける研究を行い、原著論文 [9] としてまとめた。

3.8.5 第一原理計算による有効スピン模型の導出

強磁性スピントロニクスの実用例は枚挙に遑がないが、近年、反強磁性体を用いたスピントロニクスが漏れ磁場や応答速度の観点から注目を集めている。非自明な磁気構造を持つ反強磁性体の系統的な計算のためには、様々なスピン間相互作用を第一原理的に評価する必要がある。最も低次元ハイゼンベルグ相互作用を強磁性状態から摂動的に用いる算出法はしばしば用いられてきた一方で、より高次の相互作用を算出する手法は注目されてこなかった。しかし、近年非共面磁気構造を持つ反強磁性体において高次の相互作用が極めて重要な働きをすることが指摘されており、これら高次の相互作用を第一原理的に求められる手法の開発が望まれている。

そこで我々は、Spin Cluster Expansion (SCE) と Disordered Local Moment (DLM) を組み合わせることで、第一原理的に任意のスピン間相互作用を計算することができる手法開発を行った。SCE では、古典スピン系のエネルギー局面を完全直行基底関数系で展開し、その展開係数が各スピン間相互作用を表す。DLM は、各サイトに大きさを持つ磁気モーメントが存在し、それらがランダムな方向を向いている常磁性状態を記述する枠組みである。上記の SCE と DLM を組み合わせた枠組みは元来 KKR の枠組みの中で開発されたが、我々は強束縛模型から任意の展開係数、すなわちスピン間相互作用を計算する手法を定式化・開発した。本手法は平面波基底の DFT など強束縛模型を構築できる多くの第一原理計算フレームワークから使用することができ、より広範な物質に適用可能である。従来手法は磁気秩序から摂動的にスピン間相互作用を求めるため、算出される相互作用が参照磁気秩序に依存するという課題があった。それに対して本手法では、まず特定の磁気秩序に対して強束縛模型を構築し、そこから DLM という無秩序状態を導出する。その状態をもとにスピン間相互作用を計算するため、参照秩序状態への依存性が最小限に抑えられるという利点がある。

本手法のベンチマークとして、スピン分裂を持つ 1 次元 2 軌道強束縛模型に適用した。強相関極限において 4 次の相互作用である Biquadratic 相互作用を持つスピン模型が導出されており、本手法で求める相互作用がその値に漸近的に等しくなることが確かめられた。続いて、代表的な磁性体である Fe および Co に適用した。Fe では、ハイゼンベルグ相互作用に Biquadratic 相互作用を加えることで、スピン波

分散が実験的な結果に近づくことが確認された。また、Coにおいては、本手法によって得られるスピン間相互作用の参照磁気秩序依存性が、DLM 状態の磁気モーメントの大きさによってよく特徴付けられることが示された。本手法は、強束縛模型が構築可能である広範な第一原理計算フレームワークから任意のスピン間相互作用を計算することを可能にしており、非自明な反強磁性の系統的な計算において重要な手法である。

この結果は、国内学会 [65] および国際学会 [37, 48] にて発表されたほか、原著論文 [29] にまとめられた。

3.8.6 隠れた交替スピン分裂をもつマルチフェロイック磁性体の提案

正味の磁化はゼロでありながら時間反転対称性を破るコリニア磁性体は非相対論的スピン分裂を示し、スピン流や異常ホール効果が現れることが近年の研究で指摘されてきた。このような磁性体は、強磁性体や時間反転対称性を保った反強磁性体と区別するために、交替磁性体として命名され、スピントロニクスへの応用という点でも大きな注目を集めている。一方で、時間反転対称性を保ったコリニア反強磁性体は非相対論的スピン分裂を持たないことから従来型反強磁性体として分類され、交替磁性体に比べて目されていない。

そこで我々は、時間反転対称性を保った従来型コリニア反強磁性体をスピン空間群の観点で分類した。スピン空間群は、磁気空間群を非相対論極限の場合へ一般化したものであり、交替磁性体と同様に近年盛んに研究が行われている。その結果、特定の従来型コリニア反強磁性体では、非自明な対称性の破れと隠れた交替スピン分裂が生じることを特定した。非自明な対称性の破れは、結晶構造が持つ非共形対称性と有限の伝播ベクトルを持つスピン秩序に起因する (図 3.8.14)。また、隠れたスピン交替スピン分裂とは、図 3.8.14 のように、結晶学的単位胞に局在するように交替スピン分裂が存在するが、バルク全体では相補的に打ち消し合って、スピン分裂が消失するようなものである。また、非自明な対称性の破れの帰結として、マルチフェロイックな応答や非線形輸送現象が現れることも示した。この研究は、コリニア反強磁性材料の探索において、交替磁性体とは別の方針を与えるものである。

この結果は、国際学会 [38, 39, 42] および国内学会 [66, 68] で発表されたほか、原著論文 [30] にまとめられた。

3.8.7 トポロジカルスピン構造の集団励起が電流応答に対して与える効果

近年、実空間におけるトポロジーに起因する異常横伝導が注目を集めている。磁性体における実空間トポロジーは、スピン軌道相互作用や歴電子との交換相互作用から非自明なスピントクスチャーが生

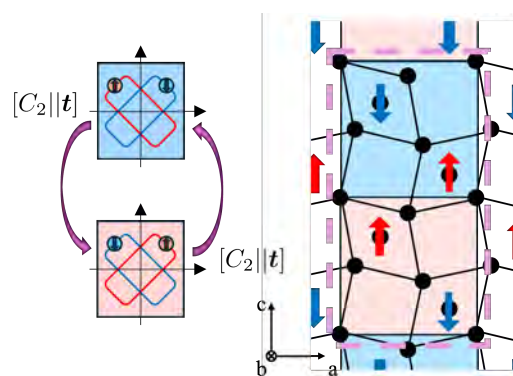


図 3.8.14: 隠れた交替スピン分裂と非自明な対称性の破れの概念図。

じるフラストレート磁性体や磁気スキルミオン系などの非共面磁気構造に現れる。最近の実験では、無視できるくらい小さな磁化を持つ非共面的なスピン秩序を持つ物質において、複雑なスピン構造と伝導電子との結合が起源と考えられる大きな異常ホール効果が現れることが実証された。実験によって決定された複数のスピンからなる磁気構造は、従来の強磁性体や反強磁性体よりも豊富な集団モードを可能にし、最近の光起電力効果の研究のように電子系の光学応答に対してスピンの集団励起の効果が現れることが予想される。

そこで、我々は All-In/All-out 磁気構造を持つ磁性体 (図 3.8.15) において異常ホール応答に対するスピンの集団励起の効果を調べた。電荷スピン結合系の光学応答を調べる上で、電子系とスピン系の両方を同時に実時間シミュレーションする手法を用いた。計算された光ホール応答の光学スペクトルから、スピンの集団励起が電子系の光学伝導に大きく影響していることがわかった。さらに、対称性の観点からスピンの集団励起を解析した結果、スキルミオン系に類似した集団励起が電子系の輸送特性に影響を与えていることがわかった。

この結果は、国際学会 [46] および国内学会 [63, 64] で発表されたほか、原著論文 [10] にまとめられた。

3.8.8 スピンレス Dirac 半金属の物質提案

トポロジカル半金属は、価電子バンドと伝導バンドの間に非自明なトポロジーで特徴づけられる縮退が存在する物質群であり、その特異な電子状態が近年高い注目を集めている。Weyl 半金属やノードライン半金属などの代表的な相は、スピン軌道相互作用の有無にかかわらず、既に多数の現実物質で確認されている。一方、スピン自由度を含まない四重縮退点 (スピンレス Dirac 点) を実現する物質は長らく未発見であった。

我々は、 RE_8CoX_3 (RE = 希土類元素, X = Al, Ga, In) 群に属する Y_8CoIn_3 などの化合物において、

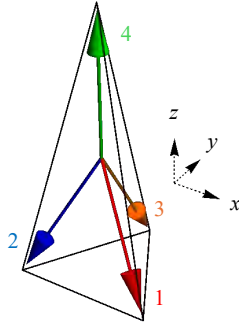


図 3.8.15: All-In/All-out 磁気構造。

余計な Fermi 面を持たない理想的なスピンレス Dirac 半金属相が実現することを第一原理計算により明らかにした。この系は空間反転対称性を持たないが、点群 C_{6v} の異なる二次元既約表現に属するバンド間の偶然縮退により、 k_z 軸上に四重縮退点的形成される (図 3.8.16)。バルクの非自明なトポロジーは、グライドセクターごとの Zak 位相により特徴づけられ、バルクギャップ中の表面バンドの存在と対応する。

さらに我々は、様々な電子相の相境界に位置するスピンレス Dirac 半金属相が示す多彩なトポロジカル相転移も調べた。第一原理計算と $k \cdot p$ ハミルトニアンを用いた解析により、 C_{2z} 対称性を保つ格子の一軸歪みによる C_{6v} 対称性の破れは、Dirac 点をノーダルラインや Weyl 点へと変化させることを明らかにした。ここで現れるノーダルライン半金属相においては、価電子バンド間および伝導バンド間にも線状の縮退が存在し、それらのノーダルラインは互いに絡み合う構造をとる。これらの半金属相は、 $C_{2z}T$ 対称な系で定義される第二 Stiefel-Whitney 類と呼ばれる Z_2 不変量によって統一的に特徴づけられる。また、希土類元素の置換により磁性を導入することで、強磁性 Weyl 半金属相が実現されることも示した。

これらの結果は、原著論文 [18] にまとめられ、国際学会 [47] で発表された。

<報文>

(原著論文)

- [1] M. Hirayama, T. Nomoto, R. Arita, Journal of Physics: Condensed Matter **36**, 27 (2024).
- [2] H. Matsuoka, S. Kajihara, T. Nomoto, Y. Wang, M. Hirayama, R. Arita, Y. Iwasa, M. Nakano Science Advances **10**, eadk1415 (2024).
- [3] R. Yamada, T. Nomoto, A. Miyake, T. Terakawa, A. Kikkawa, R. Arita, M. Tokunaga, Y. Taguchi, Y. Tokura, M. Hirschberger, Physical Review X **14**, 021012 (2024).
- [4] J. Ebad-Allah, M.-C. Jiang, R. Borkenhagen, F. Meggle, L. Prodan, V. Tsurkan, F. Schilberth, G.-

図 3.8.16: Y_8CoIn_3 の Dirac 点周辺のバンド構造。

Y. Guo, R. Arita, I. Kezsmarki, C. A. Kuntscher, Physical Review B **109**, L201106 (2024).

- [5] S. Akatsuka, M. Sakano, T. Yamamoto, T. Nomoto, R. Arita, R. Murata, T. Sasagawa, K. Watanabe, T. Taniguchi, N. Mitsuishi, M. Kitamura, K. Horiba, K. Sugawara, S. Souma, T. Sato, H. Kumigashira, K. Shinokita, H. Wang, K. Matsuda, S. Masubuchi, T. Machida, K. Ishizaka Physical Review Research **6**, L022048 (2024).
- [6] M. Wu, T. Chen, T. Nomoto, Y. Tserkovnyak, H. Isshiki, Y. Nakatani, T. Higo, T. Tomita, K. Kondou, R. Arita, S. Nakatsuji, Y. Otani, Nature Communications **15**, 4305 (2024).
- [7] H. Watanabe, Y. Yanase, Journal of Physics: Condensed Matter **36**, 373001 (2024),
- [8] H. Watanabe, A. Daido, magnetization induction Physical Review B **110**, 014405 (2024).
- [9] J.-B. Moré e, R. Arita, Physical Review B **110**, 014502 (2024).
- [10] K. Hattori, H. Watanabe, J. Iguchi, T. Nomoto, R. Arita, Physical Review B **110**, 014425 (2024).
- [11] Y. Chen, J. Gaudet, G.G. Marcus, T. Nomoto, T. Chen, T. Tomita, M. Ikhlas, H.S. Suzuki, Y. Zhao, W.C. Chen, J. Stremper, R. Arita S. Nakatsuji, C. Broholm, Physical Review Research **6**, L032016 (2024).
- [12] H. Tanaka, H. Watanabe, Y. Yanase, logical superconductivity Physical Review B **110**, 014520 (2024).
- [13] H. Mori, T. Nomoto, R. Arita, E.R. Margine, Physical Review B **110**, 064505 (2024).
- [14] K. Tanaka, T. Nomoto, R. Arita, Physical Review B **110**, 064433 (2024).
- [15] R. Masuki, T. Nomoto, R. Arita, T. Tadano, Physical Review B **110**, 094102 (2024).
- [16] M.-C. Jiang, R. Masuki, G.-Y. Guo, R. Arita, Physical Review B **110**, 104505 (2024).

- [17] E. A. Ghioldi, Zhentao Wang, L. M. Chinellato, Jian-Xin Zhu, Y. Nomura, R. Arita, W. Simeth, M. Janoschek, F. Ronning, C. D. Batista, *Physical Review B* **110**, 195123 (2024).
- [18] M. Sato, J. Bouaziz, S. Sumita, S. Kobayashi, I. Tateishi, S. Blügel, A. Furusaki, M. Hirayama, *Communications Materials* **5**, 253 (2024).
- [19] S. Sakamoto, T. Nomoto, T. Higo, Y. Hibino, T. Yamamoto, S. Tamaru, Y. Kotani, H. Kosaki, M. Shiga, D. Nishio-Hamane, T. Nakamura, T. Nozaki, K. Yakushiji, R. Arita, S. Nakatsuji, S. Miwa, *Nature Nanotechnology* **20**, 216-221 (2025).
- [20] N. Witt, Y. Nomura, S. Brener, R. Arita, A.I. Lichtenstein, T.O. Wehling, *npj Quantum Materials* **9**, 100 (2024).
- [21] R. Takagi, R. Hirakida, Y. Settai, R. Oiwa, H. Takagi, A. Kitaori, K. Yamauchi, H. Inoue, J. Yamaura, D. Nishio-Hamane, S. Itoh, S. Aji, H. Saito, T. Nakajima, T. Nomoto, R. Arita, S. Seki, *Nature Materials* **24**, 63-68 (2024).
- [22] M. Kriener, T. Koretsune, R. Arita, Y. Tokura, and Y. Taguchi, *Science and Technology of Advanced Materials*, **25** 2412971 (2024)
- [23] S. Backes, Y. Nomura, R. Arita, H. Shinaoka, *Physical Review B* **111**, L041102 (2025).
- [24] K. Ueda, Y. Tonghua, M. Kriener, M. Hirayama, R. Arita, Y. Tokura, *Physical Review B* **111**, 035140 (2025).
- [25] C.J. Butler, M. Murase, S. Sawada, M.-C. Jiang, D. Hashizume, G.-Y. Guo, R. Arita, T. Hanaguri, T. Sasagawa, *Physical Review X* **15**, 011033 (2025).
- [26] H. Takahashi, M. Ito, j. Fujioka, M. Ochi, S. Sakai, R. Arita, H. Sagayama, Y. Yamasaki, S. Ishiwata, *Physical Review B* **111**, 085153 (2025).
- [27] H.-Y. Chen, T. Nomoto, M. Hirschberger, R. Arita, *Physical Review X* **15**, 011054 (2025).
- [28] N.D. Khanh, S. Minami, M.M. Hirschmann, T. Nomoto, M.-C. Jiang, R. Yamada, N. Heinsdorf, D. Yamaguchi, Y. Hayashi, Y. Okamura, H. Watanabe, G.-Y. Guo, Y. Takahashi, S. Seki, Y. Taguchi, Y. Tokura, R. Arita, M. Hirschberger, *Nature Communications* **16**, 2654 (2025).
- [29] T. Hatanaka, J. Bouaziz, T. Nomoto, R. Arita, arXiv:2405.04369 (2024), submitted to *Phys. Rev. B*.
- [30] J. Matsuda, H. Watanabe, R. Arita, arXiv:2412.20128 (2024), submitted to *Phys. Rev. Lett.*
- (会議抄録)
- [31] S. Minami, A. Sakai, T. Chen, Y. Wang, Z. Feng, R. Ishii, T. Nomoto, R. Arita, S. Nakatsuji, *Proceedings of the 15th Asia Pacific Physics Conference* 80-87 (2024).
- (国内雑誌)
- [32] 渡邊 光, 野本 拓也, 有田 亮太郎, 「スピン空間群による磁性体の創発的応答の分類 (最近の研究から)」, *日本物理学会誌* 2025 年 03 月号.
- (学位論文)
- [33] 松永 響, 「拡張 Ginzburg-Landau 理論によるコヒーレンス長、磁場侵入長の計算法」, 修士論文 (2024).
- [34] 服部 航平, 「磁性体における電流応答に対する局在スピンドYNAMIKSの効果の理論的研究」, 修士論文 (2025).
- [35] Tonghua Yu, “First-Principles Design and Topological Phases of Electrides”, Doctoral thesis (2024).
- [36] Ryota Masuki, “Development and applications of first-principles methods to calculate crystal structures at finite temperatures”, Doctoral thesis (2024).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [37] (Poster) Tatsuto Hatanaka, Takuya Nomoto, Ryotaro Arita, “First-principles calculation of the bi-quadratic interaction based on the spin cluster expansion”, *International Conference on Magnetism 2024*, Bologna, Italy, 2024 年 6 月 30 日-7 月 5 日.
- [38] (Poster) Jin Matsuda, Hikaru Watanabe, Ryotaro Arita, “First-principles study of spin-orbit coupling-free responses in exotic collinear antiferromagnet”, *The 2nd U-Tokyo ISSP・RIKEN CEMS Collaboration Workshop*, Tokyo, Japan, 2024 年 11 月 1 日.
- [39] (Poster) Jin Matsuda, Hikaru Watanabe, Ryotaro Arita, “First-principles study of spin-orbit coupling-free responses in exotic collinear antiferromagnet”, *APW-RIKEN-Tsinghua-Kavli workshop “Highlights on condensed matter physics”*, Tokyo, Japan, 2024 年 11 月 1-3 日.
- [40] (Poster) Kohei Hattori, Hikaru Watanabe, Ryotaro Arita, “Photocurrent from Edelstein Effect in PT-symmetric Collinear Antiferromagnet” *APW-RIKEN-Tsinghua-Kavli workshop “Highlights on condensed matter physics”*, Tokyo, Japan, 2024 年 11 月 1-3 日.
- [41] (Poster) Kohei Hattori, Hikaru Watanabe, Ryotaro Arita, “Effect of Collective Spin Excitations on Photocurrent Response in Antiferromagnetic Dirac Semimetals”, *Correlated Quantum Materials + beyond*, Chiba, Japan, 2024 年 11 月 25-26 日.
- [42] (Poster) Jin Matsuda, Hikaru Watanabe, and Ryotaro Arita, “First-principles study of spin-orbit coupling-free responses in exotic collinear antiferromagnet”, *Correlated Quantum Materials + beyond*, Chiba, Japan, 2024 年 11 月 25-26 日.

- [43] (Oral) Hikaru Watanabe, “Spin crystallographic symmetry for classification of altermagnets and noncollinear magnets”, Brainstorming Workshop “Roadmap for Altermagnetism”, New Jersey, USA, 2025 年 1 月 8-10 日.
- [44] (Poster) Kohei Hattori, Hikaru Watanabe, Ryotaro Arita, “Nonlinear Hall effect driven by spin-charge-coupled motive force”, Workshop on theory of cross correlations, multipoles, and computational material design, Shizuoka, Japan, 2025 年 2 月 16-18 日.
- [45] (Poster) Kohei Hattori, Hikaru Watanabe, Ryotaro Arita, “Nonlinear Hall effect driven by spin-charge-coupled motive force”, Topological Nonlinear Optics in Quantum Materials, Chiba, Japan, 2025 年 2 月 19-21 日.
- [46] (Oral) Kohei Hattori, Hikaru Watanabe, Junta Iguchi, Takuya Nomoto, Ryotaro Arita, “Effect of collective spin excitations on electronic transport in topological spin textures”, APS Global Physics Summit 2025, Anaheim, USA, 2025 年 3 月 16-21 日.
- [47] (Oral) Manabu Sato, Juba Bouaziz, Shuntaro Sumita, Shingo Kobayashi, Ikuma Tateishi, Stefan Blügel, Akira Furusaki, and Motoaki Hirayama, “Ideal spin-orbit-free Dirac semimetal and diverse topological transitions in Y_8CoIn_3 family”, APS Global Physics Summit 2025, Anaheim, USA, 2025 年 3 月 16-21 日.
- [48] (Oral) Tatsuto Hatanaka, Takuya Nomoto, Ryotaro Arita, “Non-coplanar spin structure in $Co_{1/3}TaS_2$ induced by the biquadratic spin interaction”, APS Global Physics Summit 2025, Anaheim, USA, 2025 年 3 月 16-21 日.
- 招待講演
- [49] Hikaru Watanabe, “Pitaevskii relation bridging linear and rectification responses”, NQCM2024, Tokyo, Japan, 2024 年 6 月 25 日.
- [50] (Symposium) Hikaru Watanabe, “Symmetry analysis of altermagnetic and noncollinear magnets: disentangling spin and orbital degrees of freedom in physical phenomena”, International Conference on Magnetism 2024, Bologna, Italy, 2024 年 6 月 30 日-7 月 5 日.
- [51] Ryotaro Arita, “Coherence length and penetration depth in strongly correlated multi-orbital superconductors”, Computational Quantum Many-Body Theory, Seoul, Korea, 2024 年 7 月 17-19 日.
- [52] Ryotaro Arita, “Fermi surface expansion in correlated metals with strong ferromagnetic fluctuations”, 70 years of the Tanabe-Sugano diagrams, Tokyo, Japan, 2024 年 9 月 10-12 日.
- [53] Ryotaro Arita, “Flat-band ferromagnetism in permanent ferrimagnets”, QUAST - international conference, Dresden, Germany, 2024 年 9 月 10-12 日.
- [54] Ryotaro Arita, “Ab initio structural optimization at finite temperatures based on anharmonic phonon theory”, Recent Progress in Many-body Theories (RPMBT22), Ibaraki, Japan, 2024 年 9 月 23-27 日.
- [55] Ryotaro Arita, “Topological Hall effect in magnets with non-coplanar magnetic order”, The 25th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN-25), Ulsan, Korea, 2024 年 10 月 28-30 日.
- [56] Ryotaro Arita, “First-principles study on topological Hall Effect in $CoTa_3S_6$ with Non-Coplanar Magnetic Order”, APW-RIKEN-Tsinghua-Kavli workshop “Highlights on condensed matter physics”, Saitama, Japan, 2024 年 11 月 1-3 日.
- [57] Hikaru Watanabe, “Theory of complex magnets”, Prague, Czech, Workshop for altermagnets, 2024 年 11 月 18-19 日.
- [58] (Symposium) Hikaru Watanabe, “Symmetry approach to spin-orbit-coupling-free responses in antiferromagnets” Correlated Quantum Materials + beyond, Chiba, Japan, 2024 年 11 月 25-26 日.
- [59] Ryotaro Arita, “First-principles study on topological Hall effect in magnets with non-coplanar magnetic order”, CREST-EPiQS International Workshop 2024, Kyoto, 2024 年 12 月 2-6 日.
- [60] Ryotaro Arita, “Development of ab initio methods for topological Hall effects in magnets with multiple-Q orderings”, APS Global Physics Summit, Anaheim, USA, 2025 年 3 月 16-21 日.
- (国内会議)
- 一般講演
- [61] (口頭) 渡邊 光, 大同 暁人, 「ピタエフスキー関係式と逆電気磁気・自然二色性効果の理論」, 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学, 北海道, 2025 年 9 月 16 日.
- [62] (口頭) 佐藤 真武, 小林 伸吾, 立石 幾真, 角田 峻太郎, 古崎 昭, 平山 元昭, 「Wilson loop バンドの局所的特徴付けと表面状態との関係」, 日本物理学会第 79 回年次大会, 17aE318-12, 北海道大学, 北海道, 2024 年 9 月 17 日.
- [63] (口頭) 服部 航平, 井口 純太, 渡邊 光, 野本 拓也, 有田 亮太郎, 「All-In/All-Out 磁気構造における電子輸送特性に対する集団励起の効果」, 日本物理学会第 79 回年次大会, 2024 年 9 月 17 日.
- [64] (ポスター) 服部 航平, 井口 純太, 渡邊 光, 野本 拓也, 有田 亮太郎, 「All-In/All-Out 磁気構造における光学ホール効果に対する集団励起の効果」, アシンメトリ量子令和 6 年度領域全体会議, 2024 年 5 月 29 31 日.
- [65] (口頭) 畑中 樹人, 野本 拓也, 有田 亮太郎, 「スピニクラスター展開を用いた Biquadratic スピン間相互作用の第一原理計算」, 日本物理学会第 79 回年次大会, 19aE306-10, 北海道大学, 北海道, 2024 年 9 月 19 日.

- [66] (ポスター) 松田 仁, 渡邊 光, 有田 亮太郎, "First-principles study of spin-orbit coupling-free responses in exotic collinear antiferromagnet", アシンメトリ量子の C02 トピカルミーティング「アシンメトリ量子物質の開発：交差相関応答を求めて」, 神戸大学, 兵庫, 2024 年 12 月 6 日.
- [67] (ポスター) 渡邊 光, 大岩 陸人, 楠野 楽到, 佐藤 琢哉, 有田 亮太郎, 「軸性秩序系における円偏光活性ラマン散乱の理論」, 分子研研究会「キラリティが関連する動的現象」, 岡崎コンファレンスセンター, 愛知, 2025 年 3 月 10-12 日.
- [68] (口頭) 松田 仁, 渡邊 光, 有田 亮太郎, 「隠れた交替スピン分裂をもつマルチフェロイック磁性体の提案」日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 18-21 日.
- [69] (口頭) 渡邊 光, 松田 仁, 有田 亮太郎, 「スピン結晶群によるマルチフェロイック磁性体の解析」日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 18-21 日.

招待講演

- [70] 渡邊 光, 「スピン結晶群の利用：磁性体の分類とさらなる創発応答の解明に向けて」, アシンメトリ量子の C02 トピカルミーティング「アシンメトリ量子物質の開発：交差相関応答を求めて」, 神戸大学, 兵庫, 2024 年 12 月 6 日.

(セミナー)

- [71] Hikaru Watanabe, "Pitaevskii relation connecting linear and rectification responses", 統計力学セミナー, 東京大学柏キャンパス, 千葉, 2024 年 6 月 12 日.
- [72] 渡邊 光, 「ピタエフスキー関係式の定式化とその応用」, 東京工業大学理学院-物理学系 量子物理学・ナノサイエンス第 395 回セミナー, 東京工業大学 大岡山キャンパス, 東京, 2024 年 7 月 23 日.

4 物性実験

4.1 長谷川研究室

3月に佐藤瞬亮、谷内息吹、鄭帝洪が博士課程を修了し、それぞれ企業に就職した。

当研究室では、表面物性、特に「表面輸送」をキーワードにして実験的研究を行っている。おもに半導体や金属、トポロジカル絶縁体結晶表面上に形成される種々の表面超構造や原子層、多層膜（超格子）構造、ヘテロ接合界面などを利用し、原子尺度の低次元電子系に固有な電子状態や電子輸送特性、スピン状態・スピン流を明らかにし、機能特性として利用することをめざしている。最近の主な話題は、トポロジカル（結晶）絶縁体結晶の表面電子状態、超伝導グラフェン、ラッシュバ超伝導、原子層超伝導、非相反光電流などの研究である。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

Si(111) 表面上の (Tl,X) (X=Pb, Sn) 原子層合金における表面構造と電気伝導

Tl, Sn, Pbは単体で超伝導を示す物質であり、これらで構成される単原子層合金 Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,X) (X=Pb, Sn) は金属的な表面状態を持つことが既に報告されている。Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,Pb) は低温で超伝導となることを我々が過去に報告したが、類似系である Si(111)-(Tl,X) (X=Pb, Sn) で他の表面超構造を探索し、電気伝導測定を行った。1原子層の Tl を Si(111) 上に成膜した Si(111)-1 $\times$ 1-Tl 表面上に Sn や Pb を蒸着すると、蒸着量に応じて様々な表面超構造が現れることが新たに明らかになった。また、その周期構造は長周期なものが多かった。低温での電気伝導特性は絶縁体的な表面超構造が多かったが、下地の Tl 原子層を2原子層にすると、表面超構造は保ったまま電気伝導特性としては Tl 層のものを反映し金属的になることが明らかとなった。Tl

表面系は複雑な表面超構造を多く形成することがわかったため、今後はそれぞれの表面超構造の電子状態や原子配列を明らかにして原子層超伝導系の多様性を拓ける。

Si(111) 表面上の (Tl,Sn) 原子層合金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表面では、バンドのスピン縮退が解け、またスピンホール効果でアップスピンとダウンスピンを持つ電子がそれぞれ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単に発生させそれを電氣的に検出す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 Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl,Sn) を作成し、超高真空 *in situ* で円偏光を照射して非相反光電流を測定した。その結果、試料右端と左端に光照射すると、生じる非相反光電流の符号が反転した。これは、光誘起逆スピンホール効果（PISHE）のような現象といえる。さらに、円偏光を斜め入射にすると非相反光電流が増加したので、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。これは従来知られていた PISHE の振る舞いと違うために解釈は困難を極めたが、円偏光フォトンドラッグ効果（CPDE）の原理を参考にスピン軌道相互作用による歳差運動でスピンの面内・面直変換というモデルを立てることで説明できた。これは spin-FET や D'yakonov-Perel' スピン緩和機構と類似した原理で説明される現象であり、スピン軌道相互作用による有効磁場中での電子スピンの動きをより普遍的に理解する一助となる。

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Sn 構造の超伝導探求と新規構造

Si(111) 表面上にスズ (Sn) を 1/3 原子層だけ吸着させて形成される Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Sn は、単位胞内の電子数が奇数個であるにも関わらず、絶縁体的な電子状態をとることが知られており、モット絶縁体だと言われている。一方、ボロン (B) を高濃度ドーブした Si 基板を複数回フラッシュ加熱すると B 原子が基板表面に偏析し Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B の表面超構造が生じる。ここに 1/3 原子層の Sn を積層すると Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Sn ができ、ハイドーブ Si 基板から電子が表面状態にドーブされ、高温超伝導に似た非従来型超伝導が生じることが走査トンネル分光 (STS) 観測によって報告された。しかし超伝導に必須のゼロ抵抗については未だ観測されておらず、電気伝導の観点からの研究が待たれている。そこで我々は、同構造を作製して超高真空中で *in situ* 電気伝導測定を行った。基板の抵抗率が 1m Ω cm 程度のハイドーブ縮退 Si(111) 基板を使用した結果では、未だゼロ抵抗を実現するには至っていないが、基板のフラッシュ加熱時に B の基板表面への偏析により生じる Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B のあとに、さらなるフラッシュ加熱の反復で別な新規超構造が出現することを見出した。今後は、表面偏析 B 濃度を変化させ

て系統的に測定を行い、さらにこの新規超構造の性質と、Snを蒸着したときの超構造や超伝導の出現の可否も明らかにしていきたい。

トポロジカル超伝導体の水素修飾の影響

鉄系超伝導体は単純な機構ではないことが知られており、軌道揺らぎや磁気揺らぎなどを起源とする超伝導発現機構も提案されている。中でもFeSeはファンデルワールス層状物質であり、表面への吸着や層間に原子や分子をインターカレーション(IC)できる。そのため水素のような軽元素をFeSeにICできれば、キャリア濃度とデバイ周波数を増大させられる可能性がある。実際にFeSeでは、溶液IC法によりバルク試料に水素をICすることで、超伝導転移温度 T_C が8 Kから44 Kに上昇することが報告された。そこで我々は、超高真空中でFeSe薄片をテープで劈開した後、 10^{-5} Torr 程度の水素雰囲気下でクラックした水素原子を照射し、*in situ* 独立四探針電気伝導測定装置を用いて電気伝導測定を行った。その結果、オンセット超伝導転移温度 T_C は水素修飾により7.1 Kから12.3 Kに増加した。今後は水素修飾したFeSeのキャリア密度の変化を解明し、超伝導特性との関連を明らかにする予定である。(低温科学研究センターとの共同研究)

α -Sn/SnTeにおける非従来型超伝導

s 波超伝導とトポロジカル絶縁体を接合させると、トポロジカル超伝導であるカイラル p 波超伝導が界面に発現することが理論的に予想されており、トポロジカル超伝導を実現する有力な方法として注目されている。今回、 α -Snをトポロジカル結晶絶縁体SnTeの上にMBEによって成長させてヘテロ接合を作製すると、 α -Snが3原子層以上の膜厚の場合に超伝導となることを見出した。この超伝導はスピン軌道相互作用による散乱が大きく、KLBモデルで説明されることがわかった。また α -Snが3,4原子層の場合に面内臨界磁場がパウリ限界を超えることがわかり、BCS機構の枠組みで理解できるものではないことが示唆された。そして角度分解光電子分光からは、 α -Snが4原子層のときに超伝導に寄与するバンドが2つになる2バンド超伝導となることが示された。2バンド超伝導は超伝導ギャップが複数存在し、比熱、トンネルスペクトル、熱伝導率などが通常と異なる温度依存性を示す可能性があり、さらにバンド間相互作用によって超伝導を増強・抑制したりできる可能性、異なるバンドで異なる位相を持つ時間反転対称性の破れや $s^{\pm}$ 波超伝導などが起こる可能性、各バンドのChern数やBerry位相が異なれば、マヨラナ準粒子の実現可能性がある、などの興味深い物性が期待される。今回の構造でマヨラナ準粒子が現れれば、多値のマヨラナモードを持つことも予想され、従来の系にない展開も期待される。(物質・材料研究機構との共同研究)

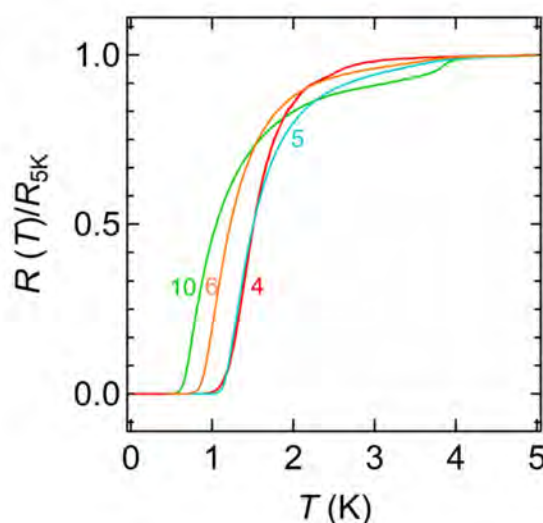


図 4.1.1: α -Sn/SnTe(111) における超伝導. 各曲線の数字は α -Sn の原子層数。

R0° グラフェンの製作

グラフェンは単原子層の炭素シートで、優れた電気伝導性、熱伝導性、機械的強度を兼ね備えており、基礎物理学の理解を深めるだけでなく、エレクトロニクス、エネルギー貯蔵、センサーなど多様な応用展開が期待されている。なかでもSiC結晶の熱分解法によるグラフェン形成によってエピタキシャルグラフェンを作成可能であり、既存の半導体技術との親和性が良いため注目されている。SiC熱分解法によるグラフェン形成において、加熱時にヒーター構造物としてpBNを用いると通常のグラフェン(R30°)と30度方位の異なるR0°グラフェンができることを発見した。各種条件で作成を試みたところ、処理中の蒸気に含まれるホウ素がR0°グラフェンの形成に寄与していることが判明した。さらに、R0°グラフェン形成時に加熱温度をあげることで、反射高速電子回折において12回対称の回折パターンを示す構造ができることも判明した。これは準結晶において見られるパターンであり、R0°グラフェンとR30°グラフェンが積層した準結晶2層グラフェンが形成されたと推測している。

Yb インターカレートグラフェンの電子状態と超伝導

グラフェン層間に異種原子をインターカレートすることで、超伝導や強磁性など物性を大きく変調できることをこれまで我々は示してきた。特に最近、Yb原子をインターカレートすると超伝導になることを発見しているが、インターカレーションプロセスに時間がかかることが問題であった。そこでより迅速にインターカレーションが進むように、Li原子を用いるとインターレート時間を大幅に短縮することに成功した。また超伝導の仕組みについて角度分解光電子分光法を用いて解析を行い、ファンホッフ特異

点 (vHs) と呼ばれるグラフェンに特有のフラットバンド様のバンドが M 点付近のフェルミ準位近傍に現れて超伝導に関与していることがわかった。この特異点が超伝導に関与すると、理論的には、非従来型超伝導が現れると予測されていることもあり、その検証のため、走査トンネル顕微鏡を用いてエネルギー分光を行って超伝導ギャップの形を観測することを目指している。(奈良先端大学との共同研究)

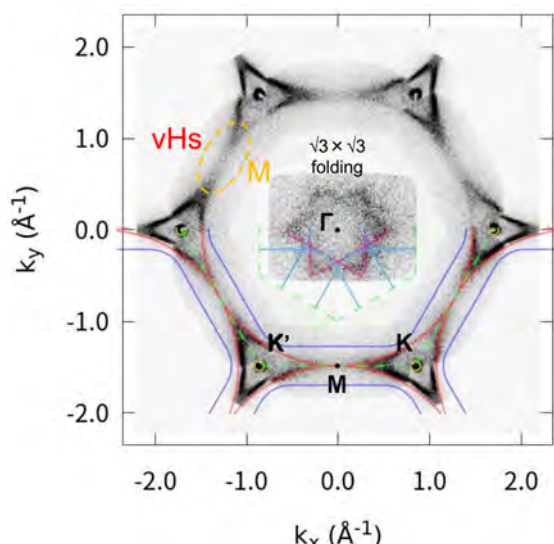


図 4.1.2: 光電子分光法によって測定された Yb インターカレートグラフェンのフェルミ面マッピング。

テラヘルツ光を用いたサイクロトロン共鳴による BiSb 薄膜結晶の物性

Bi は固体物理学の発展と共にあったほどに研究の歴史の長い物質であるが、今なお興味の尽きない物質である。Bi 薄膜の表面電子状態は、ラシュバ効果によってスピン分裂しており、またバルクバンドは量子井戸現象を示して、膜厚を薄くするとバンド構造が半金属的から半導体的に転移することを当研究室で報告してきた。また Sb 置換によってもバンド構造が複雑に変化し、トポロジカル絶縁体に転移することが知られている。よって、それぞれのバンド構造での輸送特性の違いなど詳細に解明すべき点はある。そこで、Si(111) 面に成長した $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ (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測定により、各バンド構造でのキャリアの正確な有効質量やバンド構造の変遷を明らかにした。過去の我々の分光実験では Bi 単結晶膜厚で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。現在ではさらに膜厚や Sb 置換量などのパラメータを変えた試料群を作成し終え、膜厚・Sb 置換による価電子帯・伝導帯の重なりの変化を追っている。(物質・材料研究機構との共同研究)

低抵抗材料の開発に必要となる微細加工や測定技術等の研究

半導体微細加工技術の進展とともに、細線化に伴って配線の高抵抗化が問題となっている。これは界面や粒界の反射などから配線材料の抵抗率が大きくなってしまい、発熱や低効率化などが起きる現象で、ゲート長が数 nm となる現代のデバイスでは非常に大きい問題である。我々の研究室では、JSR 株式会社と共同で、この高抵抗化を根本的に抑える物質の探索を行っている。トポロジカル物質では表面や界面に伝導チャンネルを持つため、理論上は微細化するほど抵抗率が下がるはずであり、実現すれば半導体デバイスにおいて大きな影響を持つ。本年は、低抵抗材料候補として CoSn を選び、薄膜製造と物性測定を行った。スパッタ法で成膜した多結晶性 CoSn 薄膜では既存の配線材料を超える性能は得られなかったが、エピタキシャル成長させた CoSn では超微細 (サブ nm オーダー) の領域では既存の材料を超える性能を示す可能性があることが示された。(JSR 株式会社との共同研究)

4.1.2 新しい装置・手法の開発

サブケルビン・マイクロ 4 端子伝導装置でのショット雑音の測定

本研究室ではこれまでにサブケルビンまで冷却可能なマイクロ 4 端子伝導測定装置によってさまざまな 2 次元超伝導を発見してきたが、近年注目される非従来型の超伝導を観察・解明するには伝導測定だけでは不十分であった。そこで、伝導測定と同時にトンネル分光測定、さらにはトンネル電流のショット雑音を測定することでキャリアの詳細を測定できる装置にするべく、装置の大幅改良を行っている。本年度は昨年に引き続き、ショット雑音測定のために装置の改造と検証を行った。端子ホルダーが物理的に固着する問題があり、改良のため様々な形状を試したが、セラミックと金属の勘合をさけ、強度の高い金属のかみ合わせによる結合を採用することとし、改造と性能検証を進めている。

超高真空中 *in situ* 偏光制御中赤外光照射系の開発

電子のスピンを物質中に注入するため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、物質中の電子をスピン選択的に励起することができ、円偏光を用いた手法は近年盛り上がりを見せている。当研究室では超高真空装置内で試料を作成し、その場測定する手法を取っているが、光を真空装置内に注入する際のビューポートによって円偏光は僅かに歪んでしまう。そこで円偏光生成機構を、ビューポートを介さずメイン真空装置へと接続するための作動排気型サブチャンバーと光学系を制作し既存のチャンバーにこれを増設した。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、2 ~ 9 μm と広い波長範囲の中赤外光の円偏光が生成・導入でき、それによる円偏光誘起電流が測定できるシステムを製作した。この波長域は、トポロジカル絶縁体のバルクバンドギャップやラッシュバ効果の典型的なエネルギー分裂幅である 100 ~ 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注入が期待できる。

スピン検出プローブの開発

スピンを利用する技術、スピントロニクスの研究が盛んに行われている現在、微細加工技術によって基板上にスピン流の生成・測定回路を作りこむ手法が主流であるが、この手法では微細加工で作成できる試料しか測定できず、トポロジカル絶縁体など特異なスピン伝導特性を持つことが期待される試料を測定することができない。このため、本研究室では、原子間力顕微鏡や走査トンネル顕微鏡、多端子プローバーに搭載でき、任意の場所でスピン流の生成・測定ができるスピン注入・検出プローブの開発を行ってきた。グラフェン素子を利用したプローブ作成の検討を続けているが、本年度にはその作成条件のチューニングを行った。グラフェンは濡れ性が低く、レジスト膜やスパッタ膜の形成条件が狭いため、最適条件を探して微細加工に進む予定である。

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) 「4 探針プローブでの量子ショット雑音測定によるボーズ金属の直接検出」 (代表 長谷川修司)
- ・日本学術振興会 科研費 基盤研究 (B) 「希土類原子のインターカレーションで開拓するグラフェン強相関物理」 (代表 秋山了太)
- ・日本学術振興会 科研費 挑戦的研究 (萌芽) 「トポロジカル結晶絶縁体の高品質超平坦薄膜で創製する新奇スピンドバイス」 (代表 秋山了太)
- ・日本学術振興会 科研費 学術変革領域研究 (A) 「軽元素添加によって実現する界面超伝導の転移温度高温化」 (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)

<受賞>

- [1] 清水 翔太; トポロジカル超伝導体 $\text{Fe}(\text{Se}, \text{Te})$ 薄片への軽元素修飾による影響, 日本物理学会第 79 回年次大会学生優秀発表賞 (領域 9), 2024 年 10 月 26 日.

<報文>

(原著論文)

- [2] Ibuki Taniuchi, Ryota Akiyama, Rei Hobara, and Shuji Hasegawa: *Surface Circular Photogalvanic Effect in Ti-Pb Monolayer Alloys on $\text{Si}(111)$ with Giant Rashba Splitting*, ACS Nano **19**, 3147-3154 (Jan, 2025).

(総説)

- [3] S. Hasegawa: *Surface and Interface Physics Driven by Quantum Materials*, Applied Physics Express **17**, 050101 (pp.20) (Jun, 2024).
- [4] S. Hasegawa: *Surface and Edge States of Quantum Materials*, Coshare Science **03**, 01 (Feb, 2025).

(国内雑誌)

- [5] 遠藤由大, 秋山了太, 長谷川修司: SiC 基板上的のグラフェンへのインターカレーション過程での積層構造変化, まてりあ (日本金属学会会報) **63** (12), 829-835 (Dec, 2024)

(その他)

- [6] 長谷川修司: 基礎講座: 今聞こう、魅力的な予算申請の執筆方法, 応用物理 **93** (7), 424-428 (Jul, 2024).
- [7] 長谷川修司: *JPS Anniversary Years 2025-2027* が開幕! (巻頭言), 日本物理学会誌 **80** (1), 1-1 (Jan, 2025).
- [8] 長谷川修司: 留学経験のない研究者からの留学のすすめ, 表面と真空 **68** (2), 112-114 (Feb, 2025).
- [9] 長谷川修司: 今年は国際量子科学技術年です, Isotope News (日本アイソトープ協会), No. 797, 巻頭言 P. 1-1 (Feb, 2025)
- [10] 長谷川修司: 量子力学が人間の本质に切りこんでいく (特別インタビュー 「), Newton 2 月号 『量子力学 100 年』 特集号 p.58-59 (Feb, 2025)

(学位論文)

- [11] 谷内息吹: 様々な表面超構造を形成する $\text{Si}(111)$ 上の原子層合金における光応答と電気伝導の研究 (博士論文).
- [12] 佐藤瞬亮: 金属原子インターカレートグラフェンにおける超伝導の発現とその特性 (博士論文).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [13] S. Hasegawa: *Quantum materials boost quantum technology* (Plenary), Annual Meeting of the Physical Society of Taiwan 2025, National Sun Yat-sen University, Kaohsiung (Taiwan), 2025 年 1 月 14 日.
- [14] S. Hasegawa: *Dynamical Intercalation Processes in Graphene and Physical Properties*, The 15th International Symposium on Atomic Level Characterization for New Materials and Devices 2024 (ALC'24), Kunibiki Messe, Matsue, Shimane (Japan), 2024 年 11 月 21 日.

一般講演

- [15] R. Akiyama: *Quantum Nano-System Based on Advanced Fabrication and Measurements*, Symposium on Selected Topics in Science and Technology, Institute for Advanced Study Technical University of Munich (Munich, Germany), 2025 年 2 月 12.

- [16] R. Akiyama, S. Sato, Y. Miyai, Y. Hashimoto, J. Jung, R. Hobara, Y. Kumar, A. Kumar, S. Shimizu, R. Minakawa, Y. Yamamoto, H. Tomita, T. Tadamura, T. Moriki, Y. Yamada, S. Ideta, K. Shimada, T. Matsushita, and S. Hasegawa: *Superconductivity in Yb-intercalated Few-layer Graphene*, Symposium on Hyper-Ordered Structure Sciences in London, Japan House London, London (UK), 2025 年 1 月 30 日.
- [17] S. Shimizu, R. Akiyama, R. Hobara, T. Fujii, T. Watanabe, S. Hasegawa: *Effect of Hydrogen Modification on Superconductor FeSe_{1-x}Te_x thin flakes*, Symposium on Hyper-Ordered Structure Sciences in London, Japan House London (UK), 2025 年 1 月 29 日.
- [18] S. Sato, J. Jung, R. Akiyama, R. Hobara, T. Matsushita, S. Hasegawa: *Superconductivity and Magnetism at Yb-Intercalated Graphene*, International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices in Winter 2025 (ALC-W 2025), Furano (Japan), 2025 年 1 月 24 日.
- [19] R. Akiyama, S. Sato, Y. Miyai, Y. Hashimoto, J. Jung, R. Hobara, A. Kumar, Y. Kumar, S. Shimizu, R. Minakawa, Y. Yamamoto, H. Tomita, T. Tadamura, T. Moriki, Y. Yamada, S. Ideta, K. Shimada, T. Matsushita, S. Hasegawa: *Superconductivity in Yb-intercalated Few-layer Graphene*, The 10th International Symposium on Surface Science (ISSS-10), Kita-Kyushu (Japan), 2024 年 10 月 24 日,
- [20] S. Shimizu, R. Akiyama, R. Hobara, T. Fujii, Y. Uezono, T. Otsuka, T. Watanabe, S. Hasegawa: *Effect of Hydrogen Modification on Topological Superconductor Fe(Se,Te) thin flakes*, The 10th International Symposium on Surface Science (ISSS-10), Kita-Kyushu (Japan), 2024 年 10 月 21 日,
- [21] R. Akiyama, S. Sato, Y. Miyai, Y. Hashimoto, J. Jung, Y. Kumar, A. Kumar, S. Shimizu, R. Minakawa, Y. Yamamoto, H. Tomita, T. Tadamura, T. Moriki, Y. Yamada, S. Ideta, K. Shimada, T. Matsushita, and S. Hasegawa: *Superconductivity and ferromagnetism in Yb-intercalated few-layer graphene*, International Workshop on Hyperordered Structures and Quantum Materials (Saskatchewan University, Saskatchewan, Canada), 2024 年 7 月 8 日.
- (国内会議)
- 招待講演
- [22] 秋山了太: グラフェンへの *4f* 電子系 Yb のインターカレートによる超伝導の発現とその特性, 共催シンポジウム『超秩序構造が拓く材料科学 —"Disorder in Order"と"Order within Disorder"の物理—』, 日本物理学会第 79 回年次大会 (北海道大学), 2024 年 9 月 17 日.
- [23] 秋山了太: 低速電子顕微鏡によるグラフェンへの Li インターカレーションの動的観察, 日本顕微鏡学会第 80 回学術講演会 (幕張メッセ国際会議場), 2024 年 6 月 5 日.
- 一般講演
- [24] 清水翔太, 秋山了太, 保原麗, 藤井武則, 渡辺孝夫, 長谷川修司: 超伝導体 FeSe 薄片への水素修飾による電子・原子構造の変化, 日本物理学会 2025 年春季大会 (オンライン), 2025 年 3 月 18 日.
- [25] 保原麗, 秋山了太, 長谷川修司: 30 度回転したエピタキシャルグラフェンの作成法, 日本物理学会 2025 年春季大会 (オンライン), 2025 年 3 月 18 日.
- [26] 秋山了太: 軽元素添加によって実現する界面超伝導の転移温度高温化, 学術変革領域「超秩序構造科学」第 9 回報告会 (名古屋工業大学, 名古屋), 2025 年 3 月 8 日.
- [27] 清水翔太, 秋山了太, 保原麗, 藤井武則, 渡辺孝夫, 長谷川修司: トポロジカル超伝導体 Fe(Se,Te) 薄片への軽元素修飾による物性変調, 第 16 回低温科学研究センター研究交流会 (東京大学本郷キャンパス), 2025 年 2 月 17 日.
- [28] 清水翔太, 佐藤瞬亮, 秋山了太, 宮井雄大, 橋本由介, 鄭帝洪, 保原麗, Yogendra Kumar, Amit Kumar, 皆川遼太郎, 山本裕太, 富田広人, 多田村充, 盛喜琢也, 山田侑矢, 出田真一郎, 島田賢也, 松下智裕, 長谷川 修司 Yb インターカレートグラフェンにおける超伝導の発現とその原子・電子構造第 18 回 物性科学領域横断研究会 (神戸大学六甲台キャンパス) 2024 年 11 月 26 日.
- [29] Ryota Akiyama: *Exploration of an ultra-sensitive NV quantum sensor through precise atomic-scale surface control*, PRESTO meeting on Quantum Cooperation between Materials and Information (Osaka), 2024 年 10 月 29 日.
- [30] 秋山了太: Yb インターカレートグラフェンの原子位置とその物性, 学術変革領域「超秩序構造科学」第 9 回報告会 (東北大学, 仙台), 2024 年 9 月 24 日.
- [31] 清水翔太, 秋山了太, 保原麗, 藤井武則, 上蘭優, 大塚匠, 渡辺孝夫, 長谷川修司: トポロジカル超伝導体 Fe(Se,Te) 薄片への軽元素修飾による影響, 超秩序構造化学第 8 回成果報告会, 東北大学片平キャンパス, 2024 年 9 月 24 日.
- 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 16-19 日.
- [32] 清水翔太, 秋山了太, 保原麗, 藤井武則, 上蘭優, 大塚匠, 渡辺孝夫, 長谷川修司: トポロジカル超伝導体 Fe(Se,Te) 薄片への軽元素修飾による影響 (領域 9), 9 月 16 日.
- [33] 今中康貴, 谷内息吹, 秋山了太, 長谷川修司: BiSb 薄膜における強磁場サイクロトロン共鳴 (領域 4), 9 月 16 日.
- [34] Y. Guo, R. Akiyama, T. Konoike, S. Ichinokura, Y. Hattori, T. Takashiro, R. Hobara, T. Terashima, T. Hirahara, S. Uji, and S. Hasegawa: *Two-dimensional superconductivity in a -Sn(111) layer grown on SnTe(111)*(領域 9), 9 月 16 日.

- [35] 東辻浩夫, 松本益明, 中西秀, 柴橋博資, 上杉智子, 大原仁, 岡部豊, 興治文子, 加藤岳生, 金子朋史, 栗原進, 杉山忠男, 田中忠芳, 並木雅俊, 中屋敷勉, 鈴木功, 安藤静敏, 毛塚博史, 齋藤輝文, 佐藤杉弥, 佐藤誠, 真梶克彦, 末元徹, 長谷川修司, 藤井賢一, 光岡薫, ヨーロッパ物理オリンピック (EuPhO2024) ジョージア大会参加報告 (領域 13), 9 月 16 日.
- [36] 松本益明, 東辻浩夫, 加藤岳生, 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, 柴橋博資, 杉山忠男, 田中忠芳, 中西秀, 並木雅俊, 鈴木功, 佐藤誠, 安藤静敏, 毛塚博史, 近藤泰洋, 齋藤輝文, 佐藤杉弥, 藤井賢一, 真梶克彦, 末元徹, 中屋敷勉, 長谷川修司, 光岡薫: アジア物理オリンピック 2024 マレーシア大会報告 (領域 13), 9 月 16 日.
- [37] 末元徹, 五十嵐美樹, 石川真理代, 市原光太郎, 一宮彪彦, 右近修治, 海老崎功, 大嶋孝吉, 大塚洋一, 川村康文, 岸澤真一, 毛塚博史, 小池洋二, 小林一人, 小牧研一郎, 近藤泰洋, 櫻井一充, 佐々田博之, 真梶克彦, 鈴木功, 武士敬一, 西野友年, 長谷川修司, 林壮一, 深津晋, 松本益明, 松本悠, 眞砂卓史, 三木一司, 水谷紫苑, 味野道信, 山崎詩郎, 吉澤雅幸, 吉村勇治: 物理チャレンジ 2024 報告 2: 第 2 チャレンジ実験問題 (領域 13), 9 月 16 日.
- (講義等)
- [38] 長谷川修司: 結晶化学特論, 青山学院大学 機能物質創成コース集中講義, 青山学院大学淵野辺キャンパス (東京), 2024 年 5 月 18, 25 日.
- [39] 長谷川修司: 固体物理 II (学部 4 年生), 2024 年度 S セメスター (本郷).
- [40] 長谷川修司: 物理学ゼミナール: トポロジカル物質入門 (学部 3 年生), 2024 年度 S セメスター (本郷).
- [41] 長谷川修司, 秋山了太, 清水翔太 (TA), 鄭帝洪 (TA): 物理学実験 II (学部 3 年生) 電子回折, 2024 年度 A セメスター (本郷).
- (アウトリーチ)
- [42] 長谷川修司: プレチャレンジ: 物理チャレンジ紹介+第 1 チャレンジ演習+大気圧の測定実験, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ 栃木県立大田原高等学校 (栃木), 2025 年 3 月 22 日.
- [43] 長谷川修司: 物理チャレンジと物理オリンピックの紹介, 物理オリンピック日本委員会シンポジウム (東京理科大学神楽坂キャンパスハイブリッド), 2025 年 3 月 20 日.
- [44] 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) —物理チャレンジ紹介+第 1 チャレンジ演習+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), 2025 年 2 月 22 日,
- [45] 長谷川修司: プレチャレンジ: 物理チャレンジ紹介+第 1 チャレンジ演習+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, 三重県立桑名高等学校 (三重), 2025 年 2 月 1 日.
- [46] 長谷川修司, 谷内息吹: La Trobe 大学+国立シンガポール大学学部生の見学, 理学部 1 号館 B101 室, 2025 年 1 月 30 日.
- [47] 長谷川修司: 栃木県立宇都宮高等学校 模擬授業と研究室見学, 理学部 1 号館 206 室・B101 室, 2024 年 12 月 3 日.
- [48] 長谷川修司: オンラインプレチャレンジ: 踏み出そう、はじめの一步; 物理オリンピックの紹介, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ (オンライン), 2024 年 11 月 10 日,.
- [49] 研究室総出: 神奈川県立湘南高校 模擬授業と研究室見学, 理学部 1 号館 206 室・B101 室, 2024 年 7 月 29 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。 ^3He - ^4He 希釈冷凍機を用いた 20 mK までの極低温および 15 T までの強磁場環境において、さまざまな独自技術により新しい自由度を持たせた研究を行っている。

4.2.1 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、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、新奇な磁気物理現象の観測を目指す。

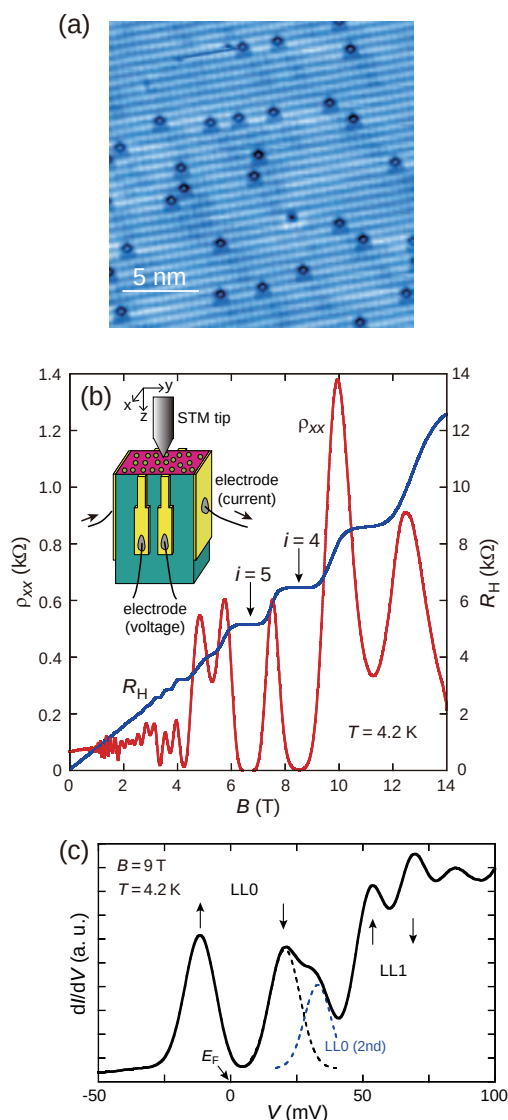


図 4.2.3: (a) InSb 劈開表面に鉄を 0.01 ML つけた場合の STM 像 (20×20 nm ^{2})。黒い輪郭を持った丸が Fe であり、明るい縞模様が Sb の格子である。(b) 4.2 K における縦抵抗率とホール抵抗の磁場依存性。明瞭な整数量子ホール効果が観測されている。(c) 走査トンネル分光の測定例。微分コンダクタンスから 2 次元電子系の状態密度を調べることができる。ここでは、スピン分裂したランダウ準位が観測されている。

4.2.2 金属超薄膜の超伝導

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

に対して単原子層領域での超伝導が観測されている。絶縁体基板上に形成された単原子層膜は、完全な 2 次元系というだけではなく、空間反転対称性が破れているという点からも魅力がある系だと考えている。

これまでの Pb 単原子層膜に対する研究において、2 次元面に対して平行に磁場をかけた場合には、Pauli 限界磁場を大きく上回る磁場に対しても超伝導転移温度がほとんど変化しないことが明らかになっている。

面内磁場印加可能な極低温走査トンネル顕微鏡の開発

半導体表面に形成された単原子層超伝導体は半導体基板と真空に挟まれているため、2 次元面に対して垂直方向にポテンシャル勾配が生じ、空間反転対称性が破れている。さらに、Pb などの重い原子を用いた場合、強いスピン軌道相互作用により大きな Rashba 効果が生じ、スピン方向に依存してフェルミ面が分裂した系が実現すると考えられている。このような系において、強い面内磁場を印加した場合、有限の運動量をもったクーパ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。

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度 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 4.2.4(a) に Pb 超薄膜表面に磁性体を蒸着した場合の結果を 3 例示す。このように 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。Matsuura, Ichinose, Nagaoka の理論が信頼できる $T_K \gg T_c$ では、実験から得られた傾きを図 4.2.4(b) に示したような計算と比較することにより、 T_K を決定することができた。結局、磁性体の種類やコーティングによる T_c の減少率の違いは、 T_K の違いにより説明することができた。まず、磁性体の種類による違いについては、磁性原子のスピン大きさ S が大きくなるにつれて、Hund 結合により近藤一重項の形成が抑制されて T_K が減少すると考えると理解できた。また、1.5 原子層程度の Au または Ag によるコーティングによって T_c の減少率が大きくなることは、磁性体に隣接する原子が Pb よりも価数が小さな金属に

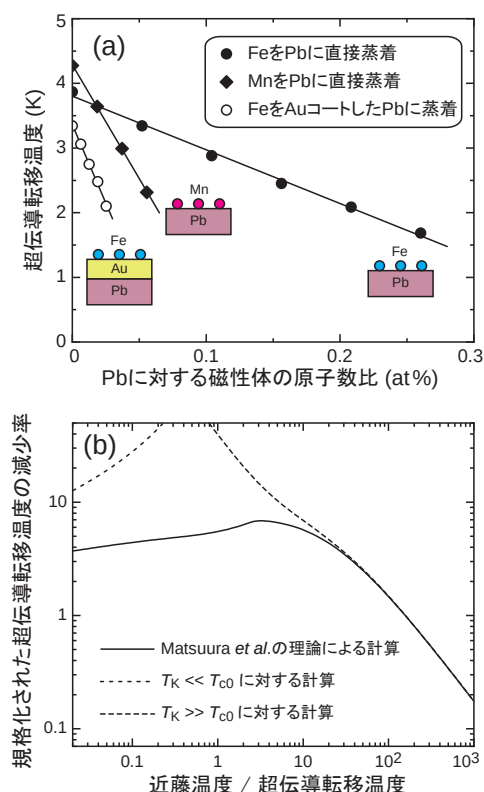


図 4.2.4: (a) Pb 超薄膜の表面に磁性体を蒸着した場合の超伝導転移温度 T_c の変化。(b) 磁性不純物量に対する T_c の減少率の理論曲線の例。

置き換わったために T_K が減少した結果として理解することができた。

走査トンネル分光法 (STS) を用いた先行研究において、磁性原子の近くに置かれた探針と試料との間で微分コンダクタンスを印加電圧の関数として測定し、Fano 関数と呼ばれるスペクトル関数でフィッティングをすることにより、非磁性金属表面の磁性原子の近藤温度が導出されている。ナノデバイスへの応用面での期待が大きいことなどから一流誌に掲載された報告も多いが、最近、STS スペクトルに対して別の解釈が行われるようになり、これまで得られた T_K の信頼性が大きく揺らいでいる。我々が開発した超伝導超薄膜を用いる手法は、金属表面の磁性体の近藤状態を研究するための新たな強力なツールになりうると考えている。

4.2.3 半導体劈開表面上に形成された低次元電子系における非相反伝導

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。さらに、InAs 劈開表面に吸着物質により誘起された二次元電子系においても対称性の破れにより引き起こされる非相反伝導の探索を行った。

GaAs 劈開表面上に作成された超伝導薄膜

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。鉛とアルミニウムの超薄膜 (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、この第二高調波から得られる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起因し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を感じるため、侵入方向に依存した非相反伝導 (ボルテックスラチェット効果) が生じていると考えている。

さらに、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させて測定を行った。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応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。我々は、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。今後、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。

InAs 劈開表面に吸着物質により誘起された二次元電子系

以前、我々の研究室では InAs や InSb 劈開表面に吸着物質により誘起された二次元電子系を用いて量子ホール効果の研究を行ってきた。この系での興味深いことの一つに、二次元面に対して鉛直方向の空間反転対称性の破れに起因したラッシュバスピ軌道相互作用が期待されることである。今年度はまず、吸着物質に In と Fe を用いて二次元電子系を誘起して測定を行った。面直磁場を印加した電気伝導測定では、ラッシュバスピ軌道相互作用に起因するシュブニコフ・ド・ハース振動のピーティング現象が観測された。今後、この系を用いて、空間反転対称性の破れと時間反転対称性の破れにより現れる多彩な物理の観測を目指す予定である。

<報文>

(原著論文)

- [1] Y. Mori, S. Tashiro, R. Masutomi, T. Okamoto: Magnetic impurity effect on superconductivity and Kondo temperature in ultrathin Pb films with adsorbed 3d transition metal atoms, Phys. Rev. B **111**, 014504 (2025).

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

銅酸化物高温超伝導体はキャリアドーパ濃度、温度に依存して、反強磁性、スピン密度波、電荷秩序など多様な秩序相が発現し、それら秩序相と超伝導との関係性を理解することは高温超伝導の発現機構を理解する上での重要課題の一つとなっている。例えば La 系銅酸化物高温超伝導体では、ストライプ秩序と呼ばれる電荷及びスピンの長距離秩序が正孔ドーパ $p = 1/8$ 近傍で発現することが知られており、これは超伝導と競合する秩序であることが様々な実験で明らかにされてきた。このストライプ秩序を示す銅酸化物高温超伝導体に対して超伝導転移温度以上で光を照射すると、瞬時的に超伝導の発現を示唆する振る舞いが現れるこ

とが報告され、光誘起超伝導として関心を集めてきた。当研究室では電荷及びスピンストライプ秩序を示す代表例である $\text{La}_{1.6-x-y}\text{Nd}_y\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LNSCO) に注目し、「光誘起超伝導現象」の観測から、平衡、非平衡におけるストライプ秩序と超伝導の関係を調べている。これまでの研究で、ストライプ秩序が最も安定化する $x = 1/8$ の試料では光励起後に c 軸方向のテラヘルツ帯反射率スペクトルに、超伝導状態で観測されるジョセフソンプラズマエッジに類似するプラズマエッジが明瞭に出現する様子を見出していた。そこで、ストライプ秩序を持つ LNSCO 系に加えて長距離のストライプ秩序を持たない $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LSCO) 系も含めた系統的な測定を行い、光誘起プラズマエッジの出現条件について調べ、論文にまとめた。相図 4.3.5 に LNSCO(a) 及び LSCO(b) それぞれにおいて、光誘起プラズマエッジが観測されるオンセット温度を示す。この結果から、光誘起プラズマエッジが、電荷ストライプ(電荷秩序)相(CO)あるいは電荷秩序相(CDW)のオンセット温度近辺まで観測されることを明らかにした。測定した全ての試料で、光誘起プラズマエッジが平衡超伝導状態でのジョセフソンプラズマ周波数と一致することから、観測された現象は超伝導と相関している現象であること、かつ超伝導転移温度以上から発達する CDW 相の性質を反映していることを強く示唆する結果となった。さらに、光学伝導度スペクトルの振る舞いから、光誘起相の空間不均一性は、平衡状態の CDW のコヒーレンス長を反映していることも明らかにした。同研究成果は Physical Review B 誌に掲載されたが、Editors' suggestion に採択されさらに Physics Magazine の Synopsis でも取り上げられた。

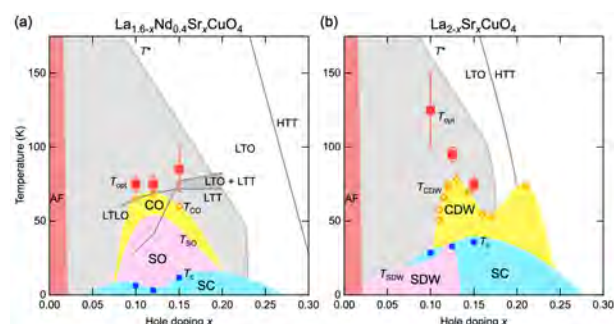


図 4.3.5: La 系銅酸化物高温超伝導体の相図 (a): $\text{La}_{1.6-x}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (b): $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 。青点は測定した試料の超伝導転移温度を示し、赤点は光誘起プラズマエッジのオンセット温度を示す。CO: 電荷ストライプ相、SO: スピンストライプ相、AF: 反強磁性相、CDW: 電荷密度波相。

一方、超伝導転移温度以下での光励起の効果を明らかにするため、LSCO の ab 面薄膜試料を用いて転移温度以下における光励起状態を、光ポンプテラヘルツプローブ分光により調べた。具体的には、最適ドーパ試料を対象として、テラヘルツ帯の複素光学

伝導度スペクトルの解析から、超伝導由来の応答と準粒子の応答とを区別して抽出し、それぞれのダイナミクスを調べた。弱励起下では、光励起による光学伝導度スペクトルの変化は、超流動成分と超伝導準粒子成分の和によって良く再現され、準粒子のダイナミクス、緩和過程は格子系との結合を考慮したレート方程式、所謂 Rothwarf–Taylor モデルによって記述できることがわかった。一方、強励起条件では超伝導が破壊され、光学伝導度は単純な超伝導準粒子成分の増加では表すことが出来なくなる様子が見られた。最適ドープ試料の面内応答の測定からは、光励起によって平衡状態の超伝導は抑制されることが明らかとなった。バルク単結晶で見られる電荷秩序相、電荷密度波相における光誘起超伝導的な振る舞いとの関連を今後調べていく予定である。

鉄系超伝導体

鉄系超伝導体 FeSe は、温度低下とともに約 90 K で電子ネマティック秩序が発達し、低温 8 K で超伝導に転移する。ネマティック秩序を反映して、超伝導ギャップ関数は 2 回回転対称性を示す強い異方的ギャップ構造をとる。このギャップ構造がどのようなペアリング対称性を反映しているかは、クーパ対形成の機構に直接関わる問題であり、これまで多くの議論がなされてきた。

さて、超伝導ペアリング相互作用が副次的な対称性成分を陰に持つ場合には、超伝導の秩序変数に付随する集団励起モードとして、Bardasis-Schrieffer モード (BS モード) と呼ばれる新たな集団励起モードが発現することが知られている。これは基底状態の秩序変数と副次的な秩序変数の間の相対的な位相モードに相当する。

我々は近年 s 波超伝導体や銅酸化物超伝導体を対象として、ヒッグスモードとテラヘルツ (THz) 波との二光子結合を介したテラヘルツ第三高調波発生 (THz-THG) の観測を進めてきたが、BS モードも THz-THG をもたすことが最近の理論研究により指摘された。BS モードの存在は超伝導ペアリング相互作用が複数の対称性成分を持つことの証拠となるため、BS モードの観測から超伝導ペアリング対称性に関する知見を得ることができると期待される。

そこで鉄系超伝導体 FeSe の超伝導秩序変数の対称性を集団励起モードの性質から調べることを目的として、THz-THG の観測を行った。その結果、FeSe では超伝導ギャップエネルギーより十分小さいエネルギー領域に集団励起モードの共鳴が存在することが明らかになった。比較として、ネマティック秩序のない FeSe_{0.5}Te_{0.5} の試料で同様の実験を行ったところ、FeSe で見られたような低エネルギーモードは観測されず、 $\omega = \Delta$ (ω は駆動周波数、 Δ は超伝導ギャップ) で共鳴するヒッグスモードと準粒子励起に起因すると考えられる THG 信号のみが観測された。多軌道モデルに基づくペアリング相互作用の理論解析と比較した結果、FeSe 観測されたモードは、ネマティック秩序によって d 波成分が混成した $s+d$ 型の超伝導秩序変数を基底状態とし、 $s-d$ 型の副次

的なペアリングチャンネルの揺らぎに相当する BS モードである可能性が高いという結論を得た。

高強度テラヘルツ光渦による超伝導体の非線形光学応答

光渦は螺旋状の波面を持つ光波であり、位相特異点に対応するビーム中心が暗点となるドーナツ状の強度分布を有するなど、ガウシアンビームとは異なる特徴を示す。こうした特性から、レーザー加工や超解像顕微鏡などへの応用が進められてきた。また、光渦はトポロジカルチャージに比例した軌道角運動量を運ぶことが知られており、近年ではそれを物質の制御に応用する試みもなされている。

我々は、超伝導体において、テラヘルツ周波数帯の光渦が新たな非線形光学応答を誘起する可能性を探索している。そこで、螺旋位相板と呼ばれる、螺旋階段状の透過素子を用いて数 kV/cm 級の強度を持つテラヘルツ光渦を生成し (図 4.3.6)、 s 波超伝導体 NbN においてテラヘルツ光渦ポンプ・ガウシアンビームテラヘルツ波プローブ分光を行った。その結果、ポンプ・プローブ遅延時間依存性に 2 種類の振動成分が観測された。一方は、ポンプ光中心周波数 ω に対して 2ω で振動する成分であり、これは集団励起モード (Higgs モード) の強制振動によるものである。他方は振動数 ω の成分で、ポンプ光 1 光子とプローブ光 2 光子を使う 3 次非線形過程であることがわかった。

新しく観測された ω 振動成分の起源を探索するため、非一様な強度分布を持つ光渦の各点での応答を測定するため、空間分解してポンプ・プローブ分光ができる系を構築し測定を行った。その結果、Higgs モードに起因する 2ω 振動はテラヘルツ光渦の局所電場によって駆動されていることから、超伝導秩序変数が実空間で回転しながら振動していることを明らかにした。一方、 ω 振動成分は局所電場のみでは説明できない位相分布を持つことが分かった。この結果は、超伝導体中でテラヘルツ光渦が持つ光軸方向の磁場成分を遮蔽する電流により誘起されていることを示唆している。現在、この ω 振動成分と光渦の軌道角運動量との関係について実験、理論両面から解明を進めている。

オンチップテラヘルツ分光系の開発

テラヘルツ分光法は、フォノンやマグノンといった素励起や超伝導ギャップなど、固体物質における重要な低エネルギー応答を測定する手法として広く普及している。通常、テラヘルツ分光は自由空間に放射されたテラヘルツ波をレンズ等で集光して試料に照射するが、この場合の集光スポット径はテラヘルツ波の波長以上の大きさ (典型的には 1 mm 以上) となり、精密な分光のためには大面積をもつ試料が必要となる。近年、この回折限界の問題を回避し、剥離二次元物質など微細な試料のテラヘルツ応答を測定する手法として、オンチップテラヘルツ分光が注

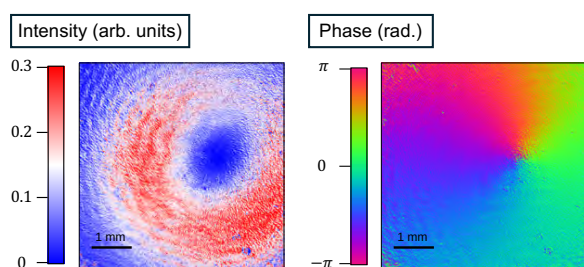


図 4.3.6: 発生させたテラヘルツ光渦の 0.5 THz 成分の (左) 強度分布 (右) 位相分布。ドーナツ状の強度分布、螺旋状の位相勾配を有することが確認できる。

目を集めている。これは、光伝導スイッチから発生したテラヘルツ（ピコ秒）電磁波パルスを基板上に配線した微細な導波路上に閉じ込め、これと微細試料を結合させて分光を行う手法である。

オンチップテラヘルツ分光で測定できる試料サイズは導波路構造の大きさで律速され、典型的には回折限界よりはるかに小さい数 10 マイクロメートル程度となる。一方、導波路との結合を維持できれば試料の細さは任意であり、原理的には 1 次元の試料のテラヘルツ分光も可能である。そのような細い形状をもつ試料に電流パルスを印加すると、非常に高い電流密度を試料内に誘起でき、これによる新しい物性制御や相転移を実現できる可能性がある。また、その相転移ダイナミクスを時間分解して観測するためには、ポンプ-プローブ分光をオンチップで実現することが求められる。我々はこの実験のための低温実装可能な装置開発を行い、実際に超伝導細線の高速度電流誘起相転移を実証した。まず、ピーク電流密度を変えながら発生したピコ秒電流パルスを超伝導細線に入射し、その反射率の非線形変化から、数ピコ秒のパルス時間内に超伝導が常伝導状態に移り変わっている兆候を確認した。その後、2 発のパルスを使ったポンプ-プローブ分光によって測定した過渡伝導度スペクトルから、確かに電流ポンプ後のピコ秒スケールの早い時間で超流動成分が消失し、その後ナノ秒の時間スケールで回復していくダイナミクスを捉えることに成功した。このとき、超伝導状態の破壊をピコ秒パルスで起こすためには、直流領域で測定した臨界電流の 20 倍以上のピーク電流密度が必要ことが明らかになった。この振る舞いの特徴は時間依存ギンズブルグ-ランダウ方程式によって計算された超伝導ギャップの時間発展で説明できることを示した。

4.3.2 ディラック、ワイル半金属

Co₃Sn₂S₂ におけるフロッケディラック-ワイル変換

固体において時間あるいは空間反転対称性が破れている場合、「ワイル半金属」と呼ばれる特殊な半

導状態が実現することがある。このワイル半金属中の電子は素粒子物理におけるワイルフェルミオンに類似した性質を持ち、非自明なトポロジーや巨大なベリー曲率双極子に起因するカイラル異常、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が発現する舞台として現在盛んに研究されている。

このようなワイル半金属状態を自在に作り出す方法として「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。このアプローチの最大の特徴は、ワイル状態実現に必要な対称性の破れという性質を、物質そのものではなく外部から照射する光などの周期外場に担わせることができるという点である。これによって高い制御性でワイル状態を実現できると期待されている（図 4.3.7）。

これまでに我々はディラック半金属であるカゴメ格子金属 Co₃Sn₂S₂ を対象にフロッケワイル状態の実現を目指して実験を進めてきた。スパッタリング法によって成膜した室温の Co₃Sn₂S₂ 薄膜に円偏光の中赤外光パルス照射し、フロッケワイル半金属状態となることで現れる異常ホール伝導度を THz 波のファラデー回転の観測を通して測定する実験を行った。この実験では、円偏光パルスに誘起される即時的な異常ホール応答を観測し、広範な中赤外光駆動周波数に対して異常ホール伝導度が一様に -3 乗に従うことを示した。この振る舞いは、フロッケ理論が予測する物質のバンド構造の変調と非ゼロの Berry 曲率分布の実現を示唆している。本年度は、光の周期駆動によるフロッケ状態の生成と密接に関係すると考えられる電子の散乱過程の影響を調べた。実験的には、広帯域 THz 光学伝導度測定を用いて Co₃Sn₂S₂ 薄膜の輸送緩和レートを見積もったところ、その値は駆動光として用いた周波数の最大 $1/3$ に達することが明らかとなった。さらに、理論グループとの共同研究により、フロッケ状態がもたらす異常ホール伝導度の散乱レート依存性について解析を行った。その結果、物質のバンド構造変調に起因する寄与は散乱に対して頑強である一方で、電子励起状態を介した光子共鳴に由来する寄与は、散乱レートの増加に伴い大きく抑制されることが判明した。これらの結果は、電子散乱の比較的大きな Co₃Sn₂S₂ 薄膜においても、ディラック-ワイル変換をもたらすバンド構造の変調が実証可能であることを補強する。また、フロッケ状態の伝導特性や光学特性に対する電子散乱や非平衡分布の影響を理解する上で、重要な知見を与えられられる。

4.3.3 時間分解磁気光学顕微鏡の開発

電子のスピンを利用するスピントロニクスの分野において、応用材料として注目されているのが反強磁性体である。反強磁性体は外部磁場に対して安定であり、強磁性体と比べて高速動作が可能という利点を持つ。近年では、電流によるスイッチングなど、電流を用いた磁化制御が数多く報告されている。一方で、スピンの互いに打ち消し合う構造ゆえに磁気応答が外部から検出しにくく、状態制御や変化の可視化が困難であるという課題も残されている。特に、

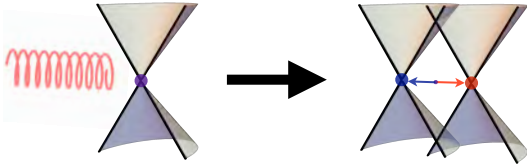


図 4.3.7: フロッケワイル半金属状態の模式図。3 次元ディラック半金属に円偏光を照射する (左) と、その周期電場が実効的なカイラルゲージ場として作用し、縮退したディラックコーンがワイルコーンに分裂し、フロッケワイル半金属状態 (右) となる。

光や電流などの外部刺激によって誘起される磁化の変化を超高速 ($\sim$ ps) で時間分解して観測するには、高度な計測技術が必要となる。我々はこの課題に対応するため、磁性体の磁化ダイナミクスをサブピコ秒スケールで観測可能な、超高速時間分解・磁気光学イメージングシステムの開発を進めた結果、僅か数 mdeg の磁気光学応答の変化を、 $1\ \mu\text{m}$ の空間分解能で時間分解観察することが可能になった。

<受賞>

- [1] 田中康太郎、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、2025 年 2 月 17 日
- [2] 吉川尚孝、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、2025 年 2 月 17 日
- [3] 吉岡大地、理学系研究科研究奨励賞、2025 年 3 月 10 日

<報文>

(原著論文)

- [4] Sachiko Nakamura, Haruki Matsumoto, Hiroki Ogawa, Tomoki Kobayashi, Fuyuki Nabeshima, Atsutaka Maeda, and Ryo Shimano: Picosecond Trajectory of Two-Dimensional Vortex Motion in $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ Visualized by Terahertz Second Harmonic Generation, *Phys. Rev. Lett.* **133**, 036004 (2024). (Editors' suggestion. selected for Physics Magazine, FOCUS)
- [5] Kohei Fujiwara, Kazuma Ogawa, Naotaka Yoshikawa, Koji Kobayashi, Kentaro Nomura, Ryo Shimano and Atsushi Tsukazaki: Giant antisymmetric magnetoresistance arising across optically controlled domain walls in the magnetic Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$, *Commun. Mater.* **5**, 239 (2024).
- [6] M. Nishida, D. Song, A. M. Hallas, H. Eisaki, and R. Shimano: Emergence of Light-Induced Superconducting-like State from the Charge Density Wave State in High-Tc Cuprate Superconductors, *Phys. Rev. B* **110**, 224515 (2024). (Editors' suggestion. selected for Physics Magazine, SYNOPSIS)

- [7] Takuya Matsuda, Tomoya Higo, Kenta Kuroda, Takashi Koretsune, Natsuki Kanda, Yoshua Hirai, Hanyi Peng, Takumi Matsuo, Cedric Bareille, Andrei Varykhalov, Naotaka Yoshikawa, Jun Yoshinobu, Takeshi Kondo, Ryo Shimano, Satoru Nakatsuji, and Ryusuke Matsunaga: Emergence of high-mobility carriers in topological kagome bad metal Mn_3Sn by intense photoexcitation, *Phys. Rev. Materials* **9**, 014202 (2025).
- [8] Ushio Narusaka, Naotaka Yoshikawa, Hideki Matsumoto, Yuki Tanaka, Maki Musashi, Masaki Nakano, Yoshihiro Iwasa, Ryo Shimano: Intense terahertz pulse induced nonthermal melting of charge density wave order in a thin film of $3\text{R-Ta}_{1+x}\text{Se}_2$, *Phys. Rev. B* **111**, 045146 (2025).

(国内雑誌)

- [9] 中村祥子、島野亮、「高強度テラヘルツ波を用いた超伝導磁束量子の質量の決定」、*固体物理* **59**, 773-784 (2024)

(学位論文)

- [10] 松本陽行、テラヘルツ非線形分光による鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ における集団励起モードの研究 (博士論文)
- [11] 吉岡大地、オンチップテラヘルツ分光法の開発と超伝導体 Nb への応用 (修士論文)
- [12] 田中康太郎、テラヘルツ光渦照射による s 波超伝導体 NbN の非線形光学応答の研究 (修士論文)
- [13] 富安泰成、銅酸化物高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の ab 面内光励起ダイナミクスの研究 (修士論文)

(著書)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [14] K. Tanaka, F. Sekiguchi, N. Yoshikawa, H. Teraï and R. Shimano, Nonlocal third-order nonlinear response in a s-wave superconductor NbN driven by terahertz vortex beam, International conference on photoinduced phase transitions (PIPT) 8, Nijmegen, Netherlands, Jun. 23, 2024. (oral)
- [15] F. Sekiguchi, D. Yoshioka, R. Shimano, On-chip THz spectroscopy of superconducting Nb wire, 9th Workshop on Physics between Ecole Normale Supérieure and University of Tokyo, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Komaba, Tokyo, Dec. 10, 2024.
- [16] H. Matsumoto, Terahertz third harmonic generation in the iron-based superconductor FeSe, 2nd FoPM Symposium, The University of Tokyo, Hongo, Tokyo, Feb. 19, 2025. (oral)

- [17] N. Yoshikawa, Anomalous Hall conductivity of a light-driven 3D Dirac semimetal, International Workshop on Topological Nonlinear Optics in Quantum Materials, Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, Kashiwa, Feb. 19, 2025. (oral)
- [18] K. Tanaka, N. Yoshikawa, F. Sekiguchi, H. Terai and R. Shimano, Nonlocal light-matter interaction in a s-wave superconductor NbN with using terahertz vortex beam, International Workshop on Topological Nonlinear Optics in Quantum Materials, Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, Kashiwa, Feb. 20, 2025. (poster)
- [19] K. Ogawa, N. Yoshikawa, Y. Hirai, K. Fujiwara, J. Ikeda, A. Tsukazaki, R. Shimano, All-optical switching of magnetization in ferromagnetic Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ using circularly polarized light pulses, International Workshop on Topological Nonlinear Optics in Quantum Materials, Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, Kashiwa, Feb. 20, 2025. (poster)
- [20] T. Tomiyasu, N. Yoshikawa, R. Shimano, Study of photoexcited high- T_c cuprate superconductor $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ probed by in-plane terahertz conductivity, International Workshop on Topological Nonlinear Optics in Quantum Materials, Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, Kashiwa, Feb. 20, 2025. (poster)
- 招待講演
- [21] Ryo Shimano, Light-induced superconducting-like state in $\text{La}_{1.6-x}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, (Keynote talk) Ultrafast Dynamics and Ultrafast Bandgap Photonics 2024, Crete, Greece, June 19, 2024
- [22] Ryo Shimano, Floquet engineering of 3-dimensional Dirac electron systems, International conference on photoinduced phase transitions (PIPT) 8, Nijmegen, Netherlands, June 27, 2024.
- [23] Ryo Shimano, Light-induced superconducting-like state emergent from charge order in La-based cuprate superconductors, The international conference of the CRC 1242 Nonequilibrium Dynamics of Condensed Matter in the Time Domain, Schluchsee, Germany, Sept. 17, 2024.
- [24] Ryo Shimano, Ultrafast manipulation of Weyl semimetals by light, CREST-EPiQS International Workshop 2024, SODOH, Kyoto, Dec.2, 2024.
- [25] Ryo Shimano, Higgs spectroscopy in superconductors, IMPRS Winter School 2024, "Tc on the rise -Novel Trends in Superconductivity", Max Planck Institute for Solid State Research, Stuttgart, Germany, Dec.6, 2024.
- [26] N. Yoshikawa, Nonthermal melting of charge density wave in $3\text{R-Ta}_{1+x}\text{Se}_2$ induced by intense terahertz pulse excitation, OPICS & PHOTONICS International Congress (OPIC 2024), LSC2024, Yokohama, Japan, Apr. 26, 2024.
- [27] N. Yoshikawa, Light control of anomalous Hall conductivity in topological semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$, OPICS & PHOTONICS The 2nd International Conference on Nonequilibrium and Ultrafast Quantum States (NUQS-2024), Dongguan, China, Oct. 22, 2024.
- [28] N. Yoshikawa, Control of anomalous Hall conductivity in topological semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ using mid-infrared light, International School and Symposium on Nanodevices and quantum Technologies (ISNTT2024), Atsugi, Japan, Dec. 6, 2024.
- (国内会議)
- 一般講演
- 日本物理学会 第 79 回年次大会 (2024 年 9 月 16-19 日、北海道大学)
- [29] 田中康太郎, 関口文哉, 吉川尚孝, 寺井弘高, 島野亮, テラヘルツ光渦を用いた s 波超伝導体 NbN の空間分解非線形分光, 2024 年 9 月 16 日 (口頭発表)
- [30] 吉川尚孝, 平井誉主在, 小川和馬, 奥村駿, 藤原宏平, 池田絢哉, 是常隆, 有田亮太郎, Aditi Mitra, 塚崎敦, 岡隆史, 島野亮, $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 常磁性ディラック半金属相における円偏光誘起異常ホール効果, 2024 年 9 月 16 日 (口頭発表)
- [31] 富安泰成, 吉川尚孝, 島野亮, 銅酸化物高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 薄膜における光ポンプテラヘルツプローブ分光, 2024 年 9 月 17 日 (口頭発表)
- [32] 関口文哉, 島野亮, AC 外場パルスに駆動された反転対称トラップポテンシャル中の粒子からの偶数次高調波発生の計算, 2024 年 9 月 19 日 (口頭発表)
- [33] 吉岡大地, 関口文哉, 島野亮, 超伝導体 Nb におけるオンチップテラヘルツ分光, 2024 年 9 月 19 日 (口頭発表)
- [34] 松本陽行, 小林友輝, 前田京剛, 島野亮, 2 次元 THz 分光による鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ の Higgs モードの観測, 2024 年 9 月 19 日 (口頭発表)
- 第 15 回低温科学研究センター研究交流会 (2025 年 2 月 17 日、東京大学)
- [35] 松本陽行, 小林友輝, 前田京剛, 島野亮, 鉄系超伝導体 FeSe のテラヘルツ第三高調波発生における低エネルギー共鳴構造 (口頭発表)
- [36] 富安泰成, 吉川尚孝, 島野亮, 銅酸化物高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の光励起状態における ab 面内過渡光学伝導度の研究 (ポスター発表)
- [37] 関口文哉, 吉岡大地, 島野亮, 超伝導体の高速制御に向けた低温オンチップテラヘルツ非線形分光系の開発 (ポスター発表)
- [38] 田中康太郎, 吉川尚孝, 関口文哉, 寺井弘高, 島野亮, テラヘルツ光渦を用いた s 波超伝導体 NbN の空間分解テラヘルツポンププローブ分光 (ポスター発表)
- [39] 吉岡大地, 関口文哉, 島野亮, オンチップテラヘルツ分光による超伝導 Nb の電流誘起超高速ダイナミクスの観測 (ポスター発表)

- [40] 吉川尚孝, 小川和馬, 藤原宏平, 小林浩二, 野村健太郎, 塚崎敦, 島野亮, 強磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の全光学磁化反転と磁壁に生じる磁気抵抗 (ポスター発表)
- 日本物理学会 2025 年春季大会 (2025 年 3 月 18-21 日、オンライン)
- [41] 関口文哉, 室谷悠太, 島野亮, 振動外場に駆動されたトラップポテンシャル中の粒子に現れる双安定性, 2025 年 3 月 21 日 (口頭発表)
- [42] 田中康太郎, 関口文哉, 吉川尚孝, 寺井弘高, 島野亮, テラヘルツ光渦による s 波超伝導体 NbN の非局所非線形光学応答, 2025 年 3 月 21 日 (口頭発表)

4.4 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。

4.4.1 スピン流物性とカイラル磁性

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。

また、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。

レーストラックメモリのビットエラー率決定に成功出 [4]

「レーストラックメモリ」は高速かつ高密度なストレージクラスの次世代磁気メモリとして期待されています。レーストラックメモリでは、ハードディスクドライブと同じように、記録媒体にデジタル情報を記録します。記録媒体は多数の磁性細線からなり、1 つ 1 つの細線にデジタル情報の 0 と 1 が列になって書き込まれています。ハードディスクドライブ、レーストラックメモリにおいてデジタル情報は磁性体の磁区の磁化の向き (たとえば上向か下向か) として記録されています。記録されているデジタル情報にアクセスするため、ハードディスクドライブでは読み取り・書き込み機能を搭載した「ヘッド」が記録媒体に近づき、必要な操作を行います。この時、記録媒体とヘッドは機械的に動くことで特定の「ビット」の読み取り・書き込み操作を行います。一方、レーストラックメモリでは磁性細線に電流パルスを送り、記録されている情報の列 (磁化パターン) を一斉に移動させて、特定のビットをヘッドに近づけます。この時、記録媒体もヘッドも機械的に固定されており、情報の列のみが電気的に移動するため、ハードディスクドライブと比べて格段に早く情報操作ができる利点があります。レーストラックメモリを実用化するにあたって重要な課題となっているのが、記録媒体に保管されているデジタル情報 (ビット) の列を移動するのに必要な電流パルスの強度や移動する速さなどが、材料に対してどのように変わるかが明らかにされてきました。一方で、ビット列への書き込みや移動操作の信頼性についての報告が少なく、特にビット操作のエラー率に関する情報がない状態となっていました。

レーストラックメモリのビット操作のエラー率を決定する性能評価手法を確立しました。フェリ磁性体を用いて作製した細線において、ナノ秒程度の電流パルスによるビットの書き込みとビット位置の操作を繰り返し行い、磁気光学 Kerr 効果顕微鏡観察で得られた磁区画像からビット位置のばらつきを求めました。この手法を用いることで、ビットエラー率を決定できることを実証しました。得られたビットエラー率は調査した範囲においてビット長に依存せず、隣り合うビット間の相互作用が小さいことがわかりました。この結果は、正味の磁化がゼロに近いフェリ磁性体の特徴を反映していると考えられ、高密度磁気メモリに向けてフェリ磁性体が記録媒体として有効であることを示唆しています。また、ビット位置操作に用いる電流パルスが十分に大きい時、連続する操作のビットエラー率に相関がないことがわかりました。エラー率を抑制するためには連続する操作にエラーの相関がないことが重要であり、本研究で得られた知見は今後のレーストラックメモリの開発に大きく貢献するものです。

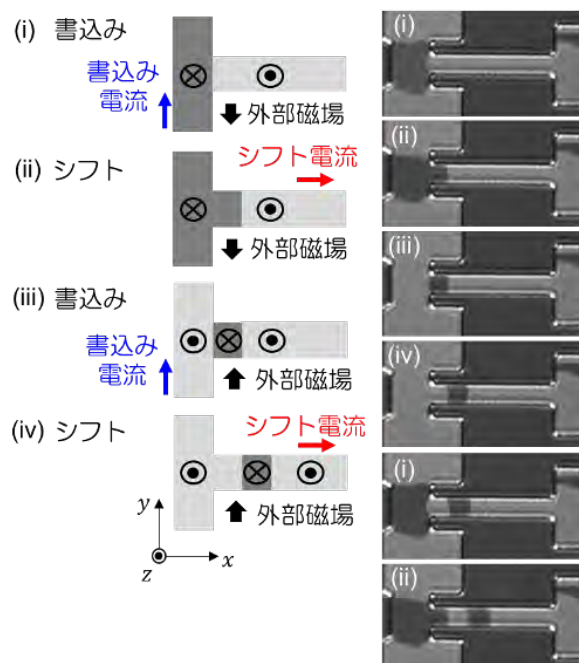


図 4.4.8: (i)-(iv) フェリ磁性細線へのビットの書き込みと移動、及びそれぞれの場合に対応する磁気光学 Kerr 効果顕微鏡によって得られた磁区画像。図は文献 [4] から引用。

4.4.2 強結合状態の探索

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に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マグノン・フォノン結合を決定 [5]

人工反強磁体におけるマグノンとフォノンの結合定数を実験的に決定しました。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。強磁性層が2層あるため、音響モード、光学モードの2つのマグノンが存在します。本実験では音響モードマグノンと、音波程度の速度で伝搬する弾性波フォノンの結合強度を調べました。結合強度を調べるため、弾性波共振器を用いました。得られた結果を解析したところ、人工反強磁体におけるマグノン・フォノン結合定数は 10 MHz 程度であることがわかりました (マグノン、フォノンの共鳴周波数は約 1.85 GHz)。一

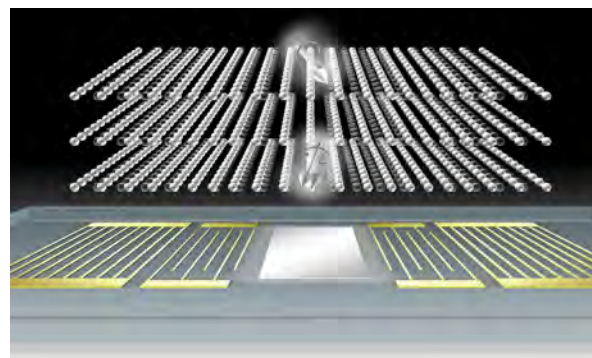


図 4.4.9: マグノン・フォノン結合を調べるために作製した弾性波共振器の模式図。黄色の線が共振器部分。上部はマグノンとフォノンが結合している様子。図は文献 [5] から引用。

般的に結合強度がマグノンとフォノンの緩和周波数よりも大きければ強結合状態と言えますが、本実験ではフォノンの緩和周波数が 0.3 MHz であったのに対し、マグノンの緩和周波数が 525 MHz と大きく、強結合状態には至りませんでした。本研究で多層膜系におけるマグノン・フォノン結合を明らかにできることが明らかになったため、今後は大きな結合が得られる材料系を設計できるか課題となります。

<報文>

(原著論文)

- [1] M. Yunokizaki, Y. Hibino, H. Idzuchi, H. Tsai, M. Ishibashi, S. Miwa, M. Hayashi, S. Nakatsuji, Tunneling magnetoresistance and spin-orbit torque magnetization switching in ferrimagnetic Gd-Fe-Co based magnetic tunnel junction. Jpn. J. Appl. Phys. 64 010904 (2025).
- [2] H. Matsumoto, Y. Todaka, T. Kawada, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Acoustoelectric nonlocal spin-wave-power detector for studying magnon-phonon coupling. Phys. Rev. Appl. 22, 054052 (2024).
- [3] Z. Chi, Y.-C. Lau, V. Li Zhang, G. Shibata, S. Sakamoto, Y. Nonaka, K. Ikeda, Y. Wan, M. Suzuki, M. Kawaguchi, M. Suzuki-Sakamaki, K. Amemiya, N. Kawamura, M. Mizumaki, M. Suzuki, H. Yang, M. Hayashi, A. Fujimori, Relationship between orbital moment anisotropy, magnetocrystalline anisotropy, and Dzyaloshinskii-Moriya interaction in W/Co/Pt trilayers. Phys. Rev. B 110, 184401 (2024).
- [4] M. Ishibashi, M. Kawaguchi, Y. Hibino, K. Yakushiji, A. Tsukamoto, S. Nakatsuji, M. Hayashi, Decoding the magnetic bit positioning error in a ferrimagnetic racetrack. Sci. Adv. 10, eadq0898 (2024).

- [5] H. Matsumoto, I. Yasuda, M. Asano, Y. Todaka, T. Kawada, M. Kawaguchi, D. Hatanaka, and M. Hayashi, Magnon-phonon coupling of synthetic antiferromagnets in a surface acoustic wave cavity resonator. *Nano Lett.* 24, 5683 (2024).

(学位論文)

- [6] 戸高安裕, 人工反強磁性体における音響・光学マグノンと弾性波フォノンの結合, 修士論文 (2025).
- [7] 三塚新, 偏光パルスレーザーによる Te 薄膜の光学異方性制御, 修士論文 (2025).
- [8] Yuxiang Mao, Magnetism and Transport Properties of Van Der Waals Ferromagnet/Topological Insulator Heterostructures, 修士論文 (2024).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [9] S. Ishida, Y. Kobayashi, A. Mitsuzuka, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Nonlinear Circular Photogalvanic Effect in WSe₂. APS March Meeting 2025. 3/19/2025, Anaheim, CA, USA.
- [10] Hiroki Matsumoto, Isamu Yasuda, Motoki Asano, Takuya Kawada, Masashi Kawaguchi, Daiki Hatanaka, Masamitsu Hayashi Magnon-phonon coupling of a synthetic antiferromagnet integrated into a surface acoustic wave resonator. Magnons on an Island 2024. 9/17/2024, Texel, The Netherlands.
- [11] Yukihiro Marui, Masashi Kawaguchi, Satoshi Sumi, Hiroyuki Awano, Kohji Nakamura, Masamitsu Hayashi, Spin and orbital Hall effects in V and Pt (poster). 25th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS2024). 7/11/2024, Bologna, Italy.
- [12] Hiroki Matsumoto, Isamu Yasuda, Motoki Asano, Takuya Kawada, Masashi Kawaguchi, Daiki Hatanaka, Masamitsu Hayashi Magnon-phonon coupling of a synthetic antiferromagnet integrated into a surface acoustic wave resonator. International Conference on Magnetism (ICM2024). 7/4/2024, Perugia, Italy.

招待講演

- [13] M. Hayashi, Magnon-phonon coupling in magnetic thin film heterostructures, SPIE Spintronics XVII, SPIE Spintronics XVII, CA, USA, Aug. 21, 2024.
- [14] M. Hayashi, Magneto-optical detection of current induced spin and orbital magnetic moments, Japan-Korea Spintronics Workshop "Recent Progress on Spintronics", Jeju, Korea, May. 30, 2024.

(国内会議)

一般講演

- [15] 三塚新, 小林裕太, 河口真志, 林将光, 偏光パルスレーザーによるテレル薄膜光学軸制御の定量的評価. 応用物理学会 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 2025 年 3 月 16 日, 東京理科大学野田キャンパス.
- [16] Masahiko Yunokizaki, Yuki Hibino, Hiroshi Idzuchi, Hanshen Tsai, Mio Ishibashi, Shinji Miwa, Masamitsu Hayashi, Satoru Nakatsu. Tunneling magnetoresistance and spin-orbit torque magnetization switching in ferrimagnetic Gd-Fe-Co based magnetic tunnel junction. 応用物理学会 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 2025 年 3 月 14 日, 東京理科大学野田キャンパス.
- [17] Shunzhen Wang, Ryota Miyazaki, Yuta Kobayashi, Masashi Kawaguchi, Kohji Nakamura, Masamitsu Hayashi. Probing the spin texture of topological surface states using current-induced magneto-optical Kerr effect. 応用物理学会 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 2025 年 3 月 14 日, 東京理科大学野田キャンパス.
- [18] 三塚新, 小林裕太, 近藤春央, 河口真志, 埋橋淳, 大久保忠勝, 林将光, 偏光パルスレーザーによる二次元テレル薄膜の構造制御. 日本物理学会 第 79 回年次大会, 2024 年 9 月 18 日, 北海道大学札幌キャンパス.
- [19] 戸高安裕, 浅野元紀, 畑中大樹, 河口真志, 林将光, 人工反強磁性体における音響・光学マグノンと弾性波フォノンの結合. 日本物理学会 第 79 回年次大会, 2024 年 9 月 16 日, 北海道大学札幌キャンパス.
- [20] 柚木崎正彦, 戸高安裕, 安田偉, 河口真志, 林将光, Fe/Tb ヘテロ構造における音響スピンホール効果と磁気弾性結合. 日本物理学会 第 79 回年次大会, 2024 年 9 月 17 日, 北海道大学札幌キャンパス.
- [21] 田中勇丞, 住友雄紀, 野原和馬, 河口真志, 林将光, 非局所スピンバルブを用いたスピン・軌道拡散長の調査 (ポスター). 日本物理学会 第 79 回年次大会, 2024 年 9 月 16 日, 北海道大学札幌キャンパス.
- [22] 宮崎稜大, Shunzhen Wang, Guanxiong Qu, 河口真志, 林将光, ディラック半金属における光・スピン変換 (ポスター). 日本物理学会 第 79 回年次大会, 2024 年 9 月 16 日, 北海道大学札幌キャンパス.
- [23] Shunzhen Wang, Ryota Miyazaki, Kohji Nakamura, Guanxiong Qu, Masashi Kawaguchi, Masamitsu Hayashi Magneto-optical detection of current-induced spin/orbital accumulation in topological insulators (ポスター). 日本物理学会 第 79 回年次大会, 2024 年 9 月 16 日, 北海道大学札幌キャンパス.
- [24] Yuxiang Mao, Shunzhen Wang, Yujun Wang, Masashi Kawaguchi, Masamitsu Hayashi Magnetism and transport properties of Cr₂Te₃/topological insulator/Cr₂Te₃ trilayers (ポスター). 日本物理学会 第 79 回年次大会, 2024 年 9 月 16 日, 北海道大学札幌キャンパス.

招待講演

- [25] 林将光, 積層構造による磁気弾性エンジニアリングとマグノン・フォノン結合. 電気学会専門技術調査委員

会研究会, 2024 年 9 月 2 日, 日本大学駿河台キャンパス.

- [26] 林将光, Spin transport in quantum materials. New Perspectives in Spintronics and Quantum Transport, 2024 年 6 月 8 日, KKR ホテル金沢.

4.5 小林研究室

4.5.1 量子計測

1980 年代以降のナノテクノロジー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。その一例が、量子力学の原理を基盤とする精密測定技術、すなわち量子計測（量子センシング）である。我々の研究の目的は、量子計測の手法を活用して精密物性物理学の新たな枠組みを構築することである。中でも我々は、透明結晶中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 中心や六方晶窒化ホウ素（hBN）中のホウ素空孔欠陥（ V_B^- ）である（図 4.5.10）。これらはそれぞれダイヤモンド量子センサおよび hBN 量子センサと呼ばれることもある。

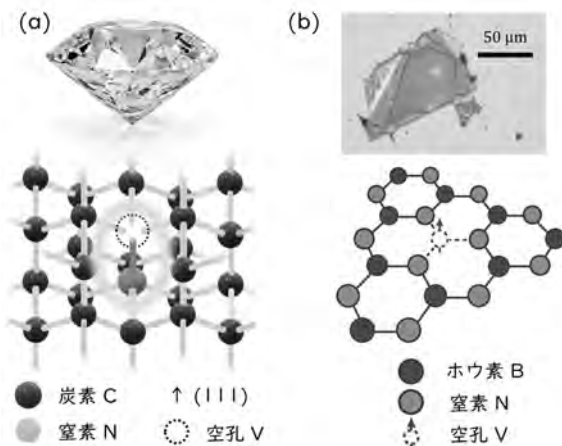


図 4.5.10: (a) ダイヤモンド結晶と NV 中心。(b) hBN 結晶とホウ素空孔欠陥 V_B^- 。

まず NV 中心について説明する。これはダイヤモンド結晶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の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、NV 中心と ODMR を利用した局所磁場観察の手法が提案された。2020 年には hBN 内のホウ素空孔欠陥でも同様の ODMR が起こることが示された。

我々は、これらの量子センサを用いて量子スピン顕微鏡を開発し、多様な物性計測への応用を目指している。本手法は、広範な磁場・温度・圧力条件下において適用可能であり、サブミクロンスケールでの磁場・温度・圧力などの空間分布を定量的にイメージングすることが可能である。これは、従来の物性物理学には存在しなかった新たな観測手法であり、今後、非平衡輸送現象・スピングラス・軌道磁性・トポロジカル端状態・高圧物性など、重要かつ魅力的な研究テーマの解明に寄与することが期待される。

2024 年度は、小林研介教授、佐々木健人助教、大学院博士課程 3 年生の小河健介、塚本萌太、博士課程 2 年生の中村祐貴、西村俊亮、博士課程 1 年生の顧豪、山本航輝、修士課程 2 年生の小林拓、須田涼太郎、修士課程 1 年生の原田怜のメンバーで研究を行った。小河 [9] と塚本 [10] が博士学位を取得し、小林拓 [11] と須田 [12] が修士学位を取得した。塚本は学位論文によって令和 6 年度理学系研究科研究奨励賞（博士）を受賞した [3]。また、短期インターン生として Lucas Moreau-Lalau (Ecole Normale Supérieure de Lyon, 5-7 月) と Manuel Torres Matsumoto (Technical University of Munich, 10-12 月) が当研究室に滞在した（以上敬称略）。

当研究室では、「量子センサの性質と量子制御」と「量子センサの物性計測応用」という二本柱のもと、研究活動を展開している。以下に順に紹介する。

4.5.2 量子センサの性質と量子制御

高感度な hBN 量子センサの作製

hBN 中のホウ素空孔欠陥は、NV 中心とは異なる特性を有しており、磁性体中の微小な磁気構造や磁気秩序を高精度に観察する新たなプローブとしての応用が期待される。微細な磁場を検出するためには、磁場感度に加えて高い空間分解能も必要となる。hBN はファンデルワールス結晶であり、機械的剥離によって原子層レベルまで薄膜化できるため、測定対象表面に極めて近い位置での磁場検出が可能である。さらに、hBN の厚さはナノメートル（nm）単位で精密に測定することができるため、量子センサと測定対象との間の距離、すなわちスタンドオフ距離を正確に見積もることができる。この特性は、従来の手法では困難であった nm スケールの磁気構造を定量的に観察する上で有用である。

我々は、ホウ素空孔欠陥を高精度に生成するために、ヘリウムイオン顕微鏡（HIM）を用いている。HIM を用いることで、hBN フレーク内の任意の位置に対して nm スケールの精度で欠陥を作製可能であることは、我々の先行研究において実証されている [Sasaki *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **122**, 244003 (2023)]。この手法により、複数のナノスケール量子

センサをアレイ状に配置し、高性能カメラによってそれらを同時に観察することで、広視野かつ高精度に磁場イメージングできる [図 4.5.11(右)] (注: 各スポットは 100nm 四方の大きさであるが光学分解能のため実際のサイズよりも広がって見えている)。

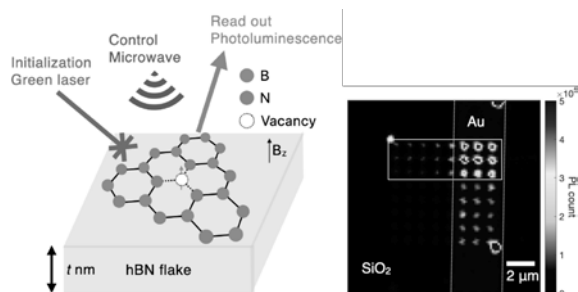


図 4.5.11: (左) hBN 量子センサにおける ODMR 測定概念図。(右) hBN 量子センサのナノ配列 [4]。

我々は、磁場センサの空間分解能を向上させることを目的として、hBN の厚さおよび基板の種類が量子センサの性能 (発光強度や磁場感度) に与える影響を系統的に調査し、最適な条件の探索を行った [4]。その過程において、イオン注入の挙動を評価するためにモンテカルロシミュレーション (Stopping and Range In Matter, SRIM) も活用した。図 4.5.11(左) には、hBN フレークを基板上に貼り付けて ODMR 測定を行う際の概念図を示している。本研究の結果、厚み 50 nm の hBN フレークにヘリウムイオンビームを加速電圧 30 keV で照射してホウ素空孔欠陥を生成する場合、金基板上に貼り付けてイオンドーズ量 10^{16} cm^{-2} に設定する場合に最も高い磁場感度が得られることを明らかにした。

この成果は、より高感度なセンサを微細な領域に集中して配置することを可能にし、局所的な磁場の変化を高精度に観測する新たな手法を提供するものである。たとえば、磁性体内部におけるスピン相関関数を調べる研究への応用が期待される。また、hBN が二次元材料として有する特性を活かすことで、他の材料との積層構造を用いた新しい量子デバイス設計への展開も可能である。

動的核スピン分極における多体ダイナミクス

ダイヤモンド中の NV 中心とは異なり、hBN 中のホウ素空孔欠陥の周囲には、窒素およびホウ素原子に由来する多数の核スピンが存在する。これらの核スピンの振る舞いを理解することは、量子センシングの感度および定量性の向上、さらには核スピンを量子ビットとして応用する上でも重要である。これまでに、光学的に分極された欠陥内電子スピンとの超微細相互作用を介して、隣接する窒素核スピンを動的な分極させる研究が複数報告されてきた。同位体組成を制御した hBN を用いた研究も含め、ODMR 測定に基づいて核スピンの分極率を推定した報告も

存在する。しかしながら、これまで得られた分極率は理論的に予測される挙動と完全には一致しておらず、また分極率が高々 30% 程度と低くとどまる原因について、定量的に検討した研究は存在しなかった。

我々は、同位体制御された hBN ($h^{10}\text{B}^{15}\text{N}$) 中のホウ素空孔欠陥に対して、広い磁場範囲にわたる ODMR スペクトルを系統的かつ高精度に測定した。特に、基底状態レベル反交差 (ground-state level anticrossing, GSLAC) が生じる磁場領域に着目して解析を行った。さらに、単一の電子スピンと 3 つの隣接 ^{15}N 核スピンを含む系に対して、Lindblad 形式に基づく数値シミュレーションを実施し、得られた測定結果との比較を行った。

シミュレーションにより、GSLAC 近傍を含むスペクトルの実験結果を再現することに成功した。加えて、ローレンツフィッティングによって推定された核スピン分極の磁場依存性の全体的な挙動もうまく説明することができた。一方で、このような定性的な一致にもかかわらず、従来のフィッティング手法ではスペクトルから核スピン分極を正確に導出することができないことも明らかとなった。この結果は、実験で得られるスペクトルには電子スピン・複数の核スピン・光学遷移が関わる複雑な多体ダイナミクスが反映されているため、単純な解析手法では正確な情報が得られないことを意味している。さらに、ホウ素空孔欠陥の対称性に由来する相互作用テンソルが、核スピン分極の最大値を抑制する主要な要因であることを論じた。

本研究は、hBN 中の欠陥を用いた動的核スピン分極の定量的理解を深めるとともに、その量子技術への応用に向けた重要な一歩となるものである [25, 34]。

4.5.3 量子センサの物性計測応用

機械学習を用いた量子温度センシング

近年、NV 中心を含むナノダイヤモンド (ND) を膜状に散布することで測定対象の磁場や温度 [Ogawa *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **92**, 014002 (2023)] のイメージングを行う手法が試みられている。その利点は、ND 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。しかしながら、ND は結晶の向きがランダムであるため、ODMR スペクトルの解析が困難であり、磁場や温度の推定精度が不安定であった。たとえば、従来広く用いられてきた「4 点測定法」は高速である一方、推定精度に課題があった。また、スペクトルをローレンツ関数でフィッティングする手法も、結果に一貫性が乏しいという問題があった。我々は、2022 年に機械学習の一種であるガウス過程回帰 (GPR) を用いて ND のスペクトルから磁場を推定する手法を開発した [Tsukamoto *et al.*, *Sci. Rep.* **12**, 13942 (2022)]。今回、我々はこの成果を温度測定に拡張した。

我々は、温度制御が可能な顕微分光用ステージに、粒径 100 nm のナノダイヤモンド (ND) を薄く塗布した銅板試料を設置した。温度を精密に制御しながら ODMR スペクトルを取得し、4 点測定法、ロー

レンツフィッティング法、ならびに機械学習によるガウス過程回帰（GPR）を用いてスペクトルを解析し、各手法によって推定された温度の精度を比較した。その結果、GPRを用いた解析手法が最も信頼性の高い温度推定を可能にすることを実証した。

スピン波伝播の広帯域・広視野イメージング

磁性体中におけるスピン波の伝播を広い周波数範囲でイメージングすることは、そのダイナミクスを理解する上で不可欠である。近年では、NV 中心を磁場センサとして使い、スピン波の振幅および位相を定量的に検出する研究が盛んに行われている。しかし、従来のセンシングプロトコルでは、NV スピンの共鳴周波数と一致する周波数成分のスピン波に限って検出が可能であり、特定の磁場および周波数条件下におけるスピン波しか調査することができなかった。

このような制約を克服する新たなプロトコルとして提案されたのが、AC ゼーマン効果を利用する手法である。AC ゼーマン効果とは、マイクロ波照射下において NV 中心の共鳴周波数がわずかにシフトする現象を指す。我々は 2023 年に、広視野顕微鏡およびアンサンブル NV 中心を用いてこの AC ゼーマン効果を応用したイメージング手法を実装し、マイクロ波アンテナにおけるマイクロ波振幅の空間分布を可視化することに成功した [Ogawa *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **123**, 214002 (2023)]。

本研究 [6] では、AC ゼーマン効果を利用することにより、外部磁場を変更することなく、イットリウム鉄ガーネット（YIG）薄膜内を伝播するスピン波を広い周波数範囲にわたってイメージングすることを実証した。図 4.5.12(a) に測定系の概念図を示す。YIG 基板には、表面に NV 中心を有するダイヤモンド基板およびアンテナが設置されており、外部磁場は試料面内に印加されている。図 4.5.12(b)(c)(d) には代表的な測定結果を示す。NV 中心が非共鳴である周波数帯においても、スピン波が左から右へと伝播する様子が明瞭に観測されている。スピン波の励起周波数が異なることで波長にも大きな差異が生じているが、これはスピン波の理論的な分散関係と定量的に一致している。実験では、最大で 567 MHz の離調に対応するスピン波のイメージングに成功した。

さらに感度評価の結果から、今回提案した AC ゼーマン効果に基づくプロトコルは、原理的には数 10 GHz という高周波のスピン波を高感度で検出できる可能性が示された。本研究の成果は、スピン波に関する実験的研究における NV センタの応用範囲を拡大し、金属強磁性体やファンデルワールス磁性体など、さまざまな材料におけるスピンダイナミクスの定量的解析に向けた新たな道を切り開くものである [6]。

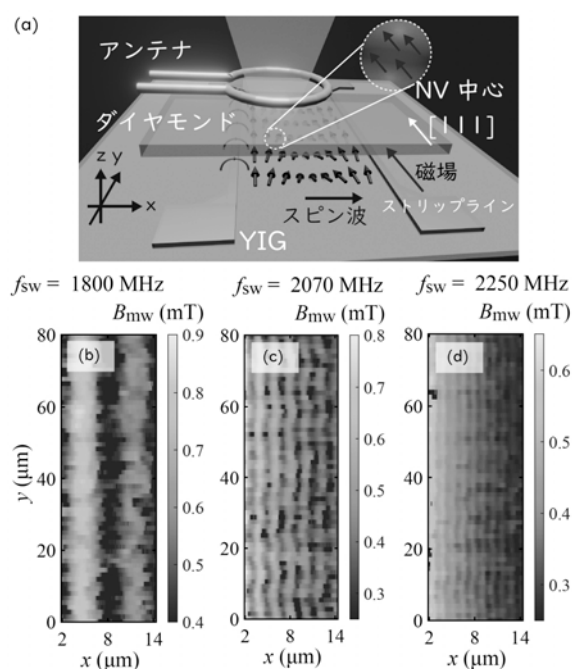


図 4.5.12: (a) 測定系の概念図。(b)(c)(d) AC ゼーマン効果を用いて様々な周波数帯域においてスピン波伝播を広視野で可視化した結果。

量子センサの高圧物性計測への応用

圧力下において物質の性質は大きく変化するため、高圧下での物性研究（高圧物性）は長らく注目を集めてきた。近年話題となっている水素化物超伝導は、その代表例である。ここ数年、GPa 級の高圧力下における圧力および磁場測定の手法として、NV 中心を用いる試みが始まっている。中でも、ナノダイヤモンド（ND）結晶を用いた測定は、結晶の入手が比較的容易であることから、簡便な手法として注目されている。

NV 中心を含有する ND を加圧用のダイヤモンドアンビルセル（DAC）内に散布することにより、試料室内部の応力分布をイメージングによって測定することが可能となる。これまでは、ルビーの蛍光スペクトルやダイヤモンドのラマンスペクトルを観測することで試料室内の圧力を推定していたが、ND を用いた手法では、イメージングにより圧力の空間分布を得ることができるばかりでなく、試料近傍における局所的な応力値の測定も可能となる。また、一軸応力成分を考慮した解析を導入することで、試料室内における非静水圧性を反映したより実態に即した圧力評価が可能となる。本研究では、DAC 試料室内における高圧下での測定技術の構築を目的として実験を行い、ND を用いた圧力分布および非静水圧性のイメージングに成功した [12, 17, 45]。

量子センシングのためのマイクロ波アンテナ作製

NV 中心を用いる実験では、レーザーとマイクロ波を組み合わせて NV 中心内のスピン状態を制御し、読み出すことが基本である。この際、電子スピン共鳴に必要なマイクロ波印加用のアンテナが重要な役割を果たす。通常の電子スピン共鳴では共鳴周波数付近において高い Q 値（例えば 20000 程度）を持つアンテナを用いるが、NV 中心の場合は磁場によって共鳴周波数が増えるため、広帯域のアンテナが望ましい。さらに、物性計測のためのイメージングにおいては、表面に NV 中心を有するダイヤモンド基板を測定対象に密着させた状態でマイクロ波を空間的に均一に照射する必要がある。この際、アンテナを 1 mm 角程度のダイヤモンド結晶の直近に置く必要があると同時に、測定対象近傍の NV 中心からの蛍光を測定するために視野を遮らない工夫も求められる。このように、コプレーナ導波路とワイヤを組み合わせたタイプや共振器型ループタイプなど、種々のアンテナを目的に応じて使い分ける必要がある。

我々は武田クリーンルームにある UV プリント基板加工装置を利用している。CAD ファイルを入力すればプリント基板上に 20 μm の精度でマイクロ波アンテナを加工できる。パラメータを少しずつ変えながら複数のアンテナを一気に作り、性能の良いものを選び出して使用することもできる。その結果、これまでには困難であった高圧・低温環境への NV 中心測定への適用も行えるようになってきた。

本取り組みは学術の発展につながる有用なものとして文部科学省マテリアル先端リサーチインフラの令和 6 年度「秀でた利用成果」優秀賞を受賞した [2]。

精密物性計測のための量子センサチップ開発

ダイヤモンドや hBN を利用する量子センシングにおいて、その感度を最終的に制限するのは量子センサチップそのものである。しかし、原理的、技術的な要因により、万能な量子センサ設計は存在しない。言い換えれば、適切なセンサ設計は、標的材料のサイズ、磁場強度、周波数など、ここに列挙しきれないほど様々な要素を考慮して初めて可能になる。

我々が進めているそれぞれの物性計測に対して適した磁場センサの設計法ならびに作製法が未だ確立されていないことは課題である。そこで我々は、磁性体や超伝導体の磁化測定に有用な「サブミクロンの空間分解能の静磁場イメージング」、相転移ゆらぎや核スピン等の測定に必要な「ナノスケールの磁場ゆらぎ分光」にフォーカスを絞り、それらに対する最適なセンサの開発を開始した。各目的に対して数値シミュレーションを行い実用上の最適設計を見積もった。その上で、そのセンサ設計を満たすための材料や加工方法、例えば同位体濃縮された低歪な高品質ダイヤモンド結晶の調達やその精密評価、独自のイオン注入やその後の熱処理条件の検討など、トライアンドエラーを繰り返しながら着実に歩を進めることができた。すでにサブミクロンの空間分解能とサブナノテスラ（地磁気の 5 万分の 1 以下）の磁場精

度の両立、原子層薄膜の核磁気共鳴検出などが視野に入ってきた。

今後は、作製した量子センサチップの物性計測利用を進めるとともに、さらにトライアルを重ねてより高精度な量子センサの作製法を模索する。これと並行して、センサの性能を十分に発揮させることができる高安定な測定装置の開発も行い、精密物性計測の基盤技術の確立を目指す。

<受賞>

- [1] S. Nishimura, Optica Student Paper Award (Optica Sensing Congress 2024, Toulouse, France, July 15-19, 2024).
- [2] 小林研介、佐々木健人、小河健介、塚本萌太、西村俊亮、中村祐貴、山本航輝、顧豪、小林拓、須田涼太郎、原田伶、令和 6 年度「秀でた利用成果」優秀賞受賞「量子センシングのためのマイクロ波アンテナ作製」（文部科学省マテリアル先端リサーチインフラ、2025 年 1 月 29 日）。
- [3] 塚本萌太、令和 6 年度理学系研究科奨励賞（博士）（2025 年 3 月 10 日）。

<報文>

(原著論文)

- [4] H. Gu, M. Tsukamoto, Y. Nakamura, S. Nakaharai, T. Iwasaki, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Ogawa, Y. Morita, K. Sasaki, K. Kobayashi, “Systematic characterization of nanoscale h-BN quantum sensor spots created by helium-ion microscopy,” *Physical Review Applied* **22**, 054026 (2024).
- [5] K. Yamamoto, K. Ogawa, M. Tsukamoto, Y. Ashida, K. Sasaki, K. Kobayashi, “Nano-diamond quantum thermometry assisted with machine learning,” *Applied Physics Express* **18**, 025001 (2025).
- [6] K. Ogawa, M. Tsukamoto, Y. Mori, D. Takafuji, J. Shiogai, K. Ueda, J. Matsuno, K. Sasaki, K. Kobayashi, “Wideband wide-field imaging of spin-wave propagation using diamond quantum sensors,” *Physical Review Applied* (in press).

(国内雑誌)

- [7] 佐々木健人、谷口尚、小林研介：「hBN 量子センサにおける窒素同位体効果」、NEW DIAMOND 第 153 号 Vol.40, No.2, p.25 (2024).
- [8] 小林研介、佐々木健人、蘆田祐人、塚本萌太：「機械学習によるダイヤモンド量子センシング」、NEW DIAMOND 第 155 号 Vol.40, No.4, p.31 (2024).

(学位論文)

- [9] K. Ogawa, “Development of measurement techniques using diamond quantum sensors and application to spin-wave dynamics”（博士論文、2025 年 3 月）。

- [10] M. Tsukamoto, “Magnetic domains and domain walls studied by quantum magnetometry” (博士論文、2025 年 3 月)。
- [11] 小林拓:「ダイヤモンド窒素空孔中心を用いた量子渦の観測」(修士論文、2025 年 3 月)。
- [12] 須田涼太郎:「ダイヤモンド量子センサを用いた高圧下物性測定手法の開発」(修士論文、2025 年 3 月)。

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [13] K. Sasaki, T. Taniguchi, K. Kobayashi, “Nitrogen isotope effects on hBN quantum sensor,” Boron Nitride Workshop (BNW2024)(Sydney, Australia, May 21–23, 2024)[oral].
- [14] S. Nishimura, T. Kobayashi, D. Sasaki, T. Tsuji, T. Iwasaki, M. Hatano, K. Sasaki, K. Kobayashi, “Quantitative wide-field imaging of superconducting vortices using diamond quantum sensors,” New Diamond & Nano Carbons 2024 (NDNC2024)(Sydney, Australia, May 27–30, 2024)[oral].
- [15] S. Nishimura, T. Kobayashi, K. Ogawa, T. Tsuji, T. Iwasaki, M. Hatano, K. Sasaki, K. Kobayashi, “Perfectly-aligned diamond quantum sensors to visualize superconducting vortices,” 2024 Optica Sensing Congress (Toulouse, France, July 15–19, 2024)[oral][Student Paper Award].
- [16] K. Uriu, K. Shimizu, R. Suda, K. Sasaki, K. Kobayashi, “High pressure magnetometry with NV center diamonds,” International Conference on Magnetism (ICM2024)(Bologna, Italy, June 30–July 5, 2024)[oral].
- [17] R. Suda, K. Yamamoto, K. Uriu, M. Sasaki, M. Einaga, K. Shimizu, K. Sasaki, K. Kobayashi, “Imaging stress distribution under high pressure using diamond quantum sensors,” 13th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (Nasu, Japan, September 24–26, 2024)[oral].
- [18] M. Tsukamoto, Z. Xu, T. Higo, K. Kondou, K. Sasaki, M. Asakura, S. Sakamoto, P. Gambardella, S. Miwa, Y. Otani, S. Nakatsuji, C. L. Degen, K. Kobayashi, “Observation of antiferromagnetic domain wall in Mn_3Sn using scanning diamond quantum sensor,” 13th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (Nasu, Japan, September 24–26, 2024)[oral].
- [19] R. Harada, Y. Nakamura, M. Tanaka, T. Ideue, K. Sasaki, K. Kobayashi, “An attempt to perform a magnetic imaging of a van der Waals magnetic material ($\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x$) $_5\text{Ge}_3\text{Te}$ using nitrogen-vacancy centers in diamond,” 13th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (Nasu, Japan, September 24–26, 2024)[poster].

- [20] K. Yamamoto, R. Suda, K. Uriu, M. Sasaki, M. Einaga, K. Shimizu, K. Sasaki, K. Kobayashi, “Magnetic imaging of iron under high pressure using diamond quantum sensors,” Global Green Transformation Workshop 2024 (Manchester, United Kingdom, October 28–30, 2024)[poster].
- [21] K. Ogawa, M. Tsukamoto, Y. Mori, D. Takafuji, K. Ueda, J. Matsuno, J. Ohe, K. Sasaki, K. Kobayashi, “Quantitative imaging of nonlinear spin-wave dynamics using diamond quantum sensors,” APS Joint March Meeting and April Meeting (APS Global Physics Summit)(Anaheim, California, USA, March 16–21, 2025)[oral].

第 2 回 FoPM 国際シンポジウム×国際キャリア研修
(東京大学伊藤国際学術研究センター&弥生講堂、
2025 年 2 月 17–19 日)

- [22] K. Ogawa, “Probing nonlinear spin-wave dynamics using diamond quantum sensors”[oral].
- [23] M. Tsukamoto, “Observation of chiral domain walls in an octupole-ordered antiferromagnet”[oral].
- [24] S. Nishimura, “Superconducting Vortex Nucleation Induced by Self-Field of Current”[oral].
- [25] Y. Nakamura, “Dynamic nuclear polarization with boron vacancy in hexagonal boron nitride”[oral].
- [26] R. Suda, K. Yamamoto, K. Uriu, M. Sasaki, M. Einaga, K. Shimizu, K. Sasaki, K. Kobayashi, “Imaging stress distribution under high pressure using diamond quantum sensors”[poster].

招待講演

- [27] K. Sasaki, “Arrangement of Nanosized hBN Quantum Sensor Spots using Helium Ion Microscope,” 2024 International Conference on Frontiers of Characterization and Metrology for Nanoelectronics (FCMN2024)(Monterey, USA, April 17, 2024).
- [28] K. Kobayashi, “Quantum Spin Microscope for Magnetism Study,” International Conference on New Frontiers in Advanced Magnetism (NFAM2024)(Sapporo, Japan, August 5–9, 2024).
- [29] K. Sasaki, “Magnetic imaging using color center ensembles,” 3rd International Workshop of Spin/Quantum Materials and Devices (IWSQMD2024)(Sendai, Japan, November 5, 2024).
- [30] K. Sasaki, “Wide-field quantitative imaging of superconducting vortices using diamond quantum sensors,” Workshop on Detection and Mitigation of Flux Trapping in Superconducting Digital Electronics (Yokohama, Japan, December 13, 2024).

(国内会議)

一般講演

- [31] 岡庭龍聖、見川巧弥、松崎雄一郎、山口達万、鈴木琉生、徳田規夫、渡邊幸志、水落憲和、佐々木健人、小林研介、早瀬潤子：「NV センサーを用いた簡便かつ周波数可変な交流磁場センシング」、第 1 回 MSJ 若手研究会（神奈川県三浦市、2024 年 11 月 12–13 日）。
- [32] 小林拓、西村俊亮、顧豪、小河健介、辻起行、岩崎孝之、波多野睦子、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド量子センサを用いた量子渦の観測」、第 16 回低温科学研究センター研究交流会（東京大学、2025 年 2 月 17 日）。
- [33] 阪野壘、佐伯彰彦、秦徳郎、本山海司、荒川智紀、Meydi Ferrier、Richard Deblock、江藤幹雄、小林研介、小栗章：「カーボンナノチューブ量子ドットの半占有 SU(4)-SU(2) 近藤クロスオーバーによる電流ノイズ」、日本物理学会 2025 年春季大会（オンライン、2025 年 3 月 18–21 日）（口頭）。
- 日本物理学会第 79 回年次大会（2024 年）（北海道大学、札幌、2024 年 9 月 16–19 日）
- [34] 中村祐貴、西村俊亮、岩崎拓哉、中弘周、小川真一、森田行則、渡邊賢司、谷口尚、佐々木健人、小林研介：「六方晶窒化ホウ素中のホウ素欠陥を利用した動的核スピン極」（口頭）。
- [35] 小河健介、塚本萌太、森祐輔、高藤大悟、上田浩平、松野丈夫、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド量子センサによる YIG スピン波のイメージング測定」（口頭）。
- [36] 山本航輝、須田涼太郎、瓜生健心、佐々木岬、榮永茉莉、清水克哉、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド量子センサを用いた高圧力下での鉄の磁気イメージング」（口頭）。
- [37] 原田怜、中村祐貴、田中未羽子、井手上敏也、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド量子センサによるファンデルワールス磁性体 ($\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x$) $_5\text{Ge}_3\text{Te}$ の磁場イメージングの試み」（ポスター）。
- [38] 顧豪、西村俊亮、佐々木健人、小林研介：「量子センサを用いた物質中の磁気ゆらぎ測定に向けて」（ポスター）。
- [39] 正木景大、北川健太郎、佐々木健人、小林研介：「精密磁化測定のための高圧下光検出磁気共鳴装置開発」（口頭）。
- [40] 小林研介：「はじめにー共催シンポジウム：物質と情報の量子協奏」（口頭）。
- [41] 西村俊亮、小林拓、小河健介、辻起行、岩崎孝之、波多野睦子、佐々木健人、小林研介：「超伝導微細デバイスにおける量子渦の観測」（口頭）。
- [42] 小林拓、西村俊亮、顧豪、小河健介、辻起行、岩崎孝之、波多野睦子、佐々木健人、小林研介：「広視野局所磁場計測による量子渦の分布の観測」（口頭）。
- [43] 塚本萌太、Z. Xu、肥後友也、近藤浩太、佐々木健人、朝倉海寛、坂本祥也、P. Gambardella、三輪真嗣、大谷義近、中辻知、C. L. Degen、小林研介：「 Mn_3Sn におけるカイラル磁壁の観測」（口頭）。
- [44] 瓜生健心、須田涼太郎、山本航輝、佐々木岬、榮永茉莉、佐々木健人、小林研介、清水克哉：「ダイヤモンド量子センサを組み込んだ高圧力発生装置の開発」（口頭）。

- [45] 須田涼太郎、山本航輝、瓜生健心、佐々木岬、榮永茉莉、清水克哉、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド量子センサを用いた高圧力下での応力分布イメージング」（口頭）。

招待講演

- [46] 佐々木健人、小林研介：「量子センサを用いた磁性体のイメージング」、日本磁気学会 第 93 回スピントロニクス専門研究会（東北大学、2024 年 6 月 20 日）。
- [47] 佐々木健人：「Nanosized quantum sensor spots in hexagonal boron nitride created using helium ion microscopy」第 85 回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム「先端イオン/電子顕微鏡技術のナノスケール材料・デバイスへの応用展開」（朱鷺メッセ、2024 年 9 月 18 日）。
- [48] 小林研介：「スピントロニクスと量子センシング」、第二回 京都大学 ナノスピントロニクス研究会（京都大学化学研究所、2024 年 10 月 12 日）。
- [49] 小林研介：「ダイヤモンド量子センサによる物性計測」、東北大通研共同プロジェクト研究会「量子物質の制御と機能開拓およびそのデバイス応用」（宮城県仙台市、2024 年 10 月 22–23 日）。
- [50] 小林研介：「量子スピン顕微鏡による物性計測技術の開発」、第 2 回 ATF コンファレンス（静岡県沼津市、2024 年 11 月 17–19 日）。
- [51] 小林研介、佐々木健人：「量子センシングのためのマイクロ波アンテナ作製」、文部科学省マテリアル先端リサーチインフラ 令和 6 年度秀でた利用成果発表会 & 秀でた利用成果・技術スタッフ表彰 表彰式（東京ビッグサイト、2025 年 1 月 29 日）。
- [52] 佐々木健人：「六方晶窒化ホウ素中の色中心のスピン物性」、第 72 回応用物理学会春季学術講演会 シンポジウム「固体量子ビットを用いた量子科学技術の最前線」（東京理科大学、2025 年 3 月 14–17 日）。

(セミナー)

- [53] K. Kobayashi, “Quantum spin microscope for magnetic materials,” Seminar (Department of Physics & Astronomy, Seoul National University, Korea, October 14, 2024).
- [54] 小林研介：「量子スピン顕微鏡による物性計測」、スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク (Spin-RNJ) シンポジウム（大阪大学豊中キャンパス・大阪大学会館、2025 年 2 月 28 日）。

(アウトリーチ)

- [55] 小林研介：研究室訪問受け入れ（ヴィアートル学園洛星高等学校、2024 年 8 月 22 日）。
- [56] 小林研介：「ナノテクノロジーと量子力学」、令和 6 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（オンライン模擬講義、2025 年 3 月 27 日）。

4.6 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

4.6.1 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, '22, '23)] 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。

大きな反強磁性ドメインを有する単結晶 YFeO_3 薄膜の作製

反強磁性体は、スピントロニクス、マグノニクス、超高速磁性など、様々な研究分野で近年注目を集めている。一方で、試料品質が低く、構造ドメインも微小であることが反強磁性薄膜研究の大きな課題となっている。我々は、パルスレーザー堆積法を用いて、高品質で双晶のない (110) 配向 YFeO_3 薄膜の作製に成功した [4]。高磁場下における薄膜のスピン回転は、2 副格子モデルで良くフィットできる。薄膜表面は原子レベルで平坦で、ステップテラス状の表面形態を有している。縦磁気光学カー回転 (MOKE 回転) はバルク単結晶に匹敵する 10 mdeg という巨大な値を室温で示す。さらに、カー応答の面内異方性は、SQUID 測定から得られる磁気異方性と一致する。大きな MOKE 信号により、反強磁性ドメインとその反転を画像化することができ、そのドメインサイズは 100 μm を超えることが確認されている。これらの高品質 YFeO_3 薄膜は、反強磁性スピントロニクスデバイスの作製を容易にし、薄膜および界面における様々なスピン関連現象を研究するための便利なプラットフォームを提供する。

界面磁気結合を用いたワイル反強磁性体 Mn_3Sn の磁気特性制御

ワイル反強磁性体 Mn_3Sn は反強磁性体でありながら巨大な異常ホール効果等の応答を示すため、次世代の反強磁性体スピントロニクスでの活用が期待されている。この Mn_3Sn の磁気秩序の制御は重要な技術であり、外部磁場に加え、スピン軌道トルクや歪みといった手法で実現されていた。本研究では Mn_3Sn 薄膜に別の反強磁性体を磁気的にカップリングさせることにより磁気特性の制御が可能であることを示し、その特異な性質を明らかにした [6]。観測された界面結合は Mn_3Sn の微小磁化からではなくそのカイラル反強磁性秩序によって発生していることを明らかにした他、 Mn_3Sn の反磁界の小ささを反映して、試料形状に関係なく様々な方位に一方磁気異方性が自在に印加されることを発見した。本研究で観測された効果は、既に Mn_3Sn において報告されている電流磁気秩序反転やトンネル磁気抵抗効果と併せて磁気メモリーにおける活用が期待される。

多結晶 $\text{Fe}_3\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x$ における巨大異常ネルンスト効果

Fe_3X ($X = \text{Ga}, \text{Al}$) はキュリー温度 $T_C \sim 720 \text{ K}$ ($X = \text{Ga}$), $\sim 600 \text{ K}$ ($X = \text{Al}$) の強磁性体であり、

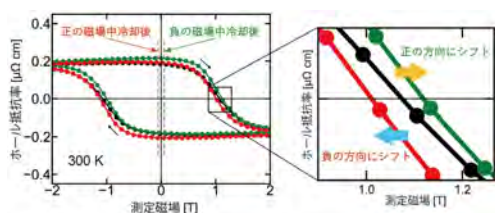


図 4.6.13: 界面磁気結合による交換バイアス効果の発生。

ノーダルウェブと呼ばれるトポロジカルな電子構造に由来した巨大異常ネルンスト効果 $S_{xy} \sim 5.7 \mu\text{V/K}$ ($X = \text{Ga}$), $\sim 4.0 \mu\text{V/K}$ ($X = \text{Al}$) を室温で示す。 Ga を Al に置換していくと、化学ポテンシャルがノーダルウェブのあるエネルギーから離れるため S_{xy} が小さくなることが予想されるが、具体的にどう変化するかは知られていなかったため本研究で調べた。驚くべきことに、 $\text{Fe}_3\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x$ ($0 \leq x \leq 0.6$) で x にほぼ依存せず大きな異常ネルンスト係数 $S_{xy} \sim 5.7 \mu\text{V/K}$ が保持されることがわかった [13]。Al の価格は Ga の約 1/100 であり、価格を抑えた上で性能を保持できる本発見は熱電応用に有用である。

カゴメ強磁性体 Fe_3Sn 薄膜における巨大異常ネルンスト効果

熱の流れに対して垂直に起電力が生じる異常ネルンスト効果 (ANE) は、薄膜作製・加工技術を用いた安価・大面積・フレキシブル性の高い熱電デバイスの開発が可能であることから、熱の流れを可視化する熱流センサやエナジーハーヴェスティングデバイスへの応用が期待されている。本研究では、ノーダルプレーンという新規なトポロジカルバンド構造が出現するカゴメ強磁性体 Fe_3Sn に着目し、高品質な (0001) 配向 Fe_3Sn エピタキシャル薄膜の作製することで、室温・ゼロ磁場下でバルクに匹敵する巨大な異常ネルンスト効果の観測に成功した [8]。また、熱電デバイスで用いられる面直熱流配置下における、単位熱流当たりの横熱起電力を評価したところ、従来の強磁性体よりも一桁以上大きいことが分かった。本成果により、高いデバイス性能に必須の特性を示す Fe_3Sn 薄膜を用いた熱流センサ等の横型熱電デバイスへの応用が期待される。

4.6.2 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ことがある。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。

四極子秩序で生じる非従来型超伝導の発見

20 世紀初頭の発見以来、超伝導発現機構の解明は物性物理学の中心的課題の 1 つである。最も単純化したモデルは BCS (Bardeen Cooper Schrieffer) 理論として知られ、多くの超伝導体の特性を説明することに成功した。一方、強相関電子系や銅酸化物高温超伝導体、鉄系高温超伝導体など BCS 理論では説明できない超伝導も多く見つかっており、非従来型超伝導と呼ばれる。非従来型超伝導の発現機構として、BCS 理論では考慮されていなかったスピンゆらぎや軌道 (電気四極子、以下四極子) ゆらぎの重要性が議論されている。一方これまでの研究では、スピンと軌道両方の自由度が共存しているため、両者を完全に分離することが難しい点が課題の一つであった。そこで我々は高次多極子のみの結晶場基底状態 (非磁性 Γ_3 二重項) を持つ $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ に着目して研究を行っている。4f 電子を 2 つ持つプラセオジム (Pr^{3+}) はスピン軌道相互作用の強い非クラマース系であり、非磁性 Γ_3 二重項はスピン (磁気双極子) 自由度が無く、電気四極子や磁気八極子の自由度のみを持つ。これまでの研究で $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ は非磁性 Γ_3 二重項を持ち、 $T_Q \sim 2 \text{ K}$ で強四極子秩序を、 $T_c \sim 0.2 \text{ K}$ で超伝導を示すことがわかっていた。そこで本研究では、四極子秩序相内で生じる $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ の超伝導特性を詳細に調べ、非従来型超伝導が生じていることを明らかにした [23]。トポロジカル反強磁性体の記述など、多極子の概念は物性物理において近年広がりを見せており、ますます注目を集めている。本研究は多極子と超伝導の関係を探るうえで重要な実験となると考えられる。

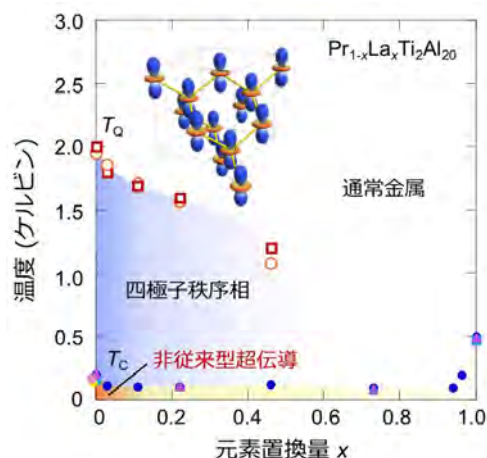


図 4.6.14: $\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x\text{Ti}_2\text{Al}_{20}$ の低温相図。挿入図は四極子秩序を表す。

<受賞>

- [1] 黒沢駿一郎 第 21 回英語講演奨励賞 応用物理学会スピントロニクス研究会 2024/9/17
- [2] 肥後 友也 第 3 回 (2025 年) AAPPS-JPS Award 日本物理学会 2024/12/16
- [3] 松本卓也 第 16 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

<報文>

(原著論文)

- [4] C. Wang, M. Lippmaa, S. Nakatsuji “Fabrication of single-crystalline YFeO_3 films with large antiferromagnetic domains” *J. Appl. Phys.* **135**, 113901 (2024).
- [5] C. Mielke III et al. “Microscopic study of the impurity effect in the kagome superconductor $\text{La}(\text{Ru}_{1-x}\text{Fe}_x)_3\text{Si}_2$ ” *Phys. Rev. B* **109**, 134501 (2024).”
- [6] M. Asakura, T. Higo, T. Matsuo, R. Uesugi, D. N-Hamane, Satoru Nakatsuji “Observation of Omnidirectional Exchange Bias at All Antiferromagnetic Polycrystalline Heterointerface” *Adv. Mater.* **36**, 2400301 (2024).
- [7] H. Isshiki, N. Budai, A. Kobayashi, R. Uesugi, T. Higo, S. Nakatsuji, and Y. Otani “Observation of cluster magnetic octupole domains in the antiferromagnetic Weyl semimetal Mn_3Sn nanowire” *Phys. Rev. Lett.* **132**, 216702 (2024).
- [8] S. Kurosawa, T. Higo, S. Saito, R. Uesugi, and S. Nakatsuji “Large spontaneous magnetothermoelectric effect in epitaxial thin films of the topological kagome ferromagnet Fe_3Sn ” *Phys. Rev. Mater.* **8**, 054206 (2024).
- [9] M. Wu, T. Chen, T. Nomoto, Y. Tserkovnyak, H. Isshiki, Y. Nakatani, T. Higo, T. Tomita, K. Kondou, R. Arita, S. Nakatsuji, Y. Otani “Current-driven fast magnetic octupole domain-wall motion in noncollinear antiferromagnets” *Nature Communications* **15**, 4305 (2024).
- [10] I. Plokhikh et al. “Discovery of charge order above room-temperature in the prototypical kagome superconductor $\text{La}(\text{Ru}_{1-x}\text{Fe}_x)_3\text{Si}_2$ ” *Communications Physics* **7**, 182 (2024).
- [11] P. Nikolić, Y. Xu, T. Ohtsuki, D. C. Elbert, S. Nakatsuji, N. Drichko “Possible Weyl-Luttinger phase transition in pyrochlore iridates revealed by Raman scattering” *Physical Review B* **110**, 035148 (2024).
- [12] Y. Chen et al. “Intertwined charge and spin density waves in a topological kagome material” *Phys. Rev. Research* **6**, L032016 (2024).
- [13] Y. Wang, A. Sakai, S. Minami, H. Gu, T. Chen, Z. Feng, D. Nishio-Hamane, S. Nakatsuji “Robust giant anomalous Nernst effect in polycrystalline nodal web ferromagnets” *Appl. Phys. Lett.* **125**, 081901 (2024).
- [14] S. Sakamoto, T. Higo, Y. Kotani, H. Kosaki, T. Nakamura, S. Nakatsuji, S. Miwa “Bulk and surface uniformity of magnetic and electronic structures in epitaxial $\text{W}/\text{Mn}_3\text{Sn}/\text{MgO}$ films revealed by fluorescence- and electron-yield x-ray magnetic circular dichroism” *Phys. Rev. B* **110**, L060412 (2024).
- [15] K. Fujinuma, D. Takegami, T. Higo, A. Melendez-Sans, G. Poelchen, M. Yoshimura, K.-D. Tsuei, S. Nakatsuji, L. H. Tjeng, and T. Mizokawa “Bulk Mott gap and S 3s/3p spectral distribution in pyrite-type NiS_2 revealed by hard x-ray photoemission spectroscopy” *Phys. Rev. B* **110**, 125136 (2024).
- [16] M. Ishibashi, M. Kawaguchi, Y. Hibino, K. Yakushiji, A. Tsukamoto, S. Nakatsuji, and M. Hayashi “Decoding the magnetic bit positioning error in a ferrimagnetic racetrack” *Science Advances* **10**, eadq0898 (2024).
- [17] Jazmin Victorin, Aleksandar Razpopov, Tomoya Higo, Reynolds Dziobek-Garrett, Thomas J. Kempa, Satoru Nakatsuji, Roser Valentí, and Natalia Drichko “Exfoliation and optical properties of $S = 1$ triangular lattice antiferromagnet NiGa_2S_4 ” *Scientific Reports* **14**, 28040 (2024).
- [18] S. Sakamoto, T. Nomoto, T. Higo, Y. Hibino, T. Yamamoto, S. Tamaru, Y. Kotani, H. Kosaki, M. Shiga, D. Nishio-Hamane, T. Nakamura, T. Nozaki, K. Yakushiji, R. Arita, S. Nakatsuji, S. Miwa “Antiferromagnetic spin-torque diode effect in a Kagome Weyl semimetal” *Nature Nanotechnology* **20**, 216 (2024).
- [19] N. Tang, M. Gen, M. Rotter, H. Man, K. Matsuhira, A. Matsuo, K. Kindo, A. Ikeda, Y. H. Matsuda, P. Gegenwart, S. Nakatsuji, Y. Kohama “Crystal field magnetostriction of spin ice under ultrahigh magnetic fields” *Phys. Rev. B* **110**, 214414 (2024).
- [20] M. Yunokizaki, Y. Hibino, H. Idzuchi, H. Tsai, M. Ishibashi, S. Miwa, M. Hayashi, S. Nakatsuji “Tunneling magnetoresistance and spin-orbit torque magnetization switching in ferrimagnetic Gd-Fe-Co based magnetic tunnel junction” *J. J. Appl. Phys.* **64**, 010904 (2025).
- [21] H. Kosaki, S. Sakamoto, T. Hatajiri, T. Higo, S. Nakatsuji, S. Miwa “Anisotropy of the Gilbert damping constant in NiFe grown on the chiral antiferromagnet” *Phys. Rev. B* **111**, 024418 (2025).
- [22] T. Matsuda, T. Higo, K. Kuroda, T. Koretsune, N. Kanda, Y. Hirai, H. Peng, T. Matsuo, C. Bareille, A. Varykhalov, N. Yoshikawa, J. Yoshinobu, T. Kondo, R. Shimano, S. Nakatsuji, R. Matsunaga “Emergence of high-mobility carriers in topological kagome bad metal Mn_3Sn by intense photoexcitation” *Physical Review Materials* **9**, 014202 (2025).
- [23] A. Sakai, Y. Matsumoto, M. Fu, T. Isomae, M. Tsujimoto, E. O’ Farrell, D. Nishio-Hamane,

S. Nakatsuji “Interplay between multipolar order and multipole-induced superconductivity in $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ ” *Nature Communications* **16**, 2114 (2025).

(学位論文)

- [24] 松本卓也 “The study on magnetic transport phenomena and element substitution effects using ferromagnet GdCo_2 ” (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・修士論文) (2025).
- [25] 近藤 理人 “反強磁性体 Mn_3Sn の c 面配向膜における磁気輸送現象と界面効果の研究” (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・修士論文) (2025).
- [26] 対馬湧太郎 “ワイル反強磁性体 Mn_3Sn 薄膜の磁気輸送特性に対する元素置換効果の研究” (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・修士論文) (2025).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [27] Mingxuan Fu, “Strange metal behavior and quantum criticality driven by Kondo entanglement of multipolar moments with conduction electrons” International Conference on New Frontiers in Advanced Magnetism (NFAM) 2024/8/7
- [28] Tomoya Higo, “Current-induced perpendicular switching of non-collinear antiferromagnetic order” From Quantum Materials to Quantum Information: Symposium on Trans-Scale Quantum Science and Quantum Materials Synthesis (QMQUI2024) 2024/11/11
- [29] Akito Sakai, “Novel quantum many-body state in quadrupole Kondo lattice $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ ” From Quantum Materials to Quantum Information: Symposium on Trans-Scale Quantum Science and Quantum Materials Synthesis (QMQUI2024) 2024/11/12
- [30] Takumi Matsuo, “Thermal contribution to the spin-orbit torque control of the antiferromagnetic order in the Weyl semimetal Mn_3Sn ” Join March Meeting and April Meeting; APS Global Physics summit 2025 2025/3/17

招待講演

- [31] Satoru Nakatsuji, “Manipulation of Correlated Weyl Fermions in the Chiral Antiferromagnet Mn_3Sn ” IEEE International Magnetism Conference 2024 2024/5/7
- [32] Satoru Nakatsuji, “Topological magnets for innovating quantum electronics” MORIS (Magnetism and Optics Research International Symposium) 2024/5/28
- [33] Satoru Nakatsuji, “Gigantic Transverse Response and Emergent Correlated Behavior in Topological Magnets” Condensed Matter Physics in the City 2024 2024/6/5

- [34] Satoru Nakatsuji, “Electrical writing and reading of topological octupolar states in the chiral antiferromagnet Mn_3Sn ” SPIE Optics and Photonics 2024 2024/8/22
- [35] Satoru Nakatsuji, “Manipulation of correlated Weyl fermions in the chiral antiferromagnet Mn_3Sn ” CT.QMAT24: International Conference on Complexity and Topology in Quantum Matter 2024/9/23
- [36] Satoru Nakatsuji, “Anomalous transport in topological correlated magnets” CREST-EPiQS International Workshop 2024 2024/12/5
- [37] Satoru Nakatsuji, “Quantum Materials” STS Grand Challenges Workshop 2024/8/25
- [38] Akito Sakai, “Multipole order, superconductivity and non-Fermi liquid in the quadrupole Kondo lattice $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Ti}, \text{V}$)” ICAM Week of Science 2025 2025/1/17”
- [39] Mihiro Asakura, “Manipulation of chiral magnetic order by interfacial magnetic coupling” Join March Meeting and April Meeting; APS Global Physics summit 2025 2025/3/18

(国内会議)

一般講演

- [40] 松本卓也, “フェリ磁性体 GdCo_2 の単結晶合成と磁気輸送特性について” 日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年) 2024/9/16
- [41] 朝倉海寛, “カイラル反強磁性体 Mn_3Sn /強磁性体薄膜界面における反強磁性的結合の観測” 日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年) 2024/9/17
- [42] 立石真之, “Fe/MgO/ Mn_3Sn トンネル接合における磁気抵抗効果の接合サイズ及び温度依存性” 日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年) 2024/9/17
- [43] 梶原悠人, “ディラック半金属 CaAuP における異方的輸送特性の測定” 日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年) 2024/9/17
- [44] 田中克大, “Cr ドープ RuO_2 を用いた接合系におけるトンネル磁気抵抗効果の第一原理計算” 日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年) 2024/9/18
- [45] Ryota Uesugi, “Observation of the giant anomalous Nernst effect in the Weyl ferromagnet Co_2MnGa polycrystalline films” 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 2024/9/20
- [46] 山田祥悟, “Pulse width dependence on spin-orbit torque switching in an antiferromagnet Mn_3Sn thin film” 2025 年第 72 回応用物理学会春季学術講演会 2025/3/14
- [47] Hanshen Tsai, “Pulse width dependence of Spin-Orbit Torque switching in topological antiferromagnets Mn_3Sn ” 日本物理学会 2025 年春季大会 2025/3/19
- [48] 立石真之, “反強磁性体 Mn_3Sn /MgO/Fe 接合におけるトンネル磁気抵抗効果の結晶方位依存性” 日本物理学会 2025 年春季大会 2025/3/20

招待講演

- [49] 酒井明人, “四極子近藤格子系における異常金属状態, 多極子秩序, 超伝導 (AAPS-JPS Award 受賞記念講演)” 日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年)
2024/9/17

5 一般物理理論

5.1 宇宙理論研究室 (吉田)

宇宙は、微視的な物理過程から巨視的な現象にわたる多くの要素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。こうした研究の共通のゴールは、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解明することである。我々のグループでは、多波長の宇宙観測データとコンピュータシミュレーションや機械学習を用いた宇宙の研究を行っている。コンピュータの性能向上の速度は著しく、数年前には不可能であった計算が次々と実行可能になり、宇宙最初の星の誕生の様子やブラックホールの形成進化のような複雑な問題にもチャレンジできるようになった。近い将来のエクサフロップス級のコンピュータ利用を視野に入れながら、超並列計算機や専用計算機を用いてマルチスケール・マルチフィジクス現象の統合シミュレーションを目指している。また、次世代の広域宇宙サーベイ観測で得られる膨大なデータを効率よく解析するため、機械学習など新しい解析手法の研究にも取り組んでいる。ビッグバン宇宙国際研究センターやカブリ数物連携宇宙研究機構に加え、国内外の他研究機関とも積極的に共同研究を行っている。研究テーマは主に、宇宙論と銀河・星・惑星系の形成進化である。宇宙進化の大枠が判明したことで、コンピュータシミュレーションによりさまざまな理論モデルに対して定量的な予言を与え、観測データとの比較により暗黒物質や暗黒エネルギーの正体、天体の形成進化過程を探る研究が可能になっている。計算手法の開発という面では、将来的に量子コンピュータを利用しより高速な計算を行うことを目指し、新しい計算手法の開発にも取り組んでいる。

5.1.1 観測的宇宙論

深層学習による 21cm 線イメージングデータの解析

宇宙早期に起きた宇宙再電離現象を解明することは、銀河形成や宇宙論を探るにあたって重要となる。中性水素からの 21cm 線の広領域強度分布を探ることで、宇宙再電離に関する情報を得ることができる。2028 年観測開始予定の SKAO では、パワースペクトルだけではなく宇宙再電離期の 21cm 線イメージを得ることもできると考えられている。本研究では、Normalizing flow と呼ばれる機械学習生成モデルを用いることで、21cm 線イメージデータから電離源の性質を探ることができることを明らかにした。[43]

銀河サーベイおよび輝線銀河マッピングを用いた宇宙大規模構造解析

銀河サーベイや将来予定されている輝線銀河マッピングを用いた宇宙大規模構造解析では、パワースペクトルや 2 点相関などの統計量を用いた解析が進められている。近年の理論研究により、物質の低密度領域（ボイド）が従来の高密度ピークに注目した解析に相補的な情報を持つことが指摘されつつある。我々は、模擬観測データを用いてボイド構造の検出手法を検証し、観測効果が観測されるボイドの性質にどのような影響を与えるか明らかにした。[70]

輝線強度マッピングを用いたブラックホール成長過程の観測的アプローチ

銀河の中心には、太陽質量の数億倍程度の質量をもつ超巨大ブラックホールが存在することが知られているが、その形成や成長の詳細はよく分かっていない。我々は、最新の観測手法である輝線強度マッピングを用いることで、超巨大ブラックホール周囲に存在するガス円盤から放射される輝線シグナルを同定できる可能性を示した。これは、ブラックホールへの物質供給過程を観測的に捉え、その成長メカニズムの解明に道を拓く重要な成果である。[50]

輝線強度マッピングのパワースペクトルモデル

輝線強度マッピングでは、銀河からの輝線シグナルを網羅的に捉えることで銀河の広領域分布を探ることができる。従来の解析では、暗黒物質ハローに一つの輝線放射源を割り当てる手法がしばしば用いられてきた。本研究では、宇宙論的流体シミュレーションを用いることで、こうした単純なモデルを用いることで得られる結果にバイアスがかかることを示した。さらに、輝線強度マップのパワースペクトルをよりよく再現できるようなモデルを構築した。こうしたモデルを用いて将来得られる観測データをフィッティングすることで、銀河進化や宇宙論について制限が与えられると考えられる。[35]

高赤方偏移銀河の塊状構造の形成起源

近年、最遠方天体観測は天文学の最先端研究課題の 1 つである。特に 2022 年から運用されている宇宙望遠鏡 JWST は非常に高い空間分解能をもち、再電離期の銀河の内部構造を探ることができる。最新の JWST 観測により遠方銀河の一部は塊状構造をもつことが明らかとなった。我々は、宇宙論的銀河形成シミュレーションの銀河から JWST で観測可能な塊状構造を同定し、その形成過程を探った。結果として銀河同士の主要合体により、周囲のガスが圧縮され塊状構造を形成することを示した。[14]

すばる PFS 広視野分光観測に向けた観測効果の除去

2025 年観測開始予定の PFS 観測では、1200 平方度に渡る領域で銀河の 3 次元分布を観測し、宇宙の密度揺らぎから宇宙膨張の歴史や構造進化の解明を目指している。PFS 観測はターゲット型の観測であり、HSC 測光観測で得られる銀河の色情報を元に選定された銀河のみ分光観測を行う。そのため、ターゲット銀河の分布には HSC 観測の観測条件が影響する。領域毎の観測条件の違いは銀河の密度揺らぎを模倣してしまうので、宇宙論解析にバイアスを生じさせる。我々は、HSC の観測条件とターゲット銀河の角度分布との相関を取り、観測条件による銀河密度の違いを取り除く手法の構築を進めている。[27]

グラフ理論による宇宙論パラメータの制限

宇宙の構造がどのように形成されてきたのかを決める、宇宙論パラメータと呼ばれるいくつかのパラメータがある。現在に至るまで宇宙論パラメータ制限の主役はパワースペクトルであったが、非線形な成長の効果を反映できないという欠点があった。ダークマターハローを頂点とするグラフを考えることでトポロジカルな統計量を考えることができ、非線形成長を自然に考慮に入れることができることはわかってきたが、事前に大規模構造の識別を行っておくことでさらに中規模の構造も捉えることができるようになり、パラメータ制限の精度を向上させることができるようになった。[76]

5.1.2 量子計算

乱流統計計算の量子アルゴリズム

乱流の 1 次元モデルを記述するバーガース方程式を解く量子アルゴリズムを提案した。Cole-Hopf 変換によりバーガース方程式を線形の拡散型方程式に書き換え、一般的な量子アルゴリズムによって初期値問題を解く。我々の提案する計算法では、非線形変換後の変数を用いて、もとのバーガース方程式が記述する速度揺らぎの統計量を直接に計算することができる。[20]

5.1.3 原始惑星系円盤

星進化による円盤ガス散逸過程への影響

原始惑星系円盤はガスとダストからなる星周円盤である。太陽系近傍星形成領域の観測から円盤寿命は数百万年であると見積もられている。星進化に伴う光度変化も同様のタイムスケールで進むことから中心星進化も同時に考えることでより現実的な円盤進化の理解が可能になる。そこで、降着、磁気円盤風、光蒸発という三つの円盤散逸過程と同時に星進化

による光蒸発率の変化も同時に考慮したシミュレーションを初めて遂行した。星進化に伴う光度進化の影響は特に太陽質量星から中質量星の周りで顕著となることを明らかにした。中質量星は円盤散逸の前に星が主系列星に到達する。それに伴い、遠紫外線光度が 3 桁以上増加するため光蒸発率が増加し、効率的な円盤散逸に寄与していた。[17]

円盤ガスとダストの相互作用と散逸

円盤ガスの散逸とともに、ダストは合体成長し、年齢とともにダストサイズ分布が変化することが赤外線観測から示されている。小さなダスト粒子は遠紫外線による光電効果でガスを加熱し、光蒸発流を駆動する。小さなダストの減少により光蒸発率や円盤寿命も変化すると考えられるため、ダストとガスを同時に考慮した一次元円盤長期進化計算を行った。ダストの動径移動・拡散・光蒸発流・合体成長・衝突破壊、ガスの降着・磁気円盤風・光蒸発を組み込み、局所的なダスト量に依存する光蒸発率を見積もった。その結果、約 100 万年でダスト・ガス質量比が 10^{-4} に減少し、光蒸発率も低下することが分かった。[28]

5.1.4 超新星

機械学習を用いた超新星中ニュートリノにおける Eddington tensor の予測

重力崩壊型超新星爆発の爆発メカニズムは未だ未解明であるが、ニュートリノが重要な役割を果たす。ニュートリノを厳密に解くことが重要であるが、計算コスト的に難しい。それを解決するべく、機械学習を用いた数値計算コードを開発する第一歩として、超新星中ニュートリノの Eddington tensor を正確に予測する研究を実施した。従来手法よりもより物理的に厳密に Eddington tensor を与えることができる。将来的な数値計算コードへの組み込みを見据えており、計算コストと物理的厳密性の両立を期待している。[40]

<受賞>

- [1] 森脇可奈、第 3 回羽ばたく女性研究者賞 (マリア・スクウォドフスカ=キュリー賞) 最優秀賞、2024 年 5 月 24 日。
- [2] 尾形絵梨花、数理物質科学研究郡長賞、筑波大学、2025 年 3 月 25 日。
- [3] 尾形絵梨花、校友会江崎賞、筑波大学、2025 年 3 月 25 日。

<報文>

(原著論文)

- [4] K. Moriwaki, A. Beane, and A. Lidz., MNRAS, 530(3):3183-3194 (2024).

- [5] H. Kawai, A. Kamada, K. Kamada, and N. Yoshida., Phys. Rev. D, 110(2), 023519, (2024).
- [6] D. Ceverino, Y. Nakazato, N. Yoshida, R.S. Klessen, and S.C.O. Glover., A& A, 689, A244 (2024).
- [7] W. Lake, *et al.* (incl. N. Yoshida), ApJ, 973, 2, 115 (2024).
- [8] Y. Zhong, A. Spitkovsky, J. F. Mahlmann, and H. Hakobyan., ApJ, 973, 2, 147 (2024)
- [9] B. Liu, *et al.* (incl. N. Yoshida), MNRAS, 534(1):290-312 (2024).
- [10] B. Dzieciol, T. Hartwig, and N. Yoshida., MNRAS, 534(2):1561-1568 (2024).
- [11] H. Kawai, and M. Oguri., Phys. Rev. D, 110(8), 083514, (2024).
- [12] H. Kawai, and M. Meneghetti., arXiv e-prints, p. arXiv:2410.14543, (2024)
- [13] T.S. Tanaka, J.D. Silverman, and Y. Nakazato., *et al.*, PASJ, 76, 6, 1323 (2024).
- [14] Y. Nakazato, D. Ceverino, and N. Yoshida., ApJ, 975, 238 (2024).
- [15] H. Kawai, and M. Oguri., arXiv e-prints, p. arXiv:2411.13816, (2024)
- [16] N. Ishii, *et al.* (incl. Y. Nakazato), PASJ, 77, 1, 139 (2024).
- [17] A. Komaki, and N. Yoshida., ApJ, 979, 1, 46 (2025).
- [18] Y. Harikane, *et al.* (incl. Y. Nakazato and N. Yoshida), ApJ, 980, 1, 138 (2025).
- [19] J. Gurian, *et al.* (incl. N. Yoshida), MNRAS, 537(1):580-597 (2025).
- [20] F. Uchida, K. Miyamoto, S. Yamazaki, K. Fujisawa, and N. Yoshida., Computers & Fluids, 288:106527 (2025).
- [21] Y. Sugahara, *et al.* (incl. Y. Nakazato and N. Yoshida), ApJ, 981, 2, 135 (2025).
- (会議抄録)
- [22] K. Hirashima, K. Moriwaki, *et al.*, In NeurIPS 2024 Machine Learning and the Physical Sciences (2024).
- [23] Y. Gondhalekar and K. Moriwaki, In NeurIPS 2024 AI for Science Workshop (2024).
- (国内雑誌)
- [24] 吉田直紀, 機械学習と宇宙論, 電子情報通信学会誌, 2024 年 10 月号
- (学位論文)
- [25] Zhong Yici, "Kinetic Simulations of Pulsar Magnetosphere in Interacting Binary Systems", Ph.D. Thesis
- [26] Hanchun Jiang, "Impact of Reionization History on Constraining Primordial Gravitational Waves with Cosmic Microwave Background B-modes", Master's Thesis
- [27] Yuka Yamada, "Probing Cosmic Large Scale Structure with Voids", Master's Thesis
- [28] Ayano Komaki, "Long-Term Evolution and Dispersal of Protoplanetary Disks", Ph.D. Thesis
- [29] Hiroki Kawai, "The nature of dark matter probed by strong gravitational lensing", Ph.D. Thesis
- [30] Erika Ogata, "Three-dimensional Radiation Hydrodynamics Simulations of Wandering Black Holes: Effects of Anisotropic Radiation Feedback in Dusty-Gas", Ph.D. Thesis
- (著書)
- [31] ブラックホール (吉田直紀監修 ニュートンプレス 2024 年 9 月 10 日)
- [32] 宇宙はどうやってつくられたのか (吉田直紀監修 ニュートンプレス 2024 年 12 月 16 日)
- [33] ニュートン先生の宇宙講義 (吉田直紀監修 ニュートンプレス 2025 年 3 月 10 日)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [34] Kana Moriwaki, "The vanishing cross-power spectrum at the epoch of reionization / SUBLIME-TIFUUN Project", Line Intensity Mapping 2024, University of Illinois Urbana-Champaign (June 2024).
- [35] R. L. Zhang, "How Scatter Affects the Power Spectrum: Shot noise is not always constant", Line Intensity Mapping 2024, University of Illinois Urbana-Champaign (June 2024).
- [36] Y. Nakazato, "FirstLight zoom-in simulations: Formation mechanism of [OIII]-bright clumps in high-redshift galaxies from $z = 6 - 9$ ", European Astronomical Society Annual meeting 2024, Padova, Italy (July 2024).
- [37] E. Ogata, K. Ohsuga, H. Fukushima, "The condition of super-Eddington accretion of wandering seed black holes considering anisotropic radiation field and dust sublimation", COSPAR 2024 45th Scientific Assembly, Korea (July 2024).
- [38] Y. Nakazato, "A merger-driven scenario for clumpy galaxy formation in the epoch of reionization: Physical properties of clumps in the FirstLight simulation", International Astronomical Union Symposium 391, Capetown, South Africa (August 2024).
- [39] Y. Yamada, "Void detection in galaxy observation", RESCEU summer school 2024, Kanazawa (September 2024).

- [40] Shota Takahashi, “Prediction of the Eddington Tensors of Neutrinos in Core-Collapse Supernovae Using AI”, RESCEU summer school 2024, Kanazawa (September 2024).
- [41] H. Jiang, “Impact of Reionization History on Constraining Primordial Gravitational Waves with CMB B-modes”, RESCEU summer school 2024, Kanazawa (September 2024).
- [42] Y. Nakazato, “Radiative-driven dusty outflow in compact high- z galaxies”, ILR workshop 2024@Osaka: From Galaxy Formation to Supermassive BlackHoles, Osaka University (September 2024).
- [43] Kana Moriwaki, “Estimating EoR parameters with deep learning”, Hongo 21cm workshop, The University of Tokyo (October 2024).
- [44] Shota Takahashi, “Prediction of the Eddington Tensors of Neutrinos in Core-Collapse Supernovae Using AI”, Data Oriented Astronomy 2024 (October 2024).
- [45] A. Komaki, “Evolution of Protoplanetary Disks”, Symposium on Next Generation Astrochemistry (November 2024).
- [46] Zhong Yici, “Kinetic simulations of pulsar magnetosphere interacting with a companion wind”, The International Pulsar Symposium 2024, Guizhou, China (November 2024).
- [47] Y. Nakazato, “Tracing Early Galaxy Formation with FirstLight: Statistical Insights and Inner Structures of high- z galaxies”, One-day workshop on high- z cosmological simulations, The University of Tokyo (December 2024).
- [48] E. Ogata, K. Ohsuga, H. Fukushima, “Bondi-Hoyle-Lyttleton Accretion onto Seed Black Holes in the Early Universe”, Elucidating the Material Circulation in the Early Universe, Japan (March 2025).
- [49] Y. Yamada, “Detecting cosmic voids using line intensity mapping”, Study of the Universe By Line Intensity Mapping Experiments (SUBLIME2025), the University of Tokyo, (March 2025).
- [50] E. Ogata, Rui Lan Jun, K. Moriwaki, N. Yoshida, “Unraveling the role of AGN emission in LIM”, Study of the Universe By Line Intensity Mapping Experiments (SUBLIME2025), the University of Tokyo, (March 2025).
- [51] Kana Moriwaki, “Transformer as a fast but realistic model for creating LIM mocks”, Study of the Universe By Line Intensity Mapping Experiments (SUBLIME2025), the University of Tokyo, (March 2025).
- 招待講演
- [52] Naoki Yoshida, “Formation of Seed Black Holes in the Early Universe”, The origin and evolution of super-massive black holes, Sexten, Italy (July 2024).
- [53] Kana Moriwaki, “Generative models for large-scale structures”, Physics in the AI Era, Pisa (September 2024).
- [54] Naoki Yoshida, “Simulations of early structure formation: Primordial magnetic field”, Computational Galaxy Formation, Ringberg, Germany (October 2024).
- [55] Naoki Yoshida, “Cosmological Vlasov-Poisson Simulations”, Ten years of Illustris, Gargonz, Italy (October 2024).
- [56] Naoki Yoshida, “Quantum Algorithm for Collisionless Boltzmann Simulations”, Action Dark Energy, Paris, France (October 2024).
- (国内会議)
- 一般講演
- [57] 森脇可奈, “輝線強度マッピングへの期待と課題”, 国際先導研究キックオフミーティング, 国立天文台 (2024 年 5 月).
- [58] 高橋正大, “重力崩壊型超新星シミュレーションの AI サロゲートモデルの開発”, 第 54 回天文・天体若手夏の学校, 東京大学 (2024 年 7 月).
- [59] 森脇可奈, “On the transitions of the large-scale 21cm-galaxy cross power”, 21cm 線ミニワークショップ, 国立天文台 (2024 年 8 月).
- [60] 尾形絵梨花, 大須賀健, 福島肇, “Dusty gas 中を漂う種ブラックホールの Bondi-Hoyle-Lyttleton 降着過程”, Exploring Extreme Transients: Emerging Frontiers and Challenges, 京都大学 (2024 年 8 月).
- [61] 高橋正大, “AI による超新星内ニュートリノの Eddington tensor の予測”, 日本天文学会 2024 年秋季年会, 関西学院大学 (2024 年 9 月).
- [62] 仲里佑利奈, “Radiative-driven dusty outflow by compact $z > 10$ galaxies”, 日本天文学会 2024 年秋季年会, 関西学院大学 (2024 年 9 月).
- [63] H. Jiang, “Impact of Reionization History on Constraining Primordial Gravitational Waves with CMB B-modes”, 日本天文学会 2024 年秋季年会, 関西学院大学 (2024 年 9 月).
- [64] 河合宏紀, “銀河団内における銀河・銀河強重力レンズ確率を用いたファジーダークマター探索”, 日本物理学会 2024 年秋季年会, 北海道大学 (2024 年 9 月).
- [65] 河合宏紀, “臨界曲線近傍の超高増光率像に関する統計的理論モデル”, 第 13 回観測的宇宙論ワークショップ, 金沢大学, (2024 年 9 月)
- [66] 尾形絵梨花, 大須賀健, 福島肇, “Bondi-Hoyle-Lyttleton 機構による種ブラックホールの成長過程: 輻射場の非等方性とダスト昇華の影響”, 2024(令和 6) 年度 国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング, 国立天文台 (2024 年 11 月).
- [67] 尾形絵梨花, 大須賀健, 福島肇, 矢島秀伸, “三次元輻射流体力学計算で探る巨大ブラックホールの形成過程: 種ブラックホールへの Bondi-Hoyle-Lyttleton 過程”, 理論懇シンポジウム, 国立天文台 (2024 年 12 月).

- [68] 河合宏紀, "臨界曲線近傍の超高増光率像に関する統計的理論モデルと原始ブラックホールの制限", 理論懇シンポジウム, 国立天文台 (2024 年 12 月).
- [69] 尾形絵梨花, Rui Lan Jun, 森脇可奈, "Line Intensity Mapping に対する AGN の寄与について", 次世代サブミリ波観測・シミュレーション計画検討会 2025, 御殿場高原時之栖 (2025 年 2 月).
- [70] Y.Yamada, "Void detection using line intensity mapping", 次世代サブミリ波観測・シミュレーション計画検討会 2025, 御殿場高原時之栖 (2025 年 2 月).
- [71] 尾形絵梨花, 大須賀健, 福島肇, "Dusty-gas 中を漂う孤立ブラックホールの Bondi-Hoyle-Lyttleton 降着", ブラックホール探査研究会 2025, 東京都立大学 (2025 年 3 月).
- [72] 尾形絵梨花, 大須賀健, 福島肇, "降着円盤放射を伴う浮遊する中間質量ブラックホールの超臨界降着プロセス", ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025, 名古屋市立大学 (2025 年 3 月).
- [73] 河合宏紀, "The ultrahigh magnification events within galaxy clusters due to microlenses", Joint workshop on general relativity and cosmology, 西谷津温泉宮本の湯 (2025 年 3 月).
- [74] 森脇可奈, "正規化フローモデルを用いた 21cm 線イメージングデータからのパラメータ推定", 日本天文学会 2025 年春季年会, 水戸市民会館 (2025 年 3 月).
- [75] 高橋正大, "超新星中ニュートリノにおける機械学習を用いた closure relation の構築", 日本天文学会 2025 年春季年会, 水戸市民会館 (2025 年 3 月).
- [76] 山崎壮一郎, "大規模構造の識別とグラフ理論による新たな統計", 日本天文学会 2025 年春季年会, 水戸市民会館 (2025 年 3 月).
- [77] 山田祐佳, "PFS 観測での宇宙論解析に向けた宇宙泡状構造の性質の解明", 日本天文学会 2025 年春季年会, 水戸市民会館 (2025 年 3 月).
- 招待講演
- [78] 吉田直紀, "Cosmology with wide-field sky survey" 超伝導工学・大規模数値計算・データ科学で解明する宇宙最初期の重元素生成過程, 東京大学 (2024 年 5 月).
- [79] 森脇可奈, "天文学における AI の応用", CfCA ユーザズミーティング 2024 (2024 年 11 月).
- [80] 森脇可奈, "サブミリ波輝線強度マッピング - 理論的な視点から", Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE) Science and Development Workshop 2024 (2024 年 12 月).
- (セミナー)
- [81] Y. Nakazato, "Physical properties and Inner structures of high-redshift galaxies ($z > 6$) using zoom-in simulations", Scuola Normale Superiore, Italy (April 2024).
- [82] 高橋正大, "重力崩壊型超新星シミュレーションの AI サロゲートモデルの開発", 富岳加速プロジェクト「シミュレーションと AI の融合で解明する宇宙の構造と進化」 (2024 年 4 月).
- [83] 森脇可奈, "AI 技術を取り入れた宇宙の研究", 千葉大学先進科学セミナー (2025 年 5 月).
- [84] 仲里佑利奈, "数値シミュレーションを用いた宇宙最初期の銀河形成および進化", JSR フェローシップ研究発表会, オンライン (2024 年 7 月).
- [85] 森脇可奈, "宇宙大規模構造", 東京女子大学 (2024 年 7 月).
- [86] 吉田直紀, "宇宙のダークエネルギーとブラックホール", 兵庫県立長田高校 Global Career Seminar, 東京大学 (2024 年 8 月).
- [87] 吉田直紀, "宇宙 138 億年解説", 取手市 EMP 講座, 千葉県取手市庁舎 (2024 年 8 月).
- [88] Y. Nakazato, "Overview of galaxy formation simulations and a review of latest studies on high- z galaxies", ELPIS+JWST Hack Days 2024, Yamanashi (August 2024).
- [89] Kana Moriwaki, "AI for astronomical observation: noise removal and component extraction", Polish Academy of Science, Astronomical Centre (September 2024).
- [90] Kana Moriwaki, "AI for astronomical observation: noise removal and component extraction", Polish Academy of Science, Center for theoretical Physics (September 2024).
- [91] Kana Moriwaki, "AI for astronomical observation: noise removal and component extraction", Polish Academy of Arts and Sciences (September 2024).
- [92] 吉田直紀, "科学 × AI", 三井住友 Pre-EMP プログラム, 東京大学 (2024 年 11 月).
- [93] 吉田直紀, "ブラックホール", 品川シルバー大学, 東京都品川区庁舎 (2024 年 11 月).
- [94] Kana Moriwaki, "Deep learning for astronomical observations: noise removal and parameter inference", Ochanomizu University (November 2024).
- [95] 吉田直紀, "From Garching to the First Light", ドイツ学術交流会講演会, 東京都港区ドイツ文化会館 (2024 年 12 月).
- [96] 森脇可奈, "シミュレーションとデータ科学的手法を用いた宇宙の研究", 筑波大学異分野融合・連携セミナー (2025 年 1 月).
- [97] 森脇可奈, "深層学習による大規模構造データの解析", Center for Planetary Science, 神戸大学 (2025 年 1 月).
- [98] 吉田直紀, "宇宙のダークマターとブラックホール", 埼玉県電業協会イノベーションセミナー, ホテルブリランテ武蔵野 (2025 年 1 月).
- [99] Y. Nakazato, "Tracing Early Galaxy Formation with FirstLight Zoom-in Simulations: Statistical Insights and Inner Structures of $z > 6$ Galaxies", University of Tsukuba (February 2025).

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のが量子情報処理であり、古典情報処理の限界を超えるブレイクスルーの候補として近年注目を集めている。

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、機械学習などに役立てる」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、特任研究員の Philip Taranto 博士、JSPS 外国人特別研究員の Zane Rossi 博士、特任研究員の宮崎慈生博士、博士課程大学院生の田中雄氏、横島亘氏、Timothy Forrer 氏、吉田智治氏、松井浩介氏、修士課程大学院生の磯貝夏斗氏、丹羽亮太郎氏、研究生の Ben Yordan Jumoorthy 氏、夏季インターン生の Noah Eckstein 氏 (Harvard 大学) 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・量子アルゴリズム

一般的な量子計算優位性に基づいた量子機械学習の優位性

量子機械学習の古典機械学習に対する優位性は、これまでショアのアルゴリズムで解ける問題に特有の構造に依存した学習問題に限り厳密に示されていた。本研究では、機械学習に適合した計算量複雑性の枠組みを考察することにより、量子計算の優位性が現れる一般的な計算問題に基づいて、量子優位性が現れる学習問題を構成できることを示した。(担当：山崎、磯貝、村尾)

多項式分解による並列化量子信号処理

量子信号処理 (QSP) 回路仮説は単純で強力だが、その連結性により、深度の高い回路が実現しにくい状況では応用が制限される。本研究では、特別な「低ノルム」多項式分解を明示的に計算して乗算ガジェッ

トを構築し、そこから生じる深さと幅のトレードオフを解析することにより QSP の実用性を並列化設定へと拡張し、エントロピー量や分配関数の推定への応用を視野に入れることに成功した。本研究は、Jack Ceroni 氏 (University of Toronto) と Isaac Chuang 博士 (MIT) との共同研究である。(担当：Rossi)

モジュール型の変数量子信号処理

量子信号処理 (QSP) の考え方によって多くの量子アルゴリズムが統合された結果、これらのアルゴリズムをモジュール化し、組み合わせることで複雑なプログラムを構築できる可能性が拓けた。本研究では、量子アルゴリズム設計における関数型プログラミング的アプローチを可能とする、モジュール型の多入力・多出力 QSP ベース超演算子の理論を提示し、「ガジェット」と呼ばれる基本単位が適用する関数レベルで、簡単に連結できることを示した。本研究は、John Martyn 博士 (MIT)、Kevin Chen 氏 (MIT)、Yuan Liu 博士 (North Carolina State University)、Isaac Chuang 博士 (MIT) との共同研究である。(担当：Rossi)

複数コピー入力量子状態を用いたテレポーテーション

Teleportation はエンタングルメントと古典通信および局所操作のみを用いて一つの未知の入力量子状態を通信するタスクであるが、このタスクを入力状態のコピーが複数個あるときに入力量子状態の一つのみ通信するタスクへと拡張した。特にベル状態の一つを用いた時の最適な成功確率の導出を行なった。本研究は Frédéric Grosshans 博士 (Sorbonne Université)、Michał Horodecki 博士 (University of Gdańsk)、Tomasz Młynik 氏 (University of Gdańsk)、Marco Túlio Quintino 博士 (Sorbonne Université)、Michał Studziński 博士 (University of Gdańsk) との共同研究である。(担当：吉田、村尾)

カウント・オラクルを用いた量子状態の準備

ブール関数の値を重ね合わせ状態の確率振幅や位相に符号化した量子状態の準備の解析において、カウント・オラクルは効率的に準備可能な状態を識別する手がかりを提供する。一般のブール関数を符号化する量子状態の準備は計算困難であることを示しつつ、充足割り当て数がカウント・オラクルによって与えられる場合には効率的な量子状態の準備が可能となることを証明した。(担当：田中、山崎、村尾)

OBDD を用いた周期発見アルゴリズムの脱量子化

ブール関数に対する周期発見アルゴリズムの計算量は、関数の表現方法に強く依存している。Ordered Binary Decision Diagram (OBDD) で表現されたブー

ル関数に対する量子コンピュータを用いた周期発見アルゴリズムは、OBDDを行列積状態(MPS)に変換することで古典的にシミュレート可能であることを示し、量子的な優位性が限定的であることが明らかにした。(担当：田中、山崎、村尾)

大規模言語モデルを用いた量子プロトコルの解析

ChatGPT等の大規模言語モデルを用いて、量子アルゴリズムに関する論文から量子プロトコルをpseudocodeとして抽出する方法を開発した。この方法を自動化することで、量子プロトコルのデータベースの自動生成を目指している。(担当：Jumoorty、村尾)

5.2.2 高階量子計算・量子学習

高階量子計算は、ブラックボックスとして与えられた未知の量子計算を入力として、量子計算を出力する関数であり、量子系の効率的な学習や量子プログラミングへの新しいアプローチを提供する。

高階量子計算の保存と再現

量子計算の作用を量子状態に保存しておき、後の好きなタイミングで任意の入力に対してその作用を確実に再現すること(Store and Retrieve, SAR)は不可能であり、達成できる最高確率が先行研究によって調べられていた。本研究では、SARを高階量子計算に拡張し、複数のユニタリと開スロットの連結によって表される高階量子計算の保存と再現について、達成できる最高確率を半正定値計画法を用いた数値計算によって求め、また、最高確率を実装する量子回路を構築した。(担当：横島、宮崎、村尾)

量子チャンネルのスペクトラム・モーメントの量子学習

近年、量子コンピュータを用いて未知の量子ダイナミクスから情報を引き出す量子学習法が活発に研究されている。本研究では、量子チャンネルのLiouville表現をブロックエンコードする手法を新たに開発することで、量子チャンネルのスペクトルに関するモーメントを推定する量子学習法を構成した。(担当：丹羽、Taranto、Rossi、村尾)

量子関数型プロトコル

量子計算の研究では、個別の問題を解決するためのプロトコルの構築に焦点を当てるのが一般的であり、複数のプロトコルを組み合わせてより複雑なプロトコルを設計するという観点はあまり考慮されていない。本研究では、多様な量子プロトコルを直感的に組み合わせ可能にする統一的な枠組みを構築し、大規

模なプロトコルの設計手法を提供することを目的としている。本研究は、Matt Wilson 博士(Université Paris-Saclay)との共同研究である。(担当：Forrer、宮崎、Taranto、村尾)

ユニタリの高階量子計算におけるクエリー数の下限の解析的な導出

ユニタリ反転などのユニタリの高階量子計算は、入力ユニタリの複数回のクエリーによって正確で決定論的な実装ができる場合があることがアルゴリズム構築により明らかになってきたが、最小クエリー数については特殊な場合しかわかっていなかった。本研究では、ユニタリの微分という新しい観点から、正確で決定論的なユニタリの高階量子計算の満たすべき条件を示し、クエリー数の下限を解析的に導出した。(担当：大嶽、吉田、村尾)

量子スイッチのシミュレーション不可能性

量子回路における因果順序を量子的に重ね合わせる「量子スイッチ」を量子回路でシミュレーションする困難性の解析を行なった。本研究では、一般的な量子チャンネルに対する量子スイッチの作用のシミュレーションを考察し、量子スイッチのシミュレーションは指数関数的に難しいことを解析的に示し、確率的あるいは近似的なシミュレーションにおける最適値を半正定値計画法によって数値的に求めた。本研究はHlér Kristjánsson 博士(Perimeter Institute)、Jessica Bavaresco 博士(University of Geneva)、Marco Túlio Quintino 博士(Sorbonne Université)との共同研究である。(担当：大嶽、吉田、Taranto、村尾)

ハミルトニアン固有値のユニバーサルな変換アルゴリズム

未知のハミルトニアン系の正と負の時間発展を実装するブラックボックスが与えられた際に、4次まで微分可能な任意の関数による固有値の変換を実行する、ユニバーサルなハミルトニアン操作を実装する量子アルゴリズムを提案した。この方法は、相関を持つ乱数を利用して二つのサブルーチンをまとめて効率的にコンパイルすることで、量子特異値変換(QSVT)を用いる方法より効率的になることを示した。本研究は、Hlér Kristjánsson 博士(Perimeter Institute)との共同研究である。(担当：大嶽、Taranto、村尾)

Port-based teleportation とユニタリ推定の最適化における等価性

ユニタリ推定という量子推定理論におけるタスクとport-based teleportationと呼ばれる量子通信に関連するタスクの近似精度の最適化に関する研究を行っ

た。それぞれのタスクの近似精度を表す estimation fidelity, teleportation fidelity と呼ばれる指標を表現論を用いて解析することで、この二つの最適 fidelity を結びつける対応関係を発見し、これらのタスクの最適化における数学的な等価性を示した。本研究は小泉勇樹氏（東京大学）、Michał Studziński 博士（University of Gdańsk）、Marco Túlio Quintino 博士（Sorbonne Université）との共同研究である。（担当：吉田、村尾）

5.2.3 量子エラー訂正と量子エラー抑制

デコヒーレンス下における CSS 符号のコヒーレント情報量

近年の研究により、量子誤り訂正符号の復号化に際して生じる相転移現象を情報論的な指標を用いて解析機ることが明らかになった。本研究では、任意の Calderbank-Shor-Steane (CSS) 符号に対するコヒーレント情報量を解析的に計算し、量子誤り訂正符号における復号化の相転移とそれに対応づけられる古典統計力学モデルにおける相転移現象の厳密な関係性を確立した。本研究は Jong Yeon Lee 博士（University of Illinois Urbana-Champaign）との共同研究である。（担当：丹羽）

定数オーバーヘッド魔法状態蒸留

誤り耐性量子計算の重要なサブルーチンの一つに魔法状態蒸留（magic state distillation）があるが、既存のプロトコルでは、達成したいエラー率に対してオーバーヘッドが対数多項式的に増大することが知られており、オーバーヘッドの大きさが課題となっていた。本研究では、効率的に量子エラー訂正を行えると同時に、漸近的に最適な符号パラメータを持ち、さらに非クリフォードゲートをトランスバーサルに実行可能であるという性質を併せ持った新たな量子符号を構成した。さらに、この符号を用いて定数オーバーヘッドを達成する新たな魔法状態蒸留プロトコルを提案した。本研究は、Adam Wills 氏（Massachusetts Institute of Technology）および Min-Hsiu Hsieh 博士（Foxconn）との共同研究である。（担当：山崎）

量子回路のロバストなエラー蓄積抑制アルゴリズムの実機検証

昨年度までの研究で、ランダムなパウリ演算を相関させて入れ子構造で量子回路に挿入することにより、ノイズのあるパウリゲートを用いても量子回路のゲート演算のエラー蓄積を抑制する量子アルゴリズムを提案し、挿入するパウリゲート自体のノイズについて強い仮定を置かなくてもエラーの抑制が達成できることを示した。今年度は、IBM-Q の 100 量子ビットの複数のマシンで実機検証を行い、エラー蓄積抑制の効果を確認することに成功した。本研究は吉岡信行博

士（東京大学）、井床利生博士（IBM）、Kunal Sharma 博士（IBM）、Antonio Mezzacapo 博士（IBM）との共同研究である。（担当：大嶽、Taranto、村尾）

5.2.4 分散型量子情報処理

エンタングルメント蒸留プロトコルにおける量子ビット使用量の削減

エンタングル状態を活用して分散量子計算を実行する場合、現実的には、エンタングル状態に含まれるノイズをエンタングル蒸留プロトコルによって低減する必要があるが、従来のエンタングルメント蒸留プロトコルに関する研究の多くは、各量子コンピュータで利用可能な量子ビット数の制限を考慮しておらず、実用性に乏しいという問題があった。本研究では、スタビライザー符号に基づいて構成されたエンタングルメント蒸留プロトコルにおいて、入力状態の準備と測定を時間的に分散して実行することで、量子ビット使用量を削減する手法を提案した。本研究は、Min-Hsiu Hsieh 博士（Foxconn）および Jun-Yi Wu 博士（Tamkang University）との共同研究である。（担当：松井、山崎、村尾）

代数幾何を応用したエンタングルメント消費量の数値計算手法

分散型量子情報処理を実装する際に消費されるエンタングルメントを最小化することは一般的に解くのが困難な最適化問題であるため、近似的な最小化を行う数値計算手法が提案されている。本研究では実装する分散型量子演算に特定の対称性がある場合に注目し、代数幾何学を応用することで高近似精度のエンタングルメントコスト最小化を行う数値計算手法を開発した。本研究は秋笛清石博士（NTT）、大坂博幸博士（立命館大学）との共同研究である。（担当：宮崎）

5.2.5 量子リソース理論

量子状態のイマジナリティの推定

量子状態に含まれる虚数成分をリソース理論に基づいて定量化することができ、定量化関数の一つとしてイマジナリティ相対エントロピーが知られている。本研究では、与えられた量子状態のイマジナリティ相対エントロピーの微小変化を精度よく推定するための量子測定方法と推定方法を導出した。（担当：宮崎）

一般化 Stein の補題と量子リソース理論の第二法則の証明

非独立同分布の量子仮説検定に関する重要な未解決問題であった一般化 Stein の補題 (generalized quantum Stein's lemma) を証明した。また、この結果を用いて、量子状態および古典量子通信路 (classical-quantum channel) の量子リソース理論に対する第二法則を示し、熱力学とのアナロジーを持つ量子リソース理論の定式化手法を構築した。本研究は、林正人教授 (The Chinese University of Hong Kong) との共同研究である。(担当: 山崎)

有限リソースを用いた効率的な量子系の冷却

マルコフ衝突モデルを用いて、有限リソースによる量子系の効率的な冷却の問題に取り組み、リソースのトレードオフについて考察するとともに、コヒーレント制御およびインコヒーレント制御に対応する量子ビットの最適な冷却プロトコルを提案した。熱力学長の概念の活用により交換戦略における熱拡散の限界を導出し、純粋状態準備の限界について議論した。本研究は、Patryk Lipka-Bartosik 博士 (University of Geneva)、Nayeli A. Rodríguez-Briones 博士 (TU Wien)、Martí Perarnau-Llobet 博士 (University of Geneva)、Nicolai Friis 博士 (TU Wien)、Marcus Huber 博士 (TU Wien)、Pharnam Bakhshinezhad 博士 (TU Wien) との共同研究である。(担当: Taranto)

開放量子系の状態を不変に保つ環境系とのユニタリ相互作用の解析

一般的な開放量子系の動力学は完全正直写像であり、環境系とのユニタリ相互作用と環境系のトレースアウトとして表すことができる。開放量子系の入出力状態を不変に保つ環境系とのユニタリ相互作用が持つ性質を考察し、そのエンタングルメント生成力を解析した。(担当: Eckstein、Taranto、村尾)

<受賞>

- [1] Tatsuki Odake and Satoshi Yoshida, Student Poster Award (Gold Prize) in the 24th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS24), "Analytical lower bound on the number of queries to a black-box unitary operation in deterministic exact transformations of unknown unitary operations", August 2024.
- [2] Hayata Yamasaki, The University of Tokyo Excellent Young Researcher (open call) from The University of Tokyo, March 2025.

<報文>

(原著論文)

- [3] P. Andres-Martinez, T. Forrer, D. Mills, J-Y. Wu, L. Henaut, K. Yamamoto, M. Murao, R. Duncan, Distributing circuits over heterogeneous, modular quantum computing network architectures, *Quantum Science and Technology* **9**, 045021 (2024).
 - [4] P. Taranto, M. T. Quintino, M. Murao, S. Milz, Characterising the Hierarchy of Multi-time Quantum Processes with Classical Memory, *Quantum* **8**, 1328 (2024).
 - [5] Koki Shiraishi, Hayata Yamasaki, Mio Murao, *Efficient decoding of stabilizer code by single-qubit local operations and classical communication*, *Physical Review A* **110**, 052617 (2024).
 - [6] Ryotaro Niwa, Jong Yeon Lee, *Coherent information for Calderbank-Shor-Steane codes under decoherence*, *Physical Review A*, **111**, 032402 (2025).
 - [7] Yonghae Lee, Joonwoo Bae, Hayata Yamasaki, Soojoon Lee, *Improved bounds on quantum uncommon information*, *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* **58**, 055304 (2025).
 - [8] Tatsuki Odake, Hlér Kristjánsson, Philip Taranto, Mio Murao, *Universal Algorithm for Transforming Hamiltonian Eigenvalues*, *Physical Review Research* **7**, 013331 (2025).
 - [9] Philip Taranto, Patryk Lipka-Bartosik, Nayeli A. Rodríguez-Briones, Martí Perarnau-Llobet, Nicolai Friis, Marcus Huber, Pharnam Bakhshinezhad, *Efficiently Cooling Quantum Systems with Finite Resources: Insights from Thermodynamic Geometry*, *Physical Review Letters* **134**, 070401 (2025).
 - [10] Zane M. Rossi, Jack L. Ceroni, and Isaac L. Chuang. *Modular quantum signal processing in many variables*. To appear in *Quantum* (accepted), arXiv:2309.16665.
 - [11] John M. Martyn, Zane M. Rossi, Kevin Z. Cheng, Yuan Liu, and Isaac L. Chuang. *Parallel quantum signal processing via polynomial factorization*, To appear in *Quantum* (accepted), arXiv:2409.19043.
- (学位論文)
- [12] Natsuto isogai, *Advantage of Quantum Machine Learning from General Computational Advantages* (一般的な量子計算の優位性に基づいた量子機械学習の優位性), Master thesis.
 - [13] Yu Tanaka, *Quantum Algorithms for Structured Data Represented by Decision Diagrams* (決定図で表現された構造化データのための量子アルゴリズム), Doctoral dissertation.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演 (selected)
- [14] Hayata Yamasaki, "Open problem: A perspective on generalized quantum Stein's lemma", *Towards Infinite Dimension and Beyond in Quantum Information (24w5274) workshop*, Granada, Spain, May 2024. (talk)

- [15] Satoshi Yoshida, Akihito Soeda, Mio Murao, “Optimal protocols for universal adjointation of isometry operations”, *Quantum Physics and Logic 2024 (QPL 2024)*, Buenos Aires, Argentina, July 2024. (talk)
- [16] Kohdai Kuroiwa, Ryuji Takagi, Gerardo Adesso, Hayata Yamasaki, “Every quantum helps: Operational advantage of quantum resources beyond convexity”, *Beyond IID in Information Theory 12*, Illinois, United States, July 2024. (talk)
- [17] Philip Taranto, Faraj Bakhshinezhad, Andreas Bluhm, Ralph Silva, Nicolai Friis, Maximilian P. E. Lock, Giuseppe Vitagliano, Felix C. Binder, Tiago Debarba, Emanuel Schwarzhans, Fabien Clivaz, Marcus Huber “Landauer vs. Nernst: What is the True Cost of Cooling a Quantum System?”, *Emergence of Classicality: New Perspectives on Measurements in Quantum Theory*, Dublin, Ireland, Jul 2024. (talk)
- [18] Hlér Kristjánsson, Tatsuki Otake, Satoshi Yoshida, Philip Taranto, Jessica Bavaresco, Marco Túlio Quintino, Mio Murao, “Simulating the quantum switch using causally ordered circuits requires at least an exponential overhead in query complexity”, *24th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS 2024)*, Sapporo, Japan, August 2024. (long talk)
- [19] Satoshi Yoshida, Akihito Soeda, Mio Murao, “Optimal protocols for universal adjointation of isometry operations”, *24th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS 2024)*, Sapporo, Japan, August 2024. (talk)
- [20] Hayata Yamasaki, Natsuto Isogai, Mio Murao, “Advantage of Quantum Machine Learning from General Computational Advantages”, *24th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2024)*, August 2024. (talk)
- [21] Shiro Tamiya, Masato Koashi, Hayata Yamasaki, “Polylog-time- and constant-space-overhead fault-tolerant quantum computation with quantum low-density parity-check codes”, *24th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2024)*, August 2024. (talk)
- [22] Satoshi Yoshida, Shiro Tamiya, Hayata Yamasaki, “Concatenate codes, save qubits”, *19th Conference On the Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography (TQC 2024)*, Okinawa, Japan, September 2024. (talk)
- [23] Zane M. Rossi, Isaac L. Chuang. “Multivariable quantum signal processing (M-QSP): prophecies of the two-headed oracle.” *Oberwolfach Arbeitsgemeinschaft: Quantum Signal Processing and Non-linear Fourier Analysis 2024*, Oberwolfach, Germany, October 2024. (talk)
- [24] Philip Taranto, Marco Túlio Quintino, Mio Murao, Simon Milz “Characterising the Hierarchy of Multi-time Quantum Processes with Classical Memory”, *From Quantum Materials to Quantum Information: Symposium on Trans-Scale Quantum Science and Quantum Materials Synthesis*, Okinawa, Japan, November 2024. (talk)
- [25] John M. Martyn, Zane M. Rossi, Kevin Z. Cheng, Yuan Liu, Isaac L. Chuang. “Parallel Quantum Signal Processing Via Polynomial Factorization.” *From Quantum Materials to Quantum Information: Symposium on Trans-Scale Quantum Science and Quantum Materials Synthesis (QMCI2024)*. Okinawa, Japan, November 2024. (talk)
- [26] John M. Martyn, Zane M. Rossi, Kevin Z. Cheng, Yuan Liu, Isaac L. Chuang. “Parallel Quantum Signal Processing Via Polynomial Factorization.” *International School and Symposium on Nanodevices and quantum Technologies (ISNTT2024)*. Atsugi, Japan, December 2024. (talk)
- [27] Masahito Hayashi, Hayata Yamasaki, “Generalized Quantum Stein’s Lemma and Second Law of Quantum Resource Theories”, *28th Annual Quantum Information Processing conference (QIP2025)*, North Carolina, United States, February 2025. (long plenary talk)
- [28] Adam Wills, Min-Hsiu Hsieh, Hayata Yamasaki, “Constant-Overhead Magic State Distillation”, *28th Annual Quantum Information Processing conference (QIP2025)*, North Carolina, United States, February 2025. (long plenary talk)
- [29] Takaya Matsuura, Nicolas C. Menicucci, Hayata Yamasaki, “Continuous-Variable Fault-Tolerant Quantum Computation under General Noise”, *28th Annual Quantum Information Processing conference (QIP2025)*, North Carolina, United States, February 2025. (talk)
- [30] Satoshi Yoshida, Yuki Koizumi, Michał Studziński, Marco Túlio Quintino, Mio Murao, “One-to-one Correspondence between Deterministic Port-Based Teleportation and Unitary Estimation”, *28th Annual Quantum Information Processing Conference (QIP 2025)*, Raleigh, USA, February 2025. (talk)
- [31] Tatsuki Otake, Satoshi Yoshida, Mio Murao, “Analytical lower bound on the number of queries to a black-box unitary operation in deterministic exact transformations of unknown unitary operations”, *28th Annual Quantum Information Processing Conference (QIP 2025)*, Raleigh, USA, February 2025. (talk)
- [32] Tatsuki Otake, Hlér Kristjánsson, Pilip Taranto, Mio Murao, “Universal algorithm for transforming eigenvalues”, *28th Annual Quantum Information Processing Conference (QIP 2025)*, Raleigh, USA, February 2025. (talk)
- [33] Satoshi Yoshida, Shiro Tamiya, Hayata Yamasaki, “Concatenate codes, save qubits”, *24th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS 2024)*, Sapporo, Japan, August 2024. (poster)

- [34] Tatsuki Otake, Satoshi Yoshida, Mio Murao, “Analytical lower bound on the number of queries to a black-box unitary operation in deterministic exact transformations of unknown unitary operations”, *24th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS 2024)*, Sapporo, Japan, August 2024. (poster)
- [35] Ryotaro Niwa, Jong Yeon Lee “Coherent information for CSS codes under decoherence”, *Quantum Innovation 2024*, Tokyo, Japan, October 2024. (poster)
- [36] Jisho Miyazaki, Seiseki Akibue, “Entanglement structure of real subspaces in composite complex Hilbert spaces”, *Quantum Innovation 2024*, Tokyo, Japan, November 2024. (poster)
- [37] Ryotaro Niwa, Jong Yeon Lee “Coherent information for CSS codes under decoherence”, *From Quantum Materials to Quantum Information 2024 (QMCI 2024)*, Okinawa, Japan, November 2024. (poster)
- [38] Kosuke Matsui, Jun-Yi Wu, Akihito Soeda, Mio Murao, “An entanglement-efficient distributed implementations for multiple global controlled-unitary gates and its application to quantum circuits” *From Quantum Materials to Quantum Information: Symposium on Trans-Scale Quantum Science and Quantum Materials Synthesis (QMCI2024)*, Okinawa, Japan, November 2024. (poster)
- [39] Frédéric Grosshans, Michał Horodecki, Mio Murao, Tomasz Młynik, Marco Túlio Quintino, Michał Studziński, Satoshi Yoshida, “Multicopy quantum state teleportation with application to storage and retrieval of quantum programs”, *28th Annual Quantum Information Processing Conference (QIP 2025)*, Raleigh, USA, February 2025. (poster)
- [40] Hayata Yamasaki, Natsuto Isogai, Mio Murao, “Advantage of Quantum Machine Learning from General Computational Advantages”, *28th Annual Quantum Information Processing conference (QIP2025)*, Raleigh, USA, February 2025. (poster)
- [41] Kosuke Matsui, Jun-Yi Wu, Hayata Yamasaki, Min-Hsiu Hsieh, Mio Murao, “Reducing qubit usage in entanglement distillation protocols” *28th Annual Quantum Information Processing Conference (QIP 2025)*, Raleigh, USA, February 2025. (poster)
- [42] John M. Martyn, Zane M. Rossi, Kevin Z. Cheng, Yuan Liu, Isaac L. Chuang. “Parallel Quantum Signal Processing Via Polynomial Factorization.” *Quantum Information Processing (QIP 2025)*. Raleigh, North Carolina, USA, February 2025. (poster)
- 招待講演
- [43] Mio Murao, “Higher-order quantum computation”, *Swiss-Japanese Quantum Symposium 2024*, Tokyo, Japan, June 2024.
- [44] Mio Murao, “Higher-order quantum computation”, *6th Seefeld Workshop on Quantum Information 2024*, Seefeld, Austria, June 2024.
- [45] Mio Murao, “Advanced fully-quantum learning”, *AAPPS Council Meeting*, Hong Kong, Hong Kong, July 2024.
- [46] Mio Murao, “Higher-order quantum computation and causality”, *Causalworlds 2024*, Waterloo, Canada, September 2024.
- [47] Mio Murao, “Entanglement-efficient bipartite-distributed quantum computing”, *Quantum Innovation 2024*, Chiyoda, Tokyo, November 2024.
- [48] Hayata Yamasaki, “Advantage of Quantum Machine Learning from General Computational Advantages”, *Workshop on quantum machine learning—mathematical foundations and applications*, Tokyo, Japan, August 2024.
- [49] Hayata Yamasaki, “New Frontiers of Low-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation”, *Quantinuum Fall 2024 training session*, Tokyo, Japan, October 2024.
- [50] Hayata Yamasaki, “New Frontiers of Low-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation”, *PCTS workshop Theoretical and experimental advances in quantum error correction*, Princeton, United States, February 2025.
- [51] Hayata Yamasaki, “Generalized Quantum Stein’s Lemma”, *The 6th RIKEN AIP Mathematics Joint Seminars (第6回理研 AIP 数学系合同セミナー)*, Kanagawa, Japan, February 2025.
- (国内会議)
- 一般講演
- [52] Takaya Matsuura, Nicolas C. Menicucci, Hayata Yamasaki, “Continuous-Variable Fault-Tolerant Quantum Computation under General Noise”, *The 51st Quantum Information Technology Symposium (QIT51)*, November 2024. (talk)
- [53] Jisho Miyazaki, “量子状態のイマジナリティの推定”, *Quantum Foundation 2025*, Chiba, Japan, March 2025. (poster)
- [54] Yu Tanaka, Hayata Yamasaki, Mio Murao, “Quantum State Preparation via Free Binary Decision Diagram”, *7th Symposium of the Q-LEAP Flagship Program for Photonics and Quantum Technologies (Q-LEAP Symposium 2024)*, Tokyo, Japan, March 2025. (poster)
- 招待講演
- [55] 村尾美緒, “量子プログラミングで量子系を学習して操る”, 第38回自然科学研究機構シンポジウム, Chiyoda, Tokyo, October 2024.
- [56] Hayata Yamasaki, “New Frontiers of Low-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation”, *The 51st Quantum Information Technology Symposium (QIT51)*, Kagawa, Japan, November 2024.

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、孤立量子系の熱平衡化などについて研究を行っている。また、非平衡開放系の新たなプラットフォームとして、量子測定とフィードバック制御が重要な役割を果たす浮揚ナノ粒子の系に注目し、研究を展開している。同時に私たちは、情報をキーワードとして量子論や統計力学の基礎概念を捉え直し、物理と情報を融合させた新分野の構築を目指す研究にも取り組んでいる。特に測定やフィードバック制御を行うもとの情報の流れに着目し、熱力学の第二法則や揺らぎの定理の一般化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

量子フィードバック制御のトポロジー

系の連続変形で不変な幾何学的性質を特徴づけるトポロジーは、対称性の自発的破れと並んで物質相の分類に大きな役割を果たしてきた。さらに、通常の熱平衡系にとどまらず、非平衡な系もトポロジーによって分類することが可能である。このような非平衡系のトポロジーは、トポロジカル相を人工的に創成・制御する方法を与えるのみならず、平衡系にはない非平衡特有のトポロジカル相の舞台ともなる。本研究では、測定とフィードバック制御を受ける量子系にトポロジーによる特徴づけを導入し、量子フィードバック制御によって作り出される非平衡トポロジカル相の新たなクラスを見出した [14]。特に、一粒子系の量子フィードバック制御を記述する量子チャンネルのトポロジーを記述する一般的な枠組みを与え、量子チャンネルの巻きつき数が量子 Hall 効果のエッジ状態とも類似したカイラルな輸送を特徴づけることを示した。さらに、量子チャンネルを対称性に基づいて系統的に分類し、射影測定による量子フィードバック制御は 10 種類の対称性クラスで分類されることを示した。具体的な例として、2010 年に行われた

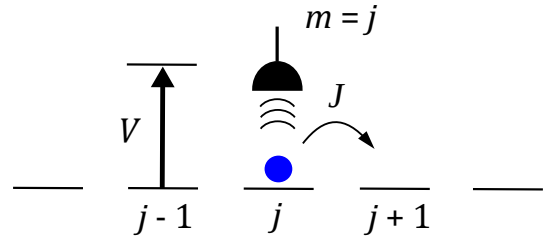


図 5.3.1: 量子フィードバック制御によってカイラルな輸送を起こすトポロジカル Maxwell デーモンモデル [14]。1 次元格子状上をホッピングする粒子の位置を測定し、測定された位置 m の左側のサイトのポテンシャルをフィードバック操作で引き上げることで、一方向輸送を実現する。

Maxwell デーモンの実証実験のセットアップを量子系に拡張することにより、量子フィードバック制御によってカイラル・ヘリカルな輸送を引き起こすトポロジカル Maxwell デーモンを構成した (図 5.3.1)。これらのトポロジカルフィードバック制御は、外界からの擾乱やノイズからトポロジーによって保護された安定なフィードバック制御を行う方法となることが期待される。

多成分 Hubbard 模型の厳密な固有状態とエルゴード性の弱い破れ

スピン $1/2$ を持つ通常の Hubbard 模型の一般化である多成分 Hubbard 模型は、 $SU(N)$ 群で記述されるエキゾチックな量子磁性や、量子色力学とも類似した多成分間の Cooper ペアリングの舞台として注目を集めている。多成分 Hubbard 模型は冷却原子気体を使って実現することが可能であり、実験的にも精力的に調べられている。一方で、多成分 Hubbard 模型の解析はその豊富な内部自由度のため難しく、厳密な結果も通常の Hubbard 模型と比べて限られていた。本研究では、そのような N 成分の Hubbard 模型について、任意の空間次元における厳密なエネルギー固有状態を構成した [9]。これは通常の 2 成分 (スピン $1/2$) Hubbard 模型における η ペアリング状態の一般化であるが、興味深いことに $SU(N)$ の量子磁性と多成分間ペアリングによる超流動の非対角長距離秩序が共存する振る舞いを示す。さらに、この厳密な固有状態は、孤立量子系の熱平衡化の十分条件である固有状態熱平衡化仮説を破る量子多体傷跡状態とみなせる。この結果は、通常の 2 成分の Hubbard 模型とは異なり、3 成分以上の Hubbard 模型においてはエルゴード性が弱く破れていることを示している。さらに、多成分 Hubbard 模型に適切な外場や散逸を加えることにより、このようなエルゴード性の弱い破れによる熱平衡化しないダイナミクスが実際

に観測可能であることを示した。

量子相転移における Yang-Lee の零点とエンタングルメント転移

Yang と Lee は、相転移における特異性の起源を理解するために、Yang-Lee の零点と呼ばれる分配関数の零点による一般的なアプローチを発展させた。彼らは、常磁性相と強磁性相の間の有限温度相転移を理解するために、複素磁場の存在下での古典 Ising 模型の分配関数の零点の分布を調べ、零点がフガシティの複素平面における単位円上にのみ分布すること、すなわち Lee-Yang の円定理を証明した。しかし、トポロジカルな量子相転移のように、量子相転移の中には熱力学的量の特異性では説明されない例外が存在する。我々は、エンタングルメントエントロピーの観点から一般の量子相転移に対する Yang-Lee 理論を展開し、Yang-Lee の零点分布の端がパリティ時間 (PT) 対称自由フェルミオン系におけるエンタングルメント転移点に対応することを厳密に証明した [12]。さらに、簡略化された Bethe 方程式に基づいた Bethe 仮設法を展開することにより、相互作用系である XXZ スピン鎖に対してもこの結果を一般化した。我々の結果は、エンタングルメント転移と Yang-Lee 端特異性との間に普遍的な対応関係が存在することを示している。

5.3.2 量子論・統計力学と情報理論・人工知能の融合

孤立量子多体系から取り出せる仕事の普遍的上限

フォン・ノイマンの先駆的な研究以来、量子力学から熱力学と統計力学を基礎づける理論的試みが数多くなされてきた。環境から孤立した量子多体系の測定・制御技術の進歩により、このような基本的な問題を実験的に検証することが可能になってきている。冷却原子気体やトラップされたイオンにおける熱化の観測に触発され、孤立量子系が熱化する条件、特に固有状態熱化仮説 (eigenstate thermalization hypothesis, ETH) に焦点が当てられている。この仮説は平衡アンサンブルだけでなく単一のエネルギー固有状態も局所的には熱平衡であることを主張しており、多くの系で数値的に検証されている。このような背景から、我々は熱力学のもう一つの中心的な問題である「系からどれだけの仕事を取り出せるか」に取り組んだ。従来の量子系からの仕事抽出に関する議論では、任意のユニタリ操作が可能であると仮定している。しかし、これを多体系で実現するためには非局所的かつ多体相互作用を持つハミルトニアンが必要であり、現実的ではない。さらに上記の議論は、有限温度において第二法則を満たす純粋状態は存在しないことを示唆しており、エネルギー固有状態はそれ自体熱的であるとする ETH と一見矛盾している。我々は、制限された操作のもと量子多体系から取り出せる仕

事の普遍的な上界を導出することで、熱化と仕事抽出の間の「矛盾」を解決した [10]。量子多体系から抽出可能な仕事 (エルゴトロピー) の最大値は、初期状態の局所的な非平衡性と量子操作によって引き起こされる局所的なエントロピーの減少によって上から押さえられる。導出した不等式を用いて、ETH が成り立つときにエネルギー固有状態が仕事抽出の意味での熱力学第二法則、すなわちプランクの原理を満たすことを証明した。

グラフ上の進化ゲーム理論における非平衡ダイナミクス

進化ゲーム理論は、プレイヤーの戦略的な行動の変化をゲーム理論の枠組みで説明する分野である。特に、囚人のジレンマと呼ばれるゲームでは、最も基本的なスキームでは各プレイヤーにとって非協力的な戦略を選択することが自身の利得の最大化のため合理的である。しかし、相互協力の方が相互非協力よりも各プレイヤーにより多くの利得を与える。この状況を社会的ジレンマと呼ぶ。近年この社会的ジレンマを解消し、相互協力を実現させるためのメカニズムが複数提案されている。そのメカニズムの一つがグラフ構造である。すなわち、グラフのノード上に配置されたプレイヤーがエッジで接続されたノード上のプレイヤーと繰り返しゲームを行い、プレイヤーが確率的に戦略を変更するダイナミクスを導入することで、協力関係が促進されることが近年明らかになった。我々は、利得及び戦略変更に関わるランダム性を変化させた場合の、協力的なプレイヤーの出現頻度を示す相図を得た [6]。相図には、三つの領域、つまり協力的なプレイヤーが全滅する領域、非協力的なプレイヤーが全滅する領域、両者が定常的に共存する領域が現れることを明らかにした。この共存領域では、隣接する協力的なプレイヤーたちが緻密なクラスター構造を複数形成することで、社会的ジレンマがある状況下でも非協力的な戦略が優勢になることを防ぐことを実証した。さらに、進化ゲームの数値シミュレーションを行い、正方格子、及び正則グラフ上の進化ゲームでは上記の共存領域はひし形の形を持つことを見出した。また、ひし形の共存領域は、4-正則グラフの場合の方が正方格子の場合よりも大きいということより、社会的ジレンマ下において、複雑なネットワーク構造は協力関係をより促進する効果があることを明らかにした。また、ひし形の共存領域の正則グラフ次数依存性を図示することで、次数が大きくなるほどひし形の領域は小さくなることを見出した。このことより、プレイヤー間の連結数が少ない構造が協力関係を促進するかを明らかにした。また、この結果は平均場近似により得られる定常解によって説明されることを示した。くわえて、ひし形の共存領域では、協力的なプレイヤーの時間変化の離散フーリエ変換から得られるパワースペクトルは、周波数に関して冪関数的に減衰することを示した。

<受賞>

- [1] 白石航暉: 分科会 優秀発表賞、第 69 回物性若手夏の学校、2024.08.03.
- [2] 法橋頭広: 分科会 優秀発表賞、第 69 回物性若手夏の学校、2024.08.03.
- [3] 小柳津敦: M1 優秀賞、理論物理学セミナー 2025、2025.2.22.

<報文>

(原著論文)

- [4] Huixia Gao, Kunkun Wang, Lei Xiao, Masaya Nakagawa, Norifumi Matsumoto, Dengke Qu, Haiqing Lin, Masahito Ueda, and Peng Xue: Experimental observation of the Yang-Lee quantum criticality in open quantum systems, *Phys. Rev. Lett.* **132**, 176601 (2024).
- [5] Cheng Shang and Hongchao Li: Resonance-dominant optomechanical entanglement in open quantum systems, *Phys. Rev. Applied* **21**, 044048 (2024).
- [6] Yuki Sakamoto and Masahito Ueda: Pink-noise dynamics in an evolutionary game on a regular graph, *Phys. Rev. E* **110**, 034110 (2024).
- [7] Liu Ziyin, Mingze Wang, Hongchao Li, Lei Wu: Parameter Symmetry and Emergence of Noise Equilibrium in Stochastic Training, *Neural Information Processing Systems (NeurIPS2024)*.
- [8] Koki Shiraishi, Hayata Yamasaki, and Mio Murao: Efficient local operations and classical communication extraction of quantum information encoded in stabilizer codes, *Phys. Rev. A* **110**, 052617 (2024).
- [9] Masaya Nakagawa, Hosho Katsura, and Masahito Ueda: Exact eigenstates of multicomponent Hubbard models: $SU(N)$ magnetic η pairing, weak ergodicity breaking, and partial integrability, *Phys. Rev. Research* **6**, 043259 (2024).
- [10] Akihiro Hokkyo and Masahito Ueda: Universal Upper Bound on Ergotropy and No-Go Theorem by the Eigenstate Thermalization Hypothesis, *Phys. Rev. Lett.* **134**, 010406 (2025).
- [11] Lennart Dabelow and Masahito Ueda: Symbolic equation solving via reinforcement learning, *Neurocomputing* **613**, 128732 (2025).
- [12] Hongchao Li: Yang-Lee zeros in quantum phase transitions: An entanglement perspective, *Phys. Rev. B* **111**, 045139 (2025).
- [13] Kazuki Yamamoto, Masaya Nakagawa, and Norio Kawakami: Correlation versus dissipation in a non-Hermitian Anderson impurity model, *Phys. Rev. B* **111**, 125157 (2025).
- [14] Masaya Nakagawa and Masahito Ueda: Topology of Discrete Quantum Feedback Control, *Phys. Rev. X* **15**, 021016 (2025).

(国内雑誌)

(学位論文)

- [15] Akihiro Hokkyo: Universal Upper Bound on Work Extractable from Quantum Many-Body Systems (修士論文).
- [16] Takanao Ishii: Quantum i.i.d. Steady States 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: Beyond-Hermitian Quantum Physics, Ultracold Atoms Japan 2024, Okinawa Institute of Science and Technology, Onna, Japan, 2024.4.12.
- [18] Masahito Ueda: Eigenstate thermalization hypothesis: locality and range of interactions, 49th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics (MECO), Hotel Kompas, Slovenia, 2024.4.22.
- [19] Masahito Ueda: Beyond-Hermitian quantum physics I (5/20), Beyond-Hermitian quantum physics II (5/21), Croucher Summer Course on Ultracold Atom Physics, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China, 2024.5.20, 21.
- [20] Masaya Nakagawa: Topology of discrete quantum feedback control, Recent Developments and Challenges in Topological Phases, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 2024.6.3.
- [21] Masahito Ueda: Non-Hermitian Quantum Physics, HQI-FQSP 1st Workshop “Perspectives of fundamental quantum science”, RIKEN, Saitama, Japan, 2024.6.19.
- [22] Masahito Ueda: Beyond-Hermitian Quantum Physics, Advances in Quantum Simulation and Sensing with Ultracold Gases, Physikzentrum, Bad Honnef, Germany, 2024.6.26.
- [23] Masaya Nakagawa: Topological Maxwell’s demon, The 14th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy, Stanford University, Stanford, USA, 2024.9.25.
- [24] Masahito Ueda: Topology of Discrete Feedback Control, Non-Hermitian topology, geometry and symmetry across physical platforms, The Simons Center for Geometry and Physics, NY, USA, 2024.9.26.
- [25] Masahito Ueda: Roles of locality and range of interactions on quantum thermalization, Quantum Thermodynamics Down Under (QTDU), University of Queensland’s City Campus, Brisbane, Australia, 2024.11.14.
- [26] Masaya Nakagawa: Topological Maxwell’s demon, From Quantum Materials to Quantum Information: Symposium on Trans-Scale Quantum Science and Quantum Materials Synthesis, Okinawa Institute of Science and Technology, Onna, Japan, 2024.11.14.

- [27] Masahito Ueda: Beyond-Hermitian quantum physics, CREST-EPiQS International Workshop 2024, The SODOH Higashiyama Kyoto, Kyoto, Japan, 2024.12.5.
- [28] Masahito Ueda: Topology of Discrete Feedback Control, CEMS Symposium on Quantum Information and Spintronics 2024, Sola City Conference Center, Tokyo, Japan, 2024.12.11.
- [29] Masahito Ueda: Topology of discrete feedback control: a new platform for exploring nonequilibrium phenomena, APS March Meeting, Anaheim Hilton, LA, USA, 2025.3.19

一般講演

- [30] Masaya Nakagawa: Topological Maxwell's demon, Quantum Simulation of Novel Phenomena with Ultracold Atoms and Molecules, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 2024.4.22.
- [31] Hongchao Li: Dissipative Superfluidity in a Molecular Bose-Einstein Condensate, NH2024 workshop, Kashiwa campus, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2024.7.12.
- [32] Akihiro Hokkyo and Masahito Ueda: Universal bound on Work Extractable from Quantum Many-Body Systems, From Quantum Materials to Quantum Information: Symposium on Trans-Scale Quantum Science and Quantum Materials Synthesis, Okinawa Institute of Science and Technology, Onna, Japan, 2024.11.14.
- [33] Hongchao Li: Dissipative Superfluidity in a Molecular Bose-Einstein Condensate, New Trends in Condensed Matter Theory, Kashiwa campus, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2024.12.09.
- [34] Koki Shiraishi: Theory of open quantum many-body systems, FoPM symposium, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2025.2.17.
- [35] Akihiro Hokkyo and Masahito Ueda: Universal bound on Work Extractable from Quantum Many-Body Systems, FoPM symposium, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2025.2.18.
- [36] Atsushi Oyaizu: Quantum-Classical Correspondence for Monitored Quantum Dynamics, FoPM symposium, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2025.2.18.
- [37] Hongchao Li: Dissipative Superfluidity in a Molecular Bose-Einstein Condensate, APS March Meeting, Anaheim Convention Center, LA, USA, 2025.3.18

(国内会議)

招待講演

- [38] 中川大也: 量子多体系を自在に制御できる時代の非平衡物理に向けて、非平衡融合研究会、東京大学、2025.2.7.

一般講演

- [39] 中川大也: 冷却原子における開放量子多体系の理論の基礎づけをめぐって、第 6 回冷却原子研究会「アトムの会」、伊豆山研修センター、2024.7.31.
- [40] 石田駿平、白石航暉、中川大也: グラフェンにおける光誘起異常ホール効果: 量子マスター方程式によるエッジ電流解析、日本物理学会第 79 回年次大会、北海道大学、2024.9.16.
- [41] 杉浦周磨、上田正仁: 浮揚ナノ粒子のフィードバック冷却法、日本物理学会第 79 回年次大会、北海道大学、2024.9.16.
- [42] 中川大也: 冷却原子系に対する多体の量子マスター方程式の導出について、日本物理学会第 79 回年次大会、北海道大学、2024.9.17.
- [43] 白石航暉、中川大也、森貴司: 開放量子多体系のデコヒーレンスと熱平衡化: Davies 方程式の回転波近似に依らない導出、日本物理学会第 79 回年次大会、北海道大学、2024.9.17.
- [44] 法橋顕広、上田正仁: 量子多体系から取り出せる仕事の普遍的な上界、日本物理学会第 79 回年次大会、北海道大学、2024.9.17.
- [45] 石井敬直、上田正仁: 定常状態が量子 i.i.d. 状態となる開放量子系の非平衡統計力学、日本物理学会第 79 回年次大会、北海道大学、2024.9.19.
- [46] 法橋顕広: 時間反転対称性と Wigner-Araki-Yanase 定理、Quantum Foundations 2025、東京大学柏キャンパス、2025.03.10.
- [47] 法橋顕広、山口瑞樹、千葉侑哉: $S = 1$ bilinear-biquadratic 鎖における局所保存量の不在証明、日本物理学会 2025 年春季大会、オンライン、2025.3.18.

(セミナー)

- [48] 中川大也: 量子フィードバック制御のトポロジー、駒場物性セミナー、東京大学、2024.5.17.
- [49] 白石航暉: Quantum master equation for many-body systems: Derivation based on the Lieb-Robinson bound、セミナー、東京大学、2024.5.29.
- [50] Hongchao Li: Dissipative Superfluidity in a Molecular Bose-Einstein Condensate、統計力学セミナー、東京大学、2024.6.6.
- [51] Hongchao Li: Dissipative Superfluidity in a Molecular Bose-Einstein Condensate、セミナー、清華大学、2024.8.4.
- [52] 中川大也: Topology of discrete quantum feedback control、セミナー、理化学研究所、2024.10.23.
- [53] 法橋顕広: 量子多体系から取り出せる仕事の普遍的な上界と熱力学第二法則、芝浦 - 量子基礎論・量子情報オンラインセミナー、オンライン、2025.01.28.
- [54] 中川大也: Topological feedback control、セミナー、東京大学、2025.3.14.

(その他)

- [55] 石井敬直: 定常状態が量子 i.i.d. 状態となる開放量子系の非平衡統計力学、第 69 回物性若手夏の学校、ホテルたつき、2024.08.03.

- [56] 白石航暉: 物性物理のための量子マスター方程式入門、第 69 回物性若手夏の学校、ホテルたつき、2024.08.03.
- [57] 法橋顕広: 量子多体系から取り出せる仕事の普遍的な上界、第 69 回物性若手夏の学校、ホテルたつき、2024.08.03.
- [58] 小柳津敦: 被測定下の量子系における量子古典対応、理論物理学セミナー 2025、2025.2.22.
- [59] 石井敬直、甲田昌也: 開放量子多体系の NISQ シミュレーション、計算物理春の学校 2025、沖縄県市町村自治会館、2025.03.12.
- [60] 法橋顕広: Universal Upper Bound on Work Extractable from Quantum Many-Body Systems, ER-ATO・学術変革 B 合同合宿会議プログラム、磐梯熱海温泉ホテル華の湯 (風の杜)、2025.03.27.

5.4 横山順一研究室

当研究室は永年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並びに重力波物理学の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きましたが、2023 年 11 月より横山の本務がカブリ数物連携宇宙研究機構に移り、同機構長とビッグバン宇宙国際研究センター長を兼務しているため、大学院生は希望に応じて柏と本郷に分散して滞在しています。

5.4.1 初期宇宙論と重力理論

インフレーション宇宙における曲率揺らぎのループ補正と原始ブラックホール形成

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) で観測されている初期揺らぎの振幅は 10^{-5} 程度の小さなものなので、その高次補正は一般に僅少にとどまると考えられている。しかし、もし初期宇宙に多数の原始ブラックホール (PBH) が生成したとすると、曲率摂動の 2 乗振幅が $\mathcal{O}(0.01)$ という、CMB で観測される値よりも 7 桁も大きな値を取った波長域があったことになる。このような大きな揺らぎは、短時間にスローロール (SR) 条件を破ることで実現できる。そのような可能性の中で最もよく知られているのが、超スローロール (USR) インフレーションである。われわれは、PBH 形成のための大振幅の小スケール揺らぎと、CMB で観測されるような小振幅の大スケール揺らぎの両方が実現されるように、SR-USR-SR 領域を経て発展する単純な単一場インフレーションモデルにおいて曲率摂動の 3 点相互作用によって誘起されるバイスペクトルとパワースペクトルに対する 1 ループ補正を計算した。その結果、PBH 形成を実現する単一場インフレーションモデルは、CMB の観測にかかる長波長においても大きな量子補正を受け、単一場インフレーションにおいて十

分な量の PBH を生成することは実質的に不可能であることを示した [2, 3, 4, 11]。

ブラックホール存在下の真空崩壊の実時間解析

真空崩壊は虚時間を用いたユークリッド経路積分法により定式化されてきたが、重力崩壊から生成される物理的なブラックホール存在下では、系が非静的となることからこれを適用することができない。そこで本研究では、真空崩壊を真空泡の対生成過程として扱い、ディラックの拘束系量子化とヌル測地線法を用いて実時間で定式化し直すことで、真空崩壊の確率を直接解析した。結果として、ユークリッド経路積分法と一致する崩壊確率を導出し、これによりブラックホールが真空相転移を触媒する効果が確かに存在することを裏付けた [12]。

R² インフレーション再加熱期におけるヒッグス場の役割

インフレーション中に引き伸ばされたヒッグス場の真空期待値がその後の再加熱機構にどのように影響を及ぼすかを調べた。再加熱期間が短いモデルにおいては、非等曲率ゆらぎが大きくなってしまい CMB の観測から棄却される可能性があることを指摘した。対して、 R^2 インフレーションモデルのような、再加熱期間が長いモデルにおいては、非等曲率ゆらぎが非常に抑制され、観測と矛盾しないことを示した [17, 37, 38]。

Einstein–Cartan 重力における $f(R)$ 理論

Einstein–Cartan 重力の $f(R)$ 理論では、metric formalism と異なり、伝搬する自由度が存在しないことが知られている。トーションの成分からなるトポロジカル項をつけて、スカラー曲率 R との組み合わせからスカラーの自由度を取り出し、さらに、それによるインフレーションを検討した [5]。その続編として、同シナリオでの再加熱やバリオン非対称生成を評価する準備として、トーションの成分と物質カレントの結合項を一般的に議論して、それによるカレントとスカラーの結合項を計算した。[18, 19, 20]

スケールフリー重力理論と宇宙論

Brans–Dicke 重力は、Einstein 理論と異なり、ラグランジアンにスケールがあるパラメータが入らない理論である。Weyl 変換すると、Einstein 理論と一つの質量のないスカラーになる。そのまま素粒子標準模型を入れると、fifth force によって強く制限されるが、標準模型の次元のあるパラメータを場で表し、さらに量子化する時、繰り込みスケールを場に依存させれば、質量のないスカラー場が標準模型の粒子と相互作用しなくなり、fifth force による制限

が解消できる (no-scale Brans–Dicke 重力)。 R^2 項や Higgs 場の non-minimal coupling、右手ニュートリノを入れて、そのシナリオでのインフレーション、再加熱、バリオン数生成とダークマターについて議論した [6]。

5.4.2 観測的宇宙論

宇宙複屈折と暗黒成分探査

近年、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測から、CMB 光子の偏光面が現在までに 0.3 度程度回転しているという兆候が報告されている。これは宇宙複屈折と呼ばれる現象でパリティ非対称の物理と関連し、新物理探索の鍵として注目されている。特に、暗黒成分の候補でもあるアクシオン様粒子 (ALP) が有力な起源の候補として盛んに研究されている。宇宙複屈折の回転角の大きさは ALP と光子の結合定数などのパラメータを決定する上で重要な観測量となる。現状の CMB のデータ解析からは、本来測定される角度に 180 度の位相不定性がある。我々はその点を明確に指摘し、CMB パワースペクトルのより詳細な解析などから、その縮退はある程度解くことができることを示した [21, 22]。また電波銀河を統計的に解析することにより、CMB とは独立かつ相補的に宇宙複屈折を検証する手法について研究を行っている [25]

アンドロメダ銀河の絶対距離測定

近年の宇宙観測の精密化に伴い、ハッブル定数の測定に関して CMB を用いる手法と近傍の天体を用いる手法とで有意な不一致が生じている (ハッブル定数問題)。真実であれば標準模型の綻びであるとして注目を集める一方、近傍天体の距離決定手法に起因する系統誤差の可能性も指摘されている。近傍天体の距離を決定する際は、さまざまな距離指標天体を用いるが、それらは絶対的に距離が定まった銀河を用いて較正される必要がある。この基礎的な較正を行う銀河 (アンカー銀河) は現在数個にとどまり潜在的な系統誤差要因となっている。我々は、新たなアンカー銀河として有力なアンドロメダ銀河に対し、食連星法による絶対距離測定を行うべく、すばる望遠鏡による観測とデータ解析を行っている [23, 46]。将来的に 1% 精度で絶対距離を決定し、アンカー銀河として利用可能にする。

CMOS センサによる時間軸天文学

これまで天文観測は主に CCD センサを用いて行われてきたが、近年はより読み出し時間の短い CMOS センサを搭載した観測装置も登場し、宇宙現象の動画観測が可能となりつつある。我々は東京大学木曽観測所の広視野 CMOS カメラ「Tomo-e Gozen」を用い、夜空の秒～分スケールの天体現象の網羅的な

探査を目指したサーベイを検討した。これまでの議論に基づき、本年度より 1 視野あたり 30 分程度の定点動画観測を行う新たなサーベイを開始し、今後のデータの活用等さらなる議論を進めている [23, 35]。

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。通常の ICA は各信号源の間に線形関係を仮定するが、横山は 2023 年度に任意の非線形相互作用のある場合の ICA を開発した。本年度はこれを KAGRA の実データに対して適用し、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を削減できることを示した。

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、上野は全著者論文の著者に名を連ねている [7, 8, 9, 10]。また、LIGO, Virgo と KAGRA は協定を結んでいるため、第三観測期以降の論文は LVK 論文として KAGRA の認定著者は著者になっている。現在、LIGO, Virgo, KAGRA は完全統合し、International Gravitational Wave Observatory Network (IGWN) を構築することを協議中であるが、横山は KAGRA のスポークスパーソン役であるかぐら科学会議議長任期終了後も、IGWN 準備委員会の KAGRA からの代表委員の一員を務めている。

<受賞>

- [1] J. Kristiano, 理学系研究科研究奨励賞 (博士課程), 理学系研究科, 2025 年 3 月 24 日。

<報文>

(原著論文)

- [2] J. Kristiano and J. Yokoyama, “Constraining Primordial Black Hole Formation from Single-Field Inflation”, *Physical Review Letters* **132**, 221003 (2024).
- [3] J. Kristiano and J. Yokoyama, “Note on the bispectrum and one-loop corrections in single-field inflation with primordial black hole formation”, *Physical Review D* **109**, 103541 (2024).
- [4] J. Kristiano and J. Yokoyama, “Comparing sharp and smooth transitions of the second slow-roll parameter in single-field inflation”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **10** (2024) 036.
- [5] M. He, M. Hong and K. Mukaida, “Starobinsky inflation and beyond in Einstein-Cartan gravity,” *JCAP* **05**, 107 (2024)

- [6] M. Hong, K. Mukaida and T. T. Yanagida, “No-scale Brans-Dicke Gravity – ultralight scalar boson & heavy inflaton,” [arXiv:2503.18648 [hep-ph]].
- [7] A. G. Abac *et al.* [LIGO Scientific, KAGRA and VIRGO], “A Search Using GEO600 for Gravitational Waves Coincident with Fast Radio Bursts from SGR 1935+2154,” *Astrophys. J.* **977** (2024) no.2, 255.
- [8] G. Raman *et al.* [LIGO Scientific, Virgo, KAGRA, Virgo, Swift and Swift-BAT/GUANO], “Swift-BAT GUANO Follow-up of Gravitational-wave Triggers in the Third LIGO–Virgo–KAGRA Observing Run,” *Astrophys. J.* **980** (2025) no.2, 207
- [9] A. G. Abac *et al.* [LIGO Scientific, Virgo, KAGRA and VIRGO], “Observation of Gravitational Waves from the Coalescence of a 2.5–4.5 $M_{\odot}$ Compact Object and a Neutron Star,” *Astrophys. J. Lett.* **970** (2024) no.2, L34
- [10] A. G. Abac *et al.* [KAGRA, LIGO Scientific and VIRGO], “Ultralight vector dark matter search using data from the KAGRA O3GK run,” *Phys. Rev. D* **110** (2024) no.4, 042001
- (学位論文)
- [11] J. Kristiano, “Quantum Nature of Cosmological Perturbations from Small to Large Scales” (博士論文) 2024 年 9 月.
- [12] 林拓未 “Real-time analysis of vacuum decay in curved spacetime” 「曲がった時空における真空崩壊の実時間解析」 (博士論文) 2025 年 3 月
- (著書)
- [13] 横山順一 (監修) 『図だけでわかる！ 宇宙の終わり』 ニュートンプレス 2025 年 1 月 96 ページ
- [14] 横山順一 (監修) 『ニュートン超図解新書 最強に面白い 宇宙の終わり』 ニュートンプレス 2024 年 7 月 200 ページ
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [15] J. Kristiano, “Cosmological correlators in slow-roll violating inflation”, Correlators in Taiwan, National Taiwan University, Taiwan, 2024/12/2-6.
- [16] J. Kristiano, “Comparing sharp and smooth transitions of the second slow-roll parameter in single-field inflation”, The 27th International Conference on Particle Physics and Cosmology (COSMO), Kyoto University, Japan, 2024/10/21-25.
- [17] Hyun Jeong, “The role of Higgs field after R2 inflation” (poster), COSMO’24, 2024/10/21-25.
- [18] Minxi He, Muzi Hong, Kyohei Mukaida, Inflation and current coupling in the Einstein-Cartan gravity, DESY theory workshop, 2024.09
- [19] Minxi He, Muzi Hong, Kyohei Mukaida, Inflation and current coupling in the Einstein-Cartan gravity, COSMO24, 2024.10
- [20] Minxi He, Muzi Hong, Kyohei Mukaida, Inflation and current coupling in the Einstein-Cartan gravity, The 33rd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 2024.12
- [21] F.Naokawa, “ $n\pi$ ambiguity of cosmic birefringence and its effect on ALP search”, Workshop on Cosmic Indicators of Dark Matter 2024, Tohoku Univ., 2024/10/16.
- [22] F.Naokawa, “The phase ambiguity of cosmic birefringence”, COSMO’24 Kyoto, Kyoto Univ., 2024/10/24.
- [23] F.Naokawa, “The distance measurement to M31 from detached eclipsing binaries with HSC”, Subaru Users Meeting FY2024, NAOJ Mitaka, 2025/1/28.
- [24] F.Naokawa, “Cosmic Birefringence : a hint of new physics ?”, 2nd FoPM International Symposium, Univ. of Tokyo, 2025/2/18.
- [25] F.Naokawa, “Probing Dark Energy, Axion like Particle and Cosmic Birefringence with low frequency radio survey”, Liaison Meeting with MPI and NAOJ, NAOJ Mitaka, 2025/3/13.
- [26] F.Naokawa, “Exploring cosmology with forthcoming CMB observation ~Cosmic birefringence & Rayleigh scattering ~”, CMB Core-to-Core (C2C) Final Meeting, Univ. of Tokyo Yaesu, 2025/3/14.
- 招待講演
- [27] J. Kristiano, “Cosmological correlators in slow-roll violating inflation”, Looping in the Primordial Universe Workshop, The European Organization for Nuclear Research (CERN), Switzerland, 2024/10/28-11/1.
- [28] J. Kristiano, “Single-field inflation and primordial black holes”, Quantum Aspects of Inflationary Cosmology Workshop, Munich Institute for Astro-, Particle and BioPhysics (MIAPbP), Germany, 2024/6/24-7/19.
- [29] J. Yokoyama “Stochastic inflation and beyond” Starobinsky memorial online conference “Quantum gravity and all of that” 2024/4/20.
- [30] J. Yokoyama “Loop corrections to non-standard inflation,” CosPA2024 Ningbo University, China, 2024/6/15.
- [31] J. Yokoyama “Quantum aspects of inflationary cosmology” 2024 Joint Annual Conference of Physical Societies in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, Macao, 2024/7/30
- [32] J. Yokoyama “Quantum loop effects in inflationary cosmology,” Pacific 2024, Gamp Station, UCLA, Tahiti, 2024/8/28.

- [33] J. Yokoyama “Quantum aspects of inflationary cosmology” ICTP-AP winter school, UCAS, Beijing, 2024/11/28.
- (国内会議)
- 一般講演
- [34] 国内会議
- [35] 直川史寛, ”トモエ動画データを救え！〜カイロス計画の紹介& 1 分間サーベイの提案〜”, 木曾シュミットシンポジウム 2024, 木曾福島保健センター, 2024/5/15.
- [36] 直川史寛, ”宇宙最古の光の左右対称性から探る暗黒物質・暗黒エネルギー”, 特別研究員-DC フレンドシップミーティング 2024 in Kyoto, 国立京都国際会館, 2024/6/15.
- [37] 鄭 玄, ”R2 インフレーション再加熱期におけるヒッグス場の役割”, 日本物理学会 第 79 回年次大会, 2024/9/16-19.
- [38] Hyun Jeong, ”The role of Higgs field after R2 inflation” (poster), JGRC2025, 2025/3/10-11.
- 招待講演
- [39] J. Kristiano, “Inflationary background renormalization”, Mini workshop on gravity and cosmology, 京大基研, 2025/3/27-28.
- (セミナー)
- [40] J. Kristiano, “Cosmological correlators in slow-roll violating inflation”, Theoretical Physics Group Seminar, Scuola Normale Superiore, 2024/11/4.
- [41] J. Kristiano, “Single-field inflation with large fluctuations”, 早稲田大学, 2024/7/10.
- [42] J. Yokoyama “Loop corrections to non-standard inflation,” Ecole Normale Supérieure, Paris, 2024/9/27.
- [43] J. Yokoyama “Introduction of Kavli IPMU and quantum aspects of inflationary cosmology,” Institute of Cosmology and Gravity, University of Portsmouth, 2024/10/10.
- [44] J. Yokoyama “Loop correction to non-standard inflation,” Institute of Cosmology and Gravity, University of Portsmouth, 2024/10/11.
- [45] F.Naokawa, “Cosmic Birefringence ~its redshift evolution and applications to dark sector search ~”, Osaka Univ., 2024/11/13.
- [46] F.Naokawa, “Distance measurement of M31”, NAOJ Hilo Hawaii, 2024/12/5.
- [47] 直川史寛, “宇宙複屈折と新物理探索”, 千葉大学, 2025/2/6.
- [48] 直川史寛, “宇宙複屈折：新物理探索の新たな糸口？”, 大阪大学, 2025/2/10.
- (アウトリーチ)
- [49] Press release by The University of Tokyo, “The case of the missing black holes”, 2024/5/29.
- [50] J. Kristiano, “Deep Dive Into Primordial Black Holes”, Youtube Podcast Interview by UNIVERSE TODAY, 2024/6/21.
- [51] 横山順一 「輪廻する宇宙」東京大学柏キャンパス一般公開 Kavli IPMU 講演会 2024/10/26

6 一般物理実験

6.1 江尻・辻井研究室

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。2024 年度は、LHW で生成した高速電子のエネルギーを定量的に測定するために、熱電対付きの可動モリブデン円筒をプラズマに挿入し測定した。その結果、入射 LHW パワーの 1 割程度の無視できないパワーがモリブデン円筒に来ていること、用いるアンテナや、測定位置によってパワーが異なることがわかった。プラズマ電流維持時に、硬 X 線 (HX) 信号には時折バーストが現れること、そのエネルギーは、放電中の全 X 線エネルギーの半分程度にも達し、電流駆動過程において重要である可能性がある。新たな計測手法として線積分トムソン散乱法を開発しており、1 視線での初期的な実験結果が得られた。理論研究では、積分型誘電率を用いた新たな波動計算手法の開発を進めている。量子科学技術研究開発機構 (QST) との共同研究として、電子サイクロトロン波補助立ち上げ時の加熱と平衡の解析を行っており、理論と TST-2 での実験結果が矛盾しないことが確かめられた。九州大学との共同研究では、トムソン散乱計測の高性能化をテーマにしている。

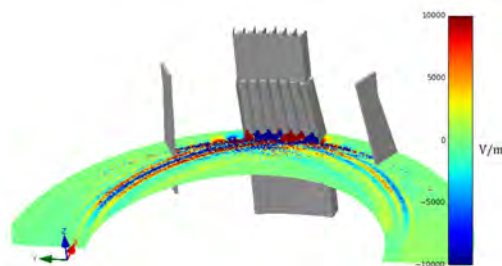


図 6.1.1: LH 波動電場の背景磁場に平行な成分のシミュレーション結果。

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

低域混成波モデリング

LHW の伝播・吸収を定量的に評価するには全波計算が有用である。従来の全波計算の多くはスペクトル法を利用していたが、これはアンテナや周辺プラズマのような複雑な計算領域を扱うのに適していない。これに対して、有限要素法による全波計算は複雑な領域を効率的に記述することができる。実際の実験においては、アンテナにおける波動の励起や、周辺プラズマと波動の相互作用が重要である。したがって、有限要素法による全波計算は、周辺領域と炉心プラズマを合わせた統一的なモデリングを可能にする大きな利点がある。図 6.1.1 は有限要素法を用いて行なった、現実的なアンテナによる LHW 励起の計算結果である。

プラズマへの高周波印加時に特徴的な現象として RF シースが挙げられる。一般にプラズマ対向機器にはシースと呼ばれる領域が存在するが、大電力高周波印加時には熱的シースよりもシース電圧が大きな RF シースが形成される。この電圧はイオンをプラズマ対向機器に対して加速する向きであり、プラズマへの不純物流入の原因になりうる。この RF シースを全波計算に境界条件として導入する計算手法が開発されている [S. Shiraiwa et al., Nucl. Fusion **63**, 026024 (2023)]。この手法を用いて TST-2 に設置されている進行波アンテナのモデリングを行った。図 6.1.2 に 100 kW 印加時のシース電圧を示す。アンテナリミタにおいて最大で数 100 V 程度のシース電圧が形成された。

ターゲットプローブによる高速電子分布推定

TST-2 における高速電子フラックス直接測定のための容器内診断装置として、モリブデンターゲットプローブシステムを開発した。このシステムは伸長と回転により 2 次元空間を走査できる。高速電子から受け取るエネルギーは、取り付けられた熱電対間の温度差を積分することで得られる。受熱器の設計パラメータは、3 次元熱伝導シミュレーションによって

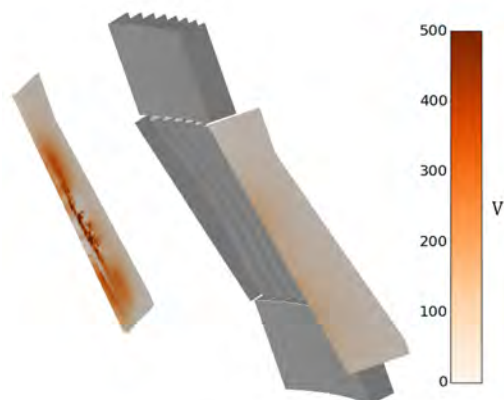


図 6.1.2: LH 波動によりアンテナリミタで形成される RF シース電圧のシミュレーション結果。

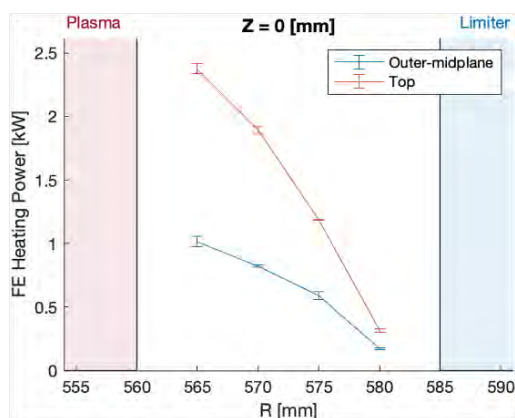


図 6.1.3: 外側赤道面 (outer-midplane) 及び上側 (top) 入射電流駆動シナリオにおけるターゲットプローブ受熱電力の径方向依存性。

決定した。誤差源を含むシステム全体のシミュレーションを高速化するために、1次元モデルを開発した。このモデルとベンチテストによって測定精度を検証した。

LHW プラズマ中の高速電子の特性を調査するために、複数のプラズマシナリオにおけるプローブの高速電子による受熱電力を評価した。2つの LHW アンテナによって生成されたプラズマを比較した結果を図 6.1.3 に示す。外側赤道面アンテナと比較して、上部アンテナプラズマにおいて、ターゲットプローブの受熱電力が大幅に増加した。この比較ではプラズマパラメータはほぼ同一に維持された。したがって、受熱電力が高いのは、上側アンテナによる高速電子の径方向輸送が強いためと考えられる。

プローブ受熱電力の LHW 入射電力依存性は弱かった。しかし、LHW 電力の減少によってプラズマ位置が内側に移動するにつれて、プローブ受熱電力は大幅に低下することが観測された。受熱電力は高温のプラズマからの距離の増大とともに減少するため、

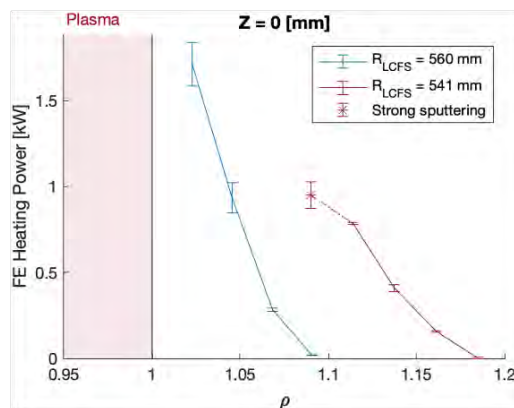


図 6.1.4: 最外殻磁気面を変化させた場合のターゲットプローブ受熱電力の規格化小半径依存性。

最外殻磁気面の距離に対する依存性を調べた。その結果を図 6.1.4 に示す。最外殻磁気面が 541 mm の場合、560 mm の場合と比較して受熱電力が概ね高く、ターゲットがバルクプラズマから比較的離れている場合でも強いスパッタリングが発生した。これは TST-2 の LHW プラズマでは珍しいことであり、今後原因を調べていく必要がある。

6.1.3 誘導駆動プラズマ

6.1.4 ダブルパストムソン散乱による異方的電子温度計測

安全性（後方ビームによる YAG レーザー装置の損傷を回避）と性能（十分な効率を持つ集光光学系）に優れたダブルパストムソン散乱システムを構築した。ダブルパストムソン散乱では、前方散乱光と後方散乱光を計測することで、磁場の方向に垂直な方向と平行な方向の温度の異方性を推定できる。TST-2 のオーミックプラズマを計測したところ、電子温度の異方性が観測された。大半径 $R = 193 \text{ mm}$ と 525 mm を除くほぼすべての測定位置で異方的温度分布が見られた。異方的な温度が見られなかった 2 つ位置はプラズマの境界付近であるため、信号強度が弱く、迷光が強いため不確実性が大きい。

前方ビームと後方ビームはプラズマ中で約 10 mm 異なる位置を通過するため、位置の違いによる温度差が前方ビームと後方ビームの散乱測定に系統的な温度差を引き起こし、隣接する 2 つの測定位置間の詳細な構造は測定できなかった。電子温度勾配の影響を可能な限り低減するために、コンパクトなファイバー配置を構成し、ファイバー間隔を 30–50 mm から 15–30 mm に狭めた。計測された電子温度異方性はスピッツァー抵抗から推定される理論値と同程度であったが、いくつかの位置では理論値からのずれが見られた。プラズマ境界領域 ($R > 470 \text{ mm}$) における不一致の理由としては、統計的磁場構造が生

じていること、また、プラズマの有効電荷や周回電場分布の不確定性が考えられる。

6.1.5 計測器開発

線積分トムソン散乱計測

原型炉では中性粒子流などの影響を避けるため、光学部品をプラズマから遠ざける必要があり、その結果立体角が小さくなる。これを補うため、後方散乱光を用いた線積分トムソン散乱計測法を開発している。原型炉におけるプラズマ測定を模擬するため、TST-2 装置に 1 視線の線積分トムソン散乱システムを導入した。従来のトムソン散乱システムとの主な違いは、入射系と集光系の光軸が同軸上にある点である。このため、迷光が従来トムソンよりも大きくなるという課題があった。この迷光を抑制するため、ポリクロメーターへの 1065 nm ショートパスフィルターの設置、光学系のマスクやチューブの設置、AR (Anti-Reflection) コーティング窓の導入などを行った。測定の結果、1065 nm ショートパスフィルターは、AOI (Angle of incidence) 12.5° 以上で迷光となりうる波長 1064 nm の信号強度を 90 % 以上減少させることがわかった。光学系のマスクやチューブも、迷光を約 90 % 程度抑制した。AR コーティング窓は窓表面でのレーザーの反射を防止するが、レーザーのフルエンスが窓の損傷閾値を超えると、窓表面に傷がつく。窓表面の損傷を避けるため、凹レンズと凸レンズを用いてレーザーの断面を拡大・縮小することで、レーザーフルエンスが窓の損傷閾値を下回るような光学系の構成位置を理論計算から求めた。これらの対策を施した線積分トムソン散乱システムの構成において、立体角分布測定、ラマン散乱測定、プラズマ測定を行った。立体角分布は線積分の要素を擬似的に表し、理論計算と測定結果は良好な一致を示した。ラマン散乱測定では、窒素圧力を変えて測定を行い、各窒素圧力における信号強度の関係は線形であった。プラズマ測定では、後方散乱を用いた線積分トムソン散乱配置において初めて小さな実効的空間分解能を実証し、電子温度の測定に成功した。

プラズマ内部磁場分布計測のためのマイクロ波偏光計

効率的な LHW 電流駆動シナリオを実現するためには、数値計算が必要である。数値計算モデルを検証し、計算精度を向上させるために、プラズマ内部の磁場分布を測定するためのマイクロ波偏光計を開発している。2024 年度は、ノイズ低減のための計測器の改良と、偏光計の性能を検証するための LH 実験を行なった。まず、入射伝送路の改造により、プラズマに入射されるプローブ光が楕円度の小さい理想的な円偏光となるように改善した。さらに、局所発振器を新たに加えることで、計測信号を安定化した。改良した偏光計 LHW プラズマを計測した結果を図 6.1.5 に示す。信号振幅は安定していることが

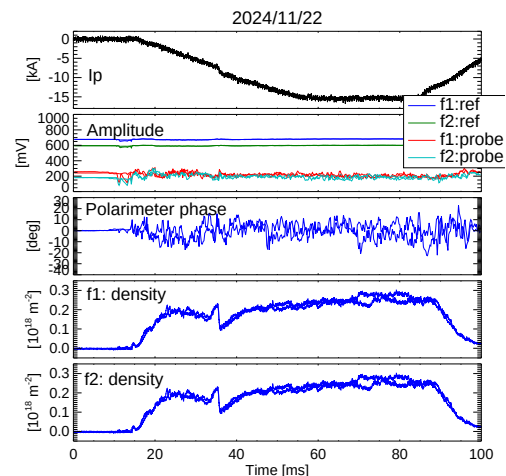


図 6.1.5: 偏光計による LHW プラズマの計測結果。偏光計と同一の視線で、新たに線積分電子密度が計測可能となった。偏光信号振幅 (amplitude) は安定している。偏光信号 (polarimeter phase) の雑音は従来の半分程度に低減したが、更なる感度向上が必要。

わかる。局所発振器の追加により、同じ計測器で新たに電子密度が計測できるようになった。偏光信号のノイズは改造前と比べて半分程度の 7° 程度に減少したが、LHW プラズマの内部磁場分布計測には更なるノイズの低減が必要である。

トロイダル電流計測器

プラズマに駆動された電流密度分布を計測するため、プローブの開発を行った。プラズマに極力影響を与えず、より近い領域へプローブを導入させて磁場の計測を行うため、直径 4.5 mm、高さ 3 mm である小型のコイルを用いてプローブを作成した。しかし、プラズマ内部で計測を行った際に、プローブが熱で融けるという事例が発生した。プローブの材料を耐熱素材に変更し、プローブを収納する管にカバーを追加するといった対策を行った (図 6.1.6)。当初は垂直磁場の分布計測から、電流密度分布の評価を試みていた。計測による電流密度は、トロイダル方向に流れる電流の総和に対し、符号が整合しなかった。一方でプラズマ電流の変化と整合する時間発展も観測された。電流密度計測の結果にはプラズマ電流と整合する点と矛盾する点があり、電流密度の評価には垂直磁場だけでなく、水平磁場の評価も必要であるという洞察を得た。新たにプローブ 2 本による計測システムを構築し、プラズマ近傍で垂直磁場と水平磁場の分布計測を行った。プラズマ電流のピークである時刻 40–80 ms で電流密度の平均を求めると、 -5.8 kA/m^2 となっていた。一方、プラズマのない時刻 0–10 ms, 110–120 ms で平均を求めると -0.65 kA/m^2 , 0.82 kA/m^2 と 0 に近い値とな

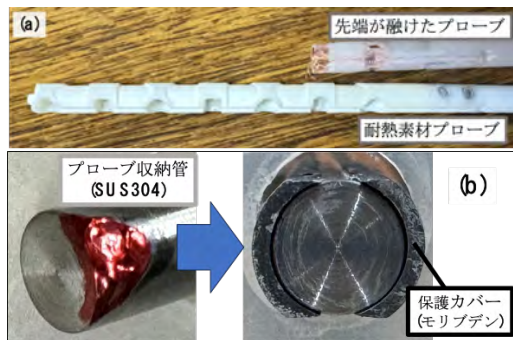


図 6.1.6: プローブの熱対策. (a) プローブの素材変更. (b) プローブ収納管にカバー追加.

ていた. 計測からノイズレベルを大きく超える信号は得られなかったが, プラズマ電流値と符合が一致し, 整合の取れた変化を持つ, 計測位置に電流の存在を示唆する結果を得ることができた.

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 装置では, トムソン散乱計測器を担当している, 2024 年度は, スイッチドキャパシタ方式の新たなデータ収集装置を導入して, データ収集機能を増力した. さらに, ポリクロメータを新たに 2 式増設することで, 同時空間測定点数を 6 点から 8 点に増やした. これにより様々なサイズのプラズマを十分な空間分解で測定することが可能となった. QUEST 装置では 6 時間を超える長時間放電が可能であり, 連続的に精度良く電子密度・電子温度の計測を行うには光軸を一定に保つことが必須である. この光軸調整を安全かつ最低限の作業労力で行うために自動レーザーアライメントシステムを開発した. このシステムは, レーザースポット位置を解析するためのプログラム (Python) と遠隔駆動ミラーを制御するためのプログラム (LabVIEW) を組み合わせたものであり, 検証実験を行い, 光軸の位置が一定に制御できることを確認した.

電子サイクロトロン波補助トカマク立ち上げ

JT-60SA のような大型の超伝導装置では中心ソレノイド (Central Solenoid, CS) 単独で安定な立ち上げに必要な磁束掃引を確保するのが困難であるため, 電子サイクロトロン波を用いて立ち上げを補助することが行われる. 従来は CS 単独での立ち上げで用いるのと同様のヌル磁場配位が用いられてきたが, より EC 補助立ち上げに適した配位を探究する共同研究を QST と行なっている. 2024 年度は軌道平均運動論による無衝突電子輸送コードの EC 波動モデルを改善するとともに, 記述の相対論化を行なった.

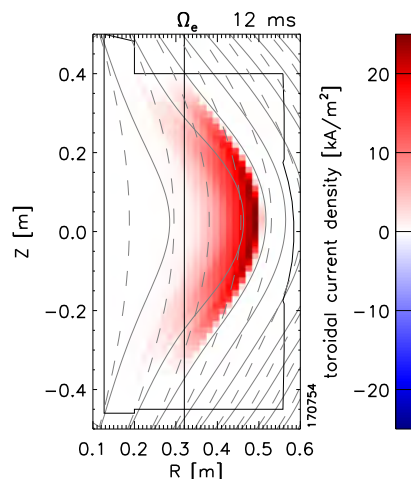


図 6.1.7: EC 補助オーミック立ち上げにおける拡張 MHD モデルによる閉磁気面形成直前の平衡磁場再構成結果 (実線). 波線はコイル電流のみから計算した (真空) 磁場.

計算予測は従来と定性的には変わらなかったが, より現実的な計算を行うことが可能となった.

軌道平均運動論解析をもとに, 立ち上げ時の無衝突電子分布のモデル関数を書き下し, 我々のグループで開発した拡張 MHD 平衡計算コードに実装した. これにより従来は解析ができなかった閉磁気面形成前の平衡配位の推定が可能となった. 結果を図 6.1.7 に示す. また, 同解析から実験計測と整合する無衝突電子の定量的な位相空間分布も初めて得ることができた (図 6.1.8).

6.1.7 FAST プロジェクトの立ち上げ

国内のいくつかの大学とスタートアップ企業とともに FAST プロジェクトを立ち上げた. FAST は, 2030 年代に発電技術を実証する統合工学試験装置であり, 当研究室は, 装置の設計パラメータを準 0 次元モデルを用いて探索した. その結果, 比較的小型 (主半径 2 m 程度) の低アスペクト比 (アスペクト比 ~ 2.3) の高温超伝導コイルを用いたトカマクで, 50 MW 程度の中性粒子入射加熱を用いることで, 要求仕様 (核融合出力 50–100 MW, 中性子壁負荷 0.3–1 MW/m²) を満たせることがわかった. 現在, 多数の研究者でチームを作り, 概念設計を行っている.

<報文>

(原著論文)

- [1] M. Fukumoto, Q. Yue, K. Hanada, S. Kojima, T. Nakano, N. Yoshida, R. Ikezoe, Y. Nagashima, T. Ido, T. Onchi, H. Idei, H. Iguchi, T. Komiyama, T. Shikama, A. Ejiri, S. Masuzaki,

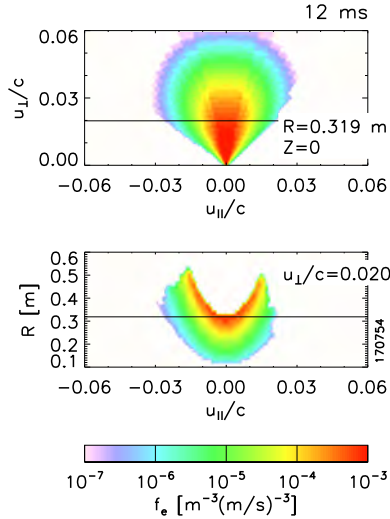


図 6.1.8: 拡張 MHD モデルにより推定された無衝突電子の位相空間分布. (上) 運動量空間分布. (下) プラズマ主半径と磁力線方向運動量に対する分布.

- M. Sakamoto, Y. Ueda, K. Kuroda, K. Kono, S. Shimabukuro and A. Higashijima, Nucl. Fusion **64**, 066022 (2024).
- [2] N. Tsujii, A. Ejiri, Y. Ko, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Lin, K. Shinohara, O. Watanabe, S. Jang, T. Hidano, Y. Shirasawa, Y. Tian, F. Adachi and C.P. Moeller, Nucl. Fusion **64**, 066023 (2024).
- [3] F. Adachi, N. Tsujii, A. Ejiri, K. Shinohara, S. Jang, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Lin, Z. Jiang, Y. Tian, Y. Jiang, S. Wang, Y. Xiong and M. Yoshida, Plasma Fus. Res. **19**, 1403026 (2024).
- [4] T. Murakami, S. Kojima, K. Hanada, H. Idei, T. Ido, R. Ikezoe, M. Hasegawa, T. Onchi, K. Kono, K. Kuroda and A. Ejiri, Plasma Phys. Control. Fusion **66**, 115016 (2024).

(学位論文)

- [5] Y. Peng: “A study of electron temperature anisotropy in TST-2 Ohmic heated tokamak plasmas by using a double-pass Thomson scattering measurement”
- [6] Y. Jiang: “Improvement of a Microwave Polarimeter for the measurement of Plasma Density and Magnetic Field on TST-2”

(著書)

- [7] 核融合エネルギーフォーラム書籍編集委員会, 江尻晶, 南貴司, 谷口正樹, 武田秀太郎世界が驚く技術革命「フュージョンエネルギー」, シーアンドアール研究所 (176 pages, Jan. 11, 2025)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [8] Y. Tian, JT-60SA International Fusion School 2024, QST Naka, Aug. 26–Sep. 7, 2024.
- [9] F. Adachi, JT-60SA International Fusion School 2024, QST Naka, Aug. 26–Sep. 7, 2024.
- [10] A. Ejiri, N. Ashikawa, T. Fujita, K. Hanada, S. Ide, H. Igami, S. Konishi, S. Murakami, Y. Ono, K. Seko, Y. Takase, H. Tanaka, Y. Todo, H. Tsutsui, 22nd International Spherical Torus Workshop (ISTW2024), Oxford, UK, October 21–24, 2024.
- [11] Y. Takase, A. Ejiri, T. Fujita, C. Wilson, 22nd International Spherical Torus Workshop (ISTW2024), Oxford, UK, October 21–24, 2024.
- [12] K. Hanada, M. Hasegawa, Y. Qilin, N. Yoshida, S. Kawasaki, Y. Oya, M. Oya, T. Shikama, I. Takagi, H. Idei, T. Ido, R. Ikezoe, Y. Nagashima, T. Onchi, T. Kinoshita, K. Kuroda, K. Kono, T. Nagata, A. Higashijima, S. Shimabukuro, I. Niya, I. Sekiya, K. Nakamura, A. Ejiri, S. Murakami, 22nd International Spherical Torus Workshop (ISTW2024) Oxford, UK, October 21–24, 2024.
- [13] Y. Peng, Z. Jiang, A. Ejiri, Y. Lin, Y. Takechi, K. Shinohara, T. Ido, K. Kono, Y. Nagasuna, The 8th QST International Symposium, Aomori, Japan, Nov. 14–15, 2024.
- [14] Y. Tian, 13th ITER International School, Nagoya, Dec. 9–13, 2024.
- [15] F. Adachi, 13th ITER International School, Nagoya, Dec. 9–13, 2024.
- [16] T. Yamaguchi, H. Idei, T. Onchi, O. Watanabe, A. Fukuyama, M. Hasegawa, R. Miyata, R. Ikezoe, K. Hanada, T. Ido, T. Kinoshita, Y. Nagashima, A. Ejiri and S. Murakami, Japan-Korea Workshop on Physics and Technology of Heating and Current Drive, NIFS, Japan, Feb. 17–18, 2025.
- [17] N. Tsujii, A. Ejiri, K. Shinohara, Y. Peng, Y. Lin, Z. Jiang, Y. Tian, F. Adachi, Y. Jiang, S. Wang, M. Yoshida and Y. Takechi, Japan-Korea Workshop on Physics and Technology of Heating and Current Drive, NIFS, Japan, Feb. 17–18 (2025).
- [18] A. Ejiri and FAST team, 13th QUEST Workshop “RF startup and sustainment in Spherical Tokamak,” Kyushu Univ., Japan, Feb. 27–28, 2025.
- [19] F. Adachi, N. Tsujii, A. Ejiri, K. Shinohara, Y. Peng, Y. Lin, Z. Jiang, Y. Tian, Y. Jiang, S. Wang, M. Yoshida and Y. Takechi, US-Japan Workshop on RF Heating and Current Drive Physics, Kyoto University Uji campus, Mar. 17–19, 2025.

(国内会議)

一般講演

- [20] 安立史弥, 「先進トカマクの物理的・工学的課題の検討」研究会, 核融合科学研究所, 2024 年 9 月 18–19 日.
- [21] 江尻晶, ST2035 検討チーム, ST2035 プロジェクト, 「先進トカマクの物理的・工学的課題の検討」研究会, 核融合科学研究所, 2024 年 9 月 18–19 日.
- [22] 江尻晶, シンポジウム「S6 小型球状トカマク核融合炉が拓く未来」趣旨説明および ST2035 (仮称) プロジェクトの概要, 第 41 回プラズマ・核融合学会年会, 東京, 2024 年 11 月 17–20 日.
- [23] 池添竜也, 文川優蘭, 平田真史, 江角直道, 東郷訓, 出射浩, 花田和明, 井戸毅, 長谷川真, 永島芳彦, 恩地拓己, 木下稔基, 四竈泰一, 江尻晶, 第 41 回プラズマ・核融合学会年会, 東京, 2024 年 11 月 17–20 日.
- [24] 辻井直人, 江尻晶, 篠原孝司, 彭翊, 林彥廷, 蔣正男, 田一鳴, 安立史弥, 江陽光, 王圣予, 吉田勝, 武智雄大, 第 41 回プラズマ・核融合学会年会, 東京, 2024 年 11 月 17–20 日.
- [25] 安立史弥, 辻井直人, 江尻晶, 篠原孝司, 彭翊, 林彥廷, 蔣正男, 田一鳴, 王圣予, 江陽光, 熊一錦, 吉田勝, 武智雄大, 第 41 回プラズマ・核融合学会年会, 東京, 2024 年 11 月 17–20 日.
- [26] 篠原孝司, 谷啓二, 林伸彦, 隅田脩平, 江尻晶, 辻井直人, 鈴木正信, 西村征也, ビャワーゲアンドレアス, 第 41 回プラズマ・核融合学会年会, 東京, 2024 年 11 月 17–20 日.
- [27] 彭翊, 江尻晶, 篠原孝司, 辻井直人, 林彥廷, 蔣正男, 田一鳴, 安立史弥, 熊一錦, 江陽光, 王圣予, 吉田勝, 武智雄大, 井戸毅, 河野香, 永島芳彦, 第 41 回プラズマ・核融合学会年会, 東京, 2024 年 11 月 17–20 日.
- [28] 河野香, 井戸毅, 木下稔基, Peng Yi, Jiang Zhengnan, 江尻晶, 第 41 回プラズマ・核融合学会年会, 東京, 2024 年 11 月 17–20 日.
- [29] 江尻晶, 土地利用とエネルギーと核融合, 学融合研究プロジェクト (GX) 研究会, 柏, 2024 年 12 月 2 日.
- [30] 江尻晶, 芦川直子, 藤田隆明, 花田和明, 伊庭野健造, 伊神弘恵, 久米祥文, 小西哲之, 小野靖, 世古圭, 高瀬雄一, 田中仁, 飛田健次, 筒井広明, 日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 18–21 日.
- [31] 辻井直人, 第 14 回 ICRF 加熱研究会「ICRF 加熱装置の高性能化と将来応用」, NIFS, 土岐, 2025 年 3 月 27 日.
- [32] Y. Jiang, 第 14 回 ICRF 加熱研究会「ICRF 加熱装置の高性能化と将来応用」, NIFS, 土岐, 2025 年 3 月 27 日.
- [33] S. Wang, 第 14 回 ICRF 加熱研究会「ICRF 加熱装置の高性能化と将来応用」, NIFS, 土岐, 2025 年 3 月 27 日.
- 招待講演
- [34] 江尻晶, フュージョンエネルギーの早期実用化を目指して, 「産学協創推進室開設シンポジウム」- 研究科の価値, 新たな価値づくりへ -, 柏の葉, 2024 年 10 月 2 日.
- (セミナー)

- [35] A. Ejiri, Seminar at National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, Dec. 10, 2024.
- [36] A. Ejiri, Interferometry & Reflectometry & Polarimetry, 1st Asian School on Advanced Plasma Diagnostics for Magnetic Fusion Experiments, NIFS Toki, Japan, Feb. 19–21 (2025).

6.2 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「6.2.1 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、昨年度と重複する内容であるが、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。

6.2.1 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次元のおよび3次元な分子の配向が可能であることの原理実証実験に成功した。これらの実験は、分子の回転周期に比べてレーザー光のパルス幅が十分長い、いわゆる断熱領域で行われたものである。この場合、分子の配向度は、レーザー強度に追従して高くなり、レーザー強度が最大のときに配向度も最大となる。一方、光電子の観測や高精度の分光実験では、高強度レーザー電場が存在しない状況で試料分子の配向を実現することが望まれる。本研究室では、静電場とレーザー電場の併用による手法が断熱領域で有効なことに着目し、分子の回転周期 T_{rot} に比べて立ち上がりのゆっくりしたパルスをピーク強度付近で急峻に遮断することにより、断熱領域での配向度と同等の配向度を高強度レーザー電場が存在しない状況下で実現する全く新しい手法を提案した (Y. Sugawara *et al.*, Phys. Rev. A **77**, 031403(R) (2008))。この手法を実現すべく、ピーク強度付近で急峻に遮断されるパルスをプラズマシャッターと呼ばれる手法を用いて整形する技術を開発し、レーザー電場の存在しない条件下で分子配向を実現することに初めて成功した (A. Goban *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 013001 (2008))。

一方、本研究室では先に、分子の回転周期よりも十分長いパルス幅をもつ高強度非共鳴2波長レーザー電場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、 $\text{C}_6\text{H}_5\text{I}$ 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 $\text{C}_6\text{H}_5\text{I}$ 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「分子内電子のアト秒立体ダイナミクス (attosecond 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「分子内電子のアト秒立体ダイナミクス」研究のさらなる推進を目指している。

まず、初期回転量子状態を選別した非対称コマ分子 ($\text{C}_6\text{H}_5\text{I}$) 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存在しない条件下での1次元配向制御に世界で初めて成功した (J. H. Mun *et al.*, Phys. Rev. A **89**, 051402(R) (2014))。さらに、静電場と楕円偏光したレーザー電場の併用により、レーザー電場の遮断直後にレーザー電場の存在しない条件下での3次元配向制御の実現に世界で初めて成功した (D. Takei *et al.*, Phys. Rev. A **94**, 013401 (2016))。この成果は、高い配向度、レーザー電場の存在しない条件下での配向制御、及び、非対称コマ分子の向きの完全な制御である3次元配向制御の3条件を満たし、静電場とレーザー電場を併用する手法の「完成形」の実現を意味している。

その後、上述した非共鳴2波長レーザー電場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 $\lambda = 1064 \text{ nm}$) とその第2高調波 ($\lambda = 532 \text{ nm}$) 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。この論文は、2022 年中に The Journal of Chemical Physics に掲載されたすべての論文の中で、most-read articles の一つにランクされた (Communications の 4 番目にランクされた)。: <https://aipinfo.org/1XPS-86LK8-B78EBE51BE49626E8FIPS CDA24847A29AE2CA2/cr.aspx>

6.2.2 レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展：今年度の成果

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。

この目標の達成を長年にわたり阻んできたボトルネックは、2 波長間の相対位相を維持できるプラズマシャッター技術の開発であった。昨年度、このボトルネックが解消され、フィールドフリーな条件下での配向制御に成功する大きな進展があった。このプラズマシャッターを用いて超高速で遮断される 2 波長レーザーパルスを用いることにより、パルスの遮断後と試料分子 OCS の回転周期後 (約 82 ps 後) にフィールドフリーな条件下での配向制御に成功した。

したがって、「完成形」の実現に向けた今後の課題は上記の (1) 高い配向度の達成と (2) 気体分子の向きの完全な制御である 3 次元配向制御となった。今年度は、(1) 高い配向度の達成に関して、大きな進展があった。昨年度の実験では、試料分子 OCS は、回転量子状態を選別していない thermal ensemble であったが、自作の分子偏向器を用いて回転量子状態を選別した試料 (試料分子の大部分が回転基底状態にある) を用いることにより配向度の向上に努めた。その結果、配向度 $|\langle \cos \theta \rangle| > 0.23$ の達成に成功した。配向度のレーザー強度依存性は完全には飽和していないため、レーザー強度を上げることで、さらに高い配向度の達成も期待できる。この様に回転量子状態を選別した OCS 分子に対し、2 波長レーザーパルス用のプラズマシャッターを適用し、レーザーパルス遮断後の配列度 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ と配向度 $\langle \cos \theta \rangle$ のダイナミクスを観測した。今年度は、プラズマシャッターでプラズマの生成に使用するフェムト秒 Ti:sapphire レーザー増幅システムの励起用 LD の劣化により、十分な出力が得られなかったため、エチレングリコールのシート上の断面積を大きくすることが困難だった。これに伴い、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) からなる 2 波長レーザーパルスの強度は、エチレングリコール上での自爆を防ぐため、パルスエネルギーを抑制せざるを得なかった。この結果、プラズマシャッター適用時の配向度は $|\langle \cos \theta \rangle| \sim 0.1$ であったが、原理実証実験時 (K. Oda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 213901 (2010)) と比べると、2.5 倍程度高い配向度を

達成できた。また、プラズマシャッター適用後には、後述する様に、観測された配列・配向のダイナミクスから、ある程度の残留電場の存在が認められた。

実際にプラズマシャッターを適用して、2 波長レーザーパルスを超高速で遮断した後の配列度 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ のダイナミクスは、プラズマシャッターの開発とその性能評価について報告した論文 (Je Hoi Mun *et al.*, Opt. Express **27**, 19130–19140 (2019)) の Fig. 3 と consistent であり、回転周期 T_{rot} までに 3 回の quantum revivals が観測できた。一方、回転量子状態を選別した OCS 分子に対する 2 波長レーザーパルスを超高速で遮断した後の配向度 $\langle \cos \theta \rangle$ のダイナミクスについては、今回世界で初めて観測することに成功した。ほぼ回転周期後に、レーザーパルスを遮断する前と同程度の配向度の達成を確認するとともに、 $T_{\text{rot}}/4$ と $3T_{\text{rot}}/4$ 付近に $\langle \cos \theta \rangle$ の変調が現れることが初めて明らかになった。この観測結果は、OCS 分子の回転基底状態を仮定して時間依存 Schrödinger 方程式を解いた結果と定性的によく一致し、その妥当性を検証することができた。また、2 波長レーザーパルスを遮断後の残留電場 (10%程度未満) の影響は、quantum revival の周期が T_{rot} よりも数 ps 遅れること、及び、 $T_{\text{rot}}/4$ と $3T_{\text{rot}}/4$ 付近に観測される $\langle \cos \theta \rangle$ の強度比が、残留電場がないときは対称であるのに対し、残留電場があると非対称になる効果として現れることが明らかになった。

配向のダイナミクスが非断熱的な場合に配向度を向上させるための手法として、2 波長レーザーパルスの強度比の最適化 (J. H. Mun and H. Sakai, Phys. Rev. A **98**, 013404 (2018))、及び、直線偏光の基本波と楕円偏光の第 2 高調波の組み合わせ (Md. M. Hossain and H. Sakai, J. Chem. Phys. **153**, 104102 (2020)) を用いることにより、配向度をさらに向上できると期待される。「完成形」の実現に必要な条件 (2) の気体分子の向きの完全な制御である 3 次元配向制御は、直線偏光の基本波と楕円偏光の第 2 高調波の組み合わせを利用すれば、分子面が楕円偏光面に揃うので、自然な形で実現できると期待される。即ち、「完成形」の実現を確実に見込める状況となった。

6.2.3 全光学的手法による鏡像異性体の選択的配向制御技術の提案

上記で報告した全光学的分子配向制御法を用いて最も高い配向度を実現できるのは、配向のダイナミクスが断熱的な場合である。近年、パルス幅 10 ns 程度の 2 波長レーザーパルスを用いても配向のダイナミクスは完全に断熱的ではなく、その様な場合にもできるだけ配向度を上げる手法として、酒井グループでは、2 波長パルスの強度比を最適化すること (J. H. Mun and H. Sakai, Phys. Rev. A **98**, 013404 (2018)) に加え、直線偏光した基本波と楕円偏光した第 2 高調波の組み合わせが有効であることを提案した (M. M. Hossain and H. Sakai, J. Chem. Phys. **153**, 104102 (2020))。分子配向制御技術では、ポテンシャルの非対称性を最大化するため、一般に 2 波長間の相対位相 Φ は 0 (または π) を仮定して数値計

算などを行って来た。今年度、この相対位相差 Φ の関数 $\sin \Phi$ と $\cos \Phi$ を含むすべての項の寄与を活かすため $\Phi = \pi/4$ を選ぶことにより、超分極率の非対角成分の符号がアミノ酸の L 体と D 体で異なるため、鏡像異性体の選択的配向制御 (互いに鏡像異性体の関係にある L 体と D 体を逆向きに配向させる) 技術に利用できることを明らかにした。また、 $\Phi = 5\pi/4$ とすれば、 $\Phi = \pi/4$ の時と比べ、L 体と D 体の向きの上下と左右を容易に反転できる。

今後は、実際にパルス幅 10 ns 程度の非共鳴 2 波長レーザーパルス、具体的には直線偏光した基本波と楕円偏光した第 2 高調波の組み合わせを用いて、鏡像異性体の選択的配向制御 (互いに鏡像異性体の関係にある L 体と D 体を逆向きに配向させる) 技術の開発を目指す。さらには、最近開発に成功した 2 波長間の相対位相を安定化できるプラズマシャッター技術を適用し、完全にフィールドフリーな条件下で鏡像異性体が選択的に配向したアミノ酸や糖の分子アンサンブルを用意する技術を開発する。その後、地球上の有用なアミノ酸が L 体だけなのに対し、糖が D 体だけである非対称性の起源の探究へと研究を展開したいと考えている。

6.2.4 その他

ここで報告した研究成果は、酒井広文研究室のメンバーと客員共同研究員として受け入れた Md. Maruf Hossain 氏、S セメスターの特別実験 I で配属された飯塚大希君、及び理学部研修生として受け入れた牧野かれんさん (国際基督教大学 4 年) の活躍によるものです。

酒井広文は、今年度末で定年退職します。25 年半の長きにわたり、物理学教室にお世話になりました。数多くの優秀な大学院生らと研究ができたため、かなりの研究成果をあげることができました。また、事務の方々にも大変お世話になりました。お世話になったすべての方々に深く感謝申し上げます。どうもありがとうございました。

<原著論文>

- [1] Weronika O. Razmus, Felix Allum, James Harries, Yoshiaki Kumagai, Kiyonobu Nagaya, Surjendu Bhattacharyya, Mathew Britton, Mark Brouard, Philip H. Bucksbaum, Kieran Cheung, Stuart W. Crane, Mizuho Fushitani, Ian Gabalski, Tatsuo Gejo, Aaron Ghrist, David Heathcote, Yasumasa Hikosaka, Akiyoshi Hishikawa, Paul Hockett, Ellen Jones, Edwin Kukk, Hiroshi Iwayama, Huynh V. S. Lam, Joseph W. McManus, Dennis Milesevic, Jochen Mikosch, Shinichirou Minemoto, Akinobu Niozu, Andrew J. Orr-Ewing, Shigeki Owada, Daniel Rolles, Artem Rudenko, Dave Townsend, Kiyoshi Ueda, James Unwin, Claire Vallance, Anbu Venkatachalam, Shin-ichi Wada, Tiffany Walmsley, Emily M. Warne, Joanne L. Woodhouse, Michael Burt, Michael N. R. Ashfold, Russell S. Minns and Ruairidh Forbes, "Exploring the ultrafast and isomer-dependent photodissociation of iodothiophenes *via* site-selective ionization," *Phys. Chem. Chem. Phys.* **26**, 15725–15737 (2024).
- <国際会議>
- [2] Shinichirou Minemoto, Naoki Hara, and Hirofumi Sakai, "All-optical field-free molecular orientation," presented at the 29th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Shizuoka City Culture Hall, Shizuoka, June 12th, 2024.
 - [3] S. Minemoto, N. Hara, M. M. Hossain, and H. Sakai, "Orientation dynamics of OCS molecules in a field-free space," to be presented at the 34th International Conference on Photonic. Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC 2025), Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan, July 29–August 5, 2025.
- <学会発表>
- (招待講演)
- [4] 酒井広文、「全光学的分子配向制御技術の進展と広がり」、第 7 回超高速光エレクトロニクス研究会で発表予定、電気通信大学 80 周年記念会館 3 階フォーラム、2025 年 4 月 18 日 (金).
- (一般講演)
- [5] 峰本紳一郎、原直樹、酒井広文、「ナノ秒 2 色レーザーパルスを用いた完全に外場がない空間での分子配向制御」、第 18 回分子科学討論会、京都大学吉田キャンパス、2024 年 9 月 20 日 (金).
 - [6] Md. Maruf Hossain, Hirofumi Sakai, "Three-dimensional enantioselective orientation of alanine molecules with intense nonresonant two-color laser pulses," レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会、広島国際会議場 (平和記念公園内)、2025 年 1 月 21 日 (火).
 - [7] 峰本紳一郎、原直樹、酒井広文、「全光学的手法による外場のない空間での分子配向制御における配向度の向上に向けて」、レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会、広島国際会議場 (平和記念公園内)、2025 年 1 月 21 日 (火).
 - [8] 峰本紳一郎、原直樹、Hossain Md. Maruf、酒井広文、「外場のない空間における分子アンサンブルの配向度の向上」、2025 年第 75 回応用物理学会春季学術講演会、東京理科大学野田キャンパス、2025 年 3 月 14 日 (金).
 - [9] 大島隆之介、長谷川龍之介、高橋悠太、峰本紳一郎、関川太郎、「円偏光高次高調波光源を用いたキラリティ判別法の開発」、2025 年第 75 回応用物理学会春季学術講演会、東京理科大学野田キャンパス、2025 年 3 月 15 日 (土).

6.3 相川研究室

相川研究室では、主に真空中に浮揚させた超低温ナノ粒子を利用し、その量子力学的振る舞いを探る研究を進めている。その背景にあるのは、巨視的物体の運動を主に光によって制御し、センサーへの応用や基礎物理の探究を行う、オプトメカニクスと呼ばれる分野である。浮揚ナノ粒子系は、環境からの高い隔離性を有し、物体の運動の量子性を探るために適していること、また捕捉ポテンシャルを自在に制御できること、といった利点をもつ。近年、浮揚ナノ粒子の運動を観測・制御する研究が急速に進展し、運動の量子基底状態（エネルギー的に最も低い状態）へと冷却することが可能となりつつある。このような実験系を利用し、電子・原子・分子などにおいて正しさが実証されてきた量子力学が、どの程度大きな物体まで成り立つのかを探る基礎的研究や、ナノ粒子をセンサーとして用いてダークマターや重力波を検出しようとする研究など、様々な方向性での研究が開始されている。

6.3.1 最近の研究成果

最近の研究テーマ

(1) 量子基底状態への全光学的冷却

浮揚ナノ粒子の重心運動は、単一粒子の運動を観測し、その運動が減衰するようにフィードバックをかけるフィードバック冷却と、共振器を用いてレーザー冷却を行う2つの手法が確立されている。当研究室では、世界にさがかけて、電場ノイズの影響を受けない中性ナノ粒子を全光学的にフィードバック冷却する手法を新たに実現した（図）。

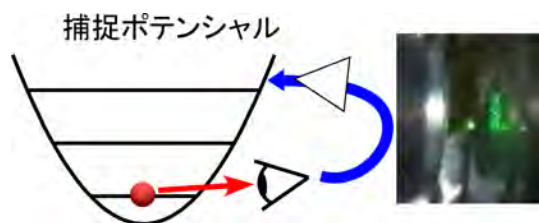


図 6.3.9: 図：単一ナノ粒子のフィードバック冷却。右は実際に捕捉されたナノ粒子の写真。

(2) 6 自由度制御と運動量観測

ナノ粒子の一方向の重心運動を基底状態へと冷却する技術の実現と共に、その他の自由度の観測・冷却についても重要なテーマとなりつつある。当研究室では、3つの重心運動を基底状態付近へと冷却した上で、3つの回転運動を全て超低温へとフィードバック冷却する新しい手法を開発し、これを利用して、飛行時間法に基づくナノ粒子の運動量観測の技術を実現した。この技術を利用し、運動の量子性を

探る研究や、高感度加速度センサーとしての応用に向けた研究も開始している。

6.3.2 現在進めている研究課題

浮揚ナノ粒子によるハイブリッド量子系

浮揚ナノ粒子は新たな量子系であると同時に、固体であることによる熱化の過程があるなど、原子に基づく量子系とは質的に異なる振る舞いも持つ。そこで、浮揚ナノ粒子と、レーザー冷却された原子とのハイブリッド量子系を実現し、その量子的な振る舞いを探る研究を進めている。2024年度は、ハイブリッド量子系実現のための新しい実験装置の設計・製作に取り組み、真空チャンバーの製作を完了した。

浮揚ナノ粒子系における情報熱力学の探究

古典的な領域から量子的な領域まで、幅広い温度範囲の振る舞いを探ることが可能な浮揚ナノ粒子系は、情報とエネルギーの関係を探る情報熱力学の実験的な舞台として最適である。特に、量子基底状態付近においては、従来の実験系では見られない振る舞いが期待される。また、複数のナノ粒子を冷却する新しい装置を開発し、それらの間に相互作用を導入する研究も進めている。2024年度は、複数のナノ粒子を同時に捕捉・冷却するための新しい実験装置の設計・製作に取り組み、真空チャンバーの製作を完了した。

浮揚ナノ粒子の量子的振る舞いを探る研究

浮揚ナノ粒子を量子基底状態付近へと冷却することは可能となったが、実際に量子力学に基づく波としての振る舞いなど、非古典的な振る舞いの観測はいまだ実現されていない。そのため、当研究室で初めて実現した、浮揚ナノ粒子の飛行時間法を利用して、非古典的な状態を生成・観測する研究を進めている。2024年度は、既存の装置を活用し、非古典的な状態を生成するために最適なプロトコルを見出した。

冷却原子気体を用いた研究

真空中の冷却原子気体は、磁場、重力、角加速度などの理想的な量子センサーとして、その応用に向けた研究が急速に進められている。当研究室では、冷却原子気体を高速な電場センサとして利用する研究を進めている。2024年度は、真空チャンバーの設計を完了した。

<報文>

(学位論文)

博士論文

- [1] Mitsuyoshi Kamba, "Feedback cooling of all external degrees of freedom of a levitated nanoparticle for exploring macroscopic quantum mechanics," Ph. D. Thesis, March 2025.

修士論文

- [2] 坂本太一、イオントラップ中のナノ粒子の重心運動の冷却性能の向上、修士論文、2025 年 3 月。

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [3] Kiyotaka Aikawa, "Feedback cooling of all external degrees of freedom of a levitated nanoparticle," Czech-Japan workshop on quantum information 2024, 21 May 2024, Tokyo, Japan.
- [4] Kiyotaka Aikawa, "Adiabatic cooling of a levitated nanoparticle near the ground state," LeviNet - Zhejiang joint conference on Optical Tweezers in Vacuum, 21 August 2024, Hangzhou, China.
- [5] Kiyotaka Aikawa, "Time-of-flight velocity measurements for a levitated nanoparticle under the feedback control of its six degrees of freedom," Quantum Engineering of Levitated Systems, 21 September 2024, Benasque, Spain.
- [6] Kiyotaka Aikawa, "Time-of-flight velocity measurements for a levitated nanoparticle under the feedback control of its six degrees of freedom," The 14th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy, 25 September 2024, Stanford University, USA.
- [7] Kiyotaka Aikawa, "Towards the state expansion measurements with an ultracold nanoparticle in an optical lattice," Quantum Physics with Trapped Particles, 17 October 2024, Monte Verita, Switzerland.
- [8] Kiyotaka Aikawa, "Towards 3D ground-state cooling of a levitated microparticle," the Levinet-OIST Workshop on Schrodinger Cats, 9 December 2024, Okinawa, Japan.

ポスター発表

- [9] Mitsuyoshi Kamba, "Revealing the Velocity Uncertainties of a Levitated Particle in the Quantum Ground State," Quantum Physics with Trapped Particles, 18 October 2024, Monte Verita, Switzerland.

(セミナー)

- [10] Kiyotaka Aikawa, "Time-of-flight velocity measurements for a levitated nanoparticle under the feedback control of its six degrees of freedom," 9 October 2024, University of Innsbruck, Austria
- [11] Kiyotaka Aikawa, "Time-of-flight velocity measurements for a levitated nanoparticle under the feedback control of its six degrees of freedom," 11 October 2024, University of Wien, Austria

6.4 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。

6.4.1 大型重力波望遠鏡 KAGRA

2015 年の Advanced LIGO による重力波の初観測以降、重力波望遠鏡の感度は着実に向上し、観測ネットワークも拡大している。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い、2024 年 5 月には O4 と呼ばれる最新の長期共同観測運転を開始した。KAGRA は O4 初期の一ヶ月間、連星中性子星の観測可能レンジ 1.3 Mpc の感度で観測運転を行い、その後さらなる高感度化に向けた調整に入っている。2025 年の 6 月ごろには 10 Mpc 程度の感度で再び観測運転に参加する予定である。アメリカ、イタリア、日本の三極での共同観測が実現されれば、到来方向決定精度が各段に上がる。また、一般相対性理論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。

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。2024 年 5 月には 1.3 Mpc の連星中性子星観測可能レンジを実現し、LIGO との共同観測運転を実施した。観測運転の休止以降、O4 終盤での観測網への再参加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、望遠鏡の原理的な雑音となる量子雑音および熱雑音の研究、KAGRA の将来計画の検討などを行っている。本年度は、KAGRA の感度向上のための様々なコミショニング活動に貢献した。具体的には、まず O4 初期の観測運転で感度を制限していた出射光学系の防振装置の改良を行った。続いて 2024 年 1 月の能登半

島地震の影響で必要となった干渉計の復旧作業を行い、上記の改良によって KAGRA の感度が大幅に向上していることを確認した。また同時に、様々な雑音の大きさを推定し、250 K であった KAGRA の懸架系の熱雑音が感度を制限していることを指摘し、KAGRA は鏡を本格的に冷却するフェーズに突入した。冷却後に改めて KAGRA 懸架系で用いられているサファイアファイバーの機械的散逸の大きさを測定し、その測定値が示す通りに KAGRA がさらなる感度向上したことを確認した。定期的に KAGRA の様々な雑音推定も行っており、コミッション活動の全体方針の決定に大きく貢献している。現在も、2025 年 6 月の観測網参加に向けて KAGRA の感度は着実に向上しており、10 Mpc 程度の感度で観測運転への再参加を目指している。

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。オーストラリアやアメリカでは数 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の原理実証実験および応用検討を行っている。昨年度の原理実証実験成功を受け、本年度は KAGRA への導入に向けた本格的な検討を開始した。今後 10 年という時間スケールでの国際重力波観測網における KAGRA の位置付けを検討し、kHz 帯に特化したアップグレード案を考案した。10-100 Hz の重力波観測は LIGO や VIRGO が主に担当し、KAGRA は kHz 帯に特化することで連星中性子星やパルサーからの重力波に関する知見をカバーすることで、得られる科学的成果を最大化するというコンセプトである。kHz 帯の感度を向上するために、KAGRA に長基線信号増幅共振器を導入する。KAGRA の将来計画として、この高周波帯の感度を向上するという方向性を今後も推進していく予定である。

6.4.2 宇宙空間重力波望遠鏡

DECIGO

当研究室では DECIGO の感度設計および量子雑音の低減手法の検討に関する共同研究を行っている。本年度は、DECIGO の光共振器内で発生する回折損失を現実的なパラメータで再計算し、感度の再設計を行った。また、量子ロッキングと呼ばれる量子雑音低減手法を用いた際のフィードバック制御ゲインの最適化を、より一般的な制御に拡張する研究も行った。

SILVIA 初期補足・相対速度計測制御

DECIGO や B-DECIGO の実現には衛星間の超精密なフォーメーションフライトが必要である。これを実証するため、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 μm 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。現在は来年度に計画されているダウンセクションに向けて計画の成熟化を進めている。

SILVIA や B-DECIGO で特に課題となっているのが、各衛星を GPS を用いて展開した後、レーザー光を用いた衛星の初期補足、および地上と同じように光共振器が制御可能となる程度まで衛星間の相対速度を減速するプロセスの確立である。当研究室では Delayline マイケルソン干渉計およびステージに搭載された懸架鏡を用いて、100 m 離れた衛星を模擬した実験系を構築し、初期補足・相対速度計測制御に向けた実験を行っている。本年度は、レーザー周波数アクチュエータを用いた超精密フォーメーションフライトまでの移行可能速度の要求値緩和、SILVIA 干渉計の具体的な工学系設計を行った。相対速度が比較的大きな状態 (100 $\mu\text{m/s}$ 程度) であっても、まずはレーザー周波数アクチュエータで制御を行ってマイケルソン干渉計のフリンジを制御し、その後に衛星スラスターへの階層制御を行うことで、超精密フォーメーションフライトへ移行可能なことを実証した。また光学素子のサイズや配置まで含めた具体的な光学系の設計を行い、SILVIA で求められる実証項目が十分達成可能な機能を、要求される光学系のサイズに収めることに成功した。さらにこの光学系を用いて、GPS による展開後のレーザーポインティングの初期補足が十分可能であることを示した。加えて、光学メーカー (清原光学) とともに実際の光学系制作における問題点・改善点の議論も進めている。

6.4.3 ねじれ型重力波検出器 TOBA

Torsion-Bar Antenna (TOBA) とは、ねじれ振りの水平回転を利用した新しい重力波検出器であり、地上でも低周波数帯 (0.1-10 Hz 付近) の重力波に感度を持つ。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検出器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 10 m スケールへの大型化に向けて、雑音低減実証や地球重力場変動

の観測，地震速報の実現を目指している．Phase-III TOBA の目標感度は，0.1 Hz においてひずみ換算で $10^{-15}/\sqrt{\text{Hz}}$ である．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モノリシック光学系や，懸架系と光学系の開発を行っている．

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 ではモノリシック光学系と呼ばれる，基材に光学素子を直接接着した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．

昨年度までに，低温で動作可能なモノリシック光学系の実証実験を行い，12 K まで冷却された環境下で 0.1 Hz において $3.6 \times 10^{-14} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ という感度を達成した．これまでに全ての光学系を接着したモノリシック光学系を低温下で動作させた例はなく，本成果は世界初のものである．

今年度は研究成果を博士論文としてまとめ [13]，国内外の学会にて発表を行なった [46, 62]．また，本研究を含めた，TOBA のこれまでの成果および現状をまとめ，論文として出版した [2]．

懸架系と光学系の開発

ねじれ回転測定のための光学系と，ねじれ振子を含む懸架系を組み合わせた構成は確立されておらず，設計・開発が必要である．そこで，TOBA の光学系と懸架系を組み合わせた設計・開発を行った [12]．光学系には，感度の良い差動 Fabry-Pérot 共振器を TOBA に初めて導入して設計を行った．補助センサとして，光てこも組み込んで設計した．懸架系においては，常温アルミニウム製のねじれ振子设计了．将来的にシリコンを使用し冷却することを見据え，冷却時にシリコンが割れない設計を行った．また，光学ベンチの並進地面振動が雑音にならない構成を提案し，TOBA 初となる縦防振のための geometric anti-spring (GAS) フィルタの導入も行った．これらの光学系と懸架系を組み合わせた装置を製作し，感度と雑音源の評価を行った．光てこを用いてねじれ振子の回転を計測し，2 本のねじれ振子間で同相雑音除去の解析を行って，0.4 Hz において $1.1 \times 10^{-7} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ の感度を達成した．光てこのセンサ雑音と鉛直地面振動雑音が感度を制限していると考えられる．今後は，差動 Fabry-Pérot 共振器でのねじれ回転検出，シリコン製ねじれ振子の冷却などを行い，感度を向上する予定である．

6.4.4 アクシオンダークマター探索実験 DANCE

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．

我々はその中でも超軽量ダークマターに分類されるアクシオンに着目している．アクシオンは光子との相互作用により質量に対応した周波数で光の偏光面を回転振動させる性質がある．そこで我々は，光リング共振器を用いることでアクシオンによる偏光回転を増幅する手法を提案し， 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する実験：DANCE (Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment) を進めている．DANCE において高感度かつ広帯域に探査を行うためには s 偏光と p 偏光の両方が共振する必要があるが，一般のリング共振器ではミラーの反射位相差が原因で同時共振できず感度が低下してしまう．そこで現在は周回長 1 m のプロトタイプを用いて，s/p 偏光を同時共振させる新手法の開発および雑音評価を進めている．

折り返し光共振器を用いた s/p 偏光間の反射位相差測定

ゼロ位相差ミラーと波長可変レーザーを用いて，s/p 偏光間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し，感度を改善する手法が提案されている．同時共振の実現には，s/p 偏光間の反射位相差を要求値を満たす精度まで抑える必要がある．本年度は折り返し光共振器を用いて，ミラー 1 枚あたりに生じる s/p 偏光間のビート信号の時間変動を 24 時間にわたり測定した．その結果，実験室の室温と光共振器の制御を工夫することにより，要求値を満たす精度での測定に成功した．

ゼロ位相差ミラーを用いた s/p 偏光同時共振手法の実証

本年度はゼロ位相差ミラーで光リング共振器を構築し，レーザー波長をチューニングすることで s/p 偏光の同時共振を実現した．また試験運転による性能評価を行い，これまでの最高感度に対して古典雑音および量子雑音の一桁以上の低減を確認した．今後は現在の感度を制限している複屈折由来のカップリ

ング雑音の低減, ハイパワー化による量子雑音の低減を行い, 目標感度の実現および観測運転を目指す。

6.4.5 基礎物理・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, 質量 30 mg 程度のねじれ振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。本年度上半期には先行研究で課題となった雑音を改善するための改良型実験セットアップの設計を行い, 主要部分の光学系設計を完了すると共にシミュレーション上で量子輻射圧感度に到達できることを確認した。また, 下半期からは実験系の構築を開始し, 現在までに実験系への地面振動の影響を低減する防振懸架系の構築を完了すると共に, 防振懸架系上で実測された地面振動が要求を満たすことを確認した。今後は, 2025 度前半中を目処に光学系の構築を完了し量子輻射圧雑音の観測実現することを目指す。

6.4.6 量子スクイーミングによるハイゼンベルグ限界への到達実験

2つの量子スクイズド状態を用いた位相測定誤差の低減レベルは, スクイーミングの強度に依存し, ハイゼンベルグ限界に到達できることが示されている。LIGO-MIT には, これを実証する実験を行っており, 本年度は, スクイズド状態を生成する2台のスクイザーの構築 (Second Harmonic Generator 及び Optical Parametric Oscillator) を完了し, それぞれ, 6.1 dB と 6.5 dB のスクイーミングの生成に成功した。現在は, それらを用いてマッハツェンダー干渉計の位相差測定をハイゼンベルグ限界で行うための光学系の構築を進めている。

6.4.7 Balanced Homodyne Detection による重力波検出の実証

重力波検出器の2つの腕共振器を構成する鏡の反射率には非対称性がある。これによって生じる contrast defect 光は重力波の信号と 90 度ずれた位相をもっており, 検出器の感度を低下させる。将来の重力波検出器では, さらなるハイパワー化が予定されており, この contrast defect 光への対策が必要となっている。Balanced Homodyne Detection は Local Oscillator 光の位相を自由に選ぶことを可能にし, 我々は contrast defect 光を補償するように位相を選ぶことができる。カリフォルニア工科大学では, この実証

を行うための実験が進んでおり, 現在は Power recycling Fabry-Perot Michelson Interferometer のロックを取得するためのデバッグが行われている。

B-L ダークマター探査

本実験では, 光共振器を用いて B-L ダークマターを探査する。B-L ダークマターは超軽量粒子に分類されるダークマター候補物質であり, 新たなゲージ対称性を仮定する際に B-L 数に結合するゲージボソンとして導入される。B-L ダークマターは B-L 数の異なる物質に振幅の異なる周期的な力を与えるため, 2種類の異なる物質をテストマスに用いて懸架共振器を構成し, 共振器長変動としてダークマター信号を検出することを目指す。本手法での B-L ダークマターの探査は, 感度が系の大きさに依存しないのが大きな特徴であり, 本実験ではテーブルトップの小規模なものでありながら, 未探査領域でのダークマター探査が可能になる。本年度は, 入射光の強度および周波数安定化に向けた入射光学系と主共振器の動作に向けた光学系の主要部分の構築, 主共振器の懸架系の設計, 入射光および主共振器制御のためのフィルターの作成を行なった。今後は制御を導入して主共振器の動作確認を行い, 感度および雑音の評価を行う予定である。

<報文>

(原著論文)

- [1] K. Komori, DECIGO collaboration: Current status of DECIGO and B-DECIGO, *Int. J. Mod. Phys. D*, 2540005 (2025).
- [2] S. Takano, *et al.*: TOrsion-Bar Antenna: A Ground-Based Detector for Low-Frequency Gravity Gradient Measurement, *Galaxies* 12 (6), 78 (2024).
- [3] S. Otabe *et al.*: Kerr-Enhanced Optical Spring, *Phys. Rev. Lett.* 132, 143602 (2024).
- [4] T. Ishikawa, *et al.*: Feasibility of loop-gain tuning for general measurement systems inspired by quantum locking for DECIGO, *Class. Quantum Grav.* 41, 215013 (2024).
- [5] R. Abbott *et al.*: Search for Gravitational-wave Transients Associated with Magnetar Bursts in Advanced LIGO and Advanced Virgo Data from the Third Observing Run, *ApJ* 966, 137 (2024).
- [6] R. Abbott *et al.*: Search for Gravitational-lensing Signatures in the Full Third Observing Run of the LIGO-Virgo Network, *ApJ* 970, 191 (2024).
- [7] A. Abac *et al.*: Observation of Gravitational Waves from the Coalescence of a 2.5–4.5 Msolar Compact Object and a Neutron Star, *ApJL* 970, L34 (2024).
- [8] A. Abac *et al.*: Ultralight vector dark matter search using data from the KAGRA O3GK run, *Phys. Rev. D* 110, 042001 (2024).

- [9] A. Abac *et al.*: Search for Eccentric Black Hole Coalescences during the Third Observing Run of LIGO and Virgo, *ApJ* 973, 132 (2024).
- [10] A. Abac *et al.*: A Search Using GEO600 for Gravitational Waves Coincident with Fast Radio Bursts from SGR 1935+2154, *ApJ* 977, 255 (2024).
- [11] G. Raman *et al.*: Swift-BAT GUANO Follow-up of Gravitational-wave Triggers in the Third LIGO–Virgo–KAGRA Observing Run, *ApJ* 980, 207 (2025).

(学位論文)

- [12] 大島由佳: Torsion Pendulum with Interferometric Readout for Low-Frequency Gravity Gradient Observation, 博士論文 (2025 年 3 月).
- [13] 高野哲: Cryogenic Monolithic Interferometer for Low-frequency Gravitational Wave Observation, 博士論文 (2024 年 6 月)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [14] Masaki Ando: Status of KAGRA, LVK Meeting (March 26th, 2025, Melbourne, Australia).
- [15] Masaki Ando: Space Gravitational-Wave Antenna B-DECIGO and DECIGO, Workshop on Deci-Hz Astronomy (December 15th 2024, Kolkata, India, Online).
- [16] Masaki Ando: Quantum Sensing for Gravitational-Wave Astrophysics, Geophysics, and Fundamental Physics, 9th ENS-UT Workshop on Physics (December 10, 2024, Komaba Campus, The University of Tokyo).
- [17] Masaki Ando: Status of KAGRA, LVK Meeting (September 24th, 2024, Barcelona, Spain).
- [18] K. Komori: Current status of DECIGO and B-DECIGO, Seventeenth Marcel Grossmann Meeting (Jul. 2024, Pescara).
- [19] Masaki Ando: Space Gravitational-Wave Antenna B-DECIGO and DECIGO, GWADW 2024 (Hamilton Island, Australia, 12-18 May 2024).
- [20] Masaki Ando: KAGRA: a Cryogenic Gravitational Wave Antenna, The 11th KAGRA International Workshop (April 16th, 2024, NMNS, Taiwan).

一般講演

- [21] H. O, *et al.*: Wide-Range Relative Velocity Sensor Using Laser Interferometry for Ultra-Precision Formation Flying, IEEE Aerospace Conference (Mar. 2025, Montana).
- [22] Yuka Oshima, *et al.*: Current Status of TOBA, TOBA and Gravity Gradient Workshop (March 2025, University of Tokyo).

- [23] Masaki Ando: TOBA at Kamioka?, 同上.
- [24] Ryosuke, Sugimoto, *et al.*: Optomechanical experiment in Ando lab, 同上.
- [25] H. Fujimoto, *et al.*: Axion Dark Matter Search with TAMA300, 4th TAMA300 Strategy Meeting (February 2025, NAOJ).
- [26] H. Fujimoto, *et al.*: Search for Ultralight Axion Dark Matter with Optical Ring Cavity, FoPM International Symposium (February 2025, University of Tokyo).
- [27] Masaki Ando: Report from KSC Board, The 34th KAGRA F2F Meeting (December 16th, 2024, ICRR, University of Tokyo).
- [28] Ryosuke, Sugimoto, *et al.*: Current status of the optomechanical experiment in Ando lab, KAGRA Future Working Group 4th open meeting (Dec. 19th, 2024, Institute of Science Tokyo and online).
- [29] Tatsuya Sugioka, *et al.*: Search for vector dark matter with a suspended cavity consisting of different B-L number materials, 同上.
- [30] Masaki Ando: IGWN Formation, The 34th KAGRA F2F Meeting (December 17th, 2024, ICRR, University of Tokyo).
- [31] Hinata Takidera, *et al.*: Current status of sensitivity improvement of Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment (DANCE), Workshop on Cosmic Indicators of Dark Matter 2024 (October 2024, Tohoku University).
- [32] Masaki Ando: Report from KSC Board, The 33rd KAGRA F2F Meeting (August 21st, 2024, Tokyo City University).
- [33] Masaki Ando: IGWN Formation, 同上.
- [34] Masaki Ando: Closing Remarks, 同上.
- [35] Masaki Ando: Creating Comfortable Research Environment, 同上.
- [36] Hinata Takidera, *et al.*: Current status and future plans of Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment (DANCE), 15th International Workshop on the Identification of Dark Matter 2024 (July 2024, L'Aquila, Italy).
- [37] Masaki Ando, *et al.*: TOBA: Torsion-Bar Antenna for Newtonian Noise Mitigation, GWADW 2024 (Gravitational Wave Advanced Detector Workshop) (Hamilton Island, Australia, 12-18 May 2024).
- [38] Masaki Ando, *et al.*: KAGRA: a Cryogenic Gravitational Wave Antenna, The 11th KAGRA International Workshop (April 16th, 2024, NMNS, Taiwan).
- [39] Masaki Ando: KIW-11 Closing Remark, 同上.

ポスター発表

- [40] Tatsuya Sugioka, *et al.*: Search for B-L dark matter with a suspended cavity consisting of different materials, LIGO-Virgo-KAGRA collaboration meeting March 2025 (March 2025, Melbourne, Australia).
- [41] Ryosuke Sugimoto, *et al.*: Development of milligram-scale optomechanical torsion pendulum with quantum noise limited sensitivity, 同上.
- [42] Yuka Oshima, *et al.*: Torsion-Bar Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observation, 同上.
- [43] Hinata Takidera, *et al.*: Adjusting optical cavity birefringence through wavelength tuning for axion dark matter search, 同上.
- [44] H. Fujimoto, *et al.*: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment DANCE: Observation results under s/p simultaneous resonance, 同上.
- [45] Ryosuke Sugimoto, *et al.*: Development of milligram-scale optomechanical torsion pendulum: Towards quantum noise-level sensitivity, Quantum Innovation 2024 (Oct. 22nd, 2024, Sola City Conference Center, Ochanomizu).
- [46] Satoru Takano, *et al.*: First demonstration of cryogenic monolithic interferometer for Torsion-Bar Antenna experiment, LIGO-Virgo-KAGRA collaboration meeting September 2024 (September 2024, Barcelona, Spain).
- [47] Masaki Ando, *et al.*: B-DECIGO: a Space Gravitational-Wave Observatory for Multimessenger Astronomy IAU General Assembly (August 6-15, 2024, Cape Town, South Africa).
- (国内会議)
- 招待講演
- [48] 安東正樹: 宇宙重力波背景放射の観測 DECIGO, 日本物理学会シンポジウム (2025 年 3 月 18 日, オンライン).
- [49] 安東正樹: 重力波宇宙物理学の今とこれから, 北海道大学 談話会 (2024 年 7 月 31 日, 北海道大学).
- 一般講演
- [50] 大島由佳, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (48): 高感度ねじれ振り子の開発, 日本物理学会 2025 年春季大会 (2025 年 3 月, オンライン).
- [51] 小森健太郎, 他: KAGRA 10 年計画: kHz 帯の感度向上, 同上.
- [52] 瀧寺陽太, 他: 光リング共振器を用いたアクション暗黒物質の探索実験 DANCE (16): DANCE の長期間観測に向けた s/p 偏光間の反射位相差測定, 同上.
- [53] 藤本拓希, 他: 光リング共振器を用いたアクション暗黒物質の探索実験 DANCE (17): s/p 偏光同時共振下における探索結果, 同上.
- [54] 安東正樹, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (193): DECIGO/B-DECIGO の概要, 同上.
- [55] 杉本良介, 他: 量子雑音感度を持つミリグラムスケールのねじれ振り子型機械光学系の開発 II, 同上.
- [56] 杉岡達哉, 他: B-L 数の異なる振り子を用いた光共振器でのベクトルダークマター探索 (3): 入射光学系の現状, 同上.
- [57] 安東正樹, 他: 高感度重力勾配センサによる地震早期アラート手法の確立, 光・量子飛躍フラッグシッププログラム 第 12 回領域会議 (2024 年 12 月 25 日, 東京科学大).
- [58] 安東正樹, 他: 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO/B-DECIGO, 第 23 回 DECIGO ワークショップ (2024 年 12 月 14 日, 東京大学).
- [59] 山崎心鉄, 本庄海築: SILVIA における初期補足-手法の検討と工学系設計-, 同上.
- [60] 王方成, 他: 超精密編隊飛行のためのレーザー干渉計を用いたワイドレンジ相対速度測定センサの開発, 第 68 回 宇宙科学技術連合講演会 (2024 年 11 月, 姫路市文化コンベンションセンター).
- [61] 安東正樹, 他: 高感度重力勾配センサによる地震早期アラート手法の確立, 光・量子飛躍フラッグシッププログラム サイトビジット (2024 年 10 月 3 日, 東京大学).
- [62] 高野哲, 他: ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA(Phase-III) の開発 (46): 低温モノリシック干渉計の開発と雑音評価, 日本物理学会 第 79 回年次大会 (2024 年 9 月, 北海道大学).
- [63] 大島由佳, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (47): ねじれ振り子と読み取り光学系の開発, 同上.
- [64] 安東正樹, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (183): DECIGO/B-DECIGO の概要, 同上.
- [65] 山口由貴, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (190): 衛星間フォーメーションフライトにおける精密相対速度計測, 角度制御の実証, 同上.
- [66] 柴井すばる, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (191): 衛星間フォーメーションフライトにおける超精密距離制御, 同上.
- [67] 小森健太郎, 他: 重力波望遠鏡 KAGRA における雑音の評価とその低減, 同上.
- [68] 瀧寺陽太, 他: 光リング共振器を用いたアクション暗黒物質の探索実験 DANCE (14): ミラー 1 枚あたりの s/p 偏光の反射位相差の時間ドリフトの低減, 同上.
- [69] 藤本拓希, 他: 光リング共振器を用いたアクション暗黒物質の探索実験 DANCE (15): ゼロ位相差ミラーを用いた s/p 偏光同時共振手法の実証, 同上.
- [70] 杉岡達哉, 他: B-L 数の異なる振り子を用いた光共振器でのベクトルダークマター探索 (1): 入射光学系と周波数安定化, 同上.
- [71] 平山彩美里, 他: B-L 数の異なる振り子を用いた光共振器でのベクトルダークマター探索 (2): 強度安定化および主共振器の設計と制御, 同上.
- [72] 杉本良介, 他: 量子雑音感度を持つミリグラムスケールのねじれ振り子型機械光学系の開発, 同上.

- [73] 安東正樹, 他: 高感度重力勾配センサによる地震早期アラート手法の確立, 光・量子飛躍フラッグシッププログラム 第 11 回領域会議 (2024 年 7 月 1 日, 東京工業大).

ポスター発表

- [74] 杉本良介, 他: ミリグラムスケールのねじれ振り子型機械光学系の開発: 量子雑音レベルの感度実現に向けて, 国際光デー記念シンポジウム〜量子技術とレーザー科学の最前線 (2024 年 7 月, 日本学術会議講堂).

(セミナー・アウトリーチ講演)

- [75] Masaki Ando: How to Write a Thesis, KAGRA Early Career Scientists Symposium (August 20th, 2024, Tokyo City University).

大島由佳, 杉岡達哉: 宇宙の謎を解き明かす精密測定, 東京大学理学部オープンキャンパス 2024 (2024 年 8 月, オンライン).

- [76] 小森健太郎: 東京大学での生活と研究 学生および研究者として, ジョイントセミナー at 東大 (岐阜高等学校 2 年生による東大訪問での OB 講演) (2024 年 8 月, 理学部 1 号館).

- [77] 安東正樹: 重力波でブラックホールの合体を観測, はまぎんキッズ・サイエンストークイベント (2024 年 7 月 6 日, はまぎん こども宇宙科学館, 横浜).

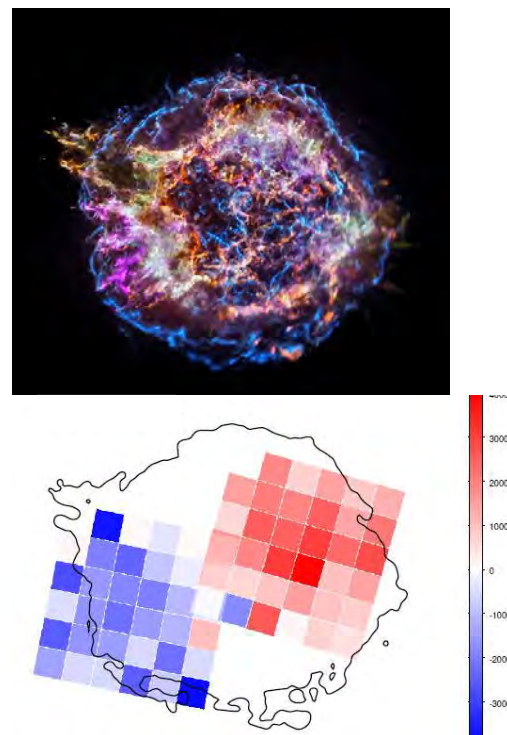


図 6.5.10: 宇宙 X 線衛星 Chandra でみた超新星残骸 Cassiopeia A (上) と XRISM で測定した鉄輝線 Doppler 偏移マップ (下)[60, 61, 62]. 下図で北西 (右上) は赤方偏移、南東 (左下) はそれぞれ青方偏移を示しており、最も色の濃い最大値は約 3000 km s^{-1} 。

6.5 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気球に搭載した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 年度打ち上げた XRISM 衛星や 2030 年代の活躍を目指す 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。本年は特に超新星残骸、活動銀河核などの観測的研究と、GRAMS 計画をはじめとする将来計画に向けた開発を行った。

6.5.1 宇宙物理現象観測に関する研究

超新星残骸

星の中にはその最後を大爆発で終えるものがあり (超新星爆発)、星間空間に強い衝撃波と数百万度の巨大プラズマ球を形成する。これを超新星残骸と呼ぶ。超新星残骸は星が核融合で作り出した重元素を宇宙空間に供給し、また衝撃波で宇宙線を加速し供給する、いわば宇宙の多様性の源である。

本年度は 2023 年に打ち上げた XRISM 衛星の観測した超新星残骸のデータ解析を本格化させた。XRISM

に搭載された極低温検出器 Resolve は、従来の宇宙 X 線検出器より 30 倍程度良いエネルギー分解能で X 線輝線群を観測することを可能にしている。図 6.5.10 は、我々の銀河系内で最も若い大質量星崩壊型超新星残骸の一つ Cassiopeia A (西暦 1682 年に爆発) の X 線画像 (上図) と、XRISM で測定した鉄輝線の Doppler 偏移マップ (下図) である。北西 (右上) 部分で $\sim 3000 \text{ km s}^{-1}$ の赤方偏移、南東 (左下) 部分で同程度の赤方偏移を示している。これは、星が爆発前に核融合で作り出した鉄元素がプラズマとなり、激しく非等方に膨張していることを示している。各場所での輝線の幅から求められる速度分散も考えると、膨張は bipolar 的というより球殻の一部にだけ物質が飛んでいっている incomplete shell structure であることを示した。このことから、この天体は爆発そのものが非等方であることが分かった。超新星爆発の爆発機構はまだ完全には解明されていないが、現在のところもっとも有力な爆発機構は、重力崩壊した星の中心部で電子捕獲由来のニュートリノが大量に

発生し、星外殻に外向きの圧力を加えることで爆発するニュートリノ駆動モデル (neutrino-driven SN) である。この機構で外向きに発生する衝撃波が星の外層を吹き飛ばすためには非等方に衝撃波が伝播し一部の領域が局所的に爆発の突破口になる必要がある。今回我々が発見した膨張の非等方性はこのモデルとも自然と合致するため、今後は様々な爆発モデルとの比較を行うことで重力崩壊型超新星爆発の爆発機構に迫れると考えている [60, 61, 62, 64]。同様の超新星残骸膨張測定は大マゼラン雲の超新星残骸 N132D [9] や Tycho の新星、SN1987A などでも行っており、今後天体間の比較により超新星爆発機構全貌の解明が期待できる。

また、このほかにも超新星残骸衝撃波の加熱機構 [29, 50, 51, 52] や超新星残骸衝撃波での粒子加速環境の調査 [25, 54, 55, 72, 73, 74, 56, 75, 76, 77, 3, 8] や加速効率の推定 [13]、超新星残骸中の特殊な過電離プラズマの精密測定 [15]、白色矮星合体で出来たと思われる残骸の X 線調査 [5] などでも成果をあげた。さらに関連天体として知られている中で最も重い白色矮星 ZTF J190132.9+145808.7 からの X 線探査 [4] も行った。

活動銀河核

銀河の中心部には太陽の百万倍から十億倍程度の質量を持つ巨大ブラックホール (BH) が存在しており、これらの BH は質量降着によってしばしば激しい電磁放射を示し活動銀河核と呼ばれる。活動銀河核の激しい活動のなかでも、光速の数%で重元素を吹き飛ばす「超高速アウトフロー」は、莫大なエネルギーを銀河に供給し銀河の進化にまでも強い影響を与えているとされている。

我々は、最新鋭の X 線観測衛星 XRISM を使って、活動銀河核 PDS 456 の超高速アウトフローを観測した。その結果、超高速アウトフローが極めて非一様で複雑な構造をしていることを発見し、さらに時間変動の解析から幅広い電離状態のアウトフローの幾何学的構造に強い制限を与えることに成功した [58, 59, 63, 65, 66, 80, 81, 82, 83]。

ブラックホールと一般相対論

ブラックホール降着系における高温ガス「コロナ」は X 線の放射源として重要な役割を果たしているが、その幾何構造や起源はまだ解明されていない。この謎を解くため、我々は X 線スペクトルと偏光観測を整合的に説明できるモデルの構築に取り組んでいる。X 線偏光撮像衛星 IXPE (2021 年 12 月打ち上げ) による偏光観測データと X 線精密分光撮像衛星 XRISM によって得られる高精度な観測データを活用するには、ブラックホール近傍の一般相対論的效果を考慮した放射輸送シミュレーションが不可欠である。

我々は、モンテカルロ X 線放射輸送コード MONACO を拡張し、Kerr 時空での光子追跡と物質との相互作用を考慮した一般相対論的シミュレーションコード

の開発を進めている。このコードは光子の位置、エネルギー、運動量、偏光を計算でき、複雑な物質分布や多様な相互作用に対応する柔軟性を持つ。開発の初期段階では光子追跡とコンプトン散乱の実装を完了し、現在は内側が欠けた降着円盤モデルを用いた X 線連星系 Cygnus X-1 の偏光解析を行っている。この初期解析では偏光角を概ね再現できる一方、偏光度については理論値が測定値を下回るという結果を得ており [71]、今後モデルと解析の改良を進める予定である。

6.5.2 将来計画に向けた検出器開発

6.5.3 GRAMS 計画

MeV ガンマ線天文学は核ガンマ線による宇宙での重元素合成過程の解明や宇宙線加速過程の解明といった重要な科学的意義を持っている一方で、従来の検出器では感度が不十分であり、“電磁波天文学最後の窓”と呼ばれている。我々は MeV ガンマ線天文学を切り開くことを目的として、GRAMS (Gamma-Ray and AntiMatter Survey) 計画を進めている。GRAMS は液体アルゴン Time-Projection Chamber (LArTPC) を検出原理として、気球や衛星上から宇宙からの MeV ガンマ線を今までの 2 桁高い感度で観測する日米合同計画である。今まで LArTPC を用いた MeV ガンマ線検出器は存在せず、検出器原理実証を行う必要がある。

そこで我々は LArTPC を用いた小型 (有感部: 5cm×5cm×10cm) の MeV ガンマ線検出原理実証機 NanoGRAMS の開発を行っている。現在、我々は検出器セットアップを構築し、液体アルゴンをを用いた実験を実施している。問題となっていたアルゴン中の不純物の混入を防ぐことに成功し、原理実証にとって不可欠な、アルゴン中でガンマ線によって電離した電子による信号を捉えることができた。

また、我々は気球高度での LArTPC の動作を実証するためにプロトタイプ検出器を気球に搭載する日米合同実験 pGRAMS も進めている。我々は気球上とデータをやりとりする通信系の開発を行っており、現在、2026 年の放球に向けて準備を進めている。

6.5.4 XRPIX 検出器の開発

我々は将来の高感度広帯域 X 線観測の実現を目指して、X 線 SOI (Silicon-On-Insulator) ピクセル検出器 “XRPIX” の開発を進めている。XRPIX は、10 μ s 以下という極めて優れた時間分解能と同時に従来の X 線 CCD に匹敵する撮像分光能力も有する。さらに、300 μ m 以上の厚い有感層を持つため、1 keV 以下の軟 X 線から数十 keV の硬 X 線にわたる広い帯域で高感度の観測が可能である。これを用いて広域探査を行えば、超巨大 BH の進化の解明や宇宙線源加速源の解明などが期待できる。

2024 年度には、衛星搭載に向けて必須な小型モジュール化を実現するために、従来は周辺の外部基板上に実装されていたアナログ-デジタル/デジタル-アナログ変換回路をセンサ上に内蔵した新たなセンサを開発した。この新たなセンサを詳細に評価することで、衛星搭載に向けて十分なレベルの性能を持つことを明らかにした [28, 45, 84]。

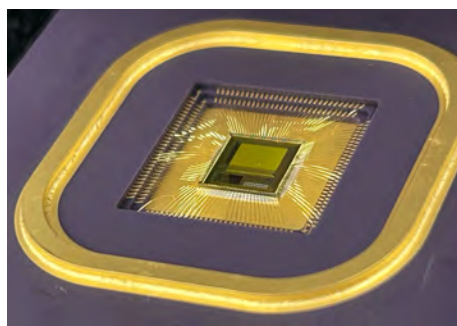


図 6.5.11: 現在開発中の XRPIX12。

<受賞>

- [1] T. Iwata, Best Poster Award, XRISM Science Workshop for Young Researchers 2024, 2024, Sep. 27
- [2] R. Sato, Poster Award, XRISM Science Workshop for Young Researchers 2024, 2024, Sep. 27

<報文>

(原著論文)

- [3] P.K.H. Yeung, S.-H. Kee, T. Mizuno, A. Bamba, “Examining a hadronic γ -ray scenario for the radiative shell & molecular clouds of the old GeV supernova remnant G298.6 – 0.0”, *PASJ*, 76, 490 (2024)
- [4] A. Bamba, K. Kashiya, S. Kisaka, Y. Terada, T. Takahashi, T. Minami, “On the X-ray efficiency of the white dwarf pulsar candidate ZTF J190132.9+145808.7”, *PASJ*, 76, 702 (2024)
- [5] T. Ko, H. Suzuki, K. Kashiya, H. Uchida, T. Tanaka, D. Tsuna, K. Fujisawa, A. Bamba, T. Shigeyama, “A dynamical model for IRAS 00500+6713: the remnant of a type Ia supernova SN 1181 hosting a double degenerate merger product WD J005311”, *ApJ*, 969, 116 (2024)
- [6] The CTA collaboration, “A detailed study of the very-high-energy Crab pulsar emission with the LST-1”, *A&A*, i690, A167 (2024)
- [7] T. Tamba, H. Odaka, T. Watanabe, T. Iwata, T. Kasuga, A. Tanimoto, S. Takashima, M. Ichihashi, H. Suzuki, A. Bamba, “Imaging reconstruction method on X-ray data of CMOS polarimeter combined with coded aperture”, *NIMA*, 1067, 169589 (2024)
- [8] V. Sapienza, M. Miceli, O. Petruk, A. Bamba, S. Katsuda, S. Orlando, F. Bocchino, T. DeLaney, “Time evolution of the synchrotron X-ray emission in Kepler’ s SNR: the effects of turbulence and shock velocity”, *ApJ*, 973, 105 (2024)
- [9] XRISM collaboration, “The XRISM First Light Observation: Velocity Structure and Thermal Properties of the Supernova Remnant N132D”, *PASJ*, 76, 1186 (2024)
- [10] XRISM collaboration, “XRISM Spectroscopy the Fe K α Emission line in the Seyfert AGN NGC 4151 Reveals the Disk, Broad Line Region, and Torus”, *ApJL*, 973, L25 (2024)
- [11] The CTA collaboration, “A new method for the reconstruction of images of gamma-ray telescopes applied to the LST-1 of CTAO”, *A&A*, 691, A328 (2024)
- [12] XRISM collaboration, “The XRISM/Resolve view of the Fe K region of Cyg X-3”, *ApJL*, 977, L34 (2024)
- [13] J. Woo, K. Mori, C. J. Hailey, E. Spira-Savett, A. Bamba, B.W. Grefenstette, T.B. Humensky, R. Mukherjee, S. Safi-Harb, T. Temin, N. Tsuji, “Spectrum and location of ongoing extreme particle acceleration in Cassiopeia A”, *ApJL*, 979, 72 (2025)
- [14] XRISM collaboration, “The bulk motion of gas in the core of the Centaurus galaxy cluster”, *Nature*, 638, 365 (2025)
- [15] XRISM collaboration, “Overionized plasma in the supernova remnant Sagittarius A East anchored by XRISM observations”, *PASJL*, 77, L1 (2025)
- [16] The CTA collaboration, “Detection of RS Oph with LST-1 and modelling of its HE/VHE gamma-ray emission”, *A&A*, 695, A152 (2025)
- [17] XRISM collaboration, “XRISM reveals low non-thermal pressure in the core of the hot, relaxed galaxy cluster Abell 2029”, *ApJL*, 982, L5 (2025)
- [18] M. Yukumoto, et al., “A detailed study on spectroscopic performance of SOI pixel detector with a pinned depleted diode structure for X-ray astronomy,” *NIMA*, 1072, 170203, 2025
- [19] H. Gulick, et al., “A study of afterglow signatures in NaI and CsI scintillator modules for the background and transient observer instrument on COSI,” *NIMB*, 561, 165631, 2025
- [20] H. Noda, K. Mori, H. Tomida, H. Nakajima, T. Tanaka, H. Murakami, H. Uchida, H. Suzuki, S. B. Kobayashi, T. Yoneyama, K. Hagino, et al., “Soft X-ray Imager of the Xtend system onboard XRISM,” *PASJ*, in press
- [21] H. Suzuki, T. Yoneyama, S. B. Kobayashi, H. Noda, H. Uchida, K. K. Nobukawa, K. Hagino, et al., “Initial operations of the Soft X-ray Imager onboard XRISM,” *JATIS*, 11(4), 1–14, 2025

- [22] R. Nakajima, S. Arai, K. Aoyama, Y. Utsumi, T. Tamba, H. Odaka, M. Tanaka, K. Yorita, S. Arai, T. Aramaki, J. Asaadi, A. Bamba, N. Cannady, P. Coppi, G. De Nolfo, M. Errando, L. Fabris, T. Fujiwara, Y. Fukazawa, P. Ghosh, K. Hagino, T. Hakamata, U. Hijikata, N. Hiroshima, M. Ichihashi, Y. Ichinohe, Y. Inoue, K. Ishikawa, K. Ishiwata, T. Iwata, G. Karagiorgi, T. Kato, H. Kawamura, J. Krizmanic, J. Leyva, A. Malige, J. G. Mitchell, J. W. Mitchell, R. Mukherjee, K. Nakazawa, K. Okuma, K. Perez, N. Poudyal, I. Safa, M. Sasaki, W. Seligman, K. Shirahama, T. Shiraishi, S. Smith, Y. Suda, A. Suraj, H. Takahashi, S. Takashima, S. Tandon, R. Tatsumi, J. Tomsick, N. Tsuji, Y. Uchida, S. Watanabe, Y. Yano, K. Yawata, H. Yoneda, M. Yoshimoto, J. Zeng, "First operation of LArTPC in the stratosphere as an engineering GRAMS balloon flight (eGRAMS)", PTEP, 2024, 12 (2024)
- [23] T. Iwata, A. Tanimoto, H. Odaka, A. Bamba, Y. Inoue, K. Hagino, "Multi-epoch X-ray spectral analysis of Centaurus A: Revealing new constraints on iron emission line origins", PASJ, 76, 923 (2024)
- [24] T. Iwata, K. Hagino, H. Odaka, T. Tamba, M. Ichihashi, T. Kato, K. Ishiwata, H. Kuramoto, H. Matsuhashi, S. Arai, T. Minami, S. Takashima, A. Bamba, "Development of the X-ray polarimeter using CMOS imager: Polarization sensitivity of a 1.5 μ m pixel CMOS sensor", NIMA, 1065, 169487 (2024)
- [25] D. Tateishi, N. Sasaki, Y. Terada, S. Katsuda, S. Lee, H. Sano, Y. Fukui, A. Bamba, "Study of the origin of the azimuthal variation of synchrotron X-ray spectrum from SNR RX J0852.0-4622", PASJ, in press
- [26] H. Suzuki, N. Tsuji, Y. Kanemaru, M. Shidatsu, L. O. Nieto, S. S. Harb, S. S. Kimura, E. de la Fuente, S. Casanova, K. Mori, X. Wang, S. Kato, D. Tateishi, H. Uchiyama, T. Tanaka, H. Uchida, S. Inoue, D. Huang, M. L. Goumard, D. Miura, S. Ogawa, S. B. Kobayashi, C. Done, M. Parra, M. D. Trigo, T. M. Darias, M. A. Padilla, R. Tomaru, Y. Ueda, "Detection of Extended X-Ray Emission around the PeVatron Microquasar V4641 Sgr with XRISM", ApJ, 978, L20.(2025)
- [27] Shunsaku Nagasawa, Takahiro Minami, Shin Watanabe, Tadayuki Takahashi, "Imaging and spectral performance of a wide-gap CdTe double-sided strip detector", NIMA, 1075, 170362 (2025)
- [28] H. Matsuhashi, et.al., "Evaluation of the X-ray SOI pixel detector with the on-chip ADC", NIMA, 1064, 169426 (2024)
- [29] Ichihashi, Masahiro, Bamba, Aya, Kato, Yuichi, Katsuda, Satoru, Suzuki, Hiromasa, Kasuga, Tomoaki, Odaka, Hirokazu, Nakazawa, Kazuhiro, "Measurement of temperature relaxation in the postshock plasma of the northwestern limb of SN 1006", PASJ, 76, 800 (2024)
- (会議抄録)
- [30] Sapienza, Vincenzo, Miceli, Marco, Bamba, Aya, Orlando, Salvatore, Lee, Shiu-Hang, Nagataki, Shigehiro, Ono, Masaomi, Katsuda, Satoru, Mori, Koji, Sawada, Makoto, Terada, Yukikatsu, Giuffrida, Roberta, Bocchino, Fabrizio, "Probing Shocked Ejecta in SN 1987A with XRISM-Resolve: The Effects of the Gate Valve Closed", Research Notes of the AAS, 8, 156 (2024)
- [31] Makoto Tashiro, et al., "Development and operation status of X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM)", Proceedings of the SPIE, 13093, 130931G (2024)
- [32] Yoneyama, Tomokage, Tamba, Tsubasa, Odaka, Hirokazu, Bamba, Aya, Murakami, Hiroshi, Mori, Koji, Terada, Yukikatsu, Nobukawa, Masayoshi, Mizuno, Tsunefumi "Pile-up simulator for XRISM/Xtend", Proceedings of the SPIE, 13093, 130935Y (2024)
- [33] T. Narita, et al., "Trigger performance evaluation and anti-coincidence demonstration of an event-driven SOI pixel detector for x-ray astronomy," Proceedings of SPIE, 131031L, 2024
- [34] H. Noda, et al., "New CCD driving technique to suppress anomalous charge intrusion from outside the imaging area for soft x-ray imager of Xtend onboard XRISM," Proceedings of SPIE, 130935X, 2024
- [35] H. Suzuki, et al., "Initial operations of the Soft X-ray Imager onboard XRISM," Proceedings of SPIE, 130935Z, 2024
- [36] Y. K. Satoh, et al., "Development of soft x-ray CMOS camera for the GEO-X mission," Proceedings of SPIE, 130935Q, 2024
- [37] Y. Ezoe, et al., "Status of geospace x-ray imager mission (GEO-X)," Proceedings of SPIE, 130932E, 2024
- [38] K. Tamura, et al., "In-orbit performance of the Xtend-XMA onboard XRISM," Proceedings of SPIE, 130931M, 2024
- [39] K. Mori, et al., "Status of Xtend telescope onboard X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM)," Proceedings of SPIE, 130931I, 2024
- [40] S. Takashima, H. Odaka, K. Shirahama, K. Ishiwata, R. Tatsumi, H. Kawamura, T. Hakamata, M. Yoshimoto, S. Watanabe, T. Tamba, H. Yoneda, S. Arai, A. Bamba, M. Ichihashi, K. Aoyama, M. Tanaka, K. Yorita, K. Nakazawa, K. Okuma, T. Aramaki, G. Karagiorgi, "Proof-of-concept study of MeV gamma-ray imaging using a liquid argon time projection chamber for GRAMS" Proceedings of SPIE, 130937R, 2024
- [41] Takahiro Minami, Shunsaku Nagasawa, Yixian Zhang, Kristopher Cooper, Athanasios Pantazides, Lindsay Glesener, Hunter Kanninen,

Shin Watanabe, Noriyuki Narukage, Tadayuki Takahashi “Hard x-ray focal plane detectors on-board the FOXSI-4 sounding rocket for solar flare observation”, Proceedings of the SPIE, 13093, 130932A (2024)

(国内雑誌)

(学位論文)

- [42] 高嶋 聡, “Development of a Compton camera using liquid argon for time-domain MeV gamma-ray astrophysics”, Ph.D. thesis
- [43] 南 喬博, “FOXSI-4 imaging-spectral study of thermal and non-thermal electrons in solar flares”, Ph.D. thesis
- [44] 加藤 辰明, “Characterization of a CMOS sensor for high-brightness X-ray polarimetry to understand the mechanism of particle acceleration in solar flares”, master thesis
- [45] 松橋 裕洋, “Development of digital SOI pixel detector for cosmic X-ray satellites”, master thesis

(著書)

- [46] 馬場 彩 (監修), 「銀河系とその先へ」、宇宙開発プロジェクト大図鑑 (3)、ポプラ社、2025 (ISBN: 9784591184769)
- [47] 馬場 彩、シリーズ現代の天文学第 6 巻「星間物質と星形成 [第 2 版]」5.2 節「超新星残骸」、日本評論社、2024 (ISBN: 978-4-535-60756-9)
- [48] 小山勝二、嶺重 慎、馬場 彩 編集、シリーズ現代の天文学第 6 巻「星間物質と星形成 [第 2 版]」、日本評論社、2024 (ISBN: 978-4-535-60756-9)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [49] A. Bamba, “Measuring the asymmetric expansion of the Fe ejecta of Cassiopeia A with XRISM/Resolve”, “SNR workshop 2025”, Gifu, 2025, Mar. 10-11
- [50] M.Ichihashi, A.Bamba, D.Tateishi, K.Hagino, S.Katsuda, H.Suzuki, T.Nakazawa, “The thermal relaxation process in collisionless shock of SN1006”, “Supernova Remnants III: An Odyssey in Space after Stellar death”, Greece, 2024 Jun.09-15, poster
- [51] M.Ichihashi, A.Bamba, D.Tateishi, K.Hagino, S.Katsuda, H.Uchida, H.Suzuki, “Thermal relaxation timescales behind supernova shocks and their dependence on shock velocities”, “XRISM science meeting”, Tokyo, 2024, Sep. 24-27, poster
- [52] M.Ichihashi, A.Bamba, D.Tateishi, K.Hagino, S.Katsuda, H.Uchida, H.Suzuki, R.Yamazaki, Y.Ohira, “Spatial analysis of the temperature and ionization environment near the northeast shock wave of the Cygnus Loop”, “SNR workshop 2025”, Gifu, 2025, Mar. 10-11, oral

- [53] T. Iwata, H. Odaka, K. Hagino, A. Bamba, “Probing relativistic effects in black hole accretion with high-resolution spectroscopy and polarimetry”, “XRISM Science Workshop for Young Researchers 2024”, Tokyo, 2024, Sep. 27, poster
- [54] D.Tateishi, Y.Terada, S.Katsuda, S.H.Lee, A.Bamba, “Suzaku/XIS study of the acceleration environment of bilateral SNR RX J0852.0-4622”, “Supernova Remnants III: An Odyssey in Space after Stellar death”, Greece, 2024 Jun.09-15, poster
- [55] D.Tateishi, “Search for the Neutral Fe line from Cassiopeia A Supernova Remnant”, “XRISM science meeting”, Tokyo, 2024, Sep. 24-27, poster
- [56] G.Fujimoto, K.Tatsuaki, A.Bamba, H.Kouichi, D.Tateishi, I.Masahiro, V.Sapienza, R.Yamazaki, H.Suzuki, H.Sano, J.Vink, “Investigation of ISM Density Impact on Particle Acceleration in the Northeastern Region of SNR RCW 86”, “SNR workshop 2025”, Gifu, 2025, Mar. 10-11, oral
- [57] G.Fujimoto, “Revealing the Energy Distribution of shocks in RCW 86 NE with XRISM and NuSTAR”, “XRISM Science Workshop for Young Researchers 2024”, Tokyo, 2024, Sep. 27, poster
- [58] R. Sato, K. Hagino, E. Behar, M. Mizumoto, M. Tashiro, R. Boissay-Malaquin, C. Done, L. Galo, H. Odaka, A. Tanimoto, T. Yaqoob, S. Yamada, J. Reeves, F. Tombesi, A. Gonzalez, A. Luminari, Y. Xu, P. Condó, R. Mizukawa, A. Miyamoto, V. Braito, A. Bamba, “Revealing the structure of AGN outflows through a time-variability study”, “XRISM Science Workshop for Young Researchers 2024”, Tokyo, 2024, Sep. 27, poster
- [59] R. Sato, K. Hagino, E. Behar, M. Mizumoto, M. Tashiro, R. Boissay-Malaquin, C. Done, L. Galo, H. Odaka, A. Tanimoto, T. Yaqoob, S. Yamada, J. Reeves, F. Tombesi, A. Gonzalez, A. Luminari, Y. Xu, P. Condó, R. Mizukawa, A. Miyamoto, V. Braito, T. Iwata, A. Bamba, “The Geometry of Ultra-Fast Outflows Probed by Soft X-ray Variability in PDS 456”, “International Conference The History and Future of X-ray Astronomy 2024”, Tokyo, 2024, Dec. 9, oral

招待講演

- [60] A. Bamba, “Recent Topics of X-ray Astrophysics with XRISM”, “Grant-in-Aid for Transformative Research Areas (A), “Multimessenger Astrophysics”: The second annual conference”, Minakami, Japan, 2024 Nov. 18-20
- [61] A. Bamba, “Recent progress on supernova remnants with XRISM X-ray satellite”, “Nucleosynthesis and Evolution of Neutron Stars”, Kyoto, Japan, 2025 Jan. 27-30
- [62] A. Bamba, “XRISM achievement on Galactic diffuse sources”, “NewAthena Science Study Team (NASST) meeting#9 XRISM scientific highlights implication for NewAthena”, online, 2025 Mar. 20

- [63] K. Hagino, “Current status and early observational results of X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM)”, The extreme Universe viewed in very-high-energy gamma rays 2024, University of Tokyo, 2024 Jan. 7-8

(国内会議)

一般講演

- [64] 馬場 彩, 「XRISM/Resolve による Cassiopeia A 鉄 ejecta の 3 次元膨張構造の測定」、日本天文学会春季年会、水戸市民会館、2025 年 3 月 17-20 日
- [65] 萩野浩一、他, 「XRISM Observation of Powerful Disk Wind Quasar PDS 456: 1. Overview and highlights」、日本天文学会秋季年会、関西学院大学、2024 年 9 月 11-13 日
- [66] 萩野浩一、他, 「XRISM の精密 X 線分光観測で探るクエーサー PDS 456 の降着円盤風の内部構造」、ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025、名古屋市立大学、2025 年 3 月 5-7 日
- [67] 萩野浩一、Lukasz Stawarz, 「XRISM observation of the broad-line radio galaxy 3C 111」、日本天文学会、水戸市民会館、2025 年 3 月 17-20 日
- [68] 新井 翔大, 「GRAMS 気球実験の現状」、第 3 回 MeV ガンマ線天文学研究会、石川県文教会館、2024 年 9 月 9-10 日
- [69] 新井 翔大, 「GRAMS 計画 13: 液体アルゴンコンプトンカメラ実証機の開発状況」、日本天文学会秋季年会、関西学院大学、2024 年 9 月 11-13 日
- [70] 新井 翔大, 「GRAMS 実験 22: 液体アルゴンコンプトンカメラ実証機 NanoGRAMS の開発状況」、日本物理学会春季大会、オンライン、2025 年 3 月 18-21 日
- [71] 岩田 季也, 「一般相対論的モンテカルロ X 線放射輸送コードの開発」、日本天文学会春季年会、水戸市民会館、2025 年 3 月 17-20 日
- [72] 立石 大, 「Suzaku/XIS による超新星残骸 RX J0852.0-4622 の非熱的放射の方位角変化の起源の検討」、日本天文学会秋季年会、関西学院大学、2024 年 9 月 11-13 日
- [73] 立石 大, 「XRISM/Resolve を用いた Cassiopeia A 超新星残骸からの低エネルギー宇宙線由来の中性鉄輝線の探査」、日本天文学会春季年会、水戸市民会館、2025 年 3 月 17-20 日
- [74] 立石 大, 「Neutral Fe line study of cosmic-ray acceleration in young supernova remnants」、XRISM core-to-core Science Workshop for Young Researchers、東京都立大学、2024 年 9 月 27 日
- [75] 藤本 源, 「効率的な粒子加速現場の特定を目指した超新星残骸 RCW 86 北東部の広帯域解析」、天文・天体物理若手の会、宝生苑、2024 年 7 月 23-26 日
- [76] 藤本 源, 「効率的な粒子加速現場の特定を目指した超新星残骸 RCW 86 北東部の広帯域解析」、日本天文学会秋季年会、関西学院大学、2024 年 9 月 11-13 日
- [77] 藤本 源, 「効率的な粒子加速現場の特定を目指した超新星残骸 RCW 86 北東部の広帯域解析 2」、日本天文学会春季年会、水戸市民会館、2025 年 3 月 17-20 日
- [78] 南 喬博, 「日米共同・太陽フレア X 線集光撮像分光観測ロケット実験 FOXSI-4 による M-Class フレア硬 X 線直接撮像分光観測の実現」、日本天文学会秋季年会、関西学院大学、2024 年 9 月 11-13 日
- [79] 南 喬博、他 FOXSI-4 team, 「FOXSI-4 硬 X 線望遠鏡観測結果」、2024 年度・宇宙プラズマにおける粒子加速ワークショップ、東京大学、2025 年 3 月 21 日
- [80] 佐藤 璃輝, 「活動銀河核 PDS 456 のフレアに伴う X 線スペクトルの時間変動の解析」、天文・天体物理若手の会、宝生苑、2024 年 7 月 23-26 日
- [81] 佐藤 璃輝, 「活動銀河核 PDS 456 のフレアに伴う X 線スペクトルの時間変動の解析」、日本天文学会秋季年会、関西学院大学、2024 年 9 月 11-13 日
- [82] 佐藤 璃輝, 「PDS 456 の軟 X 線時間変動を通じて探る超高速アウトフローのジオメトリ」、ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025、名古屋市立大学、2025 年 3 月 5-7 日
- [83] 佐藤 璃輝, 「PDS 456 の軟 X 線時間変動から探る超高速アウトフローのジオメトリ」、日本天文学会春季年会、水戸市民会館、2025 年 3 月 17-20 日
- [84] 松橋 裕洋+, 「SOI 技術を用いた新型 X 線撮像分光器の開発 64: 周辺回路を内蔵した新型 XRPIX の開発と性能評価」、日本天文学会秋季年会、関西学院大学、2024 年 9 月 11-13 日

招待講演

- [85] 馬場 彩, 「Practical aspects of X-ray observations」、第 3 回ビギナーズワークショップ、東北大学/ハイブリッド、2024 年 8 月 30 日

(セミナー)

- [86] 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 (2024 年 10 月 30 日)
- [87] 萩野 浩一, 「XRISM で探る超巨大ブラックホールと銀河の進化」、XRISM 一般講演会、JAXA 相模原キャンパス (2024 年 10 月 13 日)
- [88] 市橋 正裕, 「星が遺したメッセージ -X 線で観る超新星残骸-」、岐阜大学 (2024 年 10 月 15 日)

6.6 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 $1 \sim 3$ 分角の角度スケールに現れる。

我々は、チリ・アタカマ高地で観測を継続してきた POLARBEAR 実験、その後継である Simons Array 実験を通して研究を進めてきた。これに加えて、Simons Array と Atacama Cosmology Telescope (ACT) のグループを統合して発足した Simons Observatory 実験においても、装置開発や観測データの解析を進めている。

CMB を通した物理探索に加えて、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。また、類似の実験系を用いた高周波数 (GHz) 重力波の探索についても、実現性の検討を進めている。

6.6.1 Polarbear 実験

POLARBEAR 実験は、原始重力波 B モード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。2024 年度には、連続回転する半波長板の光学特性を利用した、大気中の酸素分子のゼーマン効果による円偏光の検出を報告した。

6.6.2 Simons Array 実験

Simons Array 実験は POLARBEAR 実験の後継であり、POLARBEAR の 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 2 台運用し、2024 年 9 月まで観測を行った。

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。日下研究室の卒業生が UC バークレーの共同研究者らと協力し、較正データを用いた axion-like particle の探索を進めている。

2 台目望遠鏡は、2023 年度に引き続き、日下研究室のメンバーが主導して、 $1/4$ 波長板を用いた独自の円偏光観測を行った。CMB 解析と同様に、較正天体を用いた系統誤差の見積もり、null-test によるデータ・解析の検証を行い、観測結果に誤りが無いことを確かめた。



図 6.6.12: チリ観測所での Simons Array 2 台目望遠鏡建設作業の様子。検出機較正装置などの導入を完了させ物理観測を開始させた。

6.6.3 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 実験では、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。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を設計し、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、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方針で作製を行った。焦点面は希釈冷凍機により 100 mK 以下まで冷却される。本研究室は、細い金属線を人工偏光光源とした校正装置の開発も行なった。京都大学と共同開発を行い、遠隔かつ自動で較正が可能なシステムを構築した。加えて、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、諏訪理科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、3 台の望遠鏡システムへの統合・評価が行われた。現在 Simons Observatory 実験はチリの観測所での望遠鏡建設が完了しつつある。日下研究室からも複数のメンバーが現地作業に参加し、建設作業に貢献した (図 6.6.13, 図 6.6.14)。

2024 年度には、先行して観測を始めた小口径望遠鏡 2 台の初期データの解析を進め、また日本グループが主導する新望遠鏡に向けた装置開発も大きく進捗した。初期データの解析では、特性を理解するための較正データの解析を進めると共に、小口径望遠鏡群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」の開発が大きく進んだ。特に、当研究室所属の大学院生が中心的な役割を果たしながら、宇宙マイクロ波背景放射温度揺らぎおよび偏光揺らぎのパワースペクトルを試験データながら測定し、これを通して観測装置が想定通りの感度・精度を達成していることを実証した。これは、今後観測を続けて精度を上げていく上での大きなマイルストーンである。

さらに、新望遠鏡として、Simons Observatory の中でも日本チームが主導する 4 台目望遠鏡に向けて開発を進めている。4 台目望遠鏡では、これまで 3 台の望遠鏡とは異なり、30 ~ 40 GHz という波長の長い周波数帯での観測を行うため新たな研究開発と最適化が必要となる。当研究室が主導する半波長板の開発においても、これまでより重量の重いサファイア光学素子を超伝導磁気軸受けにより浮遊、回転させる必要があるが、有限要素法を用いた設計・開発の手法を確立することで、この開発研究を成功させた。

6.6.4 次世代 CMB 実験用 装置開発

次世代 CMB 実験である CMB-S4 において、基本設計に半波長板システムが採用され、当研究室が開発する半波長板技術が重要な役割を果たすこととなった。CMB-S4 においては Simons Observatory よりも大口径のシステムが必要となるため、それに向けた回転装置及び光学素子の研究開発を進めている。また、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た。これまでに開発



図 6.6.13: Simons Observatory 望遠鏡の現地作業の様子。光学筒や希釈冷凍機を望遠鏡の中に導入した。



図 6.6.14: Simons Observatory 望遠鏡の現地作業の様子。現在、2 台目望遠鏡までが現地に建設された。写真は 2 台目望遠鏡の準備作業の様子。

を進めてきた周波数帯よりも低い 30~40 GHz 帯のための三層の防反射加工の開発と評価を行い、作成手法を確立した。これを元に、600 mm 直径の大型素子の作成を進めている。

6.6.5 量子センシング技術を用いた軽量暗黒物質アクシオンおよび GHz 重力波探索

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

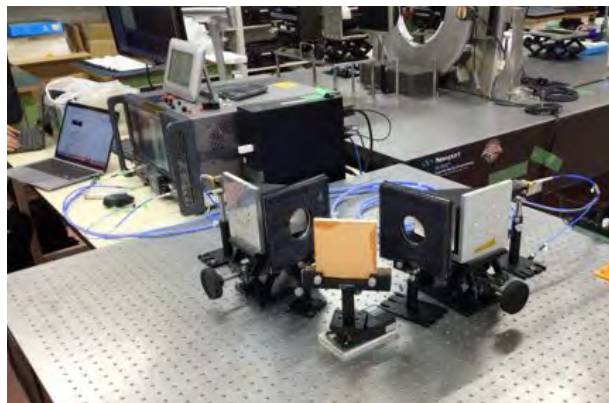


図 6.6.15: 防反射加工を施したフィルターの光学特性を評価している様子。Kavli IPMU と協力し測定を行った。

ここで、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ド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ョン探索を行うことを目指している。R&Dとして強磁性体結晶の大型化を進め、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ヘインストールし、さらに磁場の一様性を高めることでクリーンなハイブリッドモードを検出できるようになった。また、量子センシングプロトコルの最適化を進め、感度の最適化に関する研究が進展した。さらに、磁場を印加した三次元共振器を用いた高周波 (GHz) 重力波の探索についても検討を進めている。

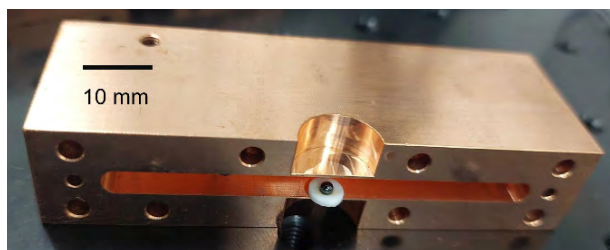


図 6.6.16: キャビティ内に直径 2mm の強磁性結晶 (YIG) の球を導入したキャビティ-マグノンハイブリッド系

<報文>

(原著論文)

- [1] Takuro Fujino, Satoru Takakura *et al.*, “A Measurement of Atmospheric Circular Polarization with POLARBEAR,” *ApJ*, **981** 15 (2025)
- [2] A. Coerver *et al.*, “Measurement and Modeling of Polarized Atmosphere at the South Pole with SPT-3G,” *ApJ*, **982** 15 (2025)

- [3] Megan Russell *et al.*, “Deployment of POLARBEAR-2b,” *J Low Temp Phys*, **216** 237–245 (2024)
- [4] Shunsuke Adachi *et al.*, “Exploration of the polarization angle variability of the Crab Nebula with POLARBEAR and its application to the search for axionlike particles,” *Phys. Rev. D*, **110** 63013 (2024)
- [5] Nicholas Galitzki *et al.*, “The Simons Observatory: Design, Integration, and Testing of the Small Aperture Telescopes,” *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **274** 33 (2024)

(学位論文)

博士論文

- [6] 寺崎友規, “Development and Characterization of the Simons Observatory Small Aperture Telescopes for High-Precision Measurements of Cosmic Microwave Background Polarization”
- [7] 坂東佳奈, “Search for Millimeter-Wave Circular Polarization with the Simons Array Experiment”

修士論文

- [8] 佐々木大地, “Research and Development of Millimeter-Wave Polarization Modulators for Polarization Measurements of CMB and Galactic Synchrotron Radiation”
- [9] 樋口昌樹, “Simons Observatory 実験の小口径望遠鏡における極低温領域の冷却性能向上に向けた研究開発”

(国際会議)

招待講演

- [10] Akito Kusaka, “Cosmic Microwave Background – Now and Future, and relevance for particle physics,” KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology, KEK (2025/2)
- [11] Akito Kusaka, “Observing the First Light in the Universe, from the Earth and from the Sky,” CMB B-mode – NEXT, KEK (2025/1)

一般講演

- [12] Tomoki Terasaki, “Simons Observatory: small aperture telescopes overview and status,” SPIE Astronomical telescopes + Instrumentation, Yokohama (2024/6)
- [13] Masaki Higuchi, “Simons Observatory: Optimization of the sub-Kelvin thermal strap and thermal contact conductance for a Small Aperture Telescope,” SPIE Astronomical telescopes + Instrumentation, Yokohama (2024/6)
- [14] Junna Sugiyama, “Precipitable water vapor measurement using GNSS data in the Atacama Desert for millimeter and submillimeter astronomical observations,” SPIE Astronomical telescopes + Instrumentation, Yokohama (2024/6)

- [15] Daichi Sasaki, “Large aperture and large load-capacity superconducting magnetic bearing for a millimeter-wave polarization modulator,” The Applied Superconductivity Conference, Salt Lake City (2024/9)
- [16] Junna Sugiyama, “The Simons Observatory: data analysis on the cryogenic half-wave plate of the small aperture telescopes,” COSMO’ 24, Kyoto University (2024/10)
- [17] Daichi Sasaki, “Systematic effects of the polarization modulator for the low-frequency band of Simons Observatory,” COSMO’ 24, Kyoto University (2024/10)
- [18] Satoru Takakura, “Half-Wave Plate Pros & Cons from analysis point of view,” CMB B-mode – NEXT, KEK (2025/1)
- [19] Junna Sugiyama, “The Simons Observatory Overview,” CMB B-mode – NEXT, KEK (2025/1)
- [20] Tomoki Terasaki, “The Simons Observatory Analysis of Small Aperture Telescopes,” CMB B-mode – NEXT, KEK (2025/1)
- [21] Daichi Sasaki, “Half-Wave Plate of Simons Observatory SAT,” CMB B-mode – NEXT, KEK (2025/1)
- [22] Yuta Miki, “Investigation of lens mount issue for Small Aperture Telescopes of Simons Observatory,” CMB B-mode – NEXT, KEK (2025/1)
- [29] シン シュレスタ ヤマン, 他, “マグノンの量子センシングを用いたアクシオンダークマター 探索: YIG 結晶の大型化に向けた開発,” 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学 (2024/9)
- [30] 杉山純菜, 他 Simons Observatory コラボレーション, “Simons Observatory 実験で稼働する低温偏光変調器のデータ解析,” 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学 (2024/9)
- [31] 坂栗佳奈, 他 POLARBEAR コラボレーション, “Simons Array 実験での円偏光探索に向けた 1/4 波長板開発と観測状況,” 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学 (2024/9)
- [32] 三木裕太, 他 Simons Observatory コラボレーション, “Simons Observatory 実験の小口径望遠鏡におけるレンズ保持法の検証,” 日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン (2025/3)
- [33] シン シュレスタ ヤマン, 他, “マグノンの量子センシングを用いたアクシオン探索実験に向けた 研究開発,” 第 16 回低温科学研究センター研究交流会, 東京大学 (2025/2)
- [34] 高倉理, 藤野琢郎, 他 POLARBEAR Collaboration, “POLARBEAR 実験による大気円偏光の観測,” 日本天文学会 2024 年秋季年会, 関西学院大学 (2024/9)

(国内会議)

招待講演

- [23] 日下 暁人, “宇宙マイクロ波背景放射観測の現在と展望,” ミニワークショップ “ボトムアップ素粒子・重力融合理論と宇宙観測,” 新潟大学 (2024/12)

一般講演

- [24] 高倉理, 他 POLARBEAR collaboration, “Simons Array 実験での交流バイアス TES モデルの調査,” 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学 (2024/9)
- [25] 内河内峻太, 他, “空洞共振器を用いた GHz 帯重力波探索実験の検討,” 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学 (2024/9)
- [26] 三木裕太, 他 Simons Observatory コラボレーション, “Simons Observatory 低周波の小口径望遠鏡に向けた冷却光学系の性能評価,” 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学 (2024/9)
- [27] 樋口昌樹, 他 Simons Observatory コラボレーション, “Simons Observatory 実験に搭載する可とう端子設計のための極低温領域における銅線の熱伝導率測定,” 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学 (2024/9)
- [28] 佐々木大地, 他 Simons Observatory コラボレーション, “Simons Observatory 実験における低周波数帯用偏光変調器の回転機構開発,” 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道大学 (2024/9)

6.7 竹内研究室

竹内研究室は、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・コロイドなどのソフトマターや、バクテリアなど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法則を抽出することを目指し、アクティブマター、非平衡相転移、トポロジ等々のキーワードで繋がる多彩な問題を扱う。本年度は以下の課題に取り組んだ。研究室ウェブサイト <https://labjp.kaztake.org/> にも紹介がある。

6.7.1 ソフトマター系の非平衡実験

柔らかい粉体に特有の剛性転移を発見

粉体は、状況によって流れたり固まったりすることができ、剛性転移を示す。従来研究では、粉体の剛性転移、特にジャミング転移は、剛体球などの硬い粒子系を中心に調べられてきたが、自然界には、細胞組織をはじめ、大変形可能な粒子系も珍しくない。そこで我々は、極端に柔らかく大変形可能なモデル粉体粒子を製作し、それを多数敷き詰めた粉体系に剪断を加えることで、柔らかい粉体系の剛性転移の計測に取り組んできた。粒子運動の解析と力測定から、固化・剛性転移を明確に検出し特徴づけたほか、硬い粉体とは異なる原理で柔らかい粉体系の剛性転移が引き起こされることが判明し、その理論的説明にも成功した [6, 25, 36]。

確率的な粒子輸送のモデル実験

非平衡統計力学において重要な Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 普遍クラスは、成長界面ゆらぎなど様々な非平衡現象を記述する [10, 24, 70]。理論的には、KPZ クラスが記述する物理現象の 1 つに確率的な粒子輸送があり、非対称単純排他過程 (通称 ASEP) などで極めて詳細な性質が調べられているが、実験で KPZ クラスの特徴指数が観測されたことはない。我々は、ビーズ粒子を収めるサイトを非対称チャンネルで繋いだ格子系を基板上に製作し、一式を加振することで、確率的な粒子輸送のモデル実験に取り組んでいる。粒子は、非対称ホッピングや排除体積相互作用など、本実験に適した特性を備えていることが判明し、現在大規模化に取り組んでいる [18]。

液晶トポロジカル欠陥の再結合現象の直接観測

液晶の特徴は配向秩序にあり、その局所的な乱れであるトポロジカル欠陥は、理学的にも工学的にも興味を持たれてきた。我々は、蛍光色素の吸着を用いて線状トポロジカル欠陥の 3 次元動力学を直接観察する実験を展開している。トポロジカル線欠陥の特徴的な素過程として、線欠陥どうしの再結合現象があり (図 6.7.17)、我々はこれまで、解析の容易な面内再結合について特徴的スケール則と自発的対称性の回復現象を見出していた。今回、交差型の再結合現象に対象を広げ、画像解析手法を開発して動力学を調査したところ、線欠陥の距離と交差角の関係に理論と異なる挙動が見出された [4]。理論家との共同研究を通し、相違点の起源について理論的洞察を得ることに成功している。

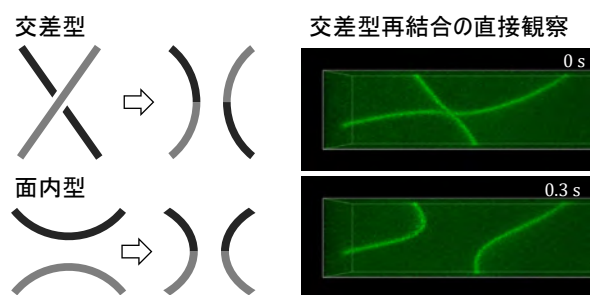


図 6.7.17: 液晶トポロジカル欠陥の再結合現象 [4]

自己遊泳コロイドの走流性

非対称な表面を持つコロイド粒子 (ヤヌス粒子) に水中で鉛直方向の交流電場を印加すると、非対称な電気浸透流が生じる結果として、水平面内を自己遊泳する [74]。このヤヌス粒子が、微生物などがせん断流下で上流あるいは下流に方向性を持って遊泳する走流性と同様の性質を示すか否か調査するために、ヤヌス粒子のせん断流下での挙動を調査した。その

ための、交流電場と流れを同時に印加できるデバイスを考案・製作した [59]。

6.7.2 生物系の非平衡実験

細菌集団におけるアクティブマター諸物質相の探求

バクテリアなどの生細胞は、伝統的な物理学で想定される粒子と異なり、自発的運動や成長、分裂、生体分子や小胞の分泌など、粒子スケールで様々な非平衡現象を生み出している。このような構成粒子の集団は、非平衡性が内在する新奇物質と捉えることもでき、そこに如何なる物質相が出現して、それがどのような特徴を有するかを解明することは、アクティブマター物理学の重要な課題である [50, 71]。我々は、メンブレン微小流体デバイス中の閉鎖領域で運動性大腸菌を培養・観察し、バクテリア集団に特有のガラス転移を見出すとともに、通常のガラス転移との共通点や相違点などを明らかにした [5]。また、非運動性大腸菌の飢餓過程において、浮遊細胞の集団がスメクチック液晶状の束構造を形成することを発見し、それが枯渇引力に起因すること、細胞成長の停止も必要であることを見出した [8, 60, 65, 69]。ほか、バクテリア集団における液晶秩序の役割も様々な研究を展開している [10, 30, 50, 60, 65, 69]。

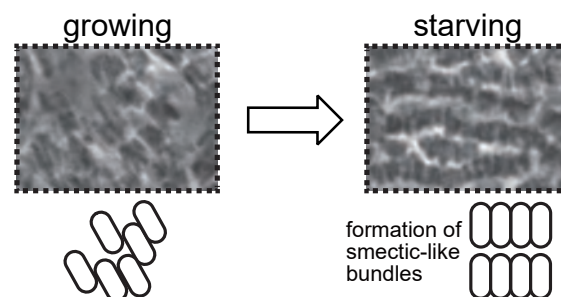


図 6.7.18: 飢餓状態の大腸菌集団が形成するスメクチック液晶状の束構造 [8]

遊泳バクテリア集団運動の乱流化シナリオ

高密度の遊泳バクテリア懸濁液は、渦が多く存在し、時空カオス的な流動を示す集団運動状態であるアクティブ乱流を発現する。このバクテリア懸濁液を小さな円形領域内に閉じ込めると、一方方向に安定して回転する定常な渦を形成しする一方、大きな半径の極限では元の時空カオス的な流動に至る。本研究では、この円形領域の半径が大きくなるにつれてアクティブ乱流へ至る過程における中間状態を詳細に調べた。結果として、まず定常な渦が乱れるとともに渦の回転方向が周期的に反転する 2 渦の状態が現れ、次に脈動する 4 渦の状態を経て乱流化することを発見した (図 6.7.19)。これらの観測結果をアク

ティブ流体模型に基づく数値計算と解析的理論からも再現することに成功し、アクティブ乱流への遷移過程における分岐構造などの理論的理解を構築した [9, 26, 28, 31, 32, 34, 35, 37, 42, 45, 46, 62, 64, 66, 67, 68, 72, 73]。

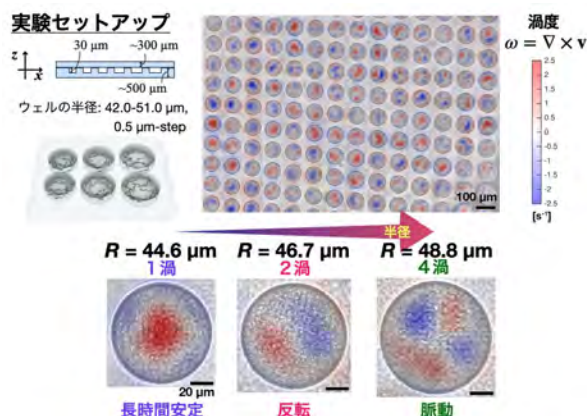


図 6.7.19: 高密度のバクテリア懸濁液を微小な円筒領域内に閉じ込めたときの振る舞いを、その半径を体系的に変えながら調査した。

アクティブマターにおけるトポロジカル現象の探求

近年のトポロジカル物性科学の興隆を受け、アクティブマターや生物系においても、トポロジカルに駆動された輸送現象の出現が理論的に予言されている。我々は、アクティブマターにおけるトポロジカル現象をデザインすべく、非対称な流路からなる格子構造を微細加工で作製し、バクテリア集団を閉じ込める実験を行った (図 6.7.20)。まず、ラチェット機構を持つ流路によってバクテリア集団の一方向流れを実現した。次に、この流路を用いて籠目格子を作成した。格子中でのバクテリア集団の密度分布解析によりエッジ局在が観察された。また、実験的で得たバクテリア集団の速度場を用いて粒子輸送をシミュレーションで議論し、バクテリア集団の特徴的な流れがエッジ局在を生み出すことが示唆された [11, 17, 40, 44, 56]。

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が形成する多細胞生物的集団 (バイオフィーム) はその三次元構造や細胞マトリクス分子によって特徴づけられ、その腐食能や薬剤耐性能から様々な分野で盛んに研究されている。しかしその集団形成の初期段階において、いつ・どのようにマトリクスが分泌されるのかは明らかにされていない。そこで我々は大腸菌の典型的なマトリクスの一つであるコラン酸 (CA) がバクテリア集団内で生産誘導される過程を蛍光顕微鏡で観察し、トポロジカル欠陥という特徴的な細胞配向パターン

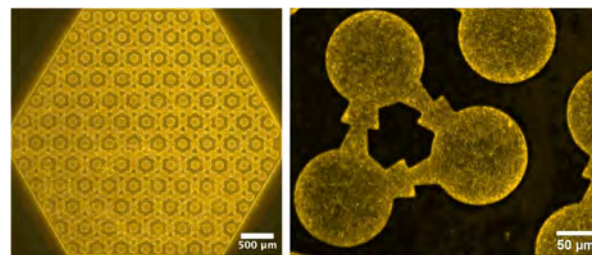


図 6.7.20: 非対称な籠目格子に閉じ込められたバクテリア懸濁液の共焦点顕微鏡写真 (左)。籠目格子はラチェット機構を持つ非対称流路 (右) から構成されている。

の周囲よりコラン酸が生産誘導されることを見出した (図 6.7.21)。コラン酸生産は細胞の膜変形によって誘導され、欠陥において細菌細胞は蓄積することから、欠陥周囲における細胞の混み合いによる細胞衝突によってコラン酸生産が不均一に誘導されたと考えられる [14, 27, 57, 63, 65, 69]。

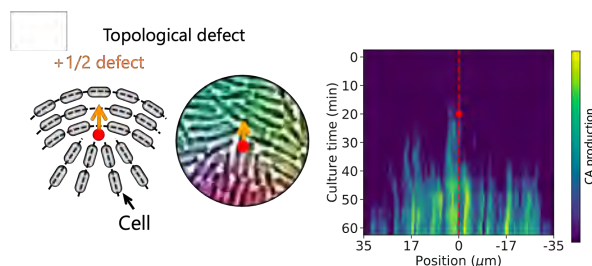


図 6.7.21: トポロジカル欠陥周囲でのコラン酸生産誘導

微生物生態研究に向けた土壌多孔質モデル実験系開発

土壌中には多種多数の微生物が共存しており、その生態系における土壌の多孔質空間構造の重要性が近年活発に議論されている。微生物生態と空間構造の関連を解き明かすためには、空間動態を非破壊的に追跡可能な制御性・解析性の高い実験モデルが必要である。そこで我々は、光学観察による時空間追跡が可能な三次元土壌モデルを構築するため、低屈折率の透明材料を人工土壌粒子として微小培養デバイスを開発した。特に、土壌の乾燥・湿潤にともなう水と空気の空間分布変化に着目し、その構造依存性やヒステリシスを観察した [58]。

磁気走性バクテリアの集団状態

外場応答は、揺動応答関係や Harada-sasa 等式のように、揺らぎの理解を深めてきた。アクティブア

クティブマターにおいても同様に、外場応答を測定することで、集団スケールでの揺らぎの理解を発展させられると期待される。本研究では、細胞が磁気モーメントを持っており磁場応答する磁性細菌を用いて、アクティブマターの集団運動における磁場応答の定量化を実現した。磁場応答の測定に先立ち、磁性細菌を擬二次元的なウェルに閉じ込めて、無磁場において磁性細菌の細胞同士が局所的に配向する様子を観察した。次に、定常磁場に対する集団運動の磁場応答を調べた。磁性細菌の集団運動に、永久磁石を用いて定常磁場を印加して、定常磁場に対する磁場応答を測定した。[2, 3, 16, 20, 22, 38, 43, 47, 48, 52]

捕食回避における生物の集団運動

大規模な群れはしばしば被捕食者種においてみられ、捕食回避において集団運動が重要な役割を果たすと考えられている。本研究では、実際に捕食圧に晒されている生物種であるミナミコメツキガニ (*Mictyris guinotae*) に着目し、集団運動が効果的な捕食回避を与える物理学的メカニズムを調べている。我々は、野外の群れに対して遠隔で視覚刺激を与える実験手法を構築し、異なる群れサイズにおける集団逃避運動の観測に成功している (図 6.7.22)。また、観測データの解析手法として、機械学習をベースとした個体検出を高精度で実現した [1, 12, 39, 55]。

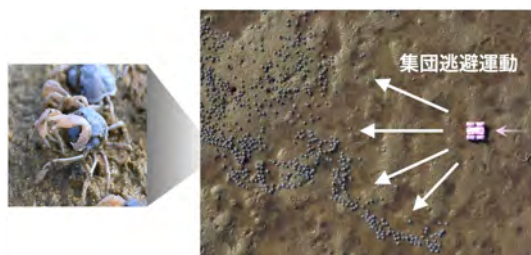


図 6.7.22: 誘発されたミナミコメツキガニの集団逃避運動のスナップショット。

6.7.3 理論的アプローチ

可積分スピン鎖と Kardar-Parisi-Zhang クラス

成長界面ゆらぎなどを記述する KPZ 普遍クラスは、厳密解研究の進展によって、その非平衡ゆらぎの統計的性質が極めて深く理解されている [10, 24, 70]。近年、その KPZ クラスの特徴が、可積分スピン鎖の平衡 2 点相関に現れることが報告され、注目されているが、ごく最近の研究では高次統計量の相違が示され、KPZ とは異なるという結論が主張されていた。我々は、古典および量子系の可積分スピン鎖の数値計算を行い、KPZ 厳密解の知見を活用して、様々な 2 点統計量の定量的検証を行った。その結果、高次統計量は KPZ と異なる一方で、平衡 2 点相関以外

の様々な 2 点統計量が全て KPZ 厳密解と定量的に一致することが判明し、KPZ クラスが平衡スピン系に、部分的ながら明瞭に現れるという、極めて不思議な事実を見出すことに成功した [7, 23, 29, 33, 51]。

リザーバー計算による大自由度カオス解析

バタフライ効果という言葉に代表されるように、不安定性や初期条件鋭敏依存性はカオス現象の本質的特徴であり、定量的には Lyapunov 指数で特徴づけられる。大自由度の時空カオス現象では、実験的に Lyapunov 指数を計測することは従来不可能と考えられてきたが、数値的には、機械学習手法、特にリザーバー計算によって、大自由度系に適用可能な手法が開発されていた。我々は、バクテリア集団が示すバクテリア乱流現象が時空カオス系に近い特徴を有すること [9] に着目し、顕微鏡画像の解析データとリザーバー計算を組み合わせることによって、Lyapunov 指数の計測に向けた取り組みを行っている [15, 31, 41, 62]。

<受賞>

- [1] 上杉佑人, 宇宙地球フロンティア国際卓越大学院プログラム優秀賞, 2025 年 2 月 21 日.
- [2] 後藤崇志, MERIT 自主キャンプポスター発表最優秀賞, MERIT 自主キャンプ, 2024 年 9 月 9 日
- [3] 後藤崇志, 第 12 回ソフトマター研究会 ポスター賞, 2024 年 12 月 17 日.

<報文>

(原著論文)

- [4] Y. Zushi, C. D. Schimming, K. A. Takeuchi, Approach and rotation of reconnecting topological defect lines in liquid crystal. *Phys. Rev. Res.* **6**, 023284 (2024).
- [5] H. Lama, M. J. Yamamoto, Y. Furuta, T. Shimaya, K. A. Takeuchi, Emergence of bacterial glass. *PNAS Nexus* **3**, pga238 (2024).
- [6] S. Poincloux, K. A. Takeuchi, Rigidity transition of a highly compressible granular medium. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **121**, e2408706121 (2024).
- [7] K. A. Takeuchi, K. Takasan, O. Busani, P. L. Ferrari, R. Vasseur, J. De Nardis, Partial yet definite emergence of the Kardar-Parisi-Zhang class in isotropic spin chains. *Phys. Rev. Lett.* **134**, 097104 (2025).
- [8] T. Shimaya, F. Yokoyama, K. A. Takeuchi, Smectic-like bundle formation of planktonic bacteria upon nutrient starvation, *Soft Matter* **21**, 2868-2881 (2025).
- [9] D. Nishiguchi, S. Shiratani, K. A. Takeuchi, I. S. Aranson, Vortex reversal is a precursor of confined bacterial turbulence. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **122**, e2414446122 (2025).

(会議抄録・総説)

(国内雑誌)

- [10] 竹内一将, 東京大学実験統計力学研究室 (竹内研究室) — 研究室紹介から見る液晶科学の拡がり —. 液晶 **28**, 161-164 (2024).

(学位論文)

- [11] 内田善人, 非対称流路によって整流されたバクテリア集団運動のエッジ状態. 修士論文, 2025.
- [12] 上杉佑人, *Mictruris guinotae* の集団逃避運動の観測: 群れ効果の物理的解明を目指して, 修士論文, 2025.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [13] F. Yokoyama, A. Kling, P. S. Dittrich, Extracellular Vesicles Secreted From Individual *Escherichia coli* Cells on Microfluidic Device, ASM Microbe 2024, poster, Atlanta (GA, USA), June 17, 2024.
- [14] F. Yokoyama, K. A. Takeuchi, Phenotypic Heterogeneity and Cell Orientation in Extracellular Matrix Production of *Escherichia coli*, IUPAB (International Union for Pure and Applied Biophysics) 2024, poster, Kyoto (Japan), June 26, 2024.
- [15] K. A. Takeuchi, Evaluating the instability & the inertial manifold dimension of space-time chaos from time series data. Dynamics Days Asia Pacific 13 / YKIS2024, talk, Kyoto (Japan), July 3, 2024.
- [16] T. Goto, D. Nishiguchi, K. A. Takeuchi, Observation of collective states of magnetotactic bacteria confined in cylindrical wells, Frontiers in Non-equilibrium Physics 2024, poster, Kyoto (Japan), July 24, 2024.
- [17] Y. Uchida, D. Nishiguchi, K. A. Takeuchi, 2D network with asymmetric flow of bacterial collective motion, Frontiers in Non-equilibrium Physics 2024, poster, Kyoto (Japan), July 24, 2024.
- [18] J. Zhu, K. A. Takeuchi, A model granular system for stochastic particle transport. Recent developments in Kardar-Parisi-Zhang universality, talk, Kyoto (Japan), Sep. 26, 2024.
- [19] L. Kershner, W. E. Uspal, Geometry-dependent motion of L-shaped microswimmers near a planar wall, poster presentation, International Active Matter Workshop, Tokyo (Japan) Jan. 24, 2024.
- [20] T. Goto, D. Nishiguchi, K. A. Takeuchi, Response of collective orientation of magnetotactic bacteria to a stationary magnetic field, Active matter workshop 2025, poster, Tokyo (Japan), Jan. 24, 2025.
- [21] Y. Karita, G. T. Rodríguez-Sánchez, E. Brambilla, J. C. R. Hernandez-Beltran, M. Schwarz, P. B. Rainey, Ancestors scaffold environments for mutants to succeed in adaptive evolution. 1st India-Japan Workshop on Physical Aspects of Living Systems, poster, Tokyo (Japan), Feb. 19-21, 2025.
- [22] T. Goto, D. Nishiguchi, K. A. Takeuchi, Magnetic field response of collective orientation of magnetotactic bacteria in quasi-2D space, Soft liquid matter physics 2024, poster, Tokyo (Japan), Mar. 13, 2025.
- [23] K. A. Takeuchi, K. Takasan, O. Busani, P. L. Ferrari, R. Vasseur, J. De Nardis, Partial yet definite emergence of the Kardar-Parisi-Zhang class in isotropic spin chains. APS Global Physics Summit, talk, Anaheim (USA), Mar. 19, 2025.

招待講演

- [24] K. A. Takeuchi, Introduction to the KPZ equation and its experimental aspects. Les Houches School of Physics: Kardar-Parisi-Zhang equation: new trends in theories and experiments, lectures, Les Houches (France), Apr. 20-24, 2024.
- [25] K. A. Takeuchi, Squish Jamming. XXth Rencontres du Vietnam: Soft Matter, Fluids, Interfaces, talk, Quy Nhon (Vietnam), June 10, 2024.
- [26] D. Nishiguchi, Reversals and oscillations as a prelude to bacterial turbulence. The Physics of Self-Organising Active Matter, talk, Edinburgh (UK), Jul. 9, 2024.
- [27] F. Yokoyama, Phenotypic Heterogeneity of Extracellular Matrix Production within Bacterial Proliferating Active Matter. The physics of self-organizing active matter, talk, Edinburgh (UK), July 10, 2024.
- [28] K. A. Takeuchi, Route to turbulence of bacterial suspensions under confinement. Frontiers in Non-equilibrium Physics 2024, talk, Kyoto (Japan), July 26, 2024.
- [29] K. A. Takeuchi, Partial yet definite emergence of the Kardar-Parisi-Zhang class in isotropic spin chains. Conference of Condensed Matter Physics (CCMP2024), talk, Liyang (China), Aug. 5, 2024.
- [30] K. A. Takeuchi, Active nematics. PEBBLE BioFusion Camp 2024, lecture, Hangzhou (China), Aug. 8, 2024.
- [31] K. A. Takeuchi, Onset and instability of bacterial turbulence: from experiments to theory and back. PEBBLE BioFusion Camp 2024, talk, Hangzhou (China), Aug. 8, 2024.
- [32] D. Nishiguchi, Topological and geometrical control of bacterial turbulence. American Chemical Society Fall 2024 Global Virtual Symposium "Chemical Nanomotors", talk, online, Aug. 21, 2024.
- [33] K. A. Takeuchi, Partial yet definite emergence of the Kardar-Parisi-Zhang class in isotropic spin chains. Recent developments in Kardar-Parisi-Zhang universality, talk, Kyoto (Japan), Sep. 25, 2024.
- [34] D. Nishiguchi, Vortex reversal is a precursor of confined bacterial turbulence. DAIKIN International Symposium on Physics of Intelligence, talk, Tokyo (Japan), Nov. 7, 2024.

- [35] D. Nishiguchi, Vortex reversal is a precursor of confined bacterial turbulence. Gel Symposium 2024, talk, Okinawa (Japan), Nov. 18, 2024.
- [36] K. A. Takeuchi, Squishy Granular Rigidification. Gel Symposium 2024, talk, Nago (Japan), Nov. 19, 2024.
- (国内会議)
- 一般講演
- [37] 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「複雑流動」第6回領域会議, 講演, 福岡, 2024年5月9-11日.
- [38] 後藤崇志, 西口大貴, 竹内一将, 擬二次元系における磁性細菌の配向秩序と磁場応答, 第64回生物物理若手の会夏の学校, ポスター, 北海道, 2024年8月26-29日.
- [39] 上杉佑人, 谷田桜子, Claudio Feliciani, 村上久, Xiaolu Jia, 西口大貴, 竹内一将, 捕食危機に晒されたミナミコメツギガニの集団運動, 第64回生物物理若手の会夏の学校, ポスター, 北海道, 2024年8月26-29日.
- [40] 内田善人, 西口大貴, 竹内一将, 非対称ネット中のバクテリア集団運動が示すエッジ流の探索, 第64回生物物理若手の会夏の学校, ポスター, 北海道, 2024年8月26-29日.
- [41] 竹内一将, 清水太朗, 西口大貴, バクテリア乱流実験における Lyapunov スペクトル推定, 日本物理学会 2024 年次大会, 講演, 北海道大学, 2024 年 9 月 18 日.
- [42] 西口大貴, 白谷空, Igor S. Aranson, 竹内一将, バクテリア乱流の前兆としての渦反転. 日本物理学会第 79 回年次大会, 講演, 北海道, 2024 年 9 月 16-19 日.
- [43] 後藤崇志, 西口大貴, 竹内一将, 擬二次元系における磁性細菌の配向秩序, 日本物理学会 2024 年次大会, 講演, 北海道大学, 2024 年 9 月 19 日.
- [44] 内田善人, 西口大貴, 竹内一将, 非対称ネットワーク中のバクテリア集団運動が示すエッジ流の検証. 日本物理学会 2024 年次大会, 講演, 北海道大学, 2024 年 9 月 19 日.
- [45] 西口大貴, 白谷空, Igor S. Aranson, 竹内一将, バクテリア乱流の前兆としての渦の反転と周期振動. 日本流体力学会 年会 2024, 仙台, 日本, 2024 年 9 月 25-27 日.
- [46] 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「複雑流動」第7回領域会議, 口頭発表, 千葉, 2024 年 10 月 31 日.
- [47] 後藤崇志, 西口大貴, 竹内一将, 擬二次元系におけるバクテリア集団の磁場応答, ソフトマター若手研究会, ポスター, 千葉, 2024 年 11 月 9 日.
- [48] 後藤崇志, 西口大貴, 竹内一将, 擬二次元系におけるバクテリア集団の配向秩序と定常磁場応答, 第 12 回ソフトマター研究会, ポスター, 大阪, 2024 年 12 月 16 日.
- [49] L. Kershner, W. E. Uspal, Geometry-dependent motion of L-shaped microswimmers near a planar wall, poster presentation, 第 12 回ソフトマター研究会, ポスター, 大阪, 2024 年 12 月 16 日.
- [50] 竹内一将, 高密度バクテリア集団によるアクティブマター物質相開拓, 2024 年度酒見パネル「創発の場」, 講演, 東京, 2025 年 1 月 29 日.
- [51] 竹内一将, KPZ 普遍クラスは固体・量子多体系に何ができるか?, 非平衡融合研究会, 講演, 東京大学, 2025 年 2 月 7 日.
- [52] 後藤崇志, 西口大貴, 竹内一将, 磁性細菌の集団の定常磁場応答の測定, 第 14 回日本生物物理学会関東支部会, 講演, 千葉, 2025 年 3 月 5 日.
- [53] 横山文秋, 姫岡優介, 細菌細胞生死境界の定量に向けた嫌気・マイクロ流体生細胞イメージングシステム, 日本農芸化学会 2025 年度大会, ポスター, 北海道, 2025 年 3 月 7 日.
- [54] 横倉淳也, 竹内一将, 連続体方程式に現れる項の系の対称性を用いた自動的探索手法, 日本物理学会 2025 春季大会, 講演, オンライン, 2025 年 3 月 19 日.
- [55] Y. Uesugi, S. Tanida, C. Feliciani, H. Murakami, X. Jia, D. Nishiguchi, K. A. Takeuchi, Collective Escape Behavior in Swarms of Soldier Crabs, 第 2 回生物普遍性ワークショップ, ポスター, 東京大学, 2025 年 3 月 26 日.
- [56] Y. Uchida, D. Nishiguchi, K. A. Takeuchi, Control and design principle of topological transport phenomena in active matter systems, 第 2 回生物普遍性ワークショップ, ポスター, 東京大学, 2025 年 3 月 26 日.
- [57] F. Yokoyama, K. A. Takeuchi, Induced Production of Extracellular Polymeric Substance by Escherichia coli Cells around Topological Defects, 第 2 回生物普遍性ワークショップ, ポスター, 東京大学, 2025 年 3 月 26 日.
- [58] Y. Karita, K. A. Takeuchi, Ecological and evolutionary impacts of spatially-structured habitats, 第 2 回生物普遍性ワークショップ, ポスター, 東京大学, 2025 年 3 月 26 日.
- [59] L. Kershner, D. Nishiguchi, W. E. Uspal, Effects of External Flows on Electrokinetic Janus Particle Locomotion, 第 2 回生物普遍性ワークショップ, ポスター, 東京大学, 2025 年 3 月 26 日.
- 招待講演
- [60] 竹内一将, 生命に宿る液晶, 2024 日本液晶学会 小サマースクール, 講演, 三浦, 2024 年 7 月 12 日.
- [61] 横山文秋, Non-Japanese and non-“Science Communication” Communication: 世界中に友達を作って、語り合う人生って素晴らしいか, 第 64 回生物物理若手の会 夏の学校, 講演, 北海道, 2024 年 8 月 27 日.
- [62] 竹内一将, バクテリア集団の route to turbulence (or 時空カオス), 日本物理学会 2024 年次大会, 講演, 北海道大学, 2024 年 9 月 18 日.
- [63] F. Yokoyama, Heterogeneity of Bacterial Collectives through the Lens of Cell Orientational Order, 第 47 回 日本分子生物学会, 講演, 福岡, 2024 年 11 月 27 日.

- [64] 西口大貴, バクテリア乱流の渦秩序形成と乱流化シナリオ. プラズマ科学のフロンティア 2024 研究会, 講演, 岐阜, 2025 年 1 月 6-7 日.
- [65] K. A. Takeuchi, Active liquid-crystal approaches to bacterial biofilms, OIST SHINKA meeting, 講演, 沖縄科学技術大学院大学, 2025 年 2 月 21 日.
- [66] 西口大貴, アクティブマターでやってみたいこと達. 第 1 回アクティブ流体討論会, 講演, 京都, 2025 年 1 月 17 日.
- [67] 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. 日本物理学会 2025 年春季大会, 講演, オンライン, 2025 年 3 月 21 日.
- (セミナー・集中講義)
- [68] 西口大貴, アクティブマター実験による非平衡普遍法則の探究. 東京科学大学 量子物理学・ナノサイエンス 第 403 回セミナー, 講演, 東京, 2025 年 1 月 10 日.
- [69] K. A. Takeuchi, Active liquid-crystal approaches to bacterial biofilms, invited seminar, Pennsylvania State University, Mar. 25, 2025.
- (アウトリーチ)
- [70] 竹内一将 (インタビュー), ”乱れて整う”未解明の物理現象の法則を見つけない, milsil, 国立科学博物館 (2024).
- [71] 竹内一将 (テレビ出演), ガリレオ X 「生命現象の原理を知りたい」(BS フジ), 2024 年 5 月 12 日.
- [72] 西口大貴 (インタビュー), 群れから新しい物理学の世界を切り拓く!, 東京大学 理学部ニュース 2024 年 7 月号 理学の研究者図鑑, 東京大学理学部, 2024 年 7 月 24 日.
- [73] 西口大貴 (講演), アクティブマター物理学: 群れの秩序と普遍法則, 大阪星光学院高等学校の東大ツアーにおける講演・研究室見学受け入れ, 2024 年 7 月 31 日.
- [74] L. Kershner, Nonequilibrium Statistical Mechanics and the God of Doorways: A research journey from New York to Tokyo, with a layover for surfing and lasers, talk given in the Graduate School of Science Dean's Party, Mar. 7, 2025.

6.8 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)¹に所属しており、上述のように、

¹<http://www.ipst.s.u-tokyo.ac.jp/>

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。

6.8.1 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。

これまで、これらの現象の理解とその応用技術の開発を進めてきた。その成果を先端半導体製造技術に応用するためのプロジェクトの準備を進めた。そして、経済安全保障重要技術育成プログラムの一つに採択が決まり、2025 年度から開始されることになった。

6.8.2 KAGRA project

重力波が実際に検出されてから、すでに、8 年以上の時間が過ぎ、現在までに検出されたイベントは 200 以上となった。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、O4a と呼ばれる国際共同観測 (2023 年 5 月に開始) の最初の部分に参加した。しかし、大変、不幸なことに、2024 年 1 月に起きた能登地震の影響を受け、装置の復旧に非常に多くの時間と労力を要した。そして、復旧作業がほぼ終了し、感度は大幅に向上した。

<報文>

(原著論文)

- [1] C. Fletcher, *et al.*: “A Joint Fermi-GBM and Swift-BAT Analysis of Gravitational-wave Candidates from the Third Gravitational-wave Observing Run,” *ASTROPHYSICAL JOURNAL*, **964** (2) 149 (2024) (10.3847/1538-4357/ad1eeld).

- [2] R. Abbott, *et al.*: “Search for Gravitational-wave Transients Associated with Magnetar Bursts in Advanced LIGO and Advanced Virgo Data from the Third Observing Run,” *ASTROPHYSICAL JOURNAL*, **966** (1) 137 (2024) (10.3847/1538-4357/ad27d3).
- [3] R. Abbott, *et al.*: “Search for Gravitational-lensing Signatures in the Full Third Observing Run of the LIGO-Virgo Network,” *ASTROPHYSICAL JOURNAL* **970** (2) (2024)(10.3847/1538-4357/ad3e83).
- [4] A. G. Abac, *et al.*: “Observation of Gravitational Waves from the Coalescence of a $2.5\text{--}4.5 M_{\odot}$ Compact Object and a Neutron Star,” *ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS* **970** (2) L34 (2024) (10.3847/2041-8213/ad5beb).
- [5] A. G. Abac, *et al.*: “Ultralight vector dark matter search using data from the KAGRA O3GK run,” *PHYSICAL REVIEW D* **110** (4) 042001 (2024) (10.1103/PhysRevD.110.042001).
- [6] A. G. Abac, *et al.*: “Search for Eccentric Black Hole Coalescences during the Third Observing Run of LIGO and Virgo,” *ASTROPHYSICAL JOURNAL* **973** (2) 132 (2024) (10.3847/1538-4357/ad65ce).
- [7] A. G. Abac, *et al.*: “A Search Using GEO600 for Gravitational Waves Coincident with Fast Radio Bursts from SGR 1935+2154,” *ASTROPHYSICAL JOURNAL* **977** (2) 255 (2024) (10.3847/1538-4357/ad8de0).
- [8] R. Koike, M. Matoba, S. Kawano, H. Sakurai, K. Konishi, N. Mio: “Broadband laser-processed terahertz moth-eye antireflection structure with a controlled lattice type,” *APPLIED OPTICS* **63** (28) 7442-7446 (2024) (10.1364/AO.533467).
- [9] G. Raman, *et al.*: “Swift-BAT GUANO Follow-up of Gravitational-wave Triggers in the Third LIGO-Virgo-KAGRA Observing Run,” *ASTROPHYSICAL JOURNAL* **980** (2) 207 (2024) (10.3847/1538-4357/ad9749).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [10] M. Matoba, K. Konishi, N. Mio, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami: “Detection of Dark Plasmon Modes of a Single Gold Rod by Radially Polarized Terahertz Pulses,” 9th Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics (NPO2024) (August 7, 2024).
- [11] W. Kimura, S. Kawano, R. Yamada, H. Sakurai, K. Konishi, N. Mio: “Time-phase imaging of femtosecond laser-induced air plasma with high spatial resolution,” 9th Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics (NPO2024) (August 7, 2024).
- [12] K. Soeda, K. Naganuma, Y. Yamaguchi, K. Konishi, H. Tamaru, N. Mio, H. Ito, J. Yumoto: “THz Low-Loss Functional Hollow Waveguide Devices Fabricated by 3D Printer and Metal Plating,” 2024 49TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFRARED, MILLIMETER, AND TERAHERTZ WAVES, IRMMW-THZ 2024 (November 28, 2024).
- (国内会議)
- 一般講演
- [13] 遠藤健太, 佐古大誌, 森脇喜紀, 宮川治 A 三尾典克 B, 灰野禎一 C, 三代木伸二 A, KAGRA collaboration: 「重力波望遠鏡 KAGRA で用いる高出力レーザー II の性能評価」 [17aC213-7] 日本物理学会 第 79 回年次大会 2024 年 9 月 17 日、北海道大学 (札幌キャンパス) .

6.9 小西研究室

レーザーは、発明から現在までの 60 年間の間に驚異的な技術的發展を遂げ、情報通信、情報処理、ディスプレイ、レーザー加工、量子技術など、現代社会を支える基盤技術となっている。小西研究室では、最先端の微細加工技術で作製するナノおよびマイクロスケールの超微細な人工構造と光との相互作用によって生じる新たな物理現象を探索し、レーザーを含む光の制御技術に新たな展開をもたらすことを目指している。このような微細構造を実現するレーザー加工技術も研究対象とし、光物性物理学に基づいて、「なぜ光でものは壊れるのか」という、レーザー加工の学理を探究するとともに、最先端のレーザーを駆使した微細三次元構造作製のための新手法の開発も進めている。

また、東京大学光量子科学連携研究機構および東京大学大学院理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構に所属し、研究室の関わるプロジェクトによって創出された新技術を実社会へと迅速にトランスファーするための新たな仕組み作りにも取り組んでおり、国内外の研究室や企業とも積極的に共同研究を進めている。最近では、メンバーとして参画した大型研究プロジェクトである JST 経済安全保障重要技術育成プログラム (K program) 「次世代半導体微細加工プロセス技術」の採択が決定し、レーザー加工の学理探究とともにその社会実装も加速させていく予定である。

以下では、2024 年度に小西研究で行われた研究の概要を紹介する。

6.9.1 人工ナノ構造の光物理学の探求と光制御への応用

現代の社会に不可欠となった半導体チップに搭載されているトランジスタのゲート長は、現在では数

10 nm のオーダーにまで微細化が進んでいる。一方、可視光の波長はおよそ 380 nm~780 nm である。すなわち我々は、光の波長よりもはるかに小さな構造を、金属や半導体で自在に作製する手法をすでに手にしているといえる。このような光の波長よりも小さな人工構造は、新たな物理現象発現の場となるとともに、人が設計したナノ構造の「形」で光との相互作用を自在に操作するという、新しい考え方に基づいた光制御を可能とする。小西研究室では、このような人工ナノ・マイクロ構造における新現象の探索とそのメカニズム解明および光源応用を進めている。

近年、新しいタイプのレンズとして「メタレンズ」が注目を集めている。メタレンズは、平坦な基板上に光の波長と同程度、またはそれ以下のナノ構造を規則的に並べて作られる。光がこれらの構造を通過すると、その位相が構造の形状に応じて変化するため、ナノ構造を適切に設計すれば透過する光の位相を自在に制御することが可能となり、光の波が空間上の一点で強め合うことで集光が実現する。このように、従来のレンズが光線としての性質（屈折）を利用していたのに対し、メタレンズは光の波としての性質（位相制御）を活用している。

メタレンズは構成するナノ構造の厚さが光の波長程度と極めて薄く、サブミクロンサイズであるため、超薄型のレンズが実現できる。加えて、位相を自由に設計できることから、単一のレンズで多様な集光特性を持たせることも可能であり、従来のレンズにはない柔軟性と機能性を備えている。こうした特徴から、メタレンズは光学分野に革新をもたらす新たな平面レンズ技術として期待されている。

2024 年度において小西研究室では、メタレンズを作製するための新しい手法の実現と、メタレンズを新たにレーザー加工に応用する研究を行った。それらの詳細を以下で説明する。

i 線ステッパー露光プロセスのみで作製可能な可視光フレネルゾーンプレートレンズの開発

これまでのメタレンズの実現には、ナノスケールの人工構造を高精度で作製することが必要であり、それは現在の半導体微細加工技術によって可能となった。しかしながら、従来のメタレンズの製造には多くの工程が必要であった。まず、基板に薄膜を形成し、感光性樹脂（フォトレジスト）を塗布したのち、半導体露光装置で紫外光を照射してレジストにパターンを描き、それをマスクとしてエッチングにより薄膜を加工し、最後にレジストを除去するという複雑なプロセスを経る必要があり、製造効率の向上が課題となっていた。

本研究では、フォトレジストを単なるマスクではなく、そのままレンズ材料として活用するという新しいアプローチを提案した。使用したのは、JSR 株式会社が開発したカラーレジストであり、特定の波長を吸収する性質を持っている。この特性を利用して、フレネルゾーンプレートと呼ばれる集光構造を簡便に作製することを試みた。具体的には、ガラス基板にカラーレジストを塗布し、現在産業界で広く

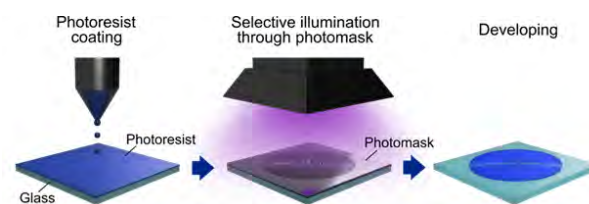


図 6.9.23: 開発した平面レンズ作製方法の模式図

用いられている半導体用の露光装置（i 線ステッパー）で紫外線を照射して現像するだけという、極めてシンプルな工程である（図 6.9.23）。この手法は、エッチングやレジスト除去が不要であるため、プロセスを極めて簡略化することができる。

この手法により、8 インチガラス基板上に多数のフレネルゾーンプレートを一括して作製することに成功した（図 6.9.24）。さらに、これらのレンズを用いて波長 550 nm の光を集光したところ、約 1.1 μm のビーム径が得られた。また、波長 450 nm および 650 nm でも同様の性能が確認され、幅広い波長への応用可能性が示された。既存の半導体製造装置を活用することで、高性能な平面レンズを低コストかつ大量に製造できる可能性があり、本手法は今後の光学素子の製造に新たな展開をもたらすと期待される。

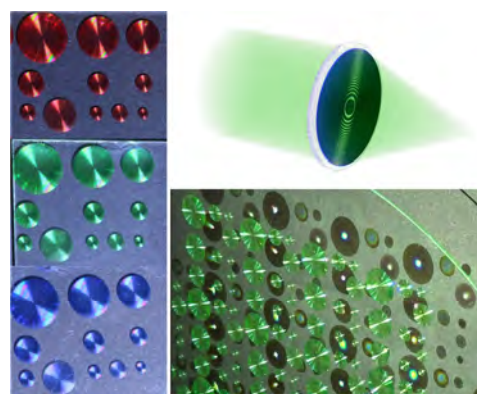


図 6.9.24: 作製したフレネルゾーンプレートの写真と集光の様子

本研究は、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻と JSR 株式会社による協創オフィス「JSR・東京大学協創拠点 CURIE」における共同研究で得られた成果であり、Light: Science & Applications 誌に掲載された [7][31][35]。

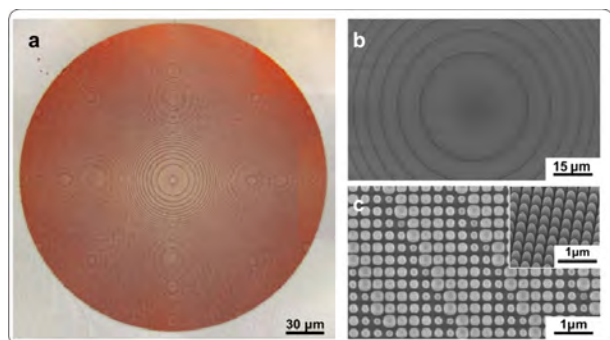


図 6.9.25: 作製した AlN メタレンズの光学顕微鏡増 (a) と電子顕微鏡画像 (b,c)[8]

メタレンズを用いた深紫外超短パルスレーザー微細加工

深紫外（波長 200～300 nm）の波長領域の光は、ナノフォトニクス、バイオイメーキング、光リソグラフィなど多岐にわたる先端技術において重要な役割を果たしている。また、超短パルスレーザー加工においても、波長が短いことによる高い集光特性と、高いフォトンエネルギーによって、微細かつ高品質な加工が可能となる。

このような深紫外領域における光学素子の高機能化を担う新しいデバイスとしてもメタレンズが近年注目されている。しかしながら、これまでに深紫外のメタレンズ材料として使われていた酸化ハフニウムやダイヤモンドは、微細加工が難しくコストも高いという課題があった。

このような課題を解決する材料として我々は、アルミニウムナイトライド (AlN) に着目した。AlN は高い屈折率と低損失特性を有しており、熱的・機械的に安定で、既存の半導体微細加工技術との親和性が高いという多くの利点を有している。本研究では、AlN を用いて深紫外対応のメタレンズを初めて設計・作製し、その高い集光性能を実証するとともに、深紫外超短パルスレーザーによる微細構造作製への応用が可能であることを初めて実証した。

本研究で開発した AlN メタレンズは、サファイア基板上に作成された円形の AlN ナノピラーで構成される (図 6.9.25)。ピラーの高さは 380 nm で、直径は 100～280 nm の範囲で設計されている。ナノピラーの共鳴現象によって局所的な位相変調が起こり、70% 以上の透過率を有しつつ、 2π の完全な位相制御が可能となる。実験により、開発されたメタレンズは、波長 266 nm の深紫外レーザー光を理論回折限界に近い約 $0.75\ \mu\text{m}$ のビーム径に集光できることや、約 $0.8\ \mu\text{m}$ の分解能で深紫外イメージングが可能であることが確認できた。

さらに、作製した AlN メタレンズを集光レンズとして用いて、波長 266 nm の深紫外ピコ秒レーザー

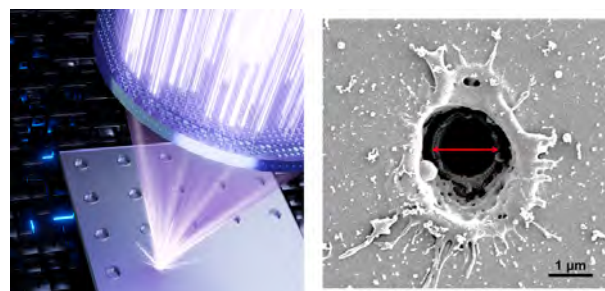


図 6.9.26: (左) AlN メタレンズによる深紫外超短パルスレーザー加工の概念図 (右) 作製した微細加工穴の電子顕微鏡増。赤矢印部がシリコンの加工穴部分 [8]

を照射することによって、フォトレジストを塗布したシリコン基板に直径約 $1.5\ \mu\text{m}$ の微細孔を作製することに成功した (図 6.9.26)。この結果は、AlN メタレンズが深紫外超短パルスレーザーのレーザー加工に用いるのに十分なレーザー耐性を有していることを示しており、深紫外領域におけるレーザー加工用の集光レンズの低コスト化と、複雑な光ビーム制御を可能にするためのデバイスとして、メタレンズが有望な素子となることを本研究は初めて実証した結果である。

本研究は、台湾の国立陽明交通大学の Ming-Lun Tseng 博士らとの共同研究で得られた成果であり、Nano Letter 誌に掲載された [8]。

6.9.2 レーザーによるマイクロ三次元構造の創成と電磁波制御への応用

近年のレーザー技術の進歩によって発生が可能になった、高強度かつ高安定な超短パルスレーザーを用いることによって、単に物体の穴あけや切断を行うのみならず、他の方法では作製が困難なミクロンオーダーの微細 3 次元構造を作製することが可能になってきている。このような先端技術を活用して作製した構造は、ミリ波、テラヘルツ波等の電磁波よりも小さいサイズであるため、適切な構造を作製することによって、新たな電磁波制御のための機能性材料として活用することができる。本研究では、このようなレーザーを用いた 3 次元構造作製技術の開発を進めると同時に、それを用いた新たな機能性材料の開発も進め、宇宙物理学や、次世代無線技術 (Beyond 5G, 6G) など、様々な分野への展開を進めている。

超短パルスレーザー加工によるテラヘルツモスアイ無反射構造作製と広帯域化

近年のテラヘルツ (THz) 技術の進歩に伴って、THz 非線形光学や宇宙からの微弱な THz 信号観測など、THz 波の高強度化や検出の高感度化が重要となる研究が多く進められている。これらを実現するためには THz 波のエネルギー損失の低減が重要であり、その損失要因の一つである材料界面でのフレネル反射の抑制が必要とされる。ここで、波長以下の大きさのピラミッド構造が周期的に配列したモスアイ構造は、反射の原因となる屈折率の物質界面の不連続変化を解消し、広帯域な反射防止膜として機能することが知られている。このようなモスアイ構造は可視光およびマイクロ波領域では広く使われている一方で、その中間の、特徴的なサイズが数 10~数 100 μm のオーダーとなる THz 領域においては、旧来の加工法では作製が困難であった。我々は、フェムト秒レーザー微細加工技術を用いて、シリコンやアルミナのような代表的な THz 光学材料に THz 反射防止モスアイ構造を作製し、透過特性の評価を進めている。これまでに、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構の松村知岳准教授らとの共同研究によって、宇宙背景放射観測用の望遠鏡に搭載するための大面積モスアイ構造を作製することに初めて成功し、すでに米国の天文台へ実装されて実運用が開始されている [10][11]。将来的には、LiteBIRD 計画における宇宙背景放射偏光観測小型科学衛星への搭載を目標として研究を進めている [30][32]。

モスアイ構造が無反射特性を示すためには、隣接するピラミッドの頂点間の間隔が回折を起こさないほど小さく、高さは波長の約半分以上であることが必要となる。すなわち、モスアイ構造の反射防止帯域幅は、ピラミッドのアスペクト比（高さと同隔の比）に依存するため、高アスペクト比構造の作製に多くの努力が注がれてきた。しかしながら、現状のモスアイ構造のアスペクト比はおよそ 5 に達しており、これ以上の高アスペクト比構造をレーザーで作製することが困難になりつつある。

この問題を克服するために我々は、モスアイ構造のアスペクト比を変えずに、ピラミッド形状が配列する格子パターンが異なるモスアイ構造をレーザー加工で作製することを試みた。周期構造の逆格子ベクトルは、格子の間隔のみならず格子の形状にも依存するため、これまで一般的に用いられてきた正方格子以外の格子構造を有するモスアイ構造を作製することによって、周波数防止帯域の高周波側の限界周波数を高められる可能性を有している。

本研究では、中心波長 1030 nm、パルス幅 290 fs のフェムト秒レーザーを用いて、シリコン基板に対して線状のスキンを繰り返すレーザー加工を行い、ハニカム格子 (三角形)、正方格子、六角格子のモスアイ構造を作製した。特に、各パルスを 440 ピコ秒間隔で 25 個のサブパルスに分割するバーストモード設定を使用して加工を行った。作製したモスアイ構造の電子線顕微鏡画像を図 6.9.27 に示す。それぞれの形状の格子構造がレーザー加工で作製できていることがわかる。作製したモスアイ構造の間隔は 67

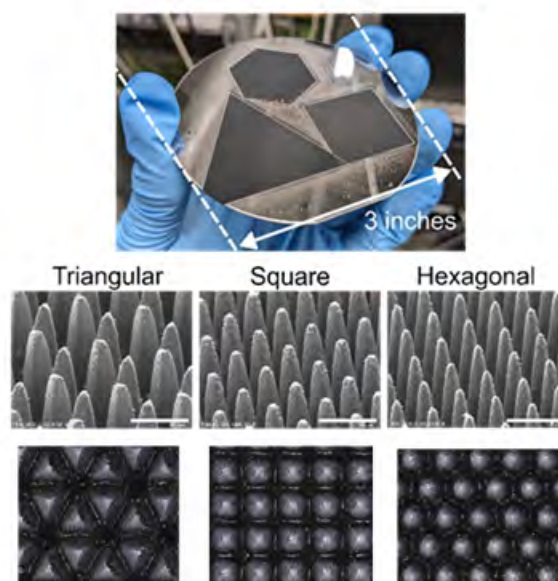


図 6.9.27: フェムト秒レーザー加工で作製したモスアイ構造の透過スペクトルの計測値と計算値 (a) ハニカム格子、(b) 正方格子、(c) 六角格子

μm 、高さは約 200 μm であった。

作製したこれらのモスアイ構造のテラヘルツ周波数領域における透過スペクトルを、テラヘルツ時間領域分光法を用いて計測した結果および数値シミュレーションで計算した結果を図 6.9.28 に示す。格子構造を六角格子にした場合、正方格子の場合と比べて無反射帯域幅が約 15% 増大することが明らかになった。本研究は、レーザー加工によるモスアイ構造の広帯域化に対して新たな設計指針を示すものであり、特に広い帯域幅が求められる天文観測や無線通信といった応用分野において、有効な手法となると考えられる。

本研究の成果は、Applied Optics 誌に掲載された [7]。

6.9.3 レーザー加工の原理解明 ～なぜレーザーでものが壊れるのか～

物質に対して強いレーザー光が当たるとその物質は壊れるという事実は良く知られており、実際にレーザー加工は、現在の産業を支える重要な基盤技術となっている。その一方で、特に超短パルスレーザー光によって物質の破壊現象が生じるメカニズムについては、いまだに明らかになっていない点が多く存在する。物質破壊が生じるほどの高強度パルス光が物質に入射した場合、その光のエネルギーはどの

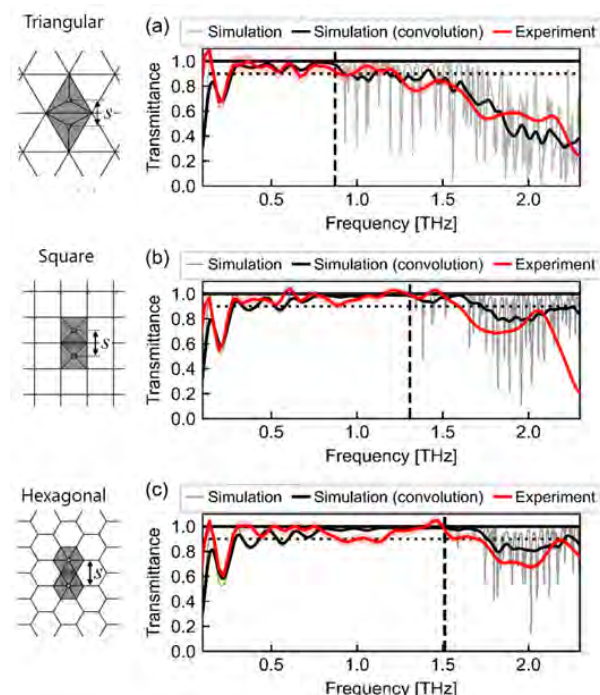


図 6.9.28: フェムト秒レーザー加工で作製したハニカム格子、正方格子、六角格子のテラヘルツモスアイ構造の全体写真と顕微鏡画像

ようなプロセスを通じて物質に受け渡されるのか？その受け渡されたエネルギーは、物質内部で電子系、格子系を通じてどのように伝搬し、何をきっかけとして破壊という劇かつ不可逆な現象を引き起こすのか？これらの問いに答えを見つけるべく、最先端の光制御技術とさまざまな計測手法を開発し、それらを駆使することによって研究を進めている。本研究によって、レーザーによる物質破壊というメカニズムの解明にとどまらず、その知見によってレーザー加工技術のさらなる進化につなげていくことを目指している。

2024年度は、超短パルスレーザー加工の原理解明に向けて、レーザー照射後の物質の超高速ダイナミクスを計測するための、高分解能かつ高い定量性を有するポンプ・プローブ時間分解計測システムを構築した。この計測系を用いて、空気に対する超短パルスレーザー励起で生じるエアプラズマに対する時間分解位相イメージングを行い、サブピコ秒の時間分解能でエアプラズマ密度の時間変化の計測を行うことに成功し、空気中における超短パルスレーザーの非線形伝搬シミュレーション手法で予想される値と比較を行ったところ、ファクターの精度で良い一致を示すことを明らかにした[16][18]。また、井手口研究室と共同で進めている、マルチタイムスケール

時間分解位相イメージング手法を用いたデータ取得を進め、レーザーの進行方向に対して垂直な面内の位相変化イメージングを通じて、電子励起から熱拡散までのレーザー加工に関わる現象を統一的に観測することに成功した[19][29]。これらの融合することにより、今後はレーザー加工時の超高速ダイナミクスを3次的に観察し、その全容解明を目指していく。

<受賞>

- [1] Wataru Kimura, Best student presentation awards (Roger Kelly Awards) "Young Researcher" Category, 8th Venice International School on Lasers in Materials Science (SLIMS), July 20, 2024.
- [2] Shotaro Kawano, Best student presentation awards (Roger Kelly Awards) "Rising Stars" Category, 8th Venice International School on Lasers in Materials Science (SLIMS), July 20, 2024.
- [3] Mizuho Matoba, Best poster award, 9th Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics (NPO2024), August 8, 2024.

<報文>

(原著論文)

- [4] Miu Tamamitsu, Keiichiro Toda, Masato Fukushima, Venkata Ramaiah Badarla, Hiroyuki Shimada, Sadao Ota, Kuniaki Konishi, Takuro Ideguchi "Mid-infrared wide-field nanoscopy," *Nat. Photon.* **18**, 738 (2024).
- [5] Ya-Lun Ho, Chee Fai Fong, Yen-Ju Wu, Kuniaki Konishi, Chih-Zong Deng, Jui-Han Fu, Yuichiro K. Kato, Kazuhito Tsukagoshi, Vincent Tung, Chun-Wei Chen "Finite-Area Membrane Surfaces for Enhancing Light-Matter Coupling in Monolayer Transition Metal Dichalcogenides," *ACS Nano* **18**, 241173 (2024).
- [6] Rikuo Koike, Mizuho Matoba, Shotaro Kawano, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Norikatsu Mio "Broadband laser-processed terahertz moth-eye antireflection structure with a controlled lattice type," *Appl. Opt.* **63**, 7442 (2024).
- [7] Ryohei Yamada, Hiroyuki Kishida, Tomohiro Takami, Itti Rittaporn, Mizuho Matoba, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi "Optical Fresnel zone plate flat lenses made entirely of colored photoresist through an i-line stepper," *Light Sci. Appl.* **14**, 43 (2025).
- [8] Yu Chieh Peng, Yu Jie Wang, Kuan-Heng Chen, Yu Hung Lin, Haruyuki Sakurai, Hsueh-Chih Chang, Cheng-Ching Chiang, Ruei-Tzu Duh, Bo-Ray Lee, Chia-Yen Huang, Min-Hsiung Shih, Ray-Hua Horng, Kuniaki Konishi, Ming Lun Tseng "Deep-Ultraviolet AlN Metalens with Imaging and Ultrafast Laser Microfabrication Applications," *Nano Lett.* **25**, 3141 (2025).

(国内雑誌)

- [9] 中里 智治, 田丸 博晴, 谷 峻太郎, 遠藤 翼, 乙津 聡夫, 櫻井 治之, 小西 邦昭, 坂上 和之, 小林 洋平 "産学連携によるレーザー加工データベースの構築とその活用" レーザー研究 第 52 巻第 4 号, pp201 - 206, 2024 年 4 月
- [10] 高久 諒太, 櫻井 治之, 小西 邦昭, 松村 知岳 "レーザー加工で作製した表面マイクロ構造の天文観測分野への応用" レーザー研究 第 53 巻第 1 号, pp31 - 36, 2025 年 1 月
- (著書)
- [11] 櫻井治之、小西邦昭 "テラヘルツ波の発生、検出、制御技術と最新応用" (分担執筆, 範囲: 第 2 章第 2 節 フェムト秒レーザー加工によるテラヘルツ波反射防止モスアイ構造の作製と評価) 技術情報協会、2024 年 7 月
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [12] Yuki Hakamada, Mizuho Matoba, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, "Comparison of laser-processed terahertz metalenses with numerical simulation of measured focusing characteristics," Optics & Photonics International Congress 2024 (OPIC2024) 2024/4/25, Minatomirai, Kanagawa, Japan, Oral)
- [13] Ya-Lun Ho, Chee Fai Fong, Yen-Ju Wu, Kuniaki Konishi, Jui-Han Fu, Yuichiro Kato, Vincent Tung, Chun-Wei Chen, "Membrane Nanophotonic Platform for Enhanced Light-Matter Interaction of Transition Metal Dichalcogenide Monolayer," 14th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META2024) (2024/7/18, Toyama International Conference Center, Toyama, Japan, Oral)
- [14] Haruyuki Saukrai, Kuniaki Konishi, "Terahertz meta-optics made with ultrashort pulse laser processing," 9th Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics (NPO2024) (2024/8/7, the Spa hotel Rauhalhti, Kuopio, Finland, Oral)
- [15] Y. Hakamada, M. Matoba, H. Sakurai, K. Konishi, "Fabrication and characterization of THz metalens by ultraviolet femtosecond laser ablation," 9th Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics (NPO2024) (2024/8/7, the Spa hotel Rauhalhti, Kuopio, Finland, Poster)
- [16] Wataru Kimura, Shotaro Kawano, Ryohei Yamada, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Norikatsu Mio, "Time-phase imaging of femtosecond laser-induced air plasma with high spatial resolution," 9th Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics (NPO2024) (2024/8/7, the Spa hotel Rauhalhti, Kuopio, Finland, Poster)
- [17] Mizuho Matoba, Kuniaki Konishi, Norikatsu Mio, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami, "Detection of Dark Plasmon Modes of a Single Gold Rod by Radially Polarized Terahertz Pulses," 9th Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics (NPO2024) (2024/8/7, the Spa hotel Rauhalhti, Kuopio, Finland, Poster)
- [18] Wataru Kimura, Shotaro Kawano, Ryohei Yamada, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Norikatsu Mio, "Nomarski interferometer with sub-micron spatial resolution for time-resolved complex-amplitude imaging of femtosecond laser-induced air plasma," SPIE Photonics West 2025 (2025/1/27, Moscone Center, San Francisco, USA, Oral)
- [19] Shotaro Kawano, Keiichiro Toda, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Takuro Ideguchi, "Trans-timescale complex optical electric-field imaging for femtosecond laser processing of dielectric materials," SPIE Photonics West 2025 (2025/1/28, Moscone Center, San Francisco, USA, Oral)
- [20] Kentaro Soeda, Kazunori Naganuma, Yoshinori Yamaguchi, Kuniaki Konishi, Hiroharu Tamaru, Norikatsu Mio, Tadao Nagatsuma, Hiroshi Ito, Junji Yumoto, "Three-dimensional THz integrated circuits for the 200–400 GHz band using a 3D printer and metal plating," SPIE Photonics West 2025 (2025/1/30, Moscone Center, San Francisco, USA, Oral)
- 招待講演
- [21] Kuniaki Konishi "Microstructures for Terahertz Wave Control Fabricated by Ultrafast Laser Processing," The 19th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS2024), (2024/5/3, Kyoto University of Advanced Science (KUAS), Kyoto, Japan)
- [22] Kuniaki Konishi "Generation and polarization control of vacuum ultraviolet coherent light using dielectric nanomembrane metastructures," The 7th International Workshop on UV Materials and Devices (IWUMD2024), (2024/6/4, Taipei International Convention Center, Taipei, Taiwan)
- [23] Kuniaki Konishi "Control of Circular Polarization Using Nonlinear Optical Effect in Dielectric Membrane Nanostructures," 14th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META2024) (2024/7/18, Toyama International Conference Center, Toyama, Japan)
- [24] Kuniaki Konishi "Fabrication of terahertz metalenses using femtosecond laser processing," 9th Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics (NPO2024) (2024/8/8, the Spa hotel Rauhalhti, Kuopio, Finland)
- [25] Kuniaki Konishi "High-precision observation and simulation of femtosecond laser ablation," SPIE Optics + Photonics 2024 (2024/8/18, San Diego Convention Center, San Diego, USA)

- [26] Kuniaki Konishi "Structured Freestanding Nano-/Micro- Membrane as a New Platform of Meta-Optics," The 18th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials' 2024) (2024/9/11, Minoa Palace Hotel, Platanias, Greece)
- [27] Kuniaki Konishi "Lightwave control using free-standing dielectric nanomembrane structures," Optics & Photonics Taiwan International Conference (OPTIC2024) (204/11/27, Nangang Exhibition Center Hall 1, Taipei, Taiwan)
- [28] Kuniaki Konishi "Fabrication of terahertz meta-optics using ultrashort pulse laser processing," SPIE Photonics West 2025 (2025/1/27, Moscone Center, San Francisco, USA)

(国内会議)

一般講演

- [29] 川野 将太郎, 戸田 圭一郎, 櫻井 治之, 小西 邦昭, 井手口 拓郎 "誘電体ガラス基板の深紫外ナノ秒パルスレーザー加工における時間分解複素振幅イメージング" 第 85 回応用物理学会 秋季学術講演会 (2024 年 9 月 16 日、朱鷺メッセ、新潟)
- [30] 相澤耕佑, 秋澤涼介, 川野将太郎, Scott Cray, Jürgen Koch, 小西邦昭, 櫻井治之, 高久諒太, Shaul Hanany, 松村知岳, Rex Lam "地上 CMB 偏光観測望遠鏡搭載に向けたレーザー加工によるモスアイ反射防止構造付きアルミナ赤外線吸収素子の開発" 日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年 9 月 19 日、北海道大学)
- [31] 岸田 寛之, 山田 涼平, 高見 朋宏, イッティ リッターポーン, 的場 みづほ, 櫻井 治之, 小西 邦昭 "i 線ステッパー工程のみで作製可能なカラーレジストからなる可視光用平面レンズ" 第 72 回応用物理学会 春季学術講演会 (2025 年 3 月 14 日、東京理科大学野田キャンパス)
- [32] 相澤耕佑, 秋澤涼介, Scott Cray, Jürgen Koch, 櫻井治之, 小西邦昭, 高久諒太, Shaul Hanany, 松村知岳 "地上 CMB 偏光観測実験用アルミナ赤外吸収フィルターのためのレーザー加工によるモスアイサブ波長反射防止構造の開発" 日本物理学会 2024 年春季大会 (2025 年 3 月 19 日、オンライン)

招待講演

- [33] 小西邦昭 "誘電体人工微細構造によるメタオプティクス研究の進展" 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会「固体光物性研究の新潮流」(2024 年 11 月 9 日、東京大学山中寮内藤セミナーハウス)
- [34] 小西邦昭 "超短パルスレーザー加工を用いた微細マイクロ構造作製とテラヘルツ波制御への応用" 日本オプトメカニクス協会 2024 年度第 4 回フォトンテクノロジー技術部会 (機械振興会館別館、2025 年 2 月 25 日)
- [35] 山田涼平, 岸田寛之, 高見朋宏, イッティ リタポーン, 的場みづほ, 櫻井治之, 小西邦昭 "i 線ステッパー露光プロセスのみで作製可能な可視光フレネルゾーンプレートレンズ" 日本光学会メタオプティクス研究グループ第 2 回研究会 (早稲田大学西早稲田キャンパス、2025 年 3 月 24 日)

7 生物物理

7.1 能瀬研究室

脳・神経系は多数の神経細胞がシナプスという構造を介して連絡した複雑な回路である。この中を神経インパルスが伝わるのが、脳機能の基本であると考えられているが、その実体はほとんど謎のままである。一体、どのような回路の中を、どのようにインパルスが伝わる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 Cambridge 大、St. Andrews 大との共同研究において、コネクティクス解析（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値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。さらに、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。配線パターンの分かっているモデル神経回路において、神経回路の情報処理の基本原則を明らかにし、さらにその発生と進化の仕組みを明らかにすることが私達の目標である。

7.1.1 神経活動ダイナミクスおよび行動出力の数値統計解析

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や行動介入技術を開発している。

超音波を用いた遠隔介入によるショウジョウバエ幼虫の個体間相互作用解析システムの構築（張旭（新領域）、能瀬聡直、高坂洋史（新領域、電通大））

動物は多様な行動レパートリーを示す。行動パターンの時間的な変遷を実験的に調べるためには、動物行動の長期モニタリングが不可欠である。しかし、長時間の観察には広い観測領域が必要となり、実験的な困難を引き起こし得る。その解決策として、外界からの最小限の遠隔介入によって、動物を限定された空間に閉じ込める方法が考えられる。本研究では、ショウジョウバエ幼虫の行動解析を目的として、空間的・時間的に変化する空気圧勾配を生成することで、非接触的に動物の行動範囲を制限し、個体間相互作用を解析するシステムの構築を進めた。

本システムでは超音波の非線形現象を活用する。二次元トランスデューサーアレイが超音波を位相を揃えて集束させると、音響放射圧が発生する。トランスデューサー間の位相関係を調整することで、焦点を動的に制御し、最大 3 gf (27 mN) の力を生成できる。昨年度の研究では、この手法によりショウジョウバエの幼虫を、仮想境界（直径 2cm）を越えた際に適応的な音響放射圧を与えることで、30 分以上閉じ込められることを実証した。これを踏まえて、今年度は行動モニタリングの長時間化を目的として、閉じ込めエリアを 21 cm × 16 cm に拡張することで、3 時間以上の継続観察を可能にした。さらに、追跡アルゴリズムを改良することで、最大 10 匹の幼虫を同時にモニタリングできるようになった。異なるショウジョウバエ種の個体間相互作用を解析するために、2 つの円形チャンバーを細い通路で接続したダンベル型のアリーナを設計した。この構成により、2 種のショウジョウバエ（例えば、*Drosophila melanogaster* と *Drosophila ananassae*）の幼虫の移動と相互作用を、遠隔かつ非侵襲的な介入下で解析することが可能となった。今後、この遠隔介入システムを用いて幼虫の運動学的特性と、種内および種間相互作用について解析を進める。本研究は新領域・複雑理工学専攻の篠田裕之博士、牧野泰才博士、南山大学の藤原正浩博士との共同研究である。

ショウジョウバエ幼虫のターニング行動を制御する神経細胞探索のためのトラッキングシステムの構築（石励岩（新領域）、松永光幸）

動物が示す多様な運動パターンの作動機構を理解するためには、個々の運動に関連する神経活動を詳細に解析することが必要である。本研究では、ショウジョウバエ幼虫が示すターニング行動をモデルとして、複雑な運動制御に関与する神経基盤解明に取り組んでいる。ターニング行動は、幼虫が外的刺激や内的状態に反応して、体節間の筋肉を協調的に収縮させることで実現される複雑な運動である。近年、中枢内での情報統合の過程に関するモデルが報告されているが、これらを実際に制御する神経細胞の実体は不明である。

本研究では、ターニング行動を制御する神経細胞の同定を目的として、ディープラーニングにより動画から動物の姿勢や行動を自動的に追跡するソフトウェア DeepLabCut を用い、幼虫の身体部位の自動認識およびトラッキングシステム構築に取り組んだ。自由行動の幼虫の動画を 50 本撮影し、そのうち 5 本をモデルのトレーニング、残り 45 本を性能評価に使用した。頭部、マウスフック、各体節、尾部をキーポイントとしてアノテーションを行い、モデルの最適化を繰り返すことでシステムを調整した。性能評価の結果、ターンを含む多様な行動中において、尾部近くの体節は平均 90 % 以上、頭部・マウスフック・尾部ではほぼ 100 % の信頼度で検出可能であることが示された。さらに、顕微鏡の電動ステージをリアルタイムで制御するプログラムを開発し、トラッキングシステムと連携させることで、常に幼虫を視野内に保持しながら、各部位を自動認識することを可能とした。これによってターニングを含む多様な行動の高精度な解析が可能となった。

次年度は、ターニング行動を制御する神経細胞のスクリーニングを行い、構築したトラッキングシステムと光遺伝学的手法を組み合わせ、同定された神経細胞の機能を詳細に解析する予定である。これらのアプローチにより、ショウジョウバエ幼虫のターニング行動を制御する神経基盤を解明することを目指す。

7.1.2 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。

筋弛緩状態の維持と運動出力のゲート制御を担う神経細胞群の機能解析（伊達隆久、能瀬聡直、高坂洋史（新領域、電通大））

動物は、適切なタイミングで筋肉を収縮させることで、洗練された運動を行うことができる。ここで、動物は安静時には筋弛緩状態を保つ必要があり、筋弛緩の制御もまた正確な運動のために重要である。しかし、筋弛緩状態を維持するための神経回路機構は、単一細胞レベルの解像度ではこれまでよく調べられていなかった。我々は、ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動において、筋弛緩状態の維持に関わっていると考えられる神経細胞群を発見した。この細胞群は、腹部神経節（脊椎動物の脊髄に相当）の各体節制御領域に左右一対ずつ存在する興奮性介在ニューロ

ンである。中枢神経系の単離状態および運動中の個体において神経活動イメージングを行うと、この細胞群は持続的な神経活動を示し、対応する体節の筋収縮時に活動が一過的に抑制された。活動パターンと細胞の形態を元に、この細胞群を tonically active lateral (TAL) neuron と名付けた。さらに、コネクトミクス解析により TAL neuron 下流の神経回路構造を調べたところ、TAL neuron は抑制性ニューロン群を介して運動ニューロンを抑制する回路をもつことがわかった。活動パターンと回路構造から、TAL neuron が持続的に活動することで筋弛緩状態が維持され、運動時に TAL neuron が一過的に抑制されることで運動出力がゲート制御される可能性が示唆された。TAL neuron 特異的に光遺伝学による神経活動の活性化を行ったところ、光照射時に幼虫が停止する、もしくは運動の回数が低下することがわかった。これは、TAL neuron の活動によって筋弛緩状態が維持されるという仮説と一致している。反対に、TAL neuron を光遺伝学的に抑制すると、突発的な筋収縮が観察された。この結果から、TAL neuron によるゲート制御によって不要な運動出力が抑えられることで、運動の正確性が保証されていることが示唆された。現在、TAL ニューロンの持続的な神経活動の背後にある膜電位ダイナミクスを、パッチクランプ法により直接記録することで明らかにすることを試みている。本研究は、米国ニューヨーク大学の Marc Gershow 研究室、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。

前進運動を制御する新規介在ニューロン A18f の機能解析（関崇貴、高坂洋史（新領域、電通大）、能瀬聡直）

動物の運動は、多数の筋肉が時空間的に協調した収縮と弛緩を行うことで達成される。しかし、協調した運動パターンを生成する神経基盤は完全には解明されていない。本研究は、ショウジョウバエ幼虫の前進蠕動運動に注目した。前進蠕動運動は、体壁の筋肉が尾側から頭側に向かって順次収縮することによって生じる。この連続的な筋収縮は、中枢神経系における神経活動の波によって誘導される。今回我々は、前進運動特異的に活動する新規介在ニューロン A18f を同定し、このニューロンが前進運動の制御において中心的な役割を果たすことを見出した。A18f はセグメント間介在ニューロンであり、前方セグメントに興奮性の入力を行う。A18f の活動を光遺伝学的に阻害すると、幼虫の運動が強く阻害されることから、A18f が幼虫の前進運動に必要であることが示された。コネクトミクス解析の結果、A18f は前運動ニューロン A27h や GDL ニューロンなど、前進運動に関与することが知られている多くのニューロンに強い入力を行うことが明らかになった。このコネクトームと一致して、A18f を光遺伝学的に活性化すると、前方体節の筋収縮が誘導された。さらに、コネクトームデータに基づく数値シミュレーションを行った結果、A18f（及び密接に結合する別種のニューロン）が構成する回路は特定の条件下で前進波を生

成し得る構造であることが明らかになった。以上の結果から、A18f ニューロンは中枢神経系において前進運動のパターン生成の核となる高次ニューロンであり、下流ニューロン種に応じた適切なタイミングで前方セグメントの神経活動を誘導することで、前進運動に伴う神経活動を制御していることが示唆される。本研究は、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 (渡辺逸希、張春陽 (新領域)、能瀬聡直)

外部環境からの感覚情報が適切な行動に変換される仕組みの理解は、神経科学における重要な課題である。本研究では、ショウジョウバエ幼虫の逃避行動をモデルとし、感覚入力が行動出力へとつながる神経回路構造を明らかにすることを目指した。ショウジョウバエ幼虫は身体前方の接触刺激に対しては後退運動を示す一方、身体後方の接触刺激に対しては前進運動を示す。当研究室の先行研究において、このような部位特異的な逃避行動を制御するニューロンとして Wave ニューロンが同定されている。Wave は A2~A7 の神経節で左右 1 組ずつ存在するが、前方 (A2, A3 節) の Wave (以下、a-Wave) の活動亢進は後退運動を誘導するのに対して、後方 (A4~A7 節) の Wave (以下、p-Wave) の活動亢進は前進運動を誘導する。また、a-Wave と p-Wave の同時活動亢進は、より激しい逃避行動である回転運動を誘導する。Wave ニューロンと後退/前進運動実行回路は直接結合しておらず、各 Wave から送られた逃避行動コマンドが実行回路へと伝わっていく経路は未解明であった。本研究では、過去のコネクトミクス解析により発見された、a-Wave と後退運動実行ニューロン群を結ぶ BLT ニューロンに着目し、BLT が a-Wave 由来の後退運動の実行に関与するか調査した。私たちは BLT と似た形態を持つニューロン (以下、BLT-like ニューロン) を標識するトランスジェニック系統を同定し、これを用いて BLT-like の機能解析を行った。BLT-like を光遺伝学的に活性化させると後退運動が観察された。一方、BLT-like の抑制下では Wave を活性化させたときに回転運動が見られなくなった。これらの結果から、BLT-like が a-Wave の下流で逃避行動コマンドを送る役割を担っている可能性が示唆された。

ショウジョウバエ幼虫の前進または後退運動時に選択的に活動するニューロン群の光変換型カルシウムセンサーによる探索 (佐藤政凱 (新領域)、伊達隆久、高坂洋史 (新領域、電通大)、能瀬聡直)

ショウジョウバエ幼虫の前進・後退運動を制御する腹部神経節の神経回路において、光変換型カルシウムイオンセンサー (CaMPARI) を用いて、前進・後退運動のどちらか一方で選択的に活動するニューロン群のスクリーニングを行った。CaMPARI は、カルシウムイオン濃度が高い環境下で紫光が照射され

ると、蛍光が緑色から赤色へと不可逆的に変化する。よって、紫光を照射した時間窓内での神経活動レベルを、CaMPARI の色変換強度として定量することができる。

我々は、GAL4 系統のライブラリーを用いて、幼虫中枢神経系の様々な少数の神経細胞に CaMPARI を発現させた。幼虫の尾部または頭部に触覚刺激を与えることで前進または後退運動を引き起こし、運動中に紫光を照射することにより CaMPARI の色変換を誘導した。前進と後退運動における CaMPARI の色変換強度、すなわち神経活動レベルを比較することで、前進・後退運動の一方で選択的に活動するニューロンを探索した。76 の Gal4 系統に対してこの CaMPARI スクリーニングを行い、前進または後退運動選択的に活動するニューロンをラベルする 10 系統を同定した。

その一つにより標的される α ニューロンは SEZ に左右一対ずつ存在するニューロンであり、腹部神経節の反対側に投射する。より高い時間分解能で神経活動を解析するため、単離した中枢神経系でカルシウムイメージングを行ったところ、 α ニューロンは仮想前進運動中に活動レベルが上昇し、仮想運動の間には 1 Hz 程度の振動活動パターンを示した。また、 α ニューロンを光遺伝学的に活性化すると、首振り行動が誘発された。さらに、内向き整流性カリウムチャネル Kir2.1 を用いて α ニューロンの活動を阻害したところ、幼虫の成長速度が遅くなり、摂食量が対照群と比べて減少し、蛹になる前に死滅した。これらの結果は、 α ニューロンが幼虫の前進運動、餌の探索行動の制御に関与している可能性を示唆している。以上の結果は、CaMPARI が特定の行動時に活動するニューロンの大規模スクリーニングにおいて有用なツールであることを示すものである。

7.1.3 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。

運動回路の発達初期における活動様式成熟の細胞基盤 (関崇貴、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。我々は最近、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、次第にセグメント間での同期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動を示すようになる。

M ニューロンの活動様式が散発的から同期発火へと成熟する仕組みは、隣接するセグメントの M ニューロン間に電気シナプスが形成されることであることが既に知られている。しかし、同期発火から波状活動へと成熟する機構は不明であった。そこで、波状活動の出現に M ニューロンへのどのような入力が必要なのかを調査したところ、ニコチン性アセチルコリン受容体をノックダウンすると孵化直後の幼虫の蠕動運動に異常が見られた。ここから、M ニューロンへのアセチルコリン受容体を介した興奮性の化学シナプスが M/A27h 回路の活動様式の成熟に必要な可能性が示唆された。さらに、コネクストミクス解析により、M ニューロンの最も強い上流がアセチルコリン作動性ニューロン A18f であることも明らかになった。一方、全ニューロンで抑制性シナプスを阻害すると波状活動が消失したことから、M ニューロンのさらに上流で抑制性シナプスが波状活動の生成に重要な役割を果たすことも示唆されている。現在、これらの結果を統合するための実験および数値シミュレーションを行っている。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。

行動選択を担う神経回路の構築原理 (久保智裕、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 (p-Wave) を刺激すると前進を、頭部に近いもの (a-Wave) 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 Frizzled2 (DFz2) が同定された。さらに DFz2 を発現抑制すると、野生型では体の前方へと軸索を伸ばす a-Wave が、体の後方へと軸索を伸ばすようになり、それに伴って誘導される行動のパターンにも変化が見られた。しかし、形質

変異させた a-Wave において、軸索のシナプス結合に変化が生じたのか、また生じていた場合下流のいかなる運動神経回路にどの程度結合しているのかについてはまだわかっていない。そこで、本年度の研究では、確率的に単一ニューロンを可視化できる MCFO 法を用いて、軸索のシナプスを確認している。

Wnt/Fz シグナルによる BLT ニューロンの軸索誘導機構の解析 (張春陽 (新領域)、渡辺逸希、能瀬聡直)

上記のように当研究室の先行研究において逃避行動の制御に重要な役割を果たす Wave ニューロンの体節特異的な軸索伸長に、Wnt/Fz シグナル経路が関与することが示された。Wnt4 リガンドは前方から後方にかけて濃度勾配を形成しており、受容体である DFz2 は軸索を Wnt4 の低濃度側 (前方) へと誘導し、DFz4 は高濃度側 (後方) への軸索伸長を促進することが知られている。一方、我々は Wave ニューロンの下流において BLT と A19d と呼ばれる相同な介在ニューロンが、それぞれ後方、前方と異なる前後方向へ軸索の伸長することにより後退、前進運動を誘導することを示唆する結果を得ている。この結果は行動制御回路の複数の層において相同なニューロンが軸索の伸長パターンを変化させることにより異なる行動を誘導する神経回路が形成されるという興味深い可能性を示唆している。本研究では BLT ニューロンの軸索誘導が Wave 同様に Wnt/Fz シグナルによって制御されている可能性について検討した。

まず、BLT ニューロンにおける DFz2 および DFz4 の機能を解析した。具体的には、Gal4/UAS システムを用いて BLT ニューロンに GFP を発現させるとともに、RNAi によるノックダウンおよび UAS による過剰発現を行い、軸索の成長に与える影響を観察した。その結果、DFz2 のノックダウンでは軸索が有意に延長し、DFz4 のノックダウンでは軸索が短縮した。一方、DFz2 を過剰発現すると軸索は短縮することが確認された。これらの結果から、BLT ニューロンの軸索誘導は DFz2 および DFz4 の両方によって制御され、DFz2 は反発的 (軸索が後方に伸びるのを抑制) であるのに対し DFz4 は誘引的 (軸索が後方に伸びるのを促進) に働く可能性が示唆された。

次に BLT と形態や位置が類似した新規ニューロン、BLT-like ニューロンに対しても同様の実験を行った。その結果、DFz2 の操作 (ノックダウンおよび過剰発現) によってのみ軸索長に変化が見られ、DFz4 の操作では有意な変化は認められなかった。このことから、BLT-like ニューロンは DFz2 依存的に軸索誘導を受けている可能性が高い。今後は、DFz2 または DFz4 の発現を操作した下で、光遺伝学的手法 (CsChrimson) を用いて BLT または BLT-like ニューロンを選択的に活性化することで、軸索誘導の変化が後退運動誘導における機能に影響を与えるかどうかを検証する予定である。これにより、Wnt/Fz シグナルによる軸索配線の変化が、行動レベルにおける機能的な役割へとつながるかどうかを明らかにしていく。

ショウジョウバエ近縁種 *Scaptodrosophila* 属幼虫の尾部伸展開行動進化を支える分子基盤の探索（高橋正弥（新領域）、松永光幸）

生物は進化の過程において、環境に合わせた様々な運動機能を獲得・喪失してきた。これまでに、例えば身体表面の模様のような身体構造の進化については分子レベルでの研究が進められてきた一方、行動や運動の進化に関する研究例は限られている。本研究では、*Drosophila*（ショウジョウバエ属）の近縁種である *Scaptodrosophila*（マメショウジョウバエ属）幼虫をモデルとして進化の中で獲得された行動を支える分子メカニズム解明に迫る。*Scaptodrosophila* 幼虫は特徴的な長い尾部を持ち、posterior extension という尾部を局所的に伸縮させる行動を示す。Posterior extension は *Drosophila* や、より祖先形質を保持する *Chymomyza*（ハシリショウジョウバエ属）では見られないため、*Scaptodrosophila* 系統群で独立に獲得されたものと考えられる。そのために *Scaptodrosophila* 属が何らかの特異的な筋繊維を有している、あるいは体の頭尾軸のボディプラン決定に関与する遺伝子群である Hox 遺伝子群の変化があるといった可能性について検討した。

筋肉については、tropomyosin 抗体を用いて免疫染色を行うことで可視化した。染色像から、体側面の筋肉に沿って体長に対する A7、A8/9 体節の占める割合を算出したところ、*Scaptodrosophila* のみ全長に対して A8/9 体節の占める割合が、他の 2 種と比較して有意に高いことが示された。Hox 遺伝子群の解析についてはまず、腹部以後を制御する AbdA、AbdB をそれぞれ標識する *Drosophila* Ubx/AbdA、AbdB の 2 つの抗体を用いて免疫染色を行い、胚発生期の種間での発現パターンの違いを観察した。その結果、Ubx/AbdA は 3 種すべてにおいて発現パターンを確認できた。一方 AbdB は *Drosophila* では染色されたが、*Scaptodrosophila*、*Chymomyza* では染色されなかったため、RNAFISH を用いた発現パターン比較を現在試みている。今後さらなる研究により、posterior extension を可能とする尾部構造の分子基盤、神経回路基盤の解明を目指す。

水面を滑るショウジョウバエの進化機構（松永光幸、名倉幸祐（4年生特別実験）、不殿創士（4年生特別実験））

地球上の多様な生物は、それぞれ固有の生態学的ニッチを占有し、種特異的な模様や行動を進化させてきた。こうした進化機構を明らかにすることは、生物多様性の生成メカニズムの理解に貢献する。しかし、生物が新たな生態学的ニッチを獲得する際に関与する遺伝・神経学的基盤に関する研究はこれまで限定的であった。

本研究では、キイロショウジョウバエ (*Drosophila melanogaster*: 以下「キイロ」) に近縁でありながら、種特異的な水上移動行動を示すマメショウジョウバエ属の幼虫 (*Scaptodrosophila*: 以下「マメ」) をモ

デルとして、昆虫が新たな生態学的ニッチを獲得するときの形態学的・遺伝学的・神経学的基盤解明の解明を目指している。

マメの水上移動行動は、アメンボやミズカメムシなどの水棲適応を遂げた昆虫に類似し、体の特異的に曲げた姿勢を維持することで、水面を滑るように移動する。本年度はまず、この行動に関わる物理的メカニズムを明らかにするために、数理解析を行った。水平方向からの観察により、マメが水面上を移動するとき、頭端と尾端付近では上向きメニスカス、中部では下向きメニスカスが形成されていることが明らかとなった。これは、体の各部位と壁面との間に表面張力による引力が働いていることを示唆するものであり、水面移動時の加速度データを用いた数理解析の結果、この力は約 1m dynes と推定された。参考として、ミズカメムシでは約 2dynes の力が報告されており、この差は体重や水棲適応の違いに起因すると考えられる。

さらに、水上移動行動に関与する要因として、幼虫クチクラの疎・親水性に着目し、Nile Red 染色と接触角解析による種間比較を実施した。マメでは背側に強い染色が観察され、背側表面が疎水性であることが示唆された。また、クチクラ抽出物をスライドガラス上に展開・乾燥させた後、水滴を垂らして接触角を測定したところ、キイロでは約 50°、マメではほぼ 0° であり、マメが超親水性のクチクラ成分を持つことが示唆された。これらの結果から、マメは体表面上に疎水性と親水性の領域を併せ持っていることが示唆され、これはアメンボの脚に見られる機能分化と類似している。

以上の結果は、マメ幼虫の水上移動行動が、特異的な姿勢制御と、部位ごとに制御された疎・親水性パターンによって支えられていることを示唆している。今後は上記の表現型制御に関与する遺伝・神経学的基盤の解明を進める。

<受賞>

- [1] 関崇貴, 最優秀ポスター賞, 臨界期生物学 夏の領域班会議, 2024.8.30

<報文>

(原著論文)

- [2] J. Jonaitis, K.L. Hibbard, K.M. Layte, A. Hiramoto, A. Cardona, J.W. Truman, A. Nose, M.F. Zwart, S.R. Pulver. Steering From the Rear: Coordination of Central Pattern Generators Underlying Navigation by Ascending Interneurons. bioRxiv (2024)
- [3] S. Takagi, S. Takano, Y. Hashimoto, S. Morise, X. Zeng, A. Nose. Segment-specific axon guidance by Wnt/Fz signaling diversifies motor commands in *Drosophila* larvae. eLife (2024)
- [4] K. Fukumasu, A. Nose, H. Kohsaka. Modular organization of synapses within a neuromere for distinct axial locomotion in *Drosophila* larvae. bioRxiv (2024)

- [5] T. Matsunaga, C.E. Reisenman, B. Goldman-Huertas, S. Rajshekar, H.C. Suzuki, D. Tadres, J. Wong, M. Louis, S.R. Ramirez, N.K. Whiteman, Odorant receptors tuned to isothiocyanates in *Drosophila melanogaster* are co-opted and expanded in herbivorous relatives. bioRxiv (2024)

(学位論文)

- [6] 伊達隆久: Identification and functional analyses of a tonically active segmental interneuron maintaining muscle relaxation in *Drosophila* larvae (博士論文)
- [7] 佐藤政凱: Searching for neurons preferentially active during forward or backward locomotion in *Drosophila* larvae with a photoconvertible calcium sensor (修士論文、新領域創成科学研究科)
- [8] 高橋正弥: ショウジョウバエ近縁種 *Scaptodrosophila* 属幼虫の尾部伸展行動進化を支える分子基盤の探索 (修士論文、新領域創成科学研究科)
- [9] 渡辺逸希: Study of neural circuits driving escape behavior selection in *Drosophila* larvae (修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] S. Takagi, I. Watanabe, A. Cardona, A. Nose. Wnt/Fz-mediated differential wiring of homologous neurons in the command system contributes to the formation of motor circuits that elicit distinct behaviors, Molecular Mechanisms Of Neuronal Connectivity, 2024.9.10-14, Cold Spring Harbor, USA
- [11] S. Takagi, A. Nose. Segment-specific axon guidance by Wnt/Fz signaling diversifies motor commands in *Drosophila* larvae, Neuroscience 2024, 2024.10.5-9, Chicago, USA
- [12] T. Seki, H. Kohsaka, A. Nose. A higher-order interneuron that orchestrates intersegmental coordination in axial locomotion. Neuroscience 2024, 2024.10.5-9, Chicago, USA
- [13] 渡辺逸希, 橋本裕作, 高野詩菜, 高木優, 能瀬聡直, ショウジョウバエ幼虫の侵害刺激に対する逃避行動選択を制御する神経回路の機能解析, ACC 国際シンポジウム, 2025.1.24-25, 埼玉

招待講演

- [14] T. Matsunaga, N.K. Whiteman. How aversive chemicals can become attractive to specialized herbivorous insects through evolution. 19th International Symposium on Olfaction and Taste, 2024.6.22-26, Reykjavik, Iceland

(国内会議)

一般講演

- [15] H. Kohsaka, X. Zhang, G. Arakawa, A. Nose, M. Fujiwara, Y. Makino. Flexible physical intervention to fly larval locomotion using an ultrasound phased array device. 第 47 回日本神経科学大会, 2024.7.24-27, 福岡
- [16] X. Zhang, G. Arakawa, A. Nose, M. Fujiwara, Y. Makino, H. Kohsaka. Flexible physical intervention to fly larval locomotion using an airborne ultrasound phased array device. 階層的生物ナビ学領域会議, 2024.6.24-25, 名古屋
- [17] X. Zhang, A. Nose, H. Kohsaka, M. Fujiwara, Y. Makino. Comprehensive analysis the behavioral response of *Drosophila* larvae to airborne tactile stimulation using ultrasound phase array device 階層的生物ナビ学領域会議, 2024.6.24-25, 名古屋
- [18] T. Date, Y. Liu, A. Yamaguchi, R. Wu, P. McNulty, M. Gershow, M. Zwart, A. Nose, H. Kohsaka. Gating of motor output with tonically active segmental interneurons in *Drosophila* larvae. 第 47 回日本神経科学大会, 2024.7.24-27, 福岡
- [19] T. Date, Y. Liu, A. Yamaguchi, R. Wu, P. McNulty, M. Gershow, M. Zwart, A. Nose, H. Kohsaka. Gating of motor output with tonically active segmental interneurons in *Drosophila* larvae. 適応回路センサ領域会議, 2024.10.17-19, 淡路島
- [20] T. Seki, H. Kohsaka, A. Nose. A higher-order interneuron that orchestrates intersegmental coordination in axial locomotion. NEURO2024, 2024.7.24-27, Fukuoka
- [21] 関崇貴, 高坂洋史, 能瀬聡直, ショウジョウバエ幼虫の前進運動においてセグメント間協調を担う高次介在ニューロン. 臨界期生物学 夏の領域班会議, 2024.8.28-30, オンライン
- [22] M. Sato, T. Date, A. Nose. Searching for neurons specifically active during forward or backward locomotion in *Drosophila* larvae with a photoconvertible calcium sensor. 適応回路センサ領域会議, 2024.10.17-19, 淡路
- [23] M. Sato, T. Date, A. Nose. Searching for neurons specifically active during forward or backward locomotion in *Drosophila* larvae with a photoconvertible calcium sensor. 第 47 回 日本分子生物学会年會, 2024.11.27-29, 福岡
- [24] M. Takahashi, T. Matsunaga, A. Nose. Molecular analysis of the posterior extension behavior of *Scaptodrosophila* larvae. 第 47 回日本分子生物学会年會, 2024.11.27-29, 福岡
- [25] 渡辺逸希, 橋本裕作, 高野詩菜, 高木優, 能瀬聡直, ショウジョウバエ幼虫の侵害刺激に対する逃避行動選択を制御する神経回路の機能解析, 第 47 回日本分子生物学会年會, 2024.11.27-29, 福岡

招待講演

- [26] H. Kohsaka. Interspecific comparison of fly larval movement. The 16th Japanese *Drosophila* Research Conference, 2024.9.17-19, 仙台

(セミナー)

- [27] A. Nose: Design principles of neural circuits generating adaptive animal behaviors, Harvard Medical School, 2024.9.16, Boston, USA
- [28] H. Kohsaka: Motor circuits and neuromechanics of locomotion in fruit fly larvae. NeuroPSI, 2024.11.7, Paris, France
- [29] H. Kohsaka: Motor circuits and neuromechanics of locomotion in fruit fly larvae. Seminar Dept Neuroscience, Institute Pasteur, 2024.11.8, Paris, France

7.2 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。

以下、2024 年度に報告した主な研究成果の概要を説明する。

7.2.1 蛍光タンパク質バイオセンサーの開発

細胞内での代謝やシグナル伝達は、代謝分子あるいはシグナル伝達分子などの小分子を介した化学反応である。したがって、生きた細胞内でこれらの小分子の濃度を計測することにより、細胞の代謝状態やシグナル伝達の様子を調べることができる。1980 年代に開発された Fura2 は、カルシウムイオンに結合して蛍光スペクトルが変化する蛍光色素であり、細胞内カルシウムイオン濃度変化の可視化に今でも広く用いられている。その後、緑色蛍光タンパク質 (GFP) が生物学研究に利用され始めると、蛍光タンパク質を用いたカルシウムイオンセンサーの開発が報告された。蛍光タンパク質をベースにしたセンサーは、これをコードする遺伝子を細胞や個体に組み込むことでセンサーを発現させることができる。このため、細胞あるいは個体レベルでの計測を可能にする技術として、蛍光タンパク質をベースにしたセンサー (蛍光タンパク質バイオセンサー) が数多く開発されてきた。

蛍光タンパク質バイオセンサーは、計測対象の小分子との結合により蛍光が変化することで計測を行う。これまで、多くのセンサーでは、蛍光の「色」(蛍光スペクトル) の変化か「明るさ」(蛍光強度) の変化が利用されてきた。蛍光強度が変化するタイプは操作が比較的簡単で扱いやすい反面、蛍光分子の量や褪色、その他の実験条件に影響を受けやすく、定量計測は困難である。一方、蛍光スペクトルが変化するタイプのバイオセンサーは定量性に優れる反面、スペクトル変化を計測するため 2 色 (以上) の計測が必要となる。そのため、計測装置が複雑になり、特に複数の化学物質の同時計測は工夫を要する。

定量計測と多種類同時計測を可能にするパラメータとして、蛍光寿命がある。励起光によって励起された蛍光分子が、励起状態から基底状態に戻るまでの時間、すなわち励起状態の寿命が蛍光寿命と呼ばれる。蛍光寿命は蛍光分子周囲の物理化学的な環境を反映し、再現性よく定量的な計測が可能である。このため、実験条件の影響を受けにくく、高い信頼性を持つ定量的な計測が可能なイメージング技術として活用されている。

しかし、蛍光寿命値を用いて測定対象の小分子の濃度を計測する蛍光タンパク質バイオセンサー、すなわち蛍光寿命バイオセンサーの報告は限られていた。特に、蛍光タンパク質を 1 個だけ用いる構造の蛍光寿命バイオセンサーの設計手法は未確立であった。また、蛍光寿命計測による大規模スクリーニングが技術的に困難であることも、開発を妨げる要因となっていた。

私たちは、シアン色蛍光タンパク質 (mTurquoise2) に注目した。mTurquoise2 は、シアン色蛍光タンパク質の改良型で、明るい蛍光と長い蛍光寿命 (4.0 ナノ秒) を特徴としている。その開発過程で、発色団近傍に位置する β シートのフェニルアラニン-146 が蛍光寿命延長と量子収率向上に寄与することが報告されている。そこで、mTurquoise2 分子の側面の β シートの 1 本をチロシン-145 とフェニルアラニン-146 の間で切断し、間にセンサードメインを挿入するという構造を設計した (図 7.2.1)。この設計は、ATP、cAMP、クエン酸、ブドウ糖という 4 種類の異なる小分子に対するセンサードメインのいずれを挿入しても機能することが示され、蛍光寿命バイオセンサーの汎用的な設計法として確立することができた ([14])。

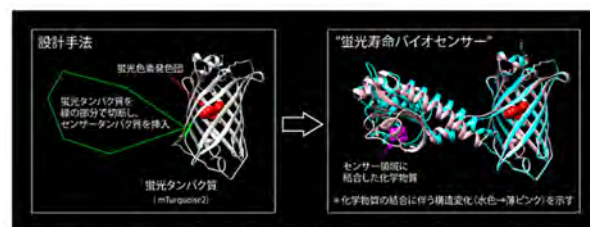


図 7.2.1: 蛍光寿命バイオセンサーの設計。右側は AlphaFold2 による推定構造

7.2.2 超耐光性蛍光プローブ開発と超解像蛍光顕微鏡への応用

蛍光顕微鏡観察では、試料を蛍光色素や蛍光タンパク質などの蛍光プローブ分子で染色し、励起光を照射して試料が発する蛍光を観察する。

励起光強度が 1 W/cm^2 のとき、個々の蛍光プローブ分子から放出される蛍光は、光子数にして毎秒約 1000 個である。このように光量が少ないイメージングでは、光の量子性によるノイズ (ショットノイズ) の影響が顕著になる。光子数が $10 \sim 10,000$ 個の場合に、蛍光分子 1 個の像がどのように見えるかのシミュレーション画像を図 7.2.2 に示す。このように、光子数が少ない画像はショットノイズの影響で画質が大幅に劣化し、光子数が数百個以下では分子 1 個の像はノイズに埋もれてしまうことが判る。

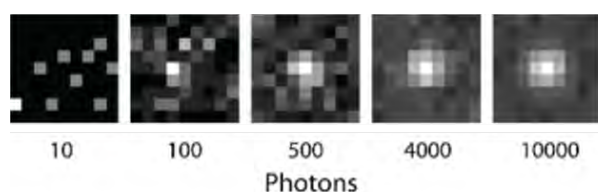


図 7.2.2: 蛍光一分子イメージングにおけるショットノイズの影響

分子の動態を計測するためには、繰り返し撮影する必要がある。しかし、一重項励起状態 (S_1) から 10^{-3} 程度の確率で項間交差が生じて三重項状態 (T_1) へと遷移する (図 7.2.3)。多くの場合は、ミリ秒程度の時間で基底状態に戻る (blinking) が、三重項状態は溶液中の溶存酸素分子と反応しやすいため、三重項状態を繰り返すうちに不可逆的な化学反応が起こり、蛍光を発しない分子へと変化する (蛍光褪色)。このため、通常の蛍光プローブ分子は、蛍光褪色するまでに $10^4 \sim 10^5$ 個しか蛍光分子を放出することができない (光子予算)。すなわち、分子動態を観察する動画は、10-100 コマしか撮影できないということである。

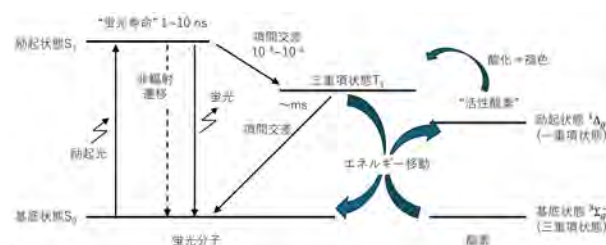


図 7.2.3: 蛍光分子のブリンキングと褪色のエネルギー準位図

この制約に対し、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、蛍光褪色しにくい蛍光プローブ分子の開発と応用に取り組んできた ([2], [3], [4], [5])。特に、私たちの研究室の Zhang は、理化学研究所宮脇研究室で開発された超耐光性緑色蛍光タンパク質 mStayGold とさまざまなタンパク質との融合タンパク質を細胞で発現させ、タンパク質の局在や動態などの機能に悪影響を与えず、蛍光ライブセルイメージングが可能であることを確認し、誘導放出制御法 (STED) を含むさまざまな超解像蛍光顕微鏡法にも有用であることを実証した (図 7.2.4, [18])。

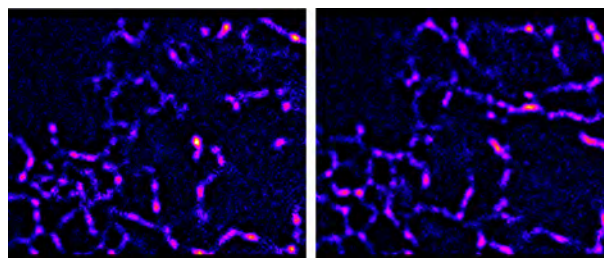


図 7.2.4: mStayGold で染色した ER の超解像蛍光ライブイメージング。1 フレーム目と 1000 フレーム目を左右に並べた。1000 フレーム撮影しても、まったく褪色していないことが判る

7.2.3 高速高分解能定量位相差顕微鏡

超耐光性蛍光プローブの開発により、 $10 \sim 100 \text{ W/cm}^2$ の励起光強度での継続的観察が可能となり、超解像蛍光ライブセルイメージング法や蛍光分子の高速・高精度追跡が実現された。しかし、直射日光のエネルギー密度が 0.135 W/cm^2 (太陽定数) であることを考えると、 $10 \sim 100 \text{ W/cm}^2$ という励起光強度は、直射日光を直径 10 cm の虫眼鏡で集光した焦点に匹敵する。細胞は可視光をほとんど吸収しないが、ビタミン類など有色分子も存在するため、強い光の照射によりダメージを受ける (光毒性)。したがって、励起光強度をこれ以上強くすることは望ましくない。また、iPS 細胞などの幹細胞は光毒性感受性が高いことが知られており、蛍光顕微鏡観察が困難である。とくに、再生医学などの臨床応用においては、蛍光色素や蛍光タンパク質で染色することができないケースも多い。

このため、蛍光以外の方法で、ほぼ無色透明な細胞の構造を観察する手法も重要である。この目的では、古くから位相差顕微鏡や微分干渉顕微鏡が用いられてきた。いずれも、タンパク質や脂質などの生体成分の屈折率が水より大きいことを利用し、位相遅れを強度に変換して観察するという顕微鏡法である。特に、干渉計を組んで位相遅れを定量化すれば、既知の屈折率の値を利用して、タンパク質や脂質の量を推定することが出来る。これは定量位相差顕微鏡法とよばれている。

私たちの研究室の犬塚は、干渉計を用いるのではなく、偏光を利用した斜光照明と偏光カメラを巧みに組み合わせることで、一回の撮影で4方向からの斜光照明画像を取得し位相回復する polarization-based differential phase contrast (pDPC) 法を開発した ([16], [19], [25], [26])。高速かつ高分解能での細胞内微細構造の動態観察を目指した設計としたことにより、私たちが以前に開発した世界最高速の超解像蛍光顕微鏡 (スピニングディスク超解像蛍光顕微鏡 [1]) に匹敵する約 100 nm の空間分解能 8 ms/フレームの時間分解能を達成し、生きた細胞内で ER やミトコンドリア内膜クリステ構造の動態を観察することに成功した (図 7.2.5)。

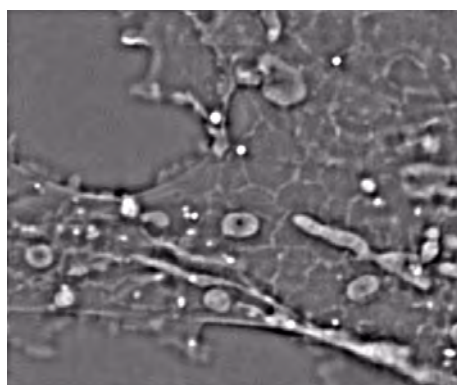


図 7.2.5: pDPC 法で得られた無染色生細胞画像。ER やミトコンドリア内膜クリステ構造などの細胞内微細構造が可視化されている

さらに、その応用として、Alex と犬塚は、無染色生細胞の定量位相差顕微鏡像の機械学習による解析も行った。機械学習の手法を利用して、細胞の認識・追跡を自動で行い、さらに各細胞の画像を畳み込みニューラルネットワーク (CNN) に学習させることで、細胞周期の自動分類が出来ることを示した ([24])。

7.2.4 一分子追跡からの分子形状の推定

多くのタンパク質分子は概ね球形をしているが、棍棒あるいは短い繊維状の形状のタンパク質分子も珍しくない。特に、アクチン線維や微小管などの細胞骨格と呼ばれる繊維状の長いタンパク質ポリマーを形成するタンパク質 (アクチン、チューブリンなど) は、単量体あるいは数個の単量体が結合したオリゴマー構造で細胞質に存在する。このようなタンパク質オリゴマーのブラウン運動による分子位置の確率分布は非ガウスの、球形粒子のブラウン運動によるガウス分布との差を検出することで、タンパク質分子の形状を調べることが原理的には可能である。

しかし、前節で述べたとおり、一分子追跡で計測できる軌跡の長さには限界があるため、ガウス分布からの小さな差は計測ノイズに埋もれてしまい検出することは困難である。

2022 年度 A セメスターの特別実験で、高波はこの問題に取り組んだ。細胞辺縁のような細胞質が薄く 2 次元系とみなせる系を対象として、長径方向と短径方向で異なる拡散係数を持つ楕円粒子の 2 次元異方拡散としてモデル化した。一分子追跡では、粒子の位置を計測することはできるが、向きを計測することは困難である。そのため、この 2 次元異方拡散粒子の位置の軌跡のみから (向きを隠れ変数として)、長径方向・短径方向の拡散係数を推定することが目標となる。

高波は特別実験後もこの研究を発展させ、大学院進学先の樺島研において私たちとの共同研究という形で継続・完成させた。彼は Expectation-Maximization アルゴリズムと粒子フィルタによって実装された確率伝搬法を組み合わせたアルゴリズムを開発し、この問題を解決した。この手法により、実験的に計測可能な長さの軌跡からでも十分に形状パラメータを推定できることが示された ([8])。

<報文>

(原著論文)

2023 年度までの論文のうち引用したもの

- [1] Hayashi S. and Okada Y. Ultrafast superresolution fluorescence imaging with spinning disk confocal microscope optics. *Mol. Biol. Cell.* **26**, 1743-1751 (2015).
- [2] Grzybowski M, *et al.*, A Highly Photostable Near-Infrared Labeling Agent Based on a Phosphor-rhodamine for Long-Term and Deep Imaging. *Angew. Chem. Int.* **57**, 10137-10141 (2018).
- [3] Wu Q, *et al.*, Stereochemistry-Dependent Labeling of Organelles with a Near-Infrared-Emissive Phosphorus-Bridged Rhodamine Dye in Live-Cell Imaging. *Angew. Chem. Int.* **63**, e202400711 (2024).
- [4] Hirano M, *et al.*, A highly photostable and bright green fluorescent protein. *Nat. Biotechnol.* **40**, 1132-1142 (2022).
- [5] Ando R, *et al.*, StayGold variants for molecular fusion and membrane-targeting applications. *Nat. Meth.* (2023).

2024 年度に発表した論文

- [6] Tran NV, *et al.*, α -Spectrin regulates cell shape changes during disassembly of microtubule-driven protrusions in *Drosophila* wings. *MicroPubl Biol.* **2024**, 10.17912/micropub.biology.001169 (2024).
- [7] Louder MIM, *et al.*, Transient sensorimotor projections in the developmental song learning period. *Cell Rep.* **43**, 114196 (2024).
- [8] Takanami K, *et al.*, Detection of diffusion anisotropy from an individual short particle trajectory. *Phys Rev Res* **6**, 033272 (2024).
- [9] Kobayashi TA, *et al.*, Dimeric transport mechanism of human vitamin C transporter SVCT1. *Nat Commun.* **15**, 5569 (2024).

- [10] Katoh TA, *et al.*, BMP4 regulates asymmetric Pkd2 distribution in mouse nodal immotile cilia and ciliary mechanosensing required for left-right determination. *Developmental Dynamics*. **2024**, 1-14 (2024).
- [11] Kubo S, Okada Y, Takada S. Theoretical insights into rotary mechanism of MotAB in the bacterial flagellar motor. *Biophys J*. **123**, 3587-3599 (2024).
- [12] Saji T, *et al.*, KIF1C facilitates retrograde transport of lysosomes through Hook3 and dynein. *Commun Biol*. **7**, 1305 (2024).
- [13] Shibuya R, *et al.*, Nucleic Acid-Rich Stress Granules Are Not Merely Crowded Condensates: A Quantitative Raman Imaging Study. *Anal Chem*. **96**, 17078-17085 (2024).
- [14] Zhong C, Arai S, Okada Y. Development of fluorescence lifetime biosensors for ATP, cAMP, citrate, and glucose using the mTurquoise2-based platform. *Cell Rep Methods*. **4**, 100902 (2024).
- [15] Kubo S, Okada Y. The ATPase asymmetry: Novel computational insight into coupling diverse FO motors with tripartite F1. *Biophys J*. **124**, 891-900 (2025).
- [16] Inutsuka Y, *et al.*, Single-shot label-free nanoscopy for quantitative organelle visualization on standard commercial microscopes. *bioRxiv*. **2024.12.31.630894** (2025).

(学位論文)

- [17] 田村香絵, 脳室流の流速および一次繊毛におけるカルシウムスパイク頻度の測定 (修士論文)
- [18] 張 云飛, 光安定性の高い蛍光タンパク質 mStayGold のライブセルイメージングおよび STED 顕微鏡への応用 (修士論文)
- [19] 犬塚悠剛, 計算位相顕微鏡による細胞内観察 (博士論文)
- [20] 岩崎奏子, 速い軸索輸送の分子機構解析 (博士論文)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [21] Okada Y. Challenging the Frontiers of Live-Cell Imaging Approaches with New Microscope Optics, New Probes, and Computation. MELIS-UPF and RIKEN BDR Symposium, Barcelona Biomedical Research Park, 2024 年 4 月 19 日
- [22] Okada Y. Challenging the frontiers of single-molecule or super-resolution live cell imaging. IUPAB2024 Symposium, Kyoto, 2024 年 6 月 27 日
- [23] Okada Y. From VAAS to NSPARC: 15 Years of Super-Resolution Confocal Microscopy. IUPAB2024 BP Seminar, Kyoto, 2024 年 6 月 27 日

一般講演

- [24] Kondratiev AY, Inutsuka Y, Okada Y. Continuous Cell Cycle Representation Using Ordinal Regression and Siamese Network from Quantitative Phase Images. 2024 IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), 1-5 (2024)
- [25] Inutsuka Y, Okada Y. Single-shot label-free nanoscopy visualizing organelles. *Cell Bio 2024 - An ASCB—EMBO Meeting*, Dec. 2024
- [26] Inutsuka Y, Okada Y. Single-shot computational phase nanoscopy visualizing organelles. *SPIE Photonics West 2025*, Jan. 2025

(国内会議)

招待講演

- [27] 岡田康志. 生きている細胞と死んだ細胞の違いを超解像・一分子イメージングで探る. 日本 Cell Death 学会 特別講演, 徳島大学, 2024 年 7 月 20 日
- [28] 岡田康志. 4 次元イメージング. 細胞生物学ワークショップ, 大阪大学+オンライン, 2024 年 8 月 2 日
- [29] 岡田康志. 高速高分解能ライブイメージング〜培養細胞から個体まで〜. 16th Japanese Drosophila Research Conference JDRC16, ランチョンセミナー, 仙台国際会議場, 2024 年 9 月 18 日
- [30] 岡田康志. 生きている細胞と死んだ細胞の違いを超解像・一分子イメージングで探る. 理研シンポジウム第 12 回光量子光学研究, 理研鈴木梅太郎ホール, 2024 年 12 月 12 日
- [31] 岡田康志. 「生命力」を超解像・一分子イメージングで探る. 第 13 回 AAA 特別講演, 東京コンファレンスセンター, 2025 年 1 月 12 日
- [32] 岡田康志. 生きている細胞と死んだ細胞の違いを超解像・一分子イメージングで探る. 第 10 回お茶の水サイエンス倶楽部, ソラシティ・カンファランスセンター (東京), 2025 年 1 月 31 日
- [33] 岡田康志. ライブセルイメージング技術はゲル科学に貢献できるか. ERATO 酒井複素ゲルプロジェクト キックオフシンポジウム, 東京大学, 2025 年 3 月 7 日

(アウトリーチ)

- [34] 岡田康志. 超すごい顕微鏡で生きた細胞を視る. 中高生のためのオンライン特別授業, ポンペウファブラ大学 (バルセロナ) + オンライン, 2024 年 4 月 20 日
- [35] 岡田康志. 「生命力」の起源を顕微鏡で探る. 第 10 回 IRCN, IPMU, ELSI 合同一般講演会, シブヤキューズ, 2025 年 1 月 25 日
- [36] 岡田康志. 超すごい顕微鏡で生きた細胞を視る. ナレッジキャピタル SpringX 超学校, ナレッジフロント (グランフロント大阪), 2025 年 2 月 4 日

7.3 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。

7.3.1 触媒反応系の可安定性と可制御性に関する一般則の解明

本研究では、触媒反応系の制御可能性について、局所的安定化が可能な状態では、その状態がグローバルな可制御性も獲得することを示した。

従来の化学反応系や生物学的制御系では、複雑かつ高次元の系において「すべての初期状態から目標状態へ制御可能か」を判定するのは困難と考えられてきたが、本研究では、特に反応次数と化学量論係数が一致する量論整合的な動力学 (stoichiometrically compatible kinetics, SCK) を満たす触媒反応系に焦点を当てることで、局所的安定化が可能であれば、同一の Stoichiometric Compatibility Class 内のどの状態からも目標状態へ誘導できる、という一般則を証明した。

具体的には、まず反応速度関数を熱力学的部分 (反応方向を決める部分) と動力学的部分 (それ以外の部分) に分解し、さらに各反応を非負の制御入力によって加速・減速する枠組みを導入する。また、反応のつり合い多様体 (balance manifold) や、反応方向の向きによって分割されるセル構造 (cell) を状態空間に導入し、制御が「自由セル (free cell)」内で十分な自由度を持つ場合には局所安定化が可能になることを示した。次に、その自由セルが頂点 (0 次元境界) として Wegscheider 条件を満たす化学平衡状態を持つ場合に、その自由セルの任意の点へと制御することが可能であることを示した。これは、Wegscheider 条件を満たす化学平衡状態については定制御で Lyapunov 関数を構成できることと、化学平衡状態の漸近安定性を壊さないような微小摂動が存在することを用いた。

以上の成果は、生化学ネットワークや代謝経路の制御可能性、安定化可能性に新たな理解をもたらし、設計的・工学的な応用のみならず、生物が示すロバストな適応現象やレジリエンスの背後にある基本原理を考察する上でも大きな意義を持つと考えられる。また、[Himeoka, Horiguchi and Kobayashi, Phys. Rev. Res., (2024)] において提案した「細胞死の理論」のフレームワークにおいて「細胞死」を起こさないモデルクラスを解明したことになる。

7.3.2 突然変異率と薬剤耐性進化速度の関心の定量的解析

細菌が抗生物質に抵抗する能力 (薬剤耐性) をどのように獲得していくのかは、医学・進化生物学の両面から重要な課題である。とりわけ、進化の原動力となる「突然変異率」が進化速度に与える影響については古くから議論されてきたが、その関係性は必ずしも単純ではなく、特に選択環境の影響を受けることが示唆されていた。そこで本研究では、突然変異率の違いが薬剤耐性の進化速度に与える影響を、定量的かつ多様な条件下で評価することを目的とし、大腸菌の系統的な進化実験を実施した。

まず、DNA 修復・複製に関わる 5 つの遺伝子を単独または組み合わせて欠損させた 12 株の大腸菌を構築し、それぞれの突然変異率を測定した。結果としてこれらの株は、野生株の約 6~400 倍の突然変異率を有していた。これらの株を 5 種類の抗生物質 (静菌性 2 種、殺菌性 3 種) 下で 9 日間にわたり培養し、薬剤耐性の指標である MIC (最小発育阻止濃度) の上昇速度を進化速度として定量した。その結果、一般には突然変異率の上昇に伴って進化速度も増加することが確認されたが、最も突然変異率の高い株ではむしろ進化速度が低下した。このことは、有害変異の蓄積によって成長そのものが妨げられた可能性を示唆する。また、進化速度の変化パターンは抗生物質の種類により異なり、静菌性薬剤では突然変異率の影響が大きい一方、殺菌性薬剤では影響が小さい傾向があった。これらの結果は、選択圧の性質が進化可能性に与える影響を反映していると考えられる。さらに、得られた結果を再現する数理モデルを構築し、薬剤感受性や突然変異の利益効果などをパラメータとして組み込むことで、実験結果との整合性を確認した。本研究は、薬剤耐性進化の理解にとどまらず、突然変異率進化の一般的理解にも資する知見を提供するものである (Shibai, PLOS Genetics 2025)。

7.3.3 Feast-Famine サイクル環境下における多様な栄養利用戦略の出現

多種多様な生物がなぜ共存しているのかという問いは理論生態学における中心的問いのひとつである。R. May らの先駆的研究によって、多様な生物の共存の困難さが示されて以来、空間的ニッチ分割や生物種同士の相利関係性など、共存を可能にするメカニズムが多数提案されてきた。そのなかでも本研究では生命機能間のトレードオフに着目して多種共存のメカニズムを解析した。

本研究では、よく用いられるレプリケーターモデルに類似したモデルを用いて微生物集団動態の解析を行なった。通常モデルと大きく異なる点は以下の 2 点である：① 栄養は外部環境から定常的に供給されるのではなく離散的・確率的イベントによって供給される。その結果、微生物集団は Feast-Famine サイクルと呼ばれる、富栄養状態と貧栄養状態を交

互に経験する。②「同時に全ての栄養を最大速度で使えることはない」という栄養利用に関するトレードオフと、「素早く増殖する種は貧栄養環境では素早く死滅する」という増殖速度と死滅速度の間のトレードオフを導入したことである。

微生物集団動体モデルを最も単純なセットアップで解析した結果、トレードオフの強度や Feast-Famine サイクルにおける栄養供給イベントの頻度などに応じて、すべての栄養を平均的な速度で消費する「ジェネラリスト」と、特定の栄養利用に特化した「スペシャリスト」の間で優占種の転移が起こることが明らかになった。この転移点に関しては解析的な見積もりも行い、数値計算と整合することが確認できた。

次に、ジェネラリストとスペシャリストの中間種などが出現することを許した、より大規模な数値計算を行なった。その結果、トレードオフ強度の変化させることにより、N 種の栄養のうち 2 種のみを使用するスペシャリストが優占種である状態から 3 種スペシャリスト、4 種、5 種…というように優占種が段階的に変化していくことが明らかになった。

7.3.4 融合遺伝子による酵素構造の収斂進化とその再現性に関する研究

タンパク質の進化において、異なる系統で同様の機能や構造が独立に獲得される「収斂進化」は、進化の再現性の検証において重要な観点である。特に、異なるドメイン間の相互作用を介したタンパク質の全体構造の収斂進化については未解明な点が多い。本研究では、アルデヒド脱水素酵素 (ALDH) とアルコール脱水素酵素 (ADH) の融合により生じた AdhE と、独立に進化した新規融合酵素 BdhE の比較を通じて、構造進化の再現性を解析した。

まず、ゲノムデータベースから AdhE とは低い相同性しか持たないが ALDH-ADH 構造をもつ遺伝子群 (BdhE ファミリー) を同定し、系統樹解析により BdhE と AdhE が独立の融合イベント由来であることを示した。次に、BdhE の組換え発現および酵素活性測定により、AdhE と同様にエタノール酸化やアセチル CoA 還元などの機能を持つことを確認した。さらに、クライオ電子顕微鏡によって立体構造を解析した結果、AdhE がスプリング状のポリマー構造をとるのに対し、BdhE は環状のテトラマー構造を形成していた。興味深いことに、両者は 70% 以上のアミノ酸配列の非共有にもかかわらず、ALDH-ADH 間の相互作用を通じた類似したダイマー構造単位を形成していた。その相互作用は、AdhE と BdhE でそれぞれ異なるループ構造の進化によって達成されていた。また、両酵素の遺伝子は、進化的に近縁な ALDH・ADH 遺伝子対がゲノム上で隣接しやすい傾向を持ち、それが融合の前提条件となっていたことも示された。

本研究は、ドメイン間相互作用を介したタンパク質構造進化が、遺伝子融合という共通の出発点から独立に繰り返し生じうることを明らかにし、構造収斂進化の一般原理への理解を深める成果となった。

7.3.5 遺伝子発現調節領域における変異に対する頑強性の進化的起源

遺伝子発現量はゲノム変異の影響を受けて変動するが、その変動しやすさは遺伝子ごとに異なる。この発現変動性の違いは、特定の表現型を持つ変異体の出現頻度や、その後の表現型進化の促進・制約に影響を与えていると考えられている。しかし、発現変動性における遺伝子間の違いが何によって生じているのかについては十分に解明されていない。この課題に対処するためには、共に遺伝子の発現制御に関与するシス因子 (注目遺伝子上流のプロモーターなど) とトランス因子 (注目遺伝子を制御する転写因子など) の両方の因子を考慮する必要がある。本研究では、大腸菌をモデルとし、シス因子、特にプロモーター領域の変異に着目して、発現量の変動性の違いの起源を探った。

先行研究から、増殖に必須な遺伝子は、非必須遺伝子と比較して発現変動性が低いことが予想されたため、必須遺伝子と非必須遺伝子の二つのグループのプロモーター領域に着目した。まず、必須遺伝子と非必須遺伝子のプロモーター領域について配列の相同性や長さ、塩基組成を比較したが、両者を明確に分けるような特徴は見出されなかった。次に、各プロモーター領域に実際に変異を導入し、下流の遺伝子の発現量に与える影響を GFP 蛍光で評価したところ、必須遺伝子由来のプロモーターでは、活性が野生型より低下する変異体が多く、逆に高活性の変異体は出現しにくい傾向が見られた。このことは、必須遺伝子のプロモーター領域が、発現量の進化において高発現方向への変化を制限する分子機構として働いている可能性を示唆している。

さらに、先行研究の実験データを解析したところ、必須遺伝子は非必須遺伝子に比べて発現量が高く、その発現量の低下は細胞の増殖速度により大きな悪影響を与えることが明らかとなった。これらの実験証拠から、必須遺伝子には高発現を維持するような強い自然選択圧がかかってきたと推測された。この自然選択が、新たに発生する変異体の発現量変化にどのような影響を与えるかを調べるため、プロモーター配列空間を富士山型の活性地形とする進化シミュレーションを行った結果、強い正選択を受けた配列 (必須遺伝子モデル) は局所的な活性ピークに到達しやすく、そこからの変異が活性低下を引き起こしやすいことが示された。これらの結果から、プロモーター領域は自然選択の履歴に応じて発現量進化の方向性を制約しうることで、そしてその方向性自体が進化可能な形質であることが示唆された (Tsuru, Mol. Biol. Evo. 2024)。

7.3.6 発現量が進化しやすい遺伝子の転写制御ネットワーク解析

発現変動性を左右する分子機構を明らかにするためには、シス因子だけでなく、トランス因子も考慮する必要がある。そこで本研究では、トランス因子

である遺伝子間相互作用の知見が豊富に蓄積されている大腸菌を用いて、発現量が進化しやすい遺伝子の転写制御ネットワークの特徴の解明に取り組んだ。まず、発現量が進化しやすい遺伝子を特定するため、寒天培地上で単一細胞由来のコロニーを連続的に植え継ぐ進化実験を行い、多様な変異を蓄積した大腸菌進化株を得た。これらの進化株を一定の条件下で培養し、網羅的発現量解析によって、ゲノム上の蓄積変異による発現変動量 (DM_{mut}) を遺伝子毎に定量した。次に、大腸菌野生株をさまざまな環境条件で培養することで得られた既存の発現プロファイルを解析し、環境変化による発現変動量 (DM_{env}) を遺伝子毎に定量した。これらの発現変動量を比較した結果、環境変化に対して発現量が大きく変化しやすい遺伝子は、変異に対しても同様に変化しやすい傾向があることが明らかになった。

こうした発現量が進化しやすい遺伝子は、細胞の遊泳や代謝に関わる特定の機能を持つ遺伝子に多く見られた。先行研究によって蓄積された転写制御ネットワークの知見を活用し、発現量が進化しやすい遺伝子が共通してどの転写因子によって制御されているかを解析した結果、13 個の転写因子 (TR_{com}) が環境変化と変異の双方に対して大きな影響を標的遺伝子の発現量に与えることが判明した。また、制御ネットワークの構造解析により、 TR_{com} の多くはセンサー機能を持つ特別な転写因子と強連結成分を形成しており、細胞状態の変化を広範に感知し、それを標的遺伝子の発現制御へとつなげる仕組みを有していることがわかった。さらに TR_{com} 同士の間にも密な制御関係が存在し、このようなネットワーク構造が、発現量の変化しやすさ、ひいては進化のしやすさを生み出す分子基盤になっていることが示唆された (Tsuru, Nature Commun. 2025)。

<受賞>

- [1] 中堀祥悟, 小谷葉月, 吹谷智, 古澤力, Michael Bott, 前田智也, 第 76 回日本生物工学会大会 学生最優秀発表賞, 2024 年 9 月
- [2] 山上見汰郎, 小谷葉月, 吹谷智, 古澤力, 前田智也, 第 76 回日本生物工学会大会 学生優秀発表賞, 2024 年 9 月
- [3] 今野直輝, 三宅敬太, 西野聡, 大前公保, 柳澤春明, 津留三良, 古澤力, 吉川雅英, 岩崎渉, 生命情報科学若手の会第 16 回年会 最優秀ポスター賞, 2024 年 9 月
- [4] 今野直輝, 津留三良, 岩崎渉, 古澤力, 第 19 回日本ゲノム微生物学会年会 最優秀ポスター賞, 2025 年 3 月

<報文>

(原著論文)

- [5] Development of specialized devices for microbial experimental evolution. Shibai A, Furusawa C. Dev Growth Differ. 2024, 66(7):372-380.
- [6] Promoters constrain evolution of expression levels of essential genes in *Escherichia coli*. Tsuru S, Hatanaka N, Furusawa C. Mol Biol Evol. 2024, msae185.

- [7] Roles of network topology in the relaxation dynamics of simple chemical reaction network models. Himeoka Y, Kirkegaard JB, Mitarai N, Krishna S. Sci Rep. 2024, 14(1):22187.
- [8] *Yamadazyma thunbergiae* sp. nov., a novel yeast species associated with Bengal clock vines and soil in Okinawa, Japan. Seike T, Takekata H, Sakata N, Furusawa C, Matsuda F. Int J Syst Evol Microbiol. 2024, 74(10).
- [9] Bioinformatic analysis reveals the association between bacterial morphology and antibiotic resistance using light microscopy with deep learning. Ikebe M, Aoki K, Hayashi-Nishino M, Furusawa C, Nishino K. Front Microbiol. 2024, 15:1450804.
- [10] Theoretical basis for cell deaths. Himeoka Y, Horiguchi SA, Kobayashi TJ. Phys Rev Res. 2024, 6(4):043217.
- [11] Growth inhibition by ppc deletion is rescued by isocitrate dehydrogenase mutations in *Escherichia coli*. Toya Y, Imada T, Ishibashi M, Kawamoto Y, Isshiki K, Shibai A, Furusawa C, Shimizu H. FEMS Microbiol Lett. 2025, 372:fnaf013.
- [12] Discovery and identification of a novel yeast species, *Hanseniaspora drosophilae* sp. nov., from *Drosophila* in Okinawa, Japan. Seike T, Takekata H, Kono K, Sakata N, Kotani H, Furusawa C, Matsuda F. Int J Syst Evol Microbiol. 2025, 75(2).
- [13] Genetic properties underlying transcriptional variability across different perturbations. Tsuru S, Furusawa C. Nature Commun. 2025, 16(1):2421.
- [14] Quantitative analysis of relationship between mutation rate and speed of adaptation under antibiotic exposure in *Escherichia coli*. Shibai A, Izutsu M, Kotani H, Furusawa C. PLoS Genet. 2025, 21(3):e1011627.
- [15] Perturbation-response analysis of in silico metabolic dynamics: Hard-coded responsiveness in the cofactors and network sparsity. Himeoka Y, Furusawa C. eLife, in press
- [16] Kimura R, Sato S, Wang S, Takahashi Y, Nishiwaki R, Shibai A, Furusawa C. Complete Genome Sequence of a Bacterial Strain, *Kurthia intestingallinarum*, Microb. Res. Ann., in press
- [17] Laboratory evolution of the bacterial genome structure through insertion sequence activation, Kanai Y, Shibai A, Yokoi N, Tsuru S, Furusawa C. Nucleic Acids Res., in press

(国内雑誌)

- [18] 前田智也, 古澤力, 適応的実験室進化の原理とその応用: 薬剤耐性化機構の解明から有用物質生産菌の育種まで, 化学と生物 2025, 63(3):114-122.

(学位論文)

- [19] 中村能之: Constraints on Developmental Processes: Mathematical Model Approaches to Cell Differentiation and Morphogenesis (発生過程にかかる制約: 数理モデルによる細胞分化と形態形成へのアプローチ) (博士論文)
- [20] 今野直輝: Phylogenetic, genomic, and structural studies toward predicting evolution (進化の予測に向けた系統学・ゲノミクス・構造生物学的研究) (博士論文)
- [21] 池田雄太郎: 遺伝子数が増える発現制御ネットワークの進化 (修士論文)
- [22] 木津川楓輝: 遺伝子制御ブーリアンモデルにおけるアトラクターの高速検出 (修士論文)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [23] Yoshiyuki Nakamura, Yusuke Himeoka, Nen Saito, Chikara Furusawa: Evolution of hierarchy and irreversibility in theoretical cell differentiation model, Physics of Cell Fate Decisions 2024, 2024 年 5 月
- [24] Yudai Iyoda, Chikara Furusawa, Yusuke Himeoka: Appearance and adaptive properties of bow-tie structures from simple metabolic networks, GSB Symposium of Molecular Systems Biology 2024, 2024 年 5 月
- [25] Yusuke Himeoka: Quantification of the point of no return of an in silico Escherichia coli metabolism, GSB Symposium of Molecular Systems Biology 2024, 2024 年 5 月
- [26] Yusuke Himeoka, Chikara Furusawa: Stability and death of in silico Escherichia coli metabolism, IUPAB2024, 2024 年 6 月
- [27] Saburo Tsuru, Chikara Furusawa: Genetic properties influencing transcriptional variability, IUPAB2024, 2024 年 6 月
- [28] Atsushi Shibai, Sumpei Sato, Chikara Furusawa: Analysis of evolutionary constraints using bacterial experimental evolution, IUPAB2024, 2024 年 6 月
- [29] Takuya Sato, Chikara Furusawa, Kunihiro Kaneko: Prediction of cross-fitness for adaptive evolution to different environmental conditions: Consequence of phenotypic dimensional reduction, IUPAB2024, 2024 年 6 月
- [30] Shunnosuke Ban, Yusuke Himeoka, Tomoaki Matsuura, Yoshihiro Shimizu, Chikara Furusawa: Estimation of biochemical reaction parameters using a mathematical model of the cell-free translation system, IUPAB2024, 2024 年 6 月
- [31] Yudai Iyoda, Chikara Furusawa, Yusuke Himeoka: Appearance and adaptive properties of bow-tie structures from simple metabolic networks, IUPAB2024, 2024 年 6 月
- [32] Yuki Kanai, Chikara Furusawa: Genome reduction increases parasite sensitivity and promotes the evolution of endosymbiotic mutualism, IUPAB2024, 2024 年 6 月
- [33] Tomoya Maeda, Junpei F Yamagishi, Chikara Furusawa: Analysis of dependence and independence of microbial community assembly on carbon sources through community assembly experiments, EMBO Workshop: Molecular mechanisms in evolution and ecology, 2025 年 10 月
- [34] Hiroki Ono, Saburo Tsuru, Chikara Furusawa: Effects of carbon source diversity on interspecies interactions, EMBO Workshop: Molecular mechanisms in evolution and ecology, 2025 年 10 月
- [35] Yudai Iyoda, Chikara Furusawa, Yusuke Himeoka: Exploring potential metabolic networks of life using chemical reaction databases, 1st India-Japan Workshop on Physical Aspects of Living Systems, 2025 年 2 月
- [36] Yusuke Himeoka: Theoretical basis for cell deaths, 1st India-Japan Workshop on Physical Aspects of Living Systems, 2025 年 2 月
- [37] Junpei F. Yamagishi, Tetsuhiro S. Hatakeyama: Global Constraint Principle for Microbial Growth Law, 1st India-Japan Workshop on Physical Aspects of Living Systems, 2025 年 2 月
- [38] Kansuke Sasamori, Yusuke Himeoka, Chikara Furusawa: Towards the Universal Theory Behind Species-Specific Difference in Cellular Dedifferentiation Potential, 1st India-Japan Workshop on Physical Aspects of Living Systems, 2025 年 2 月
- [39] Atsuki Hishida, Yusuke Himeoka, Chikara Furusawa: Analysis of cellular response to low temperature stress using metabolic kinetics model, 1st India-Japan Workshop on Physical Aspects of Living Systems, 2025 年 2 月
- 招待講演
- [40] Shunnosuke Ban, Yusuke Himeoka, Tomoaki Matsuura, Yoshihiro Shimizu, Chikara Furusawa: Updating parameters of in silico PURE system model (ePURE) based on experimental observations, Korea-Japan Joint Workshop of Bottom-up Synthetic Biology, 2024 年 9 月
- [41] Yusuke Himeoka: Stability and death of in silico Escherichia coli metabolism, The workshop on Goal-Directed Behaviours, 2024 年 10 月
- [42] Chikara Furusawa: Toward the Prediction and Control of Microbial Evolution: Analysis of High-throughput Experimental Evolution, Gordon Research Conference, Stochastic Physics in Biology, 2025 年 1 月
- [43] Naoki Konno: Prediction and pattern detection of antimicrobial resistance dissemination by Evodictor, 1st India-Japan Workshop on Physical Aspects of Living Systems, 2025 年 2 月

- [44] Chikara Furusawa: Toward the Prediction and Control of Microbial Evolution: Analysis of High-throughput Experimental Evolution, 1st India-Japan Workshop on Physical Aspects of Living Systems, 2025 年 2 月
- [45] Jumpei F. Yamagishi: Microeconomics of Metabolism, 1st India-Japan Workshop on Physical Aspects of Living Systems, 2025 年 2 月
- [46] Yusuke Himeoka: Theoretical basis for cell deaths, Computational & Physical Understanding of Biological Information Processing, 2025 年 3 月
- [47] Yusuke Himeoka: Stability and death of in silico metabolism, Computational & Physical Understanding of Biological Information Processing, 2025 年 3 月
- (国内会議)
- 一般講演
- [48] 後藤琉, 小谷葉月, 吹谷智, 古澤力, 前田智也: ST 合剤を用いた大腸菌の二剤併用薬剤耐性進化実験, 日本農芸化学会北海道支部第一回学術講演会, 2024 年 7 月
- [49] Saburo Tsuru, Chikara Furusawa: Promoters constrain evolutionary diversification in expression levels of essential genes in *Escherichia coli*, 第 26 回日本進化学会神奈川大会, 2024 年 8 月
- [50] Naoki Konno, Keita Miyake, Satoshi Nishino, Kimihiro Omae, Haruaki Yanagisawa, Saburo Tsuru, Chikara Furusawa, Masahide Kikkawa, Wataru Iwasaki: Unpredictable diversification of enzyme complex structures brought by convergent gene fusions, 第 26 回日本進化学会神奈川大会, 2024 年 8 月
- [51] 中堀祥悟, 小谷葉月, 吹谷智, 古澤力, Michael Bott, 前田智也: *Corynebacterium glutamicum* における NADH 酸化系変異株の適応的実験室進化, 第 76 回日本生物工学会大会, 2024 年 9 月
- [52] 山上晃汰郎, 小谷葉月, 吹谷智, 古澤力, 前田智也, 第 76 回日本生物工学会大会, 2024 年 9 月
- [53] 菱田温規, 姫岡優介, 古澤力: 代謝動力学モデルを用いた細胞の低温ストレス応答解析, 日本物理学会 第 79 回年次大会, 2024 年 9 月
- [54] 伊與田裕大, 古澤力, 姫岡優介: 人工的な代謝ネットワークにおける Bow-tie 構造の形成機序, 日本物理学会 第 79 回年次大会, 2024 年 9 月
- [55] 新美倫太郎, 古澤力, 姫岡優介: 変動環境下におけるスペシャリスト/ジェネラリスト戦略の集団動態, 日本物理学会 第 79 回年次大会, 2024 年 9 月
- [56] 姫岡優介, 堀口修平, 小林徹也: 「細胞死」の理論, 日本物理学会 第 79 回年次大会, 2024 年 9 月
- [57] 佐藤匠哉, 古澤力: ノイズを用いた細胞状態適応の効率の進化, 日本物理学会 第 79 回年次大会, 2024 年 9 月
- [58] 池田雄太郎, 姫岡優介, 古澤力: 遺伝子数が増える発現制御ネットワークにおける進化速度, 日本物理学会 第 79 回年次大会, 2024 年 9 月
- [59] 芝井厚, 佐藤駿平, 小谷葉月, 横井直美, 古澤力: 微生物進化実験を用いた進化軌跡の制御手法の開発, 日本物理学会 第 79 回年次大会, 2024 年 9 月
- [60] 今野直輝, 三宅敬太, 西野聡, 大前公保, 柳澤春明, 津留三良, 古澤力, 吉川雅英, 岩崎渉: 情報×代謝×構造生物学で解き明かすタンパク質立体構造の収斂進化, 生命情報科学若手の会第 16 回年会, 2024 年 9 月
- [61] 後藤琉, 小谷葉月, 吹谷智, 古澤力, 前田智也: ST 合剤を用いた大腸菌の二剤併用薬剤耐性進化実験, 第 2 回北海道バイオ”Mix-up”, 2024 年 9 月
- [62] 池田雄太郎, 姫岡優介, 古澤力: 遺伝子数が増える発現制御ネットワークにおける進化, 研究会「理論と実験」, 2024 年 10 月
- [63] 汪亜運, 金井雄樹, 古賀隆一, 津留三良, 古澤力, 深津武馬: IS 増幅進化実験による大腸菌の共生細菌化とその進化過程の実証, 日本微生物生態学会第 37 回大会, 2024 年 10 月
- [64] 小野大樹, 津留三良, 古澤力: 炭素源の多様性が細菌による種間の協力へ及ぼす影響, 日本微生物生態学会第 37 回大会, 2024 年 10 月
- [65] 伊與田裕大, 古澤力, 姫岡優介: 化学反応データベースを用いた生命が持ちうる代謝ネットワークの探索, 「細胞を創る」研究会 17.0, 2024 年 11 月
- [66] 金井雄樹, 芝井厚, 横井直美, 津留三良, 古澤力: Accelerated Laboratory Evolution of the Bacterial Genome Structure by Transposon Activation, 第 47 回日本分子生物学会年会, 2024 年 11 月
- [67] 菱田温規, 姫岡優介, 古澤力: 代謝動力学モデルを用いた細胞の低温ストレス応答解析, 定量生物学の会九州キャラバン, 2025 年 1 月
- [68] 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欠乏への潜在的な適応能力の解明, 日本農芸化学会 2025 年度大会, 2025 年 3 月
- [69] 角広陸, 芝井厚, 古澤力, 吹谷智, 前田智也: 共培養実験による 2 種環境細菌間の競合ダイナミクスの解析, 日本農芸化学会 2025 年度大会, 2025 年 3 月
- [70] Kansuke Sasamori, Yusuke Himeoka, Chikara Furusawa: Towards the Universal Theory Behind Species-Specific Difference in Cellular Dedifferentiation Potential, 第 1 回 Evo-Devo 若手研究会, 2025 年 3 月
- [71] Yuki Kanai, Norikazu Ichihashi, Atsushi Shibai, Naomi Yokoi, Saburo Tsuru, Chikara Furusawa: Laboratory evolution of early symbiont and pathogen evolution by transposon activation, 第 2 回 AMED SCARDA「ワクチン開発のための世界トップレベル研究開発拠点の形成事業」合同シンポジウム, 2025 年 3 月
- [72] 今野直輝, 津留三良, 岩崎渉, 古澤力: 進化予測モデル Evodictor による薬剤耐性の伝播予測, 第 19 回日本ゲノム微生物学会年会, 2025 年 3 月

- [73] 藤吉真生, 鈴木誉保, 岩崎渉, 古澤力, 松井求: 細菌の 16S rRNA 遺伝子配列から形質を予測するインターフェース Bac2Feature, 第 19 回日本ゲノム微生物学会年会, 2025 年 3 月

招待講演

- [74] 古澤力: 薬剤耐性進化の予測と制御へ向けて: 大規模進化実験によるアプローチ, シンポジウム「生物物理の新展開」, 2024 年 4 月
- [75] 姫岡優介: 大腸菌代謝数理モデルの生死境界, 第一回微生物代謝研究会, 2024 年 5 月
- [76] 姫岡優介: 酵素量による細胞状態制御と細胞死, 制御理論と生物学の境界, 2024 年 6 月
- [77] 姫岡優介: 酵素量による細胞状態制御と細胞死, 日本生物物理学会サブグループ 人工細胞モデル&分子ロボティクス研究会, 2024 年 7 月
- [78] 今野直輝: 「予測検証型」の進化生物学を目指して - 系統樹に基づくアプローチ, 生命科学を支える分子系統学 2024, 2024 年 7 月
- [79] 姫岡優介: 大腸菌代謝動力学モデルの安定性と死, 2024 年度数理生物学会年会 シンポジウム『多階層な細胞システムの変容の理解』, 2024 年 9 月
- [80] 姫岡優介: 微生物細胞代謝ダイナミクスの応答性・制御可能性と細胞死, 第 18 回メタボロームシンポジウム, 2024 年 10 月
- [81] 姫岡優介: 大腸菌代謝動力学モデルの安定性と死, 微生物生態学会シンポジウム, 2024 年 10 月
- [82] 今野直輝: 三宅敬太, 岩崎渉: 集光性色素合成酵素の網羅的探索により光環境適応と分子進化の関係を解く, 日本微生物生態学会第 37 回大会, 2024 年 10 月
- [83] 姫岡優介: Emergence of dormancy and death from kinetic models of E.coli metabolism, 日本分子生物学会 第 47 回年会 シンポジウム, 2024 年 11 月
- [84] 姫岡優介: 代謝動力学モデルを用いた生死境界の定量, 第 7 回 ExCELLS シンポジウム, 2025 年 1 月
- [85] 前田智也, 古澤力: 異種間相互作用が抗生物質耐性進化に及ぼす影響, 日本農芸化学会 2025 年度大会, 2025 年 3 月
- [86] 古澤力: 薬剤耐性進化の予測と制御へ向けて: 大規模進化実験によるアプローチ, 日本薬学会第 145 年会, 2025 年 3 月
- [87] 姫岡優介: 「細胞死」の理論, 第 6 回 TREFOIL 研究会, 2025 年 3 月
- [91] 姫岡優介: 「細胞死」の理論, 第 64 回生物物理若手の会夏の学校 分科会, 2024 年 8 月
- [92] 今野直輝: Toward predictive biology of evolution, Q-BIO Seminar, 2024 年 9 月
- [93] 古澤力: 薬剤耐性進化の予測と制御へ向けて: 大規模進化実験によるアプローチ, 日本放線菌学会第 74 回学術講演会講演, 2024 年 10 月
- [94] 今野直輝: 微生物の進化予測を目指して - 乳酸菌に見る収斂進化の法則性 -, 日本乳酸菌学会 2024 年度秋期セミナー, 2024 年 11 月
- [95] Naoki Konno: Serendipity illuminating the repeatability of 3D protein structure evolution, ELSI (地球生命研究所) セミナー, 2024 年 11 月
- [96] 佐藤駿平: Automated laboratory evolution system for extending yeast's lifespan, 理化学研究所 異分野交流の夕べ, 2024 年 11 月
- [97] 姫岡優介: A theoretical basis for cell deaths, Kyoto University Statistical Physics - Dynamics Group Seminar, 2024 年 12 月
- [98] 今野直輝: 未来予測/検証型の進化生物学を目指して, 第 13 回 バイオインフォマティクス分野講演会, 2024 年 12 月
- [99] 今野直輝: 予測・検証型の進化生物学を目指して, 理化学研究所よんもくセミナー, 2025 年 1 月
- [100] 古澤力: 共生進化の理解に向けた定量的・構成的アプローチ, 公開シンポジウム「共生を進化させ 創り出し 理解する」, 2025 年 2 月
- [101] 姫岡優介: 「細胞死」の理論, 駒場物性セミナー, 2025 年 1 月
- [102] 今野直輝: Toward predictive biology of evolution, 葉山セミナー, 統合進化科学研究センター (RCIES), 2025 年 3 月

(セミナー)

- [88] 今野直輝: AI で生命進化を予測する, 進化学若手の会 セミナーシリーズ, 2024 年 5 月
- [89] 芝井厚: 自動培養装置と機械学習による細胞状態のフィードバック制御系の開発, ACT-X 技術交流会, 2024 年 7 月
- [90] 岩間亮, 芝井厚: 麹菌におけるハイスループット形質転換系の構築, 野田産研コンソーシアムキックオフミーティング, 2024 年 7 月

7.4 川口研究室

川口研究室では、多様な生命現象や物理現象を物理学的な視点から解明することを目指している。現在は細胞内現象から細胞集団、生物進化、AI の創発現象など広範囲の研究を、理論、数値計算、データ解析、実験との協力を通じて推進している。

本年度の主な研究テーマは以下である。

7.4.1 生物物理学・形態進化

四肢動物の脊椎骨数のパターンとその進化

脊椎動物の背骨の数（脊椎構成）は、進化の重要な指標である。この形成には Hox 遺伝子群が関与すると考えられるが、詳細は未解明である。388 種の四肢動物のデータを解析し、胸椎・腰椎数の一定性など既知のパターンに加え、頸椎と仙椎など離れた部位間の相関や鳥類特有の前後部位のバランス関係など、新たなパターンを発見した。また、脊椎数と Hox 遺伝子の構造との関連性も示した [6]。

細胞内の分子集合体を予測する理論

細胞内ではタンパク質や RNA が集まり、液滴状の構造（膜のないオルガネラ）を形成する（液-液相分離）。この形成を引き起こすタンパク質配列、特に天然変性領域 (Intrinsically disordered region, IDR) の相互作用をシミュレーションに基づいて予測する理論モデルを構築した。さらに、異なる IDR 配列間での混合や分離を予測する指標を提案し、細胞内で共存可能な液滴の種類には上限があることも示した [15]。

クロマチン構造とヒストン修飾

細胞核内のクロマチン構造は、ヒストン修飾（特にアセチル化）により制御されるが、詳細な仕組みは未だ未解明である。我々は人工クロマチンを作成する実験により、アセチル化が構造の揺らぎを増やし、クロマチンをよりオープンな状態にすることを明らかにした。また、この修飾パターンのみによって、細胞内で見られる構造パターンに類似した構造が再現可能であることを示した [11]。

細菌細胞分裂における膜相分離とタンパク質動態

細菌の細胞膜には特定の脂質領域（膜ドメイン）があり、分裂時にタンパク質が集まる。人工細胞膜 (GUV) を用いて膜の相分離状態を再現し、タンパク質が特定の膜ドメインを選択しパターン形成すること、さらにタンパク質の集合が膜構造を再編成するという双方向の相互作用を明らかにした [5, ?]。

7.4.2 物理学に着想を得た AI・機械学習

ニューラルネットワークにおける創発現象のパージョレーションモデル

大規模ニューラルネットワークでは、モデル規模が一定を超えると新たな能力が突然現れる（創発現象）。我々は物理の相転移との類似に着目し、人工言語を学習させる実験から、文法ルールの習得と課題性能の急激な向上が強く関連することを示した。さらに、この現象を物理学のパージョレーションモデルで理論的に説明し、学習データ量のスケール則を予測できることを実証した [12]。

7.4.3 非平衡物理と統計物理学

ブラウン運動における動的相転移の普遍性

ブラウン運動という基本的な確率過程において、「動的相転移」という非平衡系特有の現象が普遍的に存在することを初めて示した。例えば、空間次元が

4 を超えると粒子が局在・非局在の相に一次相転移を起こすことや、一次元系でも観測量を工夫すれば二次の動的相転移が生じることを理論的に証明した。これらの結果は、非平衡統計力学や AI の拡散モデルの理解に新たな視点を与える [4, 13, 1, 2]。

<受賞>

- [1] 学修奨励賞, 東京大学理学部, 2025-03.
- [2] ポスター賞, RIKEN BDR Symposium 2025, 2025-03.
- [3] MPIB Junior Scientists' Publication Award 2024, 2024-07.

<報文>

(原著論文)

- [4] T. Kanazawa, K. Kawaguchi, and K. Adachi, *Physical Review Research* 7, 013124 (2025).
- [5] N. Kanwa, S. Kohyama, Leonard Fröhlich, A. Desai, and P. Schuille, *Angewandte Chemie* (2024).
- [6] R. T. Cerbus, I. Hiratani, and K. Kawaguchi, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 121, e2411421121 (2024).
- [7] T. Kanazawa and A. Furukawa, *SOFT MATTER* 20 (2024).
- [8] K. Adachi, and K. Kawaguchi, "Predicting Heteropolymer Interactions: Demixing and Hypermixing of Disordered Protein Sequences", *Physical Review X* 14, 031011, (2024).
- [9] K. Takasan, K. Adachi, and K. Kawaguchi, *Physical Review Research* 6, 023096 (2024).

(会議抄録)

(国内雑誌)

(学位論文)

(著書)

(その他報文)

- [10] T. Kanazawa and K. Ishimoto, "Locomotion on a lubricating fluid with spatial viscosity variations", *arXiv:2412.15656*, (2024).
- [11] Y. T. Fukai, T. Kujirai, M. Wakamori, S. Kanamura, L. Yamauchi, S. Zeraati, C. Tanegashima, M. Kadota, H. Kurumizaka, T. Umehara, and K. Kawaguchi, "Gene-scale in vitro reconstitution reveals histone acetylation directly controls chromatin architecture", *bioRxiv:2024.11.08.622658*, (2024).
- [12] E. S. Lubana, K. Kawaguchi, R. P. Dick, and H. Tanaka, "A Percolation Model of Emergence: Analyzing Transformers Trained on a Formal Language", *arXiv:2408.12578*, (2024).

- [13] T. Kanazawa, K. Kawaguchi, and K. Adachi, “Dynamical phase transitions in single particle Brownian motion without drift”, arXiv:2407.18282, (2024).
- [14] K. Sone, K. Yokomizo, K. Kawaguchi, and Y. Ashida, “Hermitian and non-Hermitian topology in active matter”, arXiv:2407.16143, (2024).
- [15] K. Adachi and K. Kawaguchi, “Predicting Heteropolymer Interactions: Demixing and Hypermixing of Disordered Protein Sequences”, arXiv:2401.07826, (2024).
- [25] K. Kawaguchi, “Tissue homeostasis: theory and experiment”, PEBBLE BioFusion Camp 2024, 2024-08-09.
- [26] K. Kawaguchi, “Phase transitions in multiple scales of biology: from intracellular condensates to language models”, Conference of Condensed Matter Physics 2024, 2024-08-06.
- [27] 川口 喬吾, 「細胞内凝集体の共存原理: ヘテロポリマー間相互作用の理論予測から」、医生物学研究所「物理学・情報科学と生物学」研究会、2024年7月31日.
- [28] K. Kawaguchi, “Topology and coordination in multicellular tissues”, 2024 international symposium on multicellular mechanobiology, 2024-06-17.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [16] S. Lee, D. Fabregas, K. Kawaguchi “Prediction of cell fates during embryogenesis based on geometry and topology”, RIKEN BDR Symposium 2025, 2025-03-03. (Poster)
- [17] T. Kanazawa, K. Kawaguchi, K. Adachi, “Phase transition in colocalization of multiple Brownian particles”, RIKEN BDR Symposium 2025, 2025-03-03. (Poster)
- [18] M. Mori, S. Nakayama, K. Adachi, M. Morimoto, and K. Kawaguchi, “A model for periodic patterning of tracheal cartilage rings”, RIKEN BDR Symposium 2025, 2025-03-03. (Poster)
- [19] S. Inoue and K. Kawaguchi, “Mechanism of nuclear condensate miscibility”, RIKEN BDR Symposium 2025, 2025-03-03. (Poster)
- [20] S. Inoue, Y. T. Huang, Tzu-Ling Liu, and Z. C. Chao, “Classification of EEG signals for creativity performance”, The 13th Australasian Cognitive Neuroscience Society Conference, 2024-11. (Poster)

招待講演

- [21] S. Kohyama, “Building up higher-order protein functions by design”, 2024 BrainLink X-Lab Day Talk Concert, 2024-12-11.

(国内会議)

一般講演

- [22] K. Kawaguchi, “Predicting heteropolymer interactions: theory and numerical experiments”, 日本物理学会 第79回年次大会, 2024-09-17.
- [23] 川口 喬吾, 「生命の設計原理の探索：物理学・進化系統樹からのアプローチ」、第6回シンポジウム 生物物理の新展開 (東大本郷キャンパス)、2024年4月26日.

招待講演

- [24] K. Kawaguchi, “Rule inference from biological data”, 複雑生命系秩序懇談会, 2025-01-20.

(セミナー)

8 技術部門

(下澤、寺山、簀口、佐伯)

技術部門では、実験装置試作室、安全衛生、IT 関連、学生実験などの業務を行っている。技術部門の担当教員 (中村教授、藤堂教授、安東教授、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)

8.1.1 利用状況

2024 年 1 月から 2024 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：328 枚、総製作個数 827 個
- 加工依頼依頼元別の加工時間数の割合：物理 50.9%、化学：18.4%、素粒子センター：17.6%、地球惑星：6.4%、地殻化学：4.6%、生物：1.4%、主な依頼者（物理：日下研、中辻研、安東研、素粒子センター、化学：岩崎研、合田研）

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、3D-CAD データのメール送付とマシンニングセンタによる加工を推進している。

8.2 技術室 (寺山、簀口、佐伯)

8.2.1 専攻 Web システムの改修 (寺山、簀口)

物理学専攻の論文審査会の運営補助のシステム（以下論文システム）のメンテナンスを行い、操作のマニュアルと一部の内部動作に関するドキュメントを作成した。本業務に関する技術的な内容に関して、学内外で発表を行った [5][6]。また同じく専攻の大学院入試の運営補助のシステムの稼働に立ち会い、今後のメンテナンスや更改に向けた検討を行った。

8.2.2 安全衛生 (寺山)

専攻の安全衛生の担当者として、学部 4 年生に向けた安全衛生教育を行った。また、産業医巡視の同行と指摘事項対応の取りまとめを行い、研究・学習環境の改善に努めた。

8.2.3 寒剤管理 (寺山)

理学部寒剤管理委員会の委員として、理学部 4 号館脇の CE タンクの保守管理を行った。特に昨年度はタンク設備・建屋に問題が発覚して液体窒素の供給サービスを中止していた時期があり、これに関する状況確認と専攻内のアナウンスを行った。

8.2.4 IT 関連 (簀口)

物理学専攻のシステム、サーバについて、以下の開発、管理を行った。

- ウェブサイト 3 種の更新、専攻メールアカウントの管理、メーリングリスト約 30 種の更新、海外出張登録システムの管理を行った。
- 並び順や言語ごとに 26 ページ分に分かれていた教員一覧ページを一括編集できるようにし、これまで不整合があった情報の整合性がとれるようにした。
- 共用計算機室の室温監視システムをセキュリティアップデートに合わせ再構築した。さらに、Web ページで随時室温を確認できるようにした。
- 専攻技術室 IT ページを wiki 仕様に変更し、掲載情報を最新のものに更新した。
- 論文システムおよび出張システムのサーバー移行を目指して両システムを AWS へ複製・OS やソフトウェアのアップデートを行った。

理学系研究科の情報システムチームの一員として、以下の業務を行った。

- 理学系の全学生および教職員の理学系研究科アカウントおよび Webex アカウントのユーザ登録管理、専攻内および一部外部の理学系研究科アカウントの分類管理を行った。
- 理学系研究科教員一覧、理学系ラーニングサイトの管理を行った。また、事務業務端末利用者の管理を一部期間行った。
- コンピュータ活用講習会の受講状況の定期的な確認及び未受講者への個別のリマインドを行い、事務業務端末利用者全員の受講を確認した。
- 専攻内のネットワークインフラの設定管理を行った。

- 主に物理学専攻や附属施設に所属する教職員、学生に対し、理学系のサービス、端末等に関するヘルプデスク業務を行った。

8.2.5 学生実験 (佐伯)

学部3年生向けの物理学実験I、IIのグループ編成、スケジュールリング、物理学実験説明会、解説書の編集と発注など学生実験全般の運営を行った。実験担当教職員の実験担当者会議(2回)はハイブリッドで行った。

- 物理学実験II(Aセメスタ)「生物物理学」の技術指導

8.2.6 技術交流 (佐伯、寺山、渡辺 (生物科学専攻))

理学系研究科技術部の技術交流として、ラズベリーパイPicoを使った技術研修を行った。9月4日と2月5日の2日間、参加者8名で実習を実施した[2, 3, 4]。

8.2.7 各種委員会

- 理学系環境安全管理室 室員(寺山)
- 理学系寒剤管理委員会(寺山)
- 第33回東京大学大学院理学系研究科・理学部技術部シンポジウムWG、実行委員(寺山)

<報文>

- [1] 技術部報告集2024(東京大学大学院理学系研究科・理学部技術部、2025年2月)。

<学術講演>

(国内会議)

- [2] 佐伯喜美子、渡辺綾子、寺山智春 ラズベリーパイPicoを使った技術研修(III) 第36回生物学技術研究会(岡崎コンファレンスセンター、2025年2月)。
- [3] 渡辺綾子、佐伯喜美子、寺山智春 ラズベリーパイPico 集合型技術交流の取り組み、第33回東京大学大学院理学系研究科・理学部技術部シンポジウム(東京大学、2025年3月)。
- [4] 佐伯喜美子、渡辺綾子、寺山智春 ラズベリーパイPico 集合型技術交流の作品紹介、第33回東京大学大学院理学系研究科・理学部技術部シンポジウム(東京大学、2025年3月)。
- [5] 寺山智春、業務で使う現代的なマークアップ言語、第33回東京大学大学院理学系研究科・理学部技術部シンポジウム(東京大学、2025年3月)
- [6] 寺山智春、博士・修士論文審査会のスケジュールリングツールの開発、総合技術研究会2025筑波大学(筑波大学2025年3月)

II

Summary of group activities in 2024

1 Fukushima Group

Research Subjects: QCD phase diagram, Confinement, Lattice simulation, Neutron star, Chiral anomaly

Member: Kenji Fukushima, Arata Yamamoto, and Syo Kamata

In Theoretical Hadron Physics group, many-body quantum problems of quarks and gluons are studied theoretically on the basis of the quantum chromodynamics (QCD). The subjects studied include the 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. Z_3 gauge theory as an effective model of QCD.
2. Quantum computing in the Z_2 gauge theory.
3. Numerical analysis of the Higgs-confinement transition with non-local operators.
4. Inhomogeneous state with chiral symmetry breaking in the imaginary-rotating system.
5. Signature for the inhomogeneous state in the relativistic heavy-ion collision via the HBT interferometry.
6. Research of nuclear matter properties using the QCD-based functional renormalization group.
7. Analysis of the equation of state and the neutron star mass-radius distributions in the machine-learning method.
8. Path-integral formulation and the WKB approximation for the diffusion generative model.
9. Gravitational wave analysis with the equation of state with crossover to quark matter.
10. Inversion of polarization of rotating matter under strong magnetic fields.
11. Unified description of the sound speed and the trace anomaly in various high-density 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. Cooper quartet correlations near the surface of $N = Z$ nuclei
2. Response of asymmetric nuclear matter with finite nucleon numbers
3. Possibly heaviest $N = Z$ doubly-magic nucleus

4. Quantum computation for two-valence neutron nuclei
5. Non-relativistic trace anomaly in dense three-color fermionic matter
6. P -wave Bose polaron picture of neutrons in alpha matter
7. Free-field approaches to boundary RCFT₂
8. Probing supersymmetry-like transport of Goldstino in an ultracold Bose-Fermi mixture
9. Fluctuations and Fano-Feshbach resonance in a two-band superconductor
10. Non-Hermitian P -wave Fermi superfluid with the inelastic three-body loss
11. Thermomagnetic spin transport through the magnetic junctions

3 High Energy Physics Theory Group

Research Subjects: Particle Physics and Cosmology

Member: Takeo Moroi, Koichi Hamaguchi, Yutaka Matsuo, Masahito Yamazaki

We are working on a wide range of topics in particle physics and cosmology, such as physics beyond the Standard Model, dark matter, baryogenesis, inflation, phenomenology of supersymmetric models, astroparticle physics, neutrinos, axion, string theory, supersymmetric field theories, conformal field theories, generalized symmetries, and so on. Specific subjects studied in this academic year are summarized below:

1. Phenomenology
 - 1.1. ALP dark matter [1]
 - 1.2. Neutron star temperature observation and new physics search [2]
 - 1.3. Inflation [24]
 - 1.4. Collider physics [13]
 - 1.5. Dark matter direct detection [21, 22]
 - 1.6. Neutrino physics [26, 27, 15, 16]
 - 1.7. Nucleon decay in grand unified theories [17, 18]
 - 1.8. Leptogenesis [23, 29]
 - 1.9. Phase transition [25]
 - 1.10. Supernova [14]
 - 1.11. Quantum anomaly detection [3]
 - 1.12. Quantum parton shower [9]
2. Superstring theory and formal aspects of quantum field theories
 - 2.1. Invariants of Calabi-Yau manifolds and the BPS/CFT correspondence [19, 20]
 - 2.2. Generalized symmetries [31, 32, 33, 34]
 - 2.3. Classification of two-dimensional CFTs [35]
 - 2.4. Fractonic quantum field theories [36]
 - 2.5. Solvable models with non-Abelian holonomy and their symmetries [28]
 - 2.6. Lorentz-invariant spinor wave packet [30]
 - 2.7. θ angle and topology in Yang-Mills theories [6, 4]
 - 2.8. Non-invertible symmetries [5]
 - 2.9. BPS states counting [7]

- 2.10. Integrability of large-charge sectors [10]
- 2.11. Phenomenology of quantum gravity [11, 8]
- 2.12. Phenomenological implications of positivity bounds in gravitational scattering amplitudes [12]

References

- [1] D. Y. Cheong, K. Hamaguchi, Y. Kanazawa, S. M. Lee, N. Nagata and S. C. Park, “Wormhole-induced ALP dark matter,” *JHEP* **02**, 183 (2025) [arXiv:2411.07713 [hep-ph]].
- [2] N. Nagata, K. Hamaguchi, and M. Fujiwara, “Exploring Physics Beyond the Standard Model via Temperature Observations of Neutron Stars,” *BUTSURI*, 79, No. 5, 242 (2024).
- [3] A. Hammad, M. M. Nojiri and M. Yamazaki, *JHEP* **02**, 081 (2025) [arXiv:2411.09927 [hep-ph]].
- [4] N. Yamada, M. Yamazaki and R. Kitano, *JHEP* **02**, 211 (2025) [arXiv:2411.00375 [hep-lat]].
- [5] W. Cao, L. Li and M. Yamazaki, *SciPost Phys.* **17**, no.4, 104 (2024) [arXiv:2406.05454 [cond-mat.str-el]].
- [6] N. Yamada, M. Yamazaki and R. Kitano, *JHEP* **07**, 198 (2024) [arXiv:2403.10767 [hep-lat]].
- [7] J. Bao, R. K. Seong and M. Yamazaki, *JHEP* **03**, 140 (2024) [arXiv:2401.02792 [hep-th]].
- [8] S. F. King, R. Roshan, X. Wang, G. White and M. Yamazaki, *JCAP* **05**, 071 (2024) [arXiv:2311.12487 [hep-ph]].
- [9] C. W. Bauer, S. Chigusa and M. Yamazaki, *Phys. Rev. A* **109**, no.3, 032432 (2024) [arXiv:2310.19881 [hep-ph]].
- [10] M. Dodelson, S. Hellerman, M. Watanabe and M. Yamazaki, *JHEP* **08**, 166 (2024) [arXiv:2310.01823 [hep-th]].
- [11] S. F. King, R. Roshan, X. Wang, G. White and M. Yamazaki, *Phys. Rev. D* **109**, no.2, 024057 (2024) [arXiv:2308.03724 [hep-ph]].
- [12] K. Aoki, T. Noumi, R. Saito, S. Sato, S. Shirai, J. Tokuda and M. Yamazaki, *Phys. Rev. D* **110**, no.1, 016002 (2024) [arXiv:2305.10058 [hep-ph]].
- [13] H. Fukuda, T. Moroi, A. Niki and S. F. Wei, *JHEP* **02** (2024), 214 doi:10.1007/JHEP02(2024)214 [arXiv:2310.07162 [hep-ph]].
- [14] K. Akita, S. H. Im, M. Masud and S. Yun, *JHEP* **07** (2024), 057 [arXiv:2312.13627 [hep-ph]].
- [15] K. Akita, G. Baur, M. Ovchinnikov, T. Schwetz and V. Syvolap, *Phys. Rev. Lett.* **134** (2025) no.12, 121001 [arXiv:2411.00892 [hep-ph]].
- [16] K. Akita, G. Baur, M. Ovchinnikov, T. Schwetz and V. Syvolap, *Phys. Rev. D* **111** (2025) no.6, 063542 [arXiv:2411.00931 [hep-ph]].
- [17] K. Hamaguchi, S. Hor, N. Nagata and H. Takahashi, *Universe* **10** (2024) 9, 379 [arXiv:2407.11892 [hep-ph]].
- [18] K. Hamaguchi, S. Hor, N. Nagata and H. Takahashi, *JHEP* **01**, 175 (2025) [arXiv:2409.08747 [hep-ph]].
- [19] T. Kimura and G. Noshita, [arXiv:2404.17061 [hep-th]].
- [20] T. Kimura and G. Noshita, *JHEP* **03**, 050 (2025) doi:10.1007/JHEP03(2025)050 [arXiv:2411.01987 [hep-th]].
- [21] S. Chen, H. Fukuda, T. Inada, T. Moroi, T. Nitta, T. Sichanugrist, *Phys.Rev.Lett.* **133** (2024) 2, 021801 [arXiv:2311.10413 [hep-ph]].
- [22] S. Chen, H. Fukuda, T. Inada, T. Moroi, T. Nitta, T. Sichanugrist, *Phys.Rev.D* **110** (2024) 11, 115021 [arXiv:2407.19755 [hep-ph]].
- [23] H. Fukuda, K. Kamada, T. Sichanugrist, *JHEP* **02** (2025) 192 [arXiv:2410.04701 [hep-ph]].
- [24] R. Jinno, K. Kohri, T. Moroi, T. Takahashi and M. Hazumi, “Testing multi-field inflation with LiteBIRD,” *JCAP* **03** (2024), 011 [arXiv:2310.08158 [astro-ph.CO]].
- [25] Z. Fan and T. Moroi, “Metastability of quantum fields in a thermal bath,” *Phys. Rev. D* **110** (2024) no.5, 056045 [arXiv:2406.11153 [hep-ph]].
- [26] S. F. Ge, C. F. Kong and P. Pasquini, “Neutrino CP measurement in the presence of RG running with mismatched momentum transfers,” *Phys. Rev. D* **110**, no.1, 1 (2024) doi:10.1103/PhysRevD.110.015003 [arXiv:2310.04077 [hep-ph]].
- [27] S. F. Ge, P. Pasquini and L. Tan, “Neutrino mass measurement with cosmic gravitational focusing,” *JCAP* **05**, 108 (2024) doi:10.1088/1475-7516/2024/05/108 [arXiv:2312.16972 [hep-ph]].

- [28] J.-E. Bourguine and Y. Matsuo, "Calogero model for the non-Abelian quantum Hall effect", Phys. Rev. B **109**, 2024, 15.
- [29] J. Wada, "Majoron-driven leptogenesis in gauged $U(1)_{L\mu-L\tau}$ model," Phys. Rev. D **110** (2024) no.10, 103510 doi:10.1103/PhysRevD.110.103510 [arXiv:2404.10283 [hep-ph]].
- [30] K. y. Oda and J. Wada, "Lorentz-covariant spinor wave packet," Phys. Rev. D **110** (2024) no.7, 076001 doi:10.1103/PhysRevD.110.076001 [arXiv:2307.05932 [hep-th]].
- [31] C. Cordova and K. Ohmori, "Quantum duality in electromagnetism and the fine structure constant," Phys. Rev. D **109** (2024) no.10, 105019 doi:10.1103/PhysRevD.109.105019 [arXiv:2307.12927 [hep-th]].
- [32] K. Inamura and K. Ohmori, "Fusion surface models: 2+1d lattice models from fusion 2-categories," SciPost Phys. **16** (2024), 143 doi:10.21468/SciPostPhys.16.6.143 [arXiv:2305.05774 [cond-mat.str-el]].
- [33] C. Cordova, S. Hong, S. Koren and K. Ohmori, "Neutrino Masses from Generalized Symmetry Breaking," Phys. Rev. X **14** (2024) no.3, 031033 doi:10.1103/PhysRevX.14.031033 [arXiv:2211.07639 [hep-ph]].
- [34] C. Copetti, M. Del Zotto, K. Ohmori and Y. Wang, "Higher Structure of Chiral Symmetry," Commun. Math. Phys. **406** (2025) no.4, 73 doi:10.1007/s00220-024-05227-9 [arXiv:2305.18282 [hep-th]].
- [35] K. Kawabata, "Fermionic and parafermionic CFTs with $\widehat{su}(2)$ and $\widehat{su}(3)$ symmetry," JHEP **02** (2025) 070 [arXiv:2411.01926 [hep-th]].
- [36] S. Shimamura, "Anomaly of subsystem symmetries in exotic and foliated BF theories," JHEP **06**, 002 (2024) doi:10.1007/JHEP06(2024)002 [arXiv:2404.10601 [cond-mat.str-el]].

4 Nakamura Group

Research Subjects: Spectroscopic study of hypernuclei and related hadron/nuclear physics

Member: Satoshi N. Nakamura and Sho Nagao

The Nuclear EXperimental physics group (NEX) consists of two research groups: the Nakamura Group, led by Professor Nakamura and Assistant Professor Nagao with four master's course students, and the Suzuki Group, newly established by Associate Professor Suzuki, who joined in December 2024. The NEX group is concurrently affiliated with the Quark Nuclear Science Institute (QNSI), established in July 2024, and is leading international collaborative research through the development of the International Quantum Physics Network. This section summarizes the research activities of the Nakamura Group.

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 ($nn\Lambda$), 3) charge symmetry breaking of Λ 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, $nn\Lambda$
 - Electro-production of hyperons
 - Electro-production of η' mesons
 - High-precision spectroscopy of Λ hypernuclei with the $(e, e'K^+)$ reaction
 - Design of the next generation experiment of decay π^- spectroscopy
- Decay π^- spectroscopy of electro-produced hypernuclei at MAMI
 - Precise measurement of mass of hypertriton
 - High-precision measurement of electron beam energy using synchrotron radiation interference
 - High precision calibration of magnetic spectrometers
- Study of light hypernuclei at RARiS
 - Lifetime measurement of hypernuclei
 - Study of the Λn interaction by the Final State Interaction measurement
- Study of hypernuclei at J-PARC
 - Lifetime measurement of light hypernuclei
 - Spectroscopy of Ξ hypernuclei
 - Research and Development for the spectroscopy of Λ hypernuclei with the (π^+, K^+) reaction
 - Design of the next generation experiment with the (π, K) reaction at HIHR, J-PARC

5 Suzuki Group

Research Subjects: Experimental nuclear physics: exotic nuclei, nuclear matter and nuclear astrophysics

Member: Daisuke Suzuki

Our laboratory specializes in nucleon many-body physics. We are promoting research on nuclei, nuclear matter, and nuclear astrophysics using quantum beams of radioactive isotopes (RI). In particular, focusing on spectroscopic and reaction experiments of asymmetric nuclei with an imbalance of neutrons and protons, we are challenging various problems in modern nuclear physics, from microscopic systems of extremely short-lived nuclei to macroscopic objects such as neutron stars and explosive astrophysical phenomena.

Nuclear physics is a very broad academic field whose main theme is the formation and evolution of hadronic matter in the universe. Nucleon many-body systems, which are our laboratory's area of expertise, i.e., atomic nuclei and nuclear matter, are quantum many-body systems composed of protons and neutrons (collectively called nucleons) that appear in the low-energy limit of quantum chromodynamics (QCD). Although it is a seemingly simple system involving only the ud sector, it is known to be a many-body system where direct calculations based on QCD are extremely difficult. In particular, the nuclear force acting between nucleons and many-body correlations in the medium are very complex, with many mysteries remaining and serving as a source of unexpectedly diverse physical phenomena.

While nucleon many-body physics was historically limited to the study of stable nuclei on Earth, technological innovations in heavy-ion RI beam (beams in which the nuclei of heavy ions are replaced with RI) facilities, which emerged in the 1990s, have made it possible to artificially generate extremely short-lived nuclei and nuclear matter that do not exist on Earth using RI beams accelerated to approximately 10% to 70% of the speed of light, and to conduct quantum scattering experiments. Particularly with the successful operation of the RI Beam Factory (RIBF) of RIKEN Nishina Center, the world's first third-generation facility, a global rush to construct RI beam facilities is currently underway.

We are tackling various problems related to three themes: (1) exotic nuclei, (2) nuclear matter, and (3) nuclear astrophysics, through RI beam experiments using electroweak probes (electromagnetic and weak

forces) and hadron probes (strong force). Furthermore, we are actively participating in the RIBF Upgrade Project as a medium- to long-term project. This project is an innovative attempt to pioneer the intensity frontier of RI beams by applying beam recycling technology based on a storage ring to RI beam generation for the first time.

Our activities in FY2024 include:

- Investigating shape transition, triaxiality, and octupole deformation using in-beam γ -ray spectroscopy.
- Studying mirror symmetry beyond the proton dripline.
- Addressing the spectroscopic factor quenching problem.
- Researching the nuclear equation of state through heavy ion collision ($S\pi$ RIT project) and isoscaler giant monopole resonance measurement.
- Exploring the origin of molybdenum elements in the Universe.
- Developing a 3D γ -ray tracking germanium detector (GT-5 project).
- Organizing the international symposium PCM2025 at the University of Aizu to discuss updates and perspectives on nuclear structure studies.
- Organizing the international workshop ADRIB25 for discussions on the RIBF Upgrade Project.

6 Yokoyama(M)-Nakajima Group

Research Subjects: Experimental Particle Physics and Particle Astrophysics

Member: Masashi Yokoyama, Yasuhiro Nakajima, and Kota Nakagiri

Our group primarily focuses on studying the properties of neutrinos and using them as probes for research. We are leading experiments with the Super-Kamiokande and Hyper-Kamiokande detectors, as well as the J-PARC accelerator.

T2K long-baseline neutrino oscillation experiment

We are currently conducting research on neutrino oscillations through the T2K long-baseline neutrino experiment. This experiment measures intense neutrino and antineutrino beams produced by the J-PARC accelerator complex, which are then detected by the Super-Kamiokande detector located 295 km away. Our primary goal is to identify a new source of CP symmetry violation in neutrino oscillations.

We have been leading the upgrade of the near neutrino detectors to reduce uncertainties in neutrino interaction modeling. This year, we began neutrino beam data taking with the fully instrumented SuperFGD detector. We are leading its operation, calibration, and data analysis, aiming at precise measurements of electron neutrino interactions and neutrino oscillations.

Super-Kamiokande experiment

Super-Kamiokande (SK) is the largest underground detector in the world for studying neutrino physics and nucleon decay. In the summer of 2022, we added 27 tons of $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ to increase the concentration of gadolinium in Super-Kamiokande from 0.011% achieved in 2020 to 0.033%. By increasing the gadolinium concentration, we have improved the detection efficiency of neutrons.

Our group has been leading the search for the diffuse supernova neutrino background (DSNB) using the enhanced neutron detection capability of Super-Kamiokande, aiming for the world's first observation of these neutrinos. We are also developing a new calibration method based on neutron captures on gadolinium. Furthermore, we are preparing a nuclear physics experiment to improve our understanding of neutrino-nucleus interactions and enhance the sensitivity of DSNB searches.

Hyper-Kamiokande

The next-generation water Cherenkov detector, Hyper-Kamiokande, is currently under construction. It will significantly extend the reach of neutrino physics and the search for proton decay beyond what is possible with T2K and Super-Kamiokande. Hyper-Kamiokande will feature a cylindrical tank measuring 68 meters in diameter and 71 meters in depth, containing 260,000 tons of ultrapure water. Our group has been leading the design and construction of the Hyper-Kamiokande detector system, as well as testing the performance of 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 of our focus is the search for neutrinoless double-beta decay with ^{160}Gd , utilizing ultra-high purity Gd technology developed for the SK-Gd project.

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.

- Thermal transport phenomena [1–3]
- Strongly correlated electron systems [4]
- Altermagnet [5]
- Spin-orbit interaction [6,7]
- Orbital magnetic effects [8]
- Theories on organic conductors [9–11]
- Physics of chirality [12–13]

- [1] H. Matsuura, M. Ogata, N. Tujii, and T. Mori: in preparation. “Theory of thermoelectric effect based on antiferromagnetic magnon drag in natural chalcopyrite $\text{Cu}_{1+x}\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$ ”
- [2] J. Endo, H. Matsuura, and M. Ogata: Phys. Rev. B **110**, 205121 (2024). “Phonon drag effect in Nernst and thermal Hall effects: General theory and application to dilute metal $\text{SrTiO}_{3-\delta}$ ”
- [3] H. Matsuura, A. Riss, F. Garmroudi, M. Parzer, and E. Bauer: Phys. Rev. Research **6**, 043071 (2024). “Cooperative Nernst effect of multilayer systems: Parallel circuit model study”
- [4] K. Takahashi, H. Matsuura, H. Maebashi, and M. Ogata: in preparation. “Electrical and thermal magnetotransport and the Wiedemann-Franz law in semimetals with electron-electron scattering”
- [5] K. Takahashi, C. R. W. Steward, M. Ogata, R. M. Fernandes, and J. Schmalian: arXiv:2502.03517 (2025), to appear in Phys. Rev. B. “Elasto-Hall conductivity and the anomalous Hall effect in altermagnets”
- [6] M. Kato and M. Ogata: Phys. Rev. B **111**, 035137 (2025). “Interatomic spin-orbit coupling in atomic orbital-based tight-binding models”
- [7] M. Kato and M. Ogata: in preparation. “Microscopic theory of three-center spin-dependent hopping”
- [8] S. Ozaki, H. Matsuura, I. Tateishi, T. Koretsune, and M. Ogata: arXiv preprint arXiv:2406.07281. “Orbital paramagnetism without density of states enhancement in nodal-line semimetal ZrSiS ”
- [9] K. Kitayama and M. Ogata: Phys. Rev. B **110**, 045127 (2024). “Nonlinear optical response in multiband Dirac-electron system”
- [10] K. Kitayama and M. Ogata: in preparation. “Charge order induced circular photogalvanic effects in α -type organic conductors”
- [11] Y. Suzumura, T. Tsumuraya, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 054704 (2024). “Seebeck coefficient of two-dimensional Dirac electrons in an organic conductor under pressure”

- [12] R. Hirakida, M. Kato, and M. Ogata: Phys. Rev. B **111**, 115150 (2025). “Symmetry requirements for current-induced spin magnetization specific to chiral crystals: Multipole analysis and the hidden spin-glide symmetry”
- [13] K. Ohe, H. Shishido, M. Kato, S. Utsumi, H. Matsuura, and Y. Togawa: Phys. Rev. Lett. **132**, 056302 (2024). “Chirality-induced selectivity of phonon angular momenta in chiral quartz crystals”

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 calculations based on the density functional theory (DFT). We are also developing new methods that go beyond the limitations of classical MD and DFT to study the electronic, structural, and dynamical properties of materials.

This academic year, we improved two methods for crystal structure exploration. One is the method based on the evolutionary algorithm, where we introduced neural network potentials for atomic interactions to accelerate the calculation. We applied the method to several hydrides to find new superconducting materials. The other is the data-assimilated molecular dynamics method (DAMD), which utilizes powder X-ray/neutron diffraction data to accelerate structural exploration by the simulated annealing method. We showed that large-scale DAMD applies to so-called multi-phase materials containing two or more different crystal grains.

We also developed a machine-learning method for molecular dipole moments in liquids and polymers. This method successfully calculated the permittivity of liquid alcohols, propylene glycol, and polypropylene glycol at the THz frequency range, where the electronic dipole moment couples and changes with molecular motion and structural deformation.

Another important development is the Green function method in the framework of the transcorrelated method, which utilizes explicitly correlated wave functions to treat electron correlation. We confirmed that the Green function method improves the ionization energy and the charge density distribution in the ionic Hubbard model.

Besides the topics mentioned above, we applied the superconducting density functional theory to a doped perovskite hydride to find the critical effect of spin fluctuation, applied first-principles path-integral molecular dynamics to H₂O ice under high pressure to clarify the nuclear quantum effects on its elastic property, and developed a hydrodynamic simulation of laser ablation to find 100fs ultra-short laser pulse cause less thermal damage compared to the 10ps short laser pulse.

9 Todo Group

Research Subjects: Development of simulation algorithms for strongly-correlated systems; Novel state and critical phenomena in strongly correlated systems; Quantum computing and quantum algorithms; Machine learning and statistical mechanics; Development of open-source software for next-generation parallel simulations

Member: Syngé Todo, Hidemaro Suwa, Tsuyoshi Okubo, Sayan Mukherjee, Atsushi Iwaki, Tatsuya Sakashita

To understand the state of matter, the many-body Schrödinger equation must be solved to obtain the partition function in statistical mechanics. However, even with the computational power of modern supercomputers, solving this equation completely is difficult. Therefore, a crucial issue in computational physics is reconstructing the original equation in a form that is easy to simulate while preserving the physically important properties, such as symmetry and quantum correlations, inherent in the original equation.

At Todo Laboratory, we have been studying various quantum many-body systems ranging from quantum spin systems to real matter and even quantum computers by making full use of sampling methods such as Monte Carlo methods, representation of quantum fluctuations based on path integrals, singular value decomposition, information compression using tensor networks, statistical machine learning methods, etc. We have also been developing new techniques to simulate quantum many-body systems. We aim to elucidate the unique states, phase transitions, and dynamics of various quantum many-body systems, from quantum spin systems to real materials, and even quantum computers.

We are also developing and releasing open-source software for next-generation large-scale simulations. We are also involved in the “Quantum Software” endowed course and the “Sustainable Quantum AI” program of the JST’s Co-creation Field Formation Support Program. In addition, through the “Quantum Software” endowed chair and the JST Center for Sustainable Quantum AI Research and Development, he is actively engaged in researching and developing quantum algorithms and quantum machine learning methods based on sampling and tensor networks.

- [1] N. Yoshioka, T. Okubo, Y. Suzuki, Y. Koizumi, and W. Mizukami, Hunting for quantum-classical crossover in condensed matter problems, *npj Quantum Information* **10**, 45 (10pp) (2024).
- [2] S. Akiyama, Y. Meurice, R. Sakai, Tensor Renormalization Group for fermions, *J. Phys.: Condens. Matter* **36**, 343002 (31pp) (2024).
- [3] Y. Alexeev *et al.*, Quantum-centric supercomputing for materials science: A perspective on challenges and future directions, *Future Generation Computer Systems* **160**, 666–710 (2024).
- [4] K. M. Nakanishi, T. Satoh, S. Todo, Decompositions of multiple controlled-Z gates on various qubit-coupling graphs, *Phys. Rev. A* **110**, 012604 (7pp) (2024).
- [5] R. West, S. Mukherjee, Stylized Rendering as a Function of Expectation, *ACM Trans. Graph.* **43**, 96 (19pp) (2024).
- [6] T. Mashiko, T. Okubo, Quantum phase transition between spin liquid and spin nematics in spin-1 Kitaev honeycomb model, *Phys. Rev. Research* **6**, 033110 (11pp) (2024).
- [7] S. Akiyama, R. G. Jha, J. Unmuth-Yockey, SU(2) principal chiral model with tensor renormalization group on a cubic lattice, *Phys. Rev. D* **110**, 34519 (2024).
- [8] S. Akiyama, Y. Kuramashi, Tensor renormalization group study of (1 + 1)-dimensional U(1) gauge-Higgs model at $\theta = \pi$ with Lüscher’s admissibility condition, *J. High Energ. Phys.* **09**, 086 (2024).
- [9] A. Iwaki, S. Ozaki, Solvable toy model of negative energetic elasticity, *Phys. Rev. E* **110**, L032102 (6pp) (2024).
- [10] H. Suwa, S. Todo, Control of Probability Flow in Markov Chain Monte Carlo—Nonreversibility and Lifting, *J. Chem. Phys.* **161**, 174107 (10pp) (2024).
- [11] A. Iwaki, Truncation error in series expansions linking microcanonical and canonical ensembles, *J. Phys. Soc. Jpn.* **93**, 125001 (2pp) (2024).
- [12] K. Homma, T. Okubo, N. Kawashima, Nuclear norm regularized loop optimization for tensor network, *Phys. Rev. Research* **6**, 043102 (2024).
- [13] S. Shiratani, S. Todo, Stochastic approximation analysis of dynamical quantum critical phenomena in long-range transverse-field Ising chain, *Phys. Rev. E* **110**, 064106 (14pp) (2024).
- [14] F. Duc, *et al.*, Field-driven spin structure evolution in MnCr₂S₄: A high-field single-crystal neutron diffraction study, *Phys. Rev. B* **110**, 214416 (2024).
- [15] H. Takahashi, R. Sakurai, H. Shinaoka, Compactness of quantics tensor train representations of local imaginary-time propagators, *SciPost Phys.* **18**, 007 (2025).
- [16] D. Fujiki, F. Tanaka, T. Sakashita, Quantum hypothesis testing for composite alternative hypotheses, *Phys. Rev. A* **111**, 032405 (2025).

-
- [17] H. P. Kwok, S. Akiyama, S. Todo, Grassmann tensor renormalization group approach to (1+1)-dimensional two-color lattice QCD at finite density, *J. High Energ. Phys.* **2025**, 27 (2025).
 - [18] Y. Kato, *et al.*, Spin Seebeck Effect as a Probe for Majorana Fermions in Kitaev Spin Liquids, *Phys. Rev. X* **15**, 011050 (2025).
 - [19] D. Watari, *et al.*, Tensor Network-Based Light-Weight Energy Forecasting for Virtual Power Plant, 13th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA2024) **469**, 474 (2024).
 - [20] H. Kanno, S. Akiyama, K. Murakami, S. Takeda, Grassmann Tensor Renormalization Group for two-flavor massive Schwinger model with a theta term, 41st International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2024) **466**, 368 (2025).
 - [21] S. Akiyama, Y. Kuramashi, Tensor renormalization group study of the two-dimensional lattice U(1) gauge-Higgs model with a topological θ term under Lüscher's admissibility condition, 41st International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2024) **466**, 361 (2025).
 - [22] H. P. Kwok, S. Akiyama, S. Todo, Two-color lattice QCD in (1+1) dimensions with Grassmann tensor renormalization group, 41st International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2024) **466**, 364 (2025).
 - [23] S. Sugawara, K. Inomata, T. Okubo, S. Todo, Embedding of Tree Tensor Networks into Shallow Quantum Circuits, *Proceedings of the 17th International Conference on Agents and Artificial Intelligence - Volume 1: QAIO* 793–803 (2025).
 - [24] T. Kobori, *et al.*, LSQCA: Resource-Efficient Load/Store Architecture for Limited-Scale Fault-Tolerant Quantum Computing, 2025 IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA).

10 Katsura Group

Research Subjects: Condensed Matter Theory and Statistical Physics

Member: Hosho Katsura and Yutaka Akagi

In our group, we conduct theoretical research on fundamental problems in condensed matter and statistical physics, with a particular focus on strongly correlated quantum many-body systems, both in and out of equilibrium. Our goal is to understand and predict novel quantum phases and emergent phenomena that arise in these systems. To this end, we use a combination of analytical and numerical methods. We are currently exploring topics such as (i) low-dimensional correlated systems, (ii) topological magnetism, (iii) open quantum many-body systems, and (iv) nonequilibrium dynamics in integrable and non-integrable systems. In addition, we are interested in the mathematical aspects of the above-mentioned fields. Our research projects conducted in FY 2024 are the following:

- Low-dimensional correlated systems
 - Ground-state phase diagram of the Hubbard model on a trimer ladder [1]
 - Spontaneous breaking of U(1) symmetry at zero temperature in one dimension [2]
- Topological magnetism
 - Electric field induced thermal Hall effect of triplons in quantum dimer magnets [3]
 - High harmonic generation from electrons moving on topological spin textures [4]
 - Gravitational wave analogues in spin nematics and cold atoms [5]
- Open quantum many-body systems
 - Late-time dynamics of two particles with two-body losses in one dimension [6]
- Mathematical and statistical physics

- Quantum many-body scars in spin models with Dzyaloshinskii-Moriya interaction [7]
- Integrability and a precursor of chaos in disorder-free Sachdev-Ye-Kitaev models [8]
- Weak ergodicity breaking in non-integrable models [9, 10]

- [1] S. Saha, H. Katsura, and M. Kumar, Phys. Rev. B **111**, 094425 (2025).
- [2] H. Watanabe, H. Katsura, and J. Y. Lee, Phys. Rev. Lett. **133**, 176001 (2024).
- [3] N. Esaki, Y. Akagi, and H. Katsura, $XCuCl_3$ ($X = \text{Ti, K}$), Phys. Rev. Research **6**, L032050 (2024).
- [4] A. Ono, S. Okumura, S. Imai, and Y. Akagi, Phys. Rev. B **110**, 125111 (2024).
- [5] L. Chojnacki, R. Pohle, H. Yan, Y. Akagi, and N. Shannon, Phys. Rev. B **109**, L220407 (2024).
- [6] A. Marché, H. Yoshida, A. Nardin, H. Katsura, and L. Mazza, Phys. Rev. A **110**, 033321 (2024).
- [7] M. Kunimi, T. Tomita, H. Katsura, and Y. Kato, Phys. Rev. A **110**, 043312 (2024).
- [8] S. Ozaki and H. Katsura, Phys. Rev. Research **7**, 013092 (2025).
- [9] M. Nakagawa, H. Katsura, and M. Ueda, Phys. Rev. Research **6**, 043259 (2024).
- [10] H. Katsura, C. Matsui, C. Paletta, and B. Pozsgay, Phys. Rev. Research **7**, 023099 (2025).

11 Kabashima Group

Research Subjects: Statistical mechanics of disordered systems and its application to information science

Member: Yoshiyuki Kabashima, Takashi Takahashi

We are working in a cross-disciplinary field between statistical mechanics and information science. Our research interests include error-correcting codes, cryptography, CDMA multi-user detection, data compression, compressed sensing, sparse modeling, high-dimensional statistics, probabilistic inference, neural networks, random matrix, machine learning, spin glasses, etc.

The followings are highlights in our research activities in AY 2024:

1. Quantum effects in spin glass models with rotationally invariant random interactions
2. Analysis of SGD dynamics for principal component analysis
3. Analysis of iterative thresholding algorithm
4. Correlation between secondary structure and robustness to environmental changes in lattice proteins
5. Analysis of retrieval dynamics in the Hopfield model with three-body interactions
6. Analysis of intracellular signal transduction pathways using transfer entropy
7. Analysis of under-bagging method
8. Analysis of ensemble-learning-based variable selection methods
9. Analysis of self-distillation in linear models
10. Statistical mechanics derivation of information criterions

12 Tsuji Group

Research Subjects: Theory of condensed matter physics, nonequilibrium quantum many-body systems

Member: Naoto Tsuji, Kazuaki Takasan, and Shohei Imai

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 2024, we mainly worked on the following projects:

- Dynamics of superconductors
 - Higgs mode in superconductors and nonlinear responses
 - Collective modes in multiband superconductors with Lifshitz invariant
 - Nonequilibrium phase transition in periodically driven superconductors
 - Superconducting nonlinear Hall effect
- Dynamics of open quantum many-body systems
 - Quantum active matter
 - Steady states of boundary-driven quantum spin systems with partial solvability [3]
 - Strongly correlated electron systems coupled to quantum electromagnetic fields
- Quantum many-body scar states [5]
- Dynamical response of quantum many-body systems
 - Attosecond physics in solids [4]
 - KPZ universality class in integrable spin chains [6]
 - THz pulse driven dynamics in Weyl semimetals [1]
 - Nonlinear response based on AdS/CFT correspondence [2]
- Tensor train methods for quantum many-body problems
- Many-body excitons and magnetic orders

- [1] Ryohei Ikeda, Hiroshi Watanabe, Moon Ji Heon, Myung-Hwa Jung, Kazuaki Takasan, Shin-ichi Kimura, “Light-Field-Driven Non-Ohmic Current Generation by an Intense THz Pulse in a Weyl Semimetal”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **93**, 053701 (2024).
- [2] Shuta Ishigaki, Shin Nakamura, Kazuaki Takasan, “Patchwork Conditions for Holographic Nonlinear Responses: A Computational Method for Electric Conductivity and Friction Coefficient”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2024, 083B07 (2024).
- [3] Chihiro Matsui, Naoto Tsuji, “Boundary dissipative spin chains with partial solvability inherited from system Hamiltonians”, *Phys. Rev. B* **110**, 224306 (2024).
- [4] Atsushi Ono, Shun Okumura, Shohei Imai, and Yutaka Akagi, “High harmonic generation from electrons moving in topological spin textures”, *Phys. Rev. B* **110**, 125111 (2024).
- [5] Shohei Imai and Naoto Tsuji, “Quantum many-body scars with unconventional superconducting pairing symmetries via multibody interactions”, *Phys. Rev. Research* **7**, 013064 (2025).
- [6] Kazumasa A. Takeuchi, Kazuaki Takasan, Ofer Busani, Patrik L. Ferrari, Romain Vasseur, Jacopo De Nardis, “Partial Yet Definite Emergence of the Kardar-Parisi-Zhang Class in Isotropic Spin Chains”, *Phys. Rev. Lett.* **134**, 097104 (2025).

13 Ashida Group

Research Subjects: Condensed matter theory, Theoretical quantum information/optics

Member: Yuto Ashida and Kazuki Yokomizo

This group focuses on theoretical studies at the intersection of quantum many-body physics and quantum information/optics. We have been studying the physics of open and out-of-equilibrium systems, where quantum systems interact with the 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 2024 below.

- Open quantum systems [1, 5, 9]
 - Strongly interacting quantum light-matter systems [2, 4]
 - Statistical physics, machine learning [8]
 - Ultracold atoms [6, 7]
 - Transport phenomena [3]
- [1] Y. Guo and Y. Ashida, Two-dimensional symmetry-protected topological phases and transitions in open quantum systems, *Physical Review B* **109**, 115115 (May 2024).
 - [2] K. Masuki and Y. Ashida, Cavity moiré materials: Controlling magnetic frustration with quantum light-matter interaction, *Physical Review B* **109**, 195173 (May 2024).
 - [3] J. Mochida and H. Ishizuka, Skew scattering by magnetic monopoles and anomalous Hall effect in spin-orbit coupled systems, *New Journal of Physics* **26**, 063031 (June 2024).
 - [4] J. Mochida and Y. Ashida, Cavity-enhanced Kondo effect, *Physical Review B* **110**, 035158 (July 2024).
 - [5] Y. Ashida, S. Furukawa, and M. Oshikawa, System-environment entanglement phase transitions, *Physical Review B* **110**, 094404 (September 2024).
 - [6] Y. Akamatsu, S. Endo, K. Fujii, and M. Hongo, Complex-valued in-medium potential between heavy impurities in ultracold atoms, *Physical Review A* **110**, 033304 (2024).
 - [7] K. Fuji and T. Enss, Hydrodynamics Attractor in Ultracold Atoms, *Physical Review Letters* **133**, 173402 (October 2024).
 - [8] K. Yamamoto, K. Ogawa, M. Tsukamoto, Y. Ashida, K. Sasaki, and K. Kobayashi, Nanodiamond quantum thermometry assisted with machine learning, *Applied Physics Express* **18**, 025001 (February 2025).
 - [9] B. Min, Y. Zhang, Y. Guo, D. Segal, and Y. Ashida, Mixed-state phase transitions in spin-Holstein models, *Physical Review B* **111**, 115123 (March 2025).

14 Arita Group

Research Subjects: Condensed Matter Theory

Member: Ryotaro Arita and Hikaru Watanabe

We are studying condensed matter physics using non-empirical methods. Our goal is to predict unique material properties originating from non-trivial electronic states and to pioneer unexplored areas in materials science through extensive calculations for diverse materials. This approach not only aims to uncover new principles, laws, and concepts in physics but also sets the stage for groundbreaking advancements in materials design. We are also developing cutting-edge computational methodologies that promise unprecedented precision in materials design.

Major research topics in AY 2024 are as follows.

1. Development and application of first-principles methods for magnetic materials [1]
2. Magnetic structure prediction and high throughput materials search for functional magnets [2]
3. Development and application of first-principles methods for superconductors [3,4,5,6]
4. *Ab initio* derivation of effective low-energy models for magnetic materials [7]
5. Exotic responses of spin-orbital coupled systems [8]
6. Non-perturbative studies on strongly correlated electron systems [9]
7. Crystal structure prediction at finite temperatures [10]
8. Topological materials [11, 12]

- [1] H.-Y. Chen, T. Nomoto, M. Hirschberger, R. Arita, Phys. Rev. X 15, 011054 (2025).
- [2] R. Takagi, *et al.*, Nature Materials 24, 63 (2025).
- [3] N. Witt, *et al.*, npj Quantum Materials volume 9, 100 (2024).
- [4] M.-C. Jiang, R. Masuki, G.-Y. Guo and R. Arita, Phys. Rev. B 110, 104505 (2024).
- [5] H. Mori, T. Nomoto, R. Arita and E.R. Margine, Phys. Rev. B 110, 064505 (2024).
- [6] J.-B. Moree and R. Arita, Phys. Rev. B 110, 014502 (2024).
- [7] T. Hatanaka, J. Bouaziz, T. Nomoto, R. Arita, arXiv:2405.04369
- [8] K. Hattori, H. Watanabe, J. Iguchi, T. Nomoto and R. Arita, Phys. Rev. B 110, 014425 (2024).
- [9] S. Backes, Y. Nomura, R. Arita, H. Shinaoka, Phys. Rev. B 111, L041102(2025).
- [10] R. Masuki, T. Nomoto, R. Arita and T. Tadano, Phys. Rev. B 110, 094102 (2024).
- [11] M. Hirayama, T. Nomoto, R. Arita, Journal of Physics: Condensed Matter 36, 27 (2024).
- [12] M. Sato *et al.*, Communications Materials 5, 253 (2024).

15 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:

- Anomalous Hall effect at sandwich structures consisted of magnetic topological insulators and topological crystalline insulator
- 2D superconductivity at α -Sn layers on a topological crystalline insulator
- Non-reciprocal photocurrent at Rashba surfaces induced by irradiation of circularly polarized light
- Ferromagnetism and superconductivity at Yb-intercalated graphene
- Conductivity of highly N-doped surface layer on SiC crystal

(2) New methods:

- Fabrication of a four-point probe UHV system with tunneling spectroscopy and quantum Shot noise measurements

- Development of probes for spin injection and spin detection

- Fabrication of a UHV-MBE system with polarization-controlled mid-infrared irradiation

[1] Ibuki Taniuchi, Ryota Akiyama, Rei Hobara, and Shuji Hasegawa: *Surface Circular Photogalvanic Effect in Tl-Pb Monolayer Alloys on Si(111) with Giant Rashba Splitting*, ACS Nano **19**, 3147-3154 (Jan, 2025).

[2] Shuji Hasegawa: *Surface and Interface Physics Driven by Quantum Materials*, Applied Physics Express **17**, 050101 (pp.20) (Jun, 2024).

[3] Shuji Hasegawa: *Surface and Edge States of Quantum Materials*, Coshare Science **03**, 01 (Feb, 2025).

16 Okamoto Group

Research Subjects: Experimental Condensed Matter Physics,

Low temperature electronic properties of two-dimensional systems.

Member: Tohru Okamoto and Ryuichi Masutomi

We study low temperature electronic properties of two-dimensional systems.

The current topics are following:

1. Two dimensional electrons at cleaved semiconductor surfaces:

At the surfaces of InAs and InSb, conduction electrons can be induced by submonolayer deposition of other materials. Recently, we have performed in-plane magnetotransport measurements on in-situ cleaved surfaces of *p*-type substrates and observed the quantum Hall effect which demonstrates the perfect two dimensionality of the inversion layers. Research on the hybrid system of 2D electrons and adsorbed atoms has great future potential because of the variety of the adsorbates and the application of scanning probe microscopy techniques.

To explore exotic physical phenomena related to spin at a semiconductor surface, magnetic-atom induced two dimensional electron systems are investigated by using low-temperature scanning tunneling microscopy and spectroscopy combined with transport measurements.

2. Superconductivity of monolayer films on cleaved GaAs surfaces:

Recently, we studied the effect of the parallel magnetic field $H_{\parallel}$ on superconductivity of monolayer Pb films on GaAs(110). Superconductivity was found to occur even for $H_{\parallel} = 14$ 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 of the GaAs substrate causes the rectification effect, which is called vortex ratchet.

17 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) ($1 \text{ THz} \sim 4 \text{ meV}$) frequency range where various quasi-particle excitations and various collective excitations exist. The research topics in FY2024 are as follows.

1. **Light-induced superconducting-like state in high- T_c cuprate superconductors:** We performed a comprehensive study on the light-induced superconductivity phenomenon in cuprate superconductors, $\text{La}_{1.6-x-y}\text{Nd}_y\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, by using near-infrared optical-pump and terahertz-probe spectroscopy. The light-induced plasma edge was observed in the c -axis terahertz reflectivity for all the samples above T_c , regardless of long-range charge order (CO) or short-range charge density wave (CDW) order while showing a strong correlation with the coherence length of the CO/CDW order. The frequency of light-induced plasma edge coincides with that of Josephson plasma resonance in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ at the similar doping in the low-temperature superconducting phase, imposing a strong constraint on the interpretation of the phenomenon.
2. **Study of collective mode in iron-based superconductors:** We studied the collective mode behavior of iron-based superconductors, $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$, by using terahertz third harmonic generation technique. In FeSe, a distinct collective mode resonance was identified substantially below the superconducting gap. By comparing with the theoretical analysis based on the multi-orbital model of pairing interactions, the observed mode is accounted for the Bardasis-Schrieffer mode, corroborating that the superconducting order parameter in FeSe is described by the admixture of s -wave and d -wave pairing channels.
3. **Floquet engineering of Dirac electron systems:** We have aimed at realizing Floquet states in Dirac electron system in thin films of $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$. Upon the irradiation of circular polarized mid-infrared light pulses, we observed the light-induced anomalous Hall effect as manifested by the transient Faraday rotation signal in the terahertz frequency range. The light-induced optical Hall conductivity shows $1/\omega^3$ dependence against the driving frequency ω , in accordance with the Floquet theory that predicts the light-induced Floquet-Weyl state with further strong driving fields.

References

- [1] Sachiko Nakamura, Haruki Matsumoto, Hiroki Ogawa, Tomoki Kobayashi, Fuyuki Nabeshima, Atsutaka Maeda, and Ryo Shimano: Picosecond Trajectory of Two-Dimensional Vortex Motion in $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ Visualized by Terahertz Second Harmonic Generation, *Phys. Rev. Lett.* **133**, 036004 (2024). (Editors' suggestion. selected for Physics Magazine, FOCUS)
- [2] Kohei Fujiwara, Kazuma Ogawa, Naotaka Yoshikawa, Koji Kobayashi, Kentaro Nomura, Ryo Shimano and Atsushi Tsukazaki: Giant antisymmetric magnetoresistance arising across optically controlled domain walls in the magnetic Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$, *Commun. Mater.* **5**, 239 (2024).
- [3] M. Nishida, D. Song, A. M. Hallas, H. Eisaki, and R. Shimano: Emergence of Light-Induced Superconducting-like State from the Charge Density Wave State in High- T_c Cuprate Superconductors, *Phys. Rev. B* **110**, 224515 (2024). (Editors' suggestion. selected for Physics Magazine, SYNOPSIS)
- [4] Ushio Narusaka, Naotaka Yoshikawa, Hideki Matsuoka, Yuki Tanaka, Maki Musashi, Masaki Nakano, Yoshihiro Iwasa, Ryo Shimano: Intense terahertz pulse induced nonthermal melting of charge density wave order in a thin film of $3\text{R-Ta}_{1+x}\text{Se}_2$, *Phys. Rev. B* **111**, 045146 (2025).

18 Hayashi Group

Research Subjects: Condensed matter physics

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 currents and chiral magnetism
 - Decoding the magnetic bit positioning error in a ferrimagnetic racetrack[4]
Current-driven motion of magnetic domain walls is one of the key technologies for developing storage class memory devices. Extensive studies have revealed a variety of material systems that exhibit high-speed and/or lower power propagation of the domain walls driven by electric current. However, few studies have assessed the reliability of the operations of the memory technology. Here, we decode the errors associated with writing and shifting domain walls using nanosecond current pulses in a 5-micrometer-wide wire composed of a Pt/GdFeCo bilayer. We find that writing a domain wall at the edge of the wire causes a bit positioning error of 0.3 micrometers, whereas the shifting process induces an error of 0.1 micrometers per a 2-nanosecond-long current pulse. The error correlation among successive shifting is negligible when the current drive is sufficiently large. These features allow reliable operation of highly packed domain walls in a ferrimagnetic racetrack.
 - Strong coupling in solids
 - Magnon-phonon coupling of synthetic antiferromagnets in a surface acoustic wave cavity resonator[5]
a surface acoustic wave (SAW) cavity resonator is used to study the coupling of acoustic magnons in a synthetic antiferromagnet (SAF) and phonons carried by SAWs. The SAF is composed of a CoFeB/Ru/CoFeB trilayer, and the scattering matrix of the SAW resonator is studied to assess the coupling. We find that the spectral line width of the SAW resonator is modulated when the frequency of the excited magnons approaches the SAW resonance frequency. Such a change in the spectral linewidth can be well reproduced using macrospin-like model calculations. From the model analyses, we estimate the magnon – phonon coupling strength to be ~ 9.9 MHz at a SAW resonance frequency of 1.8 GHz: the corresponding magnomechanical cooperativity is ~ 0.66 . As the spectral shape hardly changes in a CoFeB single-layer reference sample, these results show that SAF provides an ideal platform to study magnon – phonon coupling in an SAW cavity resonator.
- [1] M. Yunokizaki, Y. Hibino, H. Idzuchi, H. Tsai, M. Ishibashi, S. Miwa, M. Hayashi, S. Nakatsuji, Tunneling magnetoresistance and spin-orbit torque magnetization switching in ferrimagnetic Gd-Fe-Co based magnetic tunnel junction. *Jpn. J. Appl. Phys.* 64 010904 (2025).
 - [2] H. Matsumoto, Y. Todaka, T. Kawada, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Acoustoelectric nonlocal spin-wave-power detector for studying magnon-phonon coupling. *Phys. Rev. Appl.* 22, 054052 (2024).
 - [3] Z. Chi, Y.-C. Lau, V. Li Zhang, G. Shibata, S. Sakamoto, Y. Nonaka, K. Ikeda, Y. Wan, M. Suzuki, M. Kawaguchi, M. Suzuki-Sakamaki, K. Amemiya, N. Kawamura, M. Mizumaki, M. Suzuki, H. Yang, M. Hayashi, A. Fujimori, Relationship between orbital moment anisotropy, magnetocrystalline anisotropy, and Dzyaloshinskii-Moriya interaction in W/Co/Pt trilayers. *Phys. Rev. B* 110, 184401 (2024).
 - [4] M. Ishibashi, M. Kawaguchi, Y. Hibino, K. Yakushiji, A. Tsukamoto, S. Nakatsuji, M. Hayashi, Decoding the magnetic bit positioning error in a ferrimagnetic racetrack. *Sci. Adv.* 10, eadq0898 (2024).
 - [5] H. Matsumoto, I. Yasuda, M. Asano, Y. Todaka, T. Kawada, M. Kawaguchi, D. Hatanaka, and M. Hayashi, Magnon-phonon coupling of synthetic antiferromagnets in a surface acoustic wave cavity resonator. *Nano Lett.* 24, 5683 (2024).

19 Kobayashi Group

Research Subjects: Quantum sensing and mesoscopic physics

Member: Kensuke Kobayashi and Kento Sasaki

The advancement of nanotechnology since the 1980s has paved the way for mesoscopic physics, which seeks to manipulate the properties of matter using miniature electronic circuits—so-called mesoscopic systems—composed of semiconductors, metals, superconductors, and magnetic materials. Progress in this field

has opened up new avenues for various quantum technologies. Among them, quantum sensing—a precision measurement technique grounded in the principles of quantum mechanics—has emerged as an auspicious approach. Our research aims to establish a new framework for precision condensed matter physics based on quantum sensing.

We focus on quantum sensors based on color centers, such as nitrogen vacancy (NV) centers in diamond and boron vacancies in hexagonal boron nitride (hBN). We are developing a single quantum spin microscope for various quantum sensing applications. This technique enables quantitative imaging of magnetic field and temperature distributions at submicron scales under multiple conditions. Such a capability has been unprecedented in the field of condensed matter physics. This approach holds promise for exploring various compelling topics, including non-equilibrium transport, spin glasses, topological edge states, and persistent currents.

The primary research topics in FY2024 are as follows.

- Systematic characterization of nanoscale hBN quantum sensor spots created by helium-ion microscopy [1]
- Nano-diamond quantum thermometry assisted with machine learning [2]
- Wideband wide-field imaging of spin-wave propagation using diamond quantum sensors [3]
- Quantitative imaging of nonlinear spin-wave dynamics using diamond quantum sensors
- Superconducting vortex nucleation induced by self-Field of current
- Imaging stress distribution under high pressure using diamond quantum sensors
- Observation of antiferromagnetic domain wall in Mn_3Sn using scanning diamond quantum sensor

Published papers:

- [1] H. Gu, M. Tsukamoto, Y. Nakamura, S. Nakaharai, T. Iwasaki, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Ogawa, Y. Morita, K. Sasaki, K. Kobayashi, *Physical Review Applied* **22**, 054026 (2024).
- [2] K. Yamamoto, K. Ogawa, M. Tsukamoto, Y. Ashida, K. Sasaki, K. Kobayashi, *Applied Physics Express* **18**, 025001 (2025).
- [3] K. Ogawa, M. Tsukamoto, Y. Mori, D. Takafuji, J. Shiogai, K. Ueda, J. Matsuno, K. Sasaki, K. Kobayashi, *Physical Review Applied* (in press).

20 Nakatsuji-Sakai Group

Research Subjects: Condensed Matter Experiment

Member: Satoru Nakatsuji and Akito Sakai

Our research group is advancing a new phase in quantum materials science, where fundamental discoveries are increasingly connected with emerging quantum technologies through interdisciplinary collaboration. We focus on the design, synthesis, and characterization of quantum materials that exhibit novel macroscopic properties. These materials are integrated into thin-film-based devices, enabling us to probe novel quantum functionalities and assess their technological potential. By forging direct links between quantum phenomena and practical applications, our mission is to lead the creation of material platforms that drive both scientific discovery and innovation in computing, sensing, and energy-saving technologies.

Major research themes:

1. Quantum transport in magnetic topological materials
2. Coherent quantum spin transport in antiferromagnetic spintronics
3. Strange metal and exotic superconductivity in strongly correlated electron systems

Summary of research subjects in 2024

1. Fabrication of single-crystalline YFeO₃ films with large antiferromagnetic domains [1]

Antiferromagnets have attracted considerable interest in fields such as spintronics, magnonics, and ultrafast magnetism. However, issues with sample quality and the presence of structural domains complicate quantitative studies of antiferromagnetic thin films, which limit their application in these areas. In this study, we successfully fabricated high-quality, twinning-free (110)-oriented YFeO₃ films using pulsed laser deposition. Our results show that spin rotation under high magnetic fields aligns well with the two-sublattice approximation model. The films feature an atomically flat surface with a step-terrace morphology. We also observed a longitudinal magneto-optic Kerr (MOKE) rotation of 10 millidegrees at room temperature, consistent with previous reports based on bulk single crystals. The in-plane anisotropy of the Kerr response matches the magnetic anisotropy measured by SQUID techniques. The strong MOKE signal enables imaging of antiferromagnetic domains and their reversal, with domain sizes exceeding 100 micrometers. These high-quality YFeO₃ thin films are promising for the development of antiferromagnetic spintronics and the exploration of spin-related phenomena in thin films and interfaces.

2. Manipulation of Weyl antiferromagnet Mn₃Sn by interlayer magnetic coupling [2]

The Weyl antiferromagnet Mn₃Sn exhibits large responses like the anomalous Hall effect with tiny magnetization and is expected to be utilized in next-generation spintronics. The control of the magnetic properties of Mn₃Sn is a critical technique, and manipulation using several means, including external magnetic field, spin-orbit torque, and strain, has been demonstrated. In this study, we demonstrated the manipulation of the magnetic state in Mn₃Sn by interlayer magnetic coupling and revealed unique properties of this effect. We found that the observed coupling phenomena were induced not by the tiny magnetization but by the chiral antiferromagnetic order of Mn₃Sn. Moreover, the unidirectional magnetic anisotropy resulting from interfacial coupling can be easily applied in any direction owing to its small demagnetizing field. This effect can play a key role in realizing all-antiferromagnetic memory devices.

3. Large Anomalous Nernst effect in polycrystalline ferromagnets with nodal web band structure [3]

We explored the anomalous Nernst effect (ANE) in chemically substituted Fe₃(Ga, Al) and Fe₃(Al, Si) compounds, which are promising for thermoelectric and spintronic applications due to their topological band structure. Our study revealed that Fe₃Ga_{1-x}Al_x polycrystals display a remarkably large and robust ANE signal ($\sim 5.7 \mu\text{V/K}$) over a wide range of chemical compositions, demonstrating that the underlying topological "nodal web" feature remains intact despite significant atomic substitutions. The substitution of Ga with the more abundant and cost-effective aluminum further highlights the potential of Fe₃Ga_{1-x}Al_x as a promising material for scalable, energy-harvesting thermoelectric technologies.

4. Large spontaneous anomalous Nernst effect in kagome ferromagnet Fe₃Sn thin film [4]

The anomalous Nernst effect (ANE) is a representative transverse thermoelectric effect that holds promise for developing low-cost, large-area, and flexible thermoelectric devices. It is suitable for applications in heat flux sensors and energy harvesting. In this work, we investigate the thin-film kagome ferromagnet Fe₃Sn, which exhibits a novel topological electronic structure characterized by a nodal plane. We fabricated high-quality (0001)-oriented Fe₃Sn epitaxial thin films and successfully observed a large spontaneous ANE in these thin films, with a response comparable to bulk samples. Moreover, we assessed the transverse electromotive force per unit heat flux under an out-of-plane heat current, matching the configuration used in heat flux sensors, and demonstrated a sensitivity one order of magnitude greater than that of conventional ferromagnetic materials. Our findings underpin the thermoelectric application of the Fe₃Sn binary system, which utilizes cost-effective elements.

5. Multipole-drive superconductivity in PrTi₂Al₂₀ [5]

Since the discovery of unconventional superconductivity in the early 20th century, expanding the landscape and understanding its mechanism have been central themes in quantum materials research worldwide. The ultimate goal of realizing superconductivity at room temperature and under everyday conditions can revolutionize today's technologies, from electrical grids with no loss and new computing techniques to ultra-fast, energy-efficient transportation. Recent research has extensively explored the link between superconductivity and the coexistence of ordered states beyond conventional long-range spin order, generating significant interest. In this study, we focus on PrTi₂Al₂₀, which provides a unique and fascinating platform to explore how high-rank multipoles can generate superconductivity in the absence of spin degrees of freedom. We comprehensively characterized the superconducting state through highly challenging thermodynamic experiments, uncovering key insights into the superconducting pairing symmetry. Through La-doping, we identified an intimate link between the multipolar order parameter and superconducting pairing symmetry via chemical tuning, revealing a phase diagram that contrasts sharply with that of the extensively studied

spin-fluctuation-driven superconductors. This study is a crucial step in characterizing and showcasing the unique properties of multipole-driven superconductivity.

- [1] C. Wang, M. Lippmaa, S. Nakatsuji “Fabrication of single-crystalline YFeO_3 films with large antiferromagnetic domains” *J. Appl. Phys.* **135**, 113901 (2024).
- [2] M. Asakura, T. Higo, T. Matsuo, R. Uesugi, D. N.-Hamane, Satoru Nakatsuji “Observation of Omnidirectional Exchange Bias at All Antiferromagnetic Polycrystalline Heterointerface” *Adv. Mater.* **36**, 2400301 (2024).
- [3] Y. Wang, A. Sakai, S. Minami, H. Gu, T. Chen, Z. Feng, D. Nishio-Hamane, S. Nakatsuji “Robust giant anomalous Nernst effect in polycrystalline nodal web ferromagnets” *Appl. Phys. Lett.* **125**, 081901 (2024).
- [4] S. Kurosawa, T. Higo, S. Saito, R. Uesugi, and S. Nakatsuji “Large spontaneous magneto-thermoelectric effect in epitaxial thin films of the topological kagome ferromagnet Fe_3Sn ” *Phys. Rev. Mater.* **8**, 054206 (2024).
- [5] A. Sakai, Y. Matsumoto, M. Fu, T. Isomae, M. Tsujimoto, E. O’ Farrell, D. Nishio-Hamane, S. Nakatsuji “Interplay between multipolar order and multipole-induced superconductivity in $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ ” *Nature Communications* **16**, 2114 (2025).

21 Theoretical Astrophysics Group

Research Subjects: Observational Cosmology, High-Energy Astrophysics , and Artificial Intelligence

Member: Naoki Yoshida, Kana Moriwaki & Erika Ogata

The Theoretical Astrophysics Group conducts a wide range of research programs. We pursue a variety of topics such as observational cosmology, galaxy formation and evolution, high-energy astrophysics, quantum computing and artificial intelligence.

Observational Cosmology attempts to understand the evolution of the universe based on the observational data in various wavebands. The proper interpretation of recent and upcoming observational data provided by JWST, ALMA, Euclid, SPHEREx, and Subaru PFS is 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 and ionization and thermal history of the universe and reionization.

Astronomical observations 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 and galaxies were born, which illuminated the universe once again and terminate the cosmic Dark Ages. We explore direct and indirect observational signatures from those objects that can be obtained in future observations. Comparing the predictions of our simulations to observations allows us to better understand the nature of the underlying physical processes.

To maximise the information gain from astrophysical observations and numerical simulations, we also explore several new techniques. We develop supervised machine learning models to analyze noisy observational data. With the aim of utilizing quantum computers in the future for faster computation, we are also working on the development of new computational methods.

Let us summarize this report by presenting recent titles of the PhD and Master’s theses in our group;

2024

- Kinetic Simulations of Pulsar Magnetosphere in Interacting Binary Systems
- Impact of Reionization History on Constraining Primordial Gravitational Waves with Cosmic Microwave Background B-modes
- Probing Cosmic Large Scale Structure with Voids

- Long-Term Evolution and Dispersal of Protoplanetary Disks
- The nature of dark matter probed by strong gravitational lensing
- Three-dimensional Radiation Hydrodynamics Simulations of Wandering Black Holes: Effects of Anisotropic Radiation Feedback in Dusty-Gas

2023

- Binary blackhole mergers induced by dynamical interaction of hierarchical triple systems
- Observational studies of stellar rotation using high precision photometric data
- White Dwarf Populations from a Semi-Analytical Star Formation Model

2022

- Understanding Atmospheric Escape of Hot Jupiters Using Radiation Hydrodynamics Simulations
- Neutron-capture element enrichment of early galaxies
- Formation and evolution of star clusters and galaxies in the early Universe

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 are in a superposition of 0 and 1 states. Quantum information processing seeks to perform tasks that are impossible or ineffective with conventional classical information by manipulating quantum states. Examples are quantum computation, quantum cryptography, quantum communication, and quantum sensing.

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, Philip Taranto, Zane Marius Rossi (JSPS foreign postdoctoral fellow), Jisho Miyazaki, graduate students, Yu Tanaka (D3), Wataru Yokojima (D3), Timothy Forrer (D2), Satoshi Yoshida (D2), Kosuke Matsui (D1), Natsuto Isogai (M2), Ryotaro Niwa (M1), Ben Yordan Jumoorty (Research student) and an intern, Noah Eckstein (Harvard University). We engaged in active collaborations with colleagues at the University of Toronto, MIT, North Carolina State University, Sorbonne Université, University of Gdańsk, Université Paris-Saclay, Perimeter Institute, University of Geneva, University of Illinois Urbana-Champaign, Foxconn, IBM Quantum, Tamkang University, NTT, NII, Ritsumeikan University, the Chinese University of Hong Kong, and TU Wien.

Our projects engaged in this academic year were the following:

Quantum Machine Learning and Quantum Algorithms

- Advantage of quantum machine learning from general quantum computational advantages (Yamasaki, Isogai, Murao)
- Parallel quantum signal processing via polynomial factorization (Rossi)
- Modular quantum signal processing in many variables (Rossi)
- Quantum state preparation using counting oracles (Tanaka, Yamasaki, Murao)
- Dequantization of period-finding algorithms using binary decision diagrams (Tanaka, Yamasaki, Murao)
- Teleportation using multiple copies of input quantum states (Yoshida, Murao)
- Analysis of quantum protocols using large language models (Jumoorty, Murao)

Higher-Order Quantum Computation and Quantum Learning

- Storage and retrieval of higher-order quantum channels (Yokojima, Miyazaki, Murao)
- Quantum algorithms for learning spectral moments of quantum channels (Niwa, Taranto, Rossi, Murao)
- Quantum functional protocols (Forrer, Miyazaki, Taranto, Murao)
- Analytical lower bound on the number of queries of higher-order transformations of unitaries (Otake, Yoshida, Murao)
- No-go theorem on quantum switch simulation (Otake, Yoshida, Taranto, Murao)
- Universal algorithm for transforming Hamiltonian eigenvalues (Otake, Taranto, Murao)
- Equivalence between fidelities of port-based teleportation and unitary estimation (Yoshida, Murao)

Quantum Error Correction and Quantum Error Suppression

- Coherent information for Calderbank-Shor-Steane codes under decoherence (Niwa)
- Constant-overhead magic state distillation (Yamasaki)
- Robust error accumulation suppression of quantum circuits (Otake, Taranto, Murao)

Distributed Quantum Information Processing

- Reduction of qubit usage in entanglement distillation protocols (Matsui, Yamasaki, Murao)
- Computing entanglement costs of nonlocal operations using algebraic geometry (Miyazaki)

Quantum Resource Theories

- Estimation of imaginarity of quantum states (Miyazaki)
- Proof of generalized quantum Stein’s lemma and the second law of quantum resource theories (Yamasaki)
- Efficiently cooling quantum systems with finite resources (Taranto)
- Analysis of unitary interactions preserving states of quantum open systems (Eckstein, Taranto, Murao)

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, 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 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 FY2024 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms, nonequilibrium open systems
 - Topology of discrete quantum feedback control [1]
 - Exact eigenstates and weak ergodicity breaking in multicomponent Hubbard models [2]
 - Yang-Lee zeros in quantum phase transitions and their relation with entanglement transitions [3]

- Unification of quantum physics, statistical mechanics, information theory, and machine learning
 - Universal upper bound on work extractable from isolated quantum many-body systems [4]
 - Nonequilibrium dynamics in an evolutionary game on a regular graph [5]

- [1] Masaya Nakagawa and Masahito Ueda, Phys. Rev. X **15**, 021016 (2025).
- [2] Masaya Nakagawa, Hosho Katsura, and Masahito Ueda, Phys. Rev. Research **6**, 043259 (2024).
- [3] Hongchao Li, Phys. Rev. B **111**, 045139 (2025).
- [4] Akihiro Hokkyo and Masahito Ueda, Phys. Rev. Lett. **134**, 010406 (2025).
- [5] Yuki Sakamoto and Masahito Ueda, Phys. Rev. E **110**, 034110 (2024).

24 J. Yokoyama Group

Research Subjects: Theoretical Cosmology and Gravitation

Member: Jun'ichi Yokoyama

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. Yokoyama served as the Director of RESCEU from April 2023, but since November 2023, he has also been the Director of the Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe. He continues his duties at the Graduate School of Science as an adjunct professor.

Cosmology of the early universe and gravitation

- One-loop correction on the primordial curvature perturbation from single-field inflation and primordial black hole formation
- Real-time analysis of vacuum decay in the presence of a black hole
- Roles of the Higgs field during reheating after R^2 inflation.
- $f(R)$ gravity in the Einstein-Cartan theory.
- Scale free gravity and cosmology

Observational cosmology

- Cosmic birefringence as a probe of dark components
- Distance measurement to the Andromeda galaxy
- Time domain astronomy using Tomo-e Gozen

Gravitational wave analysis

- Noise removal by nonlinear independent component analysis
- LVK collaboration papers

25 Ejiri-Tsujii 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 FY2024, a movable molybdenum target rod with a thermocouple was fabricated to measure the energy flux of the fast electrons generated by the LHW. As a result, it was found that a non-negligible power of about 10 % of the incident LHW power reaches the target, and that the power varies depending on the antenna used and the measurement position. When the plasma current is maintained, bursts occasionally appear in the hard X-ray (HX) signal, and their energy reaches about half of the total X-ray energy during the discharge, and may be important in the current drive process. As a new measurement method, we have developed the line integrated Thomson scattering method, and initial experimental results have been obtained in one line of sight. In theoretical research, we are developing a new wave calculation method using integral form dielectric tensor. In a joint research project with QST, we are analyzing the heating and equilibrium during electron cyclotron wave assisted startup, and confirmed that the theory and the experimental results in TST-2 are not inconsistent. In joint research with Kyushu University, we have continued to improve the performance of the Thomson scattering diagnostic.

26 Sakai (Hirofumi) Group

Research Subjects: Experimental studies of atomic, molecular, and optical physics

Members: Hirofumi Sakai and Shinichirou Minemoto

Our research interests are as follows: (1) Manipulation of neutral molecules based on the interaction between a strong nonresonant laser field and induced dipole moments of the molecules. (2) High-intensity laser physics typified by high-order nonlinear processes (ex. multiphoton ionization and high-order harmonic generation). (3) Ultrafast phenomena in atoms and molecules in the attosecond time scale. (4) Controlling quantum processes in atoms and molecules using shaped ultrafast laser fields. A part of our recent research activities is as follows:

(1) Observation of the alignment and orientation dynamics of state-selected OCS Molecules in a field-free space

We applied a plasma shutter developed for two-color laser pulses to state-selected OCS molecules and observed the dynamics of their alignment and orientation after the laser pulse was rapidly blocked. This year, due to the degradation of the LD used to excite the femtosecond Ti:sapphire laser amplification system for plasma generation, unfortunately, we could not utilize sufficient output power. Consequently, increasing the cross-sectional area of the femtosecond pulse on the ethylene glycol sheet was difficult. As a result, to prevent self-breakdown of the ethylene glycol, we had to limit the pulse energy of the two-color laser pulse consisting of the fundamental wave (wavelength $\lambda = 1064$ nm) and the second-harmonic wave

($\lambda = 532$ nm) of the nanosecond Nd:YAG laser. Despite this limitation, the achieved orientation degree upon applying the plasma shutter was approximately 2.5 times higher than that observed in the proof-of-principle experiment (K. Oda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 213901 (2010)). Additionally, as discussed later, the observed dynamics of alignment and orientation indicated the presence of a residual electric field to some extent after applying the plasma shutter.

The alignment dynamics after ultrafast blocking of the two-color laser pulse using the plasma shutter was found to be consistent with the results reported in the paper on the development and performance evaluation of the plasma shutter (Je Hoi Mun *et al.*, Opt. Express **27**, 19130–19140 (2019)), specifically Fig. 3. Three quantum revivals were observed within one rotational period. On the other hand, for the first time worldwide, we successfully observed the orientation dynamics after ultrafast blocking of the two-color laser pulse applied to state-selected OCS molecules. We confirmed that the orientation degree returned to approximately the same level as before laser pulse blocking after nearly one rotational period. Additionally, modulations in the orientation were observed for the first time around $T_{\text{rot}}/4$ and $3T_{\text{rot}}/4$.

The observed results qualitatively agreed with the numerical solutions of the time-dependent Schrödinger equation, assuming the rotational ground state of the OCS molecule, thereby verifying the validity of our observations. Furthermore, the effect of the residual electric field (less than approximately 10%) after laser pulse blocking was clarified. It was found that the quantum revival period was delayed by a few picoseconds compared to the field-free case. Additionally, the intensity ratio of the orientation signals observed around $T_{\text{rot}}/4$ and $3T_{\text{rot}}/4$, which is symmetric in the absence of a residual field, became asymmetric when a residual electric field was present.

(2) Proposal for an all-optical method for enantioselective orientation of chiral molecules

In the all-optical molecular orientation control method reported above, the highest orientation degree is achieved when the orientation dynamics is purely adiabatic. However, in recent years, it has been found that even when using two-color pulses with a pulse width of approximately 10 ns, the orientation dynamics is not purely adiabatic. To maximize the degrees of orientation in such cases, Sakai group proposed not only optimizing the intensity ratio of the two-wavelength pulses (Mun and Sakai, Phys. Rev. A **98**, 013404 (2018)) but also utilizing a combination of a linearly polarized fundamental wave and an elliptically polarized second-harmonic wave (Hossain and Sakai, J. Chem. Phys. **153**, 104102 (2020)).

In molecular orientation control, numerical calculations have generally assumed a relative phase of 0 (or π) to maximize the asymmetry of the potential. This year, by selecting a relative phase $\Phi = \pi/4$, the fact that the sign of the hyperpolarizability tensor's off-diagonal component differs between L- and D-enantiomers enables a technique for enantioselective orientation of chiral molecules, where L- and D-enantiomers — related as mirror images — can be oriented in opposite directions. Furthermore, by selecting $\Phi = 5\pi/4$, the relative orientation of L- and D-enantiomers can be easily switched between up/down and left/right compared to the case when $\Phi = \pi/4$.

27 Aikawa Group

Research Subjects: Levitated optomechanics

Member: Kiyotaka Aikawa, Takuya Kawasaki

We experimentally explore single nanoparticles optically levitated in vacuum. Recently, we realize feed-back cooling on all the external degrees of freedom of a single nanoparticle, with one degree of freedom being cooled to the ground state. We have realized time-of-flight free-expansion measurements of the velocity distribution of a levitated nanoparticle and elucidated that cooling the angular motions is crucial to explore the velocity distribution near the ground state. In future, we aim at employing these techniques to explore the quantum behaviors of a nanoparticle as well as its application to sensing beyond current technologies. The main research subjects in FY2024 are as follows:

- Construction of a new apparatus for multi-particle experiments
- Construction of a new apparatus for a hybrid quantum system
- Exploring the application of a nanoparticle to sensing

28 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 140 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 (B-DECIGO, SILVIA)
- Development of TOBA (Torsion Bar Antenna)
- Dark Matter Search
- High-precision experiments on relativity and opto-mechanics

Reference

- [1] K. Komori, DECIGO collaboration: Current status of DECIGO and B-DECIGO, *Int. J. Mod. Phys. D*, 2540005 (2025).
- [2] S. Takano, *et al.*: TOrsion-Bar Antenna: A Ground-Based Detector for Low-Frequency Gravity Gradient Measurement, *Galaxies* 2024, 12(6), 78
- [3] S. Otabe *et al.*: Kerr-Enhanced Optical Spring, *Phys. Rev. Lett.* 132, 143602 (2024).
- [4] T. Ishikawa, *et al.*: Feasibility of loop-gain tuning for general measurement systems inspired by quantum locking for DECIGO, *Class. Quantum Grav.* 41, 215013 (2024).
- [5] R. Abbott *et al.*: Search for Gravitational-wave Transients Associated with Magnetar Bursts in Advanced LIGO and Advanced Virgo Data from the Third Observing Run, *ApJ* 966, 137 (2024).
- [6] R. Abbott *et al.*: Search for Gravitational-lensing Signatures in the Full Third Observing Run of the LIGO+Virgo Network, *ApJ* 970, 191 (2024).
- [7] A. Abac *et al.*: Observation of Gravitational Waves from the Coalescence of a 2.5-4.5 Msolar Compact Object and a Neutron Star, *ApJL* 970, L34 (2024).
- [8] A. Abac *et al.*: Ultralight vector dark matter search using data from the KAGRA O3GK run, *Phys. Rev. D* 110, 042001 (2024).
- [9] A. Abac *et al.*: Search for Eccentric Black Hole Coalescences during the Third Observing Run of LIGO and Virgo, *ApJ* 973, 132 (2024).
- [10] A. Abac *et al.*: A Search Using GEO600 for Gravitational Waves Coincident with Fast Radio Bursts from SGR 1935+2154, *ApJ* 977, 255 (2024).
- [11] G. Raman *et al.*: Swift-BAT GUANO Follow-up of Gravitational-wave Triggers in the Third LIGO-Virgo-KAGRA Observing Run, *ApJ* 980, 207 (2025).

29 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 nuclei, and so on.

Member: Aya Bamba and Kouichi Hagino

Our aim is understanding high energy phenomena in the universe, such as supernova explosions and their remnants (SNRs), compact stars such as white dwarfs, neutron stars, and black holes, active galactic nuclei, and so on. Such energetic objects emit bright X-rays and/or gamma-rays, thus we observe such high energy photons using rockets, balloons, and satellites. We also develop detectors for future X-ray/Gamma-ray missions, such as GRAMS and XRPIX, and so on.

The group main activities of this year are as follows:

1. Observations of high energy celestial objects

- Supernova remnants are one of the main players to distribute heavy elements in the universe. We have succeeded to map the Doppler shift/broadening of Fe K shell lines in one of the youngest Galactic core-collapse SNR, Cassiopeia A (SN 1682) with XRISM, which we successfully launched on 2023. The map shows quite asymmetric expansion, suggesting incomplete shell structure. It may have connection with the supernova explosion mechanism called neutrino-driven supernova.
- We observed an active galactic nuclei, PDS456, with XRISM. Surprisingly, we have detected several absorption lines with different redshift value ($z=0.1-0.3$). It means that the ultra fast outflow from the central supermassive blackhole is very asymmetric and clumpy.

2. Developments of future missions

- We develop the liquid Ar detector for cosmic MeV gamma-ray detection. We found that impurities in liquid Ar prevents successful signal detection. We have successfully removed the impurities and detected the signal.
- We have proceed development of XRPIX detector for the future hard X-ray mission. In this year, we succeeded to operate the XRPIX with onchip ADC, without degradation of energy resolution.

Selected Papers

- [1] A. Bamba, K. Kashiyama, S. Kisaka, Y. Terada, T. Takahashi, T. Minami, “On the X-ray efficiency of the white dwarf pulsar candidate ZTF J190132.9+145808.7” , PASJ, 76, 702 (2024)
- [2] T. Iwata, A. Tanimoto, H. Odaka, A. Bamba, Y. Inoue, K. Hagino, “Multi-epoch X-ray spectral analysis of Centaurus A: Revealing new constraints on iron emission line origins” , PASJ, 76, 923 (2024)
- [3] D. Tateishi, N. Sasaki, Y. Terada, S. Katsuda, S. Lee, H. Sano, Y. Fukui, A. Bamba, ”Study of the origin of the azimuthal variation of synchrotron X-ray spectrum from SNR RX J0852.0-4622”, PASJ, in press
- [4] H.Matsushashi, et.al., ”Evaluation of the X-ray SOI pixel detector with the on-chip ADC”, NIMA, 1064, 169426 (2024)
- [5] Ichihashi, Masahiro, Bamba, Aya, Kato, Yuichi, Katsuda, Satoru, Suzuki, Hiromasa, Kasuga, Tomoaki, Odaka, Hirokazu, Nakazawa, Kazuhiro, ”Measurement of temperature relaxation in the postshock plasma of the north-western limb of SN 1006”, PASJ, 76, 800 (2024)
- [6] H. Noda, K. Mori, H. Tomida, H. Nakajima, T. Tanaka, H. Murakami, H. Uchida, H. Suzuki, S. B. Kobayashi, T. Yoneyama, K. Hagino, et al., “Soft X-ray Imager of the Xtend system onboard XRISM,” PASJ, in press
- [7] H. Suzuki, T. Yoneyama, S. B. Kobayashi, H. Noda, H. Uchida, K. K. Nobukawa, K. Hagino, et al., “Initial operations of the Soft X-ray Imager onboard XRISM,” JATIS, 11(4), 1–14, 2025

30 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 S. Takakura

- 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 observation. 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 construction and test observations. We are deploying 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. Current our focus is on the analysis of commissioning data of first 2 telescopes at Chile site and on fabrication of the 4th 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.

31 Takeuchi Group

Research Subjects: Experimental statistical physics for non-equilibrium systems

Members: Kazumasa A. Takeuchi, Daiki Nishiguchi, Yuya Karita

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, through such keywords as active matter, non-equilibrium phase transitions, topology, etc. More specifically, we carried out the following projects among others in the academic year 2023:

(1) Non-equilibrium phenomena in soft matter systems

- (1-1) Rigidity transition of a highly compressible granular medium [3]
- (1-2) Model experiment of stochastic particle transport
- (1-3) Direct observation of reconnecting liquid-crystalline topological defects [1]
- (1-4) Rheotaxis of self-propelled colloid

(2) Non-equilibrium phenomena in living systems

- (2-1) Active matter phases in bacteria [2, 5]
- (2-2) Route to turbulence for collective motion of bacteria [6]
- (2-3) Seeking for a topological mode in active matter
- (2-4) Physical origin of heterogeneity in bacterial biofilms
- (2-5) Model experimental system of porous soil for studying microbial life therein
- (2-6) Collective state of magnetotactic bacteria
- (2-7) Collective motion of animals as anti-predator behavior

(3) Theoretical approaches

- (3-1) Kardar-Parisi-Zhang universality class in integrable spin chains [4]
- (3-2) Capturing spatiotemporal chaos by reservoir computing

More detailed information can be found at the group's website, <https://lab.kaztake.org/>

References

- [1] Y. Zushi, C. D. Schimming, K. A. Takeuchi, Approach and rotation of reconnecting topological defect lines in liquid crystal. *Phys. Rev. Res.* **6**, 023284 (2024).
- [2] H. Lama, M. J. Yamamoto, Y. Furuta, T. Shimaya, K. A. Takeuchi, Emergence of bacterial glass. *PNAS Nexus* **3**, pga238 (2024).
- [3] S. Poincloux, K. A. Takeuchi, Rigidity transition of a highly compressible granular medium. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **121**, e2408706121 (2024).
- [4] K. A. Takeuchi, K. Takasan, O. Busani, P. L. Ferrari, R. Vasseur, J. De Nardis, Partial yet definite emergence of the Kardar-Parisi-Zhang class in isotropic spin chains. *Phys. Rev. Lett.* **134**, 097104 (2025).
- [5] T. Shimaya, F. Yokoyama, K. A. Takeuchi, Smectic-like bundle formation of planktonic bacteria upon nutrient starvation, *Soft Matter* **21**, 2868-2881 (2025).
- [6] D. Nishiguchi, S. Shiratani, K. A. Takeuchi, I. S. Aranson, Vortex reversal is a precursor of confined bacterial turbulence. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **122**, e2414446122 (2025).

32 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 prepared a project to apply this technology to advanced semiconductor manufacturing processes, and our proposal has been approved and decided to begin in fiscal year 2025.

KAGRA project

Almost ten years have already passed since gravitational waves were actually detected. The number of events detected to date reaches 200 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 has joined the first part of the international joint observation called O4a which began on May 24, 2023 and ended January 16, 2024. It is a very unfortunate matter, but KAGRA was significantly affected by the Noto Earthquake in January 2024. At present, it has finally recovered from the damage, and its sensitivity has greatly improved.

33 Konishi Group

Research Subjects: Metasurface, Metamaterials, Nonlinear optics, Laser processing

Member: Kuniaki Konishi and Haruyuki Sakurai

We are investigating new physical phenomena caused by the interaction of light with nano- and micro-scale ultra-fine artificial structures fabricated by state-of-the-art microfabrication techniques, and their application to optical control. Furthermore, based on condensed matter physics, we are exploring the scientific principles of laser processing to understand why light can break things and are developing new methods for fabricating micro three-dimensional structures using state-of-the-art ultrashort pulsed lasers.

As a member of UTokyo Research Institute for Photon Science and Laser Technology, we are also working to create a new system for the rapid transfer of new technologies developed by our laboratory to the real industry.

Exploration of new phenomena and the physics of artificial nanostructures and their application to optical control

Artificial nanostructures that are smaller than the wavelength of light can be used to create new physical phenomena and to control light based on the new concept of manipulating the interaction with light through the “shape” of appropriately designed nanostructures. We are exploring new phenomena in such artificial nanostructures, elucidating their mechanisms, and applying them to light sources. In particular, we are aiming to apply our light source to the vacuum ultraviolet region with wavelengths below 200 nm and terahertz waves with frequencies near 1 THz, which are in need of the development of control methods.

Creation of micro three-dimensional structures by ultrashort pulse laser and their application to electromagnetic wave control

It is a well-known fact that when a material is exposed to intense laser light, the material is destroyed. Recent advances in laser technology have made it possible to generate intense and stable ultrashort pulsed lasers that can not only drill and cut objects, but also fabricate micron-order fine three-dimensional (3D) structures that are difficult to fabricate by other methods. Since the structures fabricated by such advanced technology are smaller than electromagnetic waves, such as millimeter waves and terahertz waves, they can be utilized as functional materials for new electromagnetic wave control by fabricating appropriate structures. In this research, we are developing such laser-based 3D structure fabrication technology and at the same time, developing new functional materials using such technology, and we recommend its application to various fields such as astrophysics and next-generation wireless technology (Beyond 5G and 6G).

Elucidating the Principles of Laser Processing

It is a well-known fact that when a material is exposed to intense laser light, the material is destroyed, and in fact, laser processing is an important fundamental technology that supports the current industry. On the other hand, the mechanism by which ultrashort laser pulses, in particular, cause material destruction remains unclear. When intense pulsed light that causes material destruction is incident on a material, what kind of process is used to transfer the energy of the light to the material? How does this energy propagate through the electron and lattice systems inside the material, and what triggers the dramatic and irreversible phenomenon of destruction? To find answers to these questions, we have developed state-of-the-art optical control techniques and various measurement methods, and are conducting research by making full use of these techniques. Through this research, we aim not only to elucidate the mechanism of laser-induced material destruction but also to use this knowledge to advance laser processing technology further.

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. Segment-specific axon guidance by Wnt/Fz signaling diversifies motor commands in *Drosophila* larvae

Functional diversification of homologous neuronal microcircuits is a widespread feature observed across brain regions as well as across species, while its molecular and developmental mechanisms remain largely unknown. We address this question in *Drosophila* larvae by focusing on segmentally homologous Wave command-like neurons, which diversify their wiring and function in a segment-specific manner. Anterior Wave (a-Wave) neurons extend axons anteriorly and connect to circuits inducing backward locomotion, whereas posterior Wave (p-Wave) neurons extend axons posteriorly and trigger forward locomotion. Here, we show that Frizzled receptors DFz2 and DFz4, together with the DWnt4 ligand, regulate the segment-specific Wave axon projection. DFz2 knock-down (KD) not only reroutes Wave axons to posterior neuromeres but also biases its motor command to induce forward instead of backward locomotion as tactile response. Thus, segment-specific axon guidance diversifies the function of homologous command neurons in behavioral regulation. Since control of anterior-posterior (A-P) axon guidance by Wnt/Fz-signaling is evolutionarily conserved, our results reveal a potentially universal molecular principle for formation and diversification of the command system in the nerve cord. Furthermore, this work indicates that sensorimotor transduction can be rerouted by manipulating a single gene in a single class of neurons, potentially facilitating the evolutionary flexibility in action selection.

2. Synchronous multi-segmental activity between metachronal waves controls locomotion speed in *Drosophila* larvae

The ability to adjust the speed of locomotion is essential for survival. In limbed animals, the frequency of locomotion is modulated primarily by changing the duration of the stance phase. The underlying neural mechanisms of this selective modulation remain an open question. Here, we report a neural circuit controlling a similarly selective adjustment of locomotion frequency in *Drosophila* larvae. *Drosophila* larvae crawl using peristaltic waves of muscle contractions. We find that larvae adjust the frequency of locomotion mostly by varying the time between consecutive contraction waves, reminiscent of limbed locomotion. A specific set of muscles, the lateral transverse (LT) muscles, co-contrast in all segments during this phase, the duration of which sets the duration of the interwave phase. We identify two types of GABAergic interneurons in the LT neural network, premotor neuron A26f and its presynaptic partner A31c, which exhibit segmentally synchronized activity and control locomotor frequency by setting the amplitude and duration of LT muscle contractions. Altogether, our results reveal an inhibitory central circuit that sets the frequency of locomotion by controlling the duration of the period in between peristaltic waves. Further analysis of the descending inputs onto this circuit will help understand the higher control of this selective modulation.

References

- [1] S. Takagi, S. Takano, Y. Hashimoto, S. Morise, X. Zeng, A. Nose. Segment-specific axon guidance by Wnt/Fz signaling diversifies motor commands in *Drosophila* larvae. *eLife* (2024)
- [2] Y. Liu, E. Hasegawa, A. Nose, FM. Zwart, H. Kohsaka. Synchronous multi-segmental activity between metachronal waves controls locomotion speed in *Drosophila* larvae. *eLife* **12**:e83328 (2023)

35 Okada Group

Research Subjects: Biophysics, cell biology, super-resolution microscopy, live cell imaging and single molecule imaging.

Member: Yasushi Okada, Sawako Enoki and Keigo Ikezaki

At the heart of our research lies the fundamental question, 'What is life?'. We believe that to answer this question, we must bridge the gap between the world of molecules and living cells. Direct measurement of molecules in living cells is crucial in this endeavor. Therefore, we have been tirelessly developing 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 leading technologies we have developed to address this profound question.

This year, we achieved several significant breakthroughs in our research. We developed a generalized design strategy for fluorescence lifetime biosensors using mTurquoise2, enabling quantitative measurements of small molecules such as ATP, cAMP, citrate, and glucose in living cells ([9]). This design approach addresses the challenges of traditional biosensors by offering better quantitation and multi-target detection capabilities.

In collaboration with the Miyawaki laboratory at RIKEN, we continued our work on super-photostable fluorescent proteins. Zhang from our laboratory demonstrated that fusion proteins of the monomeric, photostable green fluorescent protein mStayGold with various cellular proteins do not adversely affect protein localization or function. These fusion proteins enable super-resolution imaging techniques, including stimulated emission depletion (STED) microscopy, with unprecedented observation duration.

Addressing the limitations of fluorescence microscopy, particularly for light-sensitive samples such as iPS cells, Inutsuka developed a label-free imaging method called polarization-based differential phase contrast (pDPC) ([11]). This technique achieves approximately 100 nm spatial resolution and 8 ms/frame temporal resolution, comparable to our previously developed spinning disk super-resolution fluorescence microscope. The pDPC method successfully visualized dynamic subcellular structures such as ER and mitochondrial

cristae in living cells without fluorescent labeling. Furthermore, Kondratiev and Inutsuka demonstrated the application of machine learning to pDPC images for automated cell cycle classification ([12]).

In the area of single-molecule analysis, Takanami, in collaboration with the Kabashima laboratory, developed a novel algorithm combining Expectation-Maximization and particle filtering to detect shape anisotropy from individual molecular trajectories ([3]). This method overcomes the limitations of traditional approaches by extracting shape information from experimentally feasible trajectory lengths, offering new insights into the conformational states of biomolecules in living cells.

- [1] Tran NV, *et al.*, α -Spectrin regulates cell shape changes during disassembly of microtubule-driven protrusions in *Drosophila* wings. *MicroPubl Biol.* **2024**, 10.17912/micropub.biology.001169 (2024).
- [2] Louder MIM, *et al.*, Transient sensorimotor projections in the developmental song learning period. *Cell Rep.* **43**, 114196 (2024).
- [3] Takanami K, *et al.*, Detection of diffusion anisotropy from an individual short particle trajectory. *Phys Rev Res* **6**, 033272 (2024).
- [4] Kobayashi TA, *et al.*, Dimeric transport mechanism of human vitamin C transporter SVCT1. *Nat Commun.* **15**, 5569 (2024).
- [5] Katoh TA, *et al.*, BMP4 regulates asymmetric Pkd2 distribution in mouse nodal immotile cilia and ciliary mechanosensing required for left-right determination. *Developmental Dynamics.* **2024**, 1-14 (2024).
- [6] Kubo S, Okada Y, Takada S. Theoretical insights into rotary mechanism of MotAB in the bacterial flagellar motor. *Biophys J.* **123**, 3587-3599 (2024).
- [7] Saji T, *et al.*, KIF1C facilitates retrograde transport of lysosomes through Hook3 and dynein. *Commun Biol.* **7**, 1305 (2024).
- [8] Shibuya R, *et al.*, Nucleic Acid-Rich Stress Granules Are Not Merely Crowded Condensates: A Quantitative Raman Imaging Study. *Anal Chem.* **96**, 17078-17085 (2024).
- [9] Zhong C, Arai S, Okada Y. Development of fluorescence lifetime biosensors for ATP, cAMP, citrate, and glucose using the mTurquoise2-based platform. *Cell Rep Methods.* **4**, 100902 (2024).
- [10] Kubo S, Okada Y. The ATPase asymmetry: Novel computational insight into coupling diverse FO motors with tripartite F1. *Biophys J.* **124**, 891-900 (2025).
- [11] Inutsuka Y, *et al.*, Single-shot label-free nanoscopy for quantitative organelle visualization on standard commercial microscopes. *bioRxiv.* **2024.12.31.630894** (2025).
- [12] Kondratiev AY, Inutsuka Y, Okada Y. Continuous Cell Cycle Representation Using Ordinal Regression and Siamese Network from Quantitative Phase Images. 2024 IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), 1-5 (2024).

36 Furusawa Group

Research Subjects: Theoretical Biophysics, Evolutionary Biology, Complex Systems

Member: Chikara Furusawa and Yusuke Himeoka

Biological systems have both robustness and plasticity, a property that distinguishes them from artificial systems and is essential for their survival. Biological systems exhibit robustness to various perturbations, including noise in gene/protein expressions and unexpected environmental changes. Simultaneously, they are plastic to the surrounding environment, changing their state through processes such as adaptation, evolution and cell differentiation. Although the coexistence of robustness and plasticity can be understood as a dynamic property of complex and interacting networks consisting of a large number of components, the mechanisms responsible for the coexistence are largely unknown.

Our work extracts the universal features of cellular dynamics responsible for robustness and plasticity in biological systems. We describe the systems using a relatively small number of degrees of freedom with the macroscopic state variables. We expect that such a description will provide novel methods for the prediction and control of complex biological systems.

The current research topics in our group are followings:

1. Laboratory evolution of bacterial cells to analyze dynamics of phenotype-genotype mappings
2. Construction of macroscopic state theory describing adaptation and evolution of biological systems
3. Theoretical analysis of evolutionary process under dynamically changing environments
4. Metabolic simulation for understanding growth, lag-phase, and death.

References

- [1] Development of specialized devices for microbial experimental evolution. Shibai A, Furusawa C. *Dev Growth Differ.* 2024, 66(7):372-380.
- [2] Promoters constrain evolution of expression levels of essential genes in *Escherichia coli*. Tsuru S, Hatanaka N, Furusawa C. *Mol Biol Evol.* 2024, msae185.
- [3] Roles of network topology in the relaxation dynamics of simple chemical reaction network models. Himeoka Y, Kirkegaard JB, Mitarai N, Krishna S. *Sci Rep.* 2024, 14(1):22187.
- [4] *Yamadazyma thunbergiae* sp. nov., a novel yeast species associated with Bengal clock vines and soil in Okinawa, Japan. Seike T, Takekata H, Sakata N, Furusawa C, Matsuda F. *Int J Syst Evol Microbiol.* 2024, 74(10).
- [5] Bioinformatic analysis reveals the association between bacterial morphology and antibiotic resistance using light microscopy with deep learning. Ikebe M, Aoki K, Hayashi-Nishino M, Furusawa C, Nishino K. *Front Microbiol.* 2024, 15:1450804.
- [6] Theoretical basis for cell deaths. Himeoka Y, Horiguchi SA, Kobayashi TJ. *Phys Rev Res.* 2024, 6(4):043217.
- [7] Growth inhibition by ppc deletion is rescued by isocitrate dehydrogenase mutations in *Escherichia coli*. Toya Y, Imada T, Ishibashi M, Kawamoto Y, Isshiki K, Shibai A, Furusawa C, Shimizu H. *FEMS Microbiol Lett.* 2025, 372:fnaf013.
- [8] Discovery and identification of a novel yeast species, *Hanseniaspora drosophilae* sp. nov., from *Drosophila* in Okinawa, Japan. Seike T, Takekata H, Kono K, Sakata N, Kotani H, Furusawa C, Matsuda F. *Int J Syst Evol Microbiol.* 2025, 75(2).
- [9] Genetic properties underlying transcriptional variability across different perturbations. Tsuru S, Furusawa C. *Nature Commun.* 2025, 16(1):2421.
- [10] Quantitative analysis of relationship between mutation rate and speed of adaptation under antibiotic exposure in *Escherichia coli*. Shibai A, Izutsu M, Kotani H, Furusawa C. *PLoS Genet.* 2025, 21(3):e1011627.
- [11] Perturbation-response analysis of in silico metabolic dynamics: Hard-coded responsiveness in the cofactors and network sparsity. Himeoka Y, Furusawa C. *eLife*, in press
- [12] Kimura R, Sato S, Wang S, Takahashi Y, Nishiwaki R, Shibai A, Furusawa C. Complete Genome Sequence of a Bacterial Strain, *Kurthia intestinigallinarum*, *Microb. Res. Ann.*, in press
- [13] Laboratory evolution of the bacterial genome structure through insertion sequence activation, Kanai Y, Shibai A, Yokoi N, Tsuru S, Furusawa C. *Nucleic Acids Res.*, in press

37 Kawaguchi Group

Research Subjects: Biophysics

Member: Kyogo Kawaguchi, Shunshi Kohyama

The Kawaguchi group aims to elucidate diverse biological and physical phenomena from a physical perspective. Currently, the lab investigates a wide range of topics, from intracellular phenomena and cell populations to biological evolution and emergent phenomena in AI, through theoretical approaches, numerical simulations, data analysis, and collaboration with experiments.

The main research themes for the current fiscal year are as follows:

- **Patterns and evolution of vertebral counts in tetrapods:** Vertebral counts are crucial evolutionary indicators, likely involving Hox genes, though details remain unclear. Analysis of data from 388 tetrapod species confirmed known patterns (e.g., constancy in thoracic/lumbar counts) and discovered new ones, such as correlations between distant regions (cervical-sacral) and avian-specific anterior-posterior balance relationships. Connections between vertebral counts and Hox gene structure were also demonstrated.
- **Theory for predicting intracellular molecular assemblies:** Proteins and RNA assemble into droplet-like structures (membraneless organelles) via liquid-liquid phase separation (LLPS). We constructed a simulation-based theoretical model to predict interactions, particularly for intrinsically disordered regions (IDRs), that drive this formation. Furthermore, we proposed indicators to predict mixing or separation between different IDR sequences and showed that there might be an upper limit to the variety of droplet types that can coexist within a cell.
- **Chromatin structure and histone modifications:** Chromatin structure within the cell nucleus is regulated by histone modifications such as acetylation, but the detailed mechanisms are not fully understood. Using experiments with reconstituted chromatin, we revealed that acetylation increases structural fluctuations, leading to a more open chromatin state. We also showed that these modification patterns alone can reproduce structures similar to those observed in vivo.
- **Membrane phase separation and protein dynamics in bacterial cell division:** Bacterial cell membranes contain specific lipid regions (membrane domains) where proteins accumulate during division. Using artificial cell membranes (GUVs) to replicate membrane phase separation states, we clarified that proteins select specific membrane domains and form patterns. Moreover, we uncovered a bidirectional interaction where protein assembly, in turn, reorganizes the membrane structure.
- **Percolation model for emergent phenomena in neural networks:** In large-scale neural networks, new abilities can suddenly appear ("emergent phenomena") once model size exceeds a certain threshold. Noting the similarity to phase transitions in physics, we conducted experiments training networks on artificial languages, showing a strong correlation between the acquisition of grammatical rules and rapid improvements in task performance. We further explained this phenomenon theoretically using a percolation model from physics, demonstrating its ability to predict scaling laws related to the amount of training data.
- **Universality of dynamical phase transitions in Brownian motion:** We provided the first demonstration that "dynamical phase transitions," phenomena characteristic of non-equilibrium systems, exist universally in the fundamental stochastic process of Brownian motion. For instance, we theoretically proved that particles undergo a first-order phase transition between localized and delocalized states when the spatial dimension exceeds four. We also showed that even in one-dimensional systems, a second-order dynamical phase transition can occur by carefully choosing the observable. These findings offer new perspectives for understanding non-equilibrium statistical mechanics and diffusion models in AI.

III

2024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 速度の変換と合成

1.5 種々の相対論的効果

2. 相対論的力学

2.1 Lorentz スカラー・ベクトル・テンソル

2.2 相対論的運動量とエネルギー

2.3 相対論的力学

2.4 相対論的運動学

3. 電磁気学

3.1 Coulomb の法則と Gauss の法則

3.2 スカラーポテンシャル

3.3 磁場の満たす方程式

3.4 ベクトルポテンシャル

3.5 静電磁場のまとめ

3.6 電磁場の Lorentz 変換

3.7 Maxwell 方程式

4. 電磁気学の共変的な形式

4.1 電磁場テンソル

4.2 4元電流密度と連続の方程式

4.3 電磁ポテンシャルと Maxwell 方程式

4.4 電磁場テンソルと Maxwell 方程式

5. 電磁場中の粒子の運動

5.1 電磁場中の運動方程式

5.2 一様な静電場中の運動

5.3 一様な静磁場中の運動

5.4 一様な静電磁場中の運動

5.5 非一様な静電磁場中の運動

6. 電磁場のエネルギーと運動量

6.1 電磁場のエネルギーと Poynting の定理

6.2 電磁場の運動量と Maxwell の応力テンソル

6.3 電磁場のエネルギー・運動量テンソル

6.4 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 古典論とその結び
 - 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 : 北川 健太郎, 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 | 5.2 エレクトロニクス |
| 3.2 確率統計 | 5.3 X線回折 |
| 4. 計測法 | 5.4 極限実験技術 |
| 4.1 電磁波の計測 | 6. データ解析と可視化 |
| 4.2 温度の計測 | 6.1 グラフ作成 |
| 4.3 距離の計測 | 6.2 非線形最小自乗法 |
| 4.4 その他の計測 | 6.3 逆問題 |
| 5. 実験の基礎技術 | 7. 実験レポートや論文を書く上での注意事項 |
| 5.1 真空技術 | |

1.1.5 物理学演習 II (解析力学、量子力学 I) : 常行 真司、日下 暁人、田島 裕之、森脇 可奈

- | | |
|--------------------------------|------------------------------------|
| 1. 解析力学 | 1.19 古典可積分系 |
| 1.1 運動エネルギー、位置エネルギーと仮想仕事 | 2. 量子力学 |
| 1.2 一般化座標 | 2.1 黒体放射 |
| 1.3 振りの運動 | 2.2 ボーアの量子模型 |
| 1.4 汎関数の極値問題 | 2.3 デバイ模型 |
| 1.5 二重振り子 | 2.4 波動方程式からシュレーディンガー方程式の導出 |
| 1.6 ばねの振動 | 2.5 シュレーディンガー方程式 |
| 1.7 ビリアル定理 | 2.6 2重スリットを通過する電子線 |
| 1.8 ラグランジュ未定乗数法 | 2.7 シュレーディンガー方程式の古典極限とハミルトン-ヤコビ方程式 |
| 1.9 保存量 | 2.8 デルタ関数型ポテンシャル |
| 1.10 拘束問題 | 2.9 エネルギー固有状態 |
| 1.11 時間に陽に依存するラグランジアン | 2.10 波束を用いた波動関数の記述 |
| 1.12 分子振動 | 2.11 粒子の反射 |
| 1.13 対称性と保存量 | 2.12 2重デルタ関数型ポテンシャル障壁の透過と反射 |
| 1.14 電磁場中の荷電粒子の運動 (サイクロトロン共鳴等) | 2.13 ブロッホの定理 |
| 1.15 正準変換を用いた方程式積分 | 2.14 調和振動子 |
| 1.16 ポアソン括弧 | 2.15 線形ポテンシャルとエアリー関数 |
| 1.17 ハミルトン-ヤコビ方程式 | 2.16 ベイカー-キャンベル-ハウスドルフの公式 |
| 1.18 リウビルの定理 | |

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：部分分数展開、 Γ 、 B 、 ζ 、など****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 : 松尾 泰****1. Fourier 級数と Fourier 変換****1.1 Fourier 級数****1.2 Fourier 変換****2. Fourier 級数・変換を用いた偏微分方程式の解法****2.1 偏微分方程式の分類****2.2 Poisson 方程式****2.3 熱伝導方程式****2.4 波動方程式****2.5 Green 関数****3. 直交多項式****3.1 分類****3.2 直交多項式の存在と一意性****3.3 Rogrigues の公式****3.4 直交多項式が満たす微分方程式****3.5 規格化因子****3.6 母関数****3.7 漸化式****4. 直交多項式と対称性****4.1 調和振動子と Hermite 多項式****4.2 Legendre 陪関数****4.3 球面調和関数と角運動量代数****5. Bessel 関数****5.1 基本的な性質****5.2 波動関数と Bessel 関数****5.3 Bessel 関数の直交性****5.4 積分表示と漸近形****6. 超幾何関数****6.1 微分方程式の級数解と確定特異点****6.2 超幾何関数****6.3 Riemann の P 関数と特異点の合流****6.4 積分表示****6.5 接続公式****1.1.8 物理学演習 I (電磁気学 I, 物理数学 I, II) : 横山将志, 濱口幸一, 松尾泰, 永田夏海, 横溝和樹****1.****1.1 Julia 集合・Mandelbrot 集合****1.2 正則関数の性質****1.3 Michelson-Morley の実験****2.****2.1 Galilei 変換****2.2 リーマン球面****2.3 複素微分と吸引的不動点・周期点****2.4 速度の合成と超光速運動****3.****3.1 Cauchy-Riemann の関係式****3.2 収束半径****3.3 Lorentz 変換****3.4 Lorentz 収縮に関するパラドックス**

- 4.
 - 4.1 光行差
 - 4.2 コーシーの積分公式の応用
 - 4.3 孤立特異点とローラン展開
 - 4.4 Doppler 効果
- 5.
 - 5.1 Fresnel 積分
 - 5.2 解析接続
 - 5.3 留数積分（実積分への応用 I）
 - 5.4 留数積分（分岐線がある場合）
 - 5.5 粒子の崩壊
- 6.
 - 6.1 斜交座標系における反変・共変ベクトル
 - 6.2 定積分の計算
 - 6.3 ベータ関数
 - 6.4 Lorentz 変換の一般論
- 7.
 - 7.1 Fourier 級数展開
 - 7.2 Fourier 変換の応用
 - 7.3 熱伝導方程式（拡散方程式）
 - 7.4 相対論的質点の運動と作用汎関数
- 8.
 - 8.1 電磁場の Lorentz 変換
 - 8.2 2次元 Laplace 方程式の境界値問題
 - 8.3 自己共役微分演算子と Green 関数
 - 8.4 相対論的動力学
- 9.
 - 9.1 Chebyshev 多項式
 - 9.2 Legendre 多項式
 - 9.3 Hermite 多項式
 - 9.4 電磁ポテンシャルと対称性
- 10.
 - 10.1 Zeeman 効果
 - 10.2 水素原子の対称性
 - 10.3 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？
文する；名詞；Questions about the Universe
- 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；The Spectrum and “Coloured” Light
- 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；What is Science？
- 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；Benjamin Franklin
- 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；Thomas A. Edison
- 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；Inventions Essential for Research
- 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；Questions about the Universe
- 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；The Story of Silent Spring
- 9. 機械翻訳を用いた英語論文作成法、辞書の使い方、参考文献；短い簡潔な文を書く；Graphene
- 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；Our Galaxy
- 11. 通じる英語のしゃべり方 2；連結語を使う；Volcanoes
- 12. 通じる英語のしゃべり方 3；不必要な単語は省く；The Internet
- 13. 英語口頭発表での注意点；日本人に多い間違いを直す；Artificial Intelligence (AI)

1.2 3年生 Sセメスター

1.2.1 電磁気学 II : 中辻 知

- | | |
|----------------|--------------|
| 1. Maxwell 方程式 | 6. 物質中の電磁波 |
| 2. 保存則 | 7. 準定常電流と伝送線 |
| 3. 物質中の静電場 | 8. 平面波の反射と透過 |
| 4. 物質中の静磁場 | 9. 導波路と光回路 |
| 5. 真空中の電磁波 | |

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 | 4. エレクトロニクス I：中島 康博、小貫 良行 |
| 2. 真空技術：岡本 徹、枡富 龍一 | 5. エレクトロニクス II：馬場彩、萩野 浩一 |
| 3. X 線回折：島野亮、吉川尚孝、高木英典、
北川健太郎、平岡奈緒香 | |

1.2.3 量子力学 II : 村尾 美緒

- | | |
|-------------------------------|---------------------------------|
| 1. 軌道角運動量 | 3.2 三次元調和振動子 |
| 1.1 波動関数を用いた量子力学の復習 | 3.3 水素原子 |
| 1.2 中心場の定常状態の Schrödinger 方程式 | 4. 摂動論 |
| 1.3 軌道角運動量 | 4.1 時間によらない摂動 縮退の無い場合 |
| 1.4 球面調和関数 | 4.2 時間によらない摂動 縮退のある場合 |
| 2. 角運動量の一般論 | 4.3 時間による摂動 |
| 2.1 ブラ・ケットを用いた量子力学の復習 | 4.4 WKB 近似 |
| 2.2 角運動量の一般化 | 5. スピン角運動量と量子力学の本質 (量子ビットの量子力学) |
| 2.3 角運動量の合成 | 5.1 量子ビットの量子力学 |
| 3. 中心場中の Schrödinger 方程式の解 | 5.2 測定演算子と密度演算子 |
| 3.1 動径部分の Schrödinger 方程式の一般論 | |

1.2.4 物理学演習 III (量子力学 II、電磁気学 II) : 赤城 裕、高三 和晃

- | | |
|----------------------------------|--|
| 1. 量子力学 | 1.5 極座標表示での Schrödinger 方程式の解法, 合流型超幾何関数 |
| 1.1 量子力学 I の復習, Gauss 波束, 不確定性関係 | 1.6 時間に依存しない摂動 |
| 1.2 対称性と保存則 | 1.7 時間に依存しない摂動 (縮退のある場合) |
| 1.3 角運動量の合成 | 1.8 時間に依存する摂動 |
| 1.4 極座標系と角運動量, スピン演算子, 球面調和関数 | 1.9 変分法 |

- | | |
|----------------------------------|---------------------|
| 1.10 ベルの不等式の破れ | 2.4 静電場, 誘電体中の境界値問題 |
| 1.11 量子テレポーテーション | 2.5 静磁場, 定常電流, 磁性体 |
| 2. 電磁気学 | 2.6 準定常電流, 導体内の電磁波 |
| 2.1 Maxwell 方程式の性質, ベクトル解析 | 2.7 電磁波の反射・屈折 |
| 2.2 Poisson 方程式, 鏡像法 | 2.8 物質中の電磁波 |
| 2.3 Laplace 方程式, Green 関数, 多重極展開 | |

1.2.5 現代実験物理学 I : 岡田 康志, 林 将光

- | | |
|--|----------------|
| 1. 顕微鏡光学系の基礎
幾何光学、結像理論 | 6.4 成膜 |
| 2. 弱位相物体観察
位相差顕微鏡、微分干渉顕微鏡、ホログラフィー
顕微鏡など | 6.5 薄膜評価技術 |
| 3. 蛍光・散乱光観察
暗視野顕微鏡、(超解像) 蛍光顕微鏡、干渉散乱
顕微鏡 (iSCAT) など | 6.6 微細加工 |
| 4. 多光子顕微鏡と量子計測
多光子励起顕微鏡、量子もつれの応用など | 7. 構造解析 |
| 5. 顕微鏡のデジタルトランスフォーメーション
コンピューショナル・マイクロスコープ | 7.1 結晶構造 |
| 6. 真空技術 | 7.2 逆格子空間 |
| 6.1 気体分子の運動 | 7.3 物質からの散乱と回折 |
| 6.2 真空装置 | 7.4 電子線回折 |
| 6.3 排気ポンプ | 8. 磁気共鳴 |
| | 8.1 磁気モーメント |
| | 8.2 運動方程式 |
| | 8.3 磁気緩和 |
| | 8.4 磁気共鳴 |
| | 8.5 強磁性共鳴 |
| | 8.6 核磁気共鳴 |

1.2.6 計算機実験 I : 藤堂 眞治、山崎 隼汰、石河 孝洋

- | | |
|------------------|-------------------|
| 1. 計算機実験の基礎 | 2.2 陽解法と陰解法 |
| 1.1 講義・実習の概要 | 2.3 Numerov 法 |
| 1.2 環境整備 | 2.4 固有値問題 |
| 1.3 数値誤差 | 2.5 シンプレクティック積分法 |
| 1.4 ニュートン法 | 3. 連立一次方程式 |
| 1.5 二分法 | 3.1 物理に現れる連立一次方程式 |
| 1.6 囲い込み法 | 3.2 連立一次方程式の直接解法 |
| 2. 常微分方程式 | 3.3 連立一次方程式の反復解法 |
| 2.1 常微分方程式の初期値問題 | 4. 行列の対角化 |

4.1 密行列の対角化

4.2 疎行列に対する反復法

4.3 特異値分解

4.4 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：寺師 弘二

1. 量子コンピュータに触れる

1.1 量子計算の基礎、量子回路、ゲート

1.2 CHSH 不等式の破れを確認する

1.3 実習：回路を実機で実行する

2. 量子回路の実装

2.1 Qiskit の基本構造を学ぶ

2.2 量子計算のプログラミング

2.3 実習：シミュレータ・実機での実行

3. 超並列計算機としての量子コンピュータ

3.1 量子フーリエ変換による足し算

3.2 量子系のダイナミクスシミュレーション

3.3 実習：ハイゼンベルグモデルの時間発展

4. ショアのアルゴリズム

4.1 量子位相推定とは

4.2 アルゴリズム本体を学ぶ

4.3 実習：シミュレータでの実行

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 アルゴリズム本体を幾何学的に学ぶ

5.3 実習：シミュレータと実機での実行

6. 変分法と変分量子固有値ソルバー

6.1 変分法と変分量子固有値ソルバー法を学ぶ

6.2 パラメータの最適化

6.3 実習：変分量子アルゴリズムの実習

7. 量子・古典ハイブリッドによる機械学習

7.1 機械学習と深層学習について

7.2 変分量子アルゴリズムによる機械学習

7.3 実習：素粒子物理への応用

8. 演習

8.1 量子誤り耐性の基礎

8.2 量子化学計算への応用

8.3 組み合わせ最適化の問題

9. 超伝導量子コンピュータの仕組みと操作

9.1 回路量子電磁力学の基礎を学ぶ

9.2 超伝導量子ビットとは

9.3 量子ビットの操作と読み出し

9.4 実習：量子コンピュータの操作を体験する

10. 超伝導量子コンピュータの実機環境

10.1 超伝導量子ビットの製作

10.2 希釈冷凍機、マイクロ波制御・読み出し系

10.3 量子コンピュータ以外への応用

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 熱平衡と微視的状态
- 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：江尻 晶, 馬場 彩

- 0. 様々な流体
- 1. 流体の基礎方程式
 - 1.1 流体を特徴づける量
 - 1.2 連続の式
 - 1.3 力
 - 1.4 運動方程式
 - 1.5 エネルギー方程式
 - 1.6 粒子の方程式から流体の方程式へ
 - 1.7 渦度と渦度方程式
- 2. 関数による流れの表現
 - 2.1 ポテンシャル流
 - 2.2 複素速度ポテンシャル
 - 2.3 等角写像とクッタ・ジューコフスキー変換
- 3. 粘性流
 - 3.1 レイノルズ数
 - 3.2 ストークス近似
 - 3.3 一様等方乱流
 - 3.4 コルモゴロフ則の問題点と改良

- 4. 水波
 - 4.1 長い波
 - 4.2 表面波
 - 4.3 表面張力波
- 5. 不安定性
 - 5.1 分類と安定性解析
 - 5.2 ケルビン・ヘルムホルツ不安定性
 - 5.3 レイリー・テイラー不安定性
- 6. 拡散とブラウン運動
 - 6.1 拡散方程式とランダムウォーク
 - 6.2 ブラウン運動
 - 6.3 ランジュバン方程式
 - 6.4 揺動散逸定理
- 7. その他
 - 7.1 分子粘性と乱流粘性
 - 7.2 電磁流体
 - 7.3 揚力

1.2.10 物理学演習 IV (統計力学 I、II) : 小林 研介、竹内 一将、中川 大也、松浦 弘泰

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

5.4 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: 石野雅也、石田明、神谷好郎

2. メスバウア効果: 日下暁人、高倉理

3. 原子核散乱: 中村 哲、永尾 翔

4. 低温: 小林 研介、佐々木 健人

5. 自動計測制御: 林 将光、河口 真志

6. 電子回折: 長谷川 修司、秋山 了太

7. 量子演算入門: 中辻 知、酒井 明人

8. 相転移: 竹内一将、菊田裕也

9. レーザー: 相川清隆、川崎拓也

10. 生物物理: 川口喬吾、光山隼史、佐伯喜美子

11. 顕微鏡光学系: 岡田 康志、池崎 圭吾、榎 佐和子

12. ブラウン運動: 安東 正樹、小森 健太郎

1.3.2 光学: 三尾 典克, 小西 邦昭

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. ビーム光学

9. 光共振器

10. レーザー

11. 最先端の光学研究

1.3.3 量子力学 III: 辻 直人

1. 電磁場中の荷電粒子の量子力学

1.1 量子力学の復習

- 1.2 電磁場中の荷電粒子
- 1.3 一様磁場中の粒子
- 1.4 一様磁場と一様電場中の粒子
- 1.5 Aharonov-Bohm 効果
- 1.6 Berry 位相
- 1.7 スピンを持つ粒子
- 2. 散乱問題
 - 2.1 散乱断面積
 - 2.2 散乱断面積の量子力学的な扱い
 - 2.3 散乱状態の波動関数が満たす方程式
 - 2.4 Born 近似
 - 2.5 部分波展開
 - 2.6 共鳴散乱
 - 2.7 Coulomb 散乱
- 2.8 Lippmann-Schwinger 方程式
- 3. 多粒子の量子力学
 - 3.1 2 粒子の量子力学
 - 3.2 N 粒子の場合
 - 3.3 ヘリウム原子
 - 3.4 多電子系
- 4. 第二量子化
 - 4.1 調和振動子の復習
 - 4.2 多数の調和振動子
 - 4.3 第二量子化の記法
 - 4.4 ボソン場の演算子
 - 4.5 フェルミオンの扱い
 - 4.6 フェルミオン場の演算子

1.3.4 現代実験物理学 II : 安東 正樹, 中島 康博

- 1. 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
- 2. 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
- 3. 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
- 4. 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
- 5. 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
- 6. 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
- 7. 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

1.3.5 物理学演習 V : 辻 直人, 安東 正樹, 竹内 一将, 山本 新, 福田 朝

- 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 Aharonov-Bohm 効果
 - 1.7 Lyman- α 遷移
 - 1.8 Born 近似
 - 1.9 磁場中の原子
 - 1.10 合流型超幾何関数
 - 1.11 一様磁場中の荷電粒子の縮退度
 - 1.12 放物線座標
 - 1.13 Coulomb 散乱

- 1.14 平面波の展開公式
- 1.15 水素分子
- 1.16 同種類のフェルミ粒子 2 個からなる系
- 1.17 同種粒子の散乱
- 1.18 球対称調和振動子型ポテンシャルのもとでの N 粒子系
- 1.19 同種粒子の多体系と第二量子化
- 1.20 Berry 位相とホール伝導度
- 1.21 Bogoliubov 変換
- 1.22 フェルミオン系と Kramers 縮退
- 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 電磁場中での荷電粒子の運動
 - 2.4 原子の電気双極子モーメント

- 2.5 古典的な原子・分子模型と光ピンセット
- 2.6 遅延ポテンシャル
- 2.7 振動する電荷からの放射
- 2.8 Lienard-Wiechert ポテンシャル
- 2.9 Larmor の公式
- 2.10 磁気双極子放射とパルサー
- 2.11 同軸ケーブル
- 2.12 導波管
- 2.13 電磁場の Lorentz 共変形
- 2.14 ロンドン方程式
- 3. 統計力学
 - 3.1 2次元イジング模型
 - 3.2 線形応答理論
 - 3.3 Langevin 方程式

1.3.6 生物物理学：能瀬 聡直, 川口 喬吾

- 1. 生命現象のミクロとマクロ：分子から個体への階層性
- 2. 遺伝情報の流れ・タンパク質の構造と機能
- 3. 細胞の構造と機能、細胞内相分離現象
- 4. 多細胞現象の理論と実験
- 5. パターン形成
- 6. 確率過程とスケーリング
- 7. アクティブマターとトポロジ
- 8. 組み換え DNA 技術とゲノム科学
- 9. 個体発生と細胞の多様化
- 10. 個体レベルで起こる生命現象の可視化と操作
- 11. 脳・神経系の生物物理 1: 脳神経系における情報の流れ
- 12. 脳・神経系の生物物理 2: 活動電位と H-H 方程式
- 13. 脳・神経系の生物物理 3: 神経ネットワークによる情報処理
- 14. 脳・神経系の生物物理 4: 脳の可塑性と記憶

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
- 5. 回転群
- 6. 点群、結晶群
- 7. 物理への応用
- 8. リー群
- 9. リー群からリー代数へ
- 10. リー代数の表現

1.3.8 固体物理学 I : 林 将光**0. 固体物理学とは****1. 固体の電子状態****1.1 1 粒子ハミルトニアン****1.2 分子軌道法****1.3 平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 結晶構造****1.7 逆格子とブリルアンゾーン****1.8 演算子表示****1.9 グラフェン****1.10 自由電子モデル****1.11 フェルミ面と状態密度****2. 格子振動****2.1 古典論****2.2 格子振動の量子化****2.3 電子格子相互作用****2.4 格子比熱****2.5 熱伝導****3. 電気伝導****3.1 自由電子ガスモデル****3.2 ブロッホの運動方程式****3.3 ボルツマン輸送方程式****3.4 緩和時間****3.5 ベリー曲率****4. 半導体****4.1 バンド構造****4.2 半導体のキャリア統計****4.3 pn 接合****4.4 ヘテロ構造****1.3.9 電磁気学 III : 安東 正樹****1. 電磁波の基礎****1.1 自由電磁場とその性質****2. 電磁波の放射****2.1 遅延ポテンシャルと先進ポテンシャル****2.2 双極子近似****2.3 遅延ポテンシャルの多重極展開****3. 荷電粒子の出す電磁波****3.1 リエナール-ヴィーヘルトのポテンシャル****3.2 運動する荷電粒子の作る電磁波****3.3 制動放射****3.4 点電荷による電磁波の散乱****3.5 チェレンコフ放射****4. 電磁波の伝播****4.1 導波管****4.2 空洞共振器****4.3 電磁波の回折****5. 電磁場の角運動量****1.3.10 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、山崎 隼汰、石河 孝洋

- 1. モンテカルロ法
 - 1.1 講義・実習の概要
 - 1.2 乱択アルゴリズム
 - 1.3 物理過程のシミュレーション
 - 1.4 モンテカルロ積分
 - 1.5 多体系の統計力学
 - 1.6 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 量子回路シミュレーション
- 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
- 3.6 ハミルトニアン・モンテカルロ法
- 4. 最適化問題
 - 4.1 最適化問題
 - 4.2 1次元の最適化 (復習)
 - 4.3 最急降下法と勾配降下法
 - 4.4 共役勾配法
 - 4.5 勾配の計算
 - 4.6 Nelder-Mead の滑降シンプレックス法
 - 4.7 シミュレーテッドアニーリング
 - 4.8 最適化手法の比較

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，数理基礎 (1)
- 2. 数理基礎 (2)
- 3. 回帰と分類 (1)
- 4. 回帰と分類 (2)
- 5. カーネル法 (1)：ガウス過程
- 6. カーネル法 (2)：サポートベクトルマシン
- 7. 多層ニューラルネットワーク (1)

- 8. 多層ニューラルネットワーク (2)
- 9. 主成分分析と因子分析
- 10. クラスタ分析
- 11. 敵対的生成ネットワーク
- 12. 拡散モデル
- 13. トランスフォーマー

1.4.2 場の量子論 I：福嶋 健二

- 1. Introduction
 - 1.1 Analogy from a classical field theory

1.2 Symmetries and the Noether currents**2. Fields****2.1 Lorentz group****2.2 Poincare group****2.3 Scalar, spinor, vector****3. Quantization****3.1 Many-body problem****3.2 scalar field theory****3.3 Discrete symmetries of the scalar field****4. Interaction****4.1 Interacting scalar theory****4.2 Reaction Rates****4.3 Vacuum in the interaction representation****5. Calculus****5.1 Generating functional****5.2 Feynman propagator****5.3 Perturbation in the ϕ^4 theory****5.4 Self-energy and 1PI graphs****5.5 Ultraviolet divergence****5.6 Renormalized perturbation theory****6. Dirac fields****6.1 Dirac equation and free spinor basis****6.2 Discrete symmetries of fermions****6.3 Anti-commutation relation****6.4 Time-ordered product and the Dirac propagator****6.5 Constrained systems****6.6 Dirac's quantization method****7. Vector fields****7.1 Polarization vectors****7.2 Feynman rules in QED****7.3 Compton scattering****8. Applications****8.1 Nambu-Jona-Lasinio model****8.2 Origin of the mass****8.3 Schwinger model (1+1D QED)****8.4 Chiral anomaly****9. Advanced topics****9.1 Non-Abelian gauge theory****9.2 Asymptotic freedom****9.3 Spinor helicity formalism****1.4.3 サブアトム物理学：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、サブアトム物理を俯瞰する

2. 原子核の基本的性質

質量と結合エネルギー

3. ミクロの世界を覗く

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. 大規模疎行列ソルバー入門****4. 第一原理計算による物質科学研究****5. 高性能プログラミングと性能測定****6. 並列 FEM と CAE(Computer Aided Engineering)**

1.4.5 統計力学特論：川島 直輝

- | | |
|---|--|
| 1. Phase transitions, critical phenomena and universality | 8. Operator product expansion |
| 2. Mean-field theory, variational principle, and Landau expansion | 9. Perturbative renormalization group |
| 3. ϕ^4 model and Ornstein-Zernike form | 10. Wilson-Fisher fixed point |
| 4. Ginzburg criterion | 11. Some Applications |
| 5. Migdal-Kadanoff approximation | 12. Berezinski-Kosterlitz-Thouless Transition |
| 6. Fixed-point and scaling operators | 13. Renormalization group in tensor network representation |
| 7. Critical phenomena and renormalization group | 14. Other topics |

1.4.6 現代物理学入門：中島 康博, 川口 喬吾

- | | |
|-------------------------|------------------------|
| 1. ニュートリノを用いた素粒子実験・宇宙観測 | 2. 「知の物理学」序説 |
| 1.1 ニュートリノ研究の歴史 | 2.1 知の物理学的定義 |
| 1.2 ニュートリノ振動の発見・測定 | 2.2 知の生物学・進化学 |
| 1.3 ニュートリノの質量にまつわる実験 | 2.3 知の計算科学 |
| 1.4 ニュートリノと宇宙観測 | 2.4 創発現象とその説明：非平衡系の相転移 |
| | 2.5 知の創発メカニズム |

1.4.7 一般相対論：仏坂 健太

- | | |
|---|---|
| 1. 特殊相対論の復習
重力赤方偏移の実験、ローレンツ変換 | フリードマン方程式、宇宙の熱史、ビッグバン
元素合成 |
| 2. 測地線方程式と粒子の運動
測地線方程式の導出、ニュートン極限、シュ
ヴァルツシルト時空上での運動、重力レンズ | 5. ブラックホール・中性子星
シュヴァルツシルト解、カー解、TOV 方程式、
中性子星 |
| 3. 重力場の方程式
アインシュタイン方程式の導出 | 6. 重力波
重力波の方程式、重力波の伝播、重力波の生成、
コンパクト連星合体からの重力波 |
| 4. 膨張宇宙論 | |

1.4.8 量子光学：上田 正仁

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| 1. 量子力学の基礎 | 7. 量子情報の消去とコヒーレンス |
| 2. 不確定性関係 | 8. 原子と光の相互作用 |
| 3. 測定の理論 | 9. アインシュタイン-ポドルスキー-ローゼン相関 |
| 4. 電磁場の量子化 | 10. 自然放出のワイスコップ-ウィグナー理論 |
| 5. コヒーレント状態、スクイズド状態、位相演算子 | 11. 共振器量子電気力学 |
| 6. 量子干渉効果 | 12. クローン禁止定理、ベルの不等式 |

13. 量子テレポーテーション

14. 量子アルゴリズム

15. 量子暗号

1.4.9 固体物理学 II : 長谷川 修司

1. 物性物理学とノーベル賞

1.1 超伝導・超流動のノーベル賞

1.2 半導体のノーベル賞

1.3 低次元系・トポロジカル系のノーベル賞

2. 半導体

2.1 バンド分散とバンドギャップ

2.2 真性半導体と不純物半導体

2.3 pn 接合とトランジスタ

3. 格子振動と比熱

3.1 格子振動とフォノン

- ・ 1 次元結晶での格子振動
- ・ 3 次元結晶での格子振動
- ・ 光学フォノンと音響フォノン
- ・ 格子振動の量子化とフォノン分光

3.2 比熱

- ・ Dulong-Petit の法則
- ・ 格子比熱 Einstein モデルと Debye モデル
- ・ 電子比熱・熱膨張

3.3 熱伝導

- ・ 熱伝導率
- ・ 熱電効果
- ・ Wiedemann-Franz の法則

4. 超伝導

4.1 超伝導の発見と現象論

- ・ 完全導体とマイスナー効果
- ・ London 方程式

- ・ その他の実験事実
- ・ Ginzburg-Landau 理論

4.2 ミクロな理論

- ・ 電子格子相互作用
- ・ Cooper 対の形成
- ・ BCS 理論
- ・ 臨界電流と臨界磁場
- ・ BCS 規格状態とマイスナー効果

4.3 超伝導の物性

- ・ 磁束の量子化
- ・ 第 1 種・第 2 種超伝導体
- ・ Josephson 効果

5. スピンと磁性

5.1 スピン

- ・ 実験事実
- ・ Dirac 方程式とスピン
- ・ 電子の磁気モーメント

5.2 磁性

- ・ 原子・イオンの磁性
- ・ 自由電子ガスの磁性
- ・ 交換操作
- ・ 自由電子間の交換相互作用
- ・ 強磁性のバンドモデル
- ・ 自発磁化の温度変化
- ・ 局在スピンモデル

5.3 対称性

- ・ 対称性の破れとスピン分裂
- ・ スピン軌道相互作用
- ・ ラッシュバ効果
- ・ トポロジカル絶縁体

1.4.10 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

1.4.11 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

1.4.12 生物物理学特論 II：岡田 康志, 新井 宗仁, 古澤 力

- 1. 細胞と数
- 2. 分子機械と揺らぎ
- 3. 情報とノイズ
- 4. 位置と方向
- 5. 蛋白質の構造と物性
- 6. 蛋白質のフォールディング機構
- 7. 蛋白質のダイナミクスと機能
- 8. 蛋白質の分子進化とデザイン
- 9. 生命の起源に関する理論と実験
- 10. 生態系の安定性に関する理論と実験
- 11. 進化プロセスに関する理論と実験
- 12. 代謝システムに関する理論と実験

1.4.13 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, 澤田 龍

1. Introduction

2. Basic Concepts

3. Experimental Tools

4. Decay and Cross Sections

5. Dirac Equation

6. Quantum Electrodynamics (QED)

7. Weak Interactions

8. Electroweak Theory

9. Quark Model and QCD

10. Quark Mixing and CP Violation

11. Forefront of Particle Physics

1.5.2 場の量子論 II：渡利 泰山

1. 量子力学の経路積分形式

2. 散乱行列、ループ展開/摂動展開

3. 摂動初項近似による散乱過程

4. 束縛状態

5. ユニタリ性

6. 低エネルギー有効場の理論

7. 場の量子論の経路積分形式

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. トポロジカル物性

1.1 物性物理におけるトポロジー

1.2 幾何学との関係

1.3 ベリー曲率による物性

1.4 ワイル半金属

2. 電子相関を考慮した固体中の電子

2.1 相互作用の無い電子系

2.2 フェルミ液体

2.3 ハバードモデルにおける電子相関

2.4 アンダーソンモデルにおける電子相関

2.5 重い電子系

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. Introduction

Non-equilibrium systems, Stochastic processes, Steady state

2. Stochastic processes

Markov chain, Chapman-Kolmogorov equation, Master equation, Fokker-Planck equation, Onsager-Machlup function, Langevin equation

3. Stochastic thermodynamics

Flow and force, Entropy production rate, The

second law of thermodynamics, Linear irreversible thermodynamics, Onsager reciprocal relations

4. Information theory

Shannon entropy and differential entropy, Kullback-Leibler divergence

5. Dynamical systems

Cumulants and moments, Fixed points and stability

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：松村 知岳

1. 物理学／研究における英語とは

2. 学術論文とは（自分が読みたい学術論文を解析することで理解する Title, Abstract, Introduction）

3. 学術論文の書き方概要。書く前の準備（書き方、校正方法）

4. 学術論文を意識した文章作成（Title, Abstract, Introduction）

5. 口頭によるプレゼンテーション方法の概要、プレゼン作りの準備

6. 口頭によるプレゼンテーションの実践、Q/A への対処

7. ポスターによるプレゼンテーション方法、ポスターを作るための準備

8. リモート会議を模擬したプレゼン、Q/A、議事録

2 各賞受賞者紹介

2.1 吉田直紀 教授

— フィリップ・フランツ・フォン・シーボルト賞 —

吉田直紀教授がドイツ連邦共和国よりフィリップ・フランツ・フォン・シーボルト賞を受賞されました。初期宇宙における星やブラックホールの形成やダークマターの大域的分布など、宇宙物理学分野での研究業績が国際的に高い評価を受けているだけでなく、研究者としてのキャリアの中でミュンヘン大学より天文学の博士号を授与されるなどドイツと深い関わりがあるほか、その後も国際共同研究等でドイツの研究者と交流を続けるなど、科学コミュニティ発展に貢献してきたことが受賞理由となりました。本受賞を機に、マックスプランク研究所との共同研究を新たに開始されるなど、今後も日独の文化および社会のよりよい相互理解の促進に貢献されます。

2.2 常行真司 教授

— 第 21 回本多フロンティア賞 —

常行真司教授が、「材料構造と非調和フォノン物性および電子物性の非経験的予測手法の開発」により、第 21 回本多フロンティア賞（2024 年）を受賞しました。本賞は、日本の材料科学の先駆者である本多光太郎先生の学徳を顕彰するため 1957 年に設立された公益財団法人本多記念会が運営するもので、理工学特に金属材料などの無機材料、有機材料及びこれらの複合材料の 3 分野のいずれかの分野に関する研究を行い、学術面あるいは技術面において画期的な発見又は発明を行った者に対して贈られます。常行教授は、格子熱伝導率や熱膨張係数を精度よく予測する非調和フォノン物性の計算手法、わずかな実験データを用いて結晶構造探索を加速するデータ同化構造探索手法、現在主流の密度汎関数理論に基づく電子状態計算手法とは全く異なる相関波動関数理論に基づく固体の第一原理計算手法など、材料研究のための汎用性の高いシミュレーション手法を開発して、今回の受賞となりました。

2.3 高木英典 教授（現物質・材料研究機構）

— 米国物理学会（APS）James C. McGroddy Prize for New Materials —

高木英典教授がアメリカ物理学会（APS）James C. McGroddy Prize for New Materials を受賞されました。この賞は新物質の科学と応用に関して目覚ましい貢献をされた研究者に対して贈られるもので、物性及び材料科学の分野において権威ある賞として知られています。受賞の対象となった業績は、4d/5d 遷移金属酸化物におけるスピン軌道相互作用が誘起するモット絶縁体の概念の提唱と、その展開としての新奇トポロジカル量子物質、特に Kitaev 量子スピン液体、の設計と発見です。高木教授は、銅酸化高温超伝導体に代表される 3d 遷移金属酸化物の強相関電子物理の研究で、長く世界を牽引されてきました。物理教室に異動された 15 年ほど前から、その殻を破り、4d/5d 遷移金属酸化物の研究へと展開されています。4d/5d 遷移金属酸化物を舞台として、重い元素に特有の強スピン軌道相互作用に由来する新奇量子相を次々と発見し、物質科学の新しいパラダイムを切り拓いたことが、今回、高く評価されました。

2.4 山崎雅人 教授

— 国際基礎科学会議 Frontiers of Science Award (Mathematics) —

山崎雅人教授が国際基礎科学会議より先端科学賞を受賞しました。国際基礎科学会議は北京市人民政府などが主催する国際会議で、基礎科学の3分野（数学、理論物理学、計算機・情報理論）の最先端の研究者1000名以上が参加します。山崎教授が受賞した先端科学賞は、この3分野の過去10年間に出版された論文の中で、価値と独創性が最も高く、その分野に重要な影響を与え、研究者から高く評価されたものを表彰しています。今回の受賞部門は数学で、山崎雅人教授とペリメーター研究所のKevin Costello教授、プリンストン高等研究所のEdward Witten教授との共著論文が対象になり、可積分格子模型の数理論を4次元のゲージ場の理論から解明した業績が評価されました。

2.5 小形正男 教授

— 日本物理学会 第30回（2025年）論文賞 —

小形正男氏が日本物理学会第30回論文賞を受賞されました。受賞対象となった論文はJ. Phys. Soc. Japan **84**, 124708 (2015) の論文で、M. Ogata and H. Fukuyama, "Orbital Magnetism of Bloch Electrons I. General Formula" です。遍歴電子の外部磁場応答である軌道磁化率は基本的かつ重要な物理量であり、ランダウの自由電子の軌道反磁性の研究から始まり長い研究の歴史を持っています。しかし固体中の多バンドのブロッホ波動関数を厳密に考慮した一般公式は長らく謎のままでした。対象論文は、グリーン関数による福山公式をもとに、多バンドの場合の軌道磁化率の表式を詳細かつ厳密に導出しました。さらに、最近では時間・空間反転対称性が破れた場合にも拡張され、ベリー曲率の寄与なども明らかにされています。関連分野での理論、実験研究を活性化すると期待されています。

2.6 肥後友也 特任准教授（現慶應大学）

— 第3回（2025年）AAPPS-JPS Award —

肥後友也特任准教授（社会連携講座「磁気界面物性講座」）が、第3回（2025年）AAPPS-JPS Awardを受賞しました。本賞は、アジアにおける物理学の発展を目的に、AAPPS（アジア太平洋物理学会連合）と日本物理学会が共同で設立したもので、優れた研究成果を挙げた若手研究者を顕彰するものです。受賞業績は「磁性トポロジカル半金属の表界面における機能物性開拓」です。肥後准教授は、薄膜作製技術を基盤に、トポロジカル反強磁性体における磁気秩序を介した電子構造の電氣的制御の実証や、トポロジカル強磁性体が示す巨大な横熱電応答を用いた高精度な熱流検出手法の研究を通じて、メモリやセンサへの応用を見据えたトポロジカル量子材料の実用化に向けて重要な進展をもたらしました。

2.7 酒井明人 講師

— 第2回（2024年）AAPPS-JPS Award —

酒井明人講師が第2回（2024年）AAPPS-JPS Awardを受賞しました。受賞業績は「四極子近藤格子系および幾何学的フラストレート磁性体等における従来型磁気量子臨界点の枠組みを超えた異常金属」です。四極子近藤格子系の実験的研究の舞台となる新化合物を見出し、特異な物性を実験的に解明したことが高く評価され、本章の受賞に繋がりました。

2.8 森脇可奈 助教（吉田研）

— 第3回羽ばたく女性研究者賞（マリア・スクウォドフスカ＝キュリー賞）最優秀賞 —

森脇可奈助教が羽ばたく女性研究者賞を受賞されました。対象となったのは「シミュレーションとデータ科

学の手法を用いた遠方銀河と宇宙の電離史の研究」で、遠方銀河の観測により宇宙の大域的な地図を作ること、宇宙の成り立ちや進化の歴史を明らかにすることを目標としています。森脇助教は世界に先駆けて深層学習を用いた宇宙観測データ解析法を開発し、銀河形成のスーパーコンピュータシミュレーションの結果から、遠方銀河からの電離酸素輝線をとらえることで宇宙の大規模構造を探索することができると提唱するなど、宇宙論の分野に新たな展開をもたらしました。実際に、東京大学が主導してすすめている SUBLIME 電波観測計画でも実現されようとしています。森脇助教の今後の研究により、ダークマターやダークエネルギーといった宇宙の深淵な謎にせまる成果につながることを大きく期待しています。

2.9 永田夏海 助教（濱口研）

— 第2回（2024年）AAPPS-JPS Award —

濱口研究室助教の永田夏海氏が「暗黒物質および宇宙素粒子物理学の理論的研究」に対して第2回（2024年）AAPPS-JPS Award を受賞されました。永田氏は、カシオペア A 中性子星の表面温度観測値との整合性を解析することで、アクシオン崩壊定数について SN1987A から与えられているものよりも強い制限を得ました。また、中性子星の冷却過程において β 平衡から外れることで生じる内部加熱効果が、中性子星の表面温度観測を用いた暗黒物質の探索可能性に大きな影響を与えることを示しました。さらに、中性子星の重力加速度が暗黒物質粒子を高エネルギーで中性子星に衝突させることから、電弱多重項暗黒物質を非弾性散乱過程を通じて効率よく探索しうることを指摘しました。これらの成果が高く評価されました。

2.10 大森寛太郎 助教（松尾研）

— 国際基礎科学会議 Frontiers of Science Award (Physics) —

松尾研究室の大森寛太郎助教が中国国際基礎科学大会の Frontiers of Science Award 物理部門を受賞しました。対象論文となった”Noninvertible Chiral Symmetry and Exponential Hierarchies” (Clay Cordova 氏との共著, Physical Review X2023 年出版) が高く評価されました。

2.11 横溝和樹 助教（蘆田研）

— 第19回（2025年）日本物理学会若手奨励賞 —

蘆田研究室助教の横溝氏が「非エルミート系におけるブロッホバンド理論の構築とその応用」に関する研究により、第19回日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。非エルミート系は、平衡系では見られない新奇な現象を示す物理系として注目されています。横溝氏は、非エルミート系におけるエネルギーバンドを計算するための基礎理論を構築しました。また、その理論を応用して様々な物理系を解析することで非エルミート系に付随する現象を解明しました。このような研究を通じて、非エルミート系におけるブロッホバンド理論は非エルミート物理を研究するための強力なツールとなることが示されました。以上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。

2.12 野下剛氏（松尾研）

— 第19回（2025年）日本物理学会若手奨励賞 —

松尾研究室の野下剛氏が第19回（2025年度）日本物理学会若手奨励賞（素粒子部門）を受賞しました。超対称ゲージ理論や超弦理論に応用されるある種の無限次元対称性の提唱と一般化が評価された。単著と共著、合わせて3篇の論文が受賞対象となりました。

2.13 山田恭平氏（日下研、現プリンストン大）

— 第 26 回（2024 年度）高エネルギー物理学奨励賞 —

日下研究室卒業生の山田恭平氏（現プリンストン大）が第 26 回高エネルギー物理学奨励賞を受賞しました。博士論文「Advancement of Millimeter-wave Polarization Modulator and Millimeter-wave Polarization Oscillation Search for Ultralight Dark Matter」が受賞対象となり、Simons Observatory 小口径望遠鏡のためのミリ波偏波変調器の開発および POLARBEAR 実験でのミリ波偏光回転観測による超軽量ダークマター探索に関する研究が高く評価されました。

2.14 小林研究室一同

— 令和 6 年度「秀でた利用成果」優秀賞（文部科学省 ARIM） —

このたび、小林研究室一同（佐々木健人、小河健介、塚本萌太、西村俊亮、中村祐貴、山本航輝、顧豪、小林拓、須田涼太郎、原田怜、小林研介、敬称略）が文部科学省マテリアル先端リサーチインフラ（ARIM）の令和 6 年度「秀でた利用成果」優秀賞を受賞しました。ARIM では毎年約 3000 件の利用実績があり、本年度は 25 の実施機関から提出された 59 件の優れた利用成果の中から、厳正な審査を経て 6 件が選出されました。そのうちの 1 件として、小林研究室の課題「量子センシングのためのマイクロ波アンテナ作製」が本賞に選定されました。本研究では、東京大学武田先端知スーパークリーンルームに設置された設備を活用し、ダイヤモンド窒素空孔中心（NV センタ）などの色中心量子センサの測定に不可欠な広帯域マイクロ波アンテナの独自開発に取り組みました。この成果が高く評価され、今回の受賞に至ったものです。本受賞を契機として、小林研究室における量子センサを用いた精密物性物理学の研究がさらに飛躍的に発展することが期待されます。

2.15 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 6 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） KRISTIANO Jason 氏、塚本 萌太 氏、吉村 耕平 氏、永瀬 慎太郎 氏、水野 るり恵 氏
- 理学系研究科研究奨励賞（修士課程） 中根 美七海 氏、柳澤 広登 氏、小川 宏太郎 氏、吉岡 大地 氏
- 理学部学修奨励賞 金澤 貴弘 氏、辻 圭汰 氏、岡田 樹 氏

皆様の今後の更なるご活躍を期待します。

3 人事異動

[物理学教室に來られた方々]

相川 清隆	准教授	R6/4/1	採用	東京工業大学
松下 雄一郎	特任准教授 (SQAI)	R6/4/1	採用	東京工業大学
岩木 惇司	特任助教 (SQAI)	R6/4/1	採用	本学総合文化研究科博士課程
坂下 達哉	特任助教 (SQAI)	R6/4/1	採用	大阪大学
川崎 拓也	特任助教 (相川研)	R6/4/1	採用	東京工業大学
Shi Xiaodong	特任研究員 (横山研)	R6/4/1	採用	高エネルギー加速器研究機構
小林 裕太	特任研究員 (林研)	R6/4/1	採用	日本学術振興会特別研究員
中村 吉伸	特任研究員 (高木研)	R6/4/1	採用	本学工学研究科
本間 千柊	特任研究員 (常行研)	R6/4/1	採用	東京工業大学博士後期課程
秋田 謙介	特任研究員 (濱口研)	R6/4/1	採用	Institute for Basic Science, Center for Theoretical Physics of the Universe
藤井 啓資	特任研究員 (蘆田研)	R6/4/1	採用	Institut für Theoretische Physik, Universität Heidelberg
簗口 睦美	一般技術職員 (技術室)	R6/4/1	採用	
小山 啓子	上席係長 (物理教務)	R6/4/1	配置換え	本学農学生命科学研究科
島田 佳恵	係長 (物理事務)	R6/4/1	配置換え	本学工学研究科
茅根 裕司	特任助教 (日下研)	R6/4/16	採用	高エネルギー加速器研究機構
高倉 理	特任助教 (日下研)	R6/4/16	採用	高エネルギー加速器研究機構
並河 俊哉	特任助教 (日下研)	R6/4/16	兼務	本学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構
杉本 良介	特任研究員 (安東研)	R6/5/1	採用	総合研究大学院大学博士課程
Gekko Patria	特任研究員 (常行研)	R6/5/1	採用	東京工業大学
Budiutama				
黄 欣馳	特任研究員 (常行研)	R6/5/1	採用	東京工業大学
宮崎 慈生	特任研究員 (村尾研)	R6/5/1	採用	立命館大学
野上 こずえ	技術補佐員 (中辻研)	R6/5/1	採用	
有田 亮太郎	教授	R6/6/16	配置換え	本学先端科学技術研究センタ
小林 研介	教授	R6/7/1	配置換え	本研究科附属知の物理学研究センター
光山 隼史	助教 (川口研)	R6/7/1	採用	Max-Planck-Institute of Biochemistry
Wang Cong	特任研究員 (中辻研)	R6/8/21	採用	本学新領域創成科学研究科博士課程
川崎 拓也	助教 (相川研)	R6/9/1	採用	
高倉 理	助教 (日下研)	R6/9/1	採用	
八島 恵子	特任専門職員 (相川研)	R6/9/1	採用	
Chatterjee Pritam	特任研究員 (福嶋研)	R6/10/1	採用	Homi Bhabha National Institute
石井 陽子	特任専門職員 (竹内研)	R6/10/1	採用	
山崎 雅人	教授	R6/10/16	配置換え	本学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構
渡邊 光	助教 (有田研)	R6/11/1	配置換え	本学先端科学技術研究センター
蒔田 裕也	助教 (竹内研)	R6/11/16	採用	Max Planck Institute for Evolutionary Biology
鈴木 大介	准教授	R6/12/1	採用	理化学研究所
福島 章雄	特任教授 (社会連携講座)	R6/12/1	採用	産業技術総合研究所
市川 翼	特任研究員 (中辻研)	R6/12/1	採用	大阪大学
太田 裕朗	特任研究員 (中辻研)	R7/1/16	採用	
立石 真之	技術補佐員 (中辻研)	R7/1/16	採用	
山田 祥悟	技術補佐員 (中辻研)	R7/1/16	採用	
Pritchard Cairns	特任研究員 (中辻研)	R7/2/1	採用	University of California
Luke Seaton				
小田部 莊達	特任助教 (相川研)	R7/3/1	採用	東京工業大学
安谷屋 佐知子	事務補佐員 (JSR 包括連携)	R7/3/1	採用	
井上 桜	事務補佐員 (未来社会)	R7/3/1	採用	
小田倉 未央	事務補佐員 (物理事務分室)	R7/3/1	採用	

3. 人事異動

[物理学教室から移られた方々]

三俣 千春	特任研究員（常行研）	R6/5/31	退職	筑波大学
木内 健司	助教（日下研）	R6/6/16	退職	
本間 千柊	特任研究員（常行研）	R6/6/30	退職	RWTH Aachen University
大橋 美波	事務補佐員（未来社会）	R6/8/21	退職	
西口 大貴	助教（竹内研）	R6/9/30	退職	東京科学大学
茅根 裕司	特任助教（日下研）	R6/9/30	退職	高エネルギー加速器研究機構
並河 俊哉	特任助教（日下研）	R6/9/30	兼務終了	本学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構
SU Hang	特任研究員（中辻研）	R6/9/30	退職	日本学術振興会外国人特別研究員
西澤 賢治	特任研究員（岡田研）	R6/9/30	退職	東北大学
藤井 啓資	特任研究員（蘆田研）	R6/9/30	退職	東京科学大学
内山 博喜	特任研究員（未来社会）	R6/12/31	退職	
Taranto Philip Guy	特任研究員（村尾研）	R7/1/10	退職	The University of Manchester
Couzinie Yannick	特任研究員（常行研）	R7/3/15	退職	
Michael Herbert				
小形 正男	教授	R7/3/31	定年退職	産業技術総合研究所
三尾 典克	教授	R7/3/31	定年退職	
酒井 広文	教授	R7/3/31	定年退職	
高木 英典	教授	R7/3/31	退職	物質・材料研究機構
赤城 裕	助教（桂研）	R7/3/31	退職	お茶の水女子大学
石田 明	助教	R7/3/31	退職	産業技術総合研究所
松浦 弘泰	助教（小形研）	R7/3/31	退職	産業技術総合研究所
山崎 隼太	助教（村尾研）	R7/3/31	昇任	本学情報理工学系研究科
肥後 友也	特任准教授（日東社会連携）	R7/3/31	退職	慶応義塾大学
平岡 奈緒香	特任助教（高木研）	R7/3/31	退職	物質・材料研究機構
山田 昌彦	特任講師（SQAI）	R7/3/31	退職	
Shi Xiaodong	特任研究員（横山研）	R7/3/31	退職	名古屋大学
中村 吉伸	特任研究員（高木研）	R7/3/31	退職	本研究科化学専攻
前橋 英明	特任研究員（小形研）	R7/3/31	退職	
杳間 はづき	特任専門職員（馬場研）	R7/3/31	定年退職	
古藺 由里	特任専門職員（小形研）	R7/3/31	退職	
八島 恵子	特任専門職員（相川研）	R7/3/31	退職	
福草 加世子	事務補佐員（物理事務分室）	R7/3/31	退職	
田中 麻子	事務補佐員（未来社会）	R7/3/31	退職	
町上 香織	事務補佐員（中辻研）	R7/3/31	退職	
佐伯 喜美子	一般技術職員（技術室）	R7/3/31	退職	
伊藤 早希	一般職員（物理事務室）	R7/3/31	配置換え	本学財務部

4 役務分担

【役務】	【教員】	【職員】
専攻長・学科長 幹事 専攻主任 専攻副主任 常置委員 教務 学生実験 卓越大学院	松尾 吉田、岡田 小林 横山（将） 高木、古澤 上田（理）、馬場（大学院）、濱口（学生） 安東、岡本、竹内 安東（XPS）、村尾（FoPM）、古澤（IGPEES）、 長谷川・常行・桂（MERIT）、藤堂（Q-STEP）	小山、島田、伊藤 物理教務 物理教務 物理教務 物理教務 佐伯、寺山 物理教務、物理事務
【外国人学生・留学】		
優先配置 海外学部生インターンシップ受入 GSGC 留学生支援 留学	濱口 高木、島野 樺島、Liang 濱口	物理教務 物理教務 物理教務 物理教務
【駒場生進学】		
進学指導/推薦入試アドバイザー 駒場対策	長谷川、馬場 相川、安東、酒井（明）	物理教務 物理教務
【奨学金・支援】		
奨学金 博士課程学生支援制度 就職 部屋割 安全衛生 放射線 低温 管理技術室 (技術室会議メンバー) 図書 コロキウム 年次報告 記録係 事務分室 理交会 親睦会 ホームページ、IT オープンキャンパス JSR 東大 包括連携 CURIE 緊急対応教職員 研究支援 物理学専攻災害時安否確認担当者 ハラスメント予防担当者	島野 長谷川 林 中村 中島 岡本 中村（統括、試作室） 安東（学生実験） 中村、岡本（安全衛生・低温） 藤堂（IT 関連） 辻（理）、村尾、古澤 樺島、吉田、竹内 蘆田、中島 相川、辻、中島 酒井（広） 松尾（前期）、日下（後期） 酒井（明） 藤堂、蘆田 桂 中辻、小形、常行、松尾、[宮下、湯本] 酒井（明）、Liang [馬場良子（理/URA）] 松尾（専攻長）、小林（専攻主任） 松尾（専攻長）	物理教務 島田 中村（就職室）、小山 島田 物理事務 下澤 佐伯、寺山 物理ネットワーク担当 総務課図書チーム 物理事務 中村（就職室） （物理事務）、（物理教務） 島田 島田 レクリエーション委員 物理ネットワーク担当 物理事務 小山、岡山、島田 島田

5 教室談話会

- 2024 年 6 月 12 日 (水) 16:30-18:00

Prof. Young Duck Kim (Department of Physics and Department of Information Display, Kyung Hee University, Seoul, 02447, South Korea)

“Manipulation of carbon color centers in hexagonal boron nitride for efficient deep ultraviolet light emission”

- 2024 年 6 月 13 日 (木) 11:00-12:00

Prof. N. Peter Armitage (Institute for Quantum Matter and Department of Physics and Astronomy, Johns Hopkins University)

“Energy relaxation and dynamics in strongly correlated materials”

- 2024 年 6 月 27 日 (木) 14:00-15:30

Natalia Drichko (Johns Hopkins University, Baltimore, USA)

“Raman spectra of crystal field excitations in quantum spin ice $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ as an evidence of magnetic moments fluctuations”

- 2024 年 7 月 5 日 (金) 17:00-18:00

近藤 猛 (東京大学・物性研究所)

「銅酸化物高温超伝導体における小さなフェルミポケットの観察」

- 2024 年 8 月 8 日 (木) 13:00-14:00

Prof. Yann Gallais (Matériaux et Phénomènes Quantiques, Université Paris Cité, CNRS, Paris, France)

“Time resolved Raman scattering in quantum materials”

- 2024 年 12 月 19 日 (木) 11:00-12:30

Prof. Shane Cybart (University of California, Riverside)

“Exploring Nanoscale Superconducting Phenomena and Devices Through Advanced Ion Beam Patterning Techniques”

- 2025 年 1 月 27 日 (月) 17:00-18:30

Prof. Dr. Karl-Heinz Ernst (Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology)

“Electron spin filtering and Kondo physics of helical aromatic molecules on metal surfaces”

- 2025 年 3 月 11 日 (火) 15:00-16:30

高木英典 教授 (最終講義)

「物質中の電子が示す多彩な顔」

- 2025 年 3 月 12 日 (水) 10:00-11:30
三尾典克 教授 (最終講義)
「相対論に魅せられて」
- 2025 年 3 月 12 日 (水) 13:30-15:00
酒井広文 教授 (最終講義)
「分子の気持ちを理解する!？」
- 2025 年 3 月 12 日 (水) 16:00-17:30
小形正男 教授 (最終講義)
「物性物理学 ー電子、スピン、ときどきフォノンー」

6 物理学教室コロキウム

- 第 141 回コロキウム 2024 年 4 月 19 日（金）17:00-18:30
橋坂 昌幸 氏（東京大学 物性研研究所, 准教授）
「エニオン観測・制御実験の幕開け」
- 第 142 回コロキウム 2024 年 5 月 10 日（金）17:00-18:30
田崎 晴明 氏（学習院大学 理学部物理学科, 教授）
「なぜすべては熱平衡状態に向かうのか？ 現代的な視点から」
- 第 143 回コロキウム 2024 年 5 月 31（金）17:00-18:30
相川 清隆 氏（東京大学 理学系研究科, 准教授）
「単一浮揚ナノ粒子の超低温フィードバック制御」
- 第 144 回コロキウム 2024 年 6 月 7 日（金）17:00-18:30
Feng Liu 氏（University of Utah, Global Science Graduate Course, Professor）
“Excitonic Bose Einstein Condensation in Topological Flat Bands”
- 第 145 回コロキウム 2024 年 10 月 11 日（金）17:00-18:30
野地 博行 氏（東京大学大学院工学系研究科）
「人工細胞リアクタ研究の始まり・展開・展望」
- 第 146 回コロキウム 2024 年 11 月 5 日（火）17:00-18:30
Marc Mézard 氏（Bocconi University）“From spin glasses to machine learning”
- 第 147 回コロキウム 2024 年 12 月 13 日（金）17:00-18:30
初田 哲男 氏（理化学研究所 数理創造プログラム）
「クォークから中性子星へ：基礎物理学の挑戦」
- 第 148 回コロキウム 2025 年 1 月 24 日（金）17:00-18:30
清水 明 氏（東京大学大学院理学系研究科附属 フォトンサイエンス研究機構）
「統計力学＋熱力学＋量子論の体系化の試み」

7 金曜ランチトーク

- 2024 年 10 月 25 日（金）13:00-13:25

川崎拓也 助教 (相川研究室)

“Research path toward the levitated nanoparticle experiments”

「浮揚ナノ粒子実験にいたるまで」

年次研究報告 2024年度

2025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 松 尾 泰

編 集 中 島 康 博

酒 井 明 人

中 村 ち か 子