

Department of Physics
School of Science
The University of Tokyo

Annual Report

2 0 2 5

令和 7 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

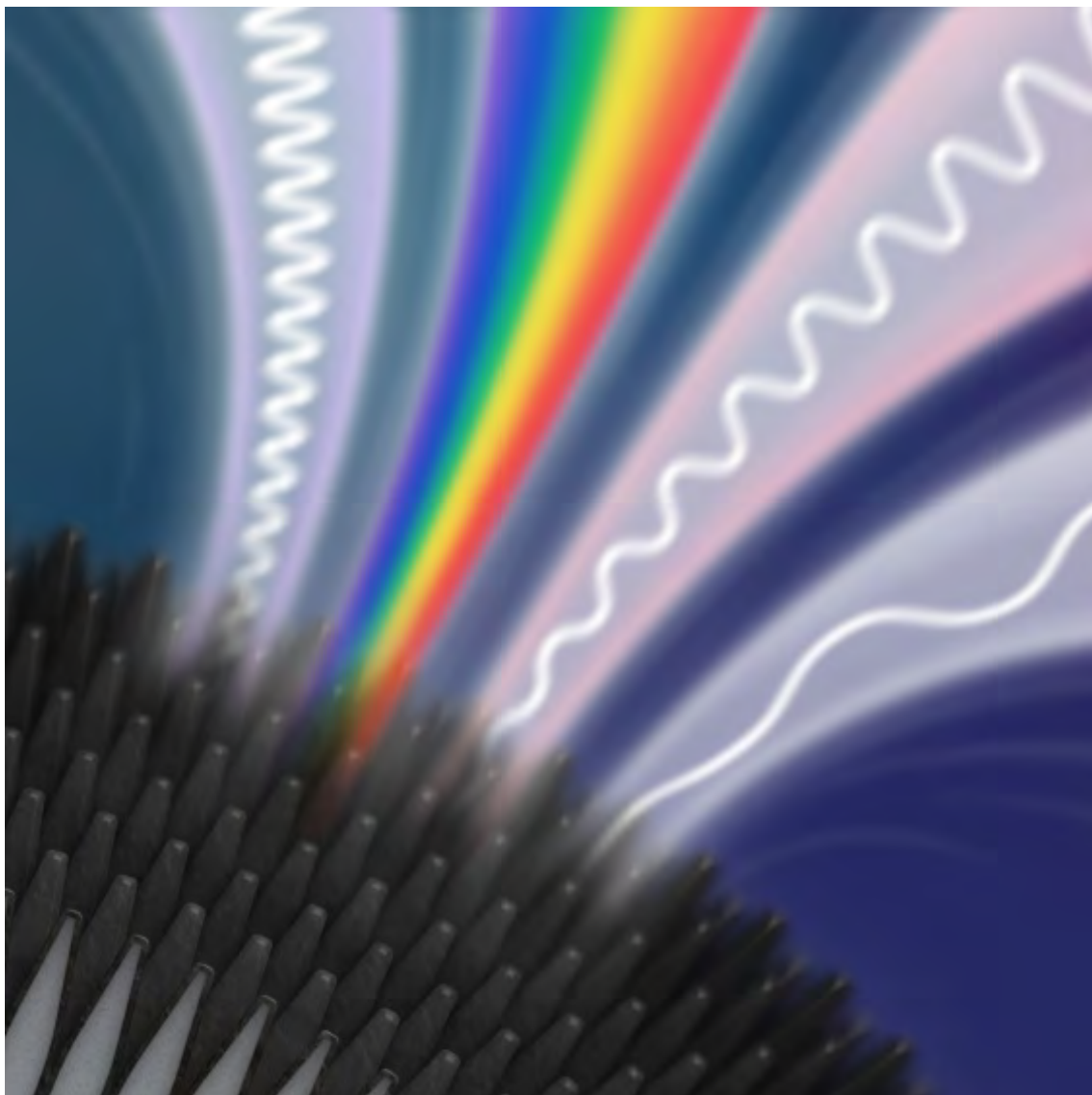


図 1: 広帯域完全吸収モスアイ構造の模式図。下部に示されたモスアイ構造は、シリコンにフェムト秒レーザー加工を施すことにより形成された、数十マイクロメートルオーダーの微細な円錐状突起が周期的に配列した構造であり、その表面は厚さ 100 nm のカーボン膜で覆われている。この構造により、テラヘルツ波から紫外域に至る極めて広い波長範囲において、高効率な光吸収が実現されることが実験的に示された。(小西研究室)

Schematic illustration of a broadband near-perfect absorbing moth-eye structure. The moth-eye structure shown at the bottom consists of a periodic array of fine conical protrusions on the order of several tens of micrometers, formed by femtosecond laser processing of silicon, and its surface is coated with a 100-nm thick carbon film. It was experimentally demonstrated that this structure enables highly efficient light absorption over an extremely broad wavelength range, extending from the terahertz region to the ultraviolet. (Konishi Group)

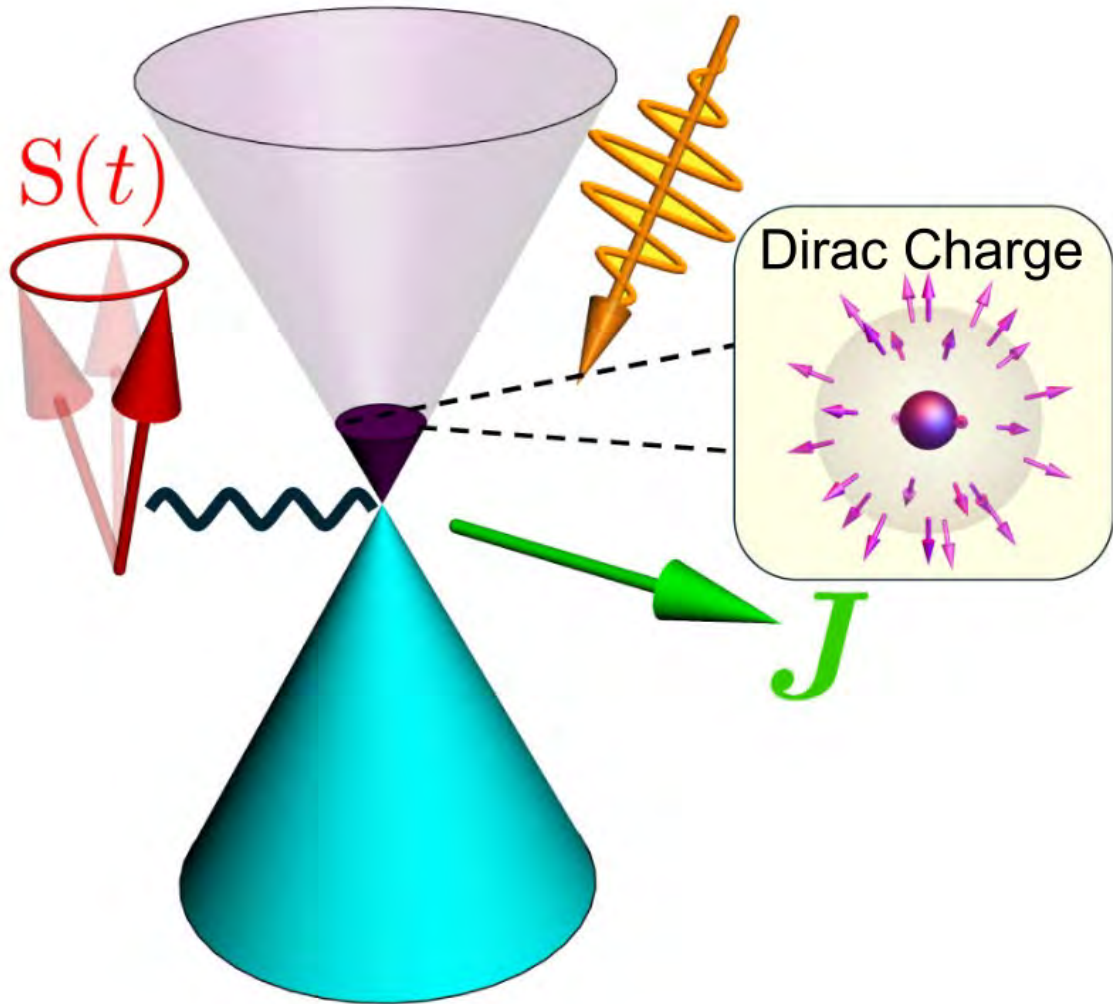


図2: ディラック半金属における局在スピンドYNAMICSに起因する光電流の模式図。電子スピンモーメントと局在スピンモーメントとの交換結合を通じて、時間依存する局在スピンのダイナミクス $S(t)$ が光電流応答 J を生成する。この J の観測からディラック電荷の検出ができる。(有田研究室)

Schematic picture of photocurrent arising from localized spin dynamics in Dirac semimetals. Through the exchange coupling between the electronic spin moment and the localized spin moment, the localized spin dynamics $S(t)$ generates the photocurrent response J . Observation of the resulting photocurrent J provides a way to detect Dirac charges. (Arita Group)

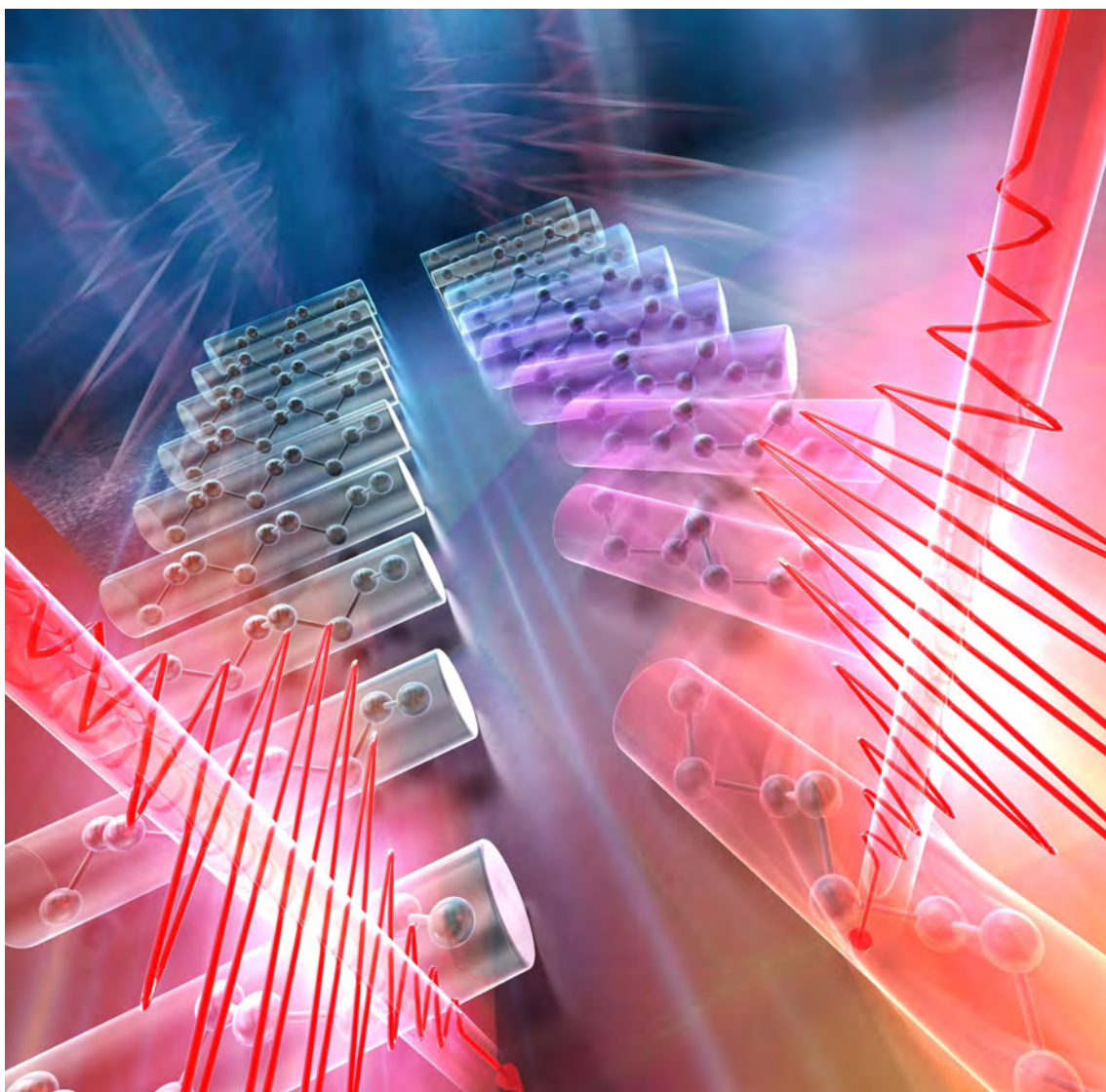


図 3: ピコ秒のパルスレーザーを使って、テルル (Te) 結晶の螺旋軸 (異方性軸) の向きを制御する模式図。パルスレーザーの偏光と直交する方向に螺旋軸の向きが揃うことが明らかになった。光を使って結晶の異方性を自在に制御できるため、メタレンズ作製などに応用できることが期待される。(林研究室)

A schematic illustration depicting the control of the orientation of the helical axis (anisotropic axis) in a tellurium (Te) crystal using a picosecond pulsed laser. Upon irradiation of the laser pulse, the helical axis aligns in a direction orthogonal to the polarization of the pulsed laser. As this technique enables free control of crystal anisotropy using light, it may find applications in fields such as the fabrication of metalenses. (Hayashi Group)

序

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・理学部物理学科の令和7年度(2025年4月-2026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、寄田浩平氏(素粒子物理学実験:早稲田大学)杉田有治氏(生物物理学理論:理化学研究所)准教授として、張奕勁氏(物性物理学実験:本学生産技術研究所)助教として加藤 ちなみ氏(吉田研:東京理科大学)、藤田 真奈美氏(中村研:日本原子力研究開発機構)、渡邊 真隆氏(山崎研:名古屋大学)、北村 徳隆氏(鈴木研:本学理学系研究科原子核科学研究センター)、吉田 博信氏(桂研:理化学研究所)、青木 匠氏(横山研:株式会社キーエンス)、北村 泰晟氏(有田研:理化学研究所)、木村 真人氏(寄田研:高エネルギー加速器研究機構)、林 優依氏(福嶋研:京都大学)、UGARTE LA TORRE DIEGO RENATO 氏(理化学研究所)が着任されました。また、中桐 洸太助教(横山研)が本学宇宙線研究所准教授、渡邊 光助教(有田研)が北海道大学准教授、峰本 紳一郎助教(専攻長預かり)が東北大学助教、高三 和晃助教が本学工学系研究科准教授、大森 寛太郎助教(松尾研)が理化学研究所上級研究員山本 新助教(福嶋研)が理化学研究所上級研究員として転出されました。さらに、長谷川修司教授、松尾泰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。有田亮太郎教授、中辻知教授が Clarivate Highly Cited Researcher 2025 を、山崎雅人教授が Best Paper Prize 2025 (J. Phys. A: Math. Theor.) および令和8年度文部科学大臣表彰科学技術賞を、酒井明人講師が令和7年度丸文研究奨励賞を、青木匠助教(横山・中島研)が ATLAS Thesis Award 2025 を、高三和晃助教(辻研)、姫岡 優介助教(古澤研)、吉田 博信助教(桂研)、小田部 莊達特任助教(相川研)が第20回(2026年)日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。また、小林孝嘉名誉教授が台湾国交通大學終身講座教授に任命されました。さらに、吉田智治氏、大賀成朗氏、西村俊亮氏、梅田滉也氏、小川和馬氏、藤本知宏氏が令和7年度理学系研究科研究奨励賞(博士課程)を、影浦優太氏、松浦修大氏、高橋正大氏、愛敬公太氏が令和7年度理学系研究科研究奨励賞(修士課程)を、金田啓氏、山之内達哉氏、高山光希氏が令和7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。退職・移動される先生方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。これにともない、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。

令和7年には理物同窓会を発足し、現役世代とOBとのつながりの場を広げてまいりました。また、「理学部物理支援基金」を設置するなど、物理学教室の活動を広く支援していただけるよう努めてまいりました。

物理学教室は、今後も社会における基礎科学の新たな役割を模索しつつ、持続可能な基礎研究・教育の実現に向けて努力してまいります。令和6年度から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まいりたいと考えております。皆様には、引き続きご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願い申し上げます。

この年次研究報告は、鈴木大介准教授、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。

2026年5月1日
物理学専攻 専攻長・物理学科 学科長
上田 正仁

目次

I	研究室別 2025 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
1.3	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	12
2	原子核・素粒子実験	17
2.1	原子核実験グループ (中村研究室)	17
2.1.1	JLab における Λ ハイパー核電磁生成分光実験	17
2.1.2	MAMI における崩壊 π^- 中間子分光	18
2.1.3	RARiS におけるハイパー核研究	19
2.1.4	J-PARC におけるストレンジネス核物理研究	20
2.1.5	国際量子物理ネットワーク	20
2.2	原子核実験グループ (鈴木研究室)	22
2.2.1	原子核構造	22
2.2.2	核物質	24
2.2.3	天体核物理	25
2.2.4	RI ビームファクトリー高度化	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	ニュートリノ反応の研究	30
2.3.4	ハイパーカミオカンデの建設	30
2.3.5	検出器開発	31
2.4	寄田研究室	34
2.4.1	高エネルギー加速器実験の研究	35
2.4.2	宇宙暗黒物質探索の研究	36
3	物性理論	39
3.1	常行研究室	39
3.1.1	データ同化結晶構造探索	39
3.1.2	水素化物高温超伝導体の探索	39
3.1.3	水素化物超伝導体におけるスピンゆらぎ	40
3.1.4	液体や高分子材料の THz 帯複素誘電率の計算手法開発	40
3.1.5	パラメータフリー DFT-1/2 法の開発	40
3.1.6	円偏光誘起スピンドYNAMIKSの理論	41
3.2	藤堂研究室	42
3.2.1	強相関多体系・格子場理論	43
3.2.2	量子計算・量子情報・量子誤り訂正	44

3.2.3	機械学習・統計物理・データ駆動科学	45
3.2.4	テンソルネットワーク・モンテカルロ・数値最適化	45
3.2.5	計算基盤・情報数理	46
3.3	桂研究室	48
3.3.1	強相関系	48
3.3.2	磁性体における輸送現象	49
3.3.3	散逸のある量子多体系	50
3.3.4	非エルゴード的な量子多体系	51
3.3.5	可解模型	51
3.4	樺島研究室	54
3.4.1	Franz-Parisi ポテンシャルを用いた Random Orthogonal モデルの解析	54
3.4.2	非単調素子を用いた連想記憶モデルの動的平均場解析	54
3.4.3	反学習の効果を取り入れた Hopfield モデルの理論解析	54
3.4.4	Ising スピン型 modern Hopfield model の解析	55
3.4.5	離散拡散モデルの動的特性解析	55
3.4.6	離散拡散モデルによる 2 次元格子タンパク質モデルのデザイン	55
3.4.7	文脈内学習におけるタスク難易度の役割	55
3.4.8	スプリアス相関および社会的バイアスの学習に与える効果	56
3.4.9	ランダム結合ダイナミクスにおける固定点数の評価：グラスマン代数を用いたアプローチ	56
3.4.10	交互最適化法に基づく双線形回帰の理論的解析	56
3.4.11	パラメトリックモデルの推論における可解性を仮定しない統計力学的解析	57
3.4.12	相関のあるスピングラスのレプリカ解析	57
3.5	辻研究室	58
3.5.1	超伝導体のダイナミクス	58
3.5.2	量子開放系のダイナミクス	59
3.5.3	量子多体傷跡状態	59
3.5.4	量子多体系の動的応答	60
3.5.5	テンソルトレイン法	60
3.5.6	量子多体系における励起子	60
3.5.7	量子多体系における輸送現象	61
3.6	蘆田研究室	65
3.6.1	開放系・非エルミート物理	65
3.6.2	強結合量子光-物質系の物理	67
3.6.3	統計物理・機械学習	67
3.7	有田研究室	69
3.7.1	二層系ニッケル酸化物高温超伝導体の研究	69
3.7.2	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	70
3.7.3	円偏光ラマン分光による物質の隠れた対称性の解明	70
3.7.4	3 次元スピンレス系における Euler 類と回転対称性の関係	70
3.7.5	反強磁性トポロジカル半金属におけるディラック電荷とその検出	71
3.7.6	高次スピン間相互作用の第一原理計算手法の開発とその応用	71
4	物性実験	76
4.1	長谷川研究室	76
4.1.1	表面/界面での輸送・磁性特性	76
4.1.2	新しい装置・手法の開発	76
4.2	岡本 研究室	79
4.2.1	劈開表面に形成された 2 次元電子系	79
4.2.2	金属超薄膜の超伝導	79
4.2.3	半導体表面に形成された超伝導超薄膜における非相反伝導に関する研究	80

4.3	島野研究室	83
4.3.1	超伝導	83
4.3.2	ディラック・ワイル半金属	85
4.4	林研究室	87
4.4.1	スピン流物性とカイラル磁性	87
4.4.2	非線形光学効果	88
4.5	小林研究室	90
4.5.1	量子計測	90
4.5.2	量子センサの性質と量子制御	91
4.5.3	量子センサの物性計測応用	92
4.6	中辻・酒井研究室	96
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	96
4.6.2	電子系および磁性体における量子エンタングルメント	98
4.6.3	共線反強磁性異常金属におけるゼロ磁場異常ホール効果の発見	99
4.7	張研究室	102
4.7.1	バルク光起電力効果	102
4.7.2	モアレ超格子による次元制御	103
5	一般物理理論	106
5.1	宇宙理論研究室（吉田）	106
5.1.1	宇宙大規模構造と銀河形成	106
5.1.2	超新星爆発	107
5.1.3	時間領域天文学	107
5.1.4	量子計算	108
5.2	村尾研究室	110
5.2.1	量子アルゴリズム	111
5.2.2	分散型量子情報処理	112
5.2.3	量子誤り訂正	112
5.2.4	量子機械学習・量子計算複雑性	113
5.3	上田研究室	115
5.3.1	冷却原子気体・非平衡開放系	115
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	119
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	共同研究	128
6.2	相川研究室	130
6.2.1	最近の研究成果	130
6.2.2	現在進めている研究課題	131
6.3	安東研究室	132
6.3.1	大型重力波望遠鏡 KAGRA	132
6.3.2	宇宙空間重力波望遠鏡	132
6.3.3	ねじれ型重力波検出器 TOBA	133
6.3.4	アクシオンダークマター探索実験 DANCE	134

6.3.5	基礎物理・量子光学実験	134
6.3.6	Balanced Homodyne Detection による重力波検出の実証	135
6.4	馬場研究室	137
6.4.1	高エネルギー天体の観測的研究	137
6.4.2	将来宇宙観測に向けた機器開発研究	138
6.5	日下研究室	143
6.5.1	POLARBEAR/Simons Array 実験	144
6.5.2	Simons Observatory 実験	144
6.5.3	次世代 CMB 実験用 装置開発	144
6.5.4	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	145
6.6	竹内研究室	146
6.6.1	ソフトマター系の非平衡実験	147
6.6.2	生物系の非平衡実験	147
6.6.3	理論的アプローチ	149
6.7	小西研究室	151
6.7.1	人工ナノ構造の光物理学の探求と光制御への応用	152
6.7.2	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	152
6.7.3	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～	153
7	生物物理	157
7.1	能瀬研究室	157
7.1.1	行動制御回路を構成する神経細胞の同定と機能解析	157
7.1.2	機能的神経回路の発生と進化	158
7.2	岡田研究室	161
7.2.1	光褪色しない新規蛍光プローブ Evergreen の開発	161
7.2.2	細胞質粘弾性プローブ GEM2.0 の開発	161
7.2.3	分子モーターの非平衡エネルギー散逸の計測	162
7.2.4	膜タンパク質の機能動態解析	163
7.3	古澤研究室	165
7.3.1	変動環境下における代謝ネットワークの Bow-tie 構造による恒常性維持	165
7.3.2	細胞分化を引き起こす制御ネットワーク構造の定量解析	166
7.3.3	再構成型無細胞タンパク質合成系における翻訳因子の非単調な応答とメカニズムの解明	166
7.3.4	炭素源多様性が細菌種間相互作用に与える影響	166
7.3.5	IS 活性化による細菌ゲノム構造進化の加速機構	167
7.3.6	プラスミドの宿主域を規定する生存戦略と薬剤耐性遺伝子拡散の解析	167
7.4	川口研究室	171
7.4.1	生物物理学・形態進化	171
7.4.2	非平衡物理学と統計物理学	171
7.4.3	合成生物学・人工細胞設計	172
7.5	杉田研究室	173
7.5.1	計算手法と分子モデルの開発	173
7.5.2	情報科学と計算物理学の融合	173
7.5.3	生体分子の構造・ダイナミクス・機能	174
7.5.4	細胞内環境における分子間相互作用	174
8	技術部門	176
8.1	実験装置試作室	176
8.1.1	利用状況	176
8.1.2	設計・加工の自動化の推進	176
8.2	技術室	176
8.2.1	専攻 Web システムの改修 (寺山、簗口)	176

8.2.2	安全衛生 (寺山)	176
8.2.3	寒剤管理 (寺山)	176
8.2.4	IT 関連	176
8.2.5	学生実験 (高田)	176
8.2.6	技術研修 (寺山、渡辺 (生物科学専攻))	176
8.2.7	各種委員会	176
II	Summary of group activities in 2025	179
1	Fukushima Group	180
2	Liang Group	180
3	High Energy Particle Theory Group	181
4	Nakamura Group	183
5	Suzuki Group	184
6	Yokoyama(M)-Nakajima Group	185
7	Yorita Group	186
8	Tsuneyuki Group	187
9	Todo Group	187
10	Katsura Group	188
11	Kabashima Group	190
12	Tsuji Group	190
13	Ashida Group	191
14	Arita Group	192
15	Hasegawa Group	193
16	Okamoto Group	194
17	Shimano Group	194
18	Hayashi Group	195
19	Kobayashi Group	197
20	Nakatsuji-Sakai Group	198
21	Zhang Group	200
22	Theoretical Astrophysics Group	201
23	Murao Group	202
24	Ueda Group	203
25	Jun'ichi Yokoyama Group	203
26	Ejiri-Tsujii Group	204
27	Aikawa Group	205
28	Ando Group	205
29	Bamba Group	206
30	Kusaka Group	207
31	Takeuchi Group	208
32	Konishi Group	209
33	Nose Group	210
34	Okada Group	211
35	Furusawa Group	212
36	Kawaguchi Group	213
37	Sugita Group	214
III	2025 年度 物理学教室全般に関する報告	217
1	学部講義概要	218

1.1	2年生 A セメスター	218
1.1.1	電磁気学 I: 日下 暁人	218
1.1.2	解析力学: 横山 順一	218
1.1.3	量子力学 I: 常行 真司	219
1.1.4	物理実験学: 鈴木 大介	220
1.1.5	物理数学 I: 濱口 幸一	220
1.1.6	物理数学 II: 松尾 泰	221
1.1.7	物理学演習 I (電磁気学 I, 物理数学 I, II): 日下 暁人、濱口 幸一、松尾 泰、高橋 昂、永田 夏海	221
1.1.8	物理学演習 II (解析力学、量子力学 I): 横山 順一、常行 真司、田島 裕之、森脇 可奈	222
1.1.9	物理学のための科学英語基礎: 小野 義正	223
1.2	3年生 S セメスター	223
1.2.1	電磁気学 II: 中辻 知	223
1.2.2	物理学実験 I: 全実験担当教員	223
1.2.3	量子力学 II: 諸井 健夫	223
1.2.4	物理学演習 III (量子力学 II、電磁気学 II): 山本 新、高三 和晃	224
1.2.5	現代実験物理学 I: 江尻 晶、岡田 康志	224
1.2.6	計算機実験 I: 藤堂 眞治、石河 孝洋、諏訪 秀磨	225
1.2.7	量子コンピューター実習: 寺師 弘二、吉岡 信行	225
1.2.8	統計力学 I: 竹内 一将	226
1.2.9	流体力学: 江尻 晶、馬場 彩	226
1.2.10	物理学演習 IV (統計力学 I、II): 桂 法称、竹内 一将、横溝 和樹、渡邊 光	227
1.3	3年生 A セメスター	228
1.3.1	物理学実験 II: 全実験担当教員	228
1.3.2	光学: 小西 邦昭、井手口 拓郎	228
1.3.3	量子力学 III: 辻 直人	228
1.3.4	現代実験物理学 II: 馬場 彩、横山 将志	229
1.3.5	物理学演習 V: 辻 直人、安東 正樹、桂 法称、加藤 ちなみ、福田 朝	229
1.3.6	生物物理学: 能瀬 聡直、川口 喬吾	229
1.3.7	物理数学 III: 山崎 雅人	230
1.3.8	固体物理学 I: 小林 研介	230
1.3.9	電磁気学 III: 安東 正樹	231
1.3.10	統計力学 II: 桂 法称	231
1.3.11	計算機実験 II: 藤堂 眞治、石河 孝洋、諏訪 秀磨	232
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: 福嶋 健二	233
1.4.3	サブアトムック物理学: 中島 康博	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	234
1.4.6	現代物理学入門: 有田 亮太郎、山崎 雅人	234
1.4.7	一般相対論: 仏坂 健太	235
1.4.8	量子光学: 相川 清隆	235
1.4.9	固体物理学 II: 長谷川 修司	235
1.4.10	プラズマ物理学: 辻井 直人	236
1.4.11	宇宙物理学: 吉田 直紀	236
1.4.12	生物物理学特論 II: 川口 喬吾、伊藤 創祐、野口 博司	236
1.4.13	化学物理学: 酒井 明人	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 : Simeon Hellerman	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	238
1.5.5	固体物理学 III : 有田 亮太郎	239
1.5.6	非平衡科学 : 伊藤 創祐	239
1.5.7	普遍性生物学 : 古澤 力	239
1.5.8	重力波物理学 : Kipp Cannon, 都丸 隆行	240
1.5.9	物理学のための科学英語特論 : 小野 義正	240
2	各賞受賞者紹介	242
2.1	有田亮太郎 教授、中辻知 教授	242
2.2	山崎雅人 教授	242
2.3	山崎雅人 教授	242
2.4	酒井 明人 講師	243
2.5	青木匠 助教 (横山・中島研)	243
2.6	高三 和晃 助教 (辻研)	243
2.7	姫岡 優介 助教 (古澤研)	243
2.8	吉田 博信 助教 (桂研)	243
2.9	小田部 荘達 特任助教 (相川研)	244
2.10	理学系研究科研究奨励賞・理学部学修奨励賞	244
3	人事異動	245
4	役務分担	247
5	教室談話会	248
6	物理学教室コロキウム	250
7	金曜ランチトーク	251
8	理物同窓会	253

I

研究室別 2025年度 研究活動報告

1 原子核・素粒子理論

1.1 原子核理論 (福島) 研究室

原子核理論 (福島) 研究室では、福島健二教授、山本新助教 (2025 年 9 月転出)、鎌田翔特任助教、林優依助教 (2026 年 2 月着任)、ポスドク、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。福島は中性子星の性質を明らかにするための理論研究や強電磁場、回転などを含む高温・高密度極限環境下での原子核クォーク物質の相構造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。また 2030 年代半ばにcomingべき EIC (Electron-Ion Collider) 実験に備えて核子構造研究にも着手している。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。林は QCD の非摂動的な性質について様々な場の量子論のテクニックを駆使して研究している。

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量子多体系ダイナミクスを研究している。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。それと同時に観測的現象論との接点も常に意識して、インパクトのある研究成果を世界に発信している。国際会議での成果発表だけでなく、国際会議の企画・運営や、シリーズ会議の誘致等にも積極的に関わる活動を行っている。

格子ハミルトニアン形式における軸性電荷の定義とアノマリー

格子ゲージ理論のハミルトニアン形式では、軸性電荷の定義として保存量と非保存量の複数の候補があり、それらは格子間隔の高次でしか違わないように見える。しかし日高・山本らは、1+1 次元での解析計算と数値計算により、連続極限でも両者は一致せず、軸性アノマリーを正しく再現するのは保存軸性電荷の方であることを示した。これは、ハミルトニアン時間発展におけるダブラー由来の人工的效果を理解する上で重要な結果である [4]。

二準位 Floquet 系に対する exact-WKB 解析

鎌田らは、周期駆動された二準位量子系では、準エネルギーや有効ハミルトニアンの精密な評価が重要である。鎌田らは、これらを支配する微分方程式に exact-WKB 解析を適用し、準エネルギーと Floquet 有効ハミルトニアンをサイクル積分 (Voros 記号) で系統的に表す方法を与えた。さらに、低周波展開から摂動補正と非摂動補正を導き、数値計算との比較を通じて、摂動論だけでは捉えられない共鳴振動の非摂動的構造を明らかにした [5]。

有限温度・有限密度・有限磁場中での光子の偏極テンソルの計算

重イオン衝突実験や中性子星などの極限環境下では、強い磁場が有限温度や有限密度のもとで作られると考えており、そうした中での光子のふるまいを調べることは重要な研究課題である。宇治・福島らは、特にマグネターから飛来する偏極 X 線の観測データが持つ奇異なふるまいを説明することを目指し、磁場が存在する環境下での光子の偏極テンソルを有限温度・有限密度での場の量子論の手法を用いて摂動的に計算した。また、有限温度・有限密度系では、光子の偏極のうち磁場に平行な成分と磁場に垂直な成分が光子のエネルギーを変化させることで入れ替わりうることを指摘した [6]。

QCD 相図の新しい可能性-クォーク・スバゲッティとグルーボール

従来、バリオン密度の小さい物理系で温度が上昇すると、ほぼ $T_c \sim \Lambda_{\text{QCD}}$ 程度の温度 (1.5 ~ 2 兆 K) で連続的にクロスオーバー転移して、カラー自由度が解放されると同時に質量の起源であるカイラル凝縮も融けると考えられてきた。ところが近年、格子 QCD 数値シミュレーション等により、単純なクロスオーバーよりも複雑な相構造が隠れていることが

徐々に認知されつつある。福嶋らはこの問題に、カラー数 N_c が無限に大きいとするラージ N_c QCD 近似を用いて取り組んだ。これまでカラーが閉込められるハドロン相の圧力は $\sim \mathcal{O}(N_c)$ であり、カラー非閉込め相ではグルーオンのカラー自由度により圧力が $\sim \mathcal{O}(N_c)$ へと不連続的にジャンプすると信じられてきたが、クォーク自由度のみが解放されてグルーオンがまだグルーボールのまま残る温度領域が存在することを指摘した。この新しい相は圧力が $\sim \mathcal{O}(N_c)$ と振る舞うことで特徴付けられ、中性子星の議論で注目されている高密度クォークイオン相と類似の性質を持つ [7]。

虚数回転 QCD における閉じ込め相と相転移の解析

虚数回転系では、高温域においても閉じ込め相が存在することが知られているが、閉じ込め・非閉じ込め相転移温度が角速度に対してどのように変化するかについては、模型・摂動計算と格子数値計算の間で結果の不一致が指摘されていた。福嶋・嶋田は、格子 QCD の強結合展開を用いて、最低次 (LO) の範囲で虚数角速度の効果を全次数まで取り入れた純グルーオン系の自由エネルギーを導出し、虚数角速度の増加とともに相転移温度が上昇することを示した。この結果は模型・摂動論的解析と整合的であり、さらに解析的導出を通じて、従来の格子定式化から得られる表式が虚数回転系に期待される対称性や虚数角速度の周期性を十分に備えていないことを指摘し、新たな格子数値計算手法の必要性を提唱した [8]。

さらに、Chen・福嶋・嶋田は、高温 QCD に対して虚角速度のもとでポリヤコフープ有効ポテンシャルを摂動的に計算し、十分大きな虚回転によりポリヤコフープがゼロをとる「摂動的閉じ込め相」が実現することを示した。また、この相が低温のハドロン相と連続的に接続される可能性に加え、空間的に不均一な構造やカイラル対称性の自発的破れが同時に現れうることを明らかにし、虚数回転下の QCD 相構造に新たな描像を与えた [14]。

核子中のエネルギー密度、圧力、せん断応力の擬ゲージ依存性

偏極電子と偏極原子核を衝突させる EIC 実験が始まることが決まり、近年核子の内部構造を調べる理論研究が活性化している。中でも、核子の重力形状因子が EIC 実験で測定できると考えられているため、重力形状因子から抽出することができる核子中のエネルギー密度、圧力、せん断応力の分布が注目されている。宇治・福嶋は、それらの分布がエネルギー運動量テンソルの擬ゲージの選び方によって一意に定まらなくなることを指摘し、核子の低エネルギー有効模型であるスキルム模型を用いて複数の擬ゲージにおける分布を例示した [9]。

相対論的スピン流体方程式の新しい定式化の提唱

スピンを近似的な保存量と見なすことで、圧力やエネルギーと同様の流体変数として扱う理論形式をスピン流体方程式という。相対論的重イオン衝突実験におけるラムダ粒子の偏極観測により、軌道角運動量がスピンへと転化していることが事実となり、それを契機としてスピン流体方程式の理論研究が一気に勢いづいた。相対論的な定式化は様々なグループが精力的に取り組んでいる課題であるが、まだ満足できる理論体系にはなっていない。福嶋らの国際共同研究チームはこの問題に長年にわたって取り組み、スピントensorに完全反対称化条件を課すことによって物理的自由度を制限する定式化を模索してきた。この方法は熱力学第二法則と整合させることが技術的に難しいのだが、苦勞の末に漸く矛盾のない理論形式を作り上げることに成功し、副産物として導出された新しいスピンの相対論的運動方程式について詳しく議論した [11]。

一定電場中の真空不安定性を取り込んだ in-in 形式の再構成

一定電場中ではシュウィンガー機構により真空が不安定化し、粒子・反粒子対生成が起こる。そのため、通常の in-in 形式では真空不安定性の効果を有限次の摂動論で扱うことが難しい。福嶋・湊は、in 真空と out 真空が非同値であることに着目し、境界波動関数の効果を自己エネルギー型の二次項として取り込むことで、真空不安定性を織り込んだ実時間伝播関数を導出した。さらに、この定式化により固有時刻表示に現れる追加の積分経路の起源を明らかにし、一定電場中の電流期待値の時間成長を記述した [12]。

ヒッグス - 閉じ込め相転移に対する格子上の非局所演算子

ヒッグス相と閉じ込め相の区別は、局所的な秩序変数では一意に特徴付けられないことが知られている。嶋田・山本は、この問題に対して格子ゲージ理論上で定義される非局所演算子に着目し、それらを用いてヒッグス - 閉じ込め相転移を特徴付ける枠組みを構築した。特に、適切に設計された非局所演算子が相の違いに敏感に応答することを示し、従来の局所量では捉えにくい相構造を識別できる可能性を指摘した [15]。

<受賞>

- [1] 吉田翔, 優秀発表賞, 原子核若手三者夏の学校, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2025 年 8 月 10 日。

- [2] 宇治知哉, 日本物理学会学生優秀発表賞, 理論核物理領域, 日本物理学会, 第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 16 日.

<報文>

(原著論文)

- [3] G. Aarts, K. Fukushima *et al.*, “Physics-driven learning for inverse problems in quantum chromodynamics”, *Nature. Rev. Phys.* **7**, no.3, 154-163 (2025).
- [4] Y. Hidaka and A. Yamamoto, “Anomaly of conserved and nonconserved axial charges in Hamiltonian lattice gauge theory”, *PTEP* **2025**, no.9, 093B04 (2025).
- [5] T. Fujimori, S. Kamata, T. Misumi, N. Sueishi and H. Taya, “Exact Wentzel–Kramers–Brillouin (WKB) Analysis of Two-Level Floquet Systems”, *PTEP* **2025**, no.10, 103A02 (2025).
- [6] K. Fukushima, Y. Hidaka, T. Uji, “Photon polarization tensor at finite temperature and density in a magnetic field”, *JHEP* **2025**, 181 (2025).
- [7] Y. Fujimoto, K. Fukushima, Y. Hidaka, and L. McLerran, “New state of matter between the hadronic phase and the quark-gluon plasma?”, *Phys. Rev. D* **112**, 074006 (2025).
- [8] K. Fukushima and Y. Shimada, “Imaginary rotating gluonic matter at strong coupling”, *Phys. Lett. B* **868**, 139716 (2025).
- [9] K. Fukushima and T. Uji, “Pseudo-gauge ambiguity in the distributions of energy density, pressure, and shear force inside the nucleon”, *Phys. Rev. D* **113**, 016025 (2026).
- [10] P. Adhikari, K. Fukushima *et al.*, “Strongly interacting matter in extreme magnetic fields”, *Prog. Part. Nucl. Phys.* **146**, 104199 (2026).
- [11] S. Fang, K. Fukushima, S. Pu, and D.L. Wang, “Relativistic spin hydrodynamics with antisymmetric spin tensors and an extension of the Bargmann-Michel-Telegdi equation”, *Phys. Rev. Lett.* in press.
- [12] K. Fukushima and S. Minato, “In-in formalism with resummation in a constant electric field: propagators including nontrivial boundary wavefunctions”, *JHEP* in press.

(会議抄録)

- [13] K. Fukushima, “QCD phase diagram and astrophysical implications”, *J. Subatomic Part. Cosmol.* **3**, 100066 (2025).
- [14] S. Chen, K. Fukushima, and Y. Shimada, “Perturbatively confined phase of QCD under imaginary rotation”, *Proceedings of Science, QCHSC24* **483**, 151 (2025).

- [15] Y. Shimada and A. Yamamoto, “Nonlocal operators on the lattice for the Higgs-confinement phase transition”, *J. Subatomic Part. Cosmol.* **5**, 100267 (2026).

(学位論文)

- [16] 南口誠介, “Probing the Existence of Quark Stars via Tidal Response”, 修士論文, 2025.
- [17] 嶋田侑祐, “High-Temperature Phase Structures of QCD in Curved Space-Time: From Rotation to Acceleration”, 博士論文, 2026.

(著書)

- [18] 福島健二, “QCD クォーク物質の理論 – トポロジー・量子異常・スピンをめぐって –”, 基本法則から読み解く物理学最前線 35, 共立出版 (2025).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [19] Y. Shimada, “Nonlocal Operators on the Lattice for the Higgs-Confinement Phase Transition”, The 21st International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2025), University of Wroclaw, Wroclaw, Poland, July 4, 2025.
- [20] P. Chatterjee, “Chiral magnetovortical instability in Hydrodynamic Weyl semimetals”, ISSP-IIS Joint Symposium on Physics of Open Systems: Resonance, Symmetry and Topology, The University of Tokyo, Kashiwa, Japan, August 7, 2025.

招待講演

- [21] K. Fukushima, “Spin hydrodynamics – mini-review and antisymmetric properties of the spin tensor”, Foundations and Applications of Relativistic Hydrodynamics, GGI, Florence, Italy, May 9, 2025.
- [22] S. Kamata, “Can we access PT symmetric QMs from Hermitian QMs, and vice versa?”, Exact WKB Analysis and Resurgence, BIMSA (online), China, May 8, 2025.
- [23] K. Fukushima, “Spin potential in and out of equilibrium”, 9th Int. Conf. on Chirality, Vorticity and Magnetic Fields in Quantum Matter, Sao Paulo, Brazil, July 9, 2025.
- [24] K. Fukushima, “Spaghetti of Quarks with Glueballs: connection between sQGP and Quarkyonic Matter”, Quark-Gluon Plasma in Heavy-Ion Collisions – Quantifying and Understanding Its Near-Perfect Fluidity 2025, Beijing, China, Sep. 15, 2025.
- [25] K. Fukushima, “Surprises and Challenges in the QCD Phase Diagram”, Nuclear Physics Across Energy Scales, CCNU, Wuhan, China, Sep. 19, 2025.

- [26] K. Fukushima, “Data Analysis for Neutron Star Matter and Anomaly Detection”, 17th Symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, Tsukuba, Japan, Oct. 6, 2025.
- [27] K. Fukushima, “Emergent conformality in dense QCD matter: lessons from a holographic QCD model”, The QCD Phase Diagram: From Theory to Experimental Signatures, Dalian, China, Oct. 8, 2025.
- [28] K. Fukushima, “Neutron stars vs. quark stars: how can they be distinguished?”, 2nd Int. Workshop on Physics at High Baryon Density (PHD2025), CCNU, Wuhan, China, Oct. 16, 2025.
- [29] K. Fukushima, “Real-time propagators in an electric field and applications”, International Symposium on Dynamics of Strong Interaction Matter, Qingdao, China, Oct. 19, 2025.
- [30] S. Minato, “Revisiting Color Superconductivity via Speed of Sound and Trace Anomaly”, International Symposium on Dynamics of Strong Interaction Matter, Qingdao, China, Oct. 19, 2025.
- [31] S. Kamata, “Reformulating the Ai-Bender-Sarkar conjecture for the massless QM”, Resurgent theory and Its applications, BIMSA, China, Dec. 13, 2025.
- [32] S. Minato, “I-Love-Q Relations: A Nuclear Physicist’s Perspective”, Workshop on recent developments from QCD to nuclear matter, Taipei, Taiwan, Dec. 18, 2025.
- [33] K. Fukushima, “Neutron and Quark Star Matter”, Workshop on recent developments from QCD to nuclear matter, Taipei, Taiwan, Dec. 19, 2025.
- (国内会議)
- 一般講演
- [34] 吉田翔, “de Sitter 時空中のハドロンの熱力学”, 原子核若手三者夏の学校, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2025 年 8 月 8 日.
- [35] 湊修平, “高密度クォーク物質の, 音速と凝縮”, 熱場の量子論とその応用, 東大物性研, 2025 年 9 月 5 日.
- [36] 宇治知哉, 福嶋健二, “ベクトルメソンスキルム模型による核子構造”, 日本物理学会, 第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 16 日.
- [37] 嶋田侑祐, 山本新, “アハラノフ-ボーム位相によるヒッグス・閉じ込め相転移の検出”, 日本物理学会, 第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 18 日.
- [38] 南口誠介, 宇治知哉, 福嶋健二, “磁気型 Love 数にみるクォーク星と中性子星の違い”, 日本物理学会, 第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 18 日.
- [39] 湊修平, 福嶋健二, “摂動 QCD と音速のピーク”, 日本物理学会, 第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 18 日.
- [40] 湊修平, “中性子星とカラー超伝導”, 対相関と対凝縮, 阪大 RCNP, 2026 年 1 月 22 日.
- [41] 福嶋健二, V.E. Ambrus, A. Gecic, “有限どんどの場の量子論による慣性モーメントの摂動計算”, 日本物理学会, 2025 年春季大会 (オンライン), 2026 年 3 月 23 日.
- 招待講演
- [42] 福嶋健二, “Lessons from hot QCD matter and unknowns from the nuclear physics point of view”, From Quarks to Neutron Stars: Insights from kHz Gravitational Waves, 東京大学 小柴ホール, 2025 年 4 月 23 日.
- [43] 福嶋健二, “高エネルギー QCD 物理学の挑戦”, 将来計画検討研究会, 東京大学, 2025 年 6 月 10 日.
- [44] 鎌田翔, “Persistent homology を用いた異常検知”, Physics Meets AI, 京都大学 益川ホール, 2026 年 2 月 20 日.
- (セミナー)
- [45] 山本新, “ Z_N lattice gauge theory: toy model for quantum simulation”, CREST HEP-QC セミナー (オンライン), 2025 年 4 月 9 日.
- [46] 嶋田侑祐, “Nonlocal Operators on the Lattice and the Phase Transition of the Abelian Higgs Model”, 京都大学, 2025 年 5 月 29 日.
- [47] 山本新, “Quantum simulation of lattice gauge theory”, 金沢大学, 2025 年 9 月 25 日.
- [48] Kenji Fukushima, “Recent advances in understanding the QCD phase diagram”, West University of Timisoara, Oct. 28, 2025.
- [49] Tomoya Uji, “Pseudo-gauge ambiguity of the mechanical properties inside a nucleon”, QCD theory seminars (online), Oct. 31, 2025.
- [50] Kenji Fukushima, “Unstable vacuum and resummed propagators in an electric field”, Eötvös Loránd University, Nov. 18, 2025.
- [51] 鎌田翔, “Reformulating the Ai-Bender-Sarkar conjecture for the massless QM”, 拓殖大学, 2026 年 1 月 21 日.
- [52] S. Kamata, “Exact Sum Rules and Zeta Generating Formulas from the ODE/IM correspondence”, Institute of Science Tokyo, Feb. 4, 2026.
- [53] 宇治知哉, “スキルム模型における偏極核子の内部構造”, 新潟大, 2026 年 2 月 16 日.
- [54] 湊修平, “Resummation for in-in formalism under spatially homogeneous electric field”, 新潟大学, 2026 年 2 月 16 日.
- [55] 嶋田侑祐, “曲がった時空における QCD の高温相構造 — 回転から加速度まで —”, 新潟大学, 2026 年 2 月 17 日.
- [56] S. Minato, “Impact of Higher-Order Color-Superconducting Gap Corrections on the Dense-Quark-Matter EoS”, KEK, 2026 年 2 月 25 日.
- [57] S. Kamata, “Exact Sum Rules and Zeta Generating Formulas from the ODE/IM correspondence”, OIST (online), March 25, 2026.

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.

Quarkyonic matter from an insight based on ultracold atom physics

Properties of dense matter are of great interest due to their relevance to massive neutron stars. Recent astrophysical observations indicate that quark matter emerges in the central region of these compact stars. However, it has been elusive how hadron matter changes into quark matter with increasing density. A fascinating scenario is the hadron-quark crossover, where hadron matter continuously changes into quark matter without phase transitions. Indeed, this picture can describe the observed mass-radius relation associated with the nuclear equation of state (EoS). On the other hand, the microscopic mechanism of the hadron-quark crossover has been an important pending problem.

Tajima, Liang, and their collaborators tackled this problem based on the analogy between the hadron-quark crossover and the Bose-Einstein condensate (BEC) to the Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) superfluid crossover [3]. Generalizing the fluctuation theory of the BEC-BCS crossover to the case with the three-body cluster formation (i.e., baryon formation), they showed that the three-body clustering fluctuation effect explains the peaked behavior of the sound velocity as well as quarkyonic-matter-like momentum distribution.

Simulating nuclear force in ultracold atoms

Nuclear three-body forces are among the most important research topics in nuclear physics, but their understanding is much more challenging than that of nuclear two-body forces. Main reasons include the experimental difficulty in observing the signature and the theoretical complexity involving many Feynman diagrams in the chiral effective field theory and the more-than-two-body problem. Nevertheless, it is well-known that the Fujita-Miyazawa three-body force, induced by two-pion exchange and one Δ -particle excitation, plays a crucial role in understanding the structure of nuclei and the neutron star EoS.

Tajima and his collaborators take an unprecedented strategy to study nuclear three-body forces by considering a quantum simulation of ultracold atoms. Impurities immersed in a Bose-Einstein condensate, called Bose polarons, are known to feel the Yukawa-type two-body interaction mediated by a superfluid phonon. In a recent work [11], it was shown that if Bose polarons are close to the impurity-boson Feshbach resonance, a closed-channel molecule plays the role of a Δ particle and thus induces the Fujita-Miyazawa-type three-body force among three Bose polarons. This result indicates that a microscopic physics related to the Fujita-Miyazawa three-body force can be investigated in this tunable many-body platform. They also showed that the signature of the Fujita-Miyazawa-type three-polaron force can be detected by observing the impurity EoS.

Tunneling transport at hadron-quark interface in massive neutron stars

Neutron stars can be regarded as wonderful testing grounds for nuclear many-body theories. The dynamical evolution of neutron stars provides us with an opportunity to study non-equilibrium phenomena under extreme conditions that are absent on Earth. In this direction, it is interesting to explore a quantum transport phenomenon involving both hadron and quark degrees of freedom. While the Andreev reflection and the Josephson effect have been investigated in either solely hadron or quark matter in the literature, the transport between them is theoretically challenging due to the baryon formation, which cannot be captured in the conventional Bogoliubov-de-Gennes-type approach.

Motivated by these backgrounds, Zhang, Tajima, and their collaborator formulated the tunneling transport theory at the hadron-quark interface in terms of Schwinger-Keldysh Green's function approach [9].

Considering the tunneling Hamiltonian for the baryon formation, they derived the perturbative expression of the tunneling current and the interface friction and discussed the Josephson tunneling current between baryon superfluidity and color superconductivity. It was shown that the direct-current Josephson current is related to the phase difference between two ordered phases.

Non-Hermitian renormalization group and quantum anomaly

Non-Hermitian physics realized in open quantum systems is one of the most important issues in modern physics. Strongly-interacting dissipative systems are theoretically challenging due to the interplay between non-perturbative strong correlations and non-Hermiticity. While the renormalization group (RG) method developed by Wilson has made significant progress in our understanding of non-perturbative phenomena in equilibrium systems, it is not well-defined in non-Hermitian systems due to the absence of a physically meaningful partition function.

Tajima, Liang, and their collaborators addressed this issue by considering the RG method based on dissipative few-body physics relevant to both nuclear and ultracold atomic systems. Considering the RG scale invariance of observables such as the scattering amplitude, they derived a non-Hermitian RG equation for few-body systems, which enables us to establish the microscopic foundation of the RG equation in non-Hermitian systems and an intuitive understanding of RG flow. As a consequence, they predicted the occurrence of a non-Hermitian quantum scale anomaly in two-dimensional dissipative systems, exhibiting the repeated appearance and disappearance of localized states. Moreover, they showed the relationship between quantum measurement backaction and multineutron correlations in a nuclear experiment. This work has been submitted to arXiv (arXiv:2602.08705 [quant-ph]) and is under review.

Isospin symmetry breaking of nuclear interaction

It is known that nuclear interaction has almost perfect isospin symmetry. However, this symmetry is slightly broken due to the mass difference between up and down quarks. The isospin symmetry breaking of the bare nuclear interaction is somewhat well known, but that in the nuclear medium is not yet well understood.

Naito and his collaborators have proposed relativistic mean-field (RMF) Lagrangian with explicit isospin symmetry breaking with considering the ρ^0 - ω mixing. This is the first RMF Lagrangian considering the isospin symmetry breaking [7]. This Lagrangian reproduces mass differences of mirror nuclei, which is a typical quantity of the isospin symmetry breaking, as well as basic observables such as masses and radii.

They also proposed a new observable called “mirror-skin thickness” to pin down the isospin symmetry breaking of the effective nuclear interaction from experimental data or *ab initio* calculation results [4]. This mirror-skin thickness is affected only by the Coulomb interaction and the isospin symmetry-breaking interaction. Therefore, this observable can be used to pin down the strength of the isospin asymmetric nuclear interaction.

Low-lying excited state of ^{229m}Th

Excitation energies of atomic nuclei are usually, at least, of the order of 100 keV; nevertheless, there are two exceptions: ^{229m}Th and ^{235m}U . The first-excited states of these two nuclei are eV order, and especially, the former is paid attention to because of the application of the nuclear clocks. Because of such a very low excitation energy, chemical states affect its half-life.

Naito and collaborators examined the decay mode of ^{229m}Th of different chemical states using analysis of the electronic structure of samples [8].

Neural network construction of equation of state from relativistic *ab initio* calculations

The properties of nuclear EoS beyond saturation density are crucial in nuclear physics and astrophysics. Although the relativistic Brueckner-Hartree-Fock (RBHF) theory, an *ab initio*, nonperturbative nuclear many-body theory starting from realistic interactions, accurately describes nuclear matter properties near the saturation density $\rho_0 \approx 0.16 \text{ fm}^{-3}$, its applicability is limited to densities up to $3\rho_0$, necessitating a reliable extrapolation to higher densities.

Wang and his collaborators employed supervised machine learning to train thousands of neural networks on low-density RBHF data. By enforcing thermodynamic consistency and smoothness, they selected a subset of 264 optimal models employing the Swish activation function, which was identified as the most reliable choice for stable extrapolation after extensive testing and comparison. Using

these models to extend the EoS to high density, they obtained the nuclear symmetry energy and then computed the neutron star mass–radius relation and tidal deformability, consistent with current astronomical observations. The corresponding extrapolation uncertainty originates from the combined contributions of both the 264 optimal models and the linear regression on nuclear matter EoS, yielding a symmetry energy of $E_{\text{sym}}(5\rho_0) = 136.0 \pm 52.8$ MeV, a pressure of $P(5\rho_0) = 346.3 \pm 97.4$ MeV/fm³, a maximum neutron star mass of $M_{\text{max}} = 2.18 \pm 0.18 M_{\odot}$, and a tidal deformability of $\Lambda_{1.4M_{\odot}} = 532 \pm 34$. This work [12] establishes a general and data-driven framework to explore dense matter EoS by integrating *ab initio* calculations with modern machine learning techniques.

Proton radioactivity in deformed nuclei with microscopic optical potential

In 2022, a new proton-emitting isotope ^{149}Lu was identified. The measured decay Q value of 1920(20) keV is the highest measured for a ground-state proton decay, and it naturally leads to the shortest directly measured half-life of 450^{+170}_{-100} ns for a ground-state proton emitter. By nonadiabatic quasiparticle calculations, it was concluded that ^{149}Lu is the most oblate deformed proton emitter observed to date.

Wang, Liang, and their collaborators presented a theoretical description of proton radioactivity in ^{149}Lu , by combining a deformed microscopic optical potential derived from *ab initio* nuclear matter calculations with the Wentzel-Kramers-Brillouin penetration probabilities. They predicted a novel angular-dependent phenomenon unprecedented in spherical proton emitters: the disappearance of classically allowed regions at small polar angles ($\theta \leq 21^\circ$). Their framework yields a half-life $T_{1/2} = 467^{+143}_{-108}$ ns for ^{149}Lu , in excellent agreement within uncertainties with the experimental value. Deformation analysis rigorously excludes configurations with $|\beta_2| \geq 0.32$. Extensions to $^{150,151}\text{Lu}$ and their isomers also achieve excellent agreement with experimental half-life data. This work has been submitted to arXiv (arXiv:2507.09692 [nucl-th]) and has been accepted in Phys. Rev. C as a Letter.

Collective quantum tunneling with time-dependent generator coordinate method

Quantum tunneling is a fundamental phenomenon in various fields of physics and chemistry and represents one of the most important quantum mechanical effects. Recently, McGlynn and Simenel [Phys.

Rev. C **102**, 064614 (2020)] proposed an innovative imaginary-time mean-field approach to address the problem of the time-dependent Hartree method, which exhibits a self-trapping effect in strongly interacting systems. They successfully enabled the mean-field evolution to explore the classically forbidden region in an exactly solvable two-well model. The computed tunneling probabilities showed an excellent agreement with exact solutions in the strong-interaction regime.

Inspired by that work, Wang, Liang, and their collaborators applied the time-dependent generator coordinate method (TDGCM) to the two-well model. Numerical simulations demonstrated that the TDGCM, by utilizing the real-time mean-field states as generator states, successfully overcomes the self-trapping effect, yielding tunneling dynamics in excellent agreement with the exact solution. Furthermore, they explored the expectation values of the generator coordinates from the correlated TDGCM many-body wave function. While different methods for calculating expectation values show consistent results in some cases, significant discrepancies are observed in others, providing critical insights into the emergence of collective and single-particle behaviors in interacting systems. This work has been submitted to arXiv (arXiv:2604.01906 [nucl-th]) and is under review.

<受賞>

- [1] Hiroyuki Tajima, Author Service Award, Springer Nature, 2025 年 5 月 29 日.

<報文>

(原著論文)

- [2] C. Wang, T. Naito, J. Li, and H. Liang, Eur. Phys. J. A **61**, 162 (2025).
- [3] H. Tajima, K. Iida, T. Kojo, and H. Liang, Phys. Rev. Lett. **135**, 042701 (2025).
- [4] T. Naito, Y. Hijikata, J. Zenihiro, G. Colò, and H. Sagawa, Eur. Phys. J. A **61**, 177 (2025).
- [5] R. Mizuno et al., Phys. Rev. C **112**, 024307 (2025).
- [6] Y. Guo, T. Naito, H. Tajima, and H. Liang, Phys. Rev. C **112**, 024310 (2025).
- [7] Y. Tanimura, T. Naito, H. Sagawa, and M.-K. Cheoun, Eur. Phys. J. A **61**, 229 (2025).
- [8] R. Masuda, T. Naito, M. Kaneko, H. Kazama, S. Hashiba, K. Misawa, and Y. Kasamatsu, Phys. Rev. Research **7**, 043217 (2025).
- [9] T. Zhang, H. Tajima, and M. Tachibana, Phys. Rev. D **112**, 123031 (2025).
- [10] Q. Wu, W. Li, Z. Niu, H. Liang, and M. Shi, Chin. Phys. C **49**, 114103 (2025).
- [11] H. Tajima, E. Nakano, and K. Iida, Phys. Rev. A **113**, L011305 (2026).

- [12] K. Chen, X. Qu, H. Tong, S. Wang, and Y. Yu, *Astrophys. J.* **1000**, 306 (2026).
- [13] C. Ding, C. Wang, J. Yao, H. Hergert, H. Liang, and S. Bogner, *Phys. Rev. Lett.* **136**, 052501 (2026).

(国内雑誌)

- [14] 田島裕之, 「ポーラロン描像から探る核物質の世界」, *日本物理学会誌* 80 (8), 458 (2025).

(学位論文)

- [15] T. Zhang, “Tunneling Hamiltonian analysis of quantum transport phenomena in cold atomic systems,” Ph.D. thesis.
- [16] Z. Zhang, “Gauged auxiliary-field quantum Monte Carlo method for interacting many-fermion systems,” Ph.D. thesis.
- [17] X. Liu, “Free-field approaches to boundary rational two-dimensional conformal field theories,” Ph.D. thesis.
- [18] 村上透, 「汎関数繰り込み群を用いた有限温度における一次元フェルミオン系の研究」, 修士論文.

(著書)

- [19] 田島裕之著, 加藤岳生監修, 『凝縮系における場の量子論-初歩から始めるファインマンダイアグラム-』, 共立出版 (2025).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [20] T. Naito, “Arch behaviour of charge radii with Fayans pairing,” ARIS2026 (2026-02-09, パルセイイざか (福島県福島市)).
- [21] T. Naito, “Atomic physics towards nuclear physics,” NuSRAP2025 (2025-11-18, 崇実大学校 Origin of Matter and Evolution of Galaxies Institute (韓国・ソウル特別市)).
- [22] T. Naito, G. Colò, T. Hatsuda, X. Roca-Maza, and H. Sagawa, “QCD-based approach on isospin symmetry breaking energy density functional,” The 29th International Nuclear Physics Conference (INPC2025) (2025-05-27, Daejeon Convention Center (韓国・大田広域市)).
- [23] H. Tajima, K. Iida, T. Kojo, and H. Liang, “Fluctuation effects and peaked speed of sound in the hadron-quark crossover,” From Quarks to Neutron Stars: Insights from kHz gravitational waves, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, April 23–24, 2025 (poster).
- [24] H. Tajima, “Polaron physics and nuclear symmetry energy in neutron star matter,” XIIIth International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSym25), RIKEN, Kobe, Japan, September 8–13, 2025.

- [25] S. Wang, “Microscopic optical potential for nucleon-nucleus scattering and proton radioactivity,” Advancing physics at next RIBF (ADRIB26), RIKEN, Wako, Japan, March 5–6, 2026.

招待講演

- [26] T. Naito, “Isospin symmetry breaking based on nuclear density functional theory,” Italy-Japan Symposium on Joint Activities in Fundamental Physics – 1日伊基礎物理学共同研究活動シンポジウム (2026-03-10, Università degli Studi di Enna ”Kore” (イタリア・シチリア自治州エンナ)).
- [27] T. Naito, “QCD-based approach on isospin symmetry breaking in nuclear density functional theory,” Workshop on recent developments from QCD to nuclear matter (2025-12-18, 中央研究院 物理研究所 (台湾・台北市)).
- [28] T. Naito, “Impact of the isospin symmetry breaking on nuclear properties,” 85th OMEG-SSANP Workshop (2025-06-02, 崇実大学校 Origin of Matter and Evolution of Galaxies Institute (韓国・ソウル特別市)).
- [29] T. Naito, “Isospin symmetry breaking energy density functional based on quantum chromodynamics,” TOPTIER Focus Program: Cutting-Edge Nuclear Theories for Exotic Nuclei (2025-04-22, Center for Exotic Nuclear Studies, Institute for Basic Science (韓国・大田広域市)).
- [30] T. Naito, “What Is The Possible Heaviest Nuclei?” 84th OMEG-SSANP Workshop “Recent Progress of Nuclear Reactions and Nuclear Structure in Theoretical Side” (2025-04-19, 崇実大学校 Origin of Matter and Evolution of Galaxies Institute (韓国・ソウル特別市)).
- [31] H. Tajima, “Pairing in ultracold atoms and in neutron stars,” The 2nd Nuclear Physics Tortoise Lecture Series (NPTLS), Yonsei University, Seoul, Korea, January 12–16, 2026.
- [32] H. Tajima, “Crossover between ultracold atoms and nuclear matter,” Workshop on recent developments from QCD to nuclear matter, Academia Sinica, Taipei, December 17–20, 2025.
- [33] H. Tajima, “Interdisciplinary approach to multi-body correlations,” 2nd Symposium on TOPTIER Platform in Extreme Rare Isotope Science, RIKEN, Wako, Japan, August 19–21, 2025.
- [34] H. Tajima, “Impurities and clusters in dilute nuclear matter,” TOPTIER Focus Program: Cutting Edge Nuclear Theories for Exotic Nuclei, Institute for Basic Science, Daejeon, Korea, April 20–22, 2025.
- [35] H. Liang, “Studies in quartet BCS theory,” Workshop on New Generation Nuclear Density Functionals 2025, Beijing, China, June 26–30, 2025.
- [36] H. Liang, “Nuclear physics with AI and quantum computing,” International Summer School in

Mathematics and Physics 2025, Jilin University, Changchun, China, August 12–22, 2025.

- [37] H. Liang, “Attempts for *ab initio* nuclear DFT,” Workshop on Nuclear Science and Technology on HIAF, Huizhou, China, January 23–27, 2026.

(国内会議)

一般講演

- [38] 内藤智也, “原子核における s 波と p 波超流動相” 第 4 回「対相関と対凝縮」研究会 (2026-01-22, 大阪大学 核物理研究センター (大阪府茨木市)).
- [39] T. Naito, “A recent progress on the Fayans pairing,” Microscopic Description of Nuclear Collective Phenomena via Large-Scale Density Functional Calculations (2026-01-09, 北海道大学 理学院 (北海道札幌市)).
- [40] 田島裕之, “On the proton effective mass in dilute nuclear matter”, ～中性子星の観測と理論～ 研究活性化ワークショップ 2025, 理化学研究所, 2025 年 5 月 19–21 日.
- [41] 田島裕之, “ボースポーラロン間に働く藤田宮沢型三体力”, 第 7 回冷却原子研究会「アトムの会」, ロワジールホテル豊橋, 2025 年 8 月 21–23 日.
- [42] 田島裕之, “冷却原子気体における藤田宮沢型三体力”, 基研研究会「核力・ハドロン間相互作用と量子多体計算の進展」, 京都大学, 京都, 2026 年 2 月 16 日.
- [43] 猪谷太輔, 田島裕之, 関野裕太, 土肥明, 長瀧重博, “マグネター内クラスト領域における $3P_0$ 中性子超流動の実現可能性”, 日本物理学会 2026 年春季大会, オンライン, 2026 年 3 月 23–26 日.
- [44] 村上透, 田島裕之, S. Wang, H. Liang, “汎関数繰り込み群を用いた有限温度における一次元フェルミオン系の研究”, 日本物理学会 2026 年春季大会, オンライン, 2026 年 3 月 23–26 日.
- [45] 田島裕之, 仲野英司, 飯田圭, “冷却原子気体における超流動フォノンを媒介とした藤田宮沢型三体力”, 日本物理学会 2026 年春季大会, オンライン, 2026 年 3 月 23–26 日.

招待講演

- [46] T. Naito, “What Is The Possible Heaviest Nuclei?” Advancing physics at next RIBF (ADRIB25) (2025-01-23, 理化学研究所 仁科加速器科学研究センター (埼玉県和光市)).
- [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」(2024-11-14, 京都大学 大学院理学研究科 セミナーハウス (京都府京都市, オンラインにて発表)).
- [48] 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?” (2024-05-16, 理化学研究所 仁科加速器科学研究センター (埼玉県和光市)).

- [49] 田島裕之, “冷却原子系と三体力”, ERATO TOMOE Progress Meeting, 京都大学, 2025 年 6 月 30 日–7 月 1 日.
- [50] 田島裕之, “核物質のスピン偏極と磁気的性質について”, 大阪大学 RCNP 研究会「量子多体系におけるスピン自由度の織り成すダイナミクス」兼大阪大学 RCNP コロキウム, 大阪大学 RCNP, 2025 年 10 月 29–31 日.
- [51] 田島裕之, “物性物理と原子核物理の交差点”, 研究会「第 10 回 凝縮系理論の最前線」, ニューウェルシティ湯河原, 湯河原, 2026 年 2 月 17–19 日.

(セミナー)

- [52] H. Liang, “Colorful nuclear physics and origin of elements,” Southwest University, China, April 1, 2025.
- [53] H. Liang, “Colorful nuclear physics and origin of elements,” Chongqing University, China, April 3, 2025.
- [54] T. Naito, “Isospin symmetry breaking in nuclear density functional theory towards accurate description of nuclear structure,” Espresso Seminars “Theory Room” (2026-03-13, Laboratori Nazionali del Sud, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (イタリア・シチリア自治州カタニーア)).
- [55] T. Naito, “Mechanism of the arch behaviour of charge radii in the Fayans pairing,” ICCUB Had-NucAtUB Seminar (2026-02-25, Departament de Física Quàntica i Astrofísica & Institut de Ciències del Cosmos, Universitat de Barcelona (スペイン・カタルーニャ州バルセロナ)).
- [56] T. Naito, “Quantum multi-body problems using unsupervised machine learning,” DEEP-IN Seminar (2025-11-05, 理化学研究所 数理創造研究センター (埼玉県和光市)).
- [57] 内藤智也, “密度で探る原子核物理” 実験原子核物理研究室セミナー (2025-09-02, 東京都市大学 理工学部 自然科学科 (東京都世田谷区)).
- [58] T. Naito, “Towards Accurate Nuclear Energy Density Functional,” Nuclear Theory Group Seminar (2025-06-16, Department of Physics, University of Zagreb (クロアチア・ザグレブ)).
- [59] 田島裕之, “中性子星の物性物理”, 理化学研究所 iTHEMS GWX-EOS セミナー, 2025 年 6 月 25 日.
- [60] H. Tajima, “Tripling fluctuations in the hadron-quark crossover: Insights from ultracold atomic physics,” Hadron theory group seminar, The University of Tokyo, 2025 年 12 月 1 日.
- [61] H. Tajima, “An interdisciplinary approach to many-body physics: From ultracold atoms to dense matter,” KEK-JAEA Joint Seminar, KEK, Tsukuba, 2026 年 1 月 29 日.
- [62] S. Wang, “Microscopic optical potential RBOM from a relativistic *ab initio* method,” Nuclear Many-body Theory Lab Seminar, RIKEN, Wako, Japan, 2026 年 2 月 10 日.

1.3 素粒子論研究室

1.3.1 現象論

量子計測・量子センシング

福田、諸井、シッチャヌギリッツは、中山（東北大、KEK）、千草（LBL, MIT）、水落（京都大、KEK）、羽澄（KEK）および松崎（中央大）とともに、マルコフ型ノイズが存在する状況下での交流磁場測定において、量子もつれを用いた測定感度向上の可能性を調べた。特に、GHZ 型エンタングル状態を用いることで、適切な条件のもとで交流磁場の検出感度を向上できることを示した [7]。

福田、シッチャヌギリッツは松崎（中央大）とともに、量子センサーを用いた軽い暗黒物質探索において、信号の方向依存性を利用する新しい探索手法を提案した。これにより、暗黒物質起源の信号を方向情報によって特徴づける可能性を示した [8]。

福田、諸井、シッチャヌギリッツは、陳（京都大）、飯山（ICEPP）、三野（ICEPP）、中原（IQM Quantum Computers, Finland）、新田（KEK）とともに、量子センサーを用いた暗黒物質探索において、集団的なエンタングル状態への射影を利用して背景事象を抑制する方法を提案した。これにより、量子測定の利点を活かしつつ、暗黒物質信号の識別性能を高められることを示した [9]。

暗黒物質生成

福田、李、諸井、仁木は、遅く崩壊するスカラー場の崩壊による Higgsino 暗黒物質の非熱的生成を調べた。この研究では、共消滅や Sommerfeld 効果を適切に取り入れて relic abundance を評価し、再加熱温度が Higgsino 質量より低い場合に、熱的生成の場合とは異なる質量領域でも正しい暗黒物質密度を実現しうることを示した [10]。

初期宇宙のトポロジカル構造

福田は、濱田（KEK, 総研大）、鎌田（UCAS 杭州市高等研究院, ICTP-AP, RESCEU）、向田（KEK, 総研大）、内田（Kavli IPMU）とともに、宇宙初期における磁気ヘリシティ、磁気単極子、ヒッグス場の winding の関係を調べた。これにより、初期宇宙におけるトポロジカルな構造と粒子生成過程の関係について、新たな理論的理解を与えた [11]。

量子パートンシャワー

山崎は量子パートンシャワーを記述するアルゴリズムを量子アルゴリズムのケース・スタディとして論じた [12]。

量子重力の現象論

山崎は、他 5 名の海外研究者とともに、量子重力に動機づけられたシナリオの宇宙論的検証可能性について論じた [13]。

レプトンフレーバー非対称性

秋田、濱口は、M. Ovchinnikov (CERN) とともに、近年のスパル望遠鏡の観測からも存在が示唆され、宇宙に様々な影響を与える、初期宇宙の大きなレプトンフレーバー非対称性がアフleck-ダイン機構によって自然に生成できることを示した [14]。

ステライルニュートリノ暗黒物質

秋田、濱口は、M. Ovchinnikov (CERN) とともに、初期宇宙にレプトン非対称性が存在するときのステライルニュートリノ暗黒物質の最大パラメータ空間を導出した [15]。

活動銀河 NGC 1068 からのニュートリノと暗黒物質

秋田は、A. Ibarra (ミュンヘン工科大)、R. Zimmermann (MPI for Astrophysics) とともに、IceCube 実験で検出されている活動銀河 NGC 1068 由来のニュートリノが NGC 1068 での暗黒物質の対消滅によって生成された可能性を指摘した [16]。

電弱精密測定による軽いヒッグシーノ探索

永田、尾崎は、電子陽電子加速器による電弱精密測定の将来感度で軽い超対称性粒子ヒッグシーノを間接検出できるパラメータ領域があることを示した [17]。また、永田は、H. Baer (U. of Oklahoma)、V. Barger (U. of Wisconsin)、D. Sengupta (INFN) らとともに、NUHM2 模型や mirage mediation 模型といった具体的な超対称シナリオをとりあげ、電弱精密測定による探索見込みを評価した [18]。

中性子星におけるアクシオン放射

濱口、永田は、J. Zheng とともに、中性子星内で超伝導状態にある陽子から放射されるアクシオンの放射率を再計算し、先行研究の計算の間に見られていた不一致が、有効質量の依存性の違いに由来することを明らかにした [19]。

線形 e^+e^- 加速器実験

永田は、Linear Collider Vision Collaboration の一員として、将来の線形 e^+e^- 加速器実験について、特に新物理探索に関するレビューを執筆した [20].

大統一理論とインフレーション

永田は、J. Ellis (King's College London, CERN), M. A. G. Garcia (UNAM), D. V. Nanopoulos (CERN, Academy of Athens, Texas& M University), K. A. Olive (U. of Minnesota) らとともに、no-scale 大統一理論に基づくインフレーションを考察し、大統一ヒッグス場の真空期待値がインフレーション物理量に与える影響を評価した [21].

レプトジェネシス

濱口、横山、和田は、A. Graneli (ボローニャ大), M. E. Ramirez-Quezada (マインツ大), 嶋田 (京大基研) とともに、熱的レプトジェネシスに関する数値的な解析を実施し、バリオン非対称を再現するために必要な右巻きニュートリノの質量の下限と、ニュートリノレス二重ベータ崩壊における有効マヨラナ質量との間の定量的な関係を示した [22].

高橋は、和田 (東北大、TUM) とともに、マヨロンにより駆動される自発的レプトジェネシスの枠組みで非対称暗黒物質模型を構築し、Cogenesis シナリオのもと、暗黒物質密度の観測値を説明可能なパラメータ空間の解析を行った。[23].

1.3.2 弦理論、場の理論全般

2 次元共形場理論の構成

矢萩は、川畑 (東大) と共に、オービフォールドを用いた 2 次元共形場理論の構成及びその双対性について研究を行った [24]。また、奥田 (東大)、西岡 (阪大) と共に、2 次元共形場理論と 3 次元場の理論であるチャーン・サイモンズ理論との関係やそれに基づく理論の分類について調べ [25]、関連する博士論文を執筆した [40]。

フラクトン系の場の理論

大森、島村は、フラクトン系の場の理論の研究を進め、ギャップレスなフラクTON的ボソン理論における foliated-exotic 双対性を発見した [26]。島村はその結果を含む研究をまとめ、博士論文を執筆した [41]。

アノマリーとユニタリ演算子

島村は、岡田、立川、Zhang (東大) とともに、対称性とそのアノマリーに関連する位置依存ユニタリ演算子を構成し、半交換する場合について調べた [27]。

強結合場の理論の量子もつれ

渡邊はあるクラスの $U(1)$ 対称性を持つ 3 次元強結合共形場理論において、円盤領域の荷電エンタングルメントエントロピー (symmetry-resolved entanglement entropy) を計算した。結果、あるクラスの理論においては巨大電荷極限において荷電エンタングルメントエントロピーがある値に収束することを示した [28].

2 次元 $\mathcal{N} = (0, 1)$ ゲージ理論

山崎、Bao、Zhou は、2 次元の $\mathcal{N} = (0, 1)$ ゲージ理論の楕円種数に対して、厳密な留数公式を導出した [29]。

4 次元チャーン・サイモンズ理論

山崎は、Ashwinkumar (ベルン) および坂本 (豊田工大) とともに可積分場の理論の格子離散化を 4 次元チャーン・サイモンズ理論において系統的に論じた [30]。山崎は、坂本 (豊田工大)、Tateo (トリノ) とともに 2 次元可積分場の理論の $T\bar{T}$ -変形を 4 次元チャーン・サイモンズ理論において実現した [36]。

格子状の非可逆対称性

山崎は、Cao (南デンマーク)、Li (ヘント) とともに双対変換を用いて非可逆対称性により守られた相の分類を論じた [31]。また山崎は Cao (南デンマーク)、Miao (東大) とともに、非可逆対称性を双対性としてもつ格子模型を系統的に構成する新たな手法について論じた [32]。

BPS 状態の数え上げ

山崎と Bao (東大) は、BPS 状態の数え上げを新たな統計模型として定式化し、その背後にある代数を発見した [33]。

3 次元 $\mathcal{N} = 4$ 理論と頂点作用素代数

山崎と Coman (エディンバラ)、Shim (清華大)、Zhou (SIMIS) は 3 次元 $\mathcal{N} = 4$ 理論の境界に現れる頂点作用素代数を論じた [34]。

量子重力におけるアンサンブル平均

山崎と Ashwinkumar (ベルン), Kidambi (MPI), Leedom (DESY) は、一般化されたナライン理論のアンサンブル平均とそのホログラフィーについて論じた [35]。

<受賞>

- [1] シッチャヌギリッツ タナポーン, 日本物理学会若手奨励賞, 素粒子論領域 日本物理学会, 2026 年 3 月
- [2] K. Ohmori, Frontiers Science Award 2025, Beijing
- [3] 尾崎弦太, ポスター優秀発表賞、学術変革領域 (A) 「極稀事象で探る宇宙物質の起源と進化: 新たな宇宙物質観創生のフロンティア」領域研究会、2025 年 6 月 26 日。
- [4] 尾崎弦太、第 80 回年次大会 (2025 年) 日本物理学会 学生優秀発表賞、日本物理学会、2025 年 9 月 16 日。
- [5] K. Maruyoshi, T. Okuda, J.W. Pedersen, R. Suzuki, M. Yamazaki, and Y. Yoshida, Best Paper Prize 2025, Journal of Physics A
- [6] K. Costello, E. Witten, and M. Yamazaki, Frontiers Science Award 2025, Beijing

<報文>

(原著論文)

- [7] T. Sichanugrist, H. Fukuda, T. Moroi, K. Nakayama, S. Chigusa, N. Mizuochi, M. Hazumi and Y. Matsuzaki, “Entanglement-enhanced ac magnetometry in the presence of Markovian noise,” *Phys. Rev. A* **111**, no.4, 042605 (2025) [arXiv:2410.21699 [quant-ph]].
- [8] H. Fukuda, Y. Matsuzaki and T. Sichanugrist, “Directional Searching for Light Dark Matter with Quantum Sensors,” *Phys. Rev. Lett.* **135**, no.24, 241802 (2025) [arXiv:2506.19614 [hep-ph]].
- [9] S. Chen, H. Fukuda, Y. Iiyama, Y. Mino, T. Moroi, M. Nakahara, T. Nitta and T. Sichanugrist, “Background suppression in quantum sensing of dark matter via collective entangled-state projection,” *Phys. Rev. D* **113**, no.5, 055014 (2026) [arXiv:2510.01816 [hep-ph]].
- [10] H. Fukuda, Q. Li, T. Moroi and A. Niki, “Non-thermal production of Higgsino dark matter by late-decaying scalar fields,” *JHEP* **06**, 091 (2025) [arXiv:2410.15733 [hep-ph]].
- [11] H. Fukuda, Y. Hamada, K. Kamada, K. Mukaida and F. Uchida, “Magnetic helicity, magnetic monopoles, and Higgs winding,” *JHEP* **03**, 127 (2026) [arXiv:2509.25734 [hep-ph]].
- [12] M. Yamazaki, *PoS QCHSC24*, 260 (2025) [arXiv:2502.18059 [hep-ph]].
- [13] Y. Gouttenoire, S. F. King, R. Roshan, X. Wang, G. White and M. Yamazaki, *Phys. Rev. D* **112**, no.7, 7 (2025) [arXiv:2501.16414 [hep-ph]].
- [14] K. Akita, K. Hamaguchi and M. Ovchinnikov, “Affleck-Dine leptoflavorgenesis,” *JHEP* **12**, 142 (2025) [arXiv: 2509.08175 [hep-ph]].
- [15] K. Akita, K. Hamaguchi and M. Ovchinnikov, “Maximal Parameter Space of Sterile Neutrino Dark Matter with Lepton Asymmetries,” *Phys. Rev. Lett.* **136**, 11, 111001 (2026) [arXiv: 2507.20659 [hep-ph]].
- [16] K. Akita, A. Ibarra and R. Zimmermann, “Dark matter explanations for the neutrino emission from the Seyfert galaxy NGC 1068,” [arXiv: 2507.16539 [hep-ph]].
- [17] N. Nagata and G. Osaki, “Electroweak precision data as a gateway to light higgsinos,” *JHEP* **07**, 242 (2025) [arXiv:2503.20602 [hep-ph]].
- [18] H. Baer, V. Barger, N. Nagata and D. Sengupta, “Reach of e^+e^- Higgs factory for light higgsinos via electroweak precision observables and comparison with other future facilities,” *Phys. Lett. B* **873**, 140203 (2026) [arXiv:2509.18288 [hep-ph]].
- [19] K. Hamaguchi, N. Nagata and J. Zheng, “Axion emission from proton Cooper pairs in neutron stars,” *JCAP* **06**, 038 (2025) [arXiv:2502.18931 [hep-ph]].
- [20] H. Abramowicz *et al.* [Linear Collider Vision], “A Linear Collider Vision for the Future of Particle Physics,” *Eur. Phys. J. ST* (2026) [arXiv:2503.19983 [hep-ex]].
- [21] J. Ellis, M. A. G. García, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, “Deformations of Starobinsky inflation in no-scale $SU(5)$ and $SO(10)$ GUTs,” *JCAP* **12**, 038 (2025) [arXiv:2508.13279 [hep-ph]].
- [22] G. Alessandro, K. Hamaguchi, M.E. Ramirez-Quezada, K. Shimada, J. Wada, and T. Yokoyama, “Insights on the scale of leptogenesis from neutrino masses and neutrinoless double-beta decay,” *Eur. Phys. J. C*, **85**, 778 (2025) [arXiv:2502.10093 [hep-ph]].
- [23] H. Takahashi and J. Wada, “Asymmetric Dark Matter from Low-Scale Spontaneous Leptogenesis,” [arXiv:2601.01849 [hep-ph]].
- [24] K. Kawabata and S. Yahagi, *SciPost Phys.* **18** (2025) no.5, 166.
- [25] K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda and S. Yahagi, *JHEP* **05** (2025), 105.
- [26] K. Ohmori and S. Shimamura, *JHEP* **09**, 049 (2025) [arXiv:2504.10835 [cond-mat.str-el]].
- [27] M. Okada, S. Shimamura, Y. Tachikawa and Y. Zhang, *JHEP* **11**, 122 (2025) [arXiv:2509.02989 [hep-th]].
- [28] M. Watanabe, *JHEP* **03** (2026), 237 doi:10.1007/JHEP03(2026)237 [arXiv:2506.10072 [hep-th]].

- [29] J. Bao, M. Yamazaki and D. Zhou, [arXiv:2508.06865 [hep-th]].
- [30] J. i. Sakamoto, R. Tateo and M. Yamazaki, JHEP **01**, 084 (2026) [arXiv:2509.12303 [hep-th]].
- [31] W. Cao, M. Yamazaki and L. Li, Phys. Rev. Lett. **136**, no.4, 040402 (2026) [arXiv:2502.20435 [cond-mat.str-el]].
- [32] W. Cao, Y. Miao and M. Yamazaki, SciPost Phys. Core **8**, 070 (2025) [arXiv:2501.12514 [cond-mat.str-el]].
- [33] J. Bao and M. Yamazaki, SciPost Phys. **18**, no.4, 143 (2025) [arXiv:2501.03365 [hep-th]].
- [34] I. Coman, M. Shim, M. Yamazaki and Y. Zhou, Commun. Math. Phys. **406**, no.6, 122 (2025) [arXiv:2312.13363 [hep-th]].
- [35] M. Ashwinkumar, A. Kidambi, J. M. Leedom and M. Yamazaki, Adv. Theor. Math. Phys. **29**, no.1, 1-55 (2025) [arXiv:2311.00699 [hep-th]].
- [36] M. Ashwinkumar, J. i. Sakamoto and M. Yamazaki, Adv. Theor. Math. Phys. **29**, 1509-1694 (2025) [arXiv:2309.14412 [hep-th]].
- (国内雑誌)
- [37] 日本物理学会誌 2025 年 80 巻 12 号「Large charge 展開—臨界現象の新しい解析法」(渡邊真隆)
- (学位論文)
- [38] Q. Li, “Non-thermal production of Higgsino dark matter,” (July, 2025).
- [39] T. Sihanugrist, “Dark Matter Detection with Superconducting Qubits,” (March, 2026).
- [40] 博士論文: S. Yahagi, “Conformal field theories from error-correcting codes and abelian Chern-Simons theories.”
- [41] 博士論文: S. Shimamura, “Foliated-Exotic Duality and Anomaly Inflow in Fracton Quantum Field Theories.”
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [42] K. Akita, “New physics decaying into metastable particles: impact on cosmic neutrinos,” Higgs as a Probe of New Physics 2025, 12 June 2025, The University of Osaka, Japan.
- [43] K. Akita, “Sterile neutrino dark matter with lepton flavor asymmetries,” The Frontier of Particle Physics: Exploring Muons, Quantum Science and the Cosmos, 20 June 2025, YITP, Japan.
- [44] G. Osaki, “Axion DM detection using shift current,” The Frontier of Particle Physics: Exploring Muons, Quantum Science and the Cosmos, 18 June 2025, YITP, Japan.
- [45] T. Yokoyama, “Leptogenesis and Neutrinoless Double-Beta Decay,” The Conferences on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY-2025), 20 Aug. 2025, UC Santa Cruz, USA.
- [46] T. Sihanugrist, “Search for wavelike dark matter with superconducting qubits and quantum circuits,” Dark Matter and Neutrinos 2025. Paris, France, May 5–23, 2025.
- [47] T. Sihanugrist, “Leptogenesis from magnetic helicity of gauged $U(1)_{B-L}$ (poster presentation),” Summer Institute 2025. Yeosu, Korea, Aug 17–22, 2025.
- 招待講演
- [48] K. Hamaguchi, “Exploring Physics Beyond the Standard Model via Temperature Observations of Neutron Stars,” The Future is Whispering, NYCU, 25–27 June 2025.
- [49] K. Hamaguchi, “Affleck-Dine Leptoflavorgenesis,” 2025 CERN-CKC joint workshop with the 13th KIAS Workshop on Particle Physics and Cosmology, November 16-21, Busan.
- [50] N. Nagata, “Cassiopeia A Neutron Star Limit on Axion”, The 4th International BSM Workshop: Building for Tomorrow, Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai, China, Aug 26, 2025.
- [51] N. Nagata, “Exploring Physics Beyond the Standard Model via Temperature Observations of Neutron Stars”, The Frontier of Particle Physics: Exploring Muons, Quantum Science and the Cosmos, YITP, Kyoto, Japan, Jun 19, 2025.
- [52] N. Nagata, “Cassiopeia A Neutron Star Limit on Axion”, Frontiers Beyond the Standard Model, University of Minnesota, MN, USA, May 17, 2025.
- [53] N. Nagata, “What’s Fundamentally New at High Energies”, LHCP 2025, GIS NTU Convention Center, Taipei, May 9, 2025.
- [54] G. Osaki, “Axion DM detection using shift-current,” 41th Regular Meeting of the New Higgs Working Group, Osaka University, Osaka, Nov 8, 2025.
- [55] T. Yokoyama, “Leptogenesis and Neutrinoless Double-Beta Decay”, 41st Regular Meeting of the New Higgs Working Group, Osaka University, Osaka, Nov. 8, 2025.
- [56] H. Takahashi, “Exploring chirality structure in nucleon decay,” The Frontier of Particle Physics: Exploring Muons, Quantum Science and the Cosmos, YITP, Kyoto, Jun 20th, 2025.
- [57] H. Takahashi, “Exploring chirality structure in nucleon decay,” Summer Institute, Yeosu, Korea, Aug 19th, 2025.
- [58] H. Takahashi, “Exploring chirality structure in nucleon decay,” 28th International Conference on Particle Physics & Cosmology, Pittsburgh, United States, Oct 15th, 2025.

- [59] H. Takahashi, “Asymmetric Dark Matter from Low-Scale Spontaneous Leptogenesis,” KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology, KEK, Tsukuba, Feb 17th, 2026.
 - [60] T. Moroi, “Dark Matter Detection with Rydberg Atoms,” The International Joint Workshop on the Standard Model and Beyond 2025, (December 9 - 12, 2025), Taipei, Taiwan.
 - [61] T. Moroi, “Quantum Error Correction for Dark Matter Detection,” Particle Physics at Crossroads, (March 3 - 6, 2026), Sapporo, Japan.
 - [62] T. Sihanugrist, “Dark matter detection with qubits and quantum circuits,” ASPIRE workshop: Gravitational Waves & Dark Matter with Quantum Technologies, the University of Chicago, Chicago, United States of America, Dec 1, 2025.
 - [63] K. Ohmori, The International Congress for Basic Science, Jul. 2025, Beijing
 - [64] M. Yamazaki, “Topology in Lattice Yang–Mills Theory”, Lattice Methods, TQFTs, and Symmetries, Uppsala Center for Geometry and Physics, Mar. 9-13, 2026
 - [65] M. Yamazaki, “Quantum Parton Showers”, Quantum Computing for High-Energy Physics (QC4HEP), LMU Munich, Feb. 26-27, 2026
 - [66] M. Yamazaki, “Quiver Algebras and Their Representations,” Quantum Algebras Meet Gauge and String Theory, SIMIS, Jan. 12-16, 2026
 - [67] M. Yamazaki, “Quiver Algebras and Their Representations,” Representations of Quivers in Mathematics and String Theory, IBS-CGP POSTECH, Pohang, Dec. 8-12, 2025
 - [68] M. Yamazaki, “QESEM User Case”, UTokyo-QEDMA workshop, Dec. 1-2, 2025
 - [69] M. Yamazaki, “Aspects of Discrete Light-Cone Quantizations”, Challenges in Integrability, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS, Wuhan, China, Nov. 9-21, 2025
 - [70] M. Yamazaki, “Generalized Chiral Potts Models and Hyperbolic Monopoles from Chern-Simons Theories,” Unification of Integrable Systems, Nagoya University, Oct. 27-29, 2025
 - [71] M. Yamazaki, “Emergent Symmetries in Ensemble Averages”, RIKEN–Berkeley Workshop on Quantum Gravity 2025, RIKEN Wako, Oct. 23-24, 2025
 - [72] M. Yamazaki, “Exploration of Quantum Advantage in Holographic Models”, IBM technical review, UTokyo, Oct. 20, 2025
 - [73] M. Yamazaki, “TTbar and root-TTbar deformations in four-dimensional Chern-Simons theory”, Japan-UK workshop on Quantum Gravity, RIKEN Kobe, Sep. 22-26, 2025
 - [74] M. Yamazaki, “TTbar and root-TTbar deformations in four-dimensional Chern-Simons theory”, Integrability, Dualities and Deformations 2025, Nordita, Stockholm, Sep. 15-19, 2025
 - [75] M. Yamazaki, “Generalized Chiral Potts Models and Hyperbolic Monopoles from Chern-Simons Theories”, Baxter2025: Exactly Solved Models and Beyond, online/hybrid, Sep. 8-11, 2025
 - [76] M. Yamazaki, “Gauge Theory and Integrability”, ICBS 2025, Beijing, Jul. 13-25, 2025
 - [77] M. Yamazaki, “Old and New of u-plane Integrals for Donaldson-Witten/Seiberg-Witten Invariants”, Mathematics and Physics of Gauge Theories, KKR Zushi, Jul. 3-6, 2025
 - [78] M. Yamazaki, “Dualities and Exact Quantum Many-Body Scars”, TSVP Symposium: Aspects of Generalized Symmetries, OIST, Jun. 16-20, 2025
 - [79] M. Yamazaki, “Quantum Simulations and Error Mitigations for Conserved Charges in Integrable Models,” Panelist for the Qiskit Function Session, IBM Quantum Partner Forum, The Minister Building, London, Jun. 4-6, 2025
 - [80] M. Yamazaki, “On Euclid/LSST,” CD3 Expo 2025, Kavli IPMU, May 30, 2025
 - [81] M. Yamazaki, “Yang-Mills theta-angle on the lattice,” KITP, UCSB, May 8, 2025
- (国内会議)
- 一般講演
- [82] 秋田謙介, “Sterile neutrino dark matter with lepton flavor asymmetries”, 素粒子物理学の進展 2025, 2025 年 9 月 4 日.
 - [83] 尾崎弦太, “シフト電流で切り開くアクシオン暗黒物質探索”, 第 80 回年次大会 (2025 年) 日本物理学会, 2025 年 9 月 16 日.
 - [84] 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”, 素粒子物理学の進展 2025, 2025 年 9 月 4 日.
 - [85] 早川怜一朗, “原始ブラックホールのホットスポットによるスカラー場への影響”, 第 2 回 学術変革「地下稀事象」若手研究会, 神戸大学, 2026 年 3 月 5 日.
 - [86] 早川怜一朗, “原始ブラックホール周囲のホットスポットがスカラー場に与える影響について”, 日本物理学会 2026 年春季大会, 2026 年 3 月 23 日.
 - [87] 北川陽斗, “Minimal Majoron DM”, 第 2 回 学術変革「地下稀事象」若手研究会, 神戸大学, 2026 年 3 月 4 日.
 - [88] 北川陽斗, “Minimal Majoron DM”, 日本物理学会 2026 年春季大会, 2026 年 3 月 23 日.
 - [89] T. Sihanugrist, “Quantum circuit for enhanced DM signal detection,” The Frontier of Particle Physics: Exploring Muons, Quantum Science and the Cosmos, Kyoto, Japan, Jun 15–20, 2025.

- [90] 笠巻大陽, “光トラップされたリユードベリ原子の励起による暗黒物質探索”, 第 71 回原子核三者若手夏の学校, 東京, 2025 年 8 月 9 日.
- [91] 笠巻大陽, “光トラップされたリユードベリ原子を用いた暗黒物質検出”, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 19 日.
- [92] 島村洲太郎, スカラー場の foliated ゲージ理論の構成, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 16 日.
- [93] 山崎雅人, “Non-invertible SPTs and Dualities”, JST ムーンショット, ベルサール秋葉原, 2026 年 3 月 3-4 日
- 招待講演
- [94] 濱口幸一, 宇宙の物質反物質非対称性の起源と標準模型を超える物理, 第 5 回 研究用原子炉を用いた原子核素粒子物理学 (FPUR-V) RCNP & KURNS, 2025 年 12 月 9 日 (月)-10 日 (火).
- [95] 尾崎弦太, “Axion Dark Matter Detection via Shift-current,” 多様化する未知粒子探索のフロンティア, 東北大学, 2025 年 12 月 19 日.
- [96] 永田夏海, “超対称性理論: 動機・展開・そして現在の状況”, 第 2 回 学術変革「地下稀事象」若手研究会, 神戸大学, 2026 年 3 月 4 日.
- [97] T. Moroi, “Dark Matter Detection with Rydberg Atoms,” New Pathways in Particle Theory and Cosmology, (September 13, 2025), Sendai, Japan. 国内会議
- [98] T. Sichanugrist, Search for dark matter using superconducting qubits, 日本物理学会 2026 年春季大会 若手奨励賞受賞記念講演, 2026 年 3 月 23 日
- [99] 山崎雅人, “Practical Quantum Gravity for Cosmologists”, Joint workshop on General Relativity and Cosmology (JGRC) 2026, サンセットブリーズ保田, 2026 年 3 月 17-19 日
- [100] 山崎雅人, “From Violations of the Eigenstate Thermalization Hypothesis to Quantum Simulation of Field Theories”, JST さきがけ領域会議, 白浜マリOTTホテル, 2025 年 11 月 3-5 日
- [101] 山崎雅人, 「超弦理論は我々の宇宙を記述するか?」, KEK 金茶会, 2025 年 6 月 27 日
- [102] 山崎雅人, 「簞ヤンギアンをめぐる数学と物理学」, Algebraic Lie Theory and Representation Theory 2025 (ALTRet 2025), 石川県青少年総合研修センター, 2025 年 5 月 23-26 日
- [103] 山崎雅人, 理論講義, 第 13 回高エネルギー春の学校 2025, 豊橋, 2025 年 5 月 22-24 日
- [104] 山崎雅人, “From Violations of the Eigenstate Thermalization Hypothesis to Quantum Simulation of Field Theories”, JST さきがけ領域会議, 名古屋, 2025 年 5 月 13-15 日
- [105] 山崎雅人, 「量子重力とワームホールの謎」, 東大物理談話会, 2025 年 4 月 11 日
- (セミナー)
- [106] K. Akita, “Sterile neutrino dark matter, leptoflavorgenesis, and the helium anomaly,” Tohoku University, Sendai, Dec 5, 2025.
- [107] K. Akita, “Maximal parameter space of sterile neutrino dark matter with lepton asymmetries,” University of Warsaw, Warsaw, Nov 3, 2025.
- [108] K. Akita, “Affleck-Dine leptogenesis, sterile neutrino dark matter, the helium anomaly” CERN, Geneve, Oct 29, 2025.
- [109] K. Akita, “Maximal parameter space of sterile neutrino dark matter with lepton asymmetries,” University of Padova, Padova, Oct 22, 2025.
- [110] K. Akita, “Maximal parameter space of sterile neutrino dark matter with lepton asymmetries,” DESY, Hamburg, Oct 20, 2025.
- [111] G. Osaki, “Axion DM detection using shift current,” Tohoku University, Miyagi, Jul 3, 2025.
- [112] 尾崎弦太, “シフト電流で切り開くアクシオン暗黒物質探索,” 東京都立大学素粒子理論研究室, 東京, 2025 年 7 月 17 日.
- [113] 高橋広季, “Exploring chirality structure in nucleon decay,” 名古屋大学素粒子論研究室, 愛知, 2025 年 7 月 29 日.
- [114] H. Takahashi, “Exploring chirality structure in nucleon decay,” Chung-Ang University, Seoul, Korea, Aug 13th, 2025.
- [115] H. Takahashi, “Exploring chirality structure in nucleon decay,” Yonsei University, Seoul, Korea, Aug 14th, 2025.
- [116] H. Takahashi, “Exploring chirality structure in nucleon decay,” Institute for Basic Science, Seoul, Korea, Aug 26th, 2025.
- [117] H. Takahashi, “Asymmetric Dark Matter from Low-Scale Spontaneous Leptogenesis,” Florida State University, Florida, United States, Feb 27th, 2026.
- [118] H. Takahashi, “Asymmetric Dark Matter from Low-Scale Spontaneous Leptogenesis,” University of Florida, Florida, United States, Mar 10th, 2026.
- [119] T. Sichanugrist, “Leptogenesis from magnetic helicity of gauged $U(1)_{B-L}$,” Tohoku University particle theory and cosmology group. Sendai, Japan, Jul 10, 2025.
- [120] S. Shimamura, “Foliated-exotic duality in fractonic QFTs”, Elementary Particle Theory Group Seminar, Kyushu University, Fukuoka, June 26, 2025.
- [121] M. Yamazaki, “Emergent Symmetries in Ensemble Averages,” Institute of Physics, Czech Academy of Sciences, Feb. 23, 2026
- [122] M. Yamazaki, “Generalized Wigner Theorem”, Lunch Talk at UTokyo HET group, Oct. 20, 2025
- [123] M. Yamazaki, “Axions and Swampland,” Seminar, High Energy Theory Group, University of Tokyo, Jun. 23, 2025

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 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、藤田真奈美助教、博士学生 2 名、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、大学院生の居室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、2025 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) 米国ジェファソン研究所 (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

2.1.1 JLab における Λ ハイパー核電磁生成成分光実験

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 年より米国ジェファソン国立研究所 (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)。

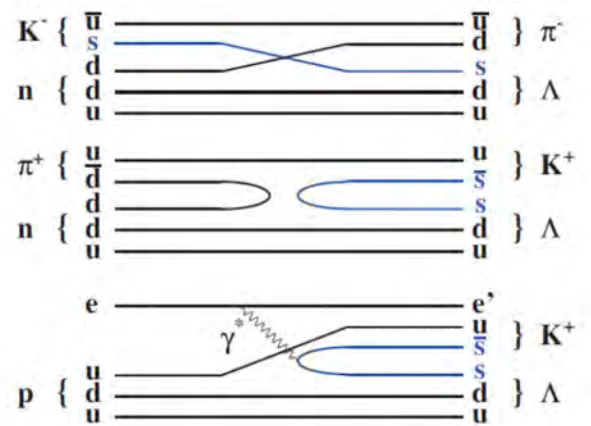


図 2.1.1: 典型的なラムダ粒子生成反応。上から (K^-, π^-), (π^+, K^+), ($e, e'K^+$) 反応

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 $W = 2.13$ GeV, $Q^2 = 0.46$ (GeV/c)², $\cos\theta_{\eta'}^{\text{CM}} \sim -1$ において測定することに成功した。

$(e, e'K^+)$ 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ことのないラムダハイパー核束縛エネルギーのアイソスピン依存性を調べるものである。このために ⁴⁰Ca, ⁴⁸Ca 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 ⁴⁰K, ⁴⁸K 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 ²⁰⁸Pb($e, e'K^+$)²⁰⁸Tl 反応による ²⁰⁸Tl 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 Λ nn 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 _{Λ} He, ⁹ _{Λ} Li, ¹¹ _{Λ} 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 Λ N 相互作用の電荷対称性の破れを詳細に調べることができる実験; ²⁷Mg 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 ${}^A_\Lambda Z \rightarrow {}^A(Z+1) + \pi^-$ 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 _{Λ} 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 _{Λ} 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電荷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 _{Λ} 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 _{Λ} 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 _{Λ} 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 _{Λ} 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 _{Λ} H 質量高精度測定を実現する実験を遂行した。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 _{Λ} 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 _{Λ} H と ⁴ _{Λ} H の 2 本ピークを同時に観測することに成功し、⁴ _{Λ} H の崩壊 π^- 中間子の運動量を基準として、³ _{Λ} H の束縛エネルギーを測定した。その結果、³ _{Λ} H は従来信じられていたよりも強く束縛されていることが明らかになった。

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

2. 原子核・素粒子実験

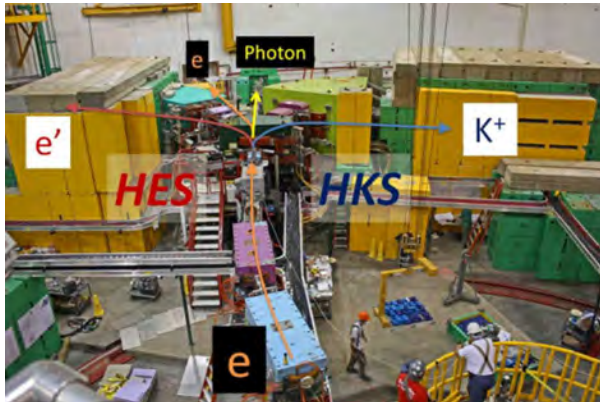


図 2.1.2: JLab Hall-C 実験室に設置した HKS(高分解能 K 中間子スペクトロメータ) と HES(高分解能電子スペクトロメータ)

要である。MAMI では電子原子核弾性散乱からの散乱電子を用いて運動量較正しており、標的に入射する電子ビームのエネルギー精度が最終的な実験精度を決定している。この電子ビームエネルギーの高精度測定法の開発も並行して進んでおり、2 台のアンジュレータを利用した「放射光干渉法」を新たに開発した。

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

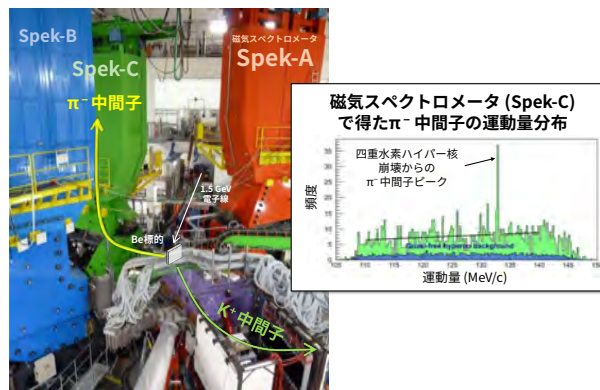


図 2.1.3: (左) MAMI の実験セットアップ。緑色の Spek-C 検出器と紫色の Kaos 検出器で崩壊 π^- と K^+ 中間子を測定する。(右) MAMI で観測した ${}^4\text{H}$ からの π^- 中間子ピーク。世界最高分解能、精度による観測結果。

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。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。

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 におけるストレンジネス核物理研究

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、および中間子が原子核の構成要素となる K 中間子原子核の研究に参画している。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できることになる。 (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。また、令和 7 年度からは国際先導研究「フェムト量子多体系で探る物質の起源～量子時代に輝く人材育成」(PI: 中村) が採択され、国際的な視野をもった若手研究者の育成も主導している。

<受賞>

- [1] 高橋 仁, 2025 年 日本物理学会学生優秀発表賞 (実験核物理領域), 日本物理学会, 2025 年 5 月
- [2] Y. Tsutsumi, SNP School incentive prize, SNP School 2025, 2025 Dec.1-5, Osaka

<報文>

(原著論文)

- [3] T. Shao *et al.*, “Measurement of ${}^6\text{H}$ ground state energy in an electron scattering experiment at MAMI-A1”, *Phys. Rev. Lett.*, **134** (2025) 162501.
- [4] S. Li *et al.*, “Inclusive studies of two- and three-nucleon short-range correlations in ${}^3\text{H}$ and ${}^3\text{He}$ ”, *Phys. Lett.*, **868** (2025) 139734.

(学位論文)

- [5] 丹羽 駿輔, 「ラムダハイパー核精密分光のための崩壊パイ中間子位置検出器の開発」 (Development of decay pion position detector for high-resolution Λ hypernuclei spectroscopy), 修士 (理学), 2026 年 3 月
- [6] 東本 海旺, 「電子線ビームを用いたラムダハイパー核分光実験のための K^+ 中間子弁別用検出器の性能評価」 (Performance study of K^+ identification detectors for Λ hypernuclear spectroscopy using electron beams), 修士 (理学), 2026 年 3 月

2. 原子核・素粒子実験

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [7] S. Nagao, “High precision hypernuclear mass measurement with decay pion spectroscopy –from MAMI to JLab–”, YITP international workshop on Hadron in Nucleus (HIN2025), April 2 - 4, (2025), Kyoto, Japan.
- [8] S.N. Nakamura, “High-precision spectroscopy of Lambda hypernuclei with electron and meson beams”, The 9th Asia-Pacific conference on Few-body problems in Physics (APFB2025), September 8-12, (2025), Ho Chi Minh City, Vietnam.
- [9] S. Nagao, “New Measurements of Lambda-hyperhydrogens and Prospects for Decay Pion Spectroscopy”, The 15th International Conference Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2025), September 29 - October 3, (2025), Tokyo, Japan.

一般講演

- [10] 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
- [11] K. Nishi, “Undulator radiation interferometry for electron beam energy measurement”, FoPM International symposium, February 18 (2025), Hongo Japan
- [12] 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.
- [13] J. Takahashi, “Evaluation of Radiation Dose using Monte Carlo Simulator in the JLab Hypernuclear Spectroscopy”, 2025 Dec. 1-5, SNP School 2025, Osaka
- [14] K. Higashimoto, “Performance Tests of Water Cherenkov Counters with a Bucking Coil for the JLab Hypernuclear Spectroscopy Experiment”, 2025 Dec. 1-5, SNP School 2025, Osaka
- [15] S. Niwa, “Development of focal plane detector for high-resolution Λ hypernuclear spectroscopy at JLab”, 2025 Dec. 1-5, SNP School 2025, Osaka
- [16] Y. Tsutsumi, “Performance Evaluations of a New Aerogel Čerenkov Detector with MPPCs Readout”, 2025 Dec. 1-5, SNP School 2025, Osaka
- [17] K. Nishi, “Hypertriton mass spectroscopy- spectrometer calibration with undulator radiation interferometry-”, 2025 Dec. 1-5, SNP School 2025, Osaka
- [18] K. Nishida, “Study of radiation damage on MPPC for the hypernuclear experiment at JLab”, 2025 Dec. 1-5, SNP School 2025, Osaka

(国内会議)

招待講演

- [19] 永尾翔, 「高エネルギー加速器実験における SiPM 光デバイスを用いた放射線検出器の利用と今後の展開」, 第 62 回アイソトープ・放射線研究発表会, 2025 年 7 月 2 日, 日本科学未来館

一般講演

- [20] 西幸太郎, 「JLab における大強度電子線を用いたラムダハイパー核質量分光実験プログラムの概要と準備状況」, 2025 年 9 月 16 日, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学
- [21] 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 JLab FADC250 モジュールによる性能評価」, 2025 年 9 月 17 日, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学
- [22] 堤祐人, 「汎用マイコンボードを用いた Si PIN フォトダイオード読み出しシステムの開発」, 2025 年 9 月 18 日, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学
- [23] 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測定機器群の吸収線量の評価」, 2025 年 9 月 18 日, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学
- [24] 西田賢, 「JLab における MPPC の放射線損傷の評価実験」, 2025 年 9 月 18 日, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学
- [25] 堤祐人, 「MPPC 読み出しを用いたエアロゲルチェレンコフ検出器による K/ π 識別性能の評価」, 2026 年 3 月 24 日, 日本物理学会 2026 年春季大会, オンライン
- [26] 東北海旺, 「JLab における次期ハイパー核分光実験用水チェレンコフ検出器の性能評価」, 2026 年 3 月 24 日, 日本物理学会 2026 年春季大会, オンライン
- [27] 丹羽駿輔, 「アルファ線検出に対応した外層シンチレーティングファイバー (OLS) 検出器の特性評価」, 2026 年 3 月 24 日, 日本物理学会 2026 年春季大会, オンライン
- [28] 山川李成, 「JLab ハイパー核分光実験で用いる水チェレンコフ検出器における磁場キャンセリングコイルの最適化」, 2026 年 3 月 26 日, 日本物理学会 2026 年春季大会, オンライン

(アウトリーチ)

- [29] 中村哲, 「量子」, 東京商工会議所荒川支部特別講義, 2025 年 7 月 12 日, 東京大学本郷キャンパス理学部 4 号館 1220 教室
- [30] 中村哲, 「金より貴重な奇妙な粒子を創る現代の錬金術師」, 東京大学理学部ニュース, 理学の研究者図鑑, 2025 年 9 月, <https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/story/newsletter/page/10933/>

- [31] 中村哲, 「むずかしい? J-PARC で広がる素粒子・原子核の世界をわかりやすく説明してみます」, J-PARC 講演会 2025, 2025 年 11 月 29 日、東海村産業・情報プラザ（アイヴィル）

(国際会議・スクール等組織)

- [32] School Chairs: A. Hosaka, K. Miwa, S.N. Nakamura and T. Takahashi, SNP School 2025, December 1-5 (2025), Suita Campus, Osaka University, Japan.
- [33] Organizers: S.N. Nakamura (Chair), S. Nagao, M. Fujita, *et al.* (the HYP2025 Organizing Committee), The 15th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2025), Sep.29-Oct.3 (2025), Hongo, Japan.
- [34] 企画委員: 中村 哲 他, 日本学術会議公開シンポジウム、「量子が世界を変える: 科学の 100 年と未来への挑戦」、令和 7 年 11 月 15 日、日本学術会議講堂

2.2 原子核実験グループ（鈴木研究室）

本研究室は低エネルギー原子核実験を専門とする研究室である。物理学教室の中村研究室とともに原子核実験グループ (NEX) を構成し、緊密に連携している。また、理学系研究科附属クォーク・核物理研究機構 (QNSI) の核子多体系研究部門にも所属しており、同部門の他の実験グループとも協働しながら、理化学研究所 RI ビームファクトリーをはじめとする国内外の先端加速器施設において国際共同研究を展開している。研究室は 2024 年 12 月に発足し、2025 年 6 月には北村徳隆助教が着任した。

本研究室では、放射性同位体 (Radioactive Isotope; RI) ビームを用いた加速器実験を推進している。特に、中性子数と陽子数が著しく非対称な RI に対する分光および反応実験を通じて、極微な量子多体現象から巨視的な天体現象に至るまで、スケールを横断する現代核物理学の諸問題に挑戦している。

原子核物理は、量子色力学 (QCD) に基づく量子多体問題を扱う広範な学問領域である。低エネルギー領域においては、陽子と中性子（総称して核子）が主要な有効自由度となり、主としてパイ中間子によって媒介される核力が支配的となる。原子核および核物質は ud クォークからなる比較的単純な系に見えるが、QCD に基づく直接的な記述は依然として極めて困難である。とりわけ、核子間相互作用および媒質中での多体相関は非常に複雑であり、多くの未解明問題と予期せぬ多様な物理現象の起源となっている。

核子多体物理は、かつては地上に存在する安定核の研究が中心であった。しかし 1990 年代に高速重イオン RI ビーム施設が登場し、技術革新が進んだことで、光速の約 10~70% まで加速された RI ビームを用いて、地上には存在しない極めて短寿命な原子核や核物質の疑似状態を人工的に生成し、量子散乱

実験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理化学研究所 RI ビームファクトリー (RI Beam Factory; RIBF) の成功を契機として、現在では世界各地で RI ビーム施設の建設が進んでいる。

本研究室では、(1) 原子核における創発現象、(2) 核物質の性質、(3) 天体核物理の三つの柱に基づき研究を推進している。電弱プローブ（電磁気力および弱い力）とハドロン・プローブ（強い力）を組み合わせた RI ビーム実験により、これらの課題に取り組んでいる。

さらに中長期的には、RI ビームファクトリー高度化計画にも積極的に参画している。本計画は、ビーム蓄積リングを用いたビーム・リサイクリング技術を RI ビーム生成に初めて適用する革新的な試みであり、RI ビームの大強度フロンティアの開拓をさらに推し進めることを目指している。

2.2.1 原子核構造

原子核には多様な秩序構造が創発することが知られている。特に、中性子過剰核や陽子過剰核においては、中性子数および陽子数の変化に伴い、核構造が非連続的に変化する現象がしばしば観測される。このような創発機構の解明を目指す研究は、核子多体論の中でも特に活発な分野の一つである。我々は、とりわけ原子核の殻構造、核変形、クラスター状態、量子揺らぎ、相転移といった現象に注目して研究を進めている。

2025 年は、独立粒子運動および集団運動に関するコペンハーゲン学派の理論研究に対してノーベル賞が授与された 1975 年から半世紀にあたる節目の年であった。これを記念し、我々は国際シンポジウム「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た。本シンポジウムでは、本分野における近年の実験・理論研究の成果を概観するとともに、将来の展望について活発な議論が行われた。会議には国内外から 100 名を超える研究者が参加し、分野横断的な交流が促進された [17]。

インビーム・ガンマ線核分光法による核変形の研究

原子核の変形現象は、核構造研究における最も重要なテーマの一つである。近年、飛躍的に進展した微視的核構造計算により、アイソスピン（中性子数と陽子数の比）の変化が多様な核変形を引き起こすことが示唆されており、実験的検証への期待が高まっている。

核変形の解明には、ガンマ線分光による情報が極めて重要である。ガンマ線輻射は原子核の対称性に対して高い感度を持つため、遷移確率や角度分布の測定を通じて核構造に関する詳細な知見を得ることができる。このため、RI ビームを用いたインビーム・ガンマ線核分光法は、核変形研究における強力な手法として広く用いられてきた。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の開発と応用に注目している。本検出器では、ゲルマニウム結晶中の信号波形を解析することにより、ガンマ線の相互作用点を三次元的に再構築することが可能である。逆運動学における高速運動核で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、相互作用点情報を用いることで高精度なドップラー補正が実現できる。

我々はその第一歩として、理化学研究所仁科加速器科学研究センター、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)などと連携し、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および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導入し、さまざまなRIに対して従来を大きく上回るエネルギー分解能を達成した[1, 6]。さらに2023年度には、HiCARIの後継となる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。現在はトラッキング検出器1基を導入し、その性能評価試験を進めるとともに、RIBFにおける新たなインビーム・ガンマ線分光実験の詳細設計を進めている[19]。



図 2.2.4: 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

本研究室は、既存のゲルマニウム検出器をベースとしたガンマ線トラッキング技術の高度化にとどまらず、新たな半導体検出器の不安定核物理実験への応用を目指した研究も推進している。我々は特に、近年開発が急速に進んでいる臭化タリウム(TlBr)半導体を用いたガンマ線検出器のもつ可能性に着目している。TlBr 検出器サンプルの初期性能評価を2025年度の物理学科4年特別実験のテーマとして実施し、期待の持てる結果が得られている。

ベータ崩壊を用いた核分光と開放量子系の研究

アイソスピンの変化が引き起こす核構造の変容を実験的に解明するためのアプローチは上述のインビーム・ガンマ線核分光法にとどまらない。中性子過剰核のベータ崩壊を用いた短寿命不安定核の励起状態の

分光手法は、不安定核における構造進化を明らかにしていくための相補的ツールである。我々はこの手法を用いた実験研究も推進しており、米国のRIビーム施設FRIB (Facility for Rare Isotope Beams) のベータ崩壊測定プラットフォーム FRIB Decay Station initiator (FDSi) における実験に参画し、得られた実験データの解析、また理論的解析を進めている。特に、非常に中性子過剰な原子核のベータ崩壊では、励起状態のエネルギーが中性子放出閾値を超え、非束縛となる場合がある。これら非束縛状態から放出される中性子の測定も加えた、励起状態構造の全容を明らかにする核分光研究を進めている[13, 15]。非束縛状態は開放量子系ともみなすことができ、その理論的記述は連続状態と束縛状態の結合というチャレンジな課題を内包していることから、近年注目を集める研究対象となっている。国内外の理論研究者を巻き込んだ議論により、中性子過剰核のベータ崩壊により生成された非束縛状態からの中性子放出機構の検証が着実に進展している。

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に達すると基底状態の形状が球形から変形状態へと急激に転移することが知られている(変形相転移現象)。しかし、この相転移を誘導する微視的機構はいまだ明らかではない。特に、核変形と密接に関連する平均場中の一粒子軌道に関する実験的知見は限られている。そこで我々は、一粒子軌道に高い感度を有する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の減速ビームラインOEDOにおいて計画している。核変形に感度を持つガンマ線と、平均場に敏感な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の解明を目指す。この実験の実現に向けて、反跳陽子測定のために荷電粒子に対する透過度の高い薄型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(IFS)のグループと共同で開発している[20]。

高次変形の探索

核変形の主要なモードは、従来、軸対称な四重極変形であると考えられてきた。一方、近年の高度な理論計算により、八重極や十六重極、さらには非軸対称変形といった高次変形的重要性が示唆されている。さらに、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唆する観測結果が報告されており、RIビームを用いた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において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[6]。さらに次の段階として、XeからNd領域において理論的に予言されている八重極変形状態の解明に向けた実験準備を進めている。本実験では、八重極変形に対して高い感度を持つE3電磁遷移確率を、陽子非弾性散乱により決定することを目指

す。一方で、対象核は準位密度が高く、八重極変形に起因する量子状態を識別するためには、ガンマ線エネルギーを高精度で測定する必要がある。この課題に対し、GT-5 プロジェクトで開発中のトラッキング型ゲルマニウム半導体検出器を用いることで、高分解能ガンマ線分光を実現し、その解決を図る。

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、核構造における基本的な対称性の一つである。しかし、原子核の束縛限界であるドリップライン近傍では、平均場に弱く束縛された核子が連続状態と結合することにより、この対称性が破れる可能性が指摘されている。特に、高いアイソスピン $T=2$ をもつ中性子過剰核 ${}^8\text{He}$ に対応するミラー核の性質は大きな関心を集めている。この問題を解明するため、我々はフランス国立重イオン加速器研究所 (GANIL) において実験を行った。具体的には、 $T_z = -2$ の ${}^8\text{He}$ に対するミラー核である ${}^8\text{C}$ ($T_z = 2$) に着目し、これまで未観測であった 2^+ 励起状態の分光を試みた。 ${}^8\text{C}$ は非束縛核であるため RI ビームとして直接生成することができないが、中性子を 1 個多く含む ${}^9\text{C}$ ビームを液体水素標的に入射し、中性子剥離 ((p, d)) 反応を用いることで ${}^8\text{C}$ を生成した。その結果、 ${}^8\text{C}$ 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。得られた ${}^8\text{C}$ の共鳴エネルギーは、対応する ${}^8\text{He}$ の値とほぼ一致していることが明らかとなった。この結果は、ドリップライン外側の共鳴領域においても、エネルギー準位に関するミラー対称性が予想に反して保持されることを示している [26]。



図 2.2.5: 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

原子核構造は一般に平均場によって記述される。しかし、核子移行反応や核子ノックアウト反応を用いた研究により、平均場に属する核子は全体の 6-7 割程度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形成しているのかは、核構造論における重要な未解明問題である。

近年、米国トーマス・ジェファソン国立加速器施設における電子散乱実験により、高運動量領域において陽子と中性子が強く相関する短距離相関現象が、クエンチングの原因の一つである可能性が示唆された。この現象は原子核の非対称性に依存すると予想されており、非対称度の大きな系におけるクエンチングの変化を実験的に検証することが重要な課題となっている。そこで我々は、陽子過剰核である ${}^9\text{C}$ および ${}^8\text{B}$ におけるクエンチングを定量的に評価するため、中性子剥離 ((p, d)) 反応の測定を行った。本研究では、系統的な不確かさの制御に特に留意した。具体的には、目的核のデータとベンチマークである安定核 ${}^{12}\text{C}$ の測定を同一の実験セットアップで実施することにより、装置起因の不確かさを低減した。さらに、不確かさを評価した光学ポテンシャルパラメータを用いることで、反応モデルに由来する不確かさを定量的に見積もった。これらの手法により、不確かさが明確に評価された高信頼度のデータを取得することに成功した。現在、本データの解析は完了しており、結果の物理的解釈について議論を進めている [18]。

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、重イオンビームを重元素標的に衝突させることで、高密度核物質を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における相対論的エネルギー ($\beta \sim 0.6$) のビームを用いることで、飽和密度（通常の原子核密度）の約 2 倍に達する核密度を実現することが可能である。SπRIT プロジェクトでは、核物質から放出される荷電パイ中間子や軽イオンをプローブとして、状態方程式の非対称項に関する情報の取得を目指している。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) を組み込むことで、衝突点で生成され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、その運動量を精密に測定することを可能とした。我々は、スズ同位体の RI ビームを用いたデータ解析により、アイソスピン非対称性の異なる系におけるフロー観測量の系統的な振る舞いを明らかにした [3]。さらに、得られた実験データを輸送モデルと比較することで、運動量依存平均場の効果および対称エネルギーに対する感度の検証を行った。

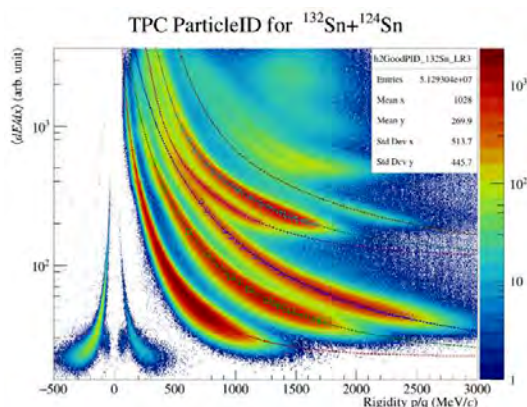


図 2.2.6: S π RIT TPC による荷電粒子の粒子識別図。横軸は磁気剛性、縦軸はエネルギー損失。荷電パイ中間子のイベントが図中左下に見える。

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、アイソスカラー型単極巨大共鳴 (ISGMR) の測定が挙げられる。ISGMR の励起には、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であるが、RI ビームを用いた測定は実験的難易度が極めて高く、ニッケル領域における例外的な結果を除いて未だ実現されていない。これは、散乱後の重陽子が極めて低エネルギーとなり、その検出が困難であるためである。

本研究では、三次元飛跡検出器 TPC の技術に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そのまま散乱標的として用いることで、数百 keV 程度の低エネルギー粒子であっても標的内部で検出することを可能にする。本装置の原理検証実験を、量子科学技術研究開発機構の重イオン加速器施設 HIMAC において実施した。その結果、安定なクリプトンビームを用いた測定により、 ^{86}Kr における ISGMR を初めて観測することに成功し、中性子過剰な安定同位体における非圧縮率のデータを取得した [7]。これにより測定手法の有効性が実証され、今後は RI ビームファクトリーにおいて RI ビームを用いた系統的な測定へと展開する予定である。

2.2.3 天体核物理

宇宙における元素起源の解明を目的とした研究を行っている。特に、太陽内部では合成されない鉄より重い元素に注目し、その起源と考えら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といった高温・高密度環境で進行する核反応過程を、RI ビーム実験により解明することを目指している。

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 過程および 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いても重要な役割を担っている。r 過程のように中性子過剰核が関与する反応機構や、原子炉における放射性廃棄物の変換過程を理解するためには、短寿命 RI の中性子捕獲断面積が不可欠な基礎データとなる。しかし、実用的な中性子標的は現在のところ実現されておらず、RI ビームを用いた中性子捕獲断面積の直接測定は実質的に不可能である。

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、重陽子内に弱く束縛された中性子を利用し、RI ビームに中性子を移行する反応 (中性子移行 (d, p) 反応) を測定することで、中性子捕獲断面積を間接的に評価する。評価精度の向上には、低エネルギーで反応を誘起することが重要である。

我々は、RI ビームファクトリーの減速ビームライン OEDO において、本手法を初めて RI ビームに適用することに成功した。開発したシリコン半導体テレスコープ TiNA を用いて、(d, p) 反応における反跳陽子を検出し、断面積の励起関数を取得した。さらに、磁気スペクトロメータにより散乱後の原子核を同定することで、複合核状態の崩壊分岐比を直接測定した。その結果、熱中性子炉における主要な長寿命核分裂生成物である ^{79}Se の中性子捕獲断面積の評価に成功した [2]。

モリブデン元素の起源の研究

モリブデン同位体の宇宙における起源は、天体核物理における重要な未解決問題の一つである。現在、多くの重元素は、中性子過剰度の高い環境で進行する s 過程および r 過程、ならびにそれらの生成物の光分解によって合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である ^{92}Mo の存在比 (約 14%) は、標準的な元素合成シナリオの予測を大きく上回っており、新たな天体環境および合成機構の存在が示唆されている。

近年、超新星爆発シミュレーションの高度化に伴い、ニュートリノ風にさらされた爆発残骸中の核物質における水素燃焼過程が注目されている。しかし、この過程では二重魔法核 ^{56}Ni において強い滞留点が存在することが課題である。この滞留を解消する機構として、反ニュートリノにより陽子から生成された中性子を ^{56}Ni が捕獲する反応が提案されている。

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、 $^{56}\text{Ni}(n, p)$ 反応断面積の評価を目的とした実験を実施した。本実験では、核子当たり 15 MeV の ^{56}Ni ビームを用い、代理反応である $^{56}\text{Ni}(d, p)$ 反応の測定を実現した。現在、取得したデータの解析を進めている。

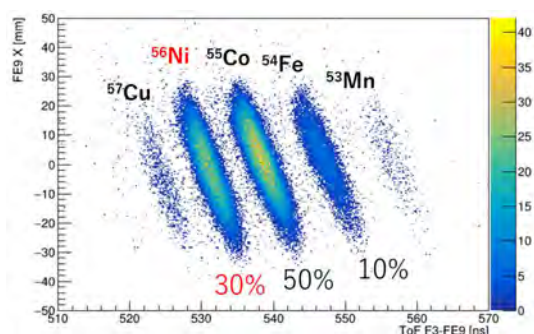


図 2.2.7: 減速ビームライン OEDO における RI ビームの識別図。横軸は飛行時間、縦軸は横方向の位置。本実験の目的核である ^{56}Ni が不純物である他の原子核と分離されていることが分かる。

2.2.4 RI ビームファクトリー高度化

RI ビームファクトリーは中長期計画として RIBF 高度化計画を推進している。RIBF は、2007 年の稼働開始以来、世界初の第三世代 RI ビーム施設として最高水準のビーム強度を実現してきた。本計画では、ビーム強度のボトルネックとなっているイオンの多価状態への変換効率を、荷電交換リング (CSR) と呼ばれる新たな装置を建設することで、ビーム強度を一桁以上増強することを目指している。

本研究室は、高度化により切り拓かれる新たな物理として、核分裂現象に着目している。核分裂は発見から約 1 世紀を経て社会実装も広く行われているが、近年では宇宙における元素合成の終焉過程や超重元素の生成においても重要な役割を果たすことが明らかになってきた。一方で、核分裂は多粒子・多次元にわたる量子トンネルおよび散逸過程であり、依然として原子核物理における最も困難な多体問題の一つである。これまで主に静的核構造において議論されてきたアイソスピン自由度が、核分裂のような動的かつ大振幅の運動においてどのように機能するかを解明することは、核構造の量子論的理解にとどまらず、元素起源や新元素合成の理解にも直結する重要課題である。

本研究室では、高度化後の RIBF における研究展開を見据え、二次ビームラインの増強や実験装置の高度化に関する検討を進めている。ユーザーコミュニティにおける議論の場として研究会 ADRIB 第 3 回を開催し [31]、さらに原子核実験コミュニティ全体のタウンミーティングにおいても議論を行った [22]。

実験技術開発

上述の RIBF 高度化計画により増強される RI ビームを余すことなく活用するためには、特に $Z > 80$ 領域の重元素 RI ビームの粒子識別能力を向上させ

つつも、100 kpps を超える高いビームレートに耐えることのできる実験技術の開発が必要となる。

RI ビームの粒子識別のために必要となる、次世代型的全運動エネルギー検出器として、新たな半導体材料 TlBr を用いた重イオン検出器を試作し、RIBF において実際に RI ビームを照射試験を行った [23]。また、同様に粒子識別のために必要となる次世代飛行時間検出器として、単結晶ダイヤモンド半導体を用いた検出器、またシリコンカーバイド半導体を用いた検出器の二種類のアプローチを検討しており、RIBF における性能試験を完了した [24, 11]。

RIBF 高度化後は、検出器だけではなくデータ収集系への要求も一段と高くなる。我々は検出器からの信号波形を直接記録・処理する、波形デジタイザを基調としたフルデジタル読み出し回路の導入により、イベントレートに対する制約を最大限取り払うための開発を行っている。新方式は、高度なリアルタイム信号処理により高計数率環境への対応を可能にするだけでなく、さまざまな検出器への高い適用性をあわせ持つことから、将来的な拡張性の面でも有望である。この開発は SPADI (Signal Processing And Data acquisition Infrastructure) Alliance の枠組みを活用して進めており、その成果を核物理コミュニティ全体へ還元することを目指している。現在は、来年度 RIBF で計画している物理実験への導入を見据えて、既存のデータ収集システムとの高い互換性を保ちながらも継続的な開発を可能にする柔軟かつ軽量な波形データ収集システムの構築を進めている [21]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] J. Acosta *et al.*, “Excited-state lifetimes in ^{131}In , ^{131}Sn , and ^{136}Te measured with the HiCARI γ -ray spectrometer at RIBF at RIKEN”, *Phys. Rev. C* **111**, 064316 (2025).
- [2] N. Imai *et al.*, “The surrogate reactions for the neutron-capture rate using OEDO and SHARAQ in RIBF”, *Nucl. Phys. A* **1064**, 123248 (2025).
- [3] M. Kurata-Nishimura *et al.*, “Directed and elliptic flow observations in Sn+Sn collisions with radioactive beams at 270 MeV/u”, *Phys. Lett. B* **871**, 139970 (2025).
- [4] J. T. Li *et al.*, “Probing heavy-ion fusion reaction $^{136}\text{Xe} + ^{64}\text{Zn}$ in inverse kinematics”, *Nucl. Phys. A* **1059**, 123079 (2025).
- [5] J. Lois-Fuentes *et al.*, “Unbound neutron $\nu 0d_{3/2}$ strength in ^{17}C and the $N = 16$ shell gap”, *Phys. Lett. B* **867**, 139600 (2025).
- [6] B. Moon *et al.*, “First high-resolution in-beam γ -ray spectroscopy of neutron-rich Mo isotopes at relativistic energy”, *Phys. Lett. B* **870**, 139904 (2025).
- [7] F. Endo *et al.*, “Measurement of the isoscalar giant monopole resonance in ^{86}Kr via deuteron inelastic scattering using an active target CAT-M”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2026**, 033D03 (2026).

- [8] H. Suzuki *et al.*, “Discovery of Proton-Rich Radioactive Isotopes in the $Z = 63\text{--}70$ Region Produced by the Projectile Fragmentation of a 345-MeV/Nucleon ^{238}U Beam,” *Prog. Theo. Exp. Phys.* **2026**, 023D02 (2026).
- [9] W.-J. Ong *et al.*, “Beta-Decay Half-Lives beyond ^{54}Ca : A Systematic Survey of Decay Properties Approaching the Neutron Dripline,” *Phys. Rev. Lett.* **136**, 092502 (2026).
- [10] B. Kreider *et al.*, “A method for estimating light quenching in inorganic scintillator detectors for radioactive ion beam experiments,” *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **1085**, 171298 (2026).
- [11] N. Kitamura *et al.*, “A Fast p-n Junction SiC Detector for Heavy-Ion Applications,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **73**, 276 (2026).
- [12] H. Suzuki *et al.*, “Discovery of Proton-Rich Radioactive Isotopes in the $Z = 60$ Region Produced by the Projectile Fragmentation of a 345-MeV/Nucleon ^{238}U Beam,” *Prog. Theo. Exp. Phys.* **2025**, 113D01 (2025).
- [13] P. Dyszel *et al.*, “First β -Delayed Two-Neutron Spectroscopy of the r-Process Nucleus ^{134}In and Observation of the $i_{13/2}$ Single-Particle Neutron State in ^{133}Sn ,” *Phys. Rev. Lett.* **135**, 152501 (2025).
- [14] T. H. Ogunbeku *et al.*, “Universal Effective Charges in the sd and fp Shells,” *Phys. Rev. Lett.* **135**, 072501 (2025).
- [15] J. F. Peltier *et al.*, “The evidence of $N = 16$ shell closure and β -delayed neutron emission from ^{25}F ,” *Phys. Lett. B* **866**, 139576 (2025).
- (会議抄録)
- [16] N. Imai *et al.*, “A new technique to determine gamma emission probability above the neutron threshold without gamma-ray detectors,” *EPJ Web of Conferences* 329, 03002 (2025)
- (国際雑誌)
- [17] D. Suzuki and M. Yamagami, “International Symposium “Single-Particle and Collective Motions from Many-Body Correlation” (PCM2025),” *Nucl. Phys. News* **35**, 26–27 (2025).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [18] D. Suzuki, “Exploring nuclear structures beyond mean-field using radioactive isotope beams”, 14th International Spring Seminar on Nuclear Physics: “Cutting-edge developments in nuclear structure physics”, May 22 (2025), Ischia, Italy.
- [19] N. Kitamura, “GT-5 status and future directions”, 11th SUNFLOWER Workshop, September 2 (2025), Institute of Modern Physics, Huizhou, China.
- [20] D. Suzuki, “Probing shape transitions in finite nuclei with radioactive-ion beam spectroscopy”, IBS-RIKEN Joint Workshop on Physics – from nuclear physics to condensed matter physics – January 19 (2026), Institute for Basic Science, Daejeon, Korea.
- 一般講演
- [21] N. Kitamura, “In-House Development and Implementation of Waveform Digitizers at RIBF”, Workshop on New Generations of Detector and Data Acquisition Systems for Nuclear Physics (NEXTGEND25), September 30 (2025), FRIB, Michigan, USA.
- (国内会議)
- 招待講演
- [22] 鈴木大介, “RI ビームファクトリー高度化プロジェクト: 実験の観点から”, 将来計画検討研究会, 2025 年 6 月 10 日, 東京大学本郷キャンパス.
- ポスター講演
- [23] 田中啓太, 「TlBr 検出器に対する重イオンビーム照射試験」日本物理学会 2026 年春季大会、2026 年 3 月 26 日、オンライン.
- [24] 葛西恒平, 「大面積単結晶ダイヤモンドを用いた重イオンビーム検出器の応答波形解析」日本物理学会 2026 年春季大会、2026 年 3 月 26 日、オンライン.
- (セミナー)
- [25] D. Suzuki, “RI ビームによる原子核・核物質研究の新展開”, 2025 年度前期 物理学教室コロキウム, 2025 年 5 月 9 日, 小柴ホール.
- [26] D. Suzuki, “Mirror symmetry of atomic nuclei and its breaking at the limits of stability”, August 22 (2025), Institute of Modern Physics, Lanzhou, China.
- (アウトリーチ)
- [27] 鈴木大介, 「量子力学が築く過去・現在・未来」, 100 周年イベント大高人記念講演会, 2025 年 11 月 7 日, 埼玉県立大宮高等学校.
- [28] 大塚孝治, 青井考, 山本康嵩, 横山輪, 本村信治, 鈴木大介, JICFuS movie “原子核のかたちを探る”, 2026 年 3 月 9 日.
- (国際会議・国際スクール主催)
- [29] Organizers: K. Hagino, T. Hyodo, H. Liang, F. Minato, T. Miyagi, T. Isobe, N. Kobayashi, D. Suzuki, A. Takamine, Y. Tanaka, “China-Japan Joint School for Nuclear Physics” (CJNP), August 20–23 (2026), Institute of Modern Physics, Lanzhou, China.

- [30] Organizers: N. Aoi, S. Choi, T. Gunji, N. Imai, N. Kitamura, H. Liang, S. Michimasa, T. Otsuka, H. Sakai, Y. Sakemi, S. Shimoura, T. Shin, D. Suzuki, H. Ueno, T. Uesaka, Y. Utsuno, T. Wakasa, K. Yako, H. Yamaguchi, K. Yoneda, “TOPTIER CNS Summer School 2025”, August 22–28 (2026), RIKEN Nishina Center, Wako.
- [31] Organizers: W. Horiuchi, M. Kimura, Y. Kondo, K. Miki, F. Minato, D. Nishimura, T. Onishi, S. Ota, M. Rosenbusch, M. Sasano, D. Suzuki, A. Takamine, K. Yoshida, International workshop “Advancing physics at next RIBF” (ADRI26), March 5–6 (2026), RIKEN Nishina Center, Wako.

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、さらに研究を進展させるべく、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。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

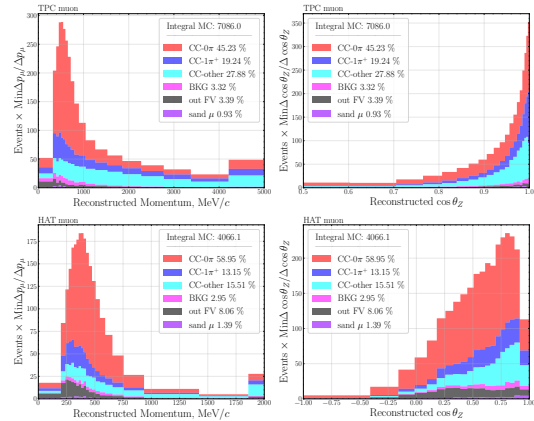


図 2.3.8: SuperFGD 検出器内部でのニュートリノ反応で生成されたミューオンの、事象再構成・事象選別後の運動量(左)と角度(右)の分布。モンテカルロシミュレーションによる。上はミューオンが SuperFGD の前方に置かれた TPC 検出器に届いた事象、下は上下の TPC 検出器に届いた事象。

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 実験の感度を向上させるために前置検出器のアップグレード計画を提案し、国際共同プロジェクトとして主導してきた。中でも特に、プラスチックシンチレータのキューブを約 200 万個並べ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 (Super Fine-Grained Detector) を建設・運用し、データ解析を行っている。

本年度は、データ収集を進めるとともに、ニュートリノ-原子核反応断面積の測定に向けて装置の較正、モンテカルロシミュレーション・事象再構成・事象選択の改善および妥当性の確認、および系統的な不確かさの見積もり、などを進めた。特に、ニュートリノ振動解析のインプットとして必要なミューオン事象に関する事象選択の確立(図 2.3.8)および系統的な不確かさの見積もりと、電子ニュートリノ事象の再構成と事象選択の評価(図 2.3.9)を行い、最終的な測定に向けた準備を整えた。

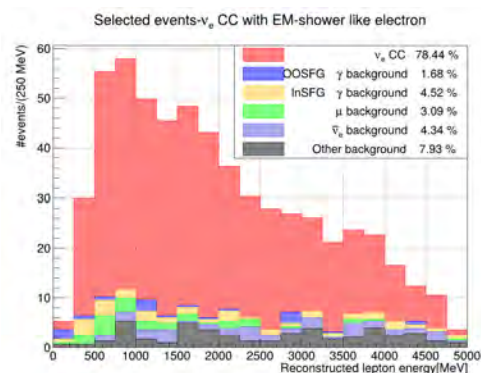


図 2.3.9: モンテカルロシミュレーションによる、SuperFGD 検出器内部で起きた電子ニュートリ反応の事象選択後の再構成運動量分布。

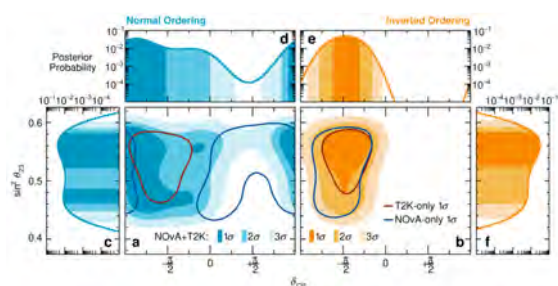


図 2.3.10: T2K 実験と米国 NOvA 実験の共同解析による、ニュートリノ振動パラメータ $\sin^2 \theta_{23}$ と CP 位相 δ_{CP} に対する制限領域 [10]。

ニュートリノ振動の測定

T2K 実験で 2021 年までに収集したデータを使い、ニュートリノ振動測定を行った。ニュートリノ-原子核反応モデルを改善し、新しい事象カテゴリーを追加で利用したほか、ニュートリノ反応モデルの様々な不定性に対する解析の信頼性を詳細に調べ、世界最高精度での振動測定を実現した（児玉将馬：博士論文 [24]）。

また、異なる基線長・エネルギーで同様の測定を行っている米国の NOvA 実験とニュートリノ振動の共同解析を行った結果が出版された（図 2.3.10）。

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ムイ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、スーパーカムイ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。

スーパーカムイオカンデ-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ムイ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、スーパーカムイオカンデでは、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。

本研究室では、SK-Gd における超新星背景ニュートリノの世界初観測に向け、スーパーカムイオカンデのデータ解析に取り組んでいる。スーパーカムイオカンデでは、ガドリニウム導入による水質の変化に加え、2023 年から 2024 年にかけて起こっていた地磁気補償コイルの一部不具合により光電子増倍管の検出効率と同時に低下していたため、時系列を追った精密な較正が極めて重要となっている。本年度は、検出器内で停止した宇宙線ミュー粒子の崩壊電子を用いた較正に取り組んだ。崩壊電子のエネルギースペクトルを用いたエネルギーの評価方法を確立し、再構成されたエネルギーを時期・場所ごとに精密に比較した結果、地磁気補償コイルの不具合期間を含め、測定器全体としてエネルギースケールが安定であることを確認した一方で、検出器内の位置依存性については、改善の余地があることを示した（正木結太修士論文 [25]）。

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子カレ

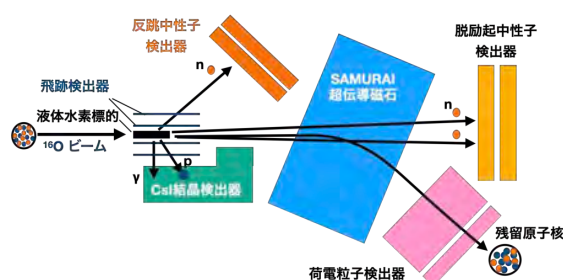


図 2.3.11: 理化学研究所で実施予定の酸素原子核ビーム実験の概略図。加速した酸素原子核を液体水素標的に衝突させ、生成される粒子を網羅的に測定する。

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 2.3.11）。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。

本年度は、とりわけ、本実験で新たに設置する中性子検出器について、その性能評価や読み出し電子回路の試験などを行ってきた。2025 年 6 月には、実機で用いる予定のプラスチックシンチレーター検出器を理研 SAMURAI 実験エリアに設置し、Ca ビームを用いた実験にパラサイトする形で、実際のビーム運転環境下での性能評価を行なった。その結果、標的からの中性・荷電粒子を検出することに成功し、またトリガーレートも電子回路の処理能力の範囲内であることを確認し、本検出器が実験の要求を満たすことを実証した（林崎響 修士論文 [25]）。

2.3.3 ニュートリノ反応の研究

ニュートリノイベントジェネレータ NEUT の改良開発

ニュートリノ振動の精密測定や超新星背景ニュートリノ探索等で支配的な系統誤差となっている、ニュー

トリノ反応の予測精度向上を目的とした研究を推進している。とりわけ、T2K 実験、スーパーカミオカンデ実験で使用されているニュートリノイベントジェネレータ（シミュレータ）NEUT の改良開発を行なっている。

ニュートリノ-原子核反応の最終過程である原子核脱励起過程では、反応によって励起された原子核がガンマ線、中性子など、さまざまな低エネルギー粒子を放出する。この過程を精密に予測するために、理論モデルに基づいた原子核脱励起イベントジェネレータ NucDeEx を開発した。公開されている実験データをもとに性能評価を行い、他のイベントジェネレータと同等以上の再現性を有することを確認した。これを NEUT に実装して、ニュートリノ反応の予測精度向上を実現した。

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、2028 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。2025 年 7 月末には、ついに大規模地下空洞本体の掘削が完了し（図 2.3.12）、装置の設置に向けた準備が本格化している。我々の研究室では、検出器の建設計画全体を取りまとめ国際共同実験を牽引し、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、信号読み出し回路の試験など、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た。我々は、100 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、毎月の納入に対し品質が安定していることを継続的に監視してきた。約 20,000 本の使用予定に対し、2026 年 3 月までに 19,000 本以上の光電子増倍管が納入された。

また、水中での光電子増倍管の連鎖爆縮を防止するためのカバーをスペイングループと協力して開発した。

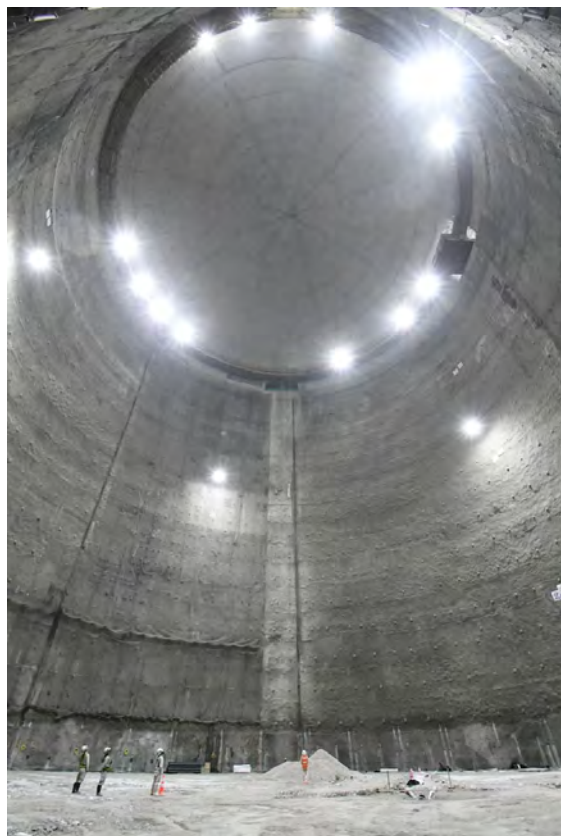


図 2.3.12: 2025 年 7 月、直径 69m、高さ 94m のハイパーカミオカンデ地下空洞掘削が完了した際の様子。(東京大学宇宙線研究所提供)

光電子増倍管の事前校正

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校正が鍵となる。運転中にもさまざまなソースを用いて校正を行うが、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校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、詳細に事前校正した 400 本程度の光電子増倍管を装置内に配置して運用中の校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校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校正装置の神岡への移設を完了させてほか、システム全体を覆う地磁気補償コイルの設計および設置を行った。その後、ハイパーカミオカンデで用いる光電子増倍管を用いた校正装置の性能評価および改善を行ってきた。まもなくシステムを完成させ、本格的な校正

作業を開始する予定である。

信号読み出し回路の試験とケーブル接続の確立

光電子増倍管からの信号を読み出し、電荷と時間の情報を精度よく記録するための電子回路の試験を行った。ほぼ最終版のフロントエンド回路の性能評価を行い、また温度特性を調べた。

さらに、光電子増倍管と電子回路の間でケーブルを接続するための手順を開発した。接続部は運転時は水中に位置するため、熱収縮チューブで覆って水密化が必要があり、もし不良があるとその部分は使用できなくなる。約 2 万本の接続部を建設スケジュールの中の限られた時間内で高い信頼性で接続・防水する手法や条件の確立を進めた。

2.3.5 検出器開発

新型波長変換ファイバーの測定

Luxium Solutions 社が開発した、従来型よりも発光時間の短い新型の波長変換ファイバーの性能を評価した。レーザーによる単体での測定と、KEK のテストビームラインでの電子ビームを用いたプラスチックシンチレータと組み合わせた性能の測定を行い、結果を論文として投稿した。

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索のための無機結晶シンチレータの評価

^{160}Gd からのニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊を探索するため、Gd を含む超高純度無機結晶シンチレータの開発とその性能評価を行なっている。本年度は、GAGG ($\text{Gd}_3(\text{Al}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$) および Gd の一部を Y(イットリウム) に置換した GYGAG ($\text{Gd}_{3-x}\text{Y}_x(\text{Al}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$) について、そのエネルギー分解能と波形弁別による粒子識別能力の評価を行なった。また、オキサイド社製 GPS ($\text{Gd}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) 結晶について、内部放射性不純物量を Bi-Po 連続崩壊の遅延同時計測法により評価した。GYGAG の評価については結果を論文として投稿し、GPS の評価結果についても投稿論文を準備中である。

<受賞>

- [1] Takumi Aoki, 2025 ATLAS Thesis Award
- [2] Shoma Kodama, Symposium of the US-Japan Science and Technology Cooperation Program 2025 Poster Award
- [3] 関山 実、第 13 回高エネルギー物理春の学校 最優秀賞
- [4] 関山 実、国際先導研究会「ニュートリノによる宇宙創生の解明 2026」ポスター賞

<報文>

(原著論文)

スーパーカミオカンデ／T2K／ハイパーカミオカンデ

- [5] S. Abe, I. Alekseev, T. Arai, T. Arihara, S. Arimoto, N. Babu, V. Baranov, L. Bartoszek, L. Berns and S. Bhattacharjee, *et al.* “Characterization of the optical model of the T2K 3D segmented plastic scintillator detector unit cube,” Nucl. Instrum. Meth. A **1080**, 170757 (2025)
- [6] S. Han *et al.* [Super-Kamiokande], “Measurement of neutron production in atmospheric neutrino interactions at Super-Kamiokande,” Phys. Rev. D **112**, no.1, 012004 (2025).
- [7] K. Abe *et al.* [T2K], “First measurement of neutron capture multiplicity in neutrino-oxygen neutral-current quasielasticlike interactions using an accelerator neutrino beam,” Phys. Rev. D **112**, no.3, 032003 (2025).
- [8] K. Abe *et al.* [T2K], “First Measurement of the Electron-Neutrino Charged-Current Pion Production Cross Section on Carbon with the T2K Near Detector,” Phys. Rev. Lett. **135**, no.15, 151802 (2025).
- [9] S. Abe, H. Alarakhia-Charles, I. Alekseev, C. Alt, T. Arai, T. Arihara, S. Arimoto, A. M. Artikov, Y. Awataguchi and N. Babu, *et al.* “Introducing a Markov chain-based time calibration procedure for multi-channel particle detectors: application to the SuperFGD and ToF detectors of the T2K experiment,” JINST **20**, no.10, P10030 (2025).
- [10] S. Abubakar *et al.* [T2K and NOvA], “Joint neutrino oscillation analysis from the T2K and NOvA experiments,” Nature **646**, no.8086, 818-824 (2025).
- [11] K. Abe *et al.* [T2K], “Signal selection and model-independent extraction of the neutrino neutral-current single π^+ cross section with the T2K experiment,” Phys. Rev. D **112**, no.7, 072008 (2025).
- [12] K. Abe *et al.* [T2K], “First Differential Measurement of the Single π^+ Production Cross Section in Neutrino Neutral-Current Scattering,” Phys. Rev. Lett. **135**, no.17, 171803 (2025).
- [13] K. Yamauchi *et al.* [Super-Kamiokande], “Search for neutron decay into an antineutrino and a neutral kaon in 0.401 megaton-years exposure of Super-Kamiokande,” Phys. Rev. D **112**, no.9, 092004 (2025).
- [14] A. Abe *et al.* [T2K], “Testing T2K’s Bayesian constraints with priors in alternate parameterisations,” Eur. Phys. J. C **85**, no.12, 1414 (2025).
- [15] K. Abe *et al.* [T2K], “Measurement of muon neutrino induced charged current interactions without charged pions in the final state using a new T2K off-axis near detector WAGASCI-BabyMIND,” Phys. Rev. D **112**, no.11, 112020 (2025).
- [16] K. Abe *et al.* [T2K], “Results from the T2K Experiment on Neutrino Mixing Including a New Far Detector μ -like Sample,” Phys. Rev. Lett. **135**, no.26, 261801 (2025).
- [17] Y. Maekawa *et al.* [Super-Kamiokande], “Measurement of the branching ratio of N16, C15, B12, and B13 isotopes through the nuclear muon capture reaction in the Super-Kamiokande detector,” Phys. Rev. C **112**, no.6, 064614 (2025).
- [18] F. Nakanishi *et al.* [Super-Kamiokande], “First Associated Neutrino Search for a Failed Supernova Candidate with Super-Kamiokande,” Astrophys. J. Lett. **997**, no.1, L9 (2026).
- [19] S. Jung *et al.* [Super-Kamiokande], “Search for nucleon decay via $p \rightarrow \nu\pi^+$ and $n \rightarrow \nu\pi^0$ in 0.484 Mton-year of Super-Kamiokande data,” Phys. Rev. D **113**, no.1, 012015 (2026).
- [20] K. Abe *et al.* [Hyper-Kamiokande], “Sensitivity of the Hyper-Kamiokande experiment to neutrino oscillation parameters using accelerator neutrinos,” Eur. Phys. J. C **86**, no.2, 170 (2026).

その他

- [21] J. Hikida, S. Akiyama, S. Ban, M. Hirose, A. K. Ichikawa, Y. Iwashita, T. Kikawa, Y. Nakajima, K. D. Nakamura and T. Nakaya, *et al.* “AXEL: High-pressure xenon gas TPC for neutrinoless double beta decay search,” Nucl. Instrum. Meth. A **1080**, 170706 (2025).
- [22] S. Abe, “Benchmarks and applications of the nuclear deexcitation event generator nucdeex,” Phys. Rev. D **112**, no.11, 112013 (2025).
- [23] S. Abe, L. Aliaga-Soplin, J. Barrow, L. Bathe-Peters, B. Bogart, L. Cooper-Troendle, R. Durba, S. Dytman, S. Gardiner and L. Hagaman, *et al.* “Improving neutrino-nuclei interaction models: Recommendations and case studies on Pelle’s Pertinent Puzzle,” Phys. Rev. D **113**, no.1, 012011 (2026).

(学位論文)

博士論文

- [24] Shoma Kodama, “Search for leptonic CP violation in the T2K experiment with studies of neutrino interaction effects”

修士論文

- [25] Hibiki Hayasaki, “Design and Performance Evaluation of Neutron Detectors for $^{16}\text{O}(p, pn)$ Reaction Measurements toward Studies of Nuclear Deexcitation at the SAMURAI-79 Experiment”
- [26] Yuta Masaki, “Study on improving the energy scale stability and uniformity in the Super-Kamiokande detector using muon decay electrons”

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [27] Masashi Yokoyama, “Hyper-Kamiokande Update,” Symposium of the US-Japan Science and Technology Cooperation Program 2025, May 12–14, 2025, Sapporo, Japan
- [28] Seisho Abe, “Neutrino Generators,” II EU Workshop on Water Cherenkov Experiments for Precision Physics, Sep 17–19, 2025, Krakow, Poland
- [29] Seisho Abe, “Modeling Neutrino-Nucleus Interaction at T2K & SK: Status and Challenges,” Neutrino Interactions for Current and Future Experiments, Oct 27–29, 2025, KEK, Japan

一般講演

- [30] Minoru Sekiyama, “Lab Studies of SpaCal PMT Candidates,” CERN Summer Student 2025 LHCb Students Presentation, Aug 19, 2025, CERN
- [31] Wataru Okinaga, “Super Fine-Grained Detector for improved neutrino interaction measurements in T2K,” XXI International Workshop on Neutrino Telescopes, Sep 29–Oct 3, 2025, University of Padova, Italy
- [32] Minoru Sekiyama, “Groundstate Energy of The Two-dimensional Pure Z2 Lattice Gauge Theory via Quantum Imaginary Time Evolution,” Lattice 2025, Nov 2–8, Tata Institute of Fundamental Research, India
- [33] Tomochika Arai, “CNN-based event separation using 2D and 3D images for the charged-current electron neutrino cross section measurement with the SuperFGD of the T2K near detector,” Connecting The Dots 2025, Nov 10–14 2025, The University of Tokyo

ポスター発表

- [34] Shoma Kodama, “Ozaki Exchange Program: Development of the new LArTPC DAQ System,” Symposium of the US-Japan Science and Technology Cooperation Program 2025, May 12–14, 2025, Sapporo, Japan
- [35] Hokuto Kobayashi, “Evaluation of Electron-Neutrino Event Reconstruction Techniques Towards Electron-Neutrino Cross section measurement in The Upgraded T2K Near Detector,” The 26th International Workshop on Neutrinos from Accelerators, Sep 1–6, 2025, The University of Liverpool
- [36] Seisho Abe, “Incorporating Adler Frame Effect into the DCC Model for Single Pion Production in NEUT,” 15th International Workshop on Neutrino-Nucleus Interactions, Oct 5–10, 2025, Mainz, Germany
- [37] Yusuke Mizuno, “Oxygen ion beam experiment for precise prediction of neutrino-nucleus interactions,” *ibid.*

(国内会議)

招待講演

- [38] 中島康博, 「ニュートリノ原子核反応の精密理解のための酸素ビームを用いた逆運動学実験」、核物理委員会 将来計画検討委員会、2025 年 6 月 10 日、東京大学
- [39] 横山将志, 「地下から素粒子と宇宙をみる：ハイパーカミオカンデの挑戦」、日本学術会議 公開シンポジウム「量子が世界を変える 科学の 100 年と未来への挑戦」、2025 年 11 月 15 日、日本学術会議
- [40] 安部清尚, 「原子核反応から拓くニュートリノ物理の新天地: 主要系統誤差削減への道」、核物理の将来 基礎物理サブ WG 研究会、2026 年 1 月 6–7 日、東京科学大学

一般講演

- [41] Tomochika Arai, “electron neutrino cross-selection measurement for CP-violation Search,” 4PM seminar, April 23, 2025, The University of Tokyo
- [42] 関山実, 「ニュートリノ反応断面積測定 YO-GASHI」、高エネルギー物理 春の学校、2025 年 5 月 22–24 日、ロワジュールホテル豊橋
- [43] 中島康博, 「SAMURAI-79 実験」、第三回瀬戸内ニュートリノ研究会、2025 年 7 月 11–13 日、豊島エスポワールパーク
- [44] 林崎響, 「SAMURAI-79 実験に向けた (p, pn) 反応の検出器シミュレーション」、同上
- [45] 小林北斗, 「T2K 実験新型前置検出器における電子ニュートリノ反応断面積測定に向けた電子再構成手法の評価」、日本物理学会第 80 回年次大会、2025 年 9 月 16–19 日、広島大学
- [46] 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 実験の概要」、同上
- [47] 冲永和平, 「T2K 新型前置検出器における運動量測定性能の評価」、同上
- [48] 山住竜輝, 「減衰長が長く発光時定数が短い新型波長変換ファイバーのレーザー及び電子ビームを用いた性能評価」、同上
- [49] 林崎響, 「SAMURAI79 実験に向けた、中性子検出器 MNEUT の検出性能とバックグラウンドの評価」、同上
- [50] 新居智将, 「T2K 新型前置検出器 SuperFGD における畳み込みニューラルネットワークを用いた電子ニュートリノ事象の光子背景事象との識別手法の開発」、同上
- [51] 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
- [52] 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 を含む GPS 結晶の性能評価」、SMART2025、2025 年 10 月 12–15 日、松江ニューアークホテル
- [53] 林崎響, 「 $0\nu\beta\beta$ 探索に向けたイットリウム を添加した GAGG の開発とその評価」、同上

- [54] 山住竜輝、「発光時定数の短い新型波長変換ファイバーの性能評価」、シンチレータ高度化研究会 2025、2025 年 10 月 28–29 日、岩手大学
- [55] 遠藤陽太、「スーパーカミオカンデにおける MeV 領域のエネルギー較正」、第 32 回 ICEPP シンポジウム、2026 年 2 月 15–18 日、志賀レークホテル
- [56] 関山実、「ハイパーカミオカンデ実験に用いられるエレクトロニクスの性能評価」、同上
- [57] 山住竜輝、「ハイパーカミオカンデにおける PMT 信号読み出し用エレクトロニクスの基礎特性評価」、同上
- [58] 遠藤陽太、「スーパーカミオカンデにおける加速電子を用いた MeV 領域のエネルギー較正」、日本物理学会 2026 年春季大会、2026 年 3 月 23–26 日、オンライン
- [59] 水野裕介、「SAMURAI-79 実験に向けた軽核における蒸発モデルパラメーターの最適化方法の開発」、同上
- [60] 関山実、「ハイパーカミオカンデ信号読み出しエレクトロニクス 最終版の性能評価」、同上
- [61] 山住竜輝、「ハイパーカミオカンデ用エレクトロニクスの性能評価 2」、同上
- [62] 林崎響、「SAMURAI79 実験に向けた、中性子検出器 MNEUT の性能とバックグラウンドの評価」、同上
- ポスター発表
- [63] Wataru Okinaga, “Evaluating the momentum reconstruction performance in the upgraded T2K near detector,” 国際先導研究会「ニュートリノによる宇宙創生の解明」 2025 年 4 月 16–17、京都大学
- [64] Tomochika Arai, “Separation between electron and gamma by multiple CNNs at SuperFGD in the T2K off-axis near detector for the measurement of the electron neutrino cross-sections,” 同上
- [65] 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」、同上
- [66] Hokuto Kobayashi, “Electron neutrino event selection using new T2K near detectors,” 同上
- [67] 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 —15N*の脱励起過程の測定—」、同上
- [68] 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 —15O*の測定—」、同上
- [69] Shoma Kodama, “Super-Kamiokande coil-off data analysis for the T2K experiment,” 同上
- [70] 山住竜輝、「小型サイクロトロンによる陽イオン加速実験」、高エネルギー物理 春の学校、2025 年 5 月 22–24 日、ロワジールホテル豊橋
- [71] 遠藤陽太、「2 層の鉛標的と 4 枚のシンチレータによるニュートリノの散乱断面積の測定」、同上
- [72] 横山将志, “Hyper-Kamiokande,” 第 3 回 素粒子国際研究センターポスター発表会、2026 年 3 月 27 日
- [73] Tatsuki Yamazumi, “Evaluation of the temperature dependence of the latest HK digitizer,” 国際先導研究会「ニュートリノによる宇宙創生の解明」、2026 年 3 月 30–31、東京大学
- [74] Minoru Sekiyama, “Performance evaluation for the final version of Hyper Kamiokande Signal Readout Electronics,” 同上
- [75] Wataru Okinaga, “Particle identification in the upgraded T2K near detector,” 同上
- [76] Hokuto Kobayashi, “Evaluation of electron-neutrino event reconstruction techniques towards an electron-neutrino cross-section measurement in the upgraded T2K near detector,” 同上
- [77] Yusuke Mizuno, “Development of Optimization Method for Evaporation Model Parameters in Light Nuclei for the SAMURAI-79 Experiment,” 同上
- [78] Tomochika Arai, “CNN-based event separation for the charged-current electron neutrino cross-section measurement with the SuperFGD of the T2K near detector,” 同上
- (セミナー)
- [79] 横山将志、「で、Hyper-K、どうなんすか?」、KEK 素粒子原子核研究所 金茶会、2025 年 5 月 16 日、高エネルギー加速器研究機構
- [80] Seisho Abe, “Recent updates on the neutrino event generator NEUT,” Seminar at University Wroclaw, Sep 22, 2025, Wroclaw, Poland
- [81] 横山将志、STREAM 研修模擬講義、愛媛県立宇和島東高等学校関東 STREAM 研修、2026 年 1 月 22 日、東京大学本郷キャンパス
- (その他の講演)
- [82] Yasuhiro Nakajima, “T2K analysis status and plan,” J-PARC 40th Program Advisory Committee meeting, Jul 17, 2025, J-PARC

2.4 寄田研究室

本研究室は、高エネルギー加速器実験、とりわけ欧州 CERN の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) における国際共同実験に参画し、標準模型の精密検証およびそれを超える新物理の探索を主要な研究課題としている。LHC 実験では、ヒッグス粒子等の精密測定を通じて標準模型の妥当性を検証するとともに、未知粒子の兆候を捉えるための新物理探索を進めている。これに加え、衝突事象の再構成や粒子識別の高度化に向けたデータ解析手法の開発、および将来の実験を見据えた検出器性能の向上にも取り組んでいる。また、宇宙暗黒物質探索のための検出器の開発に関連して、気球実験や加速器ビーム試験を活用した実証的研究も進めており、実験環境に応じた性能検証や観測技術の高度化を図っている。加速器実験の結果と他の観測・実験手法との関係を踏まえた相補的なアプローチで、素粒子物理学における未解決問題の解明を目指している。

2.4.1 高エネルギー加速器実験の研究

本研究室では、ATLAS 検出器の運転・性能評価から物理解析、さらに高輝度 LHC (HL-LHC) の構築まで、一貫した研究を推進している。今年度は、Run3 における安定なデータ取得と飛跡検出器の長期運用評価を行うとともに、Run2 と Run3 データを用いた新物理探索の感度向上と存在制限の更新を達成した。加えて、深層学習を取り入れた解析高度化や次世代内部飛跡検出器 (ITk) の開発・量産等も推進している。以下、2025 年度の研究活動の概要をまとめる。

ATLAS/LHC Run3 の運転

2025 年度の ATLAS/LHC 実験は安定な加速器・検出器運転を行い、約 120fb^{-1} のデータを取得し、Run3 全体で 300fb^{-1} のデータを蓄積した。本研究室では、とくに ATLAS 内部飛跡検出器の運転と運用評価を行っている。ATLAS 飛跡検出器中間層を構成するシリコンストリップ検出器 (SCT) は、荷電粒子の飛跡再構成と運動量測定に用いられるため、ほぼすべての物理解析に重要な役割を果たしている。実験開始より 17 年間の運転によりフルエンスは 1 MeV 中性子等価量で 10^{14} cm^{-2} に達しているため、放射線損傷の影響で高ヒット検出効率維持に必要なセンサー印加電圧 (HV) が上昇している。そこで、実際の陽子・陽子衝突データを用いてヒット検出効率の HV 依存性を解析し、95% の検出効率に必要な HV を評価した (図 2.4.13)。積分ルミノシティに対してほぼ線形に増加していることから、2026 年夏頃の Run3 終了まで SCT の HV 上限である 500 V を下回る電圧で運用可能であることを示した。

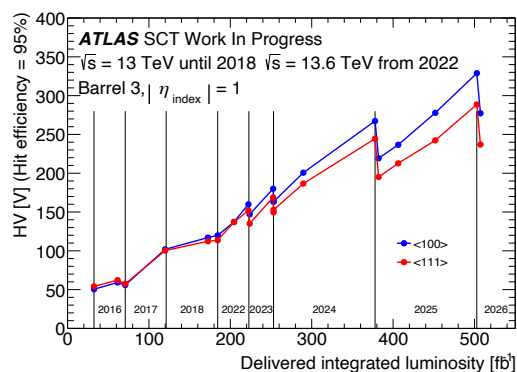


図 2.4.13: 高いヒット検出効率を達成するために必要なセンサー印加電圧の供給ルミノシティ依存性

物理データ解析

消失飛跡による超対称性暗黒物質の探索

消失飛跡探索は、検出器最内部に位置するピクセル半導体検出器のみを用いた飛跡再構成により、従来の事象再構成では検出が困難な、寿命が $0.01\sim 1\text{ ns}$ 程度の長寿命粒子の直接検出を目的とする。今年度は、LHC の重心系エネルギー 13 TeV の陽子陽子衝突による Run2 全データを用い、超対称性理論で

予測される暗黒物質候補に関連した長寿命電弱ゲージノおよびスカラータウの探索を行った。飛跡再構成手法の改良により探索感度は先行解析に対して生成断面積で約 2 倍に向上したが、有意な超過は観測されなかった。結果的に、ヒグシーノ質量に対して 225 GeV 、ウィーノに対して 660 GeV 、寿命 1 ns のスカラータウに対して 300 GeV の質量下限制限を与えた (図 2.4.14)。

重いヒッグス粒子 ($H/A \rightarrow \tau\tau$) の探索

最小超対称性標準模型などの理論では最低 5 つのヒッグス粒子の存在を预言する。重い中性ヒッグス粒子がタウ粒子対に崩壊するモードは高質量かつ大きな $\tan\beta$ で最も高い感度を持つため、重要な探索過程である。本解析では、LHC Run2 全データを用いた前回解析から、性能が改善されたタウ粒子同定及び 2023 年までに取られた LHC Run3 データを用いて、探索範囲を広げることを試みた。背景事象推定・系統誤差の精査を行い予想感度を算出し、高い $\tan\beta$ において質量 400 GeV 、 2 TeV の信号に対しては $\tan\beta$ で 30 の改善が見込まれることを確認した (図 2.4.15)。その他、ヒッグスポテンシャルの形状決定のためにも重要なヒッグス対生成事象 ($HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$) のデータ解析や深層学習の一つの Transformer を用いた解析の高度化等の研究も推進し、学術論文や学会、研究会などで公表した。

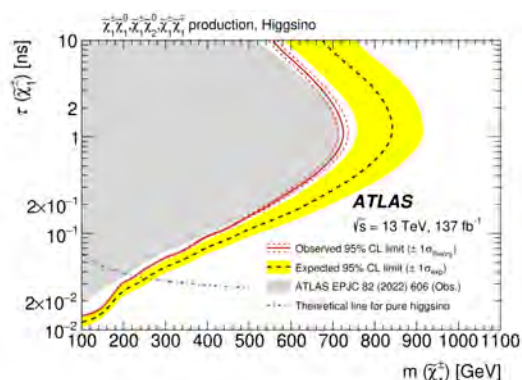


図 2.4.14: 今回の解析で得られた電弱ゲージノ質量と崩壊寿命平面における存在棄却曲線

HL-LHC 増強に向けた取り組み

LHC は今後数年の間で加速器性能を上げ、高輝度 LHC (HL-LHC) として引き続き、高エネルギーフロンティアを牽引する。これに向けた検出器増強の一環として、ATLAS 実験では内部飛跡検出器の全面更新 (ITk: Inner Tracker) が進められている。本研究室は、この ITk 構築において、ピクセル検出器の量産および品質保証・品質管理 (QA/QC) に関する研究活動に貢献している。2025 年度は、高エネルギー加速器研究機構等との共同研究のもと、ピクセ

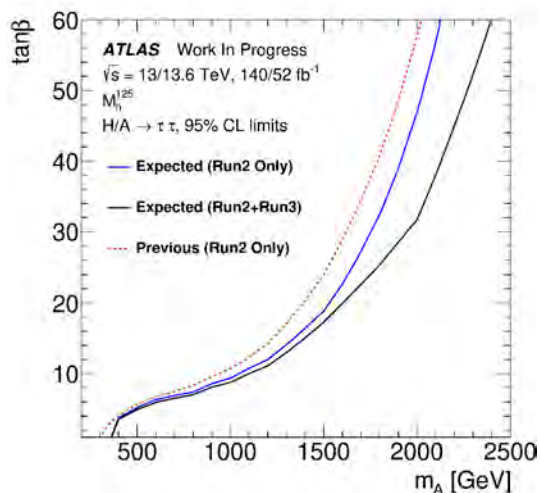


図 2.4.15: H/A 質量と $\tan\beta$ 平面における $H/A \rightarrow \tau\tau$ の探索感度曲線

ル検出器モジュールの量産に参画し、組立および検査プロセスの高度化・安定化を推進した。特に、電気的特性評価や動作試験を通じて不良モジュールの早期検出と品質向上に寄与した。また、量産工程における QA/QC 手法の整備と実運用を行い、高い信頼性を有する検出器の構築に貢献した。これらの取り組みにより、HL-LHC の高輝度・高放射線環境下においても高精度な飛跡再構成を実現するための基盤整備を進めている。

2.4.2 宇宙暗黒物質探索の研究

本研究では、液体アルゴンタイムプロジェクション検出器 (LArTPC) 技術を基盤とし、宇宙線中の反粒子観測を通じた暗黒物質探索を推進している。本手法は、低エネルギー領域における粒子のエネルギー損失および飛跡情報を高精度に測定できるため、粒子の同定識別能力に優れているという特徴をもつ。宇宙線のなかでも特に反重陽子は、暗黒物質探索において有力なプローブとなる。通常の宇宙線（主に陽子）と星間物質との相互作用により生成される反粒子（二次生成）は低エネルギー領域で急激に減少するのに対し、暗黒物質粒子の対消滅や崩壊によって生成される反重陽子は、この領域で相対的に顕著なフラックスを持つと予測されている。このため、低エネルギー反重陽子の観測は、背景事象の量に対してクリーンな探索手法 (zero background search) となる。本研究は、気球搭載型の観測として、日米協力で進めている GRAMS 実験と連携して進めており、世界初の低エネルギー反重陽子の高感度観測を目指している。これにより、従来の宇宙線実験では未踏であった領域を探索し、暗黒物質の性質に対する新たな制約、あるいはその存在を示唆する重要な知見の獲得が期待される。

液体アルゴン TPC 検出器による宇宙反粒子探索

この探索に用いる液体アルゴンタイムプロジェクション検出器 (LArTPC) は、荷電粒子の精密トラッキングおよびエネルギー付与測定を同時に実現する三次元検出器であり、特に低エネルギー領域における粒子同定において高い有効性を有する。LArTPC では、荷電粒子が液体アルゴン中を通過する際に生成する電離電子を、一様電場中でドリフトさせ、位置分解能を持つ読み出し電極により時間情報とともに検出する。このドリフト時間は飛跡の電場方向の z 座標に対応し、電極面上の空間情報と組み合わせることで、飛跡の三次元再構成が連続的に行われる。さらに、単位長さあたりのエネルギー損失 (dE/dx) が飛跡に沿ってサンプリングされるため、電離密度分布の詳細な測定が可能である。この dE/dx 情報は、粒子の運動量や電荷、質量に依存した応答を反映しており、飛跡形状と組み合わせることで高い識別能力を提供する。特に、低速粒子において顕著となるエネルギー損失の増大や停止直前のブラッグピーク構造は、粒子種の識別において重要な観測量となる。このような検出原理に基づき、LArTPC は連続的かつ高精度なトラッキングと精密な電離信号測定を両立することで、粒子の運動過程を詳細に記録するとともに、 dE/dx プロファイルに基づく高精度な粒子識別を可能とする。また、検出体積全体が均一な感受領域であるため不感領域が少なく、特に飛程の短い低エネルギー荷電粒子に対しても高い検出効率と識別性能を維持できる。すなわち、LArTPC は低エネルギー宇宙線環境における荷電粒子の精密測定に適した検出技術といえる。

反陽子ビーム照射実験@J-PARC

LArTPC 技術による反粒子検出手法の原理検証とその性能実証および較正を目的として、J-PARC において反陽子ビーム試験 (T98 実験) を 2025 年 2 月に実施した。放射線区域での作業のための安全管理や液体アルゴンの高純度維持といった技術的課題を克服しつつ、暗黒物質探索感度の定量評価に不可欠な統計量 (10^5 事象以上) の反陽子データ取得に成功し、反粒子検出に関する基盤データを確立した。2025 年度は、このビーム試験データの詳細解析を進め、飛跡形成過程、エネルギー損失分布、ならびに消滅反応に伴う複雑な事象トポロジーの体系的理解を深化させている。特に、従来手法に加えてハフ変換による停止点の決定や飛跡抽出アルゴリズムを導入するとともに、検出信号を画像データとして利用することで、CNN をはじめとする画像処理に強い深層学習を用いた高次特徴量抽出および事象再構成手法の開発を進めている (図 2.4.16)。これらの手法を組み合わせることで、反粒子特有のシグナルパターンの識別能力を向上させ、粒子識別性能の定量的評価および最適化を図っている。さらに、種々の較正データをもとに GEANT4 を基盤とした詳細な検出器シミュレーションを構築し、ビーム試験データとの比較検証を通じて、物理過程および検出器応答モデルの妥当性検証を進めている。シミュレーション

精度のさらなる高度化と再構成アルゴリズムの洗練を同時に達成し、実験データと理論モデルの整合性を高い水準で確立することを目指している。これらすべての成果は、学術論文として体系的に報告することを予定している。

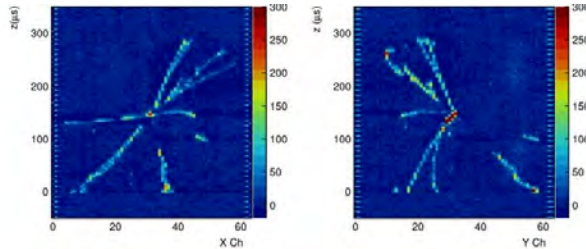


図 2.4.16: 反陽子ビーム照射で得られた、反陽子と液体アルゴン原子核の反応事象の例 (左は x-z、右は y-z 平面)。反陽子対消滅を起こし、多数のハドロンが生成されていることが確認できる。

米国アリゾナ州での次期気球フライトの準備

次期フライト計画として、2026 年度中に米国アリゾナ州における 1 日規模の気球フライト (pGRAMS) の実施が、NASA により正式に承認されており、その実現に向けた準備を進めている。本フライトは、実運用環境における検出器性能の実証および観測手法の確立を目的とするものであり、地上試験で得られた知見を統合する重要なマイルストーンと位置付けられる。特に、LArTPC 検出器の性能を左右するアルゴン純度の確保に関して、モレキュラーシーブおよび無酸素銅を用いた自作フィルターの開発と、その性能評価に関する系統的研究を実施した。これらのフィルターを直列に 2 本配置した構成により、初期不純物濃度がおよそ 100 ppb 程度の液体アルゴン (現地調達) に対しても、1 回の充填プロセスにより sub-ppb レベルまでの純化が達成可能であることを実証した。この結果は、簡便かつ高効率な純化手法として、気球実験のような厳しい制約条件下においても安定した検出器運用を可能とする重要な技術的基盤を提供するものである。さらに、新型 TPC に対応した読み出しシステムの開発および統合試験を進めており、データ取得の安定性向上に取り組んでいる。これらの改良により、飛行環境においても高精度なトラッキングおよびエネルギー測定が可能となることが期待される。今後は、これらの要素技術の統合および環境試験を進めるとともに、フライト運用手順の最適化を行い、2026 年度中の気球フライトに向けた準備を完了する。本フライトを通じて、実環境下での検出器性能の検証と観測データの取得を行い、宇宙線反物質観測に向けた技術実証を推進する。

<受賞>

- [1] Kohei Yorita as a member of ATLAS, Breakthrough Prize in Fundamental Physics, Fundamental Physics Prize Foundation, 2025
- [2] 木村真人、日本物理学会若手奨励賞 (素粒子実験領域)、日本物理学会、2026 年 3 月

<報文>

(原著論文)

- [3] G. Aad *et al.* (ATLAS Collaboration) “Search for Higgs boson decays into a pair of pseudoscalar particles in the $\gamma\gamma\tau_{had}\tau_{had}$ final state using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, JHEP 03 (2025) 190
- [4] G. Aad *et al.* (ATLAS Collaboration) “Search for electroweak production of vector-like leptons in τ -lepton and b -jet final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, Eur.Phys.J.C 85 (2025) 11, 1335
- [5] G. Aad *et al.* (ATLAS Collaboration) “Estimation of backgrounds from jets misidentified as τ -leptons using the Universal Fake Factor method with the ATLAS detector”, Eur.Phys.J.C 85 (2025) 1441
- [6] G. Aad *et al.* (ATLAS Collaboration) “A measurement of the high-mass $\tau\tau$ production cross-section at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector and constraints on new particles and couplings”, JHEP 10 (2025) 054
- [7] G. Aad *et al.* (ATLAS Collaboration), “Transforming jet flavour tagging at ATLAS”, Nature Commun. 17 (2026) 1, 541
- [8] G. Aad *et al.* (ATLAS Collaboration) “Probing the Higgs boson CP properties in vector-boson fusion production in the $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ channel with the ATLAS detector”, JHEP 10 (2025) 092
- [9] G. Aad *et al.* (ATLAS Collaboration) “Evidence for the Dimuon Decay of the Higgs Boson in pp Collisions with the ATLAS Detector”, Phys. Rev. Lett. **135**, (2025) 23, 231802
- [10] G. Aad *et al.* (ATLAS Collaboration) “Search for long-lived charginos and τ -sleptons using final states with a disappearing track in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector”, arXiv:2603.08315

(その他)

- [11] D. Akiyama, “ATLAS Inner Detector Operational experience at the LHC at CERN”, VERTEX2025, PoS (VERTEX2025) 004 (2025)
- [12] Y. Yano, “Study of Antiproton Reactions in LArTPC with J-PARC T98 data and Simulation”, PoS ICRC2025 (2025) 156

(学位論文)

- [13] 菅家康一郎, 「LHC-ATLAS 実験における Transformer を用いた $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$ 過程の解析感度評価」 (修士論文、早稲田大学)
- [14] 荒井紳太郎, 「J-PARC T98 実験における光信号解析および pGRAMS に向けた液体アルゴン純化手法の確立」 (修士論文、早稲田大学)
- [15] 矢野裕太郎, 「J-PARC T98 実験における高統計反陽子ビームを用いた LArTPC 中の反粒子捕獲事象の解析」 (修士論文、早稲田大学)
- (著書)
- [16] 『東大物理の歩き方』 東大出版 (共著)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [17] D. Akiyama, “ATLAS Inner Detector Operational experience at the Large Hadron Collider at CERN”, 33rd International Workshop on Vertex Detectors, 2025/08/25, University of Tennessee, USA
- [18] D. Akiyama, “Searches for supersymmetric particles with the ATLAS detector”, 44th International Symposium on Physics in Collision, 2025/10/21, Zewail City of Science and Technology, Egypt
- 一般講演
- [19] D. Akiyama, K. Yorita, “Track reconstruction at collider experiments using quantum-inspired simulated annealing”, Connecting The Dots 2025, Tokyo
- ポスター発表
- [20] Y. Yano, “Study of Antiproton Reactions in LArTPC with J-PARC T98 data and Simulation”, ICRC2025, Geneva, Switzerland
- [21] H. Ito, “Search for a neutral heavy Higgs boson decaying into a pair of τ leptons with the ATLAS Run2+Run3”, Tera-Scale Physics and Beyond 2025, Osaka
- [22] Y. Minekawa, “Latest Results of Hit Efficiency and Charge Collection of the ATLAS SCT Sensors”, Tera-Scale Physics and Beyond 2025, Osaka
- [23] K. Kanke, “Track reconstruction at collider experiments using quantum-inspired simulated annealing”, Connecting The Dots 2025, Tokyo
- (国内会議)
- 招待講演
- [24] 寄田浩平「JAHEP の将来計画 ～ヒッグスファクトリーからその先へ～」, 高エネルギー将来計画会議 2025 年 11 月 葉山
- 一般講演
- [25] 寄田浩平「BSM はどこからくるか? 素粒子フロンティア加速器実験の現在地と行方」シンポジウム講演 日本物理学会第 80 回年次大会 広島大
- [26] 秋山大也「LHC-ATLAS 実験 Run 2 データの新しい飛跡再構成を用いた再解析による消失飛跡探索」日本物理学会第 80 回年次大会 広島大
- [27] 荒井紳太郎「GRAMS-AM 実験 23 LArTPC による反粒子同定手法検証実験 (J-PARC T98) におけるビーム品質評価」 日本物理学会第 80 回年次大会 広島大
- [28] 渡邊知優「GRAMS-AM 実験 24 LArTPC による反粒子同定手法検証実験 (J-PARC T98) における検出器較正」 日本物理学会第 80 回年次大会 広島大
- [29] 秋山大也「LHC-ATLAS 実験 Run 2 データを用いた消失飛跡探索の最終結果」日本物理学会 2026 年春季大会
- [30] 伊藤紘貴「LHC-ATLAS 実験 Run2+Run3 におけるタウ粒子対に崩壊する重いヒッグス粒子の探索の系統誤差と予想感度の評価」日本物理学会 2026 年春季大会
- [31] 峯川優也「LHC-ATLAS 実験におけるシリコンストリップ検出器の粒子検出性能評価と Run 3 終盤での運用」日本物理学会 2026 年春季大会
- [32] 田中雅士「GRAMS-AM 実験 25 大気球搭載 LArTPC を用いた暗黒物質探索にむけた開発の現状」日本物理学会 2026 年春季大会
- [33] 渡邊知優「GRAMS-AM 実験 26 LArTPC による反粒子同定手法検証実験 (J-PARC T98) の反陽子データ解析状況」 日本物理学会 2026 年春季大会
- [34] 峯川優也「LHC-ATLAS 実験における SCT 検出器の欠陥判定手法と HV Scan の最適化」 第 13 回高エネルギー物理春の学校 2025
- [35] 高田教汰郎「LHC-ATLAS 実験におけるトップクォーク対生成事象のモデリングの検証」 第 13 回高エネルギー物理春の学校 2025
- [36] 矢野裕太郎「J-PARC T98 実験: LArTPC による反粒子同定手法検証実験の概要と解析状況」 MPGD&Active 媒質 TPC 研究会 2025
- [37] 荒井紳太郎「GRAMS 実験における気球上での液体アルゴン運用に向けた LAr 純化装置の開発」 MPGD&Active 媒質 TPC 研究会 2025
- (その他)
- [38] 寄田浩平「新しい素粒子物理への挑戦 ～暗黒物質×素粒子実験×未来展望～」東京大学理物コロキウム 2026 年 1 月

常に小さいことが分かった [10, 14, 20, 21, 24, 28]。Rietveld 解析の結果、それらの中でも $I4_1/a$ 、 $Ibam$ 構造が実験回折データとよく整合することがわかった。

3 物性理論

3.1 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。

3.1.1 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。しかし、原子数の増加すると、組合せ爆発による限界がすぐに来てしまう。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おり、実際の未知構造への応用も盛んに行っている [34, 35]。

イットリウム高圧相の構造探索

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) 構造についても広く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、機械学習ポテンシャルとデータ同化結晶構造探索手法を組み合わせることにより、セル内に最大 128 原子を含む構造まで探索範囲を広げて、dfcc 構造の探索を行った。その結果、従来知られていた $R\bar{3}m$ 、 $I4_1/a$ 構造とは異なる $Ibam$ 、 $R\bar{3}$ 構造を発見した。第一原理計算の結果、これらの構造の中では、従来最も受け入れられてきた $R\bar{3}m$ 構造が最も不安定であることがわかり、その他の構造間のエンタルピー差は非

HCl-H₂ 化合物高圧相の構造探索

ハロゲン水素化物 $(HX)_x(H_2)_y$ は、高圧下での水素化物高温超伝導体の前駆体の候補として、近年精力的に調べられている。 $X=Br, I$ の場合には、 ~ 5 GPa において $(HX)_2H_2$ 化合物が生成され、いずれも $I4/mcm$ 構造をとることが知られていたが、 $X=Cl$ の場合には、 $I4/mcm$ 構造では説明できない回折ピークが観測され、構造は未解明なままであった。そこで本研究では、機械学習ポテンシャルとデータ同化結晶構造探索手法を組み合わせることで、組成さえ未知の場合の構造決定の問題に取り組んだ。その結果、 $X=Br, I$ の場合とは異なり、 $(HCl)_3(H_2)_4$ の組成をもつ構造が有力な候補構造として得られた [31]。この構造は、実験回折データをよく再現するだけでなく、形成エネルギー凸包からの距離が 1.7 mRy/atom の準安定構造であり、動的にも安定であることが確認された。

3.1.2 水素化物高温超伝導体の探索

高圧下のランタン水素化物 (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 を検証するために、加熱した際に電極由来の 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 $LaPtH_6$ 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 [4, 22]。次に、水素供給材アンモニアボラン由来の N と B 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 系の高圧安定相と超伝導相の探索を同様の方法で行なったところ、新物質の $LaBH_5$ (Fig. 3.1.1) が熱力学的に安定な化合物として得られ、 $T_c = 29.0$ K の超伝導になることを予測した [9, 13, 15, 23, 27, 29]。この物質を 40 GPa まで加圧すると T_c が 43.5 K まで上昇するが、これ以上加圧しても更なる上昇は得られなかった。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を引き続き行う。

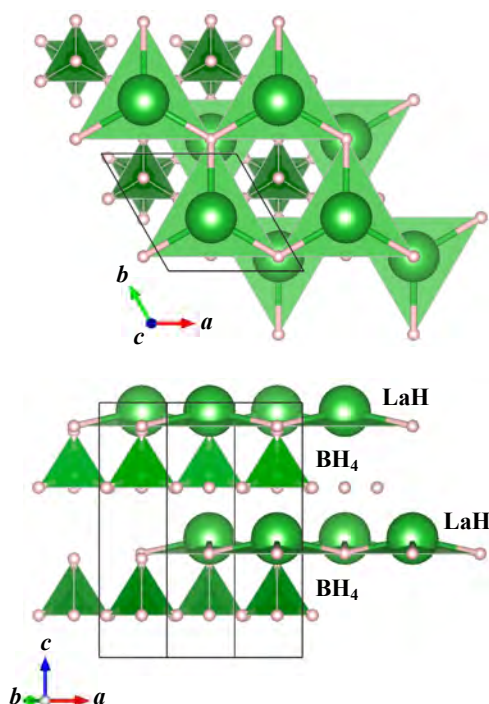


図 3.1.1: 進化的アルゴリズム、機械学習ポテンシャル、第一原理計算を用いて予測した水素化物超伝導体 LaBH_5 の結晶構造。

3.1.3 水素化物超伝導体におけるスピンゆらぎ

均一にホールドーピングされたペロブスカイト型水素化物 KMgH_3 の超伝導特性を、ドーピング濃度と、さまざまな圧力に対応するように格子定数を変えながら、第一原理計算を使って調べた [2, 6, 12, 18, 19]。結晶格子の動的安定性とフォノン振動数の計算には、当研究室で開発してきた第一原理自己無撞着フォノン法を用いた。超伝導転移温度 (T_c) の計算には超伝導体密度汎関数理論 (SCDFT) を用いたが、その際、従来無視されてきたスピン揺らぎの影響を考慮した。

格子非調和性は、動的安定性の境界付近では超伝導を抑制する傾向があるが、非調和効果によって相が安定化される領域では T_c は上昇する。ホールドーピングされた KMgH_3 においては、フォノン媒介のペアリングに逆行し、 T_c を低下させる著しいスピン揺らぎ (SF) 効果が発見された。さまざまな水素化物について同様の計算を行った結果、水素の $1s$ バンドがフェルミレベルで孤立している水素化物で、同じような異常に強い SF が見られることから、水素化物の超伝導材料探索においてスピン揺らぎを考慮する重要性が明らかになった。

3.1.4 液体や高分子材料の THz 帯複素誘電率の計算手法開発

GHz、THz 帯での物質の誘電特性には、格子振動や分子の変形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理論的に予測する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。

今年度はこれまで開発してきた化学結合ベースの双極子モーメントの機械学習モデルを用いて、液体プロピレングリコール (PG) および液体ポリプロピレングリコール (PPG) の誘電特性に関する第一原理計算を行い、テラヘルツ以下の振動数においても誘電関数の周波数依存性や温度依存性を精度良く計算できることを示した。また実験的に指摘されていた 600 cm^{-1} におけるリブレーションピークと、 100 cm^{-1} における分子間モードを同定した。重要な成果として、ポリプロピレングリコール 2 量体のデータを使って学習したモデルは、学習データに含まれていないより長い鎖を持つ PPG にも適用可能であることが明らかになった。本研究は、汎用的な双極子モデルの開発に向けた第一歩となる [1, 8, 11, 33, 34]。また昨年に引き続き、遠距離からの電場効果を取り入れた機械学習モデルの開発を行った [16, 25, 26, 32]。

3.1.5 パラメータフリー DFT-1/2 法の開発

第一原理計算に用いられる密度汎関数理論 (DFT) において、局所密度近似 (LDA) のような従来の近似法では、バンドギャップが過小評価されがちである。バンドギャップの精度が高い手法は、計算コストが高いという問題がある。そこで 2008 年に Ferreira らが導入した DFT-1/2 法では、局所ポテンシャルレベルで自己相互作用補正を適用することにより、価電子帯のエネルギー準位を調整することで、低コスト計算を実現する。この補正の程度はカットオフパラメータを自己無撞着に決定して計算するが、パラメータの調整に余分な労力を要する上に、バンドギャップの狭い半導体などの特定の材料については、バンドギャップを正確に予測できない場合がある。我々は結晶構造から自己無撞着計算なしにカットオフパラメータを決定するパラメータフリー DFT-1/2 法を開発し、バンドギャップ、有効質量、イオン化エネルギー、電子親和力といった主要な電子特性を計算することにより、パラメータフリー DFT-1/2 法の性能を検証した。また、炭化ケイ素 (SiC) 中のシリコン点欠陥の電荷遷移状態における欠陥準位を初めて評価した。その結果、パラメータフリー DFT-1/2 法は、HSE に匹敵する精度でスピン密度を再現できること、また、欠陥における電荷遷移準位の予測にも有効であることが示された [3]。

3.1.6 円偏光誘起スピンダイナミクスの理論

円偏光照射下の固体中のスピンのダイナミクスに関連した現象について、理論解析を行った [7]。まず非吸収な媒質における逆ファラデー効果の係数に関して、軌道帯磁率において知られているような分類式とブロッホ軌道による表現式を提案した。本研究では、逆ファラデー効果も軌道帯磁率同様に、原子極限において仮想遷移に伴う van Vleck 的な寄与の存在を明らかにした。また、反強磁性金属系に対して円偏光パルス照射時の磁化の非摂動的ダイナミクスを、時間依存密度汎関数理論を用いてシミュレーションし、100 fs 以下の時間スケールで反強磁性体の副格子磁化が回転的に振動する解が得られること、またその振動周期はパルスの長さや強度に依存することを示した。

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Amano, T. Yamazaki, N. Matsumura, Y. Yoshimoto and 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", *Phys. Rev. B* 111, 165149 (2025).
- [2] S. Lu, R. Akashi, M. Kawamura and S. Tsuneyuki, "Assessing the possible superconductivity in the doped perovskite hydride KMgH_3 : Effects of lattice anharmonicity and spin fluctuations", *Phys. Rev. B* 111, 134516 (2025).
- [3] C. Homma, R. Akashi, Y. Nishiya, S. Tsuneyuki, Y. Matsushita, "Practical rule for trimming the DFT-1/2 self-interaction: Band gap, absolute band alignment, and defect properties of semiconductors", *Phys. Rev. B* 112, 115111 (2025).
- [4] T. Ishikawa, Y. Tanaka, and S. Tsuneyuki, "Evolutionary search for superconducting hydrides in the La-Pt-H ternary system under compression", *Phys. Scr.* 101, 105903 (2026).

(国内雑誌)

- [5] 常行真司, 「シミュレーションと AI が拓く物質・材料研究」, *科学* 96 (3), 232-234, 2026-03 (岩波書店) .

(学位論文)

- [6] Shaocong Lu, "Spin-Fluctuations in Hydride Superconductors from First Principles" (水素化物超伝導体におけるスピン揺らぎの第一原理計算) (東京大学, 2025 年 9 月博士 (理学)).
- [7] 渡邊 峻, 「円偏光誘起スピンダイナミクスの固体電子論」 (Electronic Theory of Spin Dynamics Induced by Circularly Polarized Light in Solids) (東京大学, 2026 年 3 月修士 (理学)).

(著書)

- [8] Tomohito Amano, "First-Principles and Machine Learning Study of Anharmonic Vibration and Dielectric Properties of Materials", Springer Theses, Springer (2025).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [9] T. Ishikawa, Y. Tanaka, and S. Tsuneyuki, "Exploration of Superconducting La-N-B-H Compounds via Evolutionary Algorithms and Machine Learning Potentials", Psi-k 2025 conference, SwissTech Convention Center, EPFL, Lausanne (Switzerland), August 27, 2025.
- [10] Y. Kubo, T. Ishikawa, Y. Nakamoto, and S. Tsuneyuki, "Search for High-Pressure Phases of Yttrium via a Data Assimilation Approach", Psi-k 2025 Conference, SwissTech Convention Center, EPFL, Lausanne, Aug. 27, 2025.
- [11] T. Amano, T. Yamazaki, S. Tsuneyuki, "First-principles study of THz dielectric properties of molecular liquids with a machine learning model for dipole moments", Psi-k 2025 Conference, SwissTech Convention Center, Lausanne, Switzerland, Aug. 27, 2025.
- [12] S. Lu, R. Akashi, M. Kawamura and S. Tsuneyuki, "Spin-Fluctuations in Hydride Superconductors from First Principles", Psi-k 2025 Conference, SwissTech Convention Center, Lausanne, Switzerland, Aug. 28, 2025.
- [13] T. Ishikawa, Y. Tanaka, and S. Tsuneyuki, "Computational search for superconducting phases in the La-N-B-H system", AIRAPT-29 Joint Conference with ACHPR-11 and HPCJ-66, Matsuyama (Japan), September 28–October 3, 2025.
- [14] Y. Kubo, T. Ishikawa, Y. Nakamoto, and S. Tsuneyuki, "Exploration of High-Pressure Phases of Yttrium via a Data Assimilation Approach", 29th International Conference on High Pressure Science and Technology (AIRAPT-29), Ehime Prefectural Convention Hall, Matsuyama, Sep. 29, 2025.
- [15] T. Ishikawa, Y. Tanaka, and S. Tsuneyuki, "Evolutionary Search for Superconducting Phases in the La-N-B-H System under High Pressure", The 26th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN-26), Tsukuba International Congress Center, October 27–29, 2025.
- [16] Yutaro Okamoto, Tomohito Amano, Takahiro Ishikawa, Shinji Tsuneyuki, "Machine Learning Model of Dipole Moments in Liquids Considering Long-Range Interaction", The 26th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN-26), Tsukuba International Congress Center, October 27–29, 2025.

- [17] T. Ishikawa, Y. Tanaka, and S. Tsuneyuki, “Computational Search for Superconducting Phases in the Quaternary La-N-B-H System”, Materials Research Meeting 2025, Yokohama (Japan), December 8–13, 2025.
- [18] S. Lu, R. Akashi, M. Kawamura and S. Tsuneyuki, “Spin-Fluctuations in Hydride Superconductors from First Principles”, The 29th International Conference on High Pressure Science and Technology (AIRAPT-29), Ehime Kenmin Bunka Kaikan, Ehime, Japan, Sep. 30, 2025.
- [19] S. Lu, R. Akashi, M. Kawamura and S. Tsuneyuki, “Spin-Fluctuations in Hydride Superconductors from First Principles”, The 26th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN-26), Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, Oct. 27–29, 2025.
- [20] Y. Kubo, T. Ishikawa, Y. Nakamoto, and S. Tsuneyuki, “Exploration of High-Pressure Phases of Yttrium via a Data Assimilation Approach”, The 26th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN-26), Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Oct. 27, 2025.
- [21] Y. Kubo, T. Ishikawa, Y. Nakamoto, and S. Tsuneyuki, “Exploration of High-Pressure Phases of Yttrium by Data Assimilation”, Materials Research Meeting 2025, PACIFICO Yokohama North, Yokohama, Dec. 10, 2025.
- [22] T. Ishikawa, “Computational Search for Superconducting Phases in Lanthanum Hydride-Based Ternary Compounds”, International Workshop on “Challenges in Designing Room Temperature Superconductors”, Koshiba Hall (The University of Tokyo), July 21–24, 2025.
- [23] 岡本悠太郎、天野智仁、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」、SQAI サマーキャンプ 2025、2025 年 8 月 6 日。
- [24] 石河孝洋、田中悠太、常行真司、「La-N-B-H 系における安定相と超伝導相の進化的探索」、日本物理学会第 80 回年次大会、広島大学（東広島キャンパス）、2025 年 9 月 16 日–19 日。
- [25] 久保祐貴、石河孝洋、中本有紀、常行真司、「データ同化法による高圧下イットリウムの構造探索」、日本物理学会第 80 回年次大会、広島大学（東広島キャンパス）、2025 年 9 月 18 日。
- [26] 石河孝洋、田中悠太、常行真司、「ランタン-窒素-ホウ素-水素系における高圧安定相と超伝導相の探索」、Matlantis User Conference 2025（東京コンファレンスセンター・品川）、2025 年 10 月 8 日。
- [27] 石河孝洋、田中悠太、常行真司、「高圧下ランタン-窒素-ホウ素-水素系における超伝導相の探索」、日本物理学会 2026 年春季大会、オンライン、2026 年 3 月 23 日–26 日。
- [28] 久保祐貴、石河孝洋、関戸幹斗、坂田雅文、佐々木重雄、常行真司、「データ同化法による HCl-H₂ 化合物高圧相の結晶構造決定」、日本物理学会 2026 年春季大会、オンライン、2026 年 3 月 24 日。
- [29] 岡本悠太郎、天野智仁、石河孝洋、常行真司、「混合液体の双極子モーメントの機械学習モデルの開発」、日本物理学会 2026 年春季大会、オンライン、2026 年 3 月 25 日。

招待講演

- [30] 常行真司、「液体アルコールの誘電関数と水素結合」、水素連携研究会、東京都立大学、2025 年 7 月 17 日。
- [31] 常行真司、「データ科学による第一原理計算の拡張～結晶構造探索と液体の誘電率計算を例に～」、名古屋大学第 450 回 物性談話会、名古屋大学、2025 年 10 月 21 日。
- [32] 常行真司、「シミュレーションと計測データをつなぐ材料開発」、日本学術会議 公開シンポジウム「マテリアル融合：物質・エネルギー・情報技術融合による新たな元素戦略」、東京大学、2026 年 1 月 31 日。

招待講演

- [22] T. Ishikawa, “Computational Search for Superconducting Phases in Lanthanum Hydride-Based Ternary Compounds”, International Workshop on “Challenges in Designing Room Temperature Superconductors”, Koshiba Hall (The University of Tokyo), July 21–24, 2025.

(国内会議)

一般講演

- [23] 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」、物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会「機械学習と計算物性科学の未来」（東京大学物性研究所）、2025 年 4 月 3 日–5 日。
- [24] 久保祐貴、石河孝洋、中本有紀、常行真司、「データ同化計算を用いたイットリウム高圧相の構造探索」、物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会、東京大学物性研究所、2025 年 4 月 3 日。
- [25] 岡本悠太郎、天野智仁、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」、物性若手夏の学校、2025 年 7 月 31 日。

3.2 藤堂研究室

物質・情報・計算を貫く複雑な多体系の理解には、多体シュレーディンガー方程式や統計力学の分配関数を、量子相関・対称性・幾何学的構造といった本質を保ちながら、計算可能な形へと再構成することが不可欠である。藤堂研究室では、この課題に対して、テンソルネットワーク、モンテカルロ法、変分原理、機械学習、量子アルゴリズムを有機的に組み合わせ、強相関電子系・格子ゲージ理論・量子スピン系・開放量子系・量子デバイスなど、幅広い対象に共通する状態、相転移、ダイナミクス、情報処理の原理を探究している。2025 年度は、テンソル繰り

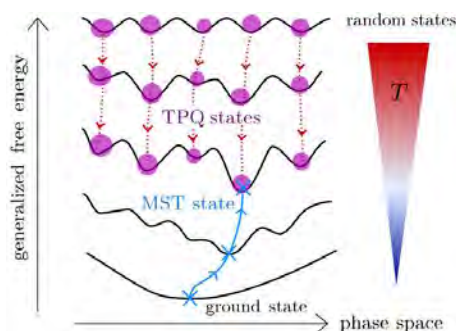


図 3.2.2: 変分原理に基づく非確率的熱的純粋状態の構成。

込み群や不偏サンプリングに基づく新しい計算手法、量子計算・量子誤り訂正・量子トモグラフィに関する基盤技術、さらに物質科学・数理金融・機械学習へと広がる応用を進展させた。加えて、次世代並列計算を見据えたオープンソース・ライブラリの整備も進めている。

3.2.1 強相関多体系・格子場理論

スピン格子結合がもたらす巨視的磁気応答と熱力学

磁性体におけるスピン自由度と格子自由度の協働効果を統一的に理解するため、ボンドフォノン模型とサイトフォノン模型を連続的に接続する拡張スピン格子結合模型を提案した。パイロクロア格子反強磁性体 CdCr_2O_4 の実験結果と比較したところ、磁場誘起相転移の系列に加え、負の熱膨張、増強された磁気熱効果、鋭い比熱ピークといった特徴的応答を整合的に再現できた。複雑な磁気相図を理解するうえで有効な理論的枠組みを与える成果である。

変分原理に基づく非確率的熱的純粋状態の構成

有限温度量子多体系を純粋状態で表す TPQ 状態は有力な方法であるが、乱数に依存するため有限サイズや低温で揺らぎが大きい。本研究では、フォン・ノイマンエントロピーの代わりに局所的に評価可能なマルコフエントロピーを用いた変分原理を導入し、揺らぎのない一意的な MST (Markov-shielded typical) 状態を構成した。一次元横磁場イジング模型では、エネルギーや磁化などの局所量を高精度で再現し、低温から高温まで熱平衡を代表する純粋状態を連続的に与えることを示した。

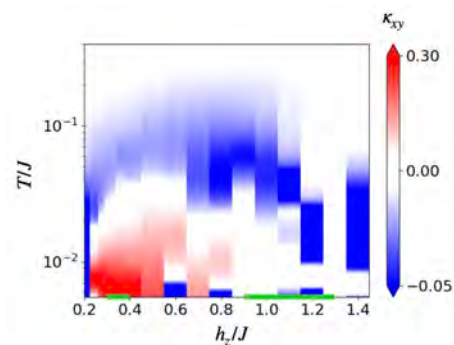


図 3.2.3: カゴメ反強磁性体の熱ホール伝導度。

対称性を保持した Grassmann テンソルネットワークによる格子フェルミオン解析と相関関数解析

格子フェルミオン系の経路積分を、Grassmann 数を明示的に含むテンソルネットワークとして表現し、符号問題の有無にかかわらず無限体積極限で評価する手法を発展させた。今年度は、グローバル対称性を保ったまま対称性ツイスト分配関数を計算する枠組みを構築し、離散対称性だけでなく連続対称性の自発的対称性の破れに対しても臨界点決定を可能にした。O(2) 模型で有効性を実証し、ヘリシティ・モジュラスの計算にも成功した。また、不純物法を用い、任意のゲージ群・任意次元に適用可能な Wilson ループ相関関数の計算法を整備した。具体例として三次元 pure SU(2) ゲージ理論を扱い、実結合定数および純虚結合定数の下でブラケット相関関数を計算した。

改良 TRG による二次元多フレーバー二色格子 QCD の研究

多フレーバー格子 QCD へのテンソル繰り込み群の適用では、初期テンソルの巨大化が大きな障害となる。本研究では、ランダム化 SVD (RSVD) を取り入れた改良 TRG 法をグラスマン・テンソルネットワークへ拡張し、フェルミオン系でも低コストに縮約できる枠組みを検討した。二次元自由 Wilson フェルミオンでベンチマークを行い、RSVD パラメータ依存性も解析した。さらに、1+1 次元二色格子 QCD の有限密度系に対する予備計算を進め、今後の本格応用への道筋を与えた。

テンソルネットワークによるカゴメ反強磁性体の熱ホール伝導解析

Dzyaloshinskii-Moriya (DM) 相互作用をもつスピン 1/2 カゴメ型ハイゼンベルク反強磁性体に対し、指数関数的熱テンソル繰り込み群を用いて熱力学と熱ホール伝導を調べた。弱い DM 相互作用の領域では、

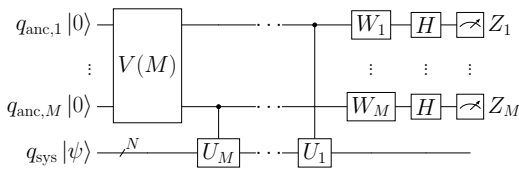


図 3.2.4: アダマールテストの並列化。

1/9 および 1/3 磁化プラトーが低温でも安定に現れ、それぞれが異なる温度依存性を示すことを明らかにした。特に熱ホール伝導度は 1/9 磁化プラトー近傍で顕著な符号反転を示し、その起源が二段階の熱的進化と相関構造の変化にあることを示した。

3.2.2 量子計算・量子情報・量子誤り訂正

アダマールテストの並列化と量子回路評価の高速化

アダマールテストは変分量子アルゴリズム、位相推定、量子カーネル法などで繰り返し用いられるため、回路数の増大が実機利用コストを押し上げる。本研究では、複数のアダマールテストを一つの回路に統合する並列アダマールテスト (PHT) を提案した。任意のユニタリ集合、先頭からの累積積配列、Gram 行列という三つの構造に対して具体的な回路設計を与え、途中測定とリセットが使える場合には補助量子ビットを 2 個まで削減できることを示した。解析と数値検証から、時間的・金銭的コストの低減可能性を明らかにした。

ランダム行列積状態における量子ランダム性の理論解析

量子ランダム性とエンタングルメントの関係を理解するため、ランダム行列積状態 (RMPS) のフレームポテンシャルを理論的に解析した。RMPS は結合次元によりエンタングルメント量を制御できるため、量子ランダム性の構造を調べる格好の舞台となる。本研究では、RMPS のフレームポテンシャルに対する理論的上限を与える手法を構築し、その結果が先行研究の数値結果と整合することを示した。

任意のツリーテンソルネットワークの量子回路埋め込み

NISQ デバイスで有望な変分量子アルゴリズムでは、バレンプラトーの回避に向けた高品質な初期状態の準備が重要となる。本研究では、任意のツリーテンソルネットワークを量子回路へ埋め込む汎用アルゴリズムを提案し、従来法を拡張して多様な TTN 構造を扱えるようにした。これにより、問題に応じ

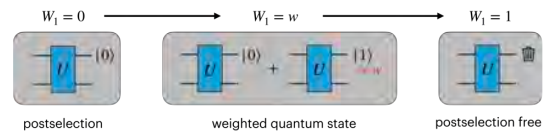


図 3.2.5: 断熱エンコーディングによる MPS の量子回路への埋め込み。

て最適なトポロジーを選ぶ柔軟な初期状態設計が可能となる。数値実験では、提案手法が変分量子アルゴリズムの収束性を改善し、古典的事前学習と量子計算を接続する有効な基盤となることを示した。

非変分量子アルゴリズムによるスピン適合基底状態の効率的準備

量子化学で重要なスピン適合基底状態を量子回路上で効率よく準備するため、従来必要だったペナルティ項を用いずに状態準備を行う二段階手法を提案した。具体的には、まず全スピン量に適合した状態を作り、その後に所望のスピン成分へ射影することで、ゲート数の増大を抑える。スピン 1/2 ハイゼンベルク模型および光化学系 II 複合体の酸素発生中心であるマンガニウム三量体を対象とした数値実験により、有効性を確認した。

断熱エンコーディングによる MPS の量子回路への埋め込み

量子状態が適切なボンド次元の MPS として表現できる場合、その構造を活かして識別器を設計できる。本研究では、MPS で表された量子状態の分類問題に対し、MPS 分類器を構築したうえで、断熱的エンコーディングにより量子回路へ移す qMPS 化の手法を検討した。古典的に最適化したテンソルネットワーク分類器を、表現力を保ったまま量子計算機上で実行可能な形へ移すことを目指している。

臨界例外点をもたらす量子スピンスクイージングの増強

開放量子多体系の非平衡臨界点である臨界例外点 (CEP) が、本質的に量子的な特性にどう現れるかを調べた。散逸性スピン・ボソン系を解析した結果、CEP 近傍では定常状態の量子スピンスクイージングがパラメトリックに増強され、多粒子エンタングルメントが観測可能になることを示した。さらに、スクイージングとアンチスクイージングが秩序変数に対する普遍的スケーリング則に従い、追加のデコヒーレンスに対しても頑健であることを明らかにした。

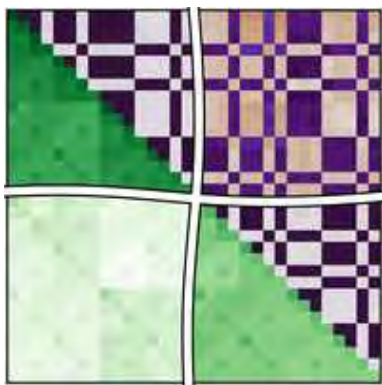


図 3.2.6: テンソルネットワークを用いた大規模量子状態トモグラフィ。

テンソルネットワークを用いた大規模量子状態トモグラフィ

量子状態トモグラフィは量子ビット数の増加とともに指数関数的にコストが増えるが、低エンタングルメント状態であればテンソルネットワーク表現により効率化できる。本研究では、この考え方をマイクロ波領域の伝搬光子列に適用し、35 量子ビット状態のトモグラフィに成功した。再構成された状態は、クラスター状態にノイズが加わった形で記述できることも確認した。

シミュレーテッド・アニーリングによる XZZX 符号デコーダ

XZZX 符号は、パウリエラーの発生確率に偏りがある状況に強い量子誤り訂正符号として注目されている。本研究では、この符号に対してシミュレーテッド・アニーリングに基づく新しいデコーダを提案した。計算機シミュレーションにより、標準的な最小重み完全マッチング法よりも低い論理エラー率を達成できることを示した。これは、MWPM が扱いにくい Y エラーの寄与を、提案デコーダが取り込めるためである。

3.2.3 機械学習・統計物理・データ駆動科学

統計力学的アプローチによる深層ニューラルネットワークの解析

深層学習は多くの応用で成功している一方、その動作原理の理論的理解はなお発展途上にある。本研究では、深層ニューラルネットワークを統計力学の視点から捉え、信号伝搬と吸収状態転移のアナロジーが学習に与える意味を明らかにすることを目指した。今年度は、広いネットワークに対する学習とカーネ

ル法の関係を利用し、モデルの表現能力、訓練データの量と質、タスクの複雑さが相互に汎化性能へどう寄与するかを理論的に解析した。

機械学習による液体系ワニエ中心予測の汎化向上

液体系におけるボンド局在ワニエ中心の位置を周辺環境から予測する既存モデルでは、周辺分子の原子配置を入力に含める必要があるため、組成の異なる系への転用が難しかった。本研究では、分子外部の情報を原子位置ではなく電場などの分子種に依らない物理量で与えることで、混合系や未知組成への汎化性能向上を目指した。周辺電荷が作る電場を入力する方法と、bond-based dipole を再帰的に用いる方法を比較し、前者を中心に精度向上と情報量増加のための改良方針を整理した。とくに電場入力の高精度化と複数観測点の導入により、未知組成や混合系への適用可能性を高める方向性が明確になった。

ニューラルネットワークによる時間発展演算子の繰り込み学習

異なる時間幅に対応する時間発展演算子どうしを結ぶ「繰り込み操作」を、作用素学習の枠組みでニューラルネットワークに学習させる研究を進めた。ある時間幅 dt の演算子から、より大きな時間幅 $2dt$ の演算子へ写す問題として定式化し、同一物理系の複数の時間発展データを用いて学習を行った。円運動および Van der Pol 振動子を対象とした数値実験では、学習に含まれない時間幅やサンプル点に対しても高精度に繰り込み後の演算子を予測できた。

対称性制約の機械的抽出に基づく支配方程式探索

未知の支配方程式を探索する際には、系の対称性から導かれる制約を満たす範囲で候補を絞ることが不可欠である。本研究では、対称性に基づく制約を高次・高階の項まで機械的に抽出するアルゴリズムを拡張し、離散対称性に加えて連続対称性も扱えるようにした。さらに、一定の一般条件の下で理論的正当性を与え、有限角回転不変多項式、Toner-Tu 方程式、KPZ 方程式で予言能力を検証した。KPZ 型方程式では、慣性が支配的な状況に対応し得る新しい候補項も得られた。

3.2.4 テンソルネットワーク・モンテカルロ・数値最適化

テンソルネットワーク縮約順序の最適化

テンソルネットワークの縮約順序の最適化は、ネットワークの重複と計算コストを最小化する二分木探

索として定式化されるが、一般には NP 困難である。本研究では、グラフ理論の観点から縮約問題の複雑さを分析し、扱いやすい物理モデリングや量子回路シミュレーションに資する新しいスペクトラルアルゴリズムの開発に取り組んだ。縮約木の質を支配するグラフ理論的指標に注目することで、既存の最先端手法に匹敵する性能を目指している。テンソルネットワーク計算の基盤を支える研究である。

テンソルネットワークモンテカルロによるユニタリ発展の不偏推定

ユニタリ発展はテンソルネットワーク縮約として表現できるが、厳密評価には指数的コストがかかるため、通常は特異値分解によるランク削減を行う。その際に生じる系統誤差を避けるため、本研究ではテンソルネットワークモンテカルロの考え方を導入し、打ち切り誤差を統計誤差へ変換する不偏推定法を構築した。dual-unitary kicked Ising chain のようにエンタングルメントが強く、従来法が苦手とする系に適用した結果、ランク削減を含みながら厳密値を正しく推定できることを示した。

逐次モンテカルロによるテンソルネットワーク繰り込みの高度化

テンソルネットワーク繰り込み法における低ランク打ち切りのバイアスを除去しつつ、統計効率も高めるため、逐次モンテカルロを組み込んだ新しい枠組みを開発している。射影子の構成自体は既存のテンソルネットワーク MCMC の定式化に従い、そのサンプリング系列全体を繰り込みフローに沿って伝播・重み付け・リサンプリングする点が新しい。これにより、単純な確率サンプリングに比べて重みの分散を抑え、より安定な不偏推定が期待できる。Bond TRG や Anisotropic TRG への適用を進めている。

テンソルネットワーク法のモンテカルロへの自動変換

テンソルネットワークモンテカルロ法 (TNMC) は、射影演算子の乱択により系統誤差を統計誤差へ変換できるが、射影子の挿入位置や場合分けを明示的に管理する必要があり、実装が複雑になりやすい。本研究では、この複雑さを自動処理し、既存のテンソルネットワーク法の操作列そのものを入力として TNMC 化する方法を開発した。これにより、複雑な格子形状や動的に計算経路が変化する状況でも、既存コードを大きく書き換えずにモンテカルロ化できる可能性が開けた。

テンソルトレインによるオプション価格・ギリックスの高速計算

高次元オプション価格計算では、モンテカルロ法は柔軟だが高精度化に多大な計算時間を要し、グリッド法は次元の呪いに直面する。本研究では、価格付け関数の変数とモデルパラメータをテンソルトレインとして圧縮表現し、その上で価格とギリックス (微分係数) を直接評価する手法を構築した。Black-Scholes 型の多資産オプションに対する数値実験では、モンテカルロ法と同程度の精度を保ちながら、特に微分量であるギリックスの計算を大幅に高速化できることを示した。

3.2.5 計算基盤・情報数理

並列計算に向けたアイソメトリックテンソルネットワーク

アイソメトリックテンソルネットワークは等長性により縮約を大幅に簡略化できるが、その利点は通常一つの直交中心の周辺に限られるため、高レベルでの並列化が難しい。本研究では、複数の直交中心をもつ構成と補助テンソルを組み合わせることで、長距離相関を保ちながら並列計算可能なネットワークを模索した。まず複数中心 MPS 上でアイソメトリック TEBD を実装し、OpenMP による高速化を確認した一方、境界での相関切断による精度低下も明らかにした。現在は新ライブラリ基盤の整備を踏まえて再実装を進めている。

Rust によるテンソルネットワーク共通ライブラリの開発

テンソルネットワーク用ライブラリは用途ごとに分断され、内部実装への依存や型の不統一が再利用性を妨げている。本研究では、テンソル表現と演算実装を抽象化した共通基盤ライブラリ Tensory を Rust で設計・実装した。低レベルの軸番号表現と高レベルの ID 表現を分離し、密テンソル・疎テンソル、CPU・GPU、浮動小数点・有限体などを交換可能なジェネリック API を整備した。さらに、桁溢れを避けるテンソル表現や TRG サンプル実装を通じて、拡張性と再利用性の概念実証を行った。

物理ベースレンダリングと非写実表現を統合するスタイル化レンダリング

物理ベースレンダリングは写実性に優れる一方、線画やセルシェーディングのような非写実表現とは理論的整合をとりにくい。本研究では、スタイル化レンダリングを期待値として定式化する統合フレームワークを導入し、従来画像空間で扱われていた処理

をバス空間へ持ち上げた。これにより、スタイル化された輪郭や陰影と、被写界深度や光沢反射といった物理的效果を自然に共存させることが可能になった。

ローカル差分プライバシー下のグラフアルゴリズム

機密性の高いネットワークデータを安全に解析するため、ローカル差分プライバシーの制約下で基本的グラフ問題をどこまで高精度に解けるかを調べた。従来のエッジ反転型匿名化はノイズが大きく、既存アルゴリズムが機能しにくいという問題がある。そこで本研究では、クラスタリングに限らず、独立集合、頂点被覆、三角形数え上げといった基本問題を対象に、定数のプライバシー予算で安定に動作する手法を開発した。

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Kobori, Y. Suzuki, Y. Ueno, T. Tanimoto, S. Todo, Y. Tokunaga, LSQCA: Resource-Efficient Load/Store Architecture for Limited-Scale Fault-Tolerant Quantum Computing, 2025 IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA) (2025).
- [2] K. Harada, T. Okubo, N. Kawashima, Tensor tree learns hidden relational structures in data to construct generative models, Mach. Learn.: Sci. Technol. **6**, 025002 (2025).
- [3] K. Murota, T. Kobori, Trainable Quantum Neural Network for Multiclass Image Classification with the Power of Pre-trained Tree Tensor Networks, 2025 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE) (2025).
- [4] S. Mukherjee, V. Suppakitpaisarn, Local Differential Privacy-Preserving Spectral Clustering for General Graphs, Transactions on Machine Learning Research (2025).
- [5] K. Kinjo, R. Sakurai, T. Kishimoto, J. Ohkubo, Permutation of Tensor-Train Cores for Computing Moments on Stochastic Differential Equations, J. Phys. Soc. Jpn. **94**, 084001 (2025).
- [6] K. Tamai, T. Okubo, T. V. T. Duy, N. Natori, S. Todo, Universal scaling laws of absorbing phase transitions in artificial deep neural networks, Phys. Rev. Research **7**, 033072 (15pp) (2025).
- [7] H. Oike, H. Suwa, Y. Takahashi, F. Kagawa, Thermally quenched metastable phase in the Ising model with competing interactions, Phys. Rev. B **112**, 064409 (2025).
- [8] K. Sakaue, H. Shinaoka, R. Sakurai, Adaptive sampling-based optimization of quantum tensor trains for noisy functions: Applications to quantum simulations, SciPost Phys. **19**, 038 (2025).
- [9] Y. Motoyama, *et al.*, TeNeS-v2: Enhancement for Real-Time and Finite Temperature Simulations of Quantum Many-Body Systems, Comp. Phys. Commun. **315**, 109692 (2025).
- [10] R. Kaneko and S. Goto, Seeding neural network quantum states with tensor network states, Phys. Rev. B **112**, 155163 (2025).
- [11] H. Kanno, S. Akiyama, K. Murakami, S. Takeda, Grassmann tensor renormalization group for the massive Schwinger model with a θ term using staggered fermions, J. High Energ. Phys. **2025**, 36 (2025).
- [12] T. Kobori, S. Todo, Bayesian inference of general noise-model parameters from the syndrome statistics of surface codes, Phys. Rev. A **112**, 052448 (14pp) (2025).
- [13] K. O. Akamatsu, K. Harada, T. Okubo, N. Kawashima, Plastic tensor networks for interpretable generative modeling, Mach. Learn.: Sci. Technol. **7**, 015014 (2026).
- [14] Y. Sunada, *et al.*, Efficient tomography of microwave photonic cluster states, Phys. Rev. X Quantum **7**, 010323 (2026).
- [15] Y. Sugimoto, S. Akiyama, Y. Kuramashi, Phase structure of (3+1)-dimensional dense two-color QCD at $T = 0$ in the strong coupling limit with tensor renormalization group, Phys. Rev. D **113**, 034503 (2026).
- [16] M. Gen, *et al.*, Unified Description of Spin-Lattice Coupling and Thermodynamics in the Pyrochlore Heisenberg Antiferromagnet, Phys. Rev. Lett. **136**, 116702 (2026).
- [17] S. Akiyama, *et al.*, Tensor renormalization group approach to critical phenomena via symmetry-twisted partition functions, Phys. Rev. D **113**, 074502 (2026).

(学位論文)

- [18] Hopai Kwok, Tensor renormalization group study of two-color lattice QCD in two dimensions (博士論文)
- [19] Soichiro Imamura, Parallelization of the Hadamard Tests in Quantum Computation (修士論文)
- [20] Kazuki Inomata, Embedding of General Tree Tensor Networks into Quantum Circuits (修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [21] Synge Todo, “TensorMC: Markov chain Monte Carlo in tensor network representation,” ALPS Workshop, June 2025, San Sebastian.

- [22] Shinichiro Akiyama, “Tensor renormalization group approach for lattice gauge theories,” Recent Developments and Challenges in Tensor Networks: Algorithms, Applications to science, and Rigorous theories, July 2025, Kyoto.
- [23] Synge Todo, “Advanced Tensor Network Algorithms for Quantum Many-Body Problems and Quantum Computation,” SQAI-NCTS Workshop on Quantum Technologies and Machine Learning, August 2025, Taipei.
- [24] Shinichiro Akiyama, “Tensor renormalization group approach to the (1+1)-dimensional U(1) gauge theory with a topological θ term,” Tensor Network States: Algorithms and Applications (TNSAA) 2025, December 2025, Tainan.
- [25] Tsuyoshi Okubo, “Thermal Hall transport in Kitaev and kagome-lattice spin models,” Tensor Network States: Algorithms and Applications (TNSAA) 2025, December 2025, Tainan.
- [26] Tsuyoshi Okubo, “Quantum computing and tensor networks: Applications to quantum many-body problems and machine learning,” Bridging Realities: Quantum Computing Meets Artificial Intelligence, December 2025, Penang.
- [27] Synge Todo, “Tensor Networks in Quantum-Classical Hybrid Computing: From Simulation to Error Correction,” WINGS-QSTEP Colloquium, February 2026, Tokyo.
- [28] Tsuyoshi Okubo, “Applications of Tensor Networks to Finite-Temperature Quantum States and Machine Learning,” Current and Future Computational Approaches to Quantum Many-Body Systems 2026, March 2026, Naha.
- [29] Tsuyoshi Okubo, “Finite-temperature tensor-network methods for quantum spin systems and their application to extended Kitaev model,” APS Global Physics Summit 2026, March 2026, Denver.

(国内会議)

招待講演

- [30] 藤堂眞治, 「テンソルネットワーク形式でのモンテカルロ法」, Tensor Network 2025, 2025 年 7 月, 東京.
- [31] 諏訪秀磨, 「リフティングと確率制御を用いた不可逆モンテカルロ法」, CSP mini-workshop—Non-reversible Monte Carlo and its applications —, 2025 年 8 月, 名古屋.
- [32] 大久保毅, 「Quantum-classical hybrid approach via tensor networks」, 日本物理学会第 80 回年次大会シンポジウム「Computational materials science based on quantum-classical hybrid algorithms」, 2025 年 9 月, 広島.
- [33] 藤堂眞治, 「テンソルくりこみ群とマルコフ連鎖モンテカルロの融合」, 日本物理学会第 80 回年次大会シンポジウム「いよいよ新領域「計算物理」が始まる」, 2025 年 9 月, 広島.
- [34] 大久保毅, 「テンソルネットワーク法を用いた磁性体の研究」, 磁気記録・情報ストレージ研究会 (MRIS), 2025 年 10 月, 豊橋.
- [35] 大久保毅, 「テンソルネットワーク法による量子スピン模型解析ソフトウェアの開発」, 物性研究所ソフトウェア開発・高度化プロジェクト研究会 ～計算物質科学の発展を支えるオープンソースソフトウェアの開発と普及, 2025 年 10 月, 柏.
- [36] 藤堂眞治, 「MateriApps LIVE! / Installer: 物質科学シミュレーションの環境構築」, 物性研究所ソフトウェア開発・高度化プロジェクト研究会 ～計算物質科学の発展を支えるオープンソースソフトウェアの開発と普及, 2025 年 10 月, 柏.
- [37] 秋山進一郎, 「内部自由度に富んだ格子理論に対するテンソルネットワーク法の開発と応用 (hp240012)」, 第 12 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, 2025 年 10 月, 品川.
- [38] 藤堂眞治, 「量子コンピュータと HPC の統合による量子 AI 基盤にむけて」, 量子コンピュータ× AI セミナー in 愛媛, 2025 年 12 月, 松山.
- [39] 藤堂眞治, 「モンテカルロ法をめぐる分離と統合」, 統計物理学の風景: 鈴木増雄先生を偲んで, 2026 年 3 月, 東京.
- [40] 藤堂眞治, 「量子計算とテンソルネットワーク」, 計算科学春の学校, 2026 年 3 月, 那覇.

3.3 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。

3.3.1 強相関系

拡張された SU(3) Hubbard 模型の基底状態における η クラスタリング状態

SU(2) 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、 N 成分フェルミオン系における 3 体以上のクラスタリング状態は冷却原子の文脈で注目を集めている。特に、基底状態においてそのようなクラスタリング状態が実現するかどうかは重要な問題である。

そこで吉田・Heinsdorf (MPI, UBC)・桂は、2 体のホッピングと、オンサイト・最近接の引力相互作用

のある1次元SU(3) Fermi-Hubbard 模型の基底状態を調べた。まず引力相互作用が非常に大きい場合からの摂動論を用いて、基底状態は (i) 朝永-Luttinger 液体相、(ii) 相分離、(iii) 電荷密度波相、の3つの相を示すことを発見した。また、(i) と (ii) の境界で η クラスタリング状態と呼ばれる、系の両端にあるSU(3) シングレットの非対角な相関で特徴づけられる状態が現れることを示した。また、有限の引力相互作用の場合にもこれらの結果が成り立つことを、密度行列繰り込み群法を用いて数値的に確かめた。これらの結果は原著論文 [5] にまとめられた。

トリプロンのトポロジカルな端状態に対する相互作用の効果

磁性体におけるマグノンやトリプロンなどのボソンの準粒子のバンド構造がもつ、非自明なトポロジーに由来するトポロジカルな端状態は近年注目を集めている。一方で、このようなトポロジカルな端状態に起因する熱ホール効果などの現象が理論的に期待される系においても、実験的には観測されないことがしばしばある。これは、トポロジーの議論では無視されている準粒子間の多体相互作用が端状態を抑制・消失させてしまうためだと考えられてきた。

桂は、Max Planck 固体研究所 (ドイツ) の Heinsdorf, Schnyder, Tata 基礎研究所 (インド) の Joshi とスピンラダー系の模型を例に、多体相互作用がトポロジカルなトリプロンの端状態に与える影響を密度行列繰り込み群法を用いて調べた。具体的には、この模型のハミルトニアンは Heisenberg 相互作用、スピン軌道相互作用に由来する異方的なスピン間相互作用、および外場の項からなる。この系の時間発展を計算し、スピン相関関数や動的構造因子を評価した。その結果、単純な準粒子描像が破綻するような強い多体相互作用のあるパラメータ領域でも、トポロジカルな端状態の痕跡が残ることを明らかにした。さらに、この模型のトポロジカル相図を議論し、低エネルギー励起の分数化が起きていることを数値的に実証した。これらの結果は、トリプロン間の多体相互作用が、必ずしもトポロジカルな端状態の寄与をかき消してしまうわけではないことを示唆する。本研究の成果は、原著論文 [7] にまとめられた。

3.3.2 磁性体における輸送現象

強磁性体におけるスカラースピンカイラリティネルンスト効果

近年、磁性体におけるカイラル物性の研究が進み、非共面的スピン構造を特徴づけるスカラースピンカイラリティ (SSC) が、電子・マグノン・フォノンのホール型輸送をはじめとする多様なカイラル輸送の起源となることが明らかになってきた。一方で、既存の研究では SSC 自体の動的な性質はほとんど議論

されておらず、特に SSC 自体がカイラルな輸送現象を示すかどうかは未解明であった。

そこで、江崎は韓国科学技術院 (KAIST) の Go, Goli, Kim およびカリフォルニア大学ロサンゼルス校 (UCLA) の Tserkovnyak とともに、カゴメ格子上の強磁性体・反強磁性体を対象に、マグノンバンドの幾何学的量に基づく定式化と Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式による数値シミュレーションを併用することで、SSC が温度勾配に対して垂直方向に輸送される「スカラースピンカイラリティネルンスト効果」を初めて理論的に提案した。本現象の特筆すべき点は、多くの既知のホール応答で重要となるスピン軌道相互作用 (例えば Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用) を必要としない内在の効果であるため、広範な磁性体での発現が期待される点にある。さらに、実際の物質で一般に存在する Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を取り入れた場合に及ぼす影響についても解析し、強磁性体と反強磁性体で異なる効果を示すことを見出した。

本研究は、SSC の静的な性質にとどまらず、SSC 自体の輸送という動的側面を明らかにするものであり、磁性体におけるカイラル物性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 [3] にまとめられた。

カゴメ格子とハニカム格子上的強磁性体におけるマグノン誘起スカラースピンカイラリティ

近年、磁性体におけるカイラル物性の研究が進み、非共面的スピン構造を特徴づけるスカラースピンカイラリティ (SSC) が、電子・マグノン・フォノンのホール型輸送現象をはじめとする多様なカイラル輸送の起源となることが明らかになってきた。一方で、SSC は主に基底状態が非共面的なスピン配置を持つ系で調べられることが多く、SSC がゼロとなってしまような共線的なスピン配置を基底状態を持つ系におけるその役割は未解明であった。

そこで、江崎は韓国科学技術院 (KAIST) の Go, Kim とともに、カゴメ格子とハニカム格子上的2次元強磁性体を対象に、線形スピン波理論に基づく解析計算と数値計算によって、基底状態が共線的なスピン配置であっても有限温度でのマグノン励起によって SSC が誘起されるという理論機構を提案した。このようなマグノンが誘起する SSC は、Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用により系の実効的な時間反転対称性が破れた結果として生じる。また、実在物質のパラメータに基づく計算から、マグノンが誘起する SSC が、非共面的なスピン配置を持つことで知られる磁性体での SSC と同程度の大きさになり得ることも見出した。

本研究結果は、共線的なスピン配置を基底状態を持つ磁性体においても SSC が重要な物理的意義を持ちうることを示唆しており、磁性体におけるカイラル物性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 [8] にまとめられた。

メイプルリーフ/スター格子におけるトポロジカルトリプルのスピネルンスト効果および熱ホール効果

近年、マグノンやトリプルなどの磁気励起のバンドトポロジーに起因する磁性体の熱輸送現象が、理論・実験の双方で注目を集めている。例えば、強磁性体をはじめとする古典的な磁気秩序を示す磁性体においては、様々な理論モデルを用いたマグノンに起因する熱ホール効果の解析が進められているだけでなく、実験的にもこの効果を示す物質が報告されている。同様に、一重項（シングレット）基底状態を持つ量子ダイマー磁性体においても、トリプル励起による熱ホール効果が複数の理論研究で予測されている。しかし、トリプルの熱ホール効果はいまだ実験的に観測されておらず、この効果を示す候補物質の探索も十分には進んでいない。

そこで、江崎、桂はお茶の水女子大学の赤城、HUNREN Wigner Research Centre for Physics (ハンガリー) の Penc とともに、このギャップを埋めるべく、図 3.3.8 のメイプルリーフ格子およびスター格子上の量子ダイマー磁性体におけるトリプル励起のバンドトポロジーに起因した熱輸送現象を理論的に解析した。これらの系は、磁場下における Heisenberg 相互作用と Dzyaloshinskii-Moriya (DM) 相互作用を含むスピン $1/2$ 模型で記述できる。我々の解析の結果、DM ベクトルの面内成分がゼロの場合、(i) 磁場がゼロのときには、バンドトポロジーが非自明な $\mathbf{Z}_2$ トポロジカル不変量で特徴づけられ、スピネルンスト効果が生じること、(ii) 面外方向に有限磁場を印加した場合には、各バンドが有限の Chern 数を持ち、実験的に検出可能な大きさの熱ホール効果が現れること、が分かった。また、我々は低温領域だけでなく、高温領域においても有効なスピネルンスト伝導度と熱ホール伝導度の解析的な表式を導出した。さらに、DM ベクトルに面内成分が存在する場合には、磁場の変化に応じて異なるバンドトポロジーを持つ複数の相が存在し、それを反映して熱ホール伝導度の温度依存性が磁場によって大きく変化しうることを示した。

本研究結果は、spangolite などに代表されるメイプルリーフ格子やスター格子を有する量子ダイマー磁性体において、トリプル由来のスピネルンスト効果や熱ホール効果が観測される可能性を示唆している。さらに、これらの結果は二層カゴメ格子系にも適用可能であり、今後の候補物質探索の有力な指針となることが期待される。これらの結果は、国際会議等で発表され [19, 30, 35]、論文 [9] にまとめられた。

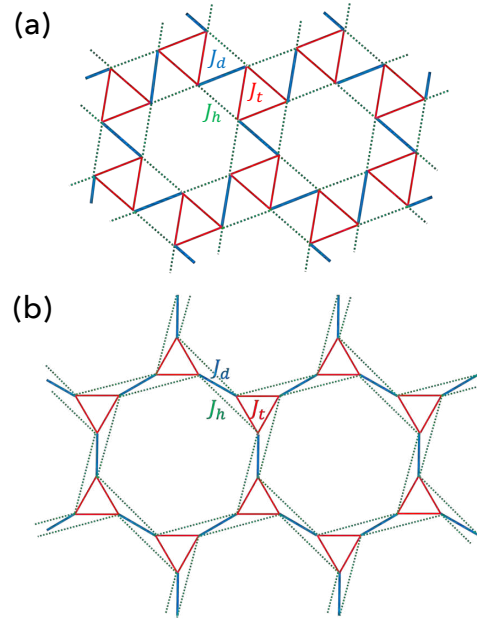


図 3.3.7: (a) メイプルリーフ格子、(b) スター格子。各ダイマー（青線）中心を 1 つのサイトとみなすと、カゴメ格子に帰着する。

3.3.3 散逸のある量子多体系

SU(3) Fermi-Hubbard 模型における三体ロスとダーク状態

光格子中の冷却原子系では、散逸過程を精密に制御・導入することが可能である。このことに刺激されて、粒子ロスのある Hubbard 型の模型の研究が近年盛んに行われている。特に、2 体の原子ロスのある SU(2) Fermi-Hubbard 模型については、ロスによる強磁性の発現や定常状態の性質など、多くの性質が明らかとなっている。一方、SU(3) Hubbard 模型において、3 体のロスが支配的となる場合の定常状態の性質については未解明な点が多かった。

桂は、Paris-Saclay 大学（フランス）の Marché, Nardin, Mazza と、1 次元 SU(3) Hubbard 模型における局所的な 3 体ロスの影響を、GKSL 型のマスター方程式を用いて理論的に解析した。この系では、ハミルトニアンも各サイトでの 3 体のロスも SU(3) 対称をもつ。このような場合、この散逸系は強い SU(3) 対称性をもつと言われる。本研究では、この対称性に着目して定常状態の分類を群論的な手法を用いて議論した。この系では、定常状態の分類はダーク状態（有効非エルミートハミルトニアンの実数固有値の固有状態で、実質的にロスの影響を受けない状態）の分類に帰着する。本研究では、SU(3) の既約表現に基づいてダーク状態を体系的に分類した。その結果、ダーク状態の数え上げや、強磁性状態や一般化 η ペアリング状態として明示的に構成できるダーク状態の存

在を明らかにした。さらに、従来の2体ロス系とは異なり、軌道部分とスピン部分が単純に因子化されない豊かな定常状態の構造が存在することも見出した。さらに、初期状態に依存した残存粒子数の振る舞いについても議論した。これらの成果は、原著論文 [11] にまとめられた。

3.3.4 非エルゴード的な量子多体系

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 (fragmentation) 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・fragmentation・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、原著論文 [2] にまとめられた。

漸近的量子多体傷跡状態の系統的な構成

量子多体傷跡状態 (Quantum Many-Body Scars; QMBS) とは、非可積分系における非熱的なエネルギー固有状態である。このような状態は、「全てのエネルギー固有状態が熱的状态である」という仮説(固有状態熱化仮説)の反例になっており、近年、理論的にも実験的にも盛んに研究されている。最近では、QMBSの拡張である漸近的量子多体傷跡状態(AQMBS)も注目を集めている。AQMBs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、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の構成は、従来は発見的な手法に依拠しており、系統的な構成方法は確立されていなかった。

桂は、國見(東京理科大)、加藤(東大総合文化)と、制限スペクトル生成代数(RSGA)の枠組みに基づき、広いクラスのQMBSを有する模型に対して、AQMBsを系統的に構成する手法を開発した。この手法で要となるのは、QMBSを基底状態としてもつ「親ハミルトニアン」の導入である。この親ハミルトニアンのギャップレス励起状態として、AQMBsは得られる。この手法をスピン1 XY 模型や Fermi-Hubbard 型の模型、Onsager scar 模型等のQMBSの存在が知られている系に適用し、従来個別に報告されていたAQMBsが本手法により統一的に記述可能であることを明らかにした。一方で、PXP 模型や AKLT 模型といった模型には、本手法が適用できないことも示している。

本定式化により、AQMBsという孤立量子系の高エネルギーの比熱的な状態と、フラストレーションフリー系やギャップレス励起などの量子多体系の低エネルギー物理における基本概念が密接に関係することが明らかになった。これらの成果は、国際会議 [17] で発表され、論文 [10] にまとめられた。

3.3.5 可解模型

G_2 対称性をもつ AKLT 模型の構成

Affleck-Kennedy-Lieb-Tasaki (AKLT) 模型は、元々は1次元のHaldaneギャップ系の理解のために導入された可解模型であったが、現在では行列積状態と呼ばれるクラスの量子状態のひな形として、また対称性に保護されたトポロジカル相の典型例として、重要な役割を果たしている。AKLT 模型には、 $SU(n)$ や $SO(N)$ など様々な古典 Lie 群の対称性をもつ拡張が知られているが、例外型 Lie 群の対称性をもつ AKLT 模型はこれまで知られていなかった。

桂と Schuricht(オランダ・Utrecht 大)は、ランク2の例外型 Lie 群 G_2 の対称性をもつ AKLT 模型を構成した。この G_2 AKLT 模型の各サイトは G_2 の随伴表現として変換する。この模型の基底状態は、元々の $SU(2)$ 対称な $S=1$ AKLT 模型と同様に valence-bond-solid (VBS) 状態の形に書くことができる。ただしここでの valence bond は、 G_2 の7次元の基本表現2つの合成から得られる1次元表現が対応する。このVBS状態は、Lie代数 g_2 の元を用いて、行列積状態として厳密に表現することが可能である。この結果を用いて、桂らはVBS状態におけるスピン・スピン相関関数を計算した。その結果、熱力学極限での相関関数は再隣接サイト間でのみ有限となり、2サイト以上離れたサイト間ではゼロになることを示した。これは $SU(2)$ AKLT 模型では見られなかった、 G_2 AKLT 模型に特有の性質である。またストリン

グ秩序と呼ばれる非局所的な秩序が VBS 状態に存在することも明らかにした。

これらの結果は、論文 [6] にまとめられ、2024 年に逝去された Ian Affleck 氏を追悼する SciPost Physics の In Memoriam: Ian Affleck Collection に収録された。

乱れない Sachdev-Ye-Kitaev 模型の厳密解: 臨界 Ising 鎖の可積分性からの導出

Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) 模型は、ランダムな全結合 p 体相互作用をもつ Majorana フェルミオン系であり、量子多体カオスの典型例として知られている。ラージ N 極限で解析的に扱えるという特徴から、ブラックホール物理や非フェルミ液体との関連で広く研究されてきた。近年、SYK 模型の本質的な性質を保ちながら、より扱いやすい様な結合の場合 (clean SYK 模型) への関心が高まっており、先行研究では様な 4 体相互作用をもつ clean SYK 模型および 3 体の超電荷をもつ超対称版が厳密に解けることが示されていた。しかし、これらは個別の事例に留まっており、その可積分性を統一的に理解する枠組みは確立されていなかった。

そこで、深井と桂は、様な p 体相互作用をもつ clean SYK 模型の族の可積分性を確立した。具体的には、スペクトルパラメータに依存する転送行列を構成し、これが臨界横磁場 Ising 鎖の R 行列から構成されるものと一致することを示した。この転送行列の可換性から、すべての clean SYK ハミルトニアンが互いに可換であり、超電荷同士も互いに可換であることが従う。さらに、転送行列の対数微分からは臨界 Ising ハミルトニアンおよびその局所保存量が得られ、clean SYK 模型と臨界 Ising 鎖が同一の可積分構造に属することが明らかになった。この構造を用いて、様な p 体相互作用をもつ SYK ハミルトニアンの厳密なエネルギースペクトルと固有状態を明示的に求めることに成功した。

本研究結果は、量子多体カオスの典型例である SYK 模型と統計力学の基礎的模型である臨界 Ising 鎖の意外なつながりを明らかにし、Yang-Baxter 可解性の観点から clean SYK 模型の可解性を統一的に説明したものである。得られた成果は、国際会議 [27, 20] や国内の学会 [32] で発表されたほか、原著論文 [12] にまとめられた。

隠れた自由フェルミオンの構造をもつ量子回路の構成

量子多体系の厳密解は、Bethe 仮説を用いる手法と Jordan-Wigner 変換により自由フェルミオン系にマップする手法に大別されると従来は考えられていた。しかし 2019 年に Fendley によって、Jordan-Wigner 変換では解けないが隠れた自由フェルミオン構造をもつ新しい可解模型、Free Fermions in Disguise (FFD) が発見され、さらに Chapman らによって FFD を含む広いクラスの模型についての一般論がグラフ理論

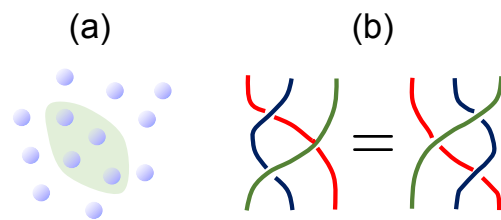


図 3.3.8: (a) $p = 4$ clean SYK 模型、(b) Yang-Baxter 方程式の模式図。

を用いて構築された。このように近年、新しいクラスの可解模型の理解が急速に進展している。

FFD では系のサイズに比例する数のパラメータを任意に選択でき、対応する転送行列は 3 サイトの局所ゲートの行列積として表現される。この転送行列は、各局所ゲートのパラメータを任意に設定しても隠れた自由フェルミオン構造が保たれる階段型の量子回路とみなすことができる。しかし、階段型以外にどのような局所ゲート配置がこの構造を保つかは未解明であった。

そこで、深井は Pozsgay (ハンガリー・Eötvös Loránd 大) とともに、FFD の局所ゲートで構成される量子回路において、隠れた自由フェルミオン構造を保つ量子ゲートの配置の仕方について調べた。その結果、Fendley の階段型量子回路以外にも、この構造を保つ新たな量子回路を複数発見した。また、系のサイズに依存しない有限深さのブリックワーク型回路についての予想を得た。さらに、先行研究で提案された、一般化された FFD の転送行列の因子化に成功し、対応する量子回路を構築した。

本研究は、ハミルトニアンから転送行列を構成する従来の手法とは異なり、直接、隠れた自由フェルミオン構造を持つ量子回路を探索する新たなアプローチを提唱したものである。これらの結果は、原著論文 [4] にまとめられた。

<受賞>

- [1] 吉田博信, 第 20 回日本物理学会若手奨励賞「SU(N) ハバード模型の基底状態と開放量子多体系の定常状態における厳密な結果」, 日本物理学会, 2026 年 3 月 24 日.

<報文>

(原著論文)

- [2] Hosho Katsura, Chihiro Matsui, Chiara Paletta, and Balázs Pozsgay: Weak ergodicity breaking with isolated integrable sectors, Phys. Rev. Research **7**, 023099 (2025).
- [3] Gyungchoon Go, Durga Prasad Goli, Nanse Esaki, Yaroslav Tserkovnyak, and Se Kwon Kim: Scalar spin chirality Nernst effect, Phys. Rev. Research **7**, L022066 (2025).

- [4] Kohei Fukai and Balazs Pozsgay: Quantum circuits with free fermions in disguise, *J. Phys. A: Math. Theor.* **58**, 175202 (2025).
- [5] Hironobu Yoshida, Niclas Heinsdorf, and Hosho Katsura: Edge-edge correlations without edge-states: η -clustering state as the ground state of the extended attractive SU(3) Hubbard chain, *Phys. Rev. A* **111**, 063307 (2025).
- [6] Hosho Katsura and Dirk Schuricht: A brief note on the G₂ Affleck-Kennedy-Lieb-Tasaki chain, *SciPost Phys. Core* **8**, 052 (2025).
- [7] Niclas Heinsdorf, Darshan G. Joshi, Hosho Katsura, and Andreas P. Schnyder: Fate of bosonic topological edge modes in the presence of many-body interactions, *Phys. Rev. Lett.* **135**, 146702 (2025) [Selected as Editors' Suggestion].
- [8] Nanse Esaki, Gyungchoon Go, and Se Kwon Kim: Magnon-induced scalar spin chirality in kagome and honeycomb ferromagnets, *Phys. Rev. B* **112**, 104440 (2025) [Selected as Editors' Suggestion].
- [9] Nanse Esaki, Yutaka Akagi, Karlo Penc, and Hosho Katsura: Spin Nernst and thermal Hall effects of topological triplons in quantum dimer magnets on the maple-leaf and star lattices, *Phys. Rev. B* **112**, 134435 (2025).
- [10] Masaya Kunimi, Yusuke Kato, and Hosho Katsura: Systematic construction of asymptotic quantum many-body scar states and their relation to supersymmetric quantum mechanics, *Phys. Rev. Research* **7**, 043107 (2025).
- [11] Alice Marché, Alberto Nardin, Hosho Katsura, and Leonardo Mazza: SU(3) Fermi-Hubbard gas with three-body losses: Symmetries and dark states, *Phys. Rev. Research* **7**, 043124 (2025).
- [12] Kohei Fukai and Hosho Katsura: Integrability of a family of clean SYK models from the critical Ising chain, *Phys. Rev. B* **113**, 115107 (2026).
- (国内雑誌)
- [13] 桂 法称: 量子物理学と行列, 数理科学, 2025 年 11 月号, No. 749.
- (学位論文)
- [14] 岩崎哲也: Analysis of nonlinear Drude weights in the one-dimensional Hubbard model (修士論文).
- [15] 関欣也: Disorder-free Quantum Breakdown Model: Exact Solution and Dynamics (修士論文).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [16] Kohei Fukai: Structure of Local Conservation Laws in Quantum Integrable Systems, *Student Workshop on Integrability*, ELTE Budapest, Hungary, June 2025.
- [17] Masaya Kunimi (Takafumi Tomita, Hosho Katsura, Yusuke Kato): Asymptotic quantum many-body scars in spin models with Dzyaloshinskii-Moriya interaction realized in Rydberg atom arrays, *DAMOP 2025*, Portland, USA, June 2025.
- [18] Kohei Fukai: Quantum circuits with free fermions in disguise, *Extreme Universe Collaboration & The 7th Extreme Universe School*, Aichi, Japan, July 2025.
- [19] Nanse Esaki (Yutaka Akagi, Karlo Penc, Hosho Katsura): Spin Nernst and thermal Hall effects of topological triplons in quantum dimer magnets on the maple-leaf and star lattices, *The International Workshop on Exotic Quantum Phases due to Unhappy Electrons*, Tokyo, Japan, Nov. 2025.
- [20] Kohei Fukai (Hosho Katsura): Integrability in the SYK model, *The 5th ExU Annual Meeting of the Extreme Universe Collaboration*, Matsuyama, Japan, Dec. 2025.
- [21] Tetsuya Iwasaki (Hosho Katsura): Analysis of the nonlinear Drude weights in the one-dimensional Hubbard model, *APS Global Physics Summit*, Denver, USA, Mar. 2026.
- [22] Kinuya Guan (Hosho Katsura): Disorder-free Quantum Breakdown Model: exact solution and dynamics, *APS Global Physics Summit*, Denver, USA, Mar. 2026.
- [23] Nanse Esaki (Kouki Nakata, Jelena Klinovaja, Daniel Loss): Magnonic Shapiro step and chaotic behavior in magnonic Josephson junction, *APS Global Physics Summit*, Denver, USA, March 2026.
- [24] Jung Hoon Han (Hosho Katsura): Theory of stochastic processes with multipole conservation, *APS Global Physics Summit*, Denver, USA, Mar. 2026.
- 招待講演
- [25] Hosho Katsura: Quantum many-body scars related to vector and scalar chiralities, *NQCM2025*, UTokyo, Japan, May 2025.
- [26] Hosho Katsura: Disorder-free SYK-like models, *Quantum Information Dynamics and Non-Equilibrium Physics*, KIAS, Korea, June 2025.
- [27] Hosho Katsura: Integrable SYK-like models, *Challenges in Integrability*, Wuhan, China, November 2025.
- (国内会議)
- 一般講演
- [28] 北浜駿太, Alberto Nardin, Leonardo Mazza, 桂法称: 分数量子ホール系のエッジに現れる量子 KdV 方程式の量子ソリトン状態, 日本物理学会第 80 回年次大会, 2025 年 9 月, 広島大学.
- [29] 江崎蘭世, 仲田光樹: 非エルミート効果誘起のマグノン Shapiro ステップとそのカオスの挙動, 日本物理学会第 80 回年次大会, 2025 年 9 月, 広島大学.

- [30] 江崎蘭世: Maple-leaf/star 格子上的量子ダイマー磁性体におけるトポジカルトリプルのスピネルンストおよび熱ホール効果, 第 21 回量子スピン系研究会, 2025 年 12 月, 下関市.
- [31] 深井康平, 吉田博信, 桂法称: 隠れた自由フェルミオン構造を有する散逸量子スピン系の厳密解, 日本物理学会 2026 年春季大会, 2026 年 3 月, オンライン
- [32] 深井康平, 桂法称: 乱れのない Sachdev-Ye-Kitaev 模型の厳密解: 臨界 Ising 鎖の可積分性からの導出, 日本物理学会 2026 年春季大会, 2026 年 3 月, オンライン

招待講演

- [33] 吉田博信: 時間依存 Lindblad 方程式における定常状態の分類と対称性, 統計物理学懇談会, 2026 年 3 月, オンライン.
- [34] 吉田博信: 孤立・開放量子多体系に対する厳密なアプローチ, 日本物理学会 2026 年春季大会, 2026 年 3 月, オンライン.

(セミナー)

- [35] Nanse Esaki: Spin Nernst and thermal Hall effects of topological triplons in quantum dimer magnets on the maple-leaf and star lattices, 2025 年 4 月, KAIST.
- [36] 吉田博信: Uniqueness of steady states of Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad equations: A simple proof, 早稲田中里・安倍研セミナー, 2025 年 11 月, 早稲田大学.

3.4 樺島研究室

2025 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、D1: 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、2025 年度に得られた主な研究成果の概要を記す。

3.4.1 Franz-Parisi ポテンシャルを用いた Random Orthogonal モデルの解析

ランダム一次相転移 (RFOT) を示すスピングラス系の相転移は complexity と呼ばれる量 (準安定状態のエントロピー) に支配され、その量は Franz-Parisi ポテンシャル (FPP) に関連している。これは参照配置とのオーバーラップを固定した条件付き自由エネルギーと解釈されるが、 p 体相互作用 spherical モデルなどで従来から研究されてきた。

回転対称な相互作用を持つモデルで固有値分布を 2 つの δ 関数ピークにした Ising スピンモデル (Random Orthogonal Model, ROM) もまた RFOT を示すことが知られている。しかし、 p -spherical モデルとは異なり、ROM は相互作用間に相関があるため解析が難しく、これまで FPP の解析は行われていなかった。

本研究では、期待値伝搬法の理論解析に着想を得た方法を用いて ROM の FPP を参照系とのオーバーラップの関数として解析した。その結果、

- 中間的なオーバーラップの値では、低温で RS 構造が破れる
- より低温では FPP に不連続性が現れるということを示した。

3.4.2 非単調素子を用いた連想記憶モデルの動的平均場解析

動的平均場法は対象となる系がエネルギーや損失関数を持たない場合でも、その巨視的なダイナミクスを解析できる。本研究では、この利点を活かし、非単調素子で構成された連想記憶モデルを解析した。

各成分を確率 $1/2$ で独立に $+1$ または -1 で与えた p 組のランダムパターン $\vec{\xi}^\mu \in \{+1, -1\}^N$ ($\mu = 1, \dots, p$) に基づき、ヘップ学習

$$J_{ij} = N^{-1} \sum_{\mu=1}^p \xi_i^\mu \xi_j^\mu (1 - \delta_{ij})$$

により結合を定めた連想記憶モデルを想定する。Morita (1993) はこのモデルの記憶容量 ($\alpha =$ 「想起可能なパターン数/ニューロン数」に関する限界値) が、想起ダイナミクスに非単調素子を用いることにより、標準的な連想記憶モデルの記憶容量 $\alpha_c \simeq 0.138$ から大幅に向上することを報告している。しかしながら、このダイナミクスはエネルギー関数を持たないため、レプリカ法など従来用いられてきた平衡統計力学の方法では詳細に解析することができない。これに対し我々は、動的平均場法を用いることにより、記憶容量および記憶状態への引込領域を高精度で評価することに成功した。

3.4.3 反学習の効果を取り入れた Hopfield モデルの理論解析

Hopfield モデルは 1982 年に John Hopfield によって提唱されたもので、脳の連想記憶機能を模倣する簡潔な神経回路モデルとして広く知られている。個々のニューロンは二値のスピンの対応し、Hebb 則に基づいて構築された対称な結合行列により、複数のパターンを安定なエネルギー極小状態として記憶する。統計力学の手法によって解析可能であり、スピングラスとの類似性を持つことから、物理学の視点からも盛んに研究されてきた。

一方、Hopfield モデルにはスプリアス記憶と呼ばれる実際の記憶パターンと異なる安定状態が出現することや、記憶容量が比較的小さな値に留まることなどの課題がある。こうした問題に対して、「unlearning (反学習)」と呼ばれる補助的な学習プロセスが提案されている。この手法では、学習済みの結合と反対方向に補正を加えることで、不要なスプリアス記憶を排除し、純粋な記憶パターンの安定性を高めることが目指される。この unlearning の手法の一つとして Nokura (1996) によって提案された J' モデルがあるが、この J' モデルは数値的には有効性が確認されていたものの、その理論的理解、特に統計力学的な解析はほとんど進んでいなかった。

本研究では、この J' モデルに対してレプリカ法を用いた理論解析を行い、unlearning の効果を定量的に評価した。主な結果としては、unlearning のパラメータを適切に選べば記憶容量が増加し、最大で $\alpha_c \simeq 0.42$ になることを確認し、さらに記憶パターンが安定状態である領域が広がった。さらに α を固定してパラメータの変化に対して、想起パターンとの重なりが相転移的な挙動を示すことを明らかにした。

3.4.4 Ising スピン型 modern Hopfield model の解析

Hopfield モデルは、連想記憶のモデルであり古くから研究されてきた。近年、記憶パターンとの重なりに関する指数関数の和でエネルギー関数を定める Hopfield モデルが、トランスフォーマーの attention 機構との関連から注目を集めている。本研究では、2 値の Ising スピンモデルと、連続値の球面 (spherical) モデルに対して、モダン Hopfield モデルの引き込み領域を求めた。

モダン Hopfield モデルでは、 p 個の記憶パターン $\{\vec{\xi}^\mu\}_{\mu=0}^p$ ($\vec{\xi}^\mu \in \{+1, -1\}^N$) に基づき、状態ベクトル $\vec{S} \in \{+1, -1\}^N$ に関するエネルギー関数を

$$E(\vec{S}) = \sum_{\mu=0}^p \exp(\beta \vec{\xi}^\mu \cdot \vec{S})$$

と定義する。また記憶を想起する際の状態更新則は、

$$S_i^{t+1} = \text{sgn} \left(\sum_{\mu=0}^p \xi_i^\mu \exp(\beta \vec{\xi}^\mu \cdot \vec{S}^t) \right)$$

となる。このように、指数関数の重み付けにより類似度の高いパターンへの寄与が強調される。 β は逆温度パラメータで、重み分布の鋭さを表しモデルの柔軟性を決定する (β が大きいほど類似度の高いパターンに強く収束する)。

本研究では、指数重みの分散を計算し、想起パターン ($\mu = 0$) とノイズパターン ($\mu \geq 1$) を比較することで、 β および初期オーバーラップ m^0 ごとの想起限界として引き込み領域を求めた。

3.4.5 離散拡散モデルの動的特性解析

拡散モデルは画像や動画、音声などの高次元のデータに対して非常に高い生成精度を誇る、近年注目される機械学習の生成モデルである。拡散モデルその高い汎化性能によって注目を集めているが、その起源は明らかではない。また、言語やアミノ酸配列などの離散データに対する拡散モデルである離散拡散モデルはその生成精度に依然課題が残る。

これら問題へのアプローチの一つとして、学習後の逆拡散過程 (すなわちデータ生成過程) において、データ系列のダイナミクスに三つの特徴的な相があることを明らかにした研究がある。本研究では、この三つの相が、離散データを生成する離散拡散モデルにおいても現れるかどうか、そしてそれらの相境界はどうなっているかを解析した。

本研究ではまず、データ分布が明示的に既知である単純な「2 値離散拡散」モデルを提案した。次に、前述の先行研究で導入された三つの相の相境界の基準を用いて、本モデルにおける各相境界を同定することに成功した。最後に、D3PM と呼ばれる離散拡散モデルを用いて、二値化 MNIST データでの学習とサンプリングを行い、理論予測が実験的にもおおむね成り立つことを確認した。

3.4.6 離散拡散モデルによる 2 次元格子タンパク質モデルのデザイン

タンパク質デザインとは、生物工学的に有用な機能を持つような与えられた構造に対して、それにフォールドするようなアミノ酸の配列を推定する問題である。タンパク質デザイン問題へは近年、機械学習によるアプローチが盛んである。それらには大まかにグラフニューラルネットワークによるものと、画像生成などで注目を浴びる生成モデルである拡散モデルの離散データ版である離散拡散モデルによるものがある。

我々はグラフ生成拡散モデルという離散拡散モデルの特定のグラフによる条件付き生成によって、2 次元格子タンパク質を疎水性と親水性の 2 種類のアミノ酸のみのモデルでデザインを試みた。この粗視化モデルは比較的小さいモノマー数ならば構造ごとにデザイン問題の正解配列を全て列挙できるため、これら正解配列のうち一部のみ学習したときに、離散拡散モデルの汎化能力によって訓練データには含まれない他の正解配列も生成できるかを議論した。

3.4.7 文脈内学習におけるタスク難易度の役割

現在の大規模言語モデルは、実世界の広範囲なタスクに対して高い性能を示すことが知られている。その背景として、大規模言語モデルは、さまざまなタスクに対してパラメータを変更せずに対応ができる

という文脈内学習 (In-Context Learning, ICL) と呼ばれる能力を獲得できることが知られている。このような未知のタスクに対して学習をせずに汎化することは、従来の教師あり学習の枠組みからは大きく外れており、理論的な機構の解明が急務である。さらに、この文脈内学習において、事前学習で提示されるタスクの難易度は ICL 能力の発現に重要な影響を与えると考えられるが、その詳細は未だ不明な点も多い。

本研究では、線形回帰を線形アテンションで学習するモデルを解析することにより、タスクの難易度が ICL 能力に与える影響を調査した。その結果、適当な仮定のもとアテンション機構による学習が従来の教師-生徒モデルに対応づけられることを明らかにし、統計力学におけるレプリカ法を用いることで典型時の性能評価が可能であることを示した。また、特定の条件で、予測結果がプロンプトによる文脈内学習に起因する項と事前学習に起因するノイズ項に分離できることを示し、事前学習により最適な線形回帰に近づくように振る舞う機構を説明した。さらに、事前学習によるタスク難易度に関して、新規のタスクに対する性能を落とさないための、事前学習で学習すべき最適なタスク難易度の存在を明らかにした。

3.4.8 スプリアス相関および社会的バイアスの学習に与える効果

機械学習で用いるデータセットには、予測対象となるラベル以外に、ラベルと直接の因果関係を持たない属性情報が付随することが多い。このような属性情報は、しばしば特徴量に対して影響を与えるため (スプリアス特徴)、学習の機構を一層複雑にする。実際に、モデルは学習過程でスプリアス特徴の影響を受けやすいことが知られており、その結果、環境変化への脆弱性や群間格差の拡大を招いてしまうという問題が存在する。しかしながら、学習によってどの条件で属性依存の手掛かりを獲得し、いつそれが公平性指標の悪化として現れるのかは、十分に整理されていない。

これらの問題に対する理解を得るため、本研究では、スプリアス特徴と社会的バイアスが共存するデータ生成過程を可解な数理モデルとして定式化した。また、オンライン確率的勾配降下法 (SGD) による学習ダイナミクスの精密な解析を行った。

解析の結果、訓練データのスプリアス特徴の真のラベル信号に対する強度が公平性に与える影響は単調ではないことが明らかになった。具体的には、スプリアス特徴を強くしていくと公平性が一旦低下した後回復する挙動を理論的に明らかにした。さらに、実データを元にした合成データセットによる数値実験でも同様の傾向が確認された。これらの結果は、属性依存を制御する介入設計に向けた理論的指針を与えることが期待される。

3.4.9 ランダム結合ダイナミクスにおける固定点数の評価：グラスマン代数を用いたアプローチ

ランダムな結合を持つ多体相互作用ダイナミクス系は、連想記憶モデル、リカレントニューラルネットワーク、スピングラスに起源をもつ系として広く研究されている。これらの系では固定点の構造がダイナミクスの幾何学的・統計的構造を反映している。特にランダム系では指数個の固定点が存在しうることが知られており、その結果、初期条件に依存して到達する固定点が異なる可能性がある。このように、多数の固定点が共存する状況では、固定点数の評価はダイナミクスの複雑さや予測可能性の限界を定量化する指標となる。固定点数の評価手法としては Kac-Rice 公式が知られている。Kac-Rice 公式自体は、リアプノフ関数の存在を仮定せずに、ダイナミクスの固定点数を定式化できる一般的な枠組みである。しかし、これまでの多くの研究では、

- 系にリアプノフ関数が存在すること
- ヤコビアン行列式の絶対値を計算上の簡略化として外すこと

が、Kac-Rice 公式を用いた解析の文脈において暗黙の前提として採用されてきた。これらの仮定は解析を簡単にする一方で、非勾配系ではその前提自体が成り立たず、同様の議論を直接適用することはできない。

本研究では、リアプノフ関数が存在しない場合も含めて、ダイナミクスの定義から直接に固定点数を評価する枠組みの構築を試みた。固定点数を Kac-Rice 公式により定式化し、行列式の絶対値を外した計算を出発点として、この近似の妥当性を検証した。一般に、ダイナミクスから固定点を数え上げる際、ヤコビアン行列式の符号構造は自明ではなく、行列式の絶対値を外す操作の妥当性は保証されない。その結果、本研究で解析した系においては行列式の符号が固定点数評価に本質的な役割を果たしており、絶対値を外す近似は固定点の構造に関する本質的な情報を失うことが示された。

3.4.10 交互最適化法に基づく双線形回帰の理論的解析

双線形回帰とは、特徴量と回帰係数に低ランクの行列構造が存在する場合の回帰問題で、低ランク行列推定問題の雛形の一つである。この問題のパラメータ推定に用いられる損失関数は非凸であるが、パラメータの部分集合に対する最適化は凸問題となるため、具体的な最適化手法としては部分集合に対する凸最適化を繰り返す交互最適化法が頻繁に用いられる。

いっぽう、交互最適化法は大域最適解を求められる保証がなく、実際に情報理論的に最適なデータ量のスケールで真のパラメータの情報を抽出が

来る保証はない。先行研究ではパラメータ数 P に対して $\mathcal{O}(P \log P)$ のサイズのデータがあれば有意な情報抽出が出来ることが示されていたが、これが $\mathcal{O}(P)$ のデータサイズで可能かが論点であった。

そこで、我々は動的密度汎関数法にレプリカ法を組み合わせることで、交互最適化法の求解ダイナミクスに対する動的平均場理論を導出した。その結果、データサイズが $\mathcal{O}(P)$ の領域に、真のパラメータの完全な推定の可否を分ける閾値が存在することを強く示唆する結果が得られた。

3.4.11 パラメトリックモデルの推論における可解性を仮定しない統計力学の解析

統計的推論や学習の問題は不規則系の統計力学の主要なトピックの1つである。しかしながら、これまでの統計力学的な解析のほとんどは極端に単純化したデータ生成分布における推論の問題を考え、それに対する厳密解を導出するアプローチによるものがほとんどである。これらはしばしば非自明な知見を与えてくれるものの、一般的なデータに対する定量的な予言を与えるような普遍的な公式を導出したり、データ生成分布が未知である実データ解析で生じる現象を予言したりするには無力であった。

そこで、この研究ではレプリカ法の解析に大正準集団の考えと変分法を組み合わせた枠組みにより、パラメトリックモデルの推論の一般的な性質を考察した。これにより、渡辺赤池情報量規準 (WAIC) や事後分布共分散情報量規準 (PCIC) などが自然に考察の対象として現れることを統計力学の立場から明らかにした。また、竹内情報量規準の非漸近的領域への拡張を導出し、実データでの学習曲線を定量的に記述することにも成功した。

3.4.12 相関のあるスピングラスのレプリカ解析

スピングラスモデルとは、磁性体のモデルにおいて結合定数を確率変数としたものである。通常の平均場モデルでは、それぞれの結合定数は統計的に独立であるとする場合が多いが、最近、西森らはここに強い相関を入れた補助模型を考察することで、通常のスピングラスモデルの相図に対して強い制限を与えられることを示した。

いっぽう、これらの結果はゲージ理論に依っており、このような補助模型をレプリカ法を用いて解析した場合、どのような解構造が得られるのかは不明であった。そこで本研究では西森によって提案された補助模型をレプリカ法を用いて考察しなおした。これにより、ゲージ理論と整合的な解以外にも複数の解候補が存在することが示唆された。

<受賞>

- [1] T. Takahashi, Outstanding Reviewer Award (Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical), IOP, 2026

<報文>

(原著論文)

- [2] T. Takahashi, G. Chikenji, K. Tokita, Y. Kabashima, “Alpha helices are more evolutionarily robust to environmental perturbations than beta sheets: Bayesian learning and statistical mechanics for protein evolution”, *Phys. Rev. Res.* **7**, 023115 (2025)
- [3] Y. Hara and Y. Kabashima, “Quantum effects in rotationally invariant spin glass models”, *Phys. Rev. E* **112**, 054102 (2025)
- [4] Y. Kabashima and K. Mimura, “Dynamical mean field approach to associative memory model with non-monotonic transfer functions”, *J. Stat. Mech.* **2026**, 014002 (2026)
- [5] K. Okajima, T. Takahashi, “Asymptotic dynamics of alternating minimization for bilinear regression” *J. Stat. Mech.* **2025**, 053301 (2025)
- [6] T. Takahashi, “Variational Gaussian Approximation in Replica Analysis of Parametric Models” *J. Phys. Soc. Japan*, **94**, 124801 (2025)

(会議抄録)

- [7] K. Mimura, J. Takeuchi, Y. Sumikawa, Y. Kabashima, ACC Coolen, “Dynamical properties of dense associative memory” to appear in *Proc. ICLR2026*; arXiv:2506.00851
- [8] K. Takanami, T. Takahashi, Y. Kabashima, “Learning Linear Regression with Low-Rank Tasks in-Context” to appear in *Proc. AISTATS2026*; arXiv:2510.04548
- [9] K. Takanami, T. Takahashi, A. Sakata, “The effect of optimal self-distillation in noisy gaussian mixture model” *NeurIPS 2025*

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [10] Y. Kabashima, “Dynamical mean field approach to associative memory models with non-monotonic neurons”, *STATPHYS29*, Florence, Italy, July 13-18, 2025
- [11] Y. Kabashima, “Dynamical mean field approach to associative memory models with non-monotonic neurons”, *WYSS Machine Learning for Science 2025*, Wenzhou, China, October 25-26, 2025
- [12] T. Takahashi “Variational Replica Analysis of Learning” *Noto-Workshop on Machine Learning and Physics 2025*, Dec 9, 2025 - Dec 11, 2025

(国内会議)

一般講演

- [13] 原佳範, 樺島祥介, “Random Orthogonal Model の Franz-Parisi ポテンシャル解析”, 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 17 日
- [14] 竹内朱太, 高橋昂, 樺島祥介, “反学習の効果を取り入れた Hopfield モデルの理論解析”, 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 17 日
- [15] 高橋智栄, 高橋昂, 樺島祥介, “離散拡散モデルの動的特性解析”, 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 17 日
- [16] 住川勇斗, 樺島祥介, “Ising スピンの modern Hopfield model の解析”, 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 17 日
- [17] 高波海斗, 高橋昂, 樺島祥介, “文脈内学習におけるタスク難易度の役割”, 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 18 日
- [18] 樺島祥介, 三村和史, “非単調素子を用いた連想記憶モデルの動的平均場解析”, 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 18 日
- [19] 高波海斗, 高橋昂, 樺島祥介, 坂田綾香, “スプリアス相関および社会的バイアスの学習に与える効果”, 日本物理学会 2026 年春季大会, オンライン, 2026 年 3 月 24 日
- [20] 高橋智栄, 樺島祥介, “離散拡散モデルによる 2 次元格子タンパク質模型のデザイン”, 日本物理学会 2026 年春季大会, オンライン, 2026 年 3 月 26 日
- [21] 竹内朱太, 高橋昂, 樺島祥介 “ランダム結合ダイナミクスにおける固定点数の評価: グラスマン代数を用いたアプローチ”, 日本物理学会 2026 年春季大会, オンライン, 2026 年 3 月 26 日
- [22] 高橋昂, “線形回帰のレプリカ解析再訪”, 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 17 日
- [23] 藤森寧々, 西川宜彦, 高橋昂, 坂田綾香, “相互作用に相関をもつスピングラスの平均場理論”, 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 17 日
- [24] 高橋昂, “アンサンブル学習における近似交差検証法”, 日本物理学会 2026 年春季大会, オンライン, 2026 年 3 月 26 日

招待講演

- [25] 高橋昂, “統計的推論と学習のレプリカ解析”, Physics Meets AI, 京都大学, 2026 年 2 月 20 日
(セミナー)
- [26] 高橋昂, “高次元における統計的学習に対する統計物理学的アプローチ”, 情報処理学会北海道支部 講演会, 北海道大学, 2026 年 2 月 9 日
- [27] 高橋昂, “双線型回帰における交互最適化法の巨視的解析”, 情報・統計・物理・計算 ワークショップ, 駒場キャンパスファカルティハウス, 2026 年 2 月 12 日
- [28] 高橋昂, “多段階の最適化に基づく学習の統計力学的解析”, 国語研数理セミナー, 国立国語研, 2026 年 3 月 16 日
- [29] 高橋昂, “高次元における摂動・集約型統計手法の理論と計算” 産業数理統計セミナー, 九州大学, 2026 年 3 月 30 日

3.5 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。

2025 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、永島来悟氏、中本大河氏、修士課程の松浦修大氏、間宮千博氏、山本溪登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、テンソルトレイン法、量子多体系における励起子、輸送現象などの研究テーマに取り組んだ。

3.5.1 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、秩序パラメーターの振幅 (超流動密度) が集団的に振動するヒッグスモードが存在する。ヒッグスモードは電氣的・磁氣的に中性であるため光と線形には結合せず、近年まで観測は困難であったが、非線形応答を通じて光と直接相互作用することが可能である。この非線形結合により、照射光の周波数の 2 倍が超伝導ギャップに一致する条件で共鳴が起こり、巨大な三次高調波が発生する。実際にテラヘルツ分光実験によりこの共鳴が観測され、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、ヒッグスモードを含む超伝導体の集団励起の最近の発展について招待講演 [21, 26, 48] および研究会等 [53] で発表を行い、関連して昨年の物性若手夏の学校の講義ノートを出版した [16]。

多層系の超伝導体においては、層内で超伝導秩序が発達し、層間では超伝導秩序が Josephson 結合によって相互作用している。辻、高三は Niklas Ziereis 氏 (ミュンヘン大学) と共同でこのような層状の超伝導体の表面に光を照射した時の超伝導体のダイナミクスを、Anderson 擬スピンの方法を用いて解析した。その結果、表面のみを光で励起しているにも関わらず、バルクの内部の超伝導秩序も集団振動を起こすことがわかった。特に、光電場が面内に分極していても面間に振幅や位相の集団励起モードが伝搬していく。集団励起モードを介して面間の Josephson 電流や面内の三次高調波が発生する。これらの結果について原著論文にまとめた [7]。

超伝導体のリフシツ不変量

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、超伝導体にリフシット不変量とよばれるものが存在するときにレゲットモードが光に対して線形に応答することを見出した。また、リフシット不変量がどのような場合に現れるかを群論の議論をもとに全ての結晶点群に対して分類した。辻はこの結果を含めてリフシット不変量を持つ超伝導体の最近の研究について研究会等で発表した [28, 49]。

加えて、辻は永島来悟氏 (カールスルーエ工科大学)、Titouan Moulleron 氏 (ENS-PSL 大) と共同で、リフシット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、リフシット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、レゲットモードに加えてヒッグスモードが光に対し線形に応答する場合があることを見出した。これらの結果を原著論文にまとめて発表した [10]。

電流に誘起された非従来型超伝導体の集団励起モード

超伝導体の集団励起モードは秩序の揺らぎを反映する動的指標であり、非従来型超伝導体においてもヒッグスモードやレゲットモード、Bardasis-Schrieffer (BS) モードなどが知られている。これらは主として非線形光学応答に現れると考えられてきたが、s 波超伝導体に対しては超伝導電流を注入することで集団励起モードが線形応答でも観測可能となることが指摘されていた。辻、高三は、Gerrit Niederhoff 氏 (スイス連邦工科大学)、片岡龍盛氏 (東京大学) と共同で電流を注入した非従来型超伝導体において各種集団励起モードが光学伝導度スペクトルに現れることを示した。具体的には、s 波と d 波が混在する系および Rashba 型スピン軌道相互作用を持つ p 波超伝導体を解析し、BS モードや混成 BS モード、Leggett モードが光学活性化すること、さらにカイラルな $p + ip$ 波では縦成分に加えて横伝導度にも BS モードの共鳴が現れることを明らかにした。これらの結果を原著論文にまとめ [11]、学会で発表した [59]。

周期的に駆動された超伝導体における非平衡相転移

光などの周期的電磁場によって駆動された超伝導体は長年研究されており、例えばマイクロ波照射により非平衡分布が形成され有効温度が低下することで超伝導が増強される (Eliashberg 効果) ことが知られている。Zhang、高三、辻はフロッケ多体理論を用いてこの系の定常状態を解析し、光の周波数が超伝導ギャップの半分より小さい場合には Eliashberg 型の分布が実現する一方、電場強度の増大によりフロッケサイドバンドを介したギャップ間トンネリングによって分布が不安定化し、多重ヒステリシスを伴う不連続な非平衡相転移が生じることを示した。さらに、フロッケサイドバンドによるスペクトル変化により、有効温度の低下を伴わずに超伝導が増強される場合

があることも明らかにした。これらの結果を原著論文 [13] にまとめ、研究会等で発表した [22, 32, 54]。

3.5.2 量子開放系のダイナミクス

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事が期待される。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。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。高三は、これらの結果に関して研究会等で発表を行った [27, 23, 24, 50, 51, 75]。

量子電磁場と超強結合したモット絶縁体

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。このような系のうち、量子電磁場と強相関電子系が結合した系については未解明な部分がいまだ多い。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ペクトルを、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。これらの結果を原著論文にまとめ [12]、研究会で発表した [33, 42, 40, 36, 64, 56, 74, 72, 73]。中本はこれらの研究が評価され、国際会議のポスター賞 [1]、物性科学領域横断研究会若手奨励賞 [5] を受賞した。

3.5.3 量子多体傷跡状態

量子多体傷跡 (スカー) 状態は熱平衡化する多体系において例外的に熱平衡状態とマクロに区別される固有状態であり、比較的小さなエンタングルメントを持つことや初期状態の情報を長時間保持するなど基底状態の性質を引き継ぐことが知られている。辻は松井千尋氏 (東大数理)、Thomas Quella 氏 (メルボルン大学) と共同で、スカー部分空間がその空間に

制限された代数により動的に他の空間から隔離されることに着目し、AKLT 模型を例として、スカー部分空間がトポロジカル応答や長距離ストリング秩序といった対称性に保護されたトポロジカル (SPT) 相の性質を持つことを示した。これらの結果について研究会等で発表した [61, 68]。

3.5.4 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。これらの結果をまとめた記事を国内雑誌に寄稿した [17]。

量子光駆動多体ダイナミクス

量子技術の発展に伴い、量子性を強く発現する高強度の光が発生できるようになった。今井は、このような高強度量子光を物質に照射することで、物質の量子状態を生成・制御する理論を構築した。具体的にはシュレディンガーの猫状態として表される光を、独立二準位系集団に照射した多体ダイナミクスを解析した。弱結合領域に注目すると、光と物質間に成長するエンタングルメントの効果により、光の情報捨ててしまうと物質系には古典混合状態しか残らない。しかし光の状態に適切な測定を施し、その測定値でヘラルドすることによって二準位系集団にラビ振動の猫状態を誘起できることを示した。また今井は、小野淳氏と辻と共同で、猫状態駆動によるダイナミクスを記述する有効理論において、新しいタイプの non-Hermitian 結合が現れることも明らかとなっている。これらの結果を原著論文にまとめ [14]、国際会議招待講演 [25] や国内外の学会において広く発表を行った [30, 35, 55, 47, 63, 76]。

トポロジカル絶縁体表面における励起子凝縮の兆候

高三は、トポロジカル絶縁体 Bi_2Te_3 の表面状態に対する時間分解角度分解光電子分光の実験研究において理論パートを担当した。この実験では、表面状態のスペクトルに過渡的にギャップが出現することを見出し、これが励起子凝縮の兆候と考えられることを明らかにした。これは、トポロジカル物性と励起子物性をつなぐ成果である。高三は、有効モデルを構築しスペクトルの計算を行った。本研究につい

て原著論文にまとめた [8]。また、高三は光電場・電流を利用した動的物性制御の理論的開拓が評価され日本物理学会若手奨励賞 [4] を受賞したほか、集中講義 [77] や関連する講演を行った [45, 46, 52]。

3.5.5 テンソルトレイン法

動的平均場理論は、量子多体系の格子模型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。不純物問題を解くために連続時間量子モンテカルロ法が広く用いられているが、負符号問題が生じるという問題がある。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では負符号問題が避けられない場合にも適用できるという利点を持つ。このソルバーを動的平均場理論に応用し、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。これらの成果は原著論文 [9] にまとめ、研究会等で発表 [31, 34, 37, 41, 43, 44, 65, 66, 58, 70] を行った。松浦はこれらの結果を合わせて修士論文 [20] としてまとめた。松浦はこれらの研究が評価され、国際会議のポスター賞 [2]、物性若手夏の学校優秀発表賞 [3]、理学系研究科奨励賞 [6] を受賞した。

3.5.6 量子多体系における励起子

Mott-Hubbard 励起子の光電子分光スペクトル

Mott-Hubbard 励起子は、Mott 絶縁体において電子が二重占有したサイト (ダブルオン) と、空のサイト (ホロン) が束縛してできる励起子である。この励起子は、Mott 絶縁体の光学応答や非平衡ダイナミクスに重要な役割を果たすと考えられているが、光電子分光スペクトルにどのような特徴をもたらすかは十分に理解されていない。そこで中本、辻は村上雄太氏 (東北大) と共に、一次元拡張ハバード模型に対して Mott-Hubbard 励起子の光電子分光スペクトルを解析した。励起子が存在しない場合は波数 $|k| < \pi/2$ の範囲にスペクトルが現れるが、励起子が存在する場合は占有バンドのレプリカ構造がスペクトルのギャップ内に出現することがわかった。また、これらの起源がスピノンとホロンのダイナミクスによって説明できることを明らかにした。これらの結果について研究会等で発表した [67]。

多体励起子と磁気秩序

NiPS_3 は、ジグザグ型の磁気秩序をもつファンデルワールス二次元物質であり、磁気秩序と絡み合った多体励起子が存在すると考えられている。先行研究では、X 線共鳴散乱実験によって多体励起子の性質が明らかにされてきたが、光学吸収スペクトルに

見られるピークの起源についてはよくわかっていなかった。そこで、松浦、今井、辻は、ジグザグ型の磁気秩序に由来して対称性が破れうることに着目し、多体励起子が光学的に励起可能になるシナリオを提案した。また、平均場近似と厳密対角化を組み合わせた数値計算により、実際に光学遷移が許されることを確かめた。この結果については研究会において発表した [57, 69]。また、辻は植田涼太氏、金子竜也氏 (大阪大学)、村上雄太氏 (東北大学)、高吉慎太郎氏 (甲南大学)、江島聡氏 (ドイツ航空宇宙センター) と共同で 1 次元 d-p 模型における励起スペクトルの理論的研究を行い研究会で発表した [62]。

3.5.7 量子多体系における輸送現象

フラットバンド系におけるホール応答

ホール効果は物質中の電荷キャリアの密度や質量、電荷の符号などの重要な情報を反映する輸送現象である。フラットバンド系においては、半古典的に考えるとキャリアの運動が抑制されるためホール伝導度は消失すると考えられてきた。量子効果を考慮しても、チャーン数がゼロとなるようなトポロジカルに自明な孤立フラットバンド系は非自明なホール効果を示さないと考えられていた。辻は永島来悟氏 (カールスルーエ工科大学)、小形正男氏 (東京大学) と共同で、トポロジカルに自明な孤立フラットバンド系におけるホール効果の研究を行った。格子模型に対する弱磁場領域でのホール伝導度のゲージ不変な公式を導出し、それを用いて孤立フラットバンド系においてホール応答が有限となり得ることを示した。その物理的起源が非可換量子幾何テンソルの効果にあることを明らかにした。この結果について原著論文にまとめて発表した [15]。

超伝導非線形ホール効果

近年、ホール効果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、超伝導体へと対象を広げ、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。この現象は非線形ホール伝導度が dc 極限で発散することが特徴である。このことにより、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。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、本研究に関して研究会等で発表を行った [29, 60, 71]。

半金属および電子格子系における輸送現象

高橋は、運動量保存散乱が支配的な半金属における輸送現象を理論的に研究した。まず、電子間散乱を含む磁場下輸送を Boltzmann 方程式に基づいて解

析し、縦・横輸送における Wiedemann–Franz 則の破れと運動量保存との関係を明らかにした。さらに、電子・フォノン相互作用を含む電子格子系に対して久保公式と Green 関数法に基づく微視的理論を構築し、フォノンドラッグとフォノン媒介電子間散乱を統一的に扱うことで、フォノン散逸が電気伝導度や Seebeck 係数に与える影響を解明した。また、電子格子相互作用に起因する熱流の項についても新たな理論的枠組みを提示した。これらの結果を博士論文にまとめ [18]、研究会で発表した [38]。

空間または時間反転の破れた系における角運動量輸送

開田は、空間反転、または時間反転対称性が破れた結晶における角運動量輸送の理論的研究を行った。特に、キラル結晶と交替磁性体に着目し、前者については多極子解析と強束縛模型に基づき電流誘起スピン磁化の発現においてキラルスピン軌道相互作用に加えキラリティに依存しないホッピング項が重要な役割を果たすことを明らかにした。後者については交替磁性体 MnTe を対象に磁気スピン Hall 効果の定量評価と対称性解析を行い、磁気構造とスピン輸送特性の対応関係を解明するとともに第一原理計算により大きなスピン Hall 角を見出し、輸送特性から磁気秩序を同定する手法を提案した。これらの結果を博士論文にまとめ [19]、研究会で発表した [39]。

<受賞>

- [1] Taiga Nakamoto, Best Poster Award, ISSP-IIS Joint Symposium on Physics of Open Systems: Resonance, Symmetry and Topology, August 2025.
- [2] Shuta Matsuura, Best Poster Award, ISSP-IIS Joint Symposium on Physics of Open Systems: Resonance, Symmetry and Topology, August 2025.
- [3] 松浦修大, 分科会 優秀発表賞, 第 70 回物性若手夏の学校, 2025 年 8 月.
- [4] 高三和晃, 日本物理学会若手奨励賞 (領域 5), 2025 年 11 月.
- [5] 中本大河, 若手奨励賞, 第 19 回物性科学領域横断研究会, 2025 年 11 月.
- [6] 松浦修大, 理学系研究科研究奨励賞, 理学系研究科, 2026 年 3 月.

<報文>

(原著論文)

- [7] N. Ziereis, K. Takasan, N. Tsuji, “Light-driven interlayer propagation of collective-mode excitations in layered superconductors”, *Phys. Rev. B* **111**, 134520 (2025).
- [8] R. Mori, K. Takasan, P. Ai, S. Ciocys, K. Kawaguchi, T. Kondo, T. Morimoto, A. Lanzara, “Possible evidence of excitonic condensation in a topological insulator”, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **122**, e2422667122.

- [9] S. Matsuura, H. Shinaoka, P. Werner, N. Tsuji, “Tensor cross interpolation approach for quantum impurity problems based on the weak-coupling expansion”, *Phys. Rev. B* **111**, 155150 (2025).
- [10] R. Nagashima, T. Moulleron, N. Tsuji, “Optically active Higgs and Leggett modes in multiband pair-density-wave superconductors with Lifshitz invariant”, *Phys. Rev. B* **112**, 024503 (2025).
- [11] G. Niederhoff, R. Kataoka, K. Takasan, N. Tsuji, “Current-Enabled Optical Conductivity of Collective Modes in Unconventional Superconductors”, *Phys. Rev. B* **112**, 144507 (2025).
- [12] T. Nakamoto, K. Takasan, N. Tsuji, “One-dimensional extended Hubbard model coupled with an optical cavity”, *Phys. Rev. B* **112**, 155150 (2025).
- [13] H. Zhang, K. Takasan, N. Tsuji, “Nonequilibrium hysteretic phase transitions in periodically light-driven superconductors”, *Phys. Rev. B* **112**, L220503 (2025).
- [14] S. Imai, “Macroscopic Schrödinger-cat states of nonequilibrium electrons induced by cat-state optical driving and projective measurements on the light field”, *Phys. Rev. A* **113**, 023702 (2026).
- [15] R. Nagashima, M. Ogata, N. Tsuji, “Hall effect in topologically trivial isolated flat-band systems”, *Phys. Rev. Research* **8**, L012041 (2026).
- (国内雑誌)
- [16] 辻直人, 「非平衡超伝導の物理」, 物性若手夏の学校講義ノート, Vol. 3, pp. 72-149 (2025).
- [17] 今井渉平, 小野淳, 「固体におけるアト秒科学—電子波束ダイナミクスの制御によるアト秒パルス発生—」, 固体物理, 第 60 巻, 第 9 号, 2025 年.
- (学位論文)
- [18] 高橋慶伍, “Transport theory in semimetals and electron-phonon systems”, 博士論文, 2026 年 3 月.
- [19] 開田亮佑, 「空間反転、または時間反転の破れた系における角運動量輸送」, 博士論文, 2026 年 3 月.
- [20] 松浦修大, “Dynamical mean-field theory with the tensor-train method and the analysis of the strongly correlated electron systems”, 修士論文, 2026 年 3 月.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [21] N. Tsuji, “Light-induced collective Higgs and Leggett modes in superconductors”, Conference on Laser and Synchrotron Radiation Combination Experiment (LSC2025), Yokohama, April 2025.
- [22] K. Takasan, “Floquet Physics in Superconductors”, Focus Program on the Mesoscopic Physics: Present Challenges and Future Opportunities, Pohang, South Korea, August 2025.
- [23] K. Takasan, “Activity-induced quantum phase transitions: A proposal for quantum active matter”, East Asia Joint Seminars on Statistical Physics 2025, Seoul, South Korea, October 2025.
- [24] K. Takasan, “Quantum Active Matter: Advancing the Frontiers of Nonequilibrium Phases of Matter”, 2nd International Workshop on Quantum Information Engineering, Okinawa, October 2025.
- [25] S. Imai, “Many-electron dynamics driven by Schrödinger cat states of light”, Trends in the Theory of Quantum Materials 2025, Saitama, October 2025.
- [26] N. Tsuji, “Anomalous linear and nonlinear terahertz response of superconductors”, 2nd International Symposium on Ab-Initio Electron Dynamics Simulation (AIEDS2), Nara, March 2026.
- [27] K. Takasan, “Quantum Active Matter: Concepts, Models, and Perspectives”, 2nd Japan-Germany Workshop, Hokkaido, March 2026.
- 一般講演
- [28] N. Tsuji, “Anomalous optical response and collective modes in superconductors with Lifshitz invariant”, International Conference on Low-Energy Electrodynamics in Solids (LEES 2025), Busan, Korea, June 2025.
- [29] K. Takasan, N. Tsuji, “Superconducting nonlinear Hall effect induced by geometric phases”, 同上.
- [30] S. Imai, “Electron dynamics driven by quantum cat-state light”, Strong-field Physics Encounters Quantum Electro Dynamics, Dresden, Germany, August 2025.
- [31] S. Matsuura, H. Shinaoka, P. Werner, N. Tsuji, “Tensor cross interpolation approach for quantum impurity problems based on the weak-coupling expansion”, International Workshop on Tensor Cross Interpolation and Other Algorithms for Learning Tensor Networks, Grenoble, France, October 2025.
- [32] H. Zhang, K. Wang, K. Levin, N. Tsuji, “Dynamics of Preformed Pairs and Nonequilibrium Optical Conductivity in a Driven Attractive Hubbard Model”, APS Global Physics Summit, Denver, USA, March 2026.
- [33] T. Nakamoto, K. Takasan, N. Tsuji, “One-dimensional extended Hubbard model coupled with an optical cavity”, 同上.
- [34] S. Matsuura, H. Shinaoka, P. Werner, N. Tsuji, “Tensor cross interpolation approach for quantum impurity problems based on the weak-coupling expansion”, 同上.

ポスター発表

- [35] S. Imai, A. Ono, N. Tsuji, “Electron dynamics induced by Schrödinger cat-state light”, CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials, Hanzomon, Tokyo, May 2025.
- [36] T. Nakamoto, K. Takasan, N. Tsuji, “Virtual photons and vacuum Rabi splitting in the extended Hubbard model coupled with an optical cavity”, 同上.
- [37] S. Matsuura, H. Shinaoka, P. Werner, N. Tsuji, “Tensor cross interpolation approach for quantum impurity problems based on the weak-coupling expansion”, 同上.
- [38] K. Takahashi, H. Matsuura, H. Maebashi, M. Ogata, “Transport theory of an electronphonon system: Crossover from phonon drag to phonon-mediated electron hydrodynamics”, 30th International Conference on Low Temperature Physics (LT30), Bilbao, Spain, August 2025.
- [39] R. Hirakida, K. Tenzin, C. C. Ye, B. Kilic, J. Slawinska, “Magnetic Spin Hall Effect in Altermagnetic MnTe”, 同上.
- [40] T. Nakamoto, “Virtual photons and vacuum Rabi splitting in the extended Hubbard model coupled with an optical cavity”, ISSP-IIS Joint Symposium on Physics of Open Systems: Resonance, Symmetry and Topology, ISSP, Kashiwa, August 2025.
- [41] S. Matsuura, H. Shinaoka, P. Werner, N. Tsuji, “Tensor cross interpolation approach for quantum impurity problems based on the weak-coupling expansion”, 同上.
- [42] T. Nakamoto, K. Takasan, N. Tsuji, “Virtual photons and vacuum Rabi splitting in the extended Hubbard model coupled with an optical cavity”, Quantum Transport Frontiers of Mesoscopic Physics, ISSP, Kashiwa, October 2025.
- [43] S. Matsuura, H. Shinaoka, P. Werner, N. Tsuji, “Tensor cross interpolation approach for quantum impurity problems based on the weak-coupling expansion”, Trends in the Theory of Quantum Materials 2025, Saitama, October 2025.
- [44] S. Matsuura, H. Shinaoka, P. Werner, N. Tsuji, “Tensor cross interpolation approach for quantum impurity problems based on the weak-coupling expansion”, Current and Future Computational Approaches to Quantum Many-Body Systems 2026, Okinawa, March 2026.
- (国内会議)
- 招待講演
- [45] 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」, さきがけ「量子協奏」×「未来材料」コラボ研究会, 大阪, 2025 年 6 月.
- [46] 高三 和晃, 「固体電子系における非平衡量子多体現象の最近の進展」, 日本磁気学会, 東京, 2025 年 7 月.
- [47] 今井渉平, 「量子光誘起相転移へ向けて」, 非平衡固体物性の最前線 2025, 東北大学, 2025 年 11 月.
- [48] 辻直人, 「線形・非線形テラヘルツ分光で見る超伝導体の集団励起モード」, 新規超伝導体を舞台とする超伝導科学のフロンティア, 京都大学, 2025 年 12 月.
- [49] 辻直人, “Anomalous optical and transport response of superconductors with Lifshitz invariant”, 学術変革領域研究「相関設計で挑む量子創発」領域会議, 理化学研究所, 2025 年 12 月.
- [50] 高三 和晃, 「量子アクティブマター」, 第十回「凝縮系理論の最前線」, 静岡, 2026 年 2 月.
- [51] 高三 和晃, 「非平衡物質相とアクティブ量子物質」, 量子物質研究会, 石川, 2026 年 3 月.
- [52] 高三 和晃, 「光電場・電流を利用した動的物性制御の理論的開拓」, 日本物理学会春季大会, オンライン, 2026 年 3 月.
- 一般講演
- [53] 和達大樹, 辻直人, 佐藤正寛, 石坂香子, 島野亮, 「非平衡・非線形が導く創発物性」, 学術変革領域研究「相関設計で挑む量子創発」キックオフミーティング, 東京大学, 2025 年 5 月.
- [54] N. Tsuji, “Many-body Floquet states”, Minisymposium on magnetic semiconductors and nonequilibrium dynamics 2025, 沖縄科学技術大学院大学, 2025 年 7 月.
- [55] S. Imai, “Macroscopic entanglement generation via the combination of quantum light and measurement”, 同上.
- [56] T. Nakamoto, K. Takasan, N. Tsuji, “One-dimensional extended Hubbard model coupled with an optical cavity”, 同上.
- [57] S. Matsuura, S. Imai, N. Tsuji, “Analysis of NiPS₃ through density functional theory and Hubbard I approximation”, 同上.
- [58] 松浦修大, 品岡寛, P. Werner, 辻直人, 「テンソルトレイン分解による量子多体系の非平衡ダイナミクス解析」, 第 70 回物性若手夏の学校, 滋賀, 2025 年 8 月.
- [59] G. Niederhoff, 片岡龍盛, 高三和晃, 辻直人, 「非従来型超伝導体における電流に誘起された光学活性な集団励起モード」, 日本物理学会年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月.
- [60] 高三 和晃, 辻直人, 「幾何学的位相が誘起する超伝導非線形ホール電流」, 同上.
- [61] 松井千尋, T. Quella, 辻直人, 「量子多体傷跡状態を通じて現れる SPT 的部分空間」, 同上.
- [62] 植田涼太, 金子竜也, 村上雄太, 高吉慎太郎, 辻直人, 江島聡, 「1 次元 d-p 模型における励起スペクトルの理論的研究」, 同上.
- [63] 今井渉平, 「量子光照射と射影測定による巨視的エンタングルメント生成」, 同上.
- [64] 中本大河, 高三和晃, 辻直人, 「光共振器と結合した一次元拡張ハバード模型の理論的研究」, 同上.

- [65] 松浦修大, 品岡寛, P. 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」, 同上.
- [66] 松浦修大, 品岡寛, P. Werner, 辻直人, 「テンソルトレイン分解を用いた強相関電子系の解析」, 非平衡固体物性の最前線 2025, 東北大学, 2025 年 11 月.
- [67] 中本大河, 高三和晃, 辻直人, “Mott 絶縁体における励起子の ARPES に関する理論的研究”, 日本物理学会春季大会, オンライン, 2026 年 3 月.

ポスター発表

- [68] N. Tsuji, “Quantum many-body scars with unconventional superconducting pairings”, JST 創発「創発の場」, 東京, 2025 年 7 月.
- [69] S. Matsuura, S. Imai, N. Tsuji, “Analysis of NiPS_3 through density functional theory and Hubbard I approximation”, Mini-symposium on magnetic semiconductors and nonequilibrium dynamics 2025, 沖縄科学技術大学院大学, 2025 年 7 月.
- [70] 松浦修大, 品岡寛, P. 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」, 第 70 回物性若手夏の学校, 滋賀, 2025 年 8 月.
- [71] 高三和晃, 「幾何学的位相が誘起する超伝導非線形ホール効果」, 非平衡固体物性の最前線 2025, 東北大学, 2025 年 11 月.
- [72] 中本大河, 高三和晃, 辻直人, “光共振器と結合した一次元拡張ハバード模型の理論的研究”, 第 19 回物性科学領域横断研究会, 東京大学物性研究所, 2025 年 11 月.
- [73] 中本大河, 高三和晃, 辻直人, “光共振器と結合した一次元拡張ハバード模型の理論的研究”, ダイキン-ipi シンポジウム 「CREST 合同 量子フロンティアの明日」, 東京大学, 2025 年 11 月.
- [74] 中本大河, 高三和晃, 辻直人, “Theoretical study of the one-dimensional extended Hubbard model coupled with an optical cavity”, 学術変革領域研究 (A) 「相関設計で挑む量子創発」領域会議, 理化学研究所, 2025 年 12 月.
- [75] 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」, 第 2 回さきがけ「量子 3 領域」合同セミナー, 東京, 2026 年 2 月.

(セミナー)

- [76] 今井渉平, 「量子光誘起多体電子ダイナミクス」, オンライン, 2025 年 7 月.

(集中講義)

- [77] 高三和晃, 「非平衡物質相の物理」, 東京科学大学 集中講義, 2026 年 1 月.

3.6 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、広い意味での非平衡開放系の物理について、量子情報理論・くりこみ群・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いる。

3.6.1 開放系・非エルミート物理

外界環境や量子測定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。

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氏と共に、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。以上の成果は出版論文と招待講演を通じて発表された [2, 38]。

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。以上の成果は出版論文と国内会議での一般講演などを通じて発表された [3, 28, 36]。

デコヒーレンス環境下での強い対称性から弱い対称性への自発的対称性の破れ

Guo らは、局所的なデコヒーレンス下にある1次元XXZ量子臨界スピン鎖において、混合状態における新しいタイプの相転移現象である「強い対称性から弱い対称性への自発的対称性の破れ (SWSSB)」を理論的に解明した。共形場理論と行列積状態を用いた大規模数値シミュレーションを組み合わせることでデコヒーレンス環境下でのグローバルな相図を特定し、SWSSB相と通常のラッティンジャー液体相が、実効的な中心電荷が変化する境界 Berezinskii-Kosterlitz-Thouless 普遍性クラスに属する臨界線によって隔てられていることを明らかにした。特に、デコヒーレンスによって純粋状態の相関が減衰する一方で、特定の非局所的な相関（セクター分解された相関関数）が秩序を維持し続けるメカニズムを精密に解析し、開いた量子系における対称性の破れの概念を拡張した。この成果は、ノイズの影響下にある量子多体系の分類において従来の閉じた系や局所的な秩序変数では捉えきれない混合状態特有の量子相転移の存在を実証したものである。以上の成果は出版論文を通じて発表された [6]。

測定を利用した高エンタングルメント状態の生成

Guo、蘆田は、グローバルな物理量の測定を活用することで、高いエンタングルメントを持つ構造化された高励起状態（量子多体スカー状態のタワー）をシステムサイズ L に対して対数的な回路深さ $O(\log L)$ で効率的に生成する新しい量子プロトコルを提案した。具体的には、量子位相推定を応用して全磁化や全運動量などの保存量を測定することで、ターゲットとなる励起状態を射影により取り出す手法を確立した。これを AKLT モデル、XX モデル (Onsager スカー)、拘束ドメインウォールモデル、および高重みの Dicke 状態の準備に適用してその有効性を実証した。さらに、非オンサイト対称性である運動量測定に対してもベル対と測定フィードバックを組み合わせることでシステムを乱さずに測定を行う手法を考案し、従来の手法では困難だった Arovas A 状態などの準備を可能にした。この成果は、局所的なユニタリ操作による情報伝搬の制限 (Lieb-Robinson 束

縛)を測定によって乗り越え、量子計測においてハイゼンベルク限界を達成しうる超広範な量子フィッシャー情報を持つ状態への高速なアクセスを実現した。以上の成果は出版論文と国内会議での一般講演を通じて発表された [8, 32]。

量子スピン鎖における非スタビライザー性

非スタビライザー性 (量子マジック) はユニバーサルな量子計算に必要なリソースであり、Stabilizer Rényi entropy (SRE) を用いて定量化される。物性物理の文脈では、量子通信のリソースであるエンタングルメントの普遍的な性質はよく理解されている一方で、非スタビライザー性は理論的に解析する枠組みが未開発であった。星野、蘆田は東大物性研の押川氏と共に、この問題に対して SRE を場の理論を用いて計算する枠組みを構築し、その普遍的な性質を解明した。イジング臨界点について具体的な解析を行い、任意のレニー指数における SRE の普遍的な寄与を解析的に求め、それをテンソルネットワークを用いた数値計算により検証した。また、SRE が量子スピン鎖におけるトポロジカル欠陥のフュージョン則を反映する量である点を指摘し、その普遍的な性質を解析した。SRE のこの性質を用いることで未知のフュージョン則を探索することが可能となる。以上の成果は出版論文と国内外の会議での招待講演などを通じて発表された [9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 30]。

連続測定下のボゾン多体系を用いた量子センシング

量子系における物理量の測定は量子測定理論や量子推定理論の枠組みの中で研究されてきた。典型的には、推定パラメータの情報をもつ状態を使って観測可能量を測定し、得られた測定値から求めたいパラメータの値を推定する。このプロセスを繰り返すことでパラメータの推定値の分布が得られる。量子推定理論によると、推定誤差の下限は量子フィッシャー情報量が決める。つまり、量子フィッシャー情報量が大きい設定ではより精度の高い測定が実現可能となる。横溝、蘆田は、シカゴ大の Clerk 氏と共に、上記の問題設定を拡張した「連続測定下の量子センシング」に着目し、ボゾン多体系における量子フィッシャー情報量の計算方法とリソースに対するスケールリングの解析を行った。相互作用の無い自由系にガウシアン測定を組み合わせることで量子フィッシャー情報量を解析的に計算できることを明らかにした。この結果から、長時間極限における量子フィッシャー情報量の漸近的な増加レートの上限がモード数の 2 乗で決まることを示した。以上の成果は国内外の会議での一般講演を通じて発表された [22, 31, 32]。

トポロジカルアクティブマターのゲージ理論

近年、固体物理学で確立されたトポロジカルなバンド構造の概念を、古典的な連続体流体へ拡張する

研究が進展している。しかし、結晶などの離散周期系とは異なり、連続体流体は波数空間がコンパクト化されていないため、通常はトポロジカル数 (チャーン数など) を厳密に定義できないという課題があった。藤井、蘆田は、カイラルな物体力が働く 2 次元連続流体において、奇粘性 (odd viscosity) が系の第一チャーン数を定義可能にすることを示した。流体力学的な変数と $U(1)$ ゲージ場の対応関係を用い、非自明なトポロジカル波を記述する、奇粘性由来の項を追加したマクスウェル・チャーン・サイモンズ理論を導出した。この理論に基づいて境界を持つ系の運動方程式を解き、エッジモードの解を特定することで、連続体系においてもバルク・エッジ対応が成立することを示した。以上の成果は出版論文を通じて発表された [4]。またトポロジカルアクティブマターと非エルミート物理に関するレビュー論文を発表した [7]。

自由フェルミオン系の混合状態における量子エンタングルメントの性質

量子多体系におけるエンタングルメントは物性物理と量子情報の分野に跨る重要な問題である。その中でも混合状態のエンタングルメントの理論的構造は純粋状態に比べて複雑であり、とりわけフェルミオン系の混合状態についての一般的な結果は乏しかった。松田は、東大物工の Gong 氏と共に、混合状態のエンタングルメントを定量化する指標であるエンタングルメントネガティビティを自由フェルミオン系において計算する解析的な式を導いた。また、その公式を用いて、局所性を満たす系においてエンタングルメントが部分系の境界面積に比例するという面積則を、平衡状態および Lindblad 方程式で記述される開放系のダイナミクスに関して証明した。平衡系の結果は従来数値的に知られていた結果に対する証明を与え、開放系における結果は孤立系における既知の結果を一般化したものといえる。本結果は国際会議と国内会議での一般講演などを通じて発表された [25, 27, 29, 41, 42]。

量子多体系における非ガウス性

量子マジックは万能量子計算に必要なリソースである。スピン系ではスタビライザー状態が古典計算により効率的にシミュレート可能であり、状態の非スタビライザー性を解析することが量子計算の観点から重要である。一方、ボゾン系やフェルミオン系ではガウシアン状態 (自由粒子系の状態) が古典計算によりシミュレートでき、非ガウシアン状態がマジックに対応する。スピン系における非スタビライザー性とボゾン系やフェルミオン系における非ガウシアン性の間には類似の構造があるが、量子多体系における両者の振る舞いがどのように統一的に理解できるのかは未解明であった。松田、星野、蘆田は、非スタビライザー性と非ガウシアン性の指標としてそれぞれ別個に知られていたマジックの指標が統一的な

1つの形式で記述できることを示し、その場の理論的な定式化を行った。特に共形場理論で記述される1次元量子臨界系の基底状態において、このマジックの指標のシステムサイズに依存しない項が共形場理論における普遍的な定数項で決まることを示し、これをスピンレスフェルミオンの相互作用するモデルで数値的に検証した。以上の成果は招待講演やポスター発表を通じて発表された [17, 37]。

3.6.2 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。

重い電子系における量子相の共振器制御

量子電磁場と物質が強く結合した共振器物質系の研究が近年盛んに行われている。これまで注目されてきた古典光による非平衡領域での物質制御とは異なり、共振器物質系は安定な制御の可能性を秘めている一方で、基底状態における量子相の制御はいまだ不明点が多い。持田、蘆田は、磁性相と重いフェルミ液体状態の競合によって量子相転移が起こる近藤格子模型に着目し、量子相の共振器制御の可能性を理論的に探求した。摂動論と平均場近似を組み合わせた有効理論を計算し、超強結合の共振器結合が量子相転移の相図を修正することを明らかにした。以上の成果は招待講演やポスター発表を通じて発表された [12, 24, 35]。

3.6.3 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。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。ここでは、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。また、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を通じて発表された [18, 21]。

アクティブネマチックにおける強化学習と最適制御

アクティブネマチックにおけるトポロジカル欠陥は、流動や配向秩序を支配する重要な役割を果たし、その制御はマイクロ流体や生物物理への応用において本質的な課題である。近年、空間的・時間的に変化する活性の時空間分布(活性パターン)により欠陥の自己駆動を誘起できることが知られているが、これを用いた汎用的な制御手法は十分に確立されていない。Islam、蘆田は東大の川口氏と共同研究を行い、格子ボルツマンシミュレーション上で強化学習に基づく制御手法を構築した。本研究では、この手法を用いて複雑なマイクロチャネル構造内におけるトポロジカル欠陥の最短時間での位置制御問題に取り組んだ。その結果、学習されたコントローラは静的な活性パターンやルールベース手法を上回る性能を示し、さらに複数の環境で訓練されたモデルを統合することで、未知の迷路状チャネルにおいても欠陥の制御が可能なコントローラを実現した。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 [23]。

エントロピー生成を最小化する非平衡状態

神田橋、星野、蘆田は東大理工のGong氏と共に、系の遷移のダイナミクスが固定された条件下において、エントロピー生成やエントロピー生成率を最小化する状態の一般的な性質の解析を行った。その結果、エントロピー生成を最小にする状態、エントロピー生成率を最小にする状態、定常状態という、平衡系の場合には一致する3つの状態の間の非平衡系での関係性、および、それに伴うMpemba効果的な熱緩和現象を明らかにした。以上の成果は国内学会と国際学会でのポスター発表を通じて発表された [26, 33]。

<受賞>

- [1] 星野真宏, 物性若手夏の学校ポスター賞, 第70回物性若手夏の学校, 2025年8月21日。

<報文>

(原著論文)

- [2] M. Hoshino, M. Oshikawa, and Y. Ashida, Entanglement swapping in critical quantum spin chains, *Physical Review B* **111**, 155143 (2025).

- [3] K. Yokomizo and Y. Ashida, Measurement-induced phase transition in free bosons, *Physical Review B* **111**, 235419 (2025) [Editors' suggestion].
- [4] K. Fujii and Y. Ashida, Gauge theory for topological waves in continuum fluids with odd viscosity, *SciPost Phys. Core* **8**, 058 (2025).
- [5] T. Yoda, Y. Moritake, K. Takata, K. Yokomizo, S. Murakami, and M. Notomi, Optical non-Hermitian skin effect in uniform media, *Physical Review Research* **7**, 033214 (2025).
- [6] Y. Guo, S. Yang, and X.-J. Yu, Quantum Strong-To-Weak Spontaneous Symmetry Breaking in Decohered One-Dimensional Critical States, *PRX Quantum* **6**, 040311 (2025).
- [7] K. Sone, K. Yokomizo, K. Kawaguchi, and Y. Ashida, Hermitian and non-Hermitian topology in active matter, *Reports on Progress in Physics* **89**, 016501 (2026).
- [8] Y. Guo and Y. Ashida, Tower of Structured Excited States from Measurements, *Physical Review Letters* **136**, 050604 (2026).
- [9] M. Hoshino, M. Oshikawa, and Y. Ashida, Stabilizer Rényi Entropy and Conformal Field Theory, *Physical Review X* **16**, 011037 (2026).
- [10] M. Hoshino and Y. Ashida, Stabilizer Rényi entropy encodes fusion rules of topological defects and boundaries, *Physical Review Letters* **136**, 080402 (2026).
- (学位論文)
- [11] 星野真宏, “Quantum resources and conformal field theory”, 修士論文, 2026 年 3 月.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [12] Y. Ashida, Cavity control of quantum materials: lessons from quantum impurity physics, Condensed matter meets c-QED, Sitges, Spain, May 14 - 16, 2025.
- [13] Y. Ashida, Universality in many-body quantum magic of 1D critical states, Many-Body Quantum Magic 2025, University of Washington, Seattle, USA, August, 18 - 29, 2025.
- [14] Y. Ashida, Universality in many-body quantum magic, BEC 2025, San Feliu, Spain, September 6 - 12, 2025.
- [15] Y. Ashida, Quantum magic and conformal field theory, Emergent Correlated and Topological Phases of Quantum Matter, KIAS, Korea, November 18 - 20, 2025.
- [16] Y. Ashida, Stabilizer Renyi entropy and boundary CFT, Topology, Entanglement, and Dynamics in Quantum Many-Body Systems, ISSP, Japan, December 22, 2025.
- [17] Y. Ashida, Quantum computational resource and conformal field theory, RIKEN FQSP Workshop on Quantum Geometry, RIKEN, Japan, February 3 - 6, 2026.
- 一般講演
- [18] K. Masuki and Y. Ashida, Generative diffusion model with inverse renormalization group flows, StatPhys29, Florence, Italy, July 13 - 18, 2025.
- [19] Masahiro Hoshino, Masaki Oshikawa, Yuto Ashida, Stabilizer Rényi entropy and conformal field theory, The 4th young researchers' workshop of the Extreme Universe Collaboration, Aichi, Japan, June 30 - July 4 2025.
- [20] Masahiro Hoshino, Masaki Oshikawa, Yuto Ashida, Stabilizer Rényi entropy and conformal field theory, SQAI-NCTS Workshop on Quantum Technologies and Machine Learning, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, August 25 - 29 2025
- [21] Y. Ashida, Generative diffusion model with inverse renormalization group flows, Amica conference on AI and Physics, Amica Karuizawa, March 9 - 11, 2026.
- [22] K. Yokomizo and Y. Ashida, Fundamental Limits of Continuous Gaussian Quantum Metrology, APS Global Physics Summit 2026, Colorado, America, March 15 - 20, 2026.
- [23] R. Islam, K. Kawaguchi, and Y. Ashida, Solving Complex Control Problems for Active Nematic Defects via Deep Reinforcement Learning, International Workshop on Active and Soft Matter, Fukuoka, Japan, March 23 - 24, 2026.
- ポスター発表
- [24] J. Mochida and Y. Ashida, Cavity-Controlled Phase Transitions in the Two-Dimensional Kondo Lattice, ISSP International Workshop on Quantum Transport Frontiers of Mesoscopic Physics, Chiba, Japan, October 20 - 22, 2025.
- [25] R. Matsuda and Z. Gong, Entanglement negativity in free fermions: twisted characteristic polynomial, universal bounds, and area laws, Extreme Universe 2025, Kyoto, Japan, October 27 - November 1, 2025.
- [26] H. Kandabashi, Z. Gong, Y. Ashida, and M. Hoshino, States Minimizing Entropy Production and Its Rate in Classical Markov Processes, Kyoto Workshop on Quantum Thermodynamics and Stochastic Thermodynamics 2025, Kyoto, Japan, December 8 - 12, 2025.
- (国内会議)
- 一般講演
- [27] 松田諒太, Zongping Gong, 自由フェルミオン系のエンタングルメントネガティビティ, 第 70 回物性若手夏の学校, 滋賀県, 2025 年 7 月 29 日 - 8 月 2 日.

- [28] 横溝和樹, 蘆田祐人, Measurement-induced phase transition in free bosons, 高次にもつれた量子相探索の展開, 京都, 2025 年 9 月 1 日 - 3 日.
- [29] 松田諒太, Zongping Gong, 自由フェルミオン系におけるエンタングルメントネガティビティ, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島, 2025 年 9 月 16 日 - 19 日.
- [30] 星野真宏, 押川正毅, 蘆田祐人, 共形場理論による量子マジックの解析, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島, 2025 年 9 月 16 日 - 19 日.
- [31] 横溝和樹, 蘆田祐人, 連続測定下のボゾン多体系を用いた量子センシング, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島, 2025 年 9 月 16 日 - 19 日.
- [32] 蘆田祐人, 連続測定下のボゾン多体系を用いた量子センシング, ダイキン-ipi シンポジウム 量子フロンティアの明日, 東京大学 2025 年 11 月 25 日 - 27 日.

ポスター発表

- [33] 神田橋穂恵, 蘆田祐人, Zongping Gong, 非平衡条件下において最小エントロピー生成を与える状態の理論的研究, 第 70 回物性若手夏の学校, 滋賀県, 2025 年 8 月 17 日 - 21 日.
- [34] 星野真宏, 押川正毅, 蘆田祐人, 「量子マジックと共形場理論」, 第 70 回物性若手夏の学校, 滋賀県, 2025 年 8 月 17 日 - 21 日.
- [35] 持田隼, 蘆田祐人, Cavity-Controlled Phase Transitions in the Two-Dimensional Kondo Lattice, ダイキン-ipi シンポジウム, 東京都, 2025 年 11 月 25 日 - 27 日.
- [36] 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, ダイキン-ipi シンポジウム, 東京都, 2025 年 11 月 25 日 - 27 日.
- [37] 松田諒太, 星野真宏, 蘆田祐人, Unified measure of nonstabilizerness and nongaussianity: from a many-body perspective, 計算物理春の学校 2026, 沖縄県, 2026 年 3 月 9 日 - 13 日.

(セミナー)

- [38] Y. Ashida, Measurement-induced entanglement and quantum magic in critical many-body states, ETH Zurich physics seminar, Switzerland, May 12, 2025.
- [39] Masahiro Hoshino, Masaki Oshikawa, Yuto Ashida, Quantum resources in critical quantum spin chains, Watanabe group seminar, Tokyo, Japan, May 2025.
- [40] Masahiro Hoshino, Masaki Oshikawa, Yuto Ashida, Quantum resources in critical quantum spin chains, Elementary Particle Theory group seminar, Kyushu university, Japan, May 2025.
- [41] 松田諒太, 自由フェルミオン系におけるエンタングルメントネガティビティ, 田島研究室セミナー, 九州大学, 2025 年 10 月 9 日 - 11 日.
- [42] 松田諒太, Entanglement negativity in free fermions, 羽田野研究室セミナー, 東京大学, 2025 年 10 月 17 日.

- [43] Masahiro Hoshino, Masaki Oshikawa, Yuto Ashida, Quantum magic and conformal field theory, Rajabpour group seminar, Fluminense Federal University, Brazil, Online, October 2025.
- [44] Y. Ashida, Quantum computational resource and Conformal Field Theory, Caltech CMP lunch seminar, USA, December 10, 2025.

3.7 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。

3.7.1 二層系ニッケル酸化物高温超伝導体の研究

遷移金属の化合物として、ニッケル酸化物は銅酸化物、鉄系超伝導体に続く第三の高温超伝導体として注目を集めている。中でも二層系ニッケル超伝導体の転移温度の記録は約 100K に迫っており、その発現機構の解明が重要課題となっている。そこで以下の二つの問題に取り組んだ。

一つは結晶構造の温度-圧力依存性の解明である。二層系ニッケル酸化物の高温超伝導は 10GPa ほどの圧力がかかった状態で発現する。このとき、常圧下に比べて結晶の対称性が高くなることがわかっているが、どの温度、どの圧力でどのような結晶構造が実現するかは明らかにされていない。そこで、本研究室で開発が進められてきた有限温度の構造最適化法を適用して、温度-圧力相図の決定を行なった。これまでの方法では、構造相転移に伴ってユニットセルに含まれる原子の数がかわらない場合のみが取り扱えたが、アルゴリズムの改良により、ユニットセルのサイズが変わる場合も取り扱えるようになった。その結果、常圧では約 600K で高対称-低対称の転移がおき、絶対零度では約 10GPa の圧力がかかったときに転移が起こることがわかった。中間領域ではこの二つの点をほぼ直線で結ぶ相境界が得られた。この結果は超伝導が発現する際の電子状態の詳細を検討する際の重要な出発点となる。この結果は国際学会 [46]、国内学会 [65, 68] で発表された。

二層系ニッケル超伝導体についてはその超伝導状態に関わる研究にも取り組んだ。二層系ニッケル超伝導体の低エネルギー有効モデルとしては $3d_{x^2-y^2}-3d_{z^2}$ 軌道に着目した二層 Hubbard 模型が精力的に研究されている。二層 Hubbard 模型は銅酸化物高温超伝導体の模型として研究がなされてきた一層 Hubbard 模型と異なり、モット絶縁相だけでなくバンド絶縁相が存在するという違いがある。これまでの研究で、二層 Hubbard 模型では非連結の小さなフェルミポケッ

トができる、バンド絶縁相に近いところで超伝導転移温度が極めて高くなることが明らかにされている。一方で、超伝導転移温度以下の超伝導状態の性質についてはその全貌が明らかでなかった。そこで本研究では、クラスター動的な平均場近似と呼ばれる手法で二層 Hubbard 模型の解析を行った。その結果、強相関領域において、電子面あるいはホール面にのみ擬ギャップが開くこと、超伝導は potential energy gain というよりは kinetic energy gain によって生じること、コヒーレンス長が格子定数の数倍程度まで短くなること、といった顕著な性質が明らかになった。これらの成果は原著論文 [17] にまとめられた。

3.7.2 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

正味の磁化がゼロであるにもかかわらず時間反転対称性を破るコリニア磁性体は、非相対論的なスピン分裂を示し、さらにスピン流や異常ホール効果を生じることが近年明らかになっている。こうした磁性体は、強磁性体や時間反転対称性を保つ反強磁性体と区別するため、「交替磁性体」として位置づけられ、スピントロニクスへの応用可能性の観点からも大きな関心を集めている。これに対して、時間反転対称性を保持するコリニア反強磁性体は、非相対論的なスピン分裂を示さないため、従来型反強磁性体として分類されてきた。そのため、交替磁性体と比べると注目は限定的であった。

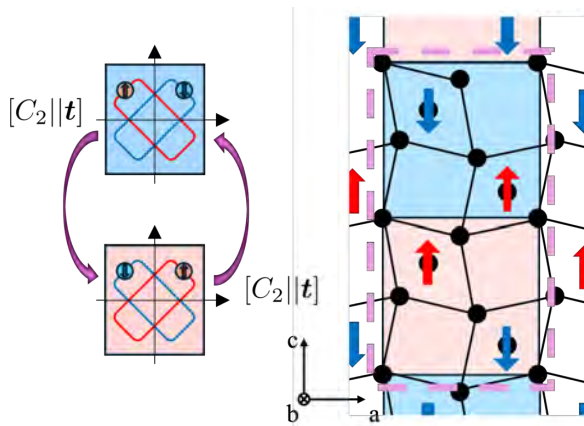


図 3.7.9: 隠れた交替スピン分裂と非自明な対称性の破れの概念図。

そこで本研究では、時間反転対称性を保つ従来型コリニア反強磁性体を、スピン空間群の観点から体系的に分類した。スピン空間群は、磁気空間群を非相対論的極限へ拡張した概念であり、交替磁性体の研究と並んで近年活発に議論されている。その結果、特定の従来型コリニア反強磁性体において、非自明な対称性の破れと隠れた交替スピン分裂が現れることを見いだした。ここでいう非自明な対称性の破れは、

結晶構造に内在する非共型対称性と、有限の伝播ベクトルをもつスピン秩序に由来するものである（図 3.7.9）。また、隠れた交替スピン分裂とは、図 3.7.9 に示すように、結晶学的単位胞の内部では交替スピン分裂が局所的に存在する一方で、バルク全体ではそれらが相補的に打ち消し合うことで、見かけ上スピン分裂が消失する現象を指す。さらに、この非自明な対称性の破れに伴って、マルチフェロイック応答や非線形輸送現象が発現することも示した。本研究は、コリニア反強磁性材料の探索において、交替磁性体とは異なる新たな指針を与えるものである。

この結果は、国際学会 [31, 33, 40, 45] および国内学会 [57, 59, 60, 61, 69] で発表されたほか、原著論文 [5] にまとめられた。

3.7.3 円偏光ラマン分光による物質の隠れた対称性の解明

物質の性質は、その対称性によって強く制約されるが、実際には外見や平均的な構造からは分からない対称性が内部に潜んでいることが多い。こうした隠れた対称性は、新奇な相転移や機能性（例えば非相対論的な電流応答や光学応答）を生み出す源であり、それを特定することは新しい物性の発見や材料設計に直結する。

本研究では、このような隠れた対称性を明らかにする手段として、円偏光を用いたラマン分光に着目し、その理論的整理を行った。入射光と散乱光の円偏光の組み合わせに基づくクロス円偏光およびパラレル円偏光におけるラマン光学活性を体系的に分類し、観測される信号と物質の対称性との対応関係を明確にした。これにより、キラル構造（右手系・左手系の違い）や、磁性に由来する特殊な対称性など、従来は直接捉えることが難しかった性質を光学的に識別できることが明らかになった。

ラマン散乱におけるストークス過程と反ストークス過程の関係は時間反転対称性と密接に結びついており、これらの信号の強度や符号の違いを精密に測定することで、物質が時間反転対称性を保っているか否か、あるいはどのような対称性が破れているかが判定できる。この点は、強相関電子系やトポロジカル物質など、複雑な量子状態を示す物質の理解において特に重要である。以上の成果は原著論文 [16] にまとめられ、Editors' suggestion に選定された。

3.7.4 3次元スピンレス系における Euler 類と回転対称性の関係

バンド数やその表現に依らずに定義される安定なトポロジカル相については、K 理論に基づく分類や対称性指標を活用した現実物質の探索が行われ、既に多くの知見が得られている。一方、バンド数やその表現が特定の条件を満たす系に対してのみ定義される不安定なトポロジカル相については、対称性との関係に未解明な点が多い。例えば、 $C_{2z}T$ 対称性な

どにより実ゲージを課せる系においては、2本のバンドに対してのみ Euler 類と呼ばれる Z 不変量が定義される。Euler 類は、電子やフォノンのバンドだけでなく様々な人工量子系を舞台に精力的に研究されているが、結晶対称性の固有値との関係は未だ知られていなかった。他にも、 $C_{4z}T$ 対称性や C_{4v} 対称性の下で二次元表現を構成するバンドに対してのみ定義されるトポロジカル不変量も存在する。それらと Euler 類の両方が定義される系も知られているが、両者を結びつける一般的な関係式は得られていなかった。

我々は、 $C_{2z}T$ 対称性に加えて C_{4z} または C_{6z} 対称性を持つスピンレス系を対象として、Euler 類と回転対称性との関係を系統的に調べた。まず 2 次元系を考え、Euler 類の定義に用いられる実 Berry 曲率が点群操作の下でどのように変換されるのかを解析し、変換則がバンドの対称性によって異なることを明らかにした。また、その解析に基づいて Euler 類と回転固有値を結びつける公式を導いた。加えて、Euler 類と、二次元表現に対してのみ定義される Z_2 不変量との間に成り立つ一般的な関係式も導出した。次に、この解析を 3 次元系における $C_{2z}T$ 不変な $k_z = 0$ 面と $k_z = \pi$ 面に適用し、各トポロジカル不変量の差について議論した。その結果、 C_{4z} 対称系では 2 次元系の議論が直接拡張できるのに対して、 C_{6z} 対称系では Euler 類の符号を考慮しなければならないことが明らかになった。さらに、鏡映対称性を持つ系へ議論を拡張し、halved mirror chirality と呼ばれる Z 不変量も含む関係式を導いた。本研究で得られた関係式は先行研究と整合するだけでなく、新たなトポロジカル相の存在を予言する。我々は新たに強束縛模型を構築し、Wilson ループや表面状態の計算を行ってそれらの相の存在を検証した。

この結果は、国内学会 [62] で発表されたほか、原著論文 [6] にまとめられた。

3.7.5 反強磁性トポロジカル半金属におけるディラック電荷とその検出

トポロジカル半金属は、ディラック点やワイル点と呼ばれるトポロジカルに保護されたバンド縮退点（トポロジカルノード）によって特徴づけられる。トポロジカル半金属の持つバンド構造の非自明なトポロジーは様々な光学現象に反映される。特に、ワイル半金属では、円偏光を直流電流に変換する光電流機構の一つである Injection current 応答がワイル電荷に由来して量子化することが知られている。このように、電子バンドのトポロジカルなノードは、ワイル半金属におけるベリー曲率のモノポールに代表される仮想的な電荷自由度を創発し、興味深い輸送現象を誘起する。

我々は、反強磁性ディラック半金属における隠れた「ディラック電荷」の存在と、その検出方法としての光電流応答を議論した。スピン空間およびスピン・電荷混合パラメータ空間で定義されるベリー曲率の観点から、一般化されたパラメータ空間におけるベリー曲率の湧き出しまたは吸い込みとしてディ

ラック電荷を同定する。このディラック電荷は、スピン・電荷結合起電力によって駆動される光電流を通じて検出可能である（図 3.7.10）。具体例として、反強磁性ディラック半金属のモデルの実時間シミュレーションを行い、光電流生成においてディラック電荷が重要な役割を果たすことを示す。我々は、反強磁性ディラック半金属における隠れた創発的電荷とその物理的帰結を明らかにするものである。

この結果は、国際学会 [44, 34, 38, 39, 41] および国内学会 [63, 67, 70] で発表されたほか、原著論文 [8] にまとめられた。また、関連する研究結果についても、国際学会 [32, 30] および国内学会 [58] で発表されたほか、原著論文 [4] にまとめられた。

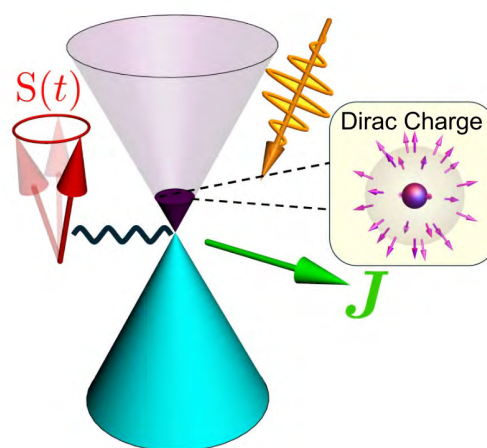


図 3.7.10: ディラック電荷とその検出方法の概念図。

3.7.6 高次スピン間相互作用の第一原理計算手法の開発とその応用

非自明な磁気構造を持つ反強磁性体は、基礎科学的な観点およびその工学的機能性から注目を集めている。そのような強磁性体の系統的な計算のためには、スピンに関して Bilinear (BL) なハイゼンベルグ相互作用を超えたより高次のスピン間相互作用を第一原理的に評価する必要がある。BL 相互作用を秩序状態から摂動的に導出する手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は未だ確立されていない。しかし、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近年指摘されており、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) を組み合わせた手法の開発を行ってきた 3.7.11。本手法により、第一原理計算により構築された強束縛模型を出発点として、非摂動的かつ系統的に様々なスピン間相互作用を計算することができる。また、強束縛模型を用

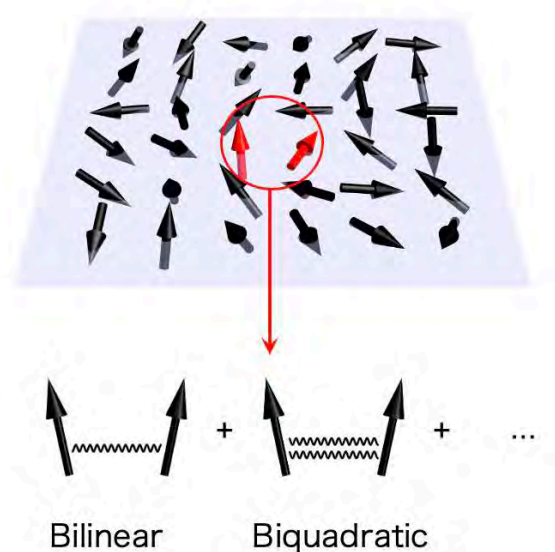


図 3.7.11: Spin Cluster Expansion と Disordered Local Moment を組み合わせた手法の概念図。

いることで、様々な基底関数による DFT と組み合わせることが可能である。DLM 状態は有限の大きさの磁気モーメントがランダムに配向した仮想的な状態であるが、そのような無秩序状態を利用することで、どの秩序状態を用いるかという任意性が存在する従来法と比較して任意性由来したバイアスが低減する。そして、そのバイアスの定量的な評価を磁気モーメントの大きさによって見積もることが可能であることも示した。

本手法の応用例として、非共面的な磁気構造が実験により報告されている $\text{Co}_{1/3}\text{TaS}_2$ 、および結晶構造中の空隙に存在する磁気モーメントによる反強磁性秩序が報告されているゼオライトの一つに適用をした。前者は高次スピン間相互作用が重要な働きをすると指摘されている物質であるが、我々の計算は実験結果と矛盾しない結果となっており、我々の手法の有用性を示すものである。また、後者においても同様に実験と矛盾しない結果が得られており、DFT における基底関数の制限を取り払うことにより我々の手法が幅広い物質に適用可能であることを示している。この結果は、国際学会 [35] および国内会議 [71] にて発表されたほか、原著論文 [7] および学位論文 [27] にまとめられた。

<受賞>

- [1] 松田仁, 第 80 回年次大会 日本物理学会学生優秀発表賞, 日本物理学会, 2025 年 10 月 11 日.
- [2] 服部航平, 第 80 回年次大会 日本物理学会学生優秀発表賞, 日本物理学会, 2025 年 10 月 11 日.
- [3] 有田亮太郎, Highly Cited Researchers 2025, Clarivate, 2025 年 11 月 15 日.

<報文>

(原著論文)

- [4] K. Hattori, H. Watanabe, and R. Arita, *Physical Review B*, **111**, 174416 (2025).
- [5] J. Matsuda, H. Watanabe, and R. Arita, *Physical Review Letters*, **134**, 226703 (2025).
- [6] M. Sato, S. Kobayashi, M. Hirayama, and A. Furusaki, *Physical Review B*, **112**, 195108 (2025).
- [7] T. Hatanaka, T. Nomoto, and R. Arita, *Journal of the Physical Society of Japan* **94**, 124709 (2025).
- [8] K. Hattori, H. Watanabe, and R. Arita, *Physical Review Letters*, **136**, 046603 (2026).
- [9] S. Kobayashi, M. Sato, and A. Furusaki, *Physical Review B*, **113**, L060501 (2026).
- [10] C.J. Butler, T. Ikenobe, M.-C. Jiang, D. Hirai, T. Yamada, G.-Y. Guo, R. Arita, T. Hanaguri, Z. Hiroi, *Physical Review Letters*, **136**, 076001 (2026).
- [11] K. Karube, M.-C. Jiang, L. Keller, J.S. White, Y.L. Chiew, X. Yu, G.Y. Guo, R. Arita, Y. Tokura, Y. Taguchi Room-Temperature Magnetic Skyrmions and Intrinsic Anomalous Hall Effect in a Nodal-Line Kagome Ferromagnet MnRhP , *Advanced Science*, **13**, e21734(2026).
- [12] S. Asai, J. Hu, Z. Liu, S. Itoh, D. Ueta, J. Matsuda, T. Hatanaka, H. Watanabe, R. Arita, T. Masuda, *Physical Review Materials*, **10**, L011401 (2026).
- [13] Y. Sato, S. Nagahama, S. Kitou, H. Sagayama, I. Belopolski, R. Yoshimi, M. Kawamura, A. Tsukazaki, N. Kanazawa, T. Nomoto, R. Arita, T. Arima, M. Kawasaki and Y. Tokura, *Nature Communications*, **16**, 10913 (2025).
- [14] S. Kitou, K. Ueda, Y. Nakamura, K. Sugimoto, Y. Nomura, R. Arita, Y. Tokura and T. Arima, Visualization of spin-orbit-entangled 4f electrons in crystalline materials *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **122**, e2500251122 (2025).
- [15] S. Nishihaya, Y. Matsuki, H. Kaminakamura, H. Sugeno, M.-C. Jiang, Y. Murakami, R. Arita, H. Ishizuka, M. Uchida, *Advanced Materials*, **37**, e02624 (2025).
- [16] H. Watanabe, R. Oiwa, G. Kusuno, T. Satoh and R. Arita, *Physical Review B*, **112**, 115105 (2025) (Editors' suggestion).
- [17] Y. Nomura, M. Kitatani, S. Sakai and R. Arita, *Physical Review B*, **112**, L020504 (2025).
- [18] J. Bouaziz, T. Nomoto and R. Arita, *Physical Review B*, **112**, 014406(2025).
- [19] R. Oiwa, A. Inda, S. Hayami, T. Nomoto, R. Arita, and H. Kusunose, *Physical Review B*, **112**, 035116 (2025).
- [20] F. Schilberth, M.-C. Jiang, F. Le Mardele, L.B. Papp, I. Mohelsky, M. A. Kassem, Y. Tabata, T. Waki, H. Nakamura, G.-Y. Guo, M. Orlita, R. Arita, I. Kezsmarki and S. Bordacs, *npj Quantum Materials*, **10**, 67 (2025).

- [21] H. Matsuoka, Y. Fujishiro, S. Minami, T. Koretsune, T. Ueda, N. Kanazawa, R. Arita, Y. Tokura, Y. Iwasa, *Physical Review Materials* **9**, 064406 (2025).
- [22] K. Karube, Y. Onuki, T. Nakajima, H.-Y. Chen, H. Ishizuka, M. Kimata, T. Ohhara, K. Munakata, T. Nomoto, R. Arita, T. Arima, Y. Tokura, and Y. Taguchi, *npj Quantum Materials*, **10**, (2025)
- [23] N. Yoshikawa, S. Okumura, Y. Hirai, K. Ogawa, K. Fujiwara, J. Ikeda, A. Ozawa, T. Koretsune, R. Arita, A. Mitra, A. Tsukazaki, T. Oka and R. Shimanono *Physical Review B*, **111**, 245104 (2025)(Editors' suggestion).
- [24] M.K. Ray, M. Fu, Y. Chen, T. Chen, T. Nomoto, S. Sakai, M. Kitatani, M. Hirayama, S. Imajo, T. Tomita, A. Sakai, D. Nishio-Hamane, G.T. McCandless, M.-T. Suzuki, Z. Xu, Y. Zhao, T. Fennell, Y. Kohama, J.Y. Chan, R. Arita, C. Broholm and S. Nakatsuji, *Nature Communications* **16** 3532 (2025).
- [25] T. Kitamura, H. Nakai, H. Katsura, and R. Arita *arXiv:2603.01922* (2026).
- [26] T. Kitamura, A. Daido, and Y. Yanase, *Appl. Phys. Lett.* **128**, 130501 (2026).
- (学位論文)
- [27] 畑中 樹人「ワニエ基底に基づく第一原理有効スピン模型導出法の開発と応用 (Development and applications of Wannier-based ab initio frameworks for deriving spin models)」博士論文 (2026).
- [28] 松田 仁, 「従来型反強磁性がもたらす奇パリティ応答の第一原理的研究」, 修士論文 (2026).
- [29] 浅井 僚真, 「有限温度の構造最適化法の開発とニッケル酸化物超伝導体への応用」修士論文 (2026).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [30] (Poster) K. Hattori, H. Watanabe, R. Arita, “Nonlinear Hall effect driven by spin-charge-coupled motive force.”, *Symposium on Emergent Quantum Materials 2025*, Tokyo, Japan, 2025 年 5 月 20 日
- [31] (Poster) Jin Matsuda, Hikaru Watanabe, and Ryotaro Arita, “Multiferroic Collinear Antiferromagnet with Hidden Altermagnetic Split”, *Workshop on Altermagnets and School on Magnetic Symmetry*, Shanghai, China, 2025 年 6 月 24 日.
- [32] (Oral) Kohei Hattori, Hikaru Watanabe, Ryotaro Arita, “Nonlinear Hall effect driven by spin-charge-coupled motive force”, *Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2025*, Montréal, Canada, 2025 年 7 月 8 日.
- [33] (Oral) Jin Matsuda, Hikaru Watanabe, Takuya Nomoto, and Ryotaro Arita, “Multiferroic Collinear Antiferromagnet with Hidden Altermagnetic Split”, *Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2025*, Montréal, Canada, 2025 年 7 月 9 日.
- [34] (Poster) Kohei Hattori, Hikaru Watanabe, Ryotaro Arita, “Dirac charge in antiferromagnetic topological semimetals”, *the 30th International Conference on Low-Temperature Physics*, Bilbao, Spain, 2025 年 8 月 8 日.
- [35] (Poster) Tatsuto Hatanaka, Takuya Nomoto, Ryotaro Arita, “Non-coplanar spin structure in $\text{Co}_{1/3}\text{TaS}_2$ induced by the biquadratic spin interaction”, *the 30th International Conference on Low-Temperature Physics*, Bilbao, Spain, 2025 年 8 月 9 日.
- [36] (Poster) Takashi Fujiwara, Shiro Sakai, Ryotaro Arita, “Spectral Analysis of the Bilayer Hubbard Model via DCA with Exact Diagonalization”, *Autumn School on Correlated Electrons: Understanding Correlated Materials with DMFT*, Forschungszentrum Jülich, Germany, 2025 年 9 月 22–26 日.
- [37] (Poster) Tristan Ryoma Fuchs, Takuya Nomoto, Hikaru Watanabe, “Microscopic Calculation of Coherence length and Penetration Depth in Superconductors”, *Autumn School on Correlated Electrons: Understanding Correlated Materials with DMFT*, Forschungszentrum Jülich, Germany, 2025 年 9 月 22–26 日.
- [38] (Poster) Kohei Hattori, Hikaru Watanabe, Ryotaro Arita, “Dirac charge in antiferromagnetic topological semimetals”, *International Symposium on Spintronics with Antiferromagnets and Altermagnets*, Kanagawa, Japan, 2025 年 10 月 8 日.
- [39] (Poster) Kohei Hattori, Hikaru Watanabe, Ryotaro Arita, “Dirac charge in antiferromagnetic topological semimetals”, *ISSP International Workshop “Quantum Transport Frontiers of Mesoscopic Physics”*, Chiba, Japan, 2025 年 10 月 21 日.
- [40] (Poster) Jin Matsuda, Hikaru Watanabe, Takuya Nomoto, and Ryotaro Arita, “First-principles study of odd-parity responses driven by conventional antiferromagnetism”, *The International Workshop on Exotic Quantum Phases due to Unhappy Electrons*, Tokyo, Japan, 2025 年 11 月 12 日.
- [41] (Poster) Kohei Hattori, Hikaru Watanabe, Ryotaro Arita, “Dirac charge in antiferromagnetic topological semimetals”, *The International Workshop on Exotic Quantum Phases due to Unhappy Electrons*, Tokyo, Japan, 2025 年 11 月 13 日.
- [42] (Poster) Tristan Ryoma Fuchs, Takuya Nomoto, Hikaru Watanabe, Ryotaro Arita, “Microscopic Calculation of Coherence Length and Magnetic Penetration Depth in Two Band Superconductors”, *CEMS Topical Meeting on Recent Trends*

- on Superconductivity, Saitama, Japan, 2026 年 2 月 27 日.
- [43] (Poster) Takashi Fujiwara, Shiro Sakai, Ryotaro Arita, "Real-frequency analysis of the pseudogap and superconducting states in the bilayer Hubbard model", CEMS Topical Meeting on Recent Trends on Superconductivity, Saitama, Japan, 2026 年 2 月 27 日.
- [44] (Oral) Kohei Hattori, Hikaru Watanabe, Ryotaro Arita, "Dirac Charge in Antiferromagnetic Topological Semimetals", APS Global Physics Summit 2026, Denver, USA, 2026 年 3 月 16 日.
- [45] (Oral) Jin Matsuda, Hikaru Watanabe, Takuya Nomoto, and Ryotaro Arita, "First-principles study of odd-parity responses driven by conventional antiferromagnetism", APS Global Physics Summit 2026, Denver, USA, 2026 年 3 月 17 日.
- [46] (Oral) Ryoma Asai, Ryotaro Arita Takumi Chida Ryota Masuki Kazuhiko Kuroki Terumasa Tadano "Finite-Temperature ab initio Structural Optimization of the Bilayer Nickelate Superconductor $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ ", APS Global Physics Summit 2026, Denver, USA, 2026 年 3 月 16 日.
- [47] (Oral) Taisei Kitamura, Hiroki Nakai Akito Daido Youichi Yanase, "Quantum geometric ferromagnetism and spin-triplet superconductivity", APS Global Physics Summit 2026, Denver, USA, 2026 年 3 月 18 日.
- 招待講演
- [48] Ryotaro Arita, "First-principles calculation of coherence length and magnetic penetration depth based on superconducting density functional theory" 2026 Total Energy Mini Workshop January 12-13, 2026, Berkley, CA USA.
- [49] Ryotaro Arita, "Odd-parity Responses in Conventional Antiferromagnets Without Nonrelativistic Spin Splitting" APW Workshop "Frontiers in Quantum Matter December 5-9, 2025, Hong-Kong.
- [50] Ryotaro Arita, "From Equations to Superconductors: Matter Under Pressure" Presidential Lecture, Simons Foundation November 12, 2025, New York, USA.
- [51] Ryotaro Arita, "Multiferroic collinear antiferromagnets with hidden altermagnetic spin splitting" International Symposium on Spintronics with Antiferromagnets and Altermagnets October 6-10, 2025, Hakone, Japan.
- [52] Ryotaro Arita, "Flat band physics in functional Kagome magnets" Flat Bands: Frustration and Correlation Physics September 10-12, 2025, Center for Computational Quantum Physics, Flatiron Institute, USA.
- [53] Ryotaro Arita, "Ab initio exploration of functional magnetic materials based on cluster multipole theory" Psi-k conference 2025 August 25-28, 2025, SwissTech Convention Center, EPFL, Lausanne, Switzerland
- [54] Ryotaro Arita, "Ab initio modelling of unconventional superconductors" NCTS Physics one-day workshop on ab initio approaches to novel properties of high temperature superconductors July 9, 2025, National Center for Theoretical Sciences, Taipei, Taiwan
- [55] Ryotaro Arita, "Magnetic structure prediction for functional magnets" 37th Annual Workshop on Recent Developments in Electronic Structure Methods June 8-11, 2025, El Paso, Texas, USA
- [56] Ryotaro Arita, "Ab initio calculation of coherence length based on superconducting density functional theory" CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials 2025 May 19-21, 2025, Wako (国内会議)
- 一般講演
- [57] (ポスター) 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」, 学術変革領域研究 (A) キメラ準粒子が切り拓く新物性科学 領域会議, 東北大学, 仙台, 2025 年 5 月 21 日.
- [58] (ポスター) 服部航平, 渡邊光, 有田亮太郎, 「Nonlinear Hall effect driven by spin-charge-coupled motive force」, キメラ準粒子令和 7 年度領域全体会議, 東北大学, 宮城, 2025 年 5 月 21 日.
- [59] (口頭) 松田 仁, 渡邊 光, 野本 拓也, 有田 亮太郎, 「従来型反強磁性がもたらす奇パリティ応答の第一原理計算」, 第 70 回物性若手夏の学校 S-E02, 白浜荘, 滋賀, 2025 年 8 月 30 日.
- [60] (ポスター) 松田 仁, 渡邊 光, 野本 拓也, 有田 亮太郎, 「従来型反強磁性がもたらす奇パリティ応答の第一原理計算」, 第 70 回物性若手夏の学校 P3-E13, 白浜荘, 滋賀, 2025 年 8 月 31 日.
- [61] (口頭) 松田 仁, 渡邊 光, 野本 拓也, 有田 亮太郎, 「従来型反強磁性がもたらす奇パリティ応答の第一原理計算」, 日本物理学会 第 80 回年次大会 16pSK314-2, 広島大学, 広島, 2025 年 9 月 16 日.
- [62] (口頭) 佐藤 真武, 小林 伸吾, 平山 元昭, 崎 昭, 「回転対称性を持つ 3 次元スピンレスオイラー絶縁体」, 日本物理学会 第 80 回年次大会, 16aSK310-3, 広島大学, 広島, 2025 年 9 月 16 日.
- [63] (口頭) 服部航平, 渡邊光, 有田亮太郎, 「反強磁性トポロジカル半金属におけるディラック電荷とその検出」, 日本物理学会第 80 回年次大会 17aSK302-5, 広島大学, 広島, 2025 年 9 月 17 日.
- [64] (口頭) 渡邊光, 大岩陸人, 楠野栄到, 佐藤琢哉, 有田亮太郎, 「軸性秩序に由来したラマン光学活性の理論」, 日本物理学会第 80 回年次大会 18aSK110-2, 広島大学, 広島, 2025 年 9 月 18 日.
- [65] (口頭) 浅井僚真, 有田亮太郎, 黒木和彦, 只野央将, 「第一原理計算による $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ の温度圧力相図の決定」日本物理学会第 80 回年次大会 18aSK303-7, 広島大学, 広島, 2025 年 9 月 18 日.

- [66] (口頭) 増木亮太, 松田仁, 渡邊光, 大岩陸人, 田中克大, 河村光晶, 野本拓也, 有田亮太郎「Quantum Espresso への磁気対称性の導入と応答特性の解析」日本物理学会第 80 回年次大会 19aSL101-2 広島大学, 広島, 2025 年 9 月 19 日.
- [67] (ポスター) 服部航平, 渡邊光, 有田亮太郎, 「Dirac charge in antiferromagnetic topological semimetals」, 第 19 回 物性科学領域横断研究会, 物性研究所, 千葉, 2025 年 11 月 27 日.
- [68] (ポスター) 浅井僚真, 有田亮太郎, 黒木和彦, 只野央将, 「有限温度の構造最適化法の開発とニッケル酸化物超伝導体への応用」, 第 19 回 物性科学領域横断研究会, 物性研究所, 千葉, 2025 年 11 月 27 日.
- [69] (ポスター) 松田 仁, 渡邊 光, 野本 拓也, 有田 亮太郎, “First-principles study of odd-parity responses driven by conventional antiferromagnetism”, 学術変革領域研究 (A) 関連設計で挑む量子創発 領域会議, 理化学研究所, 東京, 2025 年 12 月 15 日.
- [70] (ポスター) 服部航平, 渡邊光, 有田亮太郎, 「Dirac charge in antiferromagnetic topological semimetals」, 学術変革領域研究 (A) 関連設計で挑む量子創発 領域会議, 理化学研究所, 埼玉, 2025 年 12 月 15 日.
- [71] (ポスター) 畑中樹人, 野本拓也, 有田亮太郎, 「Non-coplanar spin structure in $\text{Co}_{1/3}\text{TaS}_2$ induced by the biquadratic spin interaction」, 学術変革領域研究 (A) 関連設計で挑む量子創発 領域会議, 理化学研究所, 埼玉, 2025 年 12 月 15 日.
- [72] (口頭) フックストリスταν龍馬, 野本拓也, 渡邊光, 有田亮太郎, 「2 バンド超伝導体におけるコヒーレンス長と磁場侵入長の微視的計算」日本物理学会 2026 年春季大会 23pF1-5 オンライン, 2025 年 3 月 23 日.
- [73] (口頭) 藤原敬志, 酒井志朗, 有田亮太郎, 「二層ハバードモデルの擬ギャップ状態と超伝導状態の実周波数解析」日本物理学会 2026 年春季大会 23pH1-12 オンライン, 2025 年 3 月 23 日.

招待講演

- [74] 有田亮太郎, 「圧力下の超伝導体の第一原理計算」日本物理学会 2026 年春季大会シンポジウム「理論と実験の協奏が生み出す超伝導研究の新潮流」

(セミナー)

- [75] 服部航平, 「Nonlinear Hall effect driven by spin-charge-coupled motive force and Dirac charge in antiferromagnetic topological semimetals」, 東京大学工学部物理工学科 Hirschberger 研究室, 2025 年 6 月 24 日.
- [76] Kohei Hattori, “Dirac charge in antiferromagnetic topological semimetals”, University of Tennessee at Knoxville, 2026 年 3 月 4 日.
- [77] Kohei Hattori, “Dirac charge in antiferromagnetic topological semimetals”, Oak Ridge National Laboratory, 2026 年 3 月 9 日.

4 物性実験

4.1 長谷川研究室

本年度に長谷川の定年退職にともない、1994年から32年間続いた長谷川研究室を閉じた。最後の学生である清水翔太は博士課程を修了して企業に就職した。特任研究員の保原麗は中辻研究室に所属を変えた。助教の秋山了太は5月に京都大学准教授として栄転することになった。

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きた。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た。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きた。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きた。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

カルシウムインターカレートグラフェンにおける表面保護膜を用いた大気暴露下での超伝導保持

本研究の目的は、2次元超伝導体において大気暴露による劣化を抑制し、*ex situ*での多様な測定を可能とする手法の確立である。一般に原子層・2次元超伝導体は表面反応に極めて敏感であり、超高真空中での *in situ* 測定が不可欠とされてきた。本研究では、カルシウムをグラフェンにインターカレートした2次元超伝導体に対し、酸素・水分の透過率が極めて低い新規保護フィルムを企業より提供を受け、超高真空中で試料表面に貼付した。その後大気暴露を行いPPMSによって電気伝導特性を測定した結果、超伝導転移が維持されることを確認した。最低温度で

完全なゼロ抵抗は得られていないが、試料固有の性質による可能性が高いと考えられる。今後は *in situ* でゼロ抵抗を確認した試料に対して同様の保護処理を施し、大気暴露の影響を定量的に評価する予定である。本手法により、これまで困難であった磁化測定や光学測定など、2次元超伝導体に対する多様な *ex situ* 評価が可能になると期待される。

R0° グラフェンと準結晶グラフェンの作成と特性測定

単原子層の炭素シート物質であるグラフェンは、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ウエハスケールで一般的な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に注目されている。昨年、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（SiC 格子に対して単位胞が 30°回転したもの：R30°）とは異なり、SiC 結晶格子に対して単位胞が回転していない R0° グラフェンができることを発見した。加熱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。その準結晶構造と思われる2層グラフェンの電気伝導度を測定したところ、通常の2層グラフェンに比べて著しく低いこともわかった。

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超高真空マイクロ4端子伝導測定装置によって、さまざまな表面状態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きた。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。4端子ホルダーの交換時に頻繁にトラブルがおき、改良のため様々な形状を試し、改造と性能検証を進めている。研究室の閉室にともない、本装置は、京都大学に移設され、実験が継続される予定である。

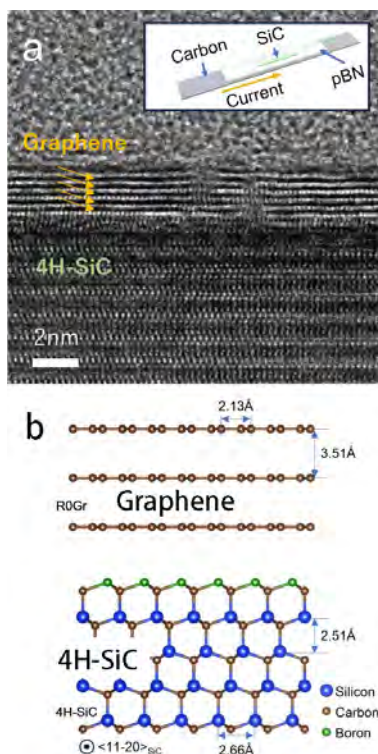


図 4.1.1: (a) SiC 結晶基板上に成長した R0° 多層グラフェンの断面 TEM (透過電子顕微鏡) 像. 各グラフェン層に点列が観察できることが、R0° 方位の直接的な証拠となる. (b) その構造模式図. 論文 [1] より。

ダイヤモンド中の欠陥状態の制御

本研究は、ダイヤモンド中のシリコン空孔中心(SiV)の電荷状態を表面水素修飾によって制御し、中性状態(SiV⁰)を安定化させることを目的とする。特にナノダイヤモンドにおいて、表面終端とフェルミ準位制御を通じた欠陥状態の制御を実現し、量子センサー応用に資するスピン活性中心の創出を目指す。

千歳科学技術大学高島グループとの共同研究により提供を受けたシリコン基板上的ナノダイヤに対して事前処理温度を最適化し、フィラメントクラッキングによる低速水素ラジカルを用いた水素修飾を行った。結果として、ナノダイヤモンドの NV 中心の発光が確認され、さらに室温測定において約 1100 nm 付近にブロードな発光ピークが観測され、新たな欠陥状態あるいは表面準位に起因する発光の可能性が示唆された。これは既報の SiV⁰ 発光とは異なる特徴を持ち、表面終端に起因する電子状態変化を反映している可能性がある。

今後は、水素修飾条件(温度・照射時間・ラジカルフラックス)を系統的に最適化し、SiV⁰ の生成効率と発光特性の相関を明らかにする。併せて低温分光測定により上記発光の起源同定を進める。また、表面終端とフェルミ準位の関係を定量的に評価し、SiV

電荷状態の制御機構を確立することで、量子センサー材料としての応用展開を図る。(千歳科学技術大学との共同研究)

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われた。

- ・日本学術振興会 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ndeバイス」(代表 秋山了太)
- ・科学技術振興機構 さきがけ研究 (量子協奏)「原子スケール表面精密制御による超高感度 NV 量子センサー開拓」(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)

<報文>

(原著論文)

- [1] R. Hobara, R. Akiyama, and S. Hasegawa: *Boron-Assisted Epitaxial Growth of Buffer-Layer-Free Graphene on the Si-face of SiC without 30°^{circ} Rotation*, ACS Applied Electronic Materials **8** (6), 2225-2233 (Mar, 2026).
- [2] T. Takashiro, R. Akiyama, R. Minakawa, and S. Hasegawa: *Beyond Superechange: Emergent Unconventional Ferromagnetism in Thin-Film Sandwich Structures of Intrinsic Magnetic Topological Insulators*, arXiv:2508.14993 (Aug, 2025).

(総説)

- [3] 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, S. Hasegawa: *Superconductivity in graphene induced by atomic intercalation*, Journal of the Ceramic Society of Japan **133** (9), 508-514 (Aug, 2025).

(国内雑誌)

- [4] 長谷川修司, 高山あかり: スピン分解 ARPES, まぐね (日本磁気学会) **21** (3), 印刷中 (Jun, 2024).

(その他)

- [5] 長谷川修司: 追悼 小林俊一先生, 理学部ニュース **57** (1), 17(May, 2025).
- [6] 長谷川修司: 象牙の塔に籠ってはいられない…(淡青評論), 東京大学学内広報 **1597** 号, 12 (Aug, 2025).
- [7] 長谷川修司: 『物理の日』の制定, 日本物理学会会誌 **80** (11), 647-648 (Nov, 2025).

- [8] 長谷川修司: 仁科芳雄を *NHK* 大河ドラマに, 大学の物理教育 (日本物理学会), **31** (3), 117 (Nov, 2025)
- [9] 長谷川修司: 研究者としてうまくやっていくにはー高校生へのメッセージー, *じっしょう理科資料* **99** 10-13 (Apr, 2026)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [10] R. Akiyama: *Quantum Frontiers: From 2D Materials to Atomic-Scale Surface Sensing*, Workshop on Material Physics, University of Göttingen, Göttingen (Germany), 2025 年 10 月 25 日.
- [11] R. Akiyama: *Superconductivity induced by atomic intercalation into few-layer graphene*, Workshop on Material, Photonics, and Quantum Technology (WMPQT2025), Asahikawa Civic Cultural Hall and Biei Town Community Center (北海道), 2025 年 6 月 13 日.

一般講演

- [12] 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, S. Hasegawa, 35th International Conference on Diamond and Carbon Materials (ICDCM), Glasgow (英国), 2025 年 9 月 1 日.
- [13] R. Hobara, S. Shimizu, K. Kubo, R. Akiyama, S. Hasegawa: *Growth and transport properties of epitaxial and sputtered CoSn thin films*, 2025 年日本表面真空学会学術講演会, つくば国際会議場 (茨城), 2025 年 10 月 21 日.
- [14] R. Hobara, R. Akiyama, N. Bornschein, S. Shimizu, S. Sato, I. Taniuchi, S. Hasegawa: *A simple and convenient pathway to the quasicrystal graphene*, The Japan Society of Vacuum and Surface Science Kanto Chapter 10th Anniversary Symposium (日本表面真空学会 関東支部 10 周年記念シンポジウム), TOKI MESSE Niigata Convention Center (新潟), 2025 年 4 月 18 日.
- [15] I. Taniuchi, R. Hobara, R. Akiyama, S. Hasegawa: *Non-reciprocal Photocurrent on Strong Spin-Orbit Coupling Surfaces*, The Japan Society of Vacuum and Surface Science Kanto Chapter 10th Anniversary Symposium (日本表面真空学会 関東支部 10 周年記念シンポジウム), TOKI MESSE Niigata Convention Center (新潟), 2025 年 4 月 18 日.

(国内会議)

招待講演

- [16] 長谷川修司: 深化する表面物理学ー構造と機能物性ー, 物性研究所短期研究会『現代表面科学の到達点とフロンティアを超えて』, 東京大学物性研究所 (柏), 2026 年 2 月 16 日.

- [17] 長谷川修司: 表面物理学での低温領域の開拓, 東京大学低温科学研究センター研究交流会, 武田ホール (本郷), 2026 年 3 月 4 日.

一般講演

- [18] 司文, 白宴丞, 清水翔太, 土師将裕, 保原麗, 秋山了太, 長谷川修司, 長谷川幸雄: *Observation of Charge Density Wave in Li-intercalated Bilayer Graphene*, 日本物理学会 2026 年春季大会 (オンライン), 2026 年 3 月 24 日.
- [19] 保原麗, 秋山了太, 長谷川修司: *SiC エピタキシャルグラフェンの Si 面 $R0^\circ$ 配向成長モード*, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 17 日.
- [20] 小池洋二, 五十嵐美樹, 石川真理代, 市原光太郎, 一宮彪彦, 右近修治, 大塚洋一, 川村康文, 岸澤真一, 毛塚博史, 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, 末元徹, 鈴木功, 武士敬一, 西野友年, 長谷川修司, 林壮一, 松本益明, 真砂卓史, 三木一司, 味野道信, 山崎詩郎, 吉澤雅幸: *物理チャレンジ 2025 報告 II: 第 2 チャレンジ実験問題報告*, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 18 日.
- [21] 松本益明, 東辻浩夫, 岡部豊, 青木健一, 斎藤輝文, 中西秀, 柴橋博資, 中屋敷勉, 鈴木功, 荒船次郎, 上杉智子, 大原仁, 興治文子, 加藤岳生, 金子朋史, 杉山忠男, 田中忠芳, 並木雅俊, 松元亮治, 荒川貴博, 安藤静敏, 毛塚博史, 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, *アジア物理オリンピック 2025 (APhO2025)* サウジアラビア大会報告, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 18 日.
- [22] 東辻浩夫, 松本益明, 中西秀, 柴橋博資, 青木健一, 荒船次郎, 上杉智子, 大原仁, 岡部豊, 興治文子, 加藤岳生, 金子朋史, 杉山忠男, 田中忠芳, 並木雅俊, 松元亮治, 中屋敷勉, 鈴木功, 荒川貴博, 安藤静敏, 毛塚博史, 斎藤輝文, 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: *国際物理オリンピック 2025 (IPhO2025)* フランス大会報告, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学, 2025 年 9 月 18 日.

(セミナー)

- [23] 長谷川修司: 物理学 (教室) の現在・過去・未来ーパーソナルヒストリーを軸にしてー, 東京大学ホームカミングデイ 理物第 1 回同窓会, 理学部 4 号館 1220 号室 (ハイブリッド), 2025 年 10 月 18 日.
- [24] 長谷川修司: 未来を拓くナノサイエンス, 千葉大学革新医療創生 CHIBA 卓越大学院プログラム第 7 回「卓越教養特論」, 千葉大学亥鼻キャンパス (千葉), 2025 年 9 月 12 日.
- [25] 長谷川修司: *21 世紀の半導体ートポロジカル半導体ー*, 千葉市科学館『大人が楽しむ科学教室』, 千葉市科学館 (千葉), 2025 年 9 月 6 日.
- [26] 長谷川修司: 量子物質の表面界面, J-PARC セミナー, J-PARC 研究棟, 東海村 (茨城), 2025 年 7 月 31 日.
- [27] 長谷川修司: 物理卒業生の多様なキャリアパス, 物理教室就職室主催キャリアセミナー (オンライン). 2025 年 6 月 17 日.

- [28] 長谷川修司: 表面と私, 東京大学理学系研究科物理学専攻退職記念最終講義, 小柴ホール (本郷), 2026 年 3 月 3 日.

(講義等)

- [29] 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), 2025 年 5 月 17, 24 日.
- [30] 長谷川修司: 固体物理 II (学部 4 年生), 2025 年度 S セメスター (本郷).

(アウトリーチ)

- [31] 長谷川修司: 第 1 チャレンジ 2 コース制の紹介, 物理オリンピック日本委員会第 2 回シンポジウム (東京理科大学神楽坂キャンパス, ハイブリッド), 2026 年 3 月 29 日.
- [32] 長谷川修司: プレチャレンジ: 物理チャレンジ紹介 + 第 1 チャレンジ理論演習 + LED の実験, 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), 2026 年 3 月 20 日.
- [33] 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), 2026 年 3 月 14 日.
- [34] 並木雅俊, 長谷川修司: プレチャレンジ: 物理チャレンジ紹介 + 第 1 チャレンジ理論演習 + 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, 石川県立小松高等学校 (石川), 2026 年 3 月 7 日.
- [35] 長谷川修司: 第 4 回プレチャレンジ: 物理チャレンジ紹介 + 第 1 チャレンジ理論問題演習 + 実験レポートの書き方, 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, 2026 年 1 月 25 日.
- [36] 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, 2025 年 12 月 2 日.
- [37] 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 + B105 室 (島野研), 2025 年 8 月 1 日.

4.2 岡本 研究室

本研究室では、低次元電子系等における新奇な物理現象の探索と解明を行っている。 ^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。また、吸着原子に磁性体を用いて、スピンの絡む新奇な物理現象の探索も行ってきた。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 次元電子系を作製しているため、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 次元電子系の作製に成功し、STM/S による磁性不純物の空間分布の観測に成功している。今後、局在スピン (磁性不純物) と伝導電子、局在スピン間の交換相互作用をトンネル分光法により実空間で精密に測定することにより、新奇な磁気物理現象の観測を目指す。

4.2.2 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中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

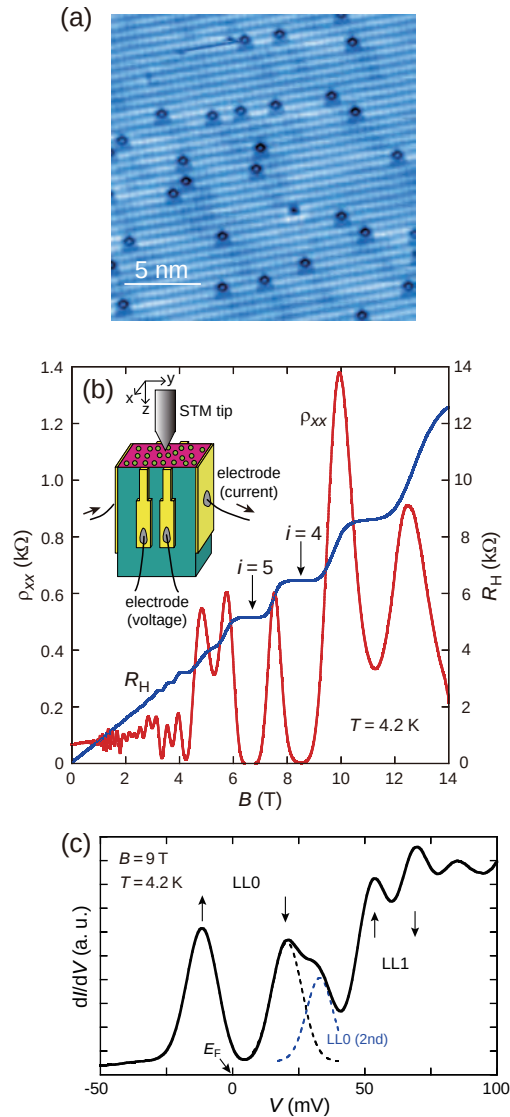


図 4.2.2: (a) InSb 劈開表面に鉄を 0.01 ML つけた場合の STM 像 (20×20 nm ^{2})。黒い輪郭を持った丸が Fe であり、明るい縞模様が Sb の格子である。(b) 4.2 K における縦抵抗率とホール抵抗の磁場依存性。明瞭な整数量子ホール効果が観測されている。(c) 走査トンネル分光の測定例。微分コンダクタンスから 2 次元電子系の状態密度を調べることができる。ここでは、スピン分裂したランダウ準位が観測されている。

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。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う。

超薄膜の超伝導と表面磁性体の近藤効果

Pb 超薄膜に磁性体を吸着あるいは混入させると超伝導転移温 T_c は減少する。近藤温度 T_K が T_c よりも十分に低い場合には、磁性不純物は自由磁気モーメントとして振る舞い、磁気散乱によって超伝導を破壊する。例えば、磁性不純物として Ce を用いた我々の研究では、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（庭田ら 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。

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、最近の我々の研究（森ら PRB2025）によって、その傾きが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。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ホスト金属の原子数や状態密度などで規格化した η を図 4.2.3(a) 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る。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。

本年度は、In 超薄膜に対する研究を行った。実験結果を図 4.2.3(b) に示す。Pb 超薄膜の場合と同様に、 η は磁性原子のスピン大きさ S が大きくなるにつれて急激に大きくなるが、このことは Hund 結合により近藤一重項の形成が抑制されて T_K が減少した結果として理解できる。一方で、各磁性元素の η が In と Pb とで大きく変わらないことは予想外であった。森らの研究では、Pb 超薄膜を 1.5 原子層程度の Au または Ag をコーティングすることによる η の変化を、ホスト金属の実効的な価数の減少による T_K の減少によるものとして説明した。Pb を In に置き換えた場合にも、 T_K の減少に相当する η の大きな変化が見られると予想していた。今度、実験・理論の両面で検討を進めていく。

4.2.3 半導体表面に形成された超伝導超薄膜における非相反伝導に関する研究

空間反転対称性と時間反転対称性が破れた系では電子輸送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。

我々は近年研究を行ってきた GaAs 劈開表面に作製された超伝導超薄膜において非相反伝導が生じる

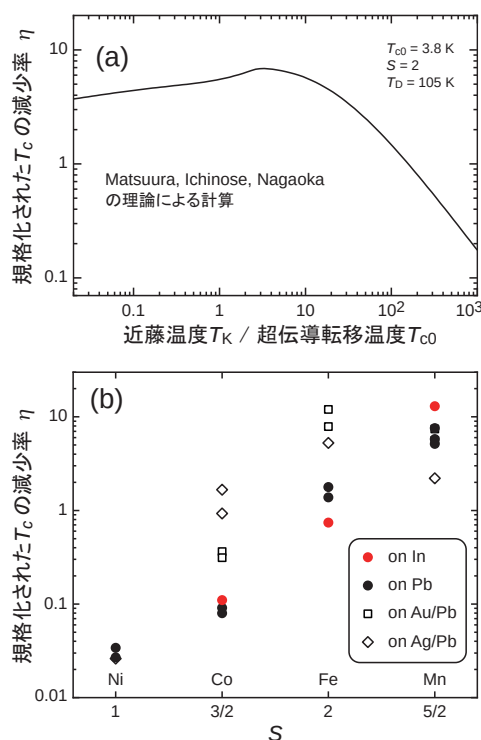


図 4.2.3: 磁性不純物に対する超伝導転移温度 T_c の減少率 η 。(a) Matsuura らの理論を用いた計算例。 T_K が T_{c0} (磁性不純物がないときの T_c) と同程度のところで η は最大となる。(b) In 超薄膜および Pb 超薄膜に対する実験結果。

か検証を行った。さらに、InAs 劈開表面に形成された超伝導超薄膜と二次元電子のハイブリッド系においても同様の研究を行った。

GaAs 劈開表面に作製された超伝導超薄膜における非相反伝導

半導体基板上に作製された超伝導超薄膜は面直方向に空間反転対称性が破られるためラッシュバースピン軌道相互作用 (SOI) が生じる。さらに、面内磁場を印加することにより時間反転対称性を破ると、電子輸送特性が電流もしくは磁場の向きに依存した非相反伝導が生じることが期待される。今年度は GaAs 劈開表面上に急冷蒸着法により作製された 1 nm 程度のインジウム超薄膜とアルミ超薄膜に関して測定を行った。

図 4.2.4(a) にインジウム超薄膜 (0.8 nm) のゼロ磁場での電気抵抗の温度依存性を示す。低次元系特有の顕著な超伝導ゆらぎが見られ、超伝導転移温度は 2.5 K であった。図 4.2.4(b) に交流ロックイン法を用いた一次高調波成分から得られる電気抵抗 (R^ω) および (c) に二次高調波成分から得られる電気抵抗

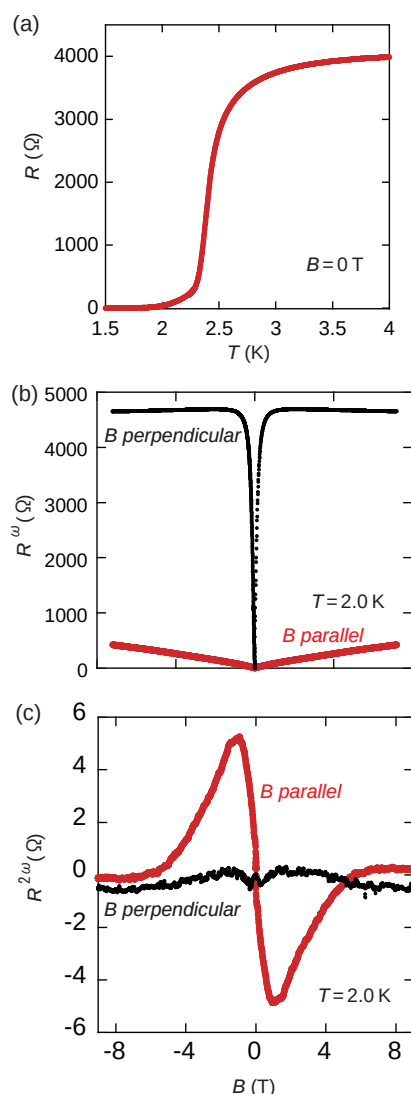


図 4.2.4: インジウム超薄膜を用いた場合の測定結果。(a) 電気抵抗の温度依存性。(b) R^ω および (c) $R^{2\omega}$ の磁場依存性。赤 (黒) が面内 (面直) 磁場下での測定結果。

($R^{2\omega}$) の面内および面直磁場依存性を示す。面直磁場を印加した場合、 $R^{2\omega}$ はほぼゼロであるが、面内磁場を印加した場合、磁場の向き (正負) に対して $R^{2\omega}$ の符号が反転する非相反な振る舞いが観測された。一方、ラッシュバ SOI が非常に小さいと考えられる超伝導アルミ超薄膜 (1.2 nm) に関して同様の測定を行ったが、 $R^{2\omega}$ は常にほぼゼロであり非相反な伝導は観測されなかった (図 4.2.5)。

この非相反伝導の起源であるが、現時点においては有限の重心運動量をもつクーパ対の形成が重要な役割を果たしているのではないかと考えている。最近の我々の研究からインジウム超薄膜のラッシュバ効果によるスピン分裂幅は数十 meV 程度である

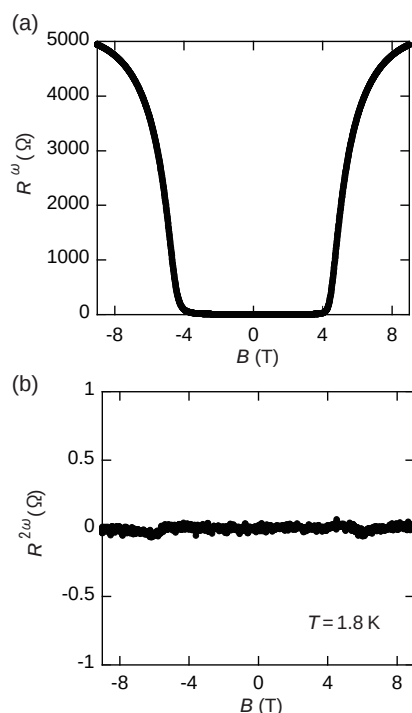


図 4.2.5: アルミ超薄膜における (a) R^ω および (b) $R^{2\omega}$ の面内磁場依存性。

ことがわかっている。さらに、急冷蒸着法により作製されたインジウム超薄膜は乱れの多い系と考えられ、面内磁場下において超伝導秩序変数の位相が空間変調するヘリカル超伝導を実現している可能性が指摘されている。このヘリカル超伝導では一方向の重心運動量 q をもつクーパー対により実現しているため、測定電流の向きに対して対称性を破ると考えられる。現在、関係性があると思われる超伝導ダイオード効果を記述する理論研究と比較・検討中であり、直接観測することの困難なヘリカル超伝導の存在を示す実験的証拠になると考えている。

InAs 劈開表面に形成された超伝導超薄膜と二次元電子のハイブリッド系における非相反伝導

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。さらにこの系では、面直方向の空間反転対称性の破れに起因するラッシュバ SOI が生じることが、シュブニコフ・ド・ハース振動のうなり現象から明らかになっている。

今年度は InAs 劈開表面にインジウムを蒸着することによる超伝導超薄膜 (1.0 nm) と二次元電子のハイブリッド系を実現した。図 4.2.6 に InAs ハイブリッド系試料の概念図およびゼロ磁場下における電気抵抗の温度依存性を示す。このハイブリッド系の特徴は超伝導近接効果によりインジウム超薄膜の超

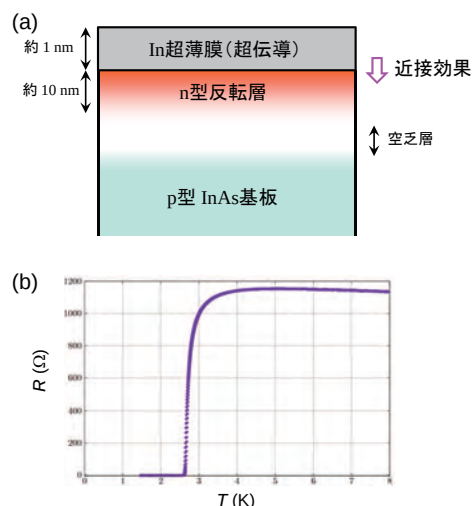


図 4.2.6: (a) InAs ハイブリッド系試料の概念図および (b) ゼロ磁場下における電気抵抗の温度依存性。

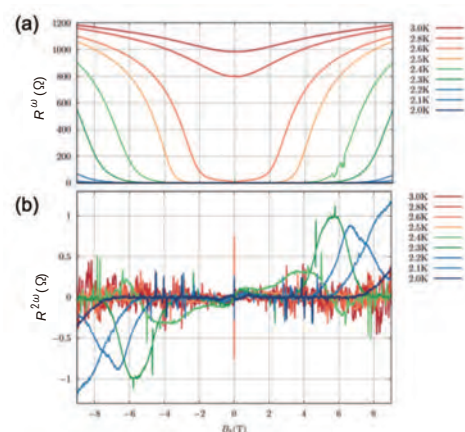


図 4.2.7: InAs ハイブリッド系における非相反伝導。(a) R^ω と (b) $R^{2\omega}$ の面内磁場依存性。

伝導成分が反転層（二次元電子）側に染み出すことである。

図 4.2.7(a) に R^ω および (b) に $R^{2\omega}$ の面内磁場依存性を示す。超伝導転移温度 (2.7 K) 以下の領域において GaAs 表面の超伝導インジウム超薄膜と同じように非相反な伝導が観測された。しかしながら、面内磁場下で $R^{2\omega}$ の正負が GaAs 表面の場合と異なっている。このことは空間反転対称性の破れにより生じる電場の向きが異なることを示唆しており、反転層の有無により電場の反転が生じている可能性が考えられる。今後、超伝導物質に SOI の大きさがより大きいと考えられる鉛などを用いて系統的な測定を行う予定である。このハイブリッド系では常伝導体を反転層と考えればラッシュバ SOI が働く超伝導近接系と考えることができ、アンドーエフ束縛状態や

マヨナラなどの非自明かつ興味深い物理現象の創発に繋がる可能性がある。

<報文>

(学位論文)

- [1] 石田 颯太: 「イオン液体を用いた InAs 表面上の高電子密度反転層を目指した研究」(修士論文)
- [2] 島津 岳斗: 「超伝導 In 超薄膜と InAs 表面反転層のハイブリッド系における非相反伝導」(修士論文)

<学術講演>

(国内会議)

一般講演

- [3] 島津 岳斗: インジウム砒素およびガリウム砒素表面上の超伝導インジウム超薄膜における非相反伝導, 第 17 回低温科学研究センター研究交流会(東京大学武田ホール) 2026 年 3 月 4 日(口頭発表).

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

2 次元テラヘルツ分光測定による銅酸化物高温超伝導体の隠れた超伝導コヒーレンスの観測

銅酸化物高温超伝導体では超伝導の他にも電荷密度波やスピン密度波といった多様な秩序相が現れる。特にランタン系銅酸化物に見られる電荷・スピンのストライプ秩序は 3 次元的なバルク超伝導と競合する秩序として知られている。このストライプ秩序相においては 2 次元的な超伝導が一定温度以下で発達していると考えられており、このストライプ秩序と超伝導との関係を明らかにすることは銅酸化物における高温超伝導発現機構を理解するうえで重要な課題と位置づけられている。本研究ではこのストライプ秩序相における隠れた超伝導コヒーレンスの観測を目的として、ランタン系銅酸化物高温超伝導体のテラヘルツ波に対する非線形光学応答を調べた。

銅酸化物高温超伝導体は c 軸方向に伝導層と絶縁層が交互に積層する構造を持ち、強い電気伝導の異方性を持つ。超伝導転移温度以下では超伝導を担う

CuO_2 面にジョセフソン結合が働くことにより、 c 軸方向にジョセフソン電流が流れる。この面間ジョセフソン結合の効果はテラヘルツ周波数帯の c 軸反射率スペクトルにエッジ構造として現れ、ジョセフソンプラズマ共鳴 (JPR) と呼ばれる。JPR はランタン系やイットリウム系銅酸化物高温超伝導体の c 軸反射率で明瞭に観測され、 c 軸超伝導コヒーレンスの発達を光学的に証拠付けするものである。ところがストライプ秩序相では、隣接する CuO_2 面のジョセフソン結合がストライプ構造によって抑制され、JPR が消失する。このとき、超伝導は CuO_2 面に閉じ込められ 2 次元的な超伝導が実現していると考えられている。ここで、ジョセフソン方程式で記述される非線形な電圧-電流特性を考慮すると、線形応答でジョセフソン電流が抑制されていても非線形応答の領域では有限の電流が流れることが予測できる。そこで、この JPR が消失した 2 次元的な「隠れた」超伝導状態を、 c 軸方向のテラヘルツ波に対する非線形応答から捉える、というのが本研究の狙いである。そのために、非線形信号を敏感に検出できる 2 次元テラヘルツ分光法の開発に着手した。2 次元テラヘルツ分光では 2 つのテラヘルツ波パルスを用い、実時間 t と 2 つのパルス間の遅延時間 τ の 2 つの時間軸を掃引しながら、2 つのパルスの組み合わせで生じる非線形信号を計測する手法である (図 4.3.8(a))。この 2 軸の時間掃引をそれぞれフーリエ変換することで、2 次元の周波数軸 (f_t, f_τ) 上に非線形信号をマッピングすることが可能となる。この 2 次元周波数マッピングの一つの利点は、超伝導電流などによる 2 つの入射波と位相関係が揃ったコヒーレントな信号と超伝導破壊や準粒子励起などに起因するインコヒーレントな信号とを分離することができる点にある。本研究では特に、3 次の非線形信号の中で、rephasing 信号と呼ばれるコヒーレントな信号に注目した。

まず、長距離ストライプ秩序がない試料 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ($x = 0.10, 0.125, 0.15$) の超伝導相においてはこの rephasing 信号の大きさは温度上昇とともに減少し常伝導相では消失する様子が観測された (図 4.3.8(b))。rephasing 信号はジョセフソンプラズマ共鳴 (JPR) 周波数と近い周波数に現れ、温度上昇に伴い JPR に追従してレッドシフトする様子が観測された。sine-Gordon 方程式を用いた境界条件と伝搬の効果を取り入れたシミュレーションを行った結果、rephasing 信号の温度依存レッドシフトを再現することに成功した。電場強度を増加させた際の振る舞いにおいても半定量的に再現され、rephasing 信号がジョセフソン電流由来であることを実証することに成功した。

次に、長距離ストライプ秩序を発現する Nd 置換試料 $\text{La}_{1.6-x}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ に対して同様の測定を行ったところ、超伝導相で (反射スペクトルには JPR が観測されないにも関わらず) rephasing 信号が観測され、かつそれが転移温度以上まで存続することが明らかになった。この結果は、マイスナー効果のオンセットで定義される 3 次元超伝導転移温度以上のストライプ秩序相において c 軸超伝導コヒーレンスが存在することを示唆するものである。さらに rephasing 信号が発達し始める温度を評価すると、面内電気抵抗の超伝導転移オンセット温度 T_c^{2D} と近いことが明らかになった。この結果について、対密度波状態 (PDW)

を仮定したシミュレーションを行ったところ、実験で観測された rephasing 信号の振る舞いを再現することに成功した。本結果は、PDW 状態の存在を光学的に決定付ける重要な成果である。今後より系統的な実験により PDW 状態やストライプ相の形成を明らかにするとともに、本手法を用いて光誘起超伝導現象の検証に取り組んでいく予定である。

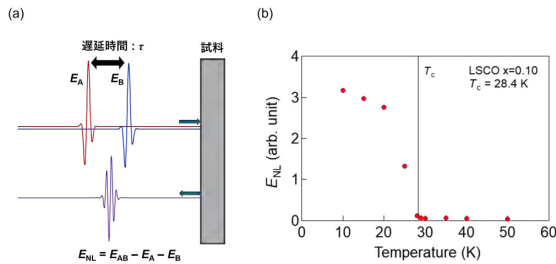


図 4.3.8: (a) 2次元テラヘルツ分光の概念図 (b) $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ($x = 0.10, T_c = 28.4 \text{ K}$) のジョセフソン効果に起因する非線形信号の振幅 E_{NL} の温度依存性。

銅酸化物高温超伝導体の中赤外光誘起異常ホール効果

d 波超伝導を示す銅酸化物高温超伝導体に時間反転対称性の破れが加わることで、カイラル超伝導などの新たな量子相が発現する可能性が指摘されている。このような対称性の破れを動的に制御する手段として円偏光照射が有効と考えられており、その応答として現れる光誘起異常ホール効果を調べた。具体的には、 $\text{La}_{1.84}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$ の ab 面薄膜に中赤外円偏光により誘起されるホール応答を、THz 波のファラデー回転の時間分解測定によって検出した。その結果、円偏光のヘリシティに依存して符号を反転する偏光回転が、中赤外光と THz 波が時間的に重なる領域でのみ観測された。さらに、その偏光回転は超伝導転移温度以下から室温までの温度範囲で観測され、擬ギャップ温度近傍での特徴的な振る舞いを示唆する結果が得られた。また、過渡光学伝導度スペクトルから、測定条件下では超伝導状態が光照射によって抑制されていることが確認されたため、観測された異常ホール応答は超伝導秩序とは独立に生じている可能性が高い。この異常ホール応答の微視的起源、特に擬ギャップ相との関係を明らかにするために、励起波長依存性から関与する電子状態の特定を進めている。

テラヘルツ光渦による超伝導 Higgs モードの時空間制御

光渦は、螺旋状の波面を持つ光波であり、位相特異点とな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。こうした性質を活かし、光渦はレーザー加工や超解像顕微鏡などに応用されてきた。また、波面の巻数に比例した軌道角運動量を運ぶことが知られており、物質との相互作用における役割が近年盛んに研究されている。

我々は超伝導体の集団励起モード (Higgs モード) の時空間制御、更に超伝導体への光の軌道角運動量転写を実証することを目指し実験を進めてきた。これまでに、強く絞ったプローブ光の位置を固定したまま、ポンプ光の集光レンズを面内で走査する手法により、空間分解能を備えたテラヘルツ波ポンプ・テラヘルツ波プローブ分光系を構築した。この系を用いて、s 波超伝導体 NbN における Higgs モードの時空間ダイナミクスを観測した。まず、中心周波数 ω の狭帯域テラヘルツポンプ光を照射することにより、プローブ光透過率が 2ω で振動する様子が確認された。これは、Higgs モードとベクトルポテンシャルの非線形結合によって、Higgs モードの強制振動が誘起されていることに対応する。さらに空間分解測定によって、テラヘルツ光渦をポンプ光として駆動された Higgs 振動の空間プロファイル調べたところ、振幅は中心が暗点のドーナツ状の分布を持ち、振動の位相が方位角方向に連続的に変化する様子が観測された (図 4.3.9)。得られた Higgs モードの時空間プロファイルから、時間依存 Ginzburg-Landau 理論に基づいて系の軌道角運動量を評価し、Higgs モードの励起を介して、光渦の波面の巻数に比例した角運動量が超伝導体に注入されることを明らかにした。

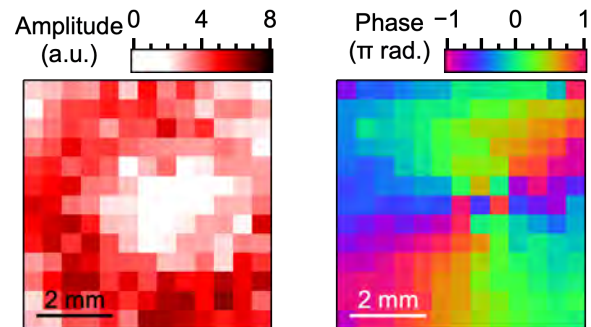


図 4.3.9: 軌道角運動量 $m = 1$ のテラヘルツ光渦によって駆動された Higgs モード強制振動の (左) 振幅分布 (右) 位相分布。Higgs モードの強制振動がベクトルポテンシャルの二次の次数で駆動されることを反映して、方位角方向に位相が 4π 回転する。

4.3.2 ディラック・ワイル半金属

3次元ディラック半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ におけるディラック-ワイル変換

時間あるいは空間反転対称性が破れた固体では、「ワイル半金属」と呼ばれる特殊な半金属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に由来する特異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。

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。このアプローチの特徴は、ワイル状態実現に必要な対称性の破れを、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点にある。これにより、高い制御性でワイル電子状態を実現できると期待されている。

我々は、3次元のディラック半金属であるカゴメ格子金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 薄膜（室温）に円偏光の中赤外光パルス照射し、フロッケワイル状態の実現を目指した。誘起される異常ホール伝導度を THz 波のファラデー回転を通して測定した結果、駆動中に即時的な異常ホール応答が現れ、その大きさが広範な中赤外光駆動周波数に対して -3 乗に従うことを見出した。この結果は理論計算とも定性的・定量的に一致しており、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。以上より、周期外場によるフロッケ状態において生じる Berry 曲率由来の輸送応答を観測したと考えられ、フロッケエンジニアリングの基盤となる結果である。

強磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ を用いた光再構成型 THz 波面制御

テラヘルツ (THz) 波は、通信やイメージングなどへの応用が期待されており、その実現にはビームの向きや広がり自在に制御する「波面制御」が重要である。近年はメタサーフェスを用いた波面制御が進展しているが、多くの方式では電気配線や外部電圧が必要であり、機能保持に電力を要するという課題がある。

本研究では、強磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ に着目した。この物質は強磁性相 ($T_C \simeq 180$ K) において巨大な THz 磁気光学応答を示し、磁化の反転に伴い偏光回転の符号が反転する。そのため、異なる磁区は THz 波に対して π 位相差を与え、磁区パターン自体が位相分布を担う光学素子として機能する。さらに、我々はこれまでの研究で本物質薄膜における全光学磁化反転を実証しており、磁区パターンを光で自在に書き込むことが可能である。これらを利用し、光で再構成可能な不揮発型 THz メタサーフェスによる波面制御の実証を目指した。

厚さ 25 nm の薄膜試料 (100 K) に対し、円偏光中赤外パルスにより磁区パターンを形成し、THz 時間領域分光により評価した。一次元磁気回折格子を書

き込むと、特定偏光成分のみが広帯域で回折することを確認し、回折波の周波数・位相・強度が書き込みパターンにより制御可能であることを示した。さらに、磁区配置の設計により多色回折や高次回折抑制を実現するとともに、フレネルゾーンプレート状の磁区により偏光選択的な集光機能を実証した。本手法は、連続薄膜の内部自由度である磁区構造を直接位相制御に用いる点で従来のメタサーフェスと異なる。光による磁化書き換えによって THz 波面を制御する新しい概念を示し、機能維持に電力を要しない再構成型 THz デバイスの設計指針を提示する。

反強磁性ワイル半金属 Mn_3Sn における超高速電流誘起磁化反転ダイナミクスの可視化

反強磁性体は、自発磁化を持たないことから漏れ磁場の影響が小さく、かつ高速応答が可能であるため、次世代のスピン트로ニクス材料として注目されている。特に Mn_3Sn は、ノンコリニアな磁気秩序に由来する大きな異常ホール効果を示すワイル半金属であり、電流によって磁気状態を制御できる系として関心を集めている。一方で、その磁化反転過程をサブナノ秒領域で直接観測した例はなく、反転機構の理解は十分ではなかった。

本研究では、 Mn_3Sn 薄膜における電流誘起磁化反転のダイナミクスを時間分解で可視化することを目的とし、フェムト秒レーザーを用いた時間分解磁気光学カー効果イメージングを用いて観測を行った。短パルス電流を印加し、その間の磁気応答を空間・時間分解して測定することが可能な高感度の時間分解磁気光学顕微鏡の開発を行い、磁化反転の進行過程を超高速時間領域で直接追跡することが可能にした。

その結果、100 ピコ秒級の時間スケールで磁化が反転する様子を捉えることに成功した。特に、図 4.3.10 に示すように、適切な電流密度では磁化が電流パルスに追従して連続的に変化する非熱的反転が観測された。一方で、より高い電流密度ではジュール熱による磁気秩序の一時的な消失を伴う熱的反転が支配的となり、反転機構が電流密度によって切り替わることが明らかとなった。

本結果は、ノンコリニア反強磁性体において、スピン軌道トルクによる非熱的な超高速磁化反転が可能であることを実験的に示したものであり、電流による不揮発な磁気制御をピコ秒領域へと拡張する重要な知見である。これにより、テラヘルツ帯で動作する超高速スピン트로ニクスデバイスの実現に向けた指針が得られた。

<受賞>

- [1] 片岡龍盛、第 17 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、2026 年 3 月 4 日
- [2] 小川和馬、理学系研究科研究奨励賞、2026 年 3 月 10 日

<報文>

(原著論文)

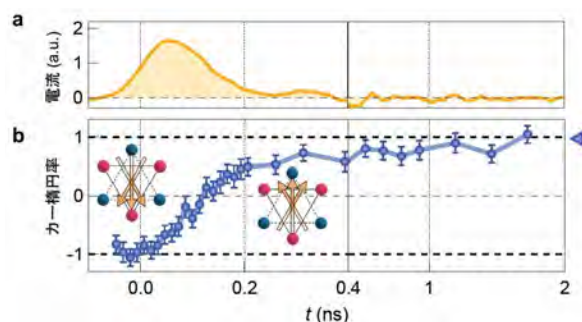


図 4.3.10: (a) 光電変換器を用いて発生した 140 ps の電流パルスの波形と、(b) 誘起されたノンコリニア反強磁性体 Mn_3Sn の磁化反転のダイナミクス。信号は、直流電流反転時の信号で規格化されている。電流パルスに追従して磁化が反転していくことがわかる。

- [3] Naotaka Yoshikawa, Shun Okumura, Yoshua Hirai, Kazuma Ogawa, Kohei Fujiwara, Junya Ikeda, Akihiro Ozawa, Takashi Koretsune, Ryotaro Arita, Aditi Mitra, Atsushi Tsukazaki, Takashi Oka, Ryo Shimano: Light-induced anomalous Hall conductivity in the massive three-dimensional Dirac semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$, *Phys. Rev. B* **111**, 245104 (2025). (Editors' suggestion)
- [4] Kota Katsumi, Yann Gallais, Ryo Shimano: Distinct terahertz nonlinear and Raman responses in cuprate superconductors $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$, *npj Quantum Materials* **10**, 91 (2025).
- [5] Naotaka Yoshikawa, Kazuma Ogawa, and Ryo Shimano: All-optical switching in ferromagnets and its application to magnetic Weyl semimetals, *J. Phys. Soc. Jpn.* **94**, 111005 (2025). (invited review article)
- [6] Daichi Yoshioka, Fumiya Sekiguchi, Naotaka Yoshikawa, and Ryo Shimano: On-Chip Terahertz Pump-Probe Spectroscopy Revealing Ultrafast Current-Induced Breakdown Dynamics in a Superconducting Nb Microstrip, *Nano Letters* **25**, 13764 (2025).
- [7] Kazuma Ogawa, Hanshen Tsai, Naotaka Yoshikawa, Takumi Matsuo, Yutaro Tsushima, Mihiro Asakura, Hanyi Peng, Takuya Matsuda, Tomoya Higo, Satoru Nakatsuji and Ryo Shimano: Ultrafast time-resolved observation of non-thermal current-induced switching in an antiferromagnetic Weyl semimetal, *Nature Materials* **25**, 434 (2026).

(国内雑誌)

- [8] 吉川尚孝, 関口文哉, 島野亮: 固体物理<新しい時間分解分光法の開発と固体物性研究への応用>特集号, **60**, 623-635 (2025).

(学位論文)

- [9] 小川和馬, Time-resolved magneto-optical imaging of ultrafast current manipulation of ferri- and antiferromagnetic systems (博士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] K. Ogawa, N. Yoshikawa, M. Ishibashi, K. Yakushiji, A. Tsukamoto, M. Hayashi, and R. Shimano, Ultrafast magneto-optical Kerr microscopy of current-induced domain wall motion dynamics in ferrimagnet GdFeCo , Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials Summer School, Vancouver, Canada, May 8, 2025. (poster)
- [11] K. Ogawa, N. Yoshikawa, and R. Shimano, Magneto-optical Kerr imaging of sub-ns domain wall motion dynamics in ferrimagnet GdFeCo induced by current pulses, The Gordon Research Conference on Spin Dynamics in Low Dimension and Low Symmetry Environment, Les Diablerets, Switzerland, Jun. 30, 2025. (poster)
- [12] K. Tanaka, N. Yoshikawa, F. Sekiguchi and R. Shimano, Rotational Higgs mode induced by terahertz vortex beam in a superconducting NbN , Driven Quantum Systems, Berlin, Germany, Jul. 23, 2025. (poster)

招待講演

- [13] N. Yoshikawa, Ultrafast light-induced anomalous Hall conductivity in 3D Dirac semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$, OPICS & PHOTONICS International Congress (OPIC 2025), LSC2025, Yokohama, Japan, Apr. 25, 2025.
- [14] R. Shimano, Light-induced coherent interlayer transport emergent from charge density waves in $\text{La}_{2-x-y}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, Gordon Research Conference, Superconductivity, Les Diablerets, Switzerland, May 4, 2025.
- [15] R. Shimano, Optical Hall effect in a light-driven 3-dimensional Dirac semimetal, The Low-Energy Electrodynamics in Solids 2025 Conference (LEES 2025), Hanwha Resort, Haeundae, Korea, June 26, 2025.
- [16] R. Shimano, Nonlinear Terahertz Spectroscopy of Collective Modes in Superconductors, The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2025 (SCES2025), Montreal, Canada, July 10, 2025.
- [17] R. Shimano, Light-induced coherent interlayer transport in La-based cuprate superconductors, Driven Quantum Systems 2025, Harnack Haus, Max Planck Institute, Berlin, Germany, July 21, 2025.

(国内会議)

一般講演

- 日本物理学会 第 80 回年次大会 (2025 年 9 月 16-19 日、広島大学)
- [18] 小川和馬, Hanshen Tsai, 吉川尚孝, 松尾拓海, 対馬湧太郎, 朝倉海寛, Hanyi Peng, 松田拓也, 肥後友也, 中辻知, 島野亮, 時間分解磁気光学イメージングによるワイル反強磁性体 Mn_3Sn の電流パルス誘起磁化反転ダイナミクスの観測, 2025 年 9 月 16 日 (口頭発表)
- [19] 田中康太郎, 吉川尚孝, 関口文哉, 姜大模, 寺井弘高, 森本高裕, 島野亮, テラヘルツ光渦を用いた超伝導体 NbN における回転 Higgs モードの観測, 2025 年 9 月 17 日 (口頭発表)
- [20] 関口文哉, 吉岡大地, 吉川尚孝, 島野亮, オンチップテラヘルツポンププローブ分光による Nb の超伝導状態の超高速電流誘起破壊と回復ダイナミクスの観測, 2025 年 9 月 17 日 (口頭発表)
- 第 17 回低温科学研究センター研究交流会 (2026 年 3 月 4 日、東京大学)
- [21] 富安泰成, 片岡龍盛, 吉川尚孝, 永崎洋, 島野亮, 2 次元テラヘルツ分光法による La 系銅酸化物高温超伝導体の c 軸超伝導コヒーレンスの観測 (口頭発表)
- [22] 黒田光貴, 吉川尚孝, 島野亮, 銅酸化物高温超伝導体 $\text{La}_{1.84}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$ 薄膜の中赤外光誘起異常ホール効果 (ポスター発表)
- [23] 田中康太郎, 吉川尚孝, 関口文哉, 寺井弘高, 島野亮, テラヘルツ光渦で駆動した超伝導体 NbN における Higgs モードの時空間ダイナミクス (ポスター発表)
- [24] 関口文哉, 島野亮, オンチップテラヘルツポンププローブ分光による超高速電流が誘起する Nb の超伝導破壊ダイナミクスの観測 (ポスター発表)
- [25] 片岡龍盛, 富安泰成, 吉川尚孝, 永崎洋, 島野亮, 銅酸化物高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の超伝導状態における c 軸テラヘルツ非線形光学応答 (ポスター発表)
- [26] 吉川尚孝, 藤原宏平, 塚崎敦, 島野亮, 強磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ における光磁化書き込みを用いたテラヘルツ波面制御 (ポスター発表)
- 日本物理学会 2026 年春季大会 (2026 年 3 月 23-26 日、オンライン)
- [27] 片岡龍盛, 富安泰成, 吉川尚孝, 永崎洋, 島野亮, 2 次元テラヘルツ分光法による銅酸化物高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の c 軸テラヘルツ非線形光学応答の観測, 2026 年 3 月 24 日 (口頭発表)
- [28] 富安泰成, 片岡龍盛, 吉川尚孝, 永崎洋, 島野亮, 2 次元テラヘルツ分光法による La 系銅酸化物高温超伝導体のストライプ相における c 軸超伝導コヒーレンスの観測, 2026 年 3 月 24 日 (口頭発表)
- [29] 吉川尚孝, 藤原宏平, 塚崎敦, 島野亮, 強磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ を用いた光書き込み型テラヘルツメタサーフェス, 2026 年 3 月 26 日 (口頭発表)

(セミナー)

- [30] K. Ogawa, Spin Texture Manipulation by Current and Light probed via Magneto-Optical Microscopy, SPINTEC Seminar, Grenoble, France, July 2, 2025.
- [31] R. Shimano, Higgs mode in superconductors studied by nonlinear terahertz spectroscopy, Seminar, Department of Physics, The University of Regensburg, Regensburg, Germany, July 18, 2025.

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、逆方向のスピンの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。



図 4.4.11: 電子がマグノンに散乱されて、異常ホール効果が発現する様子を模式的に表した図。

スピン軌道相互作用を介したマグノン散乱による異常ホール効果を観測 [3]

ファンデルワールス層状磁性体は、その特異な電子的・磁氣的性質により近年大きな注目を集めている。中でも Cr-Te 化合物は、200 ~ 300 K のキュリー温度を持つ強磁性体であり、単層でも安定に存在できるため、二次元磁性体のモデルとして研究が活発に行われている。また、Cr-Te 化合物は大きな異常ホール抵抗を示すことでも知られている。特に、この系では温度変化に伴って異常ホール抵抗の符号が反転することが特徴の一つであり、その起源についてはさまざまな説が提案されていたものの実験的な検証は十分ではなかった。

本研究では、Cr-Te 系の中でも特に安定な化合物である Cr_2Te_3 において、異常ホール効果、磁気抵抗効果の試料膜厚、測定温度依存性を系統的に調査した。実験結果とモデル計算から、 Cr_2Te_3 ではスピン軌道相互作用を介したマグノン散乱によって異常ホール効果が発現することを見出した。また、異常ホール効果が温度によって符号反転するのは、マグノン散乱による異常ホール効果と内因性異常ホール効果が競合するためであることがわかった。さらにマグノン散乱は縦抵抗にも寄与し、負の磁気抵抗を誘起することを明らかにした。

一方、第一原理計算などの結果から、 Cr_2Te_3 におけるマグノン散乱はテルルの強いスピン軌道相互作用に起因することが示唆された。伝導に関与するテルルの p 電子と、局在磁気モーメントを形成するクロムの d 電子の間の交換相互作用がスピン軌道相互作用によって変調されることでマグノン散乱を誘起するメカニズムが明らかになった。これらの結果は、重金属を含むファンデルワールス層状強磁性体において、スピン軌道相互作用に起因するマグノン散乱が、異常ホール効果などの電気伝導特性に大きな影響を与えることを示唆している。

4.4.2 非線形光学効果

光を物質に照射すると、光が持つスピン角運動量を物質に転写することができます。例えば右回りの円偏光を GaAs 等の半導体に照射すると、角運動量の保存則から特定の方向を向いたスピンを持つ電子を価電子帯から伝導帯に励起できます。一方、スピン軌道相互作用が大きい物質を含む界面・表面などに円偏光を斜めから照射すると、光の入射方向と直交する方向に電流が流れることが知られています。これはフォトガルバニック効果と呼ばれ、一見太陽電池のように見えますが、pn 接合などがなくても電流が流れるなど、その性質は大きく異なります。最近ではトポロジカル絶縁体や 2 次元層状物質などでもフォトガルバニック効果が観測されており、物質の特異な電子状態を検出する手法としても有効であるとされています。

光パルスを使った光学異方性制御に成功 [2]

テルル (Te) は、らせん状の結晶構造に由来する強い構造的・電子的異方性を持つ準一次元材料として注目を集めている。その特異な物性により、電子物性・フォトンクス分野で有望な材料の一つとして研究が活発化している。しかし、デバイス応用に不可欠な面内結晶方位の精密な制御は従来技術では難しく、課題となっていた。

本研究では、テルル薄膜の結晶方位を制御するための新しい手法を提案・実証した。結晶方位がランダムに配向したテルル薄膜に直線偏光レーザーパルスを照射すると、テルルの結晶 c 軸 (らせん軸) が偏光に対して垂直方向に揃うことがわかった。このレーザーによる再配向は、基板の結晶方位に依存せず、さらに可逆的であり、再書き込みも可能であることも明らかになった。

本研究はテルルの結晶 c 軸 (らせん軸) を成膜後に操作した初めての例である。エピタキシャル成長に頼ることなく、テルルや黒リンなどの低次元材料における光学的・電子的異方性を自在に制御する新たな手法であり、異方性を持つ二次元材料のオプトエレクトロニクスデバイス、フォトニックシステム、さらには再構成可能なメタサーフェスへの応用に新たな可能性を拓くと期待される。

<受賞>

- [1] 戸高安裕, 2025 年度コロキウム Best Poster Award, 東京大学量子科学技術国際卓越大学院 (WINGS-QSTEP), 2026 年 2 月 27 日。

<報文>

(原著論文)

- [2] Y. Kobayashi, A. Mitsuzuka, H. Kondo, M. Shoshin, J. Uzuhashi, T. Ohkubo, M. Hayashi, M. Kawaguchi, Light-Programmable Reorientation of the Crystallographic c Axis of Tellurium Thin Films. *Nano Lett.* 26, 104 (2026).

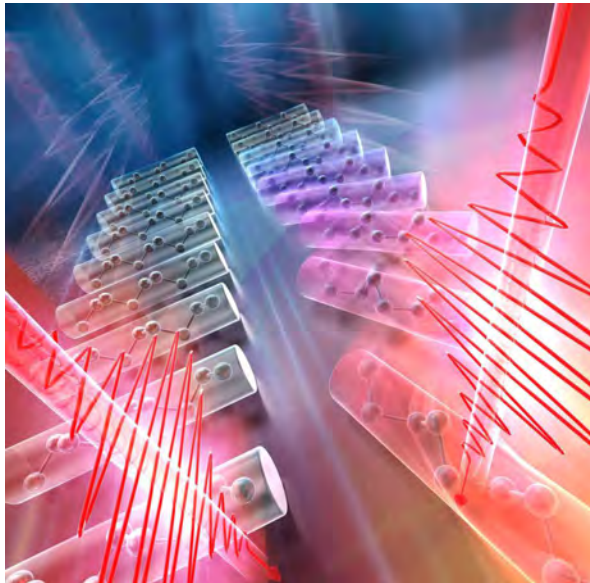


図 4.4.12: 直線偏光ピコ秒パルスレーザーを用いてテルル薄膜の結晶 c 軸 (らせん軸) の向きを制御するイメージ図。偏光と直交する方向に結晶 c 軸が向く。

- [3] Y. Wang, S. Wang, M. Kawaguchi, J. Uzuhashi, A. K. Patel, K. Nawa, Y. Sakuraba, T. Ohkubo, H. Kohno, M. Hayashi, Significant electron-magnon scattering in layered ferromagnet Cr_2Te_3 . *Comm. Phys.* 8, 262 (2025).
- [4] T. Kawada, M. Kawaguchi, H. Matsumoto, M. Hayashi, Model calculations of lattice strains and rotations associated with surface acoustic waves *J. Appl. Phys.* 138, 053905 (2025).
- [5] 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).

(国内雑誌)

- [6] 丸井幸博, 河口真志, 鷺見 聡, 粟野博之, 中村浩次, 林将光, スピン流・軌道流の光検出, 日本磁気学会誌「まぐね」, vol. 20, No. 5, pp. 1-10 (2025).

(学位論文)

- [7] Yujun Wang, Magnon induced anomalous Hall effect in layered ferromagnet Cr_2Te_3 . 博士論文 (2025).
- [8] 石田駿平, 二次元層状物質における近赤外線パルスレーザーによる非線形応答. 修士論文 (2026).
- [9] 田中 勇丞, Ni/Cr 積層膜におけるスピン軌道トルクと電流駆動磁化制御. 修士論文 (2026).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] Y. Chen, Y. Todaka, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Parametric Excitation in CoFeB Thin Films Induced by Surface Acoustic Wave (poster). International Symposium on Topological Wave Science, Okayama Convention Center, 12/9/2025.
- [11] Y. Todaka, M. Asano, M. Kawaguchi, D. Hatanaka, M. Hayashi, Magnetic field dependent complex coupling constant of magnon-phonon interaction (poster). International Symposium on Topological Wave Science, Okayama Convention Center, 12/9/2025.
- [12] M. Yunokizaki, Y. Todaka, I. Yasuda, T. Kawada, M. Kawaguchi, M. Hayashi Engineering magnetoelectric coupling using rare-earth based heterostructures. The 14th Joint European Magnetic Symposia (JEMS), Goethe University, Frankfurt, Germany, 8/27/2025.
- [13] Y. Todaka, M. Asano, Y. Chen, M. Kawaguchi, D. Hatanaka, M. Hayashi Anatomy of magnon-phonon coupling in magnetic nanostructures (poster). The 14th Joint European Magnetic Symposia (JEMS), Goethe University, Frankfurt, Germany, 8/26/2025.
- [14] Y. Todaka, M. Asano, Y. Chen, M. Kawaguchi, D. Hatanaka, M. Hayashi Dissipative coupling of magnons and surface acoustic wave phonons in Ni/Ru/Ni synthetic antiferromagnets (poster). Frontiers of Nanomechanical Systems (FNS), NTT Basic Research Laboratories, Atsugi, Japan. 6/4/2025.

招待講演

- [15] M. Hayashi, Tunable complex magnon-phonon coupling in synthetic antiferromagnets, Chimera in Alps, Des Houches, France, Feb. 26, 2026.
- [16] M. Hayashi, Spintronics with optics, 70th Birthday Symposium for Professor Stuart Parkin, Schloss Ringberg, Germany, Dec. 12, 2025.
- [17] M. Hayashi, Current induced spin texture in reduced symmetry systems, Spintronics Future Prospects, Kashiwa, Japan, Nov. 11, 2025.
- [18] M. Hayashi, Current driven dynamics of domain walls in magnetic racetracks, Frontiers of Race-track Memory - Status and Prospects, Berlin, Germany, Jul. 8, 2025.
- [19] M. Hayashi, The coupling constants of magnons and acoustic phonons in magnetic nanostructures, Frontiers of Nanomechanical Systems (FNS) 2025, Atsugi, Japan, Jun. 11, 2025.

(国内会議)

一般講演

- [20] 平岡拓士, 三塚新, 小林裕太, 的場みづほ, 河口真志, 小西邦昭, 林将光, Te の異方軸制御によって作製したメタ表面光学素子. 第 73 回応用物理学会春季学術講演会, 東京科学大学大岡山キャンパス, 2026 年 3 月 17 日.
- [21] 小林裕太, 三塚新, 近藤春央, 正信誠, 埋橋淳, 大久保忠勝, 林将光, 河口真志, テルル薄膜における結晶 c 軸の光プログラブル制御. 第 73 回応用物理学会春季学術講演会, 東京科学大学大岡山キャンパス, 2026 年 3 月 16 日.
- [22] 林将光, 層状物質 Cr_2Te_3 におけるマグノン依存輸送特性. 令和 7 年度東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究会「量子技術と物質科学の融合による次世代デバイス創製」, 松島センチュリー ホテル, 松島, 2025 年 10 月 18 日.
- [23] 田中勇丞, Shunzhen Wang, 河口真志, 林将光, Ni/Cr 多層膜での磁化スイッチング. 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学東広島キャンパス, 2025 年 9 月 19 日.
- [24] 平岡拓士, 三塚新, 小林裕太, 河口真志, 林将光, 異方性制御 Te 薄膜を用いたメタ表面光学素子. 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学東広島キャンパス, 2025 年 9 月 19 日.
- [25] 石田駿平, 三塚新, 小林裕太, 河口真志, 林将光, WSe_2 における非線形円偏光フォトガルバニック効果. 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学東広島キャンパス, 2025 年 9 月 18 日.
- [26] 戸高安裕, 浅野元紀, 河口真志, 畑中大樹, 林将光, 磁場を用いたマグノン-フォノン結合の位相制御. 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学東広島キャンパス, 2025 年 9 月 17 日.
- [27] 岡田樹, 武田伊織, 河口真志, 林将光, スピン軌道トルク測定を通じた超伝導体からのスピン流検出 (poster). 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学東広島キャンパス, 2025 年 9 月 16 日.
- [28] 三塚新, 小林裕太, Shunzhen Wang, 河口真志, 林将光, 配向テルル薄膜の磁気輸送特性 (poster). 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学東広島キャンパス, 2025 年 9 月 16 日.
- [29] 小林裕太, 小沢耀弘, 河口真志, Shunzhen Wang, 宮崎稜大, 藤原宏平, 島野亮, 塚崎敦, 岡隆史, 林将光, Linear Photogalvanic Effect in Centrosymmetric Dirac Semimetals. 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会, 名城大学天白キャンパス, 2025 年 9 月 10 日.
- [30] 平岡拓士, 三塚新, 小林裕太, 河口真志, 林将光, Te の異方性を活用した円偏光ビーム偏向子. 物性夏の学校, 白浜荘, 滋賀, 2025 年 7 月 29 日.

招待講演

- [31] 林 将光, マグノン・フォノン複素結合の物理. 文部科学省学術変革領域研究 キメラ準粒子・分野融合研究会 スピン×音響×光×軌道, 九州大学伊都キャンパス, 伊都, 2025 年 12 月 25 日

- [32] M. Hayashi, Probing and controlling spin currents for magnetic memory technologies. 2025 年日本表面真空学会学術講演会, つくば国際会議場, つくば, 2025 年 10 月 22 日

(セミナー)

- [33] 林 将光, スピントロニクス of 物理. 埼玉大学大学院理工学研究科数理電子情報専攻, さいたま. 2025 年 6 月 18 日

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 4.5.13)。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。

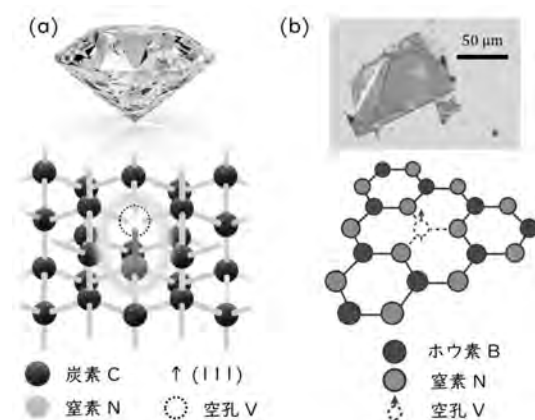


図 4.5.13: (a) ダイヤモンド結晶と NV 中心。(b) hBN 結晶とホウ素空孔欠陥 V_B^- 。

NV 中心と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と原子空孔のペアに置き換わった構造を持つ。NV 中心は光励起後の過程において電子スピンの依存する独特の経路を持つことでユニークである。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。この手法を光検出磁気共鳴 (optically detected magnetic resonance, ODMR) と呼ぶ。長年の研究により NV 中心内の電

子スピンや原子核スピンの量子状態が室温においても極めて長く保持されることがわかっている。さらに2008年、ODMRを利用した局所磁場観測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。

2025年度は、小林研介教授、佐々木健人助教、大学院博士課程3年生の中村祐貴、西村俊亮、博士課程2年生の顧豪、山本航輝、博士課程1年生の太田怜英、須田涼太郎、修士課程2年生の原田怜、修士課程1年生の柴崎大輝、長谷川亮太のメンバーで研究を行った。中村[15]と西村[16]が博士学位を取得し、原田[17]が修士学位を取得した。西村は学位論文によって令和7年度理学系研究科研究奨励賞（博士）を受賞した[4]（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。2025年度は、特にhBN量子センサの理解、ダイヤモンド量子センサチップの開発で進展があった。さらに、物性測定として、高圧物理への展開や、スピン波やトポロジカル磁性体の磁壁の観測などへの展開が進んだ。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

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 V_B^- 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。その中核となる動的核偏極(DNP)の理解には、ODMRスペクトルの系統的な測定と、その挙動を定量的に記述するモデルの構築が必要である。

本研究では、同位体制御された $h^{10}B^{15}N$ 中の V_B^- におけるODMRスペクトルを、基底状態レベル反交差(GSLAC)を含む広い磁場範囲で測定し、単一電子スピンおよび隣接する3つの ^{15}N 核スピンを考慮したリンドブラッド方程式に基づくシミュレーションと比較した。その結果、シミュレーションがGSLAC近傍を含めて実験スペクトルを良好に再現した。すなわち、スペクトルのローレンツ関数フィッティングから推定される核スピン偏極の磁場依存性の全体的な挙動の説明に成功した。本研究は、hBN中の欠

陥を用いたDNP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[9]。

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、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。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、標的材料的なサイズ・磁場強度・周波数など、様々な要素を考慮して初めて可能になる。特に、我々が進めている物性研究への応用では、磁化・電流・スピンやその揺らぎといった様々な対象を、異なる磁場・温度・圧力環境において計測するため、この課題認識は重要である。しかし、これらの課題における実用レベルのセンサ設計法ならびに作製法は世界的にも未だ確立されていない。

そこで我々は、磁性体や超伝導体の磁化ならびに電流の測定に有用な「サブミクロン空間分解能の精密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、それぞれに最適なセンサの開発を開始した。主に一昨年度から、それぞれの課題に適切なセンサ構造を検討し、その構造を達成するために必要なダイヤモンド材料や熱処理条件の基礎評価に基づく独自のプロセス設計・開発を進めてきた。

今年度は、これまでに得た材料と技術の知見を統合し、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を行えるセンサチップを複数得ることに成功した。新しいセンサチップは、我々がこれまで用いてきたものと比べて、精度と局所性が大幅に向上した。実際、これらを利用することで予備的な段階ながら原子層薄膜・磁性半導体薄膜などの磁場分布の可視化、薄膜材料中のナノスケールの核スピン分光が可能となった。さらに、高精度なセンサチップの利用によって明らかになった測定装置自体の磁場ノイズを、高安定標準用電源を利用することで大幅に抑制することにも成功した。

また、プロセス後の特性評価を地道に進めることで、ダイヤモンド材料中の不要な不純物や発光欠陥が微量に含まれていることも見出した。今後は材料合成に関する共同研究機関との連携を深めながら、より高精度な量子センサチップの作製を目指す。同時に、作製したセンサチップの物性計測利用や開発を進め、多彩な量子センサの作製法を検討する。特に、高感度を得やすい高輝度なセンサチップを開発することで磁場イメージングのスループットを向上し、磁気ダイナミクス可視化や集積回路の不良検査などの社会実装に向けた取り組みも進める。

4.5.3 量子センサの物性計測応用

量子センサによる圧力分布の可視化

圧力は基本的な熱力学変数であり、凝縮系物理学において長年重要な調整パラメータである。圧力は相転移を誘発し、新規物性をもたらす可能性を持つため、高圧物性の研究は興味深い。最近では、水素化物やニッケル酸化物が圧力下で高温超伝導体を示す候補物質として大きな注目を集めている。

本研究では、ナノダイヤモンド (ND) 中の NV 中心を量子センサとして用い、ダイヤモンドアンビルセル (DAC) 内の約 20 GPa における圧力分布を広視野光学顕微鏡を用いて可視化することに成功した。圧力および非静水圧性の空間分布は、静水圧および一軸応力条件を考慮したモデルを用いて、ODMR スペクトルをフィッティングすることで取得した。さらに、圧力媒体中に ND を導入する 2 つの手法を比較し、ND の導入方法が非静水圧性の程度に影響を与えることを明らかにした。本手法は、圧力誘起現象の解明に有効なイメージングプラットフォームを提供するとともに、磁場など他の物理量への応用も可能である。[13]。

スピン波の量子イメージング

磁性体におけるスピン波伝搬を広い周波数帯域で可視化することは、スピン波ダイナミクスの理解と応用において重要である。NV 中心は、コヒーレントなスピン波の振幅および位相を定量的に測定可能である。しかし、従来の測定手法では、NV スピンの共鳴周波数と一致するスピン波のみが検出可能であった。本研究では、交流ゼーマン効果を利用することで、外部磁場を変更することなく、最大 567 MHz の周波数デチューニングにわたり、イットリウム鉄ガーネット薄膜中を伝搬するスピン波の可視化が可能であることを実証した。この成果は、スピン波センシングにおける NV 中心の適用範囲を拡張し、金属強磁性体やファンデルワールス磁性体など多様な磁性材料におけるダイナミクスの定量的研究へつながる [8]。

非線形スピン波ダイナミクスの量子イメージング

磁性体中を伝搬するスピン波は、励起と緩和の競合により大振幅領域で非線形挙動を示し、非線形波動ダイナミクスを探究するための有力なプラットフォームを提供する。特に、運動量を担う有限波数のスピン波は、非線形領域において非線形緩和を受けるとともに波数変調を生じる。この非線形性はこれまで実験的に観測されているが、理論との定量的比較は十分に行われていない。

本研究では、減衰率の異なる 2 種類のイットリウム鉄ガーネット薄膜における非線形スピン波伝搬を、NV 中心を用いて広視野で可視化した。マイクロ波励起強度に対するスピン波の振幅および位相の定量

分布を取得した結果、スピン波振幅に非線形効果が顕在化する閾値が存在することを観測し、その閾値が両試料において四マグノン散乱に基づく理論予測と一致することを確認した。さらに、スピン波振幅の増大に伴う多マグノン散乱の兆候を捉えることにも成功した。以上の成果は、非線形スピン波ダイナミクスの可視化に向けた新たな手法を提供するとともに、その機構の定量的な理解を深化させる上で重要な知見を与える [14]。

トポロジカル磁性体の磁壁の観測

反強磁性体におけるスピンカイラリティは、スピントロニクスに新たな可能性をもたらす。カゴメ反強磁性体 Mn_3Sn は、反強磁性秩序パラメータを電氣的に検出・制御できる代表的な物質である。しかし、その磁気八極子に由来する磁気モーメントが極めて小さいため、磁気テクスチャの直接観測は困難であった。

我々は、走査型 NV 中心顕微鏡を用いて Mn_3Sn からの漏洩磁場を観測することで、この課題に取り組んだ。高品質単結晶 Mn_3Sn 薄膜において、空間分解された固有磁区および磁壁を定量的に可視化し、カゴメ面内における磁気八極子の偏極角、磁区の局所磁化、磁壁の幅およびカイラリティ、さらに磁壁中の八極子秩序を明らかにした。

NV 中心を用いたナノスケール観測は、従来のマクロ測定を補完する強力な手法であり、カイラル反強磁性の理解の深化とスピントロニクス応用の展開に向けた基盤を提供する [11]。

量子スピン顕微鏡の収差と解像度

NV 中心を用いる量子スピン顕微鏡 (QSM) は、回折限界に迫る高い空間分解能と広視野を両立して磁場を定量イメージングできる。一般的な QSM では透明なダイヤモンドを通してフォトルミネッセンスを検出するが、この構成は不可避免的に収差を伴い、画像の分解能やコントラストを低下させる要因となる。

本研究では、特にダイヤモンド厚さに依存する光学収差の影響を詳細に検討した。まず、収差を考慮した厳密な回折モデルを導入し、NV 中心の光学像を再現した。その結果、本モデルはダイヤモンド内部の異なる深さに存在する単一 NV 中心の共焦点像を高精度に再現できることを確認した。さらに、このモデルを広視野顕微鏡へ拡張した。解析に基づき、収差に起因する分解能制約を定量的に評価し、その改善策としてダイヤモンドの薄膜化が有効であることを提案した。また、ダイヤモンド透過に伴う収差の影響下にある光学系において分解能を定量評価するための手法を提示した。例えば、開口数 $NA = 0.7$ の対物レンズを用いた典型的な顕微鏡では、厚さ 30 μm のダイヤモンドを介して回折限界に到達可能であり、厚さ 100 μm の場合でも約 1 μm の分解能が得られることを示した [10]。

<受賞>

- [1] JPSJ Papers of Editors' Choice 受賞 (Journal of the Physical Society of Japan) (R. Suda, K. Uriu, K. Yamamoto, M. Sasaki, K. Sasaki, M. Einaga, K. Shimizu, K. Kobayashi) (2025 年 11 月) .
- [2] R. Ota, Spin Camp Student Presentation Award, The 14th Workshop on Semiconductor / Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (Nasu, Japan, September 29–October 1, 2025).
- [3] K. Yamamoto, High Pressure Research Student Poster Award, 29th International Conference on High Pressure Science and Technology (AIRAPT-29) (Matsuyama, Ehime, Japan, September 28–October 3, 2025).
- [4] 西村俊亮、第 59 回 (2025 年秋季) 応用物理学会講演奨励賞、「銅酸化物超伝導体の電流に誘起された量子渦状態の可視化」(2025 年 11 月 13 日)。
- [5] 須田涼太郎、ポスター賞、ダイキン ipi シンポジウム「CREST 合同 量子フロンティアの明日」(東京大学、2025 年 11 月 25–27 日)。
- [6] 西村俊亮, ISS2025 Best Presentation Award, 38th International Symposium on Superconductivity (ISS2025) (Nagasaki, Japan, December 02–04, 2025).
- [7] 西村俊亮、令和 7 年度理学系研究科奨励賞 (博士課程) 受賞 (2026 年 3 月 10 日)。
- <報文>
- (原著論文)
- [8] 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* **23**, 054001/1–22 (2025).
- [9] Y. Nakamura, S. Nishimura, T. Iwasaki, S. Nakaharai, S. Ogawa, Y. Morita, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Sasaki, K. Kobayashi, “Systematic investigation of dynamic nuclear polarization with boron vacancy in hexagonal boron nitride,” *Physical Review B* **111**, 195404/1–14 (2025) [Editors' Suggestion].
- [10] S. Nishimura, M. Tsukamoto, K. Sasaki, K. Kobayashi, “Investigations of optical aberration on quantum diamond microscopy toward high spatial resolution and sensitivity,” *Review of Scientific Instruments* **96**, 053706/1–17 (2025).
- [11] 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 chiral domain walls in an octupole-ordered antiferromagnet,” *Physical Review B* **112**, L020404/1–7 (2025) [Editors' Suggestion].
- [12] M. Tokuda, F. Matsumoto, N. Maeda, T. Higashihara, M. Nakao, M. Watanabe, S.-H. Lee, R. Nakamura, M. Maeda, N. Jiang, D. Yue, H. Narita, K. Aoyama, T. Mizushima, J. Ohe, T. Ono, X.-F. Jin, K. Kobayashi, Y. Niimi, “Observation of the crossover from quantum fluxoid to half-quantum fluxoid in a chiral superconducting device,” *Science Advances* **11**, eadw6625/1–7 (2025).
- [13] R. Suda, K. Uriu, K. Yamamoto, M. Sasaki, K. Sasaki, M. Einaga, K. Shimizu, K. Kobayashi, “GPa Pressure Imaging Using Nanodiamond Quantum Sensors,” *Journal of the Physical Society of Japan* **94**, 124707/1–9 (2025) [Papers of Editors' Choice].
- [14] K. Ogawa, M. Tsukamoto, Y. Mori, D. Takafuji, J. Shiogai, K. Ueda, J. Matsuno, Jun-ichiro Ohe, K. Sasaki, K. Kobayashi, “Quantitative imaging of nonlinear spin-wave propagation using diamond quantum sensors,” *Physical Review B* **112**, 224411/1–11 (2025).
- (学位論文)
- [15] 中村祐貴、「六方晶窒化ホウ素における光学活性スピン欠陥の実験的研究」(博士論文、2026 年 3 月)。
- [16] 西村俊亮, “Visualization of superconducting vortices and their dynamics” (博士論文、2026 年 3 月) (令和 7 年度理学系研究科奨励賞)。
- [17] 原田怜、「ダイヤモンド量子センサを用いた鉄系強磁性半導体の研究」 (修士論文、2026 年 3 月)。
- (著書)
- [18] 小林研介：中学校理科教科書 令和 7 年度版「未来へひろがるサイエンス 1–3」・「未来へひろがるサイエンス：指導書」、新興出版社啓林館 (2025 年 2 月)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [19] K. Sasaki, Y. Nakamura, S. Nishimura, T. Iwasaki, S. Nakaharai, S. Ogawa, Y. Morita, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Kobayashi, “Investigation of dynamic nuclear polarization with boron vacancy defects in hexagonal boron nitride,” Boron Nitride Workshop 2025 (BNW2025) (Nashville, Tennessee, USA, May 12–16, 2025) [oral].
- [20] K. Kobayashi, “Probing Condensed Matter Systems with Diamond Quantum Sensors,” The Quantum Sensing Gordon Research Conference “Diversity of Sensing Architectures for New Physics and Real-World Applications” (Les Diablerets, Switzerland, July 13–18, 2025) [poster].
- [21] T. Delord, R. Monge, Y. Nakamura, O. Bach, J. Shao, A. Lozovoi, A. A. Wood, K. Sasaki, K. Kobayashi, C. A. Meriles, “Sensing charges

and carriers dynamics via widefield optical spectroscopy of atomic defects,” The Quantum Sensing Gordon Research Conference “Diversity of Sensing Architectures for New Physics and Real-World Applications” (Les Diablerets, Switzerland, July 13–18, 2025) [poster].

29th International Conference on High Pressure Science and Technology (AIRAPT-29)(Matsuyama, Ehime, Japan, September 28–October 3, 2025)

- [22] K. Yamamoto, R. Suda, K. Uriu, M. Sasaki, M. Einaga, K. Shimizu, K. Sasaki, K. Kobayashi, “High-pressure magnetic transition in iron observed via diamond quantum sensing” [poster] [High Pressure Research (HPR) 賞受賞].
- [23] R. Suda, K. Uriu, K. Yamamoto, M. Sasaki, K. Sasaki, M. Einaga, K. Shimizu, K. Kobayashi, “Imaging Gigapascal Pressures with Nanodiamond Quantum Sensors” [oral].
- [24] K. Uriu, R. Suda, K. Yamamoto, M. Einaga, K. Shimizu, K. Sasaki, K. Kobayashi, “Development of wide-field magnetic imaging at high pressure and low temperature with diamond quantum sensor” [oral].
- [25] Y. Shimizu, K. Masaki, K. Sasaki, K. Kobayashi, K. Kitagawa, “Development of ultrahigh-pressure optically detected magnetic resonance and search for exotic superconductivity” [poster].

The 14th Workshop on Semiconductor / Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (Nasu, Japan, September 29–October 1, 2025)

- [26] D. Shibusaki, H. Gu, R. Hasegawa, T. Taniguchi, T. Teraji, M. Miyakawa, K. Sasaki, K. Kobayashi, “Characterization of Diamond Quantum Sensors with Narrow Linewidth for High-Precision Magnetic Field Imaging” [poster].
- [27] K. Sasaki, Hideyuki Watanabe, T. Teraji, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Kobayashi, “Nuclear magnetic resonance of van der Waals materials using diamond quantum sensors” [poster].
- [28] R. Ota, S. Nishimura, K. Honda, T. Tsuji, H. Ozawa, T. Yamashita, M. Hatano, T. Iwasaki, K. Sasaki, K. Kobayashi, “Observation of superconducting quantum vortices in NbN using diamond quantum sensors” [oral] [発表賞受賞].
- [29] R. Hasegawa, H. Gu, D. Shibusaki, T. Ishii, M. Tanaka, T. Ideue, T. Taniguchi, T. Teraji, M. Miyakawa, K. Sasaki, K. Kobayashi, “Research on 2D van der Waals magnetic materials using diamond quantum sensors” [oral].

- [30] S. Nishimura, T. Tsuji, T. Iwasaki, M. Hatano, K. Sasaki, K. Kobayashi, “Imaging of Current-Induced Superconducting Vortex Nucleation in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$,” The International Workshop on “Exotic Quantum Phases due to Unhappy Electrons” (University of Tokyo, November 12–14, 2025) [poster].
- [31] S. Nishimura, T. Tsuji, T. Iwasaki, M. Hatano, K. Sasaki, K. Kobayashi, “Imaging of Current-Driven Vortex Formation in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Superconductor,” 38th International Symposium on Superconductivity (ISS2025) (Nagasaki, Japan, December 02–04, 2025) [oral] [ISS2025 Best Presentation Award].

招待講演

- [32] K. Sasaki, Y. Nakamura, S. Nishimura, T. Iwasaki, S. Nakaharai, S. Ogawa, Y. Morita, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Kobayashi, “Properties of boron vacancy defects in hexagonal boron nitride,” 2025 KPS Spring Meeting (Daejeon, Korea, April 23–25, 2025).
- [33] K. Sasaki, “Optically addressable spin defects in hexagonal boron nitrides,” Workshop on Material, Photonics, and Quantum Technology (WM-PQT2025) (Asahikawa, June 11–13, 2025).
- [34] K. Kobayashi, “Quantum Spin Microscope for Condensed Matter Physics,” Focus Program on the Mesoscopic Physics: Present Challenges and Future Opportunities (APCTP, Pohang, Korea, August 24–29, 2025).
- [35] K. Kobayashi, “Exploring Condensed Matter Physics with a Quantum Spin Microscope,” International Conference and Expositum on Quantum Sensing and Metrology (ICEQSM 2025) (Kolkata, India & Online, Sep. 10–13, 2025) [keynote].
- [36] K. Kobayashi, “Quantum Spin Microscopy for Condensed Matter Physics,” The 9th Symposium for the Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics and the 8th Symposium on International Joint Graduate Programs in Materials Science and Spintronics (Sendai, Japan, November 4–7, 2025).
- [37] K. Sasaki, “Visualizing condensed matter physics with quantum sensors,” Photonics and Electromagnetics Research Symposium 2025 (PIERS2025) (Chiba, Japan, November 5–9, 2025).
- [38] K. Sasaki, “Exploring Condensed Matter Physics through Quantum Sensor,” The 14th International Conference on Advanced Materials and Devices (ICAMD2025) (Busan, Korea, December 8–12, 2025).

(国内会議)

一般講演

- [39] 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 NV⁻ 中心における励起三重項ゼロ磁場分裂の圧力応答測定」、第 70 回物性若手夏の学校（滋賀、2025 年 7 月 30 日）（口頭）。
- 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会（名城大学、2025 年 9 月 7 日–10 日）
- [40] 西村俊亮、辻起行、岩崎孝之、波多野睦子、佐々木健人、小林研介：「銅酸化物超伝導体の電流に誘起された量子渦状態の可視化」（口頭）[応用物理学会講演奨励賞]。
- [41] 太田怜英、西村俊亮、本田浩輝、辻起行、小澤勇斗、山下太郎、波多野睦子、岩崎孝之、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド量子センサによる NbN 超伝導量子渦の観測」（口頭）。
- [42] 中村祐貴、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炭素関連スピン欠陥の研究」（口頭）。
- [43] 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 NV⁻ 中心における励起三重項ゼロ磁場分裂の圧力応答測定」（口頭）。
- 日本物理学会第 80 回年次大会（広島大学、2025 年 9 月 16–19 日）
- [44] 顧豪、長谷川亮太、柴崎大輝、石井智博、田中未羽子、井手上敏也、谷口尚、寺地徳之、宮川仁、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 2 次元ファンデルワールス物質 CrI₃ の磁性相転移の観測」（口頭）。
- [45] 長谷川亮太、顧豪、柴崎大輝、谷口尚、寺地徳之、宮川仁、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド量子センサを用いた二次元ファンデルワールス磁性体測定の試み」（ポスター）。
- [46] 塚本萌太、T. Chen、一色弘成、辻起行、佐々木健人、岩崎孝之、波多野睦子、大谷義近、中辻知、小林研介：「非コリニア反強磁性体 Mn₃Ge の磁区と磁壁の観測」（口頭）。
- [47] 原田怜、顧豪、原拓嵩、Le Duc Anh、田中雅明、谷口尚、寺地徳之、宮川仁、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド量子センサーによる Fe 系強磁性半導体の磁性測定」（口頭）。
- [48] 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相転移の観測」（口頭）。
- [49] 柴崎大輝、顧豪、長谷川亮太、谷口尚、寺地徳之、宮川仁、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド量子センサを用いた精密磁場測定」（口頭）。
- [50] 瓜生健心、榮永茉莉、佐々木岬、須田涼太郎、山本航輝、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用いた低温高圧力下磁気イメージング法の開発」（口頭）。
- ダイキン ipi シンポジウム「CREST 合同 量子フロンティアの明日」（東京大学、2025 年 11 月 25–27 日）
- [51] 瓜生健心、須田涼太郎、山本航輝、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用いた高圧力下磁気イメージング手法の開発」（ポスター）。
- [52] 太田怜英、西村俊亮、本田浩輝、辻起行、山下太郎、波多野睦子、岩崎孝之、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド量子センサを用いた NbN 量子渦の動きの観測」（ポスター）。
- [53] 河本悠汰、瓜生健心、須田涼太郎、山本航輝、榮永茉莉、清水克哉、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンドを用いた超高圧力下での量子現象の開拓」（ポスター）。
- [54] 柴崎大輝、顧豪、長谷川亮太、谷口尚、寺地徳之、宮川仁、佐々木健人、小林研介：「高精度磁場イメージングに向けた狭線幅のダイヤモンド量子センサの特性評価」（ポスター）。
- [55] 須田涼太郎、瓜生健心、山本航輝、佐々木健人、榮永茉莉、清水克哉、小林研介：「ダイヤモンド NV⁻ 中心における励起三重項ゼロ磁場分裂の圧力応答測定の試み」（ポスター）[ポスター賞受賞]。
- [56] 中村祐貴、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空孔中心の動的核偏極」（ポスター）。
- [57] 西村俊亮、辻起行、岩崎孝之、波多野睦子、佐々木健人、小林研介：「銅酸化物超伝導の電流に誘起された量子渦状態の可視化」（ポスター）。
- [58] 長谷川亮太、顧豪、柴崎大輝、谷口尚、寺地徳之、宮川仁、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド量子センサを用いた二次元ファンデルワールス物質 CrI₃ の測定」（ポスター）。
- [59] 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相転移の観測」（ポスター）。
- [60] K. Kobayashi: “Exploring Condensed Matter Physics with Diamond NV Centers,” 学術変革領域「相関設計で挑む量子創発」、2025 年領域会議（理化学研究所、2025 年 12 月 15–16 日）（口頭）。
- [61] 山本考、久我英理、佐々木健人、小林研介、塚本萌太、吉見龍太郎：「固体量子センサを用いたトポロジカル絶縁体の電流誘起スピン蓄積観測の試み」、東京大学物性研究所 量子ナノ物性研究センター Pre-kick-off ミーティング（東京大学物性研究所、2026 年 3 月 10–11 日）（ポスター）。
- [62] 山本航輝、瓜生健心、須田涼太郎、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シングによる高圧力下での鉄の磁性転移の観測」、第 73 回応用物理学会春季学術講演会（東京科学大学およびオンライン、2026 年 3 月 15 日–18 日）（口頭）。
- 招待講演

- [63] 小林研介：「ダイヤモンド量子センサを用いた物性計測」、一般社団法人量子技術による新産業創出協議会 Q-STAR 会員企業向け講演会 量子マテリアル・デバイス・センシング (MDS) 部会 (オンライン、2025 年 7 月 23 日)。
- [64] 佐々木健人：「ヘリウムイオンビーム照射で生成した六方晶窒化ホウ素量子センサの利用と評価」、第 3 回 ナノ荷電粒子ビーム産学連携委員会研究会 (名城大学、2025 年 9 月 6 日)。
- [65] 小林研介：「量子スピン顕微鏡による物性研究」、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会 (松島、2025 年 10 月 8-9 日)。
- [66] 佐々木健人：「量子センシングにおけるイオン注入の利用—量子センサーとなる空孔欠陥の生成と応用、格子ダメージの評価—」、第 2 回電子デバイスにおける原子拡散・応力現象研究会 (東京、2025 年 10 月 28 日)。
- [67] 佐々木健人：「量子センサによるナノ薄膜物性の開拓」、ATF コンファレンス (沼津、2025 年 11 月 9 日)。
- [68] 小林研介：「ダイヤモンド量子センシングの基礎と応用」、量子技術研究会、一般社団法人 科学技術と経済の会 (東京、2025 年 11 月 14 日)。
- [69] 小林研介：「量子スピン顕微鏡で切り拓く極限物性の探索」、ダイキン ipi シンポジウム「CREST 合同 量子フロンティアの明日」(東京大学、2025 年 11 月 25-27 日)。
- [70] 佐々木健人：「量子センシングの開発と応用」、ダイキン ipi シンポジウム「CREST 合同 量子フロンティアの明日」(東京大学、2025 年 11 月 25-27 日)。
- [71] 小林研介：「量子協奏」、科学技術振興機構 第 2 回ささきがけ「量子 3 領域」合同セミナー (東京、2026 年 2 月 20 日)。
- [72] 太田怜英、西村俊亮、本田浩輝、辻起行、山下太郎、岩崎孝之、波多野睦子、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド NV 中心による超伝導量子渦の観測」、電子情報通信学会 総合大会 (九州産業大学、2026 年 3 月 9-13 日)。
- [73] 小林研介：「量子スピン顕微鏡による物性研究」、東京大学物性研究所 量子ナノ物性研究センター Pre-kick-off ミーティング「物質開発・ナノ加工・先端計測の融合で切り拓く量子物性フロンティア」(東京大学物性研究所、2026 年 3 月 10-11 日)。
- [74] 小林研介：「ダイヤモンド量子スピン顕微鏡による物性研究」、日本物理学会 2026 年春季大会 シンポジウム「ダイヤモンド研究の最前線—基礎物性から応用まで—」(オンライン、2026 年 3 月 23-26 日)。
- (セミナー)
- [75] K. Kobayashi, “Mesoscopic Physics and Quantum Sensing,” Solid State Physics Laboratory (ETH Zurich, Switzerland, July 11, 2025).
- (アウトリーチ)
- [76] 小林研介：「量子力学とナノテクノロジー」、模擬講義。灘高等学校 (2025 年 4 月 2 日)。

- [77] 日本物理学会 2025-2027 年記念事業「日本物理学会監修 QurioS 物理かるた」制作協力 (2025 年 4 月)。
- [78] 小林研介：「量子力学とナノテクノロジー」、模擬講義。洛星高等学校 (2025 年 8 月 20 日)。
- [79] 小林研介：第 1 回理物同窓会 企画 (2025 年 10 月 18 日)。
- [80] 小林研介：「ナノテクノロジーと量子力学」、令和 7 年度「東大の研究室をのぞいてみよう！」プログラム、オンライン模擬講義 (2026 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。

強磁性体/ Mn_3Sn における交換バイアス効果の等温制御

交換バイアス効果は強磁性体/反強磁性体界面において観測され、スピントロニクス研究で広く用いられるが、その制御には通常昇温、磁場中冷却過程が必要である。温度変化を経ずに交換バイアスを制御する手法として重金属層からのスピン軌道トルクを用いた電流反転や電気磁気効果を示す物質を用いる方法が示されている。本研究では反強磁性層として巨視的時間反転対称性を破るワイル反強磁性体 Mn_3Sn を用いることによりその制御性を高めることを試みた [8]。Py($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$)/ Mn_3Sn 二層膜を作製し、通常の磁場中冷却過程に加えて、等温で磁場を印加することにより交換バイアス効果が制御可能であることを示した。Py の磁化と Mn_3Sn の磁気八極子秩序の間には両者を反平行にそろえる相互作用が働いていることが判明したが、Py 層を Co に置き換えると強的な結合に変化した。

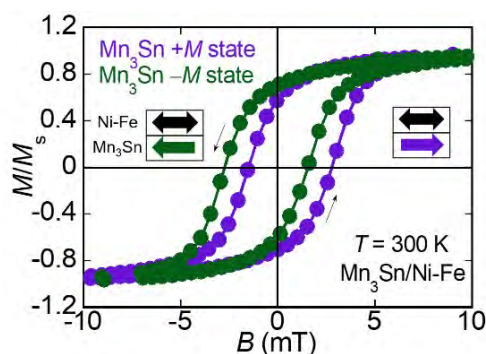


図 4.6.14: 300 K における磁場印加による Mn_3Sn の磁気状態の変化 ($\pm M$ states)、およびそれに応じた Ni-Fe に生じる交換バイアス効果の変化。

ワイル反強磁性体 Mn_3Sn における超高速電流誘起スイッチングの時間分解観測

近年、反強磁性ワイル半金属 Mn_3Sn の電气的操作は、スピントロニクスへの応用可能性から大きな注目を集めている。一方で、 Mn_3Sn の電流スイッチングが、スイッチング速度がナノ秒オーダーに制限されるジュール熱に支配されているのか、あるいはスイッチングダイナミクスがピコ秒オーダーとなる非熱的スピン軌道トルク誘起スイッチングによるものなのかについては、現在も議論が続いている。正確なスイッチング速度と根底にあるスピンダイナミクスを解明するため、本研究では時間分解磁気ドメインイメージングを用いてスイッチング過程を直接観測した。フェムト秒パルスレーザーを用いた磁気光学イメージングにより、Ta/ Mn_3Sn 多結晶薄膜のマイクロメートルスケールの磁気ドメイン構造を可視化し、サブナノ秒の電流パルス注入中の磁化スイッチングダイナミクスを観測した。その結果、スイッチング速度がパルス幅と同程度に速いこと、および反強磁性秩序が維持されたまま磁気八極子が反転する非熱的スイッチング過程が生じていることを実証した [15]。

反強磁性秩序のスピン軌道トルクの異なる二つの反転機構の実証

スピン軌道トルク (SOT) による反強磁性秩序の反転は、反強磁性体の磁気ダイナミクスの時間スケールに対応する。その時間スケールは、強磁性体より 2~3 桁速いピコ秒程度で実現すると予測され、高速駆動メモリデバイスに活用できると期待されている。しかし、印加電流パルスによるジュール熱により、反強磁性体の温度がネール点を超えると、数 10 ナノ秒の時間を要する「温度補助機構」により反転が起き、非熱的な超高速 SOT 反転を妨げる。本研究では、カイラル反強磁性体 Mn_3Sn における SOT 反転の機構を Mn_3Sn の膜厚で制御できることを示した [19]。厚膜デバイスでは SOT 印加時に磁気秩序が失われる温度補助機構を通し反転するのにに対し、薄膜デバイスではジュール熱の効果が抑制され磁気秩序が終始保たれる「内因性機構」で反転が起きる。また後者では、より短い電流パルスを用いた高速 SOT 反転が可能であることを実証した。本研究は、高速駆動かつエネルギー効率の高い反強磁性メモリデバイスを設計するための指針となる。

反強磁性体 Mn_3X の組成比による転移温度及び輸送特性の制御

アンチカイラル反強磁性体の一群である Mn_3X ($\text{X} = \text{Sn}, \text{Ge}, \text{Ga}$) は微小な磁化を持つのににもかかわらず、フェルミ面近傍の磁気ワイル点に起因して、異常ホール効果等従来強磁性体に匹敵する大きな磁気応答を示す。本研究では、スパッタ法で作製した $\text{Mn}_3\text{Sn}_{1-x}\text{Ga}_x$ 薄膜における組成比の影響を調べ、

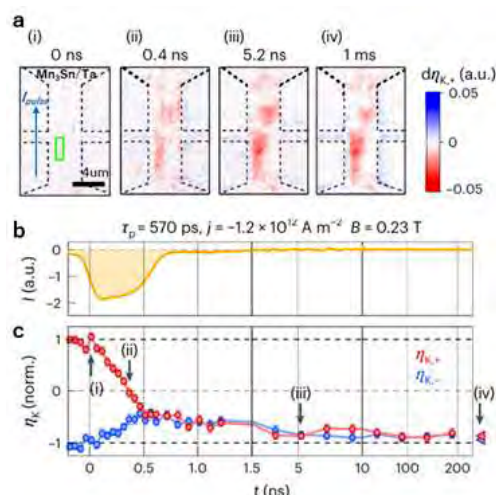


図 4.6.15: 異なる遅延時間における $\text{Mn}_3\text{Sn}/\text{Ta}$ デバイス上のカー楕円度 η_k の時間分解磁気ドメイン画像。0 ns に 570 ps のパルス電流を印加した。黒の破線はデバイスの端を示す。(b) 印加された 570 ps パルス電流の波形。(c) (a) に示された緑色の矩形領域における、パルス電流によって誘起されたカー楕円度ダイナミクス。信号は、1 ミリ秒の電流によってリセットされた η_k の最大値で規格化されている。赤(青)は、初期状態が $\eta_k = +1$ ($\eta_k = -1$) である場合のダイナミクスデータを示す。パルス電流の速度に追従して η_k が正の状態から負の状態へ切り替わる様子が明確に観察される。

ドーピング量、すなわちフェルミエネルギーに応じてネール温度が 420 K から 500 K の範囲で調整可能であること、また 300 K における異常ホール伝導度が 10 S/cm から 75 S/cm の範囲で調整可能であることを示した[14]。 Mn_3Sn に見られるアンチカイラル反強磁性相からヘリカル相への磁気相転移が Ga ドーピングによって抑制されることも示した。本研究は、デバイス応用に向けた Mn_3X 材料の最適化に関する知見を提供する。

4.6.2 電子系および磁性体における量子エンタングルメント

個々の量子状態の直積に分解できない状態は量子もつれ (Quantum entanglement) と呼ばれ、非局所性を始めとする量子力学特有の現象をもたらす。量子コンピュータにおいてはいかにそのような量子ビットを増やすかが一つの課題であるが、固体中ではアボガドロ数個のマクロな数の粒子が量子もつれ状態になる事がある。そのスピン系での例が量子スピン

液体 (Quantum spin liquid) であり、電子系での例が異常金属 (Strange Metal) である。

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、 $T_Q \sim 2$ K で強四極子秩序を、 $T_c \sim 0.2$ 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 [7]。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。

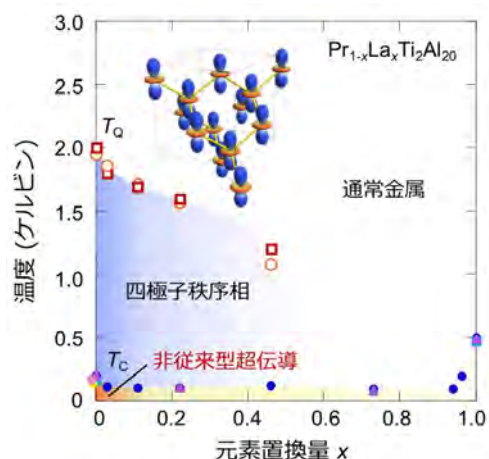


図 4.6.16: $\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x\text{Ti}_2\text{Al}_{20}$ の低温相図。挿入図は四極子秩序を表す。

4.6.3 共線反強磁性異常金属におけるゼロ磁場異常ホール効果の発見

電子相関の強い系におけるバンドトポロジーの理解は、物性物理学における重要な未解決課題であり、新奇な量子現象・量子状態の創出に向けた研究フロンティアとなっている。特に、磁化を持たないにもかかわらず巨大な異常ホール効果や異常ネルンスト効果を示す機能性反強磁性体は、次世代スピントロニクス材料として注目を集めている。遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) は、バンドトポロジー研究の有力なプラットフォームであり、2次元ヘテロ構造では分数量子ホール状態、非フェルミ液体、非従来型超伝導など多様な量子現象が報告されている。さらに、バルク TMD においては、層間への磁性遷移金属イオンのインターカレーションによりキャリア密度やバンドトポロジーを制御可能であり、磁性と電子相関が協奏する新規物性の発現が期待される。本研究では、 $V_{1/3}\text{NbS}_2$ を対象に、電気輸送測定、中性子回折、および理論計算を組み合わせた包括的研究を行った。その結果、ほぼ磁化を持たない共線反強磁性状態において、非フェルミ液体領域で異常ホール効果が発現することを見出した [10]。本成果は、従来のフェルミ液体に基づく準粒子描像を超え、電子相関とトポロジーの新たな結合を示す重要な知見である。

<受賞>

- [1] Satoru Nakatsuji, Highly Cited Researchers 2025 2025/11/14
- [2] Takanori Taniguchi, Kazumasa Hattori, Makoto Yoshida, Hikaru Takeda, Shota Nakamura, Toshiro Sakakibara, Masaki Tsujimoto, Akito Sakai, Yosuke Matsumoto, Satoru Nakatsuji, and Masashi Takigawa, 第 31 回 (2026 年) 日本物理学会論文賞 2026/1/16
- [3] 酒井 明人 令和 7 年度 (第 29 回) 丸文研究奨励賞 2026/3/3

<報文>

(原著論文)

- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 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” Phys. Rev. Mater. **9**, 014202 (2025).

- [7] 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 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ ” Nat. Commun. **16**, 2114 (2025).
- [8] M. Asakura, T. Higo, T. Matsuo, Y. Tsushima, S. Kurosawa, R. Uesugi, D. Nishio-Hamane, S. Nakatsuji “Magnetic field switching of exchange bias in a metallic FM/AFM heterostructure at room temperature” Nano Lett. **25**, 10294 (2025).
- [9] C. J. Lygouras, J. Zhang, J. Gautreau, M. Pula, S. Sharma, S. Gao, T. Berry, T. Halloran, P. Orban, G. Grissonnanche, J. R. Chamorro, T. Mikuri, D. K. Bhoi, M. A. Siegler, K. J.T. Livi, Y. Uwatoko, S. Nakatsuji, B. J. Ramshaw, Y. Li, G. M. Luke, C. L. Broholm, T. M. McQueen “Type I and type II superconductivity in a quasi-2D Dirac metal” Mater. Adv. **6**, 1685 (2025).
- [10] M. K. Ray, M. Fu, Y. Chen, T. Chen, T. Nomoto, S. Sakai, M. Kitatani, M. Hirayama, S. Imajo, T. Tomita, A. Sakai, D. Nishio-Hamane, G. T. McCandless, M.-T. Suzuki, Z. Xu, Y. Zhao, T. Fennel, Y. Kohama, J. Y. Chan, R. Arita, C. Broholm, S. Nakatsuji “Zero-field Hall effect emerging from a non-Fermi liquid in a collinear antiferromagnet $V_{1/3}\text{NbS}_2$ ” Nat. Commun. **16**, 3532 (2025).
- [11] Q.-F. Li, G. Pan, X. Zhang, S. Nakatsuji, W. Jiang, X. Y. Xu, X. Wu “Loop-Current Fluctuations Mediated Chiral d -Wave Pairing in Kagome Lattice” Chin. Phys. Lett. **42**, 057302 (2025).
- [12] K. Ma, I. Plokhikh, J. N. Graham, C. Mielke III, V. Szazgari, H. Nakamura, S. S. Islam, S. Shin, P. Král, O. Gerguri, H. Luetkens, F. O. von Rohr, J. Yin, E. Pomjakushina, C. Felser, S. Nakatsuji, B. Wehinger, D. J. Gawryluk, S. Medvedev, Z. Guguchia “Correlation between the dome-shaped superconducting phase diagram, charge order, and normal-state electronic properties in LaRu_3Si_2 ” Nat. Commun. **16**, 6149 (2025).
- [13] 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 chiral domain walls in an octupole-ordered antiferromagnet” Phys. Rev. B **112**, L020404 (2025).
- [14] M. Raju, T. Matsuo, M. B. Balkew, D. Nishio-Hamane, T. Higo, C. Broholm, S. Nakatsuji “Tunable high Néel temperature and large anomalous Hall response in antiferromagnetic Weyl semimetal $\text{Mn}_3\text{Sn}_{1-x}\text{Ga}_x$ thin films” Commun. Mater. **6**, 205 (2025).
- [15] K. Ogawa, H. Tsai, N. Yoshikawa, T. Matsuo, Y. Tsushima, M. Asakura, H. Peng, T. Matsuda, T. Higo, S. Nakatsuji, R. Shimano “Ultrafast time-resolved observation of non-thermal current-induced switching in an antiferromagnetic Weyl semimetal” Nat. Mater. **25**, 434–439 (2026).

- [16] Tomas Jungwirth, Jairo Sinova, Rafael M. Fernandes, Qihang Liu, Hikaru Watanabe, Shuichi Murakami, Satoru Nakatsuji, Libor Šmejkal “Symmetry, microscopy and spectroscopy signatures of altermagnetism” *Nature* **649**, 837–847 (2026).
- [17] Hanshen Tsai, Mihiro Asakura, Shun’ichiro Kurosawa, Satoru Nakatsuji “Topological magnets for innovating quantum electronics” *Jpn. J. Appl. Phys.* **64**, 020801 (2025).
- [18] A. Sakai, S. Nakatsuji “Berry curvature driven transverse thermoelectric generation in topological magnets” *Sci. Technol. Adv. Mater.* **26**, 2554047 (2025).
- [19] T. Matsuo, T. Higo, D. Nishio-Hamane, T. Matsuda, R. Uesugi, H. Tsai, K. Kondou, S. Miwa, Y. Otani, and S. Nakatsuji. “Crossover between intrinsic and temperature-assisted regimes in spin-orbit torque switching of antiferromagnetic order” arXiv:2510.27138v2
- (学位論文)
- [20] 朝倉 海寛 “Investigation of Interlayer Magnetic Coupling in Chiral Antiferromagnet Based Multilayers” (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・博士論文) (2026).
- [21] 黒沢 駿一郎 “Magneto-thermoelectric effects in thin films of novel topological magnets and development of transverse thermoelectric devices” (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・博士論文) (2026).
- [22] 小川 瑛生 “ノンコリニア反強磁性体 Mn_3Sn を用いた多層膜構造素子における電流誘起磁気反転の実験的研究” (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・修士論文) (2026).
- [23] 立石 真之 “反強磁性体 Mn_3Sn 電極を用いたトンネル接合における磁気抵抗効果の結晶方位依存性” (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・修士論文) (2026).
- [24] 山田 祥悟 “Intrinsic and thermal effects of current-driven fast switching of noncollinear antiferromagnetic states” (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・修士論文) (2026).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [25] Mihiro Asakura, “Manipulation of chiral magnetic order by interfacial magnetic coupling” APS Global Physics Summit 2025 2025/3/18
- [26] Takumi Matsuo, “Thermal contribution to the spin-orbit torque control of the antiferromagnetic order in the Weyl semimetal Mn_3Sn ” APS Global Physics Summit 2025 2025/3/17
- [27] Satoru Nakatsuji, “Flat bands, exotic orders and their control” International Workshop “Flat Bands, Strong Correlations, and Heavy Fermions” 2025/3/31
- [28] Mihiro Asakura, “Manipulation of chiral magnetic order by interfacial magnetic coupling” JHU IQM Group Meeting 2025/3/25
- [29] Satoru Nakatsuji, “Manipulation of Large Responses due to Multipoles on Geometric Frustrated Lattices” The 13th International Conference on Highly Frustrated Magnetism(HFM2025) 2025/5/29
- [30] Akito Sakai, “Strange metal and superconductivity in the strongly correlated multipole system” Max Planck-UBC-UTokyo Center for Quantum Materials Summer School 2025 2025/5/7
- [31] Mingxuan Fu, “Magnetic-Field Tuned Quantum Criticality and Fermi Surface Evolution in Multipolar Kondo System $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ ” International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2025 (SCES 2025) 2025/7/9
- [32] Mingxuan Fu, “The Strange Universe of Quantum Phases Driven by Interplay between Multipoles and Conduction Electrons” Condensed Matter Seminar, University of British Columbia (UBC) 2025/7/17
- [33] Katsuhiko Tanaka, “Tunnel magnetoresistance effect with an altermagnet Cr-doped RuO_2 ” International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2025 (SCES 2025) 2025/7/8
- [34] Satoru Nakatsuji, “Topological Antiferromagnets for Microwave Spintronics” Workshop on Real and Momentum Space Topology 2025/7/25
- [35] Satoru Nakatsuji, “Spintronics of Topological Antiferromagnets & Altermagnets” International Symposium on Spintronics with Antiferromagnets and Altermagnets (SAA2025) 2025/10/8
- [36] Satoru Nakatsuji, “Epitaxial Noncollinear Antiferromagnetic Devices for Microwave Spintronics” The 70th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2025) 2025/10/29
- [37] Takumi Matsuo, “Disentangling thermal contributions to the spin-orbit torque switching of a chiral antiferromagnet” The 70th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2025) 2025/10/30
- [38] Satoru Nakatsuji, “Topological antiferromagnets and altermagnets: Effects of spin splitting bands and correlation” CIFAR Quantum Materials Fall 2025 Program Meeting 2025/11/5
- 招待講演
- [39] 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
- [40] Mihiro Asakura, “Manipulation of chiral magnetic order by interfacial magnetic coupling” APS Global Physics Summit 2025 2025/3/18

- [41] Satoru Nakatsuji, “Flat bands, exotic orders and their control” International Workshop “Flat Bands, Strong Correlations, and Heavy Fermions” 2025/3/31
- [42] Satoru Nakatsuji, “Manipulation of Large Responses due to Multipoles on Geometric Frustrated Lattices” The 13th International Conference on Highly Frustrated Magnetism(HFM2025) 2025/5/29
- [43] Akito Sakai, “Strange metal and superconductivity in the strongly correlated multipole system” Max Planck-UBC-UTokyo Center for Quantum Materials Summer School 2025 2025/5/7
- [44] Mingxuan Fu, “Magnetic-Field Tuned Quantum Criticality and Fermi Surface Evolution in Multipolar Kondo System PrV₂Al₂₀” International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2025 (SCES 2025) 2025/7/9
- [45] Mingxuan Fu, “The Strange Universe of Quantum Phases Driven by Interplay between Multipoles and Conduction Electrons” Condensed Matter Seminar, University of British Columbia (UBC) 2025/7/17
- [46] Satoru Nakatsuji, “Topological Antiferromagnets for Microwave Spintronics” Workshop on Real and Momentum Space Topology 2025/7/25
- [47] Satoru Nakatsuji, “Spintronics of Topological Antiferromagnets & Altermagnets” International Symposium on Spintronics with Antiferromagnets and Altermagnets (SAA2025) 2025/10/8
- [48] Satoru Nakatsuji, “Epitaxial Noncollinear Antiferromagnetic Devices for Microwave Spintronics” The 70th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2025) 2025/10/29
- [49] Satoru Nakatsuji, “Topological antiferromagnets and altermagnets: Effects of spin splitting bands and correlation” CIFAR Quantum Materials Fall 2025 Program Meeting 2025/11/5
- [50] Satoru Nakatsuji, “Novel magnetic phenomena and their manipulation in antiferromagnets on geometrically frustrated lattices” The 17th TOYOTA RIKEN International Workshop Ruthenates and Emerging Quantum Materials (REQM2025) 2025/12/6
- [51] Satoru Nakatsuji, “Topological Antiferromagnetic & Altermagnetic Spintronics” Future Asia Conference on Spintronics and Magnetic Recording Technologies (FAST2026) 2026/2/2
- (国内会議)
- 一般講演
- [52] 山田祥悟, “Pulse width dependence on spin-orbit torque switching in an antiferromagnet Mn₃Sn thin film” 2025 年第 72 回応用物理学会春季学術講演会 2025/3/14
- [53] Hanshen Tsai, “Pulse width dependence of Spin-Orbit Torque switching in topological antiferromagnets Mn₃Sn” 日本物理学会 2025 年春季大会 2025/3/19
- [54] 立石真之, “反強磁性体 Mn₃Sn/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
- [55] 山田祥悟, “反強磁性体 Mn₃Sn における高速電流駆動反転の観測” 日本物理学会第 80 回年次大会 (2025 年) 2025/9/16
- [56] 佐藤雅彦, “marcasite 型構造を持つ FeTe₂ の単結晶合成と異方的輸送特性について” 日本物理学会第 80 回年次大会 (2025 年) 2025/9/16
- [57] 長谷部倫太, “量子スピン液体の候補物質 NaYbSe₂ に関する物性の温度・磁場依存性” 日本物理学会第 80 回年次大会 (2025 年) 2025/9/16
- [58] Luke Pritchard Cairns, “Low-Temperature Thermodynamic Measurements of the Quantum Spin Liquid Candidate NaYbSe₂” 日本物理学会第 80 回年次大会 (2025 年) 2025/9/16
- [59] 苦米地凱大, “磁気光学カー効果を用いた非共線反強磁性体 Mn₃Sn 薄膜のアニール処理による磁区構造変化の評価” 日本物理学会第 80 回年次大会 (2025 年) 2025/9/17
- [60] 立石真之, “Fe/MgO/Mn₃Sn トンネル接合の磁気抵抗効果における結晶粒の影響” 日本物理学会第 80 回年次大会 (2025 年) 2025/9/17
- [61] 小川瑛生, “ノンコリニア反強磁性体 Mn₃Sn における多層構造と反転電流値の関係” 日本物理学会第 80 回年次大会 (2025 年) 2025/9/17
- [62] 対馬湧太郎, “元素置換によるワイル反強磁性体 Mn₃Sn 薄膜の磁気特性および磁気輸送特性の制御” 日本物理学会第 80 回年次大会 (2025 年) 2025/9/17
- [63] 田中克大, “Mn₃Sn/MgO/Mn₃Sn 接合における反強磁性トンネル磁気抵抗効果の第一原理計算” 日本物理学会第 80 回年次大会 (2025 年) 2025/9/18
- [64] Mihiro Asakura, “Isothermal manipulation of exchange bias effect induced by the chiral antiferromagnet Mn₃Sn” 第 73 回応用物理学会春季学術講演会 2026/3/18
- 招待講演
- [65] 中辻知, “非共線反強磁性体におけるスピン分裂バンドとトンネル磁気抵抗” 日本磁気学会第 253 回研究会 2025/3/13
- [66] Satoru Nakatsuji, “Topological Magnets, Manipulation of Novel Properties due to Topological Electronic Structure and Multipoles” 日本物理学会第 80 回年次大会 (2025 年) 2025/9/16
- [67] Satoru Nakatsuji, “量子マテリアルの革新的機能性とイノベーション創造” 一般社団法人量子技術による新産業創出協議会事務局、量子マテリアル・デバイス・センシング部会 2025/11/28
- [68] 中辻知, “トポロジカル磁性体の量子機能性とスピントロニクス” 日本磁気学会 第 10 回岩崎コンファレンス「磁性体がもたらす多様性と可能性」 2025/12/3-4

4.7 張研究室

張研究室は 2025 年 5 月に発足した新しい研究室である。ナノマテリアルを舞台に、物質の構造が持つ対称性に着目した物性研究を行っている。

対称性は物性を決定づけるパラメーターの一つである。一般的には原子の組み合わせと組成比によって安定な結晶構造が決まってしまうため対称性の影響だけを抽出することは困難であるが、ナノマテリアルを用いると、ミクロな結晶構造を維持したままマクロな対称性を人工的に制御することが可能である。当研究室では、二次元を中心としたナノマテリアルの持つ構造制御の自由度を活かし、未知の量子物性を示す材料の探索や新奇な機能性の開拓を目指して研究を行っている。

4.7.1 バルク光起電力効果

太陽光発電の原理になっている一般的な光起電力効果は、 p - n 接合のように異なる物質の界面で発生する。一方バルク光起電力効果 (BPVE) は均一な物質において光エネルギーを電気エネルギーに変換する効果である。光の持つ振動電場から直流電流を生成しているため、BPVE は非線形応答の一つである。BPVE は長らく BaTiO_3 のようなバルク強誘電体で研究されてきたが、 WS_2 ナノチューブで発見されたこと皮切りに、近年様々なナノマテリアルでも BPVE の研究が進められている。

Janus TMD ナノスクロール

遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) は一つの遷移金属原子の上下にカルコゲン原子が配置された二次元物質である。TMD のうち上下が異なるカルコゲン原子から構成されているものは Janus TMD と呼ばれている。上下の原子が異なることにより二次元平面状態では歪が内在した状況であり、丸めて擬一次元化したナノスクロール構造がエネルギー的に安定となる (図 4.7.17(a))。

我々は Janus MoSSe ナノスクロールの両端に金属電極を作製し、顕微鏡下における光電流測定を行うことで BPVE の観測に成功した。光を照射しない状況では電流-電圧特性 (I - V 特性) は原点を通るが、光を照射すると原点からずれ電気エネルギーを生成していることがわかる (図 4.7.17(a))。また、二次元の Janus MoSSe シートとナノスクロール構造が連続している試料を用いたところ、ナノスクロール領域でのみ BPVE が観測された。Janus を含む TMD は二次元状態では空間反転対称性は破れているものの鏡映対称性と回転対称性は有している。擬一次元構造にすることで鏡映対称性と回転対称性が更に破れ極性構造となる。この結果は、ナノスクロールによる擬一次元化と極性構造が BPVE の出現に本質的な役割を果たしていることを実験的に示している。

ナノスクロールは局所的には多層ナノチューブと類似の構造をしているが、カイラリティの観点でナ

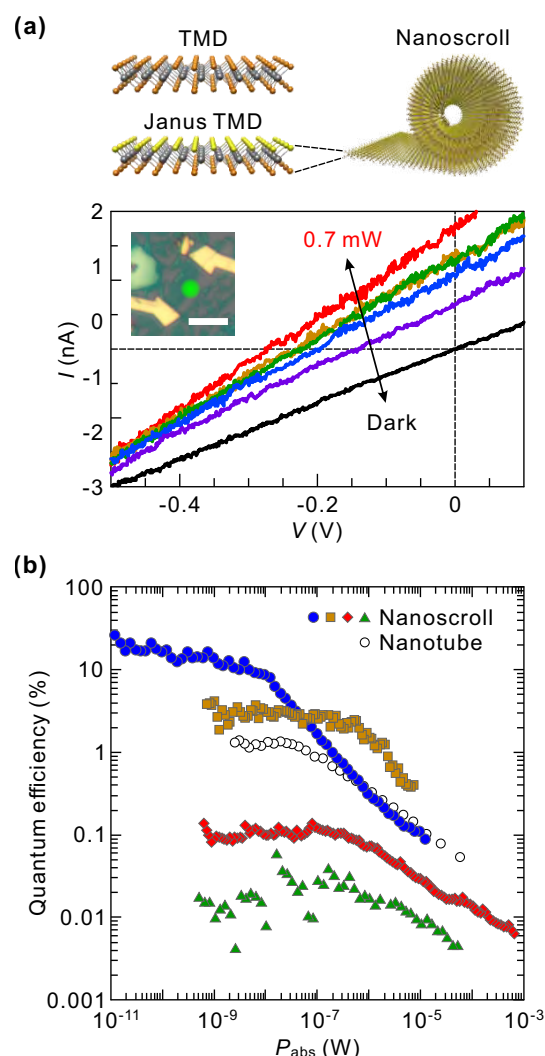


図 4.7.17: ナノスクロールにおけるバルク光起電力効果。(a) Janus TMD ナノスクロールのバルク電流-電圧特性。励起光波長 532nm、室温で測定。(b) Janus TMD ナノスクロールと TMD ナノチューブの量子効率の光強度依存性の比較。

ノチューブよりもシンプルである。化学的に合成される TMD ナノチューブでは層毎にカイラリティが異なる。BPVE は対称性に大きく依存しているため、層毎にランダムなカイラリティを持つ多層 TMD ナノチューブでは各層の効果が相殺される傾向にある。一方単一の二次元シートを丸めたナノスクロールでは局所的なカイラリティが全ての層で同じになるため、各層における効果が足し合わされる。その結果、我々のナノスクロール素子ではナノチューブ素子を 1 桁上回る量子効率を観測した (図 4.7.17(b))。

グラフェンヘテロ構造

グラフェンは二次元物質の代表格であり、線形バンド分散や量子ホール効果など特異な性質を持つ物質である。一方、炭素原子がハチの巣状に並んでいるという対称性の高い結晶構造をしているため、BPVE を含む非線形現象の研究対象からは外れていた。我々は、van der Waals 積層技術を用いてグラフェンと異なる二次元物質を重ね合わせることで、グラフェンにおいて BPVE を観測することに成功した。

二次元物質は面直方向が弱い van der Waals 力で積層しているため、格子整合を気にせず二次元物質を人工的に重ねることが許される。この手法は van der Waals 積層と呼ばれ、自然界に存在せず化学合成できない構造を人工的に作り出すことができる。重ね合わせる物質の組み合わせや結晶軸の相対角度という二つの自由度があることから、無限通りの構造が実現できる。

我々は、6 回回転対称性を持つグラフェンの上下に、それぞれ 3 回回転対称性と 2 回回転対称性を持つ六方晶窒化ホウ素 (*h*-BN) と黒リン (BP) を配置したヘテロ構造を作製した。結晶軸を並べて積層することで、ヘテロ構造全体として一つの鏡映面しか持たない極性構造を実現した。この *h*-BN/グラフェン/BP ヘテロ構造に電極をとりつけ、光照射時に発生するゼロバイアス電流を測定したところ、入射光の直線偏光の向きに応じた電流を観測した。光電流は発生する向きや偏光依存性はヘテロ構造の対称性からよく説明できることがわかった。

グラフェンはゼロギャップ半導体とも呼ばれており、幅広いエネルギー域の光子を吸収できる。実際、測定装置の制御可能範囲内で励起光の波長を変化させたところ、どの波長においても類似のゼロバイアス光電流が観測された。近赤外域でも変換効率が減少しないという結果は、可視域から近赤外域まで広がる太陽光スペクトルの多くを吸収し光電流に変換しうることを示唆している。

4.7.2 モアレ超格子による次元制御

Van der Waals 積層において重ね合わせる物質の格子定数に違いがある、もしくは結晶軸の向きがずれている (ツイストしている) 場合には、それぞれの二次元構造が干渉を起こすことで長周期構造が出現する。この長周期構造はモアレ超格子と呼ばれる。

真性一次元モアレ超格子

同一の物質をツイストして積層した構造の場合、従来、モアレ超格子は元の物質と同じ対称性を持ちツイスト角が小さい領域でのみ出現すると考えられていた。しかし我々は、二次元物質 WTe_2 を用いると高角度において WTe_2 単層とは異なる構造のモアレ超格子が出現することを見出し (図 4.7.18(a))、さらに、その次元性が二次元から一次元に低下していることを理論的に示した [6]。

図 4.7.18(b) は 62° 付近で積層した二層 WTe_2 試料における透過型電子顕微鏡像である。局所的に同じ原子配列が横方向に連続して形成され、縦方向には異なる原子配列が並んでいることが確認できる。原子スケールよりも長い周期での構造変化がモアレ超格子に対応しており、縞模様のモアレ超格子が形成されていることを示している。

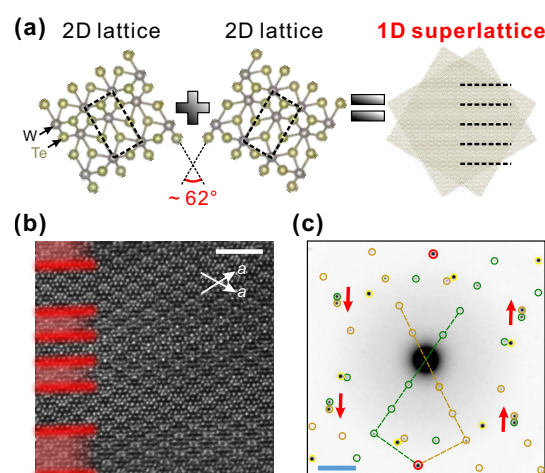


図 4.7.18: ツイスト二層 WTe_2 における一次元モアレ超格子の出現。(a) 結晶構造とモアレ超格子の模式図。(b) ツイスト二層 WTe_2 の原子像。(c) ツイスト二層 WTe_2 の電子線回折像。

モアレ超格子の周期は端数空間における各層の逆格子点の差分に対応する。縞模様のモアレ超格子が観測された試料における電子線回折像を見ると、回折点のペアが平行になっていることがわかる (図 4.7.18(c))。すなわち、モアレ超格子の元となる長周期構造が一方方向のみに存在していることを示唆している。モアレ超格子の形成は、元の結晶の格子点で作られた二次元の集合からモアレ超格子点の集合への写像と捉えることができる。縞模様のモアレ超格子に対してこの描像を厳密に検討したところ、特定の角度においてモアレ超格子点の集合が一次元になっていることが理論的に示された。

ラセミ van der Waals 積層

ツイスト角の制御による van der Waals 積層による真性一次元モアレ超格子の形成は特定の単位胞を持つ物質に限られる。具体的には五つの二次元ブレイ格子のうち長方格子と面心長方格子の二つだけである。これは、モアレ超格子点が一次元集合になるための条件から要請されるものであり、具体的には、二つの格子定数が異なりかつ鏡映対称性を有することが求められる。

真性一次元モアレ超格子の候補物質を斜方格子に拡張するため、我々はラセミ van der Waals 積層という新しいコンセプトを提唱した [1]。斜方格子の物質は、二次元平面に射影して考えると chirality (厳密には planar-chirality) を有するため鏡映対称性が破れている。この planar-chirality は二次元結晶を上下逆向きから見ると実効的に反転するため、異なる planar-chirality を持つ二つの二次元結晶を van der Waals 積層した構造を二次元平面で考えると実効的な鏡映面が存在する。これは、van der Waals 積層を用いて対称性を上げていることに対応する。化学の分野では二つの chirality を持つ分子が同数ずつ集まった集合体はラセミ体と呼ばれていることから、異なる planar-chirality を持つ二次元結晶を積層することをラセミ van der Waals 積層と名付けた。

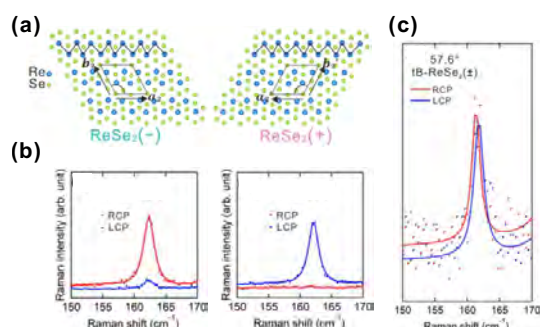


図 4.7.19: ラセミ積層による planar-chirality の制御。(a) ReSe₂ における二つの planar-chiral な結晶構造。(b) 円偏光分解ラマン測定による planar-chirality の同定。(c) ラセミ積層したツイスト二層 ReSe₂ における planar-chirality の消失。

我々は斜方格子を持つ二次元物質 ReSe₂ (図 4.7.19(a)) を用いてラセミ van der Waals 積層の概念を実証することに成功した。図 4.7.19(b) に示す通り円偏光分解ラマン測定を行うことで、単層 ReSe₂ の planar-chirality を区別することができる。円偏光によるラマン信号の強度差はラセミ積層した二層では消失しており (4.7.19(c))、planar-achiral な構造が実現していることが確認された。実際、透過型電子顕微鏡を用いて縞模様のモアレ超格子を観測するとともに電子線回折像からモアレ周期が一次元化していることも確かめられた。

<報文>

(原著論文)

- [1] X. Yang, Y. J. Zhang, K. Sato, A. Nishimura, M. Nakashima, L. Chen, K. Aso, M. Onodera, R. Moriya, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Kawakami, N. Nakatsuji, M. Koshino, Y. Yamada-Takamura, Y. Oshima, T. Machida, "Racemic van der Waals Assembly of Planar-Chiral 2D Materials for Intrinsic One-Dimensional Moiré Superlattices", *ACS Nano*, In press.
- [2] A. Nishimura, K. Kinoshita, R. Moriya, Y. Seo, M. Onodera, Y. J. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, T. Machida, "Negative differential resistance in ReSe₂/h-BN/ReSe₂ van der Waals tunnel junction", *Appl. Phys. Lett.* **127**, 213101 (2025).
- [3] K. Kuruma, M. Onodera, S. Takahashi, I. Takahashi, Y. J. Zhang, T. Machida, Y. Ozeki, "Stimulated Raman Scattering Imaging of Atomically Thin Layers and a Strained Nanotent of Hexagonal Boron Nitride", *Nanoscale* **17**, 26454 (2025).
- [4] K. Kinoshita, R. Moriya, M. Onodera, Y. J. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, T. Machida, "Resonant Tunneling in WSe₂/h-BN/WSe₂/h-BN/WSe₂ van der Waals Triple Quantum Well Device", *ACS Nano* **19**, 35592-35600 (2025).
- [5] S. Park, R. Moriya, Y. J. Zhang, K. Watabe, T. Taniguchi, T. Machida, "Emergent photo-thermoelectricity in localized bulk quantum Hall state of graphene", *Appl. Phys. Lett.* **127**, 103105 (2025).
- [6] X. Yang, Y. J. Zhang, L. Chen, K. Aso, W. Yamamori, R. Moriya, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, N. Nakatsuji, M. Koshino, Y. Yamada-Takamura, Y. Oshima, T. Machida, "Intrinsic One-Dimensional Moiré Superlattice in Large-Angle Twisted Bilayer WTe₂", *ACS Nano* **19**, 13007-13015 (2025).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [7] Arisa Nishimura, Kei Kinoshita, Rai Moriya, Yuta Seo, Momoko Onodera, Yijin Zhang, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Takao Sasagawa, Tomoki Machida, "Resonant tunneling in ReSe₂/h-BN/ReSe₂ van der Waals heterostructures", The 16th International Conference on Recent Progress in Graphene and 2D Materials Research (RPGR2025) (Toyama, Japan, November, 2025). [Poster]
- [8] Kei Kinoshita, Rai Moriya, Momoko Onodera, Yijin Zhang, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Takao Sasagawa, Tomoki Machida, "van der Waals triple quantum well device

based on $\text{WSe}_2/h\text{-BN}/\text{WSe}_2/h\text{-BN}/\text{WSe}_2$ junctions”, The 16th International Conference on Recent Progress in Graphene and 2D Materials Research (RPGR2025) (Toyama, Japan, November, 2025).

- [9] Yijin Zhang, Shunki Ogita, Masato Sotome, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Takashi Kondo, Tomoki Machida, ”Shift current in graphene-based van der Waals heterostructure”, The 16th International Conference on Recent Progress in Graphene and 2D Materials Research (RPGR2025) (Toyama, Japan, November, 2025).

招待講演

- [10] Yijin Zhang, ”Symmetry engineering in two-dimensional materials”, New Frontiers of Geometry and Topology in Condensed Matter Physics (Kashiwa, Japan, January 30, 2026).
- [11] Yijin Zhang, ”Lower dimensional structures of two-dimensional materials”, Workshop on Material, Photonics, and Quantum Technology (WMPQT2025) (Asahikawa, Japan, June 11, 2025).
- [12] Yijin Zhang, ”Bulk photovoltaic effect in two-dimensional materials”, Current Trends in Nonlinear Photocurrents and Magnetism (CINERAMA25) (San Sebastian, Spain, May 25, 2025).

(国内会議)

一般講演

- [13] 川上 拓人, 立石 駿斗, 吉田 大輝, 中辻 直斗, 楊 瀟涵, 陳 麗米, 麻生 浩平, 高村 (山田) 由起子, 大島 義文, 張 奕勁, 町田 友樹, 加藤 幸一郎, 越野 幹人, 「ツイスト二層 WTe_2 における一次元モアレ構造と電子状態」, 日本物理学会 2026 年春季大会 (オンライン, 2026 年 3 月).
- [14] Hayato Tateishi, Takuto Kawakami, Daiki Yoshida, Xiaohan Yang, Naoto Nakatsuji, Limi Chen, Kohei Aso, Yukiko Yamada-Takamura, Yoshifumi Oshima, Yijin Zhang, Tomoki Machida, Mikito Koshino, Koichiro Kato, ”Energetics and Electronic Properties of One-Dimensional Moiré Superlattice in Twisted Bilayer $1\text{T}'\text{-WTe}_2$ ”, 第 70 回記念フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム (名古屋, 2026 年 3 月). [Poster]
- [15] Xiaohan Yang, Yijin Zhang, Kazuma Sato, Arisa Nishimura, Mai Nakashima, Limi Chen, Kohei Aso, Momoko Onodera, Rai Moriya, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Takuto Kawakami, Naoto Nakatsuji, Mikito Koshino, Yukiko Yamada-Takamura, Yoshifumi Oshima, Tomoki Machida, ”Racemic van der Waals Assembly of Planar-Chiral 2D materials for Intrinsic One-Dimensional Moiré Superlattices”, 第 70 回記念フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム (名古屋, 2026 年 3 月). [Poster]

- [16] 植田 大雅, 松岡 秀樹, 青柳 俊吾, 鬼頭 俊介, 張 奕勁, 木村 文彦, 萩原 健太, 坂野 昌人, 岩垣 貴祐, 中村 唯我, 石坂 香子, 町田 友樹, 須田 理行, 有馬 孝尚, 金澤 直也, 「分子挿入 NbSe_2 における秩序-無秩序転移に起因した超格子構造の発現」, 日本物理学会 第 80 回年次大会 (広島, 2025 年 9 月).
- [17] 蔣 男, 張 奕勁, XiaYujie, 東原 有, 大熊 隆太郎, 岡田 佳憲, 渡邊 賢司, 谷口 尚, 張 田田, 町田 友樹, 新見 康洋, 「励起子絶縁体候補物質 GdGaI のラマン分光」, 日本物理学会 第 80 回年次大会 (広島, 2025 年 9 月).
- [18] 木下 圭, 守谷 頼, 岡崎 尚太, 小野寺 桃子, 張 奕勁, 渡邊 賢司, 谷口 尚, 笹川 崇男, 町田 友樹, 「複数層遷移金属ダイカルコゲナイドを用いた量子井戸エレクトロニクス」, 第 86 回 応用物理学会 秋季学術講演会 (名古屋, 2025 年 9 月).

招待講演

- [19] 張 奕勁, 「一次元モアレ超格子」, 日本物理学会 2026 年春季大会 (オンライン, 2026 年 3 月).
- [20] Yijin Zhang, ”One-dimensional moiré superlattice in large-angle-twisted bilayer WTe_2 ”, 第 70 回記念フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム (名古屋, 2026 年 3 月).
- [21] Yijin Zhang, ”One-dimensional moiré superlattice in twisted van der Waals structures of 2D materials”, Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2025 (筑波, 2025 年 10 月 20 日).

(セミナー)

- [22] Yijin Zhang, ”Symmetry engineering in two-dimensional materials”, Institute for Nanoelectronic devices and Quantum computing, Fudan University (November 10, 2025).

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、宇宙論と銀河や星の形成進化である。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 宇宙大規模構造と銀河形成

21cm 線グローバルシグナルの理論計算

宇宙論的流体シミュレーションを行い、初期宇宙の水素ガスから発せられる 21cm 線のグローバルシグナルを計算した。超音速バリオン流の効果を取り入れ、異なるダークマターモデルに対して精密な値を計算し、将来の月面電波望遠鏡による観測でダークマター粒子の性質に迫れることを示した [18]。

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、天体からの輝線放射を観測することで銀河の広領域分布を探る。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 [5, 7]。

機械学習を用いた高速模擬観測カタログ生成

銀河の広領域分布を観測することで、宇宙の構成要素や進化史を探ることができる。観測戦略の策定や観測データの適切な解析には、理論モデルに基づいた模擬観測データが必要となる。本研究では、機械学習を用いて今後の広領域銀河探査でターゲットとなる輝線銀河の模擬カタログを高速に生成する方法を構築した。大規模言語モデルで用いられるようなトランスフォーマーモデルに宇宙論的流体シミュレーションの結果を学ばせることで、暗黒物質のみの低コストなシミュレーションで得られる暗黒物質ハローから多様な銀河を自己回帰的に生成することを可能にした。本手法を用いて輝線強度マッピングと呼ばれる観測の模擬データを作成した [8]。

輝線強度マッピングにおけるブラックホール起源放射の定量的評価

輝線強度マッピングにおける理論研究では、銀河の輝線放射は主に星形成起源であると仮定されてきたが、降着する超巨大ブラックホールも強力な電離光源であり、その寄与は十分に評価されていない。本研究では、ブラックホール起源の輝線放射が統計的観測量に与える影響を定量的に評価した。宇宙論シミュレーションに基づく模擬観測を構築し、水素 H α 線および [HeII] 輝線について、星形成起源とブラックホール起源の両成分を一貫してモデル化した。その結果、ブラックホール起源放射は平均強度において無視できない寄与を持つだけでなく、特に小スケールのパワースペクトルにおいて支配的な影響を及ぼすことを明らかにした。これらの結果は、輝線強度マッピングがブラックホール成長の統計的制約手法として有効であることを示している。

スバル PFS 広視野分光観測に向けた観測効果の除去

PFS 広視野分光観測では赤方偏移 0.8~2.4 の [OII] 輝線銀河をトレーサーとして宇宙の密度分布を測定し、宇宙論的制限を設けることを目的としている。我々は 2025 年 9 月に本観測に向けた銀河ターゲット

選定の最終決定を行った。また、観測効果による見かけ上の密度揺らぎの補正手法や前景にある星のマスク手法を改良し、宇宙論解析のパイプラインを構築した。

輝線銀河マッピングの大規模構造解析に向けた前景除去

現在 NASA を中心に進められている SPHEREx 観測では輝線強度マッピングという 3D イメージング観測を用いて、輝線銀河の性質を統計的に求めようとしている。我々は生成モデルを用いて、多様な銀河の SED を生成し、銀河系内の星などの前景を含む模擬観測データを構築した。この模擬観測データを用いて、明るい点光源をマスクすることで、前景の星や銀河を効果的に除去できることを明らかにした。

遠方銀河での高い $[\text{OIII}]/[\text{CII}]$ の輝線比の起源

JWST では電離ガスからの輝線が観測される一方で、ALMA では電離ガスおよび中性ガスからの輝線 ($[\text{OIII}]88\mu\text{m}$ 、 $[\text{CII}]158\mu\text{m}$) を捉えることができる。星間物質の性質を診断する指標として輝線比が広く用いられるが、遠方銀河では $[\text{OIII}]88\mu\text{m}/[\text{CII}]158\mu\text{m}$ 比が近傍の星形成銀河に比べて 10-100 倍高いことが観測的に報告されている。本研究では、0.1 パーセクの空間分解能を持ち輻射輸送を組み込んだ銀河形成シミュレーションを用いて、各計算セルに対して詳細な輝線モデルを構築した。その結果、高赤方偏移銀河において $[\text{OIII}]/[\text{CII}]$ 輝線比が増大する主な要因が、電離ガスと中性ガスの密度比および質量比にあることを明らかにした。

5.1.2 超新星爆発

超新星爆発前の親星からのニュートリノ放出

宇宙の化学進化や高温・高密度下の物理の実証に重要な重力崩壊型超新星爆発には多くの未解明な点が残されている。特に、爆発前の親星の内部は電磁波に対して不透明であるため、直接観測が難しく、不定性が高い。そこで、本研究では物質との相互作用確率が低いニュートリノの観測による親星内部の直接検証の可能性について調査した。結果として、昨年度稼働し始めた JUNO 検出器であれば、実際の観測によって爆発数日前の親星中心部のコンパクトネスやコアの質量に対して制限をつけられる可能性があることがわかった。

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

重力崩壊型超新星爆発の爆発メカニズムは未だ確定していないが、現在、ニュートリノが衝撃波後方の物質を温めて爆発を駆動するという「ニュートリノ加熱機構」が有力視されている。これに対し数値計算によるアプローチが広く行われているが、計算コストの高さが課題であった。本研究では、その数値計算の中核的役割を担うニュートリノ輻射輸送計算のサロゲートモデルに関し、機械学習を用いて Eddington tensor を予測するモデルを構築した。これにより、計算の高速化が期待できる [13]。

系内超新星ニュートリノによる超新星の性質の機械学習を用いた予測

SN 1987A は、初めて超新星ニュートリノが検出された唯一の重力崩壊型超新星であり、爆発メカニズムの検証において観測的な証拠を与えた。現在に至るまで、それ以外の超新星ニュートリノは検出されていないが、将来的にはさらなる超新星ニュートリノの検出が期待されている。本研究では、機械学習を用いて、系内超新星ニュートリノから超新星の性質を予測するモデルを検討した。観測が期待されるニュートリノシグナルを機械学習を用いて解析し、超新星親星の情報をどこまで制限できるかを評価した [55]。

5.1.3 時間領域天文学

短時間発光現象検出プログラムの開発

木曽観測所望遠鏡に搭載された CMOS センサ Tomoe Gozen を用いて取得した 80 テラバイトの宇宙観測動画を分析するため、SSD 法に基づく短時間発光現象検出器 (プログラム) を開発した。これを用いて、1554 回の発光現象を捉え、その多くがスペースデブリによる太陽の反射光であると結論づけた [19]。

人工衛星デブリによる可視光前景の形状分類に関する機械学習モデル

秒スケールの時間変動をもつ可視光突発天体の探査は、時間軸サーベイの重要な課題の一つである。一方で、人工衛星およびそのデブリによる太陽光反射に起因する前景は、同様の時間スケールの実際の突発天体と混同されやすく、観測の精度を低下させる要因となる。本研究では、このような人工衛星起源の前景を識別し、その形状を分類する機械学習アーキテクチャを提案した。本手法は従来手法より高速であり、多様な形状に対して柔軟に対応可能である。

5.1.4 量子計算

ユニタリに最も近い Clifford の探索

誤り耐性のある量子計算を行うにあたって、実機上で実行可能な論理量子ゲート（基本ゲート）には限りがある。量子操作のほとんどは基本ゲートではなく、それらを組み合わせて近似的に実現される。このような近似の仕方は容易にわかるものではなく、古典的な探索アルゴリズムによって発見されるが、その際に障壁となっていたのがユニタリに近い Clifford を探すという過程だった。本研究では、Pauli Transfer Matrix というものを考えることでこの過程を高速に行うことができることを発見した。

制御ゲートの近似

量子操作の中でも、制御ゲートと呼ばれるものは量子アルゴリズムでも多用される非常に重要度の高い操作である。この操作の近似法の探索を非常に高速に行う古典的なアルゴリズムを発見した。また、ある条件のもと、この古典的なアルゴリズムによって導出される近似法がリソース最適な方法になっていることを示した。さらに、複数量子ビットゲートやその制御ゲートの近似など、この手法には複数の応用が存在し、それらが既存研究を超える性能を示すことを明らかにした。

<受賞>

- [1] 山崎壮一郎、第 52 回量子情報技術研究会 学生発表賞、電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ 量子情報技術特別研究専門委員会、2025 年 10 月 31 日
- [2] 高橋正大、東京大学大学院理学系研究科研究奨励賞、2026 年 3 月

<報文>

(原著論文)

- [3] H. Park, R. Barkana, N. Yoshida, S. Sikder, A. Fialkov, *Nature Astronomy*, 9, 1723 (2025)
- [4] M. Tanaka *et al.* (incl. N. Yoshida), *ApJ*, 994, 175 (2025)
- [5] R. L. Jun, T. Theuns, K. Moriwaki, and S. Bose, *MNRAS*, 540, 433 (2025)
- [6] K. Hirashima, K. Moriwaki, *et al.*, *ApJ*, 987, 86 (2025)
- [7] R. L. Jun, T. Theuns, K. Moriwaki, and S. Bose, *MNRAS*, 543, 1494 (2025)
- [8] K. Moriwaki, R. L. Jun, K. Osato, and N. Yoshida, *MNRAS*, 545, staf2124 (2026)
- [9] Z. Abdurashidova, *et al.* (incl. D. Breitman), *ApJ*, 998, 33 (2026)
- [10] N. E. P. Lines, R. A. A. Bowler, N. J. Adams, R. Fisher, R. G. Varadaraj, Y. Nakazato, *et al.*, *MNRAS*, 539, 2685 (2025)

- [11] M. Usui, *et al.* (incl. Y. Nakazato), *ApJL*, 991, 2, L38 (2025)

- [12] H. Jiang, T. Namikawa, “Impact of reionization history on constraining primordial gravitational waves in future all-sky cosmic microwave background experiments”, *PRD*, 2025, 111(8): 083555

- [13] S. Takahashi, *et al.*, *ApJ*, 986, 67 (2025)

(会議抄録)

- [14] K. Hirashima, *et al.* (incl. K. Moriwaki), In Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, SC25, 1859-1873, New York, NY, USA, 2025. Association for Computing Machinery (2025)

(国内雑誌)

(学位論文)

- [15] Yurina Nakazato, “Formation and Evolution of High-Redshift Galaxies Using Cosmological Simulations and Multi-Wavelength Observations”, Ph.D. Thesis
- [16] 高橋正大, “重力崩壊型超新星のニュートリノ輻射輸送におけるサロゲートモデル開発”, 修士論文
- [17] 橋本賢史, “銀河とダークマターハローの統計モデルと赤方偏移進化”, 修士論文

(著書)

- [18] ニュートン先生の相対性理論講義 (吉田直紀監修 ニュートンプレス 2025/6/9)
- [19] ビジュアル伝記 アインシュタイン (吉田直紀監修 Gakken 2025/6/5)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [20] N. Yoshida, “The effect of stellar evolution on the lifetime of a protoplanetary disk”, Workshop on Protoplanetary Disk Evolution, University of Tokyo, Japan (September 2025)
- [21] K. Moriwaki, “Cosmological Generative Model for Line Intensity Mapping with Transformer”, RESCEU Summer School 2025, Fukushima, Japan (September 2025)
- [22] K. Moriwaki, “CosmoGLINT: Transformer-based Generative Model for Galaxy Surveys”, Bridging Disciplines: Mathematical Modelling in Astronomy and Physics I (Australia - Japan), Macquarie University, Australia (September 2025)
- [23] K. Moriwaki, “Simulation for LIM with TIFUUN” SUBLIME-TIFUUN All Hands Meeting, Tokyo, Japan (October 2025)

- [24] E. Ogata, “Radiation Hydrodynamics Simulations for Black Hole Astrophysics”, Bridging Disciplines: Mathematical Modelling in Astronomy and Physics I (Australia - Japan), Macquarie University, Australia (September 2025)
- [25] E. Ogata, K. Moriwaki, R. L. Jun, N. Yoshida, “Impact of Black Hole Activity on Line Intensity Mapping Statistics”, SMBH growth viewed with large field surveys: special focus on the initial results from Subaru PFS, Taipei, Taiwan, (March 2026)
- [26] Y. Nakazato, “Merger-driven clump formation in high-redshift galaxies”, talk, One-day workshop for stellar cluster simulation, the University of Tokyo, Japan (April 2024)
- [27] S. Yamazaki, S. Akibue, “Universal and optimal multi-qubit unitary synthesis based on meet in the middle”, QIP 2026, ATTA Centre (Jan 2026)
- [28] H. Jiang, “Optimal delensing Method for Improving Constraints on Primordial Gravitational Waves for LiteBIRD”, RESCEU summer school 2025, Fukushima, Japan (September 2025)
- [29] Y. Yamada, “Is there a computationally efficient way to make SPHEREx mocks?”, LIM 2025, Nancy, France (June 2025)
- [30] Y. Yamada, “Mitigating imaging systematics from galaxy clustering measurements using deep neural network”, RESCEU summer school, Fukushima, Japan (September 2025)
- [31] Y. Yamada, “All-sky AGN selection with SPHEREx for PFS follow up”, SMBH growth viewed with large field surveys, University of Tokyo, Japan (March 2026)
- [32] S. Takahashi, “Machine Learning-Based Inversion of Neutrino Light Curves to Probe Supernova Core Structures”, RESCEU summer school 2025, Fukushima, Japan (September 2025)
- [33] A. Hirayama, “Effect of streaming velocity on matter power spectra and 21cm signal in the Dark Age”, Cosmological 21cm Signal and the Early Universe, University of Tokyo (October 2025)
- [34] R. Kawahigashi, “Constrain dust attenuation with $\text{Pa}\alpha$ in LIM”, RESCEU summer school 2025, Fukushima, Japan (September 2025)
- [35] N. Yoshida, “Dark Matter Density Profile around a PopIII Star”, The origin and evolution of supermassive black holes, Sexton, Sweden (June 2025)
- [36] N. Yoshida, “Inverse problems in astronomy and AI applications”, Bridging Disciplines: Mathematical Modeling in Astronomy and Physics, Macquarie University, Australia (September 2025)
- [37] N. Yoshida, “The Dark Age of the Universe”, ASIAA Colloquium, Taipei, Taiwan (November 2025)
- [38] N. Yoshida, “Physics of Primordial Star Formation”, ISYA summer school of IAU, Taipei, Taiwan (November 2025)
- [39] C. Kato, “Physics of supernova explosion and neutrino emission”, Supernova Remnants and Their Friends in the XRISM Era, University of Tokyo, Japan (October 2025)
- (国内会議)
- 一般講演
- [40] 森脇可奈, “生成モデルを用いた 21cm 線イメージングデータの解析” ビッグデータアストロノミー 2025, 筑波大学 (2025 年 5 月)
- [41] 森脇可奈, “トランスフォーマーを用いた模擬銀河カタログ生成” 富岳加速プログラム成果報告会, 筑波大学 (2025 年 9 月)
- [42] 森脇可奈, “生成モデルを用いた 21cm 線イメージングデータの解析” 第 4 回 21cm 線ミニワークショップ, 熊本大学 (2025 年 10 月)
- [43] 森脇可奈, “自己再起トランスフォーマーモデルを用いた模擬銀河カタログの生成” 第 38 回理論懇シンポジウム (2025 年 12 月)
- [44] 加藤ちなみ, “大質量星における前兆ニュートリノ及び超新星ニュートリノ観測を用いた恒星進化及び爆発メカニズムへの制限可能性”, 日本天文学会 2025 年秋季年会, 海峡メッセ下関 (2025 年 9 月)
- [45] 加藤ちなみ, “超新星親星とニュートリノ光度に関する統計的な相関調査”, 第 38 回理論懇シンポジウム, 筑波大学 (2025 年 12 月)
- [46] 加藤ちなみ, “前兆から超新星爆発の初期段階にわたるニュートリノ放出の系統的な調査と親星モデルとの相関調査”, 第 12 回超新星ニュートリノ研究会, 静岡プラザヴェルデ (2026 年 3 月)
- [47] 尾形絵梨花, 森脇可奈, Rui Lan Jun, “輝線強度マッピングにおける活動銀河核の寄与: IllustrisTNG を用いた $\text{H}\alpha$ 輝線の解析”, 日本天文学会 2025 年秋季年会, 海峡メッセ下関 (2025 年 9 月)
- [48] 尾形絵梨花, 森脇可奈, Rui Lan Jun, “How Active Black Holes Reshape LIM Signals: Voxel Statistics and Power Spectra of $\text{H}\alpha$ and He II ”, 理論懇シンポジウム, 筑波大学 (2025 年 12 月)
- [49] 尾形絵梨花, 森脇可奈, Rui Lan Jun, “輝線強度マッピングにおけるブラックホール起源放射の統計的影響”, 2025(令和 7) 年度 国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング, 国立天文台 (2026 年 1 月)
- [50] 仲里佑利奈, “高解像度輻射輸送シミュレーションで探る高赤方偏移銀河の $[\text{OIII}]/[\text{CII}]$ 比”, 日本天文学会 2025 年秋季年会, 海峡メッセ下関 (2025 年 9 月)
- [51] Soichiro Yamazaki, Seiseki Akibue, “Accelerating the Synthesis of Optimal Base Gates”, QIT52, 静岡大学 浜松キャンパス 佐鳴会館 (2025 年 5 月)
- [52] 山崎壮一郎, 秋笛清石, “制御ゲートの Clifford+T による分解”, QIT53, NTT 厚木研究開発センタ (2025 年 12 月)

招待講演

- [53] Hanchun Jiang, “Optimal delensing Method for Improving Constraints on Primordial Gravitational Waves for LiteBIRD”, 日本天文学会 2025 年秋季年会, 海峡メッセ下関 (2025 年 9 月)
- [54] Hanchun Jiang, “Optimal Delensing and Reionization Modeling for Robust Constraints on Primordial Gravitational Waves with LiteBIRD”, 日本天文学会 2026 年春季年会, 京都産業大学 (2026 年 3 月)
- [55] 高橋正大, “機械学習を用いたニュートリノ光度と超新星内部構造の相互予測モデルの構築”, 日本天文学会 2025 年秋季年会, 海峡メッセ下関 (2025 年 9 月)
- [56] 高橋正大, “量子運動論的計算を用いた高速・衝突フレイバー変換の競合”, 第 12 回超新星ニュートリノ研究会, 静岡プラサヴェルデ (2026 年 3 月)
- [57] 平山彩美里, “Dark Age における 21cm 線シグナルを用いた原始非ガウス性の観測についての研究の現状”, 第 55 回天文・天体物理若手夏の学校, 戸倉上山田温泉ホテル圓山荘 (2025 年 7 月)
- [58] 川東凜子, “ $z \leq 1.5$ における輝線強度マッピング観測による $\text{Pa}\alpha$ 線パワースペクトル”, 日本天文学会 2025 年秋季年会, 海峡メッセ下関 (2025 年 9 月)
- [59] 川東凜子, “輝線強度マッピング観測における低輝度銀河寄与の評価”, 日本天文学会 2026 年春季年会, 京都産業大学 (2026 年 3 月)
- 招待講演
- [60] 森脇可奈, “機械学習とその応用”, 第 1 回 TAICO 研究会, 名古屋大学 (2025 年 12 月)
- [61] 加藤ちなみ, “ニュートリノと銀河の歴史”, 第 1 回 TAICO 研究会, 名古屋大学 (2025 年 12 月)
- [62] 尾形絵梨花, “輻射流体シミュレーションと輝線強度マッピングで探る超巨大ブラックホールの形成過程”, 超巨大ブラックホール研究推進連絡会, 筑波大学 (2025 年 7 月)
- [63] 尾形絵梨花, “シミュレーションで解き明かす宇宙の進化とブラックホール”, 全国同時七夕講演会, つくば国際会議場大会議室 (2025 年 6 月)
- [64] Yurina Nakazato, “Line Diagnostics of High-Redshift Galaxies: Synergies Between JWST and ALMA”, 銀河微細構造線研究会 (2025 年 8 月)
- (セミナー)
- [65] Naoki Yoshida, “Probing small scale dark matter clumping below dwarf galaxy scales”, UZH Astrophysics Seminar, University of Zurich (May 2025)
- [66] Naoki Yoshida, “Streaming motions, 21cm signature, and primordial B-field”, Cosmology Seminar, Max-Planck-Institute for Astrophysics, (May 2025)
- [67] 森脇可奈, “確率的生成モデルと銀河分布”, 慶應大学 データプラットフォーム研究会 (2025 年 11 月)
- [68] Kana Moriwaki, “Fundamental physics and cosmology with ML/AI”, AIP AI for Science Seminar Series (February 2026)
- [69] Chinami Kato, “Neutrino flavor physics in supernova”, department of astronomy weekly seminar (July 2025)
- [70] Chinami Kato, “Neutrinos and SN progenitors”, RESCEU seminar (December 2025)
- [71] 尾形絵梨花, “超巨大ブラックホール形成の理論的・観測的アプローチ: 輻射流体シミュレーションと Line Intensity Mapping”, 宇宙物理コロキウム, 青山学院大学 (2025 年 5 月)
- [72] Yurina Nakazato, “Inner Structure, ISM, and Star Formation in $z > 6$ Galaxies: Insights from Cosmological Zoom-in Simulations and JWST/ALMA Observations”, 京都大学 (2025 年 7 月)
- [73] Yurina Nakazato, “Physical properties and Inner structures of high-redshift galaxies using cosmological zoom-in simulations”, 北海道大学 (2025 年 8 月)
- [74] Soichiro Yamazaki, “Accelerating the Synthesis of Optimal Base Gates”, Sorbonne universit  (January 2026)
- [75] 吉田 直紀, “宇宙の一番星”, 中日文化センター 「宇宙 138 億年の歴史」, 名古屋 (2025 年 5 月)
- [76] 吉田 直紀, “宇宙の夜明け”, 日本フンボルト協会総会, 京都大学 (2025 年 6 月)
- [77] 吉田 直紀, “宇宙のダークマターとブラックホール”, 長田高校 Global Career Seminar, 東京大学 (2025 年 8 月)
- [78] 吉田 直紀, “科学 x AI”, 三井住友 Pre-EMP プログラム, 東京大学 (2025 年 9 月)
- [79] 吉田 直紀, “データ可視化’, Editage Cactus オンライン講演, オンライン (2025 年 11 月)
- [80] 吉田 直紀, “宇宙 138 億年解説”, 東京大学出版会 知のマッピング, 東京大学 (2025 年 12 月)
- [81] 吉田 直紀, “科学データ可視化とビジュアル作成’, 名古屋工科大学 (2026 年 3 月)
- [82] 加藤ちなみ, “ニュートリノで解き明かす大質量星の終焉: 超新星爆発と中性子星の誕生”, 宇宙「最強」の星、中性子星: その正体に迫る! , 朝日カルチャーセンター, オンライン (2025 年 11 月)

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、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 Timothy Forrer 氏、吉田智治氏、松井浩介氏、磯貝夏斗氏、修士課程大学院生の丹羽亮太郎氏、有原愛貴氏、Ben Yardan Jumoorty 氏のメンバーで、多角的な視点から量子情報の理論的研究を進めた。

5.2.1 量子アルゴリズム

量子信号処理における Solovay–Kitaev 定理

QSP や QSVT などのパラメータ化量子回路の表現能力を特徴付けるために用いられる現状の脆弱な代数的手法を、量子ゲート近似 (Solovay–Kitaev 定理) の手法を群値関数空間の設定へ拡張することで大幅に強化した。これにより、標準的な QSP/QSVT を超えたパラメータ化量子回路の関数的特徴付けに対して、柔軟かつ数値的に扱いやすいアプローチが可能となり、また本研究により活発ではあるもののこれまで独立に研究されてきたブロックエンコーディングとゲート近似という二つの分野の橋渡しが実現された。(担当：Rossi)

知識を用いた量子プロトコルの合成

量子的な入力に対する関数の中には、量子コンピュータ上では実装不可能であるものがあり、no-go 定理 (不可能性定理) として定式化されている。しかし、入力に関する何らかの知識を利用することで、no-go 定理による制限を回避できる場合がある。このような知識は、入力となる量子状態や量子変換に関する古典的な情報として与えられる場合もあれば、入力に関連した未知の量子状態といった量子的な情報として与えられる場合もある。本研究では、そのような知識を用いた量子プロトコルの合成を量子コンピュータ上で実装可能にする枠組みを提案し、高階量子変換 (量子演算から量子演算への変換、スーパーチャネルとも呼ばれる) にも適用できることを示した。本研究は、Matt Wilson 博士 (パリ・サクレ大学)、Philp Taranto 博士 (マンチェスター大学) との共同研究である。(担当：Forrer、宮崎、村尾)

アイソメトリ演算の保存・再生における量子優位性

量子演算の保存・再生のタスクとは、未知の量子演算を実行できるものの、その入力となる量子状態がまだ決まっていない状況において、量子演算を一度保存し、入力状態が決まった後にそれを再生して作用させるタスクである。このタスクに対しては、未知の量子演算を推定して古典メモリに保存する「古典戦略」と、未知のまま量子状態として直接保存する「量子戦略」という2つの方法が考えられる。本研究では、アイソメトリ演算を対象とした場合に、推定精度が標準量子限界に従うことを示すことで、量子戦略が古典戦略を上回る性能を持つことを明らかにした。(担当：吉田、宮崎、村尾)

漸近的最適な $SU(3)$ 推定

未知のユニタリ演算を推定するタスクにおいて、最適な推定精度は次元が2の場合にしか知られていなかった。本研究では、グラフラプシアンを量子情報処理の研究に初めて導入して解析を行い、次元が3の場合について漸近的に最適な推定精度の導出に成功した。本研究は吉田博信博士 (東京大学) との共同研究である。(担当：吉田、村尾)

群対称性を持つ量子コムの実装

高階量子アルゴリズムを実装する最適な量子コムはしばしば群対称性を持つ。本研究では、群対称性を持つ量子コムを効率的に表現する方法を示し、量子コムを数値最適化する効率的な方法とランダムユニタリを効率的にシミュレートする方法を示した。本研究は Dmitry Grinko 博士、Maris Ozols 博士 (アムステルダム大学) との共同研究である。(担当：吉田、村尾)

入力状態が既知の高階量子アルゴリズム

従来の高階量子アルゴリズムは入力演算と入力状態の双方が未知の場合を扱うが、入力演算は未知であっても入力状態が既知の場合、高階量子アルゴリズムの性能をさらに向上させることができる。本研究ではユニタリ演算の高階量子アルゴリズムにおいて、入力状態が既知の場合の最適性能を導出した。本研究は Vanessa Brzic 氏、Marco Túlio Quintino 博士 (ソルボンヌ大学) との共同研究である。(担当：吉田、村尾)

ランダム拡張スーパーチャネル

最近発見された、混合状態のコピーをその純粋化のうちランダムに選ばれたもののコピーに変換する「ランダム純粋化チャネル」は、混合状態の学習に有用なツールであり、活発に研究が進められている。本

研究では、その量子チャネルへの拡張である「ランダム拡張スーパーチャネル」を導入し、対称群上の量子フーリエ変換および量子 Schur 変換を用いることで効率的に実装可能であることを示すことで、一般の量子チャネルの高階量子アルゴリズムへの応用を示した。(担当：吉田、丹羽、村尾)

未知量子チャネルの量子特異値変換

量子特異値変換を用いた量子アルゴリズムなどにおいて広く用いられるブロックエンコーディングを効率的に構成する既存手法では、入力となる古典データや量子チャネルの構造を知っている必要があった。本研究では、量子チャネルにブラックボックスとしてしかアクセスできない状況において、そのリウヴィル表現をブロックエンコーディングへと変換する問題を高階量子計算の枠組みで考察し、一般にはこの問題が高コスト（系の次元に対して多項式スケーリング）であることを示す一方で、適切なパラメータ領域においては既存手法よりも改善された手法を提示することで、量子チャネルを変換するための強力なツールキットを提供した。本研究は Philip Taranto 博士（マンチェスター大学）との共同研究である。(担当：丹羽、Rossi、村尾)

ノイズのあるユニタリチャネルの蒸留

本研究では、ノイズのあるユニタリを蒸留する量子スーパーチャネル（高階量子計算アルゴリズム）を探究した。半正定値計画法を数値的に解くことで、ノイズを低減する 3 スロットの並列量子超写像を見いだした。本研究は、大野浩輝氏、内海武尊氏、高木隆司博士（東京大学）との共同研究である。(担当：丹羽、吉田、村尾)

ユニタリフィンガープリンティング

二つのメッセージの同一性を、そのメッセージから作成した少ないメモリ数の「指紋」を比べることによって認証するプロトコルの一つとして、フィンガープリンティングと呼ばれるプロトコルがある。フィンガープリンティングは古典および量子の両方の設定で研究されてきた。本研究では、フィンガープリンティングを高階量子アルゴリズムの文脈に適用することを目的とした研究を行った。そして、古典的なメッセージをクリフォードユニタリへ効率的に符号化する方法の存在と、ユニタリ・デザインから選ばれた 2 つのユニタリ間の任意の重なり確率に対する上限を示した。(担当：Jumoorty、村尾)

ブロックエンコーディングのサンプル-オラクル変換

量子特異値変換の基本モジュールであるブロックエンコーディングについて、状態がエンコードされ

たブロックエンコーディングを状態自身に回復させるタスクを考察した。本研究ではタスクを成功させるために、どんな量子アルゴリズムでも次元依存のクエリ回数が必要であることを明らかにした。(担当：有原、村尾)

5.2.2 分散型量子情報処理

数値的エンタングルメント判定手法の改良

量子状態のエンタングルメントを判定する数値計算では、非エンタングル状態の集合を代数多様体を用いて近似する手法がとられる。本研究では、この近似表現を高度化することで判定精度を向上させ、分散型量子情報処理におけるエンタングルメント消費の最適化へと応用した。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)

古典通信をせずに実行できる二体量子測定

ネットワーク上の量子演算は共有エンタングルメントを消費することで実行可能だが、ノード間の古典通信が制限された条件下では、実装可能な演算の範囲が大幅に制限される。本研究では、二者間で限定的なエンタングルメントを共有しつつ古典通信を欠く状況において、実現可能な量子測定のクラスを厳密に同定した。本研究は秋笛清石博士（NTT）との共同研究である。(担当：宮崎)

限られた量子ビット数のもとでの量子計算の実行可能性

分散型量子計算が必要とされる背景には、各量子計算機で利用可能な量子ビット数が限られているという事情があるが、従来の分散型量子計算に関する研究の多くはこの制約を十分に考慮していない。そこで本研究では、与えられた量子計算が限られた量子ビット数のもとで実行可能かどうかを、量子計算における入出力間の因果関係に基づいて推定する手法を提案した。本研究は、Min-Hsiu Hsieh 博士（Foxconn）、山崎隼汰博士（東京大学）、Jun-Yi Wu 博士（Foxconn、Tamkang University）との共同研究である。(担当：松井、村尾)

5.2.3 量子誤り訂正

CXSWAP ゲートを用いたカラー符号回路の深さ削減

誤り訂正符号の回路の深さを削減することは、量子誤り訂正の実装において重要な課題である。本研

究では、CXSWAP ゲートを用いることで、カラー符号の回路の深さを削減する方法を提案した。本研究は Craig Gidney 氏、Matt McEwen 博士、Adam Zalcman 氏 (Google Quantum AI) との共同研究である。(担当：吉田)

Union-Find 復号器の閾値定理

表面符号を復号する Union-Find 復号器は、実装の容易さや数値的に確認される閾値の高さから注目されているが、閾値定理は厳密に証明されていなかった。本研究ではグラフのクラスタリングの解析に基づき、Union-Find 復号器の閾値定理を証明し、並列実装を行うことで quasi-polylogarithmic な時間で実行可能であることを示した。本研究は Ethan Lake 博士 (カリフォルニア大学バークレー校)、山崎隼汰博士 (東京大学) との共同研究である。(担当：吉田)

5.2.4 量子機械学習・量子計算複雑性

一般的な量子計算優位性を利用した量子機械学習の利点

量子機械学習の利点は、現在のところ素因数分解のような古典計算で困難な計算問題を用いて構成されており、今までの量子機械学習の利点は、このような計算問題に基づき、学習対象の関数集合 (コンセプトクラス) のサイズが問題サイズに対し多項式程度の学習問題でのみ証明されており、学習アルゴリズムは多項式個の対象関数をつづつ試すことで行われていた。本研究では、量子計算で指数的な優位性がある任意の関数を用いて、量子機械学習で優位性をもつ指数サイズのコンセプトクラスが構成可能であることを示した。本研究は山崎隼汰博士 (東京大学) との共同研究である。(担当：磯貝、村尾)

ヒューリスティック計算量における関係問題向けランダム助言の脱乱択化

計算量クラスでは、問題サイズに依存する助言ビット列を与えられた時に効率的に計算できるクラスがよく研究されている。一定の割合の入力に対しては、誤りを許すというヒューリスティック計算量において、決定問題では助言ビット列が決定的に与えられるアルゴリズムとランダムに与えられるアルゴリズムが解ける計算問題は等しいことが証明されている。本研究では、決定問題を一般化した関係問題においてもこの関係が成り立つことを示した。本研究は山崎隼汰博士 (東京大学) との共同研究である。(担当：磯貝、村尾)

<受賞>

- [1] 吉田智治, 理学系研究科研究奨励賞 (博士課程), 東京大学大学院理学系研究科, 2026 年 3 月。

- [2] Kosuke Matsui, Student Poster Award (Third Prize) in the 25th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS 2025), “Characterizing Conditions for Qubit Usage Reduction in Quantum Instruments via Weak Signaling”, August 2025.

<報文>

(原著論文)

- [3] Zane Rossi, Jack Ceroni, Isaac Chuang, *Modular quantum signal processing in many variables*, Quantum **9**, 1776 (2025).
- [4] Satoshi Yoshida, Akihito Soeda, Mio Murao, *Universal adjointation of isometry operations using conversion of quantum supermaps*, Quantum **9**, 1750 (2025).
- [5] Satoshi Yoshida, Shiro Tamiya, Hayata Yamasaki, *Concatenate codes, save qubits*, npj Quantum Information **11**, 88 (2025).
- [6] Tatsuki Otake, Satoshi Yoshida, Mio Murao, *Analytical Lower Bound on Query Complexity for Transformations of Unknown Unitary Operations*, Physical Review Letters **135**, 230603 (2025).
- [7] Jessica Bavaresco, Hlér Kristjánsson, Mio Murao, Tatsuki Otake, Philip Taranto, Marco Túlio Quintino, Satoshi Yoshida, *Simulating the quantum switch with quantum circuits is computationally hard*, Nature Communications **16**, 10216 (2025).
- [8] Satoshi Yoshida, Yuki Koizumi, Michał Studziński, Marco Túlio Quintino, Mio Murao, *One-to-One Correspondence between Deterministic Port-Based Teleportation and Unitary Estimation*, IEEE Transactions on Information Theory **72**, 2358 (2026).
- [9] Satoshi Yoshida, Jisho Miyazaki, Mio Murao, *Quantum Advantage in Storage and Retrieval of Isometry Channels*, Accepted in Physical Review Letters (2026).

(学位論文)

- [10] Satoshi Yoshida, *Group theoretical analysis of higher-order quantum algorithms* (高階量子アルゴリズムの群論的解析), Doctoral dissertation.
- [11] Ryotaro Niwa, *Quantum algorithms for learning the spectrum of quantum channels* (量子チャンネルのスペクトルを推定する量子アルゴリズム), Master thesis.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [12] Mio Murao, “Universal algorithm for transforming Hamiltonian eigenvalues”, *The International Conference on Quantum Computing 2025 (ICoQC2025)*, Paris, France, May 2025. (talk)

- [13] Tatsuki Otake, Hlér Kristjánsson, Philip Taranto, and Mio Murao, “Universal algorithm for transforming Hamiltonian eigenvalues”, *Seeking Quantum Advantage: Workshop and Conference (SEEQA 2025)*, Oxford, UK, August 2025. (poster)
- [14] Zane Rossi, “A Solovay–Kitaev theorem for quantum signal processing”, *Asian Quantum Information Science (AQIS) 2025*, Hong Kong, August 2025. (long talk)
- [15] Zane Rossi, “A Solovay–Kitaev theorem for quantum signal processing”, *Quantum Information Processing (QIP) 2025*, Riga, Latvia, January 2026. (poster)
- [16] Zane Rossi, “A Solovay–Kitaev theorem for quantum signal processing”, *Quantum Innovation 2025*, Osaka, Japan, July 2025. (poster)
- [17] Wataru Yokojima, Jisho Miyazaki, Mio Murao, “Probabilistic storage-and-retrieval of pure quantum combs”, *Quantum Innovation 2025*, Osaka, Japan, July 2025. (poster)
- [18] Satoshi Yoshida, Yuki Koizumi, Michał Studziński, Marco T’ulio Quintino, Mio Murao, “One-to-one Correspondence between Deterministic Port-Based Teleportation and Unitary Estimation”, *13th Beyond IID in Information Theory*, Garching, Germany, July 2025. (talk)
- [19] Dmitry Grinko, Satoshi Yoshida, Mio Murao, Maris Ozols, “Sequential quantum processes with group symmetry and simulation of random unitaries”, *29th Annual Quantum Information Processing Conference (QIP 2026)*, Riga, Latvia, January 2026. (talk)
- [20] Satoshi Yoshida, Yuki Koizumi, Michał Studziński, Marco T’ulio Quintino, Mio Murao, “One-to-one correspondence between deterministic port-based teleportation and unitary estimation”, *The International Conference on Quantum Computing 2025 (ICoQC2025)*, Paris, France, May 2025. (poster)
- [21] Tatsuki Otake, Satoshi Yoshida, Mio Murao, “Analytical lower bound on query complexity for transformations of unknown unitary operations”, *Quantum Innovation 2025*, Osaka, Japan, July 2025. (poster)
- [22] Satoshi Yoshida, Yuki Koizumi, Michał Studziński, Marco T’ulio Quintino, Mio Murao, “One-to-one correspondence between deterministic port-based teleportation and unitary estimation,” *QMATH Masterclass on Representation Theory in Quantum Information Science*, Copenhagen, Denmark, August 2025. (poster)
- [23] Satoshi Yoshida, Jisho Miyazaki, Mio Murao, “Quantum advantage in storage and retrieval of isometry channels,” *29th Annual Quantum Information Processing Conference (QIP 2026)*, Riga, Latvia, January 2026. (poster)
- [24] Satoshi Yoshida, Hironobu Yoshida, Mio Murao, “Asymptotically optimal unitary estimation in $SU(3)$ by the analysis of graph Laplacian,” *29th Annual Quantum Information Processing Conference (QIP 2026)*, Riga, Latvia, January 2026. (poster)
- [25] Kosuke Matsui, Jun-Yi Wu, Hayata Yamasaki, Min-Hsiu Hsieh, Mio Murao, “Characterizing Conditions for Reducing Qubit Requirements in Quantum Instruments via Weak Signaling,” *Quantum Innovation 2025*, Osaka, Japan, July 2025. (poster)
- [26] Kosuke Matsui, Jun-Yi Wu, Hayata Yamasaki, Min-Hsiu Hsieh, Mio Murao, “Characterizing Conditions for Qubit Usage Reduction in Quantum Instruments via Weak Signaling,” *25th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS 2025)*, Hong Kong, Hong Kong, August 2025. (poster)
- [27] Kosuke Matsui, Jun-Yi Wu, Hayata Yamasaki, Min-Hsiu Hsieh, Mio Murao, “Characterizing Conditions for Reducing Qubit Usage in Quantum Instruments via Weak Signaling,” *QMATH Masterclass on Representation Theory in Quantum Information Science*, Copenhagen, Denmark, August 2025. (poster)
- [28] Kosuke Matsui, Jun-Yi Wu, Hayata Yamasaki, Min-Hsiu Hsieh, Mio Murao, “Characterizing Memory-Constrained Implementability of Quantum Instruments via Signaling Conditions,” *29th Annual Quantum Information Processing Conference (QIP 2026)*, Riga, Latvia, January 2026. (poster)
- [29] Hayata Yamasaki, Natsuto Isogai, Mio Murao, “Advantage of Quantum Machine Learning from General Computational Advantages”, *International Conference on Quantum Computing 2025 (ICoQC2025)*, Paris, France, May 2025. (poster)
- [30] Natsuto Isogai, Hayata Yamasaki, Mio Murao, “Derandomization of Random Advice for Relational Problems in Heuristic Complexity”, *Quantum Innovation 2025*, Osaka, Japan, July 2025. (poster)
- [31] Natsuto Isogai, Hayata Yamasaki, Mio Murao, “Derandomization of Random Advice for Relational Problems in Heuristic Complexity”, *25th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS 2025)*, Hong Kong, August 2025. (poster)
- [32] Hayata Yamasaki, Natsuto Isogai, Mio Murao, “Advantage of Quantum Machine Learning from General Computational Advantages”, *9th Quantum Techniques in Machine Learning (QTML2025)*, Singapore, November 2025. (poster)
- [33] Natsuto Isogai, Hayata Yamasaki, Mio Murao, “Learning with Optimized Random Feature: Quantum-Inspired Classical Sampling without Sparsity and Low-Rank Assumptions”, *29th*

Annual Quantum Information Processing Conference 2026 (QIP2026), Riga, Latvia, January 2026. (poster)

- [34] Ryotaro Niwa, Zane Marius Rossi, Philip Taranto, Mio Murao, “Singular value transformation for unknown quantum channels”, *29th Annual Quantum Information Processing Conference 2026 (QIP 2026)*, Riga, Latvia, January 2026. (poster)
- [35] Ryotaro Niwa, Zane Marius Rossi, Philip Taranto, Mio Murao, “Singular value transformation for unknown quantum channels”, *25th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS 2025)*, Hong Kong, Hong Kong, August 2025. (poster)

招待講演

- [36] Mio Murao, “Higher-Order Quantum Algorithms for Learning Quantum Objects”, *IVADO’s Quantum Seminars Fall 2025*, Montreal, Canada, October 2025.
- [37] Mio Murao, “Higher-order quantum algorithms for “generative” quantum learning”, *Annual Meeting of the Physical Society of Taiwan*, Chiayi, Taiwan, January 2026. (talk)
- [38] Mio Murao, “Higher-order quantum algorithms for “advanced” quantum learning”, *W4Q Quantum Science conference*, Palma de Mallorca, Spain, March 2026.
- [39] Zane Rossi, “Modern Techniques in Quantum Algorithms”, *Quantum Techniques in Machine Learning (QTML) 2025*, Singapore, November 2025.
- [40] Zane Rossi, “A Solovay–Kitaev theorem for quantum signal processing”, *FU Berlin, Learning Seminar*, (Remote), June 2025.
- [41] Zane Rossi, “Modern Techniques in Quantum Algorithms”, *Berkeley Mathematics Department Seminar*, Berkeley, USA, March 2025.
- [42] Zane Rossi, “The art of (quantum) computer programming”, *Vanderbilt University Physics Colloquium Series*, Nashville, USA, January 2025.
- [43] Zane Rossi, “The art of (quantum) computer programming”, *Colorado School of Mines Computer Science Colloquium Series*, Denver, USA, February 2025.

(国内会議)

一般講演

- [44] Wataru Yokojima, Jisho Miyazaki, Mio Murao, “Probabilistic storage-and-retrieval of pure quantum combs”, 第 52 回量子情報技術研究会 (QIT52), 静岡県, Japan, May 2025. (talk)
- [45] Dmitry Grinko, Satoshi Yoshida, Mio Murao, Maris Ozols, “Efficient implementation of sequential quantum processes with group symmetry”, 第 53 回量子情報技術研究会 (QIT53), 神奈川県, December 2025. (talk)

- [46] 吉田智治, “高階量子変換の群論的解析”, 第 38 回量子情報関東 *Student Chapter*, 神奈川県, March 2026. (talk)

- [47] Kosuke Matsui, Jun-Yi Wu, Hayata Yamasaki, Min-Hsiu Hsieh, Mio Murao, “スペース制限下における量子インストルメント実装可能性のシグナリング条件による解析”, 第 53 回量子情報技術研究会 (QIT53), 神奈川県, December 2025. (talk)

招待講演

- [48] 村尾美緒, “量子の重ね合わせの不思議と情報処理”, 第 71 回仁科記念講演会, 東京都, December 2025. (talk)
- [49] 村尾美緒, “アカデミアにおける量子技術の基礎研究と人材育成の強化に向けて”, 日本学術会議 第 19 回情報学シンポジウム, 東京都, January 2025. (talk)

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との反作用の影響下にある冷却原子系の非ユニタリダイナミクス、非平衡開放系における相の分類、人工ゲージ場中での量子ホール効果や渦格子、孤立量子系の熱平衡化などについて研究を行っている。同時に私たちは、情報をキーワードとして量子論や統計力学の基礎概念を捉え直し、物理と情報を融合させた新分野の構築を目指す研究にも取り組んでいる。特に測定やフィードバック制御を行うもとの情報の流れに着目し、熱力学の第二法則や揺らぎの定理の一般化、波束収縮のダイナミクス、測定結果からのハミルトニアン推定などの研究を行っている。さらに、私たちは機械学習や深層学習における情報処理のプロセスに注目し、物理学の視点から AI や機械学習の理解に取り組んでいる。

5.3.1 冷却原子気体・非平衡開放系

Lieb–Robinson 限界に基づく開放量子多体系の基礎方程式の導出

Markov な開放量子系の密度行列の時間発展を記述する方程式として、Gorini–Kossakowski–Sudarshan–

Lindblad (GKSL) 型の量子マスター方程式 (GKSL 方程式) が知られている。この方程式は時間発展写像の完全正値性・トレース保存性・Markov 性のみからその形が GKSL 型に限定されるという意味で開放量子系の研究において非常に基本的であるが、系と環境全体のユニタリダイナミクスから出発してこの方程式をミクロに導出することは非自明な問題である。とくに、教科書等でよく用いられる回転波近似 (永年近似) を用いた導出は、着目系が量子多体系の場合にはその適用条件が破綻し、仮に近似を適用したとしても得られた方程式が系全体に散逸が作用する非局所的なものになるという問題点があった。本研究では、局所相互作用する量子多体系における情報伝播に対する一般的な制限である Lieb–Robinson 限界を用いて、局所的な散逸項をもつ GKSL 型量子マスター方程式のミクロからの導出法を見出した [2]。具体的には、GKSL 方程式のミクロからの導出中において、Born–Markov 近似の下で得られる Redfield 方程式の散逸項に現れる相互作用表示の演算子に対し Lieb–Robinson 限界を用いて散逸項を局所化することで、局所的な散逸項をもつ GKSL 方程式が系統的に導出できることを示した。具体例として、熱浴と接した自由フェルミオン鎖を数値的に解析し、Lieb–Robinson 限界を用いて導出した局所 GKSL 方程式がその導出の適用範囲内において系のダイナミクスを精度良く記述することを示した。

散逸のあるボース–アインシュタイン凝縮体の超流動性

双極子モーメントをもつ原子・分子の冷却気体は、ダイポール BEC に代表される長距離相互作用をもつ多体系の量子シミュレーションを実現するための、クリーンかつ制御可能なプラットフォームとして期待されている。なかでも有力な候補の一つが、強い電気双極子間相互作用をもつ異核二原子分子気体である。しかし、冷却分子は化学反応に起因する二体ロスと不可避的に受け、これはとりわけボース粒子系で深刻である。したがって、そのような散逸下で実現された BEC が超流動性を示すか否かを理解することは、基礎的に重要な問題である。本研究 [4] では、双極子相互作用と二体ロスの両方が存在する分子 BEC に対する超流動応答理論を構築した。その結果、粒子間相互作用が存在しない場合であっても、散逸が BEC の位相の剛性、ひいては超流動性を誘起しうることを示した。その背後にある物理は、二体ロスが粒子間に相関を誘起し、有効的に斥力相互作用と類似の役割を果たす点にある。加えて、分子 BEC の双極子相互作用に対する安定性が散逸によって実効的に向上することを見いだした。さらに、相互作用のない BEC において二体ロスのみによって量子化渦が生成されることを数値的に示し、これらの予言を検証した (図 5.3.1)。

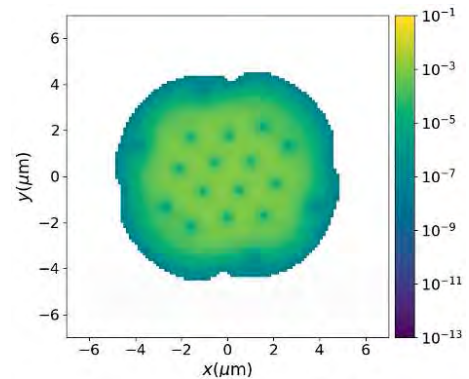


図 5.3.1: 二体ロスの下での Gross–Pitaevskii 方程式の数値シミュレーション結果 [4]。粒子間相互作用がないにもかかわらず散逸がもたらす相関によって BEC が超流動性を獲得し、量子化された渦が生成される。

ローパスフィルターを用いたナノ粒子の量子フィードバック冷却

浮揚ナノ粒子系は、光ポテンシャルを用いて真空中に捕捉された、直径約 100 nm のシリカ粒子からなる系である。浮揚ナノ粒子は物理的接触をもたないため、環境ノイズの影響をほとんど受けない。この低ノイズ性を活かし、電磁場・加速度・重力波などを計測する高感度センサーとしての応用や、巨視的量子重ね合わせ状態に代表される基礎物理の探究のためのプラットフォームとしての利用が期待されている。こうした応用を実現する前提として、浮揚ナノ粒子の重心自由度を冷却することが不可欠である。本研究 [8] ではまず、連続位置測定下にある量子調和振動子に対し、測定結果に応じてポテンシャルをシフトさせるフィードバックを導入したモデルを構築し、浮揚ナノ粒子の運動を記述する確率微分方程式を導出した。さらに、ローパスフィルターを用いたフィードバック冷却法を提案し、導出した確率微分方程式を解析することで、到達可能な最低フォノン占有数を評価した。その結果、本手法は従来の LQG 制御およびコールドダンピングを上回る冷却性能を有し、より低いフォノン占有数を達成できることを明らかにした。さらに、将来的に実験において測定効率が 1 に近い領域まで向上した場合には、本手法と既存手法の到達占有数の比が数十に達することも示した。これは、本手法が真の基底状態への到達を目指す上で、大きな優位性を有することを意味する。

5.3.2 量子論・統計力学と情報理論・人工知能の融合

$S = 1$ 量子スピン鎖の非可積分性の証明

量子多体系の平衡状態を理解するうえで、示量的な数の局所保存量を持つ可積分系は強力なツールとなる。一方で、熱平衡化に代表されるような孤立量子多体系のダイナミクスを考えるうえでは、可積分系は特異な振る舞いをすることが知られている。従って、巨視的な現象を微視的な動力学から理解するという統計力学の根本的な問題に取り組むためには、系が局所保存量を持たないこと、すなわち非可積分性を示すことが必要である。2019年に初めて具体的な系の非可積分性が厳密に証明されて以降、多くの系の非可積分性が証明されてきた一方で、これらの研究はスピン $1/2$ の系に限られていた。本研究では、スピン 1 の典型的な量子多体系として、異方性磁場をもつ bilinear-biquadratic (BLBQ) 鎖を扱った。これはスピン 1 の Heisenberg 鎖や、Affleck–Kennedy–Lieb–Tasaki (AKLT) 模型を含む。我々はこの模型が、既に知られている可積分系を除いて非可積分であることを厳密に証明した [5]。これは、高次スピン系で非可積分性が厳密に証明された最初の例を与える。AKLT 模型は多数の非熱的なエネルギー固有状態をもつ模型の典型例である。非可積分系におけるこのような固有状態の存在は量子多体傷跡と呼ばれ、熱平衡化を妨げる構造の一つである。我々の結果は、数値的に広く検証されてきた AKLT 模型の非可積分性に厳密な基礎を与え、この系において量子多体傷跡が可積分性とは独立の構造であることを示している。さらに、我々は並進対称性・ $U(1)$ 対称性・時間反転対称性・スピン反転対称性をもつ generic な $S = 1$ 鎖に結果を拡張し、その可積分性/非可積分性を完全に分類した。

量子ゆらぎを整流するマクスウェルのデーモン

マクスウェルの思考実験に端を発した概念であるマクスウェルのデーモンは、熱ゆらぎを測定とフィードバック制御によって整流しエントロピーを下げることで系から仕事を取り出す。この機構は、現在では情報処理の熱力学を理解する上での重要な基盤をなしている。一方で、量子系においては熱ゆらぎの他にも量子論に特有な測定結果のランダム性に起因した量子ゆらぎが存在する。量子ゆらぎを整流するマクスウェルのデーモンは、フィードバック制御や情報熱機関における量子性の役割を理解する上で興味深い。本研究では、古典系で行われたマクスウェルのデーモンの実証実験の設定を量子系に拡張し、量子ゆらぎのみを整流して粒子をポテンシャル勾配に逆らって輸送する量子マクスウェルデーモンの模型を考案した [7]。この模型に対しパワー・輸送速度・効率の振る舞いを調べ、パワーと輸送速度のトレードオフ関係や最適効率を達成するパラメータを見出した。また、この模型においては熱ゆらぎが存在しないことから、従来の情報熱機関の研究において議

論されてきたトレードオフ関係を破ることができることを明らかにした。この量子マクスウェルデーモンは光格子中の冷却原子系を用いて実現できることが期待されるが、実験において重要となる測定誤差の影響の解析も行い、現実的な測定誤差の範囲内で我々の結果が妥当であることを確かめた。

<受賞>

<報文>

(原著論文)

- [1] Masaya Nakagawa and Masahito Ueda: Topology of Discrete Quantum Feedback Control, *Phys. Rev. X* **15**, 021016 (2025).
- [2] Koki Shiraishi, Masaya Nakagawa, Takashi Mori, and Masahito Ueda: Quantum master equation for many-body systems based on the Lieb–Robinson bound, *Phys. Rev. B* **111**, 184311 (2025) [selected as Editors’ Suggestion].
- [3] Liu Ziyin, Hongchao Li, and Masahito Ueda: Noise balance and stationary distribution of stochastic gradient descent. *Phys. Rev. E* **111**, 065303 (2025).
- [4] Hongchao Li, Xie-Hang Yu, Masaya Nakagawa, and Masahito Ueda: Dissipative Superfluidity in a Molecular Bose–Einstein Condensate, *Phys. Rev. Lett.* **135**, 166001 (2025).
- [5] Akihiro Hokkyo, Mizuki Yamaguchi, and Yuuya Chiba: Absence of nontrivial local conserved quantities in the spin-1 bilinear-biquadratic chain and its anisotropic extensions, *Phys. Rev. Research* **7**, 043297 (2025).
- [6] Hiroki Matsui, Yuki Miyazawa, Ryoto Goto, Chihiro Nakano, Yuki Kawaguchi, Masahito Ueda, and Mikio Kozuma: Observation of the Einstein–de Haas effect in a Bose–Einstein condensate, *Science* **391**, 384 (2026).
- [7] Kangqiao Liu, Masaya Nakagawa, and Masahito Ueda: Maxwell’s demon for quantum transport, *Phys. Rev. A* **113**, 022436 (2026).
- [8] Shuma Sugiura and Masahito Ueda: Quantum feedback cooling of a trapped nanoparticle by using a low-pass filter, *Phys. Rev. A* **113**, 023119 (2026).

(国内雑誌)

- [9] 中川大也: 冷却原子と開放量子多体系の物理 第1回 はじめに、数理科学 2025 年 12 月号、サイエンス社 (2025).
- [10] 中川大也: 冷却原子と開放量子多体系の物理 第2回 原子と光の物理、数理科学 2026 年 1 月号、サイエンス社 (2025).
- [11] 中川大也: 冷却原子と開放量子多体系の物理 第3回 冷却原子の基本技術、数理科学 2026 年 3 月号、サイエンス社 (2026).
- [12] 中川大也: 冷却原子と開放量子多体系の物理 第4回 原子間の相互作用、数理科学 2026 年 4 月号、サイエンス社 (2026).

(学位論文)

- [13] Koki Shiraishi: Microscopic Approach to Open Quadratic Systems: Locality, Thermodynamics, and Transport Phenomena (博士論文) .
- [14] Atsushi Oyaizu: Physical Implementation of Non-Hermitian Spin Chains Utilizing Non-Unitary Discrete-Time Quantum Dynamics (修士論文) .

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [15] Masahito Ueda: Topology of Discrete Feedback Control, Methods for Many-Body Open Quantum Systems, University of Trento, Trento, Italy, 2025.4.1.
- [16] Masahito Ueda: Topology of discrete feedback control, International Visiting Scholar Program (BAQIA 主催), Tsinghua University, Beijing, China, 2025.5.8.
- [17] Masahito Ueda: Going beyond Hermitian Physics, Division of Atomic, Molecular and Optical Physics (DAMOP), Oregon Convention Center, Portland, Oregon, USA, 2025.6.17.
- [18] Masahito Ueda: Topology of Discrete Feedback Control, International Conference on Emerging Quantum Technology (ICEQT) 2025, HUIFENG-WANYUN Hotel Hefei, Hefei, China, 2025.9.19.
- [19] Masahito Ueda: Non-Hermitian Quantum Physics, RIKEN-Harvard joint workshop, Ory forum in the Goel building, Cambridge, USA, 2025.10.3.
- [20] Masahito Ueda: Beyond Hermitian Quantum Physics, The 16th Asia Pacific Physics Conference, Hilton Haikou Meilan, Haikou, China, 2025.10.20.
- [21] Masaya Nakagawa: Topology of discrete quantum feedback control, The 16th Asia Pacific Physics Conference, Hilton Haikou Meilan, Haikou, China, 2025.10.20.
- [22] Masahito Ueda: Topology of discrete feedback control, Ruthenates and Emerging Quantum Materials (REQM2025), Kyoto University, Kyoto, Japan, 2025.12.3.
- [23] Masahito Ueda: Open quantum systems, Beyond Hermitian Quantum Physics, Quantum Thermalization, Information Thermodynamics, Winter School on Open Quantum Systems and Mesoscopic Physics 2025, Vierumäki, Finland, 2025.12.8-12.
- [24] Masaya Nakagawa: Topology of feedback control in quantum and classical stochastic processes, New Frontiers of Geometry and Topology in Condensed Matter Physics, Institute for Solid State Physics, Kashiwa, Japan, 2026.2.2.
- [25] Masahito Ueda: Beyond Hermitian Quantum Physics, Post-selection for quantum control, Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Dresden, Germany, 2026.2.25.

- [26] Hongchao Li: Dissipative Superfluidity in a Molecular Bose-Einstein Condensate, Koushare-Europe Science Forum, online, 2026.3.03.

一般講演

- [27] K. Shiraishi, M. Nakagawa, T. Mori and M. Ueda: Quantum master equation for many-body systems based on the Lieb-Robinson bound, MEOQS2025 - Methods for many-body open quantum systems, University of Trento, Trento, Italy, 2025.04.01.
- [28] H. Li, C. Shang, T. Kuwahara, T. V. Vu: Macroscopic Particle Transport in Dissipative Long-Range Bosonic Systems, Hydrodynamics of low-dimensional interacting systems: Advances, challenges, and future directions, Kyoto University, Kyoto, Japan, 2025.06.04.
- [29] K. Shiraishi, M. Nakagawa, and T. Mori: Davies quantum master equation for quadratic many-body systems, StatPhys29, Palazzo dei Congressi & Palaffari, Florence, Italy, 2025.07.14.
- [30] T. Ishii and M. Ueda: Quantum i.i.d. steady states in open quantum many-body systems, StatPhys29, Palazzo dei Congressi & Palaffari, Florence, Italy, 2025.07.15.
- [31] A. Hokkyo and M. Ueda: Universal Upper Bound on Ergotropy and No-Go Theorem by the Eigenstate Thermalization Hypothesis, StatPhys29, Palazzo dei Congressi & Palaffari, Florence, Italy, 2025.7.17.
- [32] A. Hokkyo: Rigorous Test for Quantum Integrability and Nonintegrability, NESP-2025, Villa Ruspoli, Florence, Italy, 2025.7.21.
- [33] T. Ishii and M. Ueda: Quantum i.i.d. steady states in open quantum many-body systems, Joint ICTP-WE Heraeus Conference on Non-equilibrium Quantum Statistical Physics, Adriatico Guest House, Trieste, Italy, 2025.07.22.
- [34] M. Nakagawa and M. Ueda: Topology of discrete quantum feedback control, ISSP-IIS Joint Symposium on Physics of Open Systems: Resonance, Symmetry, and Topology, The University of Tokyo, Kashiwa, Japan, 2025.8.6.
- [35] M. Nakagawa and M. Ueda: Topology of discrete quantum feedback control, Tokyo-Beijing-Sendai Joint Workshop on Quantum Matter, Tohoku University, Sendai, Japan, 2025.10.4.
- [36] H. Li, X. Yu, M. Nakagawa and M. Ueda: Dissipative Superfluidity in a Molecular Bose-Einstein Condensate, Daikin-IPI symposium, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2025.11.26.
- [37] S. Yamada, A. Hokkyo, and M. Ueda: Many-body burst in isolated quantum systems, Kyoto Workshop on Quantum Thermodynamics and Stochastic Thermodynamics 2025, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 2025.12.8.

- [38] A. Oyaizu, H. Li, M. Nakagawa, and M. Ueda: Chaotic RG flows in non-unitary quantum dynamics, New Frontiers of Geometry and Topology in Condensed Matter Physics, Institute for Solid State Physics, Kashiwa, Japan, 2026.1.28.

(国内会議)

招待講演

- [39] 上田正仁: Beyond-Hermitian Quantum Physics, 量子力学 100 周年研究会: 量子基礎・量子情報のこれまでとこれから、京都大学基礎物理学研究所湯川記念館、2025.9.10.
- [40] 上田正仁: 冷却原子の来し方と行く末、日本物理学会領域1 国際量子科学技術年記念シンポジウム、広島大学、2025.9.16.
- [41] 中川大也: 開放量子多体系における超伝導と対凝縮、第4回「対相関と対凝縮」研究会、大阪大学核物理研究センター、2026.1.21.

一般講演

- [42] 中川大也: 量子フィードバック制御下における非平衡量子相の物理に向けて、第7回冷却原子研究会「アトムの会」、ロワジールホテル豊橋、2025.8.22.
- [43] 杉浦周磨、白石航暉、上田正仁: コスト関数の再考による浮揚ナノ粒子のフィードバック冷却の性能向上、日本物理学会第80回年次大会、広島大学、2025.9.16.
- [44] 小柳津敦、李宏超、中川大也、上田正仁: PT 転移に伴うカオス的くりこみ群フローの出現、日本物理学会第80回年次大会、広島大学、2025.9.17.
- [45] 中川大也、上田正仁: フィードバック制御のトポロジー: Maxwell デモン実験のトポロジカルな解釈、日本物理学会第80回年次大会、広島大学、2025.9.17.
- [46] 石井敬直、上田正仁: 開放量子多体系の定常状態が量子 i.i.d. 状態となる必要十分条件、日本物理学会第80回年次大会、広島大学、2025.09.17.
- [47] 白石航暉、石田駿平、中川大也: 外場によって駆動される電子系のダイナミクス: 量子マスター方程式によるアプローチ、日本物理学会第80回年次大会、広島大学、2025.09.18.
- [48] 法橋顕広: 量子可積分性と非可積分性の厳密な判定手法、日本物理学会第80回年次大会、広島大学、2025.9.19.
- [49] 石井敬直、甲田昌也: NISQ Simulation of Open Quantum Many-Body Systems、第16回量子ソフトウェア研究発表会、産業技術総合研究所、2025.10.23.
- [50] 法橋顕広: Rigorous Test for Quantum Integrability and Nonintegrability、ダイキン-ipi シンポジウム、東京大学、2025.11.26.
- [51] 中川大也、上田正仁: 量子フィードバック制御のトポロジー、ダイキン-ipi シンポジウム、東京大学、2025.11.26.
- [52] 小柳津敦、李宏超、中川大也、上田正仁: Chaotic RG flows in non-unitary quantum dynamics、ダイキン-ipi シンポジウム、東京大学、2025.11.26.

- [53] 杉浦周磨、白石航暉、上田正仁: 浮揚ナノ粒子のフィードバック冷却法、ダイキン-ipi シンポジウム、東京大学、2025.11.26.
- [54] 石井敬直、甲田昌也: 中間測定を活用した開放量子多体系の NISQ シミュレーション、ダイキン-ipi シンポジウム、東京大学、2025.11.26.
- [55] 法橋顕広: 量子論を超えたエンタングルメント生成: ボベスク=ローリッヒ箱相関の達成、Quantum Foundations 2026、大阪大学、2026.3.6.
- [56] 山田彰造、法橋顕広、上田正仁: 孤立量子系における多体バースト現象、日本物理学会 2026 年度春季大会、オンライン、2026.3.25.
- [57] 法橋顕広: 量子スピン鎖における単一の保存則からの可積分性、日本物理学会 2026 年度春季大会、オンライン、2026.3.25.

(セミナー)

- [58] 法橋顕広: Rigorous Test for Quantum Integrability and Nonintegrability、Budapest integrability seminars、オンライン、2025.4.23.
- [59] 法橋顕広: Rigorous Test for Quantum Integrability and Nonintegrability、羽田野研セミナー、東京大学、2025.5.18.
- [60] 石井敬直、上田正仁: Quantum i.i.d. steady states in open quantum many-body systems、羽田野研セミナー、東京大学、2025.5.29.
- [61] 法橋顕広: Integrability from a Single Conservation Law in Quantum Spin Chains、Budapest integrability seminars、オンライン、2025.10.22.
- [62] 法橋顕広: Integrability from a Single Conservation Law in Quantum Spin Chains、BIMSA Integrable System Seminar、オンライン、2025.11.25.
- [63] 中川大也: 開放量子多体系における超伝導・超流動、セミナー、東京都立大学、2025.12.15.

(その他)

- [64] 小柳津敦、李宏超、中川大也、上田正仁: 散逸下の量子系におけるカオス的くりこみ群、第70回物性若手夏の学校、白浜荘、2025.7.30.
- [65] 山田彰造: 孤立量子多体系における回帰の非典型性、第70回物性若手夏の学校、白浜荘、2025.7.31.
- [66] 中川大也: 講義「開放量子系の非平衡物性物理」、第70回物性若手夏の学校、白浜荘、2025.7.30-8.1.
- [67] 中川大也: 集中講義「開放量子多体系の物理」、東京都立大学、2025.12.10, 12.12, 12.15.
- [68] 石井敬直、甲田昌也: NISQ デバイスによる開放量子多体系のシミュレーション、計算物理春の学校 2026、沖縄市町村自治会館、2026.3.11.

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長に移ったため、ビッグバン宇宙国際研究センターの方は兼務教授として務め、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

原始磁場進化の統一的解析とその宇宙論的制限

原始磁場の進化を統一的に記述する解析的枠組みを構築した。最大ヘリシティを持つ場合には磁気ヘリシティ密度保存則、非ヘリカルな場合には Hosking 積分が進化を強く制約することを明確化し、さらにエネルギー散逸過程の時間スケール評価と組み合わせることで、磁場強度およびコヒーレンス長の時間発展を系統的に導出した。また、散逸機構が磁気エネルギーと運動エネルギーの支配関係、減衰ダイナミクスの非線形性、ならびにせん断粘性と抗力のいずれが卓越するかによって大きく異なることを示し、原始磁場進化の物理像を包括的に整理した。さらに本手法を用いて初期宇宙の各時期における制約を比較した結果、電弱対称性の破れ以前における磁場生成（マグネトジェネシス）が極めて困難であることを示し、原始磁場起源に対して重要な制限を与えた [4]。

Einstein–Cartan 重力と宇宙論

Einstein–Cartan 重力では、一般相対論と異なり、トーシヨンの自由度が存在する。トーシヨンに由来する伝搬するスカラー自由度を取り出すことができ、これはインフレーションを実現しうる。その可能性の一つは、近年の Atacama Cosmology Telescope による観測結果、すなわちスカラースpektral 指数が Planck 衛星の結果より大きいという観測と整合的である [7]。また、トーシヨンと物質カレントの結合から、上述のスカラー自由度と物質との結合を一般的に導出し、具体例を示した [8, 43, 24]。

No-scale Brans–Dicke 重力と宇宙論

Brans–Dicke 重力は、ラグランジアンにスケールをもつパラメータが入らない理論である。Weyl 変換を行うと、Einstein 重力と一つのスカラー場からなる理論に移る。そのまま素粒子標準模型を導入すると、上述のスカラー場による fifth force によって強い制限を受けるが、標準模型に含まれる次元をもつパラメータを場で表し、さらに量子化の際に regularization スケールも場に依存させれば、スカラー場は標準模型の粒子と相互作用しなくなり、fifth force による制限を回避できる (no-scale Brans–Dicke 重力)。さら

に、 R^2 項、Higgs 場の non-minimal coupling、右手ニュートリノを導入し、そのシナリオにおけるインフレーション、再加熱、バリオン数生成、ダークマターについて議論した [5]。加えて、ダイナミカルダークエネルギーを実現する可能性も示した [6, 24]。

インフレーションのパワースペクトルへのスケール不変なループ補正の不存在

インフレーション中に小スケールの量子揺らぎが増大すると、ハッブル半径を超えるモードを含むことにより、スケール不変なループ補正が生じると主張する論文があった。テンソル揺らぎ [9, 36, 44, 24] に対するそのような補正が、ワンループレベルで打ち消し合うことを、それぞれあらわな計算によって示した。さらに、一般相対論における一般座標変換対称性により、このキャンセレーションが保証されることを示した。

オンシェル散乱振幅を用いたブラックホールの量子効果

オンシェル・プログラムとは、ラグランジアンや場を用いず、Poincaré 対称性や局所性、ユニタリ性を第一原理として要請し、散乱振幅を決定するブートストラップ法である。本研究では、この枠組みの中で、ホーキング放射などの量子効果がどう記述されるのかを明らかにした。具体的には、ホーキング放射は解析的には多体崩壊の総和で得られ、さらに非常に良い近似で、二体崩壊とみなせるということを示した。これを踏まえ、ブラックホールの二体散乱における観測量に、この量子効果がどう現れるかを定量的に明らかにした [41]。

時間依存した宇宙の状態方程式による原始ブラックホール形成の促進

原始ブラックホール (PBH) の十分な形成には通常、極めて大きな小スケール揺らぎが必要となる。放射成分と崩壊性スペクテイター・スカラー場の 2 成分流体を用いて、状態方程式が一時的に $w: 1/3 \rightarrow 0 \rightarrow 1/3$ と変化する宇宙史を数値解析した。準静的近似による評価から、低 w 期には形成閾値が下がり、形成効率が大きく増強されることが分かった。さらに、代表質量はスカラー場の崩壊率により主に決まり、概ね崩壊率の逆数に比例するため、崩壊率の選び方に応じて幅広い質量帯で PBH 生成が可能であることを示した [26]。

5.4.2 観測的宇宙論

宇宙複屈折と暗黒成分探索

近年、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測から宇宙複屈折と呼ばれる信号の兆候が報告されている。これは CMB の偏光面が宇宙空間を伝播する際に回転する現象で、アクシオン類似粒子 (ALP) などの新物理あるいは宇宙の暗黒成分探索の重要な手がかりとなる反面、信号から物理的な情報を引き出す上ではいくつかの課題が残る。我々は CMB の信号の測定で生じる宇宙複屈折の回転角の位相不定性を部分的に解消する手法を考案し、その有用性を示した [10, 72]。また CMB の解析用に開発したコードをもとにした Planck 衛星のデータ再解析により、ALP のパラメータに新たに制限が付けられた [12]。また、電波銀河などの遠方天体観測を用いて CMB と独立・相補的にこの信号を検証する手法を考案し、実際の観測プロジェクトへの応用を進めている [11, 71, 27, 38, 28, 34, 39, 40, 46, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64]。

時間軸天文学

近年、新たな観測装置の登場や計算機とうの情報処理技術の向上により、時間軸天文学の分野が大きく進展している。我々は東京大学木曽観測所のシュミット望遠鏡に搭載された CMOS カメラ「トモエゴゼン」を用いた、全北天の動画モニタリングサーベイを推進している [37, 45]。また、国立天文台すばる望遠鏡の広視野主焦点カメラ HSC によるアンドロメダ銀河 (M31) のモニタリング観測を行い、M31 に含まれる天体の変動天体検出や、それらの時系列データを用いたハッブル定数測定などの研究を推進している [49]。

5.4.3 重力波検出器 KAGRA データ解析

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は全著者論文の著者に名を連ねている [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23]。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 論文として出版され、KAGRA の認定著者はこれらの論文の著者にもなっている。現在、LIGO, Virgo, KAGRA は完全統合し、International Gravitational Wave Observatory Network (IGWN) を構築することを準備中であるが、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の任期終了後も KAGRA Executive Office 委員を務めると共に、IGWN デザイン委員会の KAGRA からの代表委員の一員を務めている。

<受賞>

- [1] 直川史寛, FoPM Final Examination 優秀賞, 理学系研究科, 2025 年 9 月 26 日.
- [2] 直川史寛, 第 38 回理論懇シンポジウム 若手発表賞, 理論天文学宇宙物理学懇談会, 2025 年 12 月 19 日.
- [3] H. Jeong, Outstanding Presentation Award Gold Prize, The 34th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG 34), Kyoto University, 2026/1/19-23.

<報文>

(原著論文)

- [4] F. Uchida, M. Fujiwara, K. Kamada and J. Yokoyama, “New comprehensive description of the scaling evolution of the cosmological magnetohydrodynamic system,” JCAP **08** (2025), 017
- [5] M. Hong, K. Mukaida and T. T. Yanagida, “No-scale Brans-Dicke Gravity – ultralight scalar boson & heavy inflaton,” JCAP **10** (2025), 032.
- [6] M. Hong, K. Mukaida and T. T. Yanagida, “Dynamical dark energy in the no-scale Brans–Dicke gravity,” Phys. Lett. B **870**, 139932 (2025).
- [7] M. He, M. Hong and K. Mukaida, “Increase of ns in regularized pole inflation & Einstein-Cartan gravity,” JCAP **09** (2025), 080.
- [8] M. He, M. Hong and K. Mukaida, “Torsion induced current-scalar coupling in Einstein–Cartan gravity,” JCAP **01** (2026), 002.
- [9] Y. Ema, M. Hong, R. Jinno and K. Mukaida, “Cancellation of one-loop correction to soft tensor power spectrum,” JCAP **01** (2026), 040.
- [10] F. Naokawa, T. Namikawa, K. Murai, I. Obata, K. Kamada “ $n \pi$ Phase Ambiguity of Cosmic Birefringence,” Phys. Rev. Lett. **136** 041003 (2026)
- [11] F. Naokawa “Universal Profile for Cosmic Birefringence Tomography using Radio Galaxies,” Phys. Rev. Lett. **136** 041004 (2026)
- [12] F. Naokawa “Planck Constraints on Axion-Like Particles through Isotropic Cosmic Birefringence,” Phys. Rev. D **112** 123513 (2025)
- [13] K. Aoki, A. Cristofoli, H. Jeong, M. Serrano and K. Yoshimura, Quantum Effects for Black Holes with On-shell Amplitudes, JHEP **12** (2025) 163.
- [14] A. G. Abac *et al.* [LIGO Scientific, Virgo and KAGRA], “GW241011 and GW241110: Exploring Binary Formation and Fundamental Physics with Asymmetric, High-spin Black Hole Coalescences,” Astrophys. J. Lett. **993** (2025) no.1, L21
- [15] A. G. Abac *et al.* [LIGO Scientific, Virgo and KAGRA], “GW250114: Testing Hawking’s Area Law and the Kerr Nature of Black Holes,” Phys. Rev. Lett. **135** (2025) no.11, 111403
- [16] A. G. Abac *et al.* [LIGO Scientific, Virgo and KAGRA], “Black Hole Spectroscopy and Tests of General Relativity with GW250114,” Phys. Rev. Lett. **136** (2026) no.4, 041403

- [17] A. G. Abac *et al.* [LIGO Scientific, KAGRA and VIRGO], “GWTC-4.0: An Introduction to Version 4.0 of the Gravitational-Wave Transient Catalog,” *Astrophys. J. Lett.* **995** (2025) no.1, L18
- [18] A. G. Abac *et al.* [KAGRA, LIGO Scientific and VIRGO], “All-sky search for short gravitational-wave bursts in the first part of the fourth LIGO-Virgo-KAGRA observing run,” *Phys. Rev. D* **112** (2025) no.10, 102005
- [19] A. G. Abac *et al.* [LIGO Scientific, VIRGO and KAGRA], “GW231123: A Binary Black Hole Merger with Total Mass 190–265 M_{sun} ,” *Astrophys. J. Lett.* **993** (2025) no.1, L25
- [20] A. G. Abac *et al.* [LIGO Scientific, VIRGO and KAGRA], “Search for Continuous Gravitational Waves from Known Pulsars in the First Part of the Fourth LIGO-Virgo-KAGRA Observing Run,” *Astrophys. J.* **983** (2025) no.2, 99
- [21] A. G. Abac *et al.* [LIGO Scientific, KAGRA and VIRGO], “Search for Gravitational Waves Emitted from SN 2023ixf,” *Astrophys. J.* **985** (2025) no.2, 183
- [22] 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
- [23] G. Raman *et al.* [LIGO Scientific, 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
- (学位論文)
- [24] 洪木子 “Gravitational and Quantum Aspects of the Accelerating Universe” 「加速膨張宇宙における重力と量子論」 博士論文 2026 年 3 月
- [25] 直川史寛 “Probing an extremely light psuedoscalar dark sectors through cosmic birefringence” 「宇宙論的旋光現象を用いた超軽量擬スカラー暗黒成分の探索」 博士論文 2026 年 3 月
- [26] 川口健三郎, 「時間依存した宇宙の状態方程式による原始ブラックホール形成の促進 (Enhancement of primordial black hole formation via a time-dependent equation of state of the universe.)」 (修士論文), 2026 年 3 月.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [27] F. Naokawa, “Toward an independent test of cosmic birefringence, FY2024 “What is dark matter? – Comprehensive study of the huge discovery space in dark matter””, online, 2025/4/24.
- [28] F. Naokawa, “Search for dark sectors using radio galaxies through cosmic birefringence, Astrophysical Probes of Dark Sectors Using Radiowave Observations”, IAC, Spain, 2025/10/2.
- [29] H. Jeong, “Quantum Effects for Black Holes with On-Shell Amplitudes”, Nagoya workshop on General Relativity, Nagoya University, 2026/1/26-28.
- [30] H. Jeong, “Quantum Effects for Black Holes with On-Shell Amplitudes”, The 34th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG 34), Kyoto University, 2026/1/19-23.
- 招待講演
- [31] J. Yokoyama, “Real-time analysis of vacuum decay in curved spacetime,” CosPA 2025, IBS Science Culture Center, Daejeong, Korea, 2025/7/9.
- [32] J. Yokoyama, “Science at Kavli IPMU and cooperation with University of Hawai’i,” Space science, engineering, and technology symposium, Honolulu, Hawai’i, USA 2025/9/22.
- [33] J. Yokoyama, “Gravitational waves from the early Universe,” Workshop on gravitational wave cosmology and fundamental physics, Hangzhou Institute for Advanced Study, 2025/10/30.
- [34] F. Naokawa, “Cosmic birefringence, Real or Not? Dark energy or Not?”, Parity Violation From Home, online, 2025/11.
- (国内会議)
- 一般講演
- [35] 横山順一 「LiteBIRD について」 DECIGO 研究会 京都大学理学部 2025/12/6
- [36] 江間陽平, 洪木子, 神野隆介, 向田享平, “インフレーションにおけるソフトテンソル二点相関関数へのスケール不変なワンループ補正の不存在について”, 日本物理学会, 第 80 回年次大会
- [37] 直川史寛, “トモエ動画全天レガシーサーベイと白色矮星の系外惑星探索”, 木曾シュミットシンポジウム 2025, オンライン参加, 2025/5/27.
- [38] 直川史寛, “天体光源による CMB 宇宙複屈折の独立検証法”, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大 2025/9/18.
- [39] 直川史寛, “宇宙複屈折の独立検証法について”, 第 38 回理論懇シンポジウム, 筑波大, 2025/12/18.
- [40] 直川史寛, “多波長電波サーベイによる CMB 宇宙複屈折の独立・相補的検証, 日本天文学会 2026 年秋季年会”, 京都産業大, 2026/3/4.
- [41] 鄭 玄, “ブラックホール散乱問題におけるホーキング放射の効果”, 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学, 2025/9/16-19.
- 招待講演
- [42] 横山順一 「雲の向こうの宇宙のはじまり」宇宙科学シンポジウム 宇宙科学研究所 2025/7/31.

- (セミナー)
- [43] Muzi Hong, “Inflation and current couplings in the Einstein-Cartan gravity”, EPFL
 - [44] Muzi Hong, “Cancellation of one-loop correction to soft tensor power spectrum”, DESY
 - [45] 直川史寛, “トモエゴゼン動画全天サーベイによるオールトの雲への挑戦”, 国立天文台, オンライン, 2025/4/8.
 - [46] F. Naokawa, “Cosmic birefringence and the exploration of new physics”, 東北大学, オンライン, 2025/4/21.
 - [47] F. Naokawa, “An independent test of cosmic birefringence using radio galaxies”, マックスプランク宇宙物理学研究所, 2025/4/29.
 - [48] F. Naokawa, “An independent test of cosmic birefringence using radio galaxies by radio surveys such as LOFAR, ASKAP, SKA”, ハンブルク天文台, 2025/5/7.
 - [49] F. Naokawa, “Measuring the geometric distance to M31 with 1% accuracy using the Subaru telescope”, ミュンヘン工科大学, 2025/5/13.
 - [50] F. Naokawa, “Independent tests of cosmic birefringence without CMB”, CMB/LSS Meeting, ケンブリッジ大学, 2025/6/19.
 - [51] F. Naokawa, “Probing cosmic birefringence and dynamical dark energy using radio galaxies in SKA era”, SKAO, 2025/7/10.
 - [52] F. Naokawa, “Probing Cosmic birefringence and dark energy using LOFAR, ASKAP, and SKA”, ライデン大学, 2025/7/14.
 - [53] F. Naokawa, “Search for Dark Energy and Cosmic Birefringence using Radio Galaxies”, Lunch Talk, ASTRON, 2025/7/16.
 - [54] F. Naokawa, “Cosmic birefringence and its independent tests”, 国立天文台ハワイ観測所, 2025/8/29.
 - [55] F. Naokawa, “Probing dark sectors through independent tests of cosmic birefringence”, マドリード自治大学, 2025/10/7.
 - [56] F. Naokawa, “LOFAR & SKA polarized source catalogues as probes of dark sectors”, マドリードコンプルテンセ大学, 2025/10/8.
 - [57] 直川史寛, “SKA を用いた宇宙複屈折の検証とアクション暗黒エネルギー検出への挑戦”, SKAJ, オンライン, 2025/9/26.
 - [58] F. Naokawa, “Cosmic Birefringence”, 東北大学, 2026/1/26.
 - [59] F. Naokawa, “Radio Galaxy Jets as probes of dark sectors energy”, 国立天文台, 2026/1/28.
 - [60] 直川史寛, “宇宙複屈折による CMB と電波銀河を用いた暗黒エネルギー探索”, IoA, 東京大学, 2026/2/5.
 - [61] F. Naokawa, “Probing Cosmic Birefringence with the CMB and radio galaxies”, 名古屋大学, 2026/2/9.
 - [62] F. Naokawa, “Cosmic Birefringence as a probe of Dark Sectors”, KEK, 2026/3/17.
 - [63] 直川史寛, “Probing Dark Energy and Dark Matter Using AGN and the CMB”, 筑波大学, 2026/3/17.
 - [64] 直川史寛, “SKA と電波銀河で暗黒エネルギー探索!”, SKAJ, オンライン, 2026/3/27.
 - [65] H. Jeong, “Quantum Effects for Black Holes with On-Shell Amplitudes” (slide presentation-style), NTU Strings Seminar, National Taiwan University, 2026/2/6.
 - [66] H. Jeong, “Quantum Effects for Black Holes with On-Shell Amplitudes” (black board presentation-style), NTU Strings Seminar, National Taiwan University, 2026/3/18.
- (アウトリーチ)
- [67] 横山順一 「雲の向こうの宇宙」 林忠四郎講演会「量子力学と宇宙論の 100 年」九州大学理学部 2025/11/7
 - [68] 横山順一 「宇宙のはじまりと終わり」 千葉大学医学部 卓越教養特論 2025/12/19
 - [69] 直川史寛, “大きな宇宙・小さな素粒子”, 奈良県立国際中学 3 年理科特別講演会, 奈良県立国際中学・高等学校, 2025/11/28.
 - [70] 直川史寛, “星を見ることは何の役に立つの? ～暗黒エネルギーの探し方～”, 五反田文化センタープラネタリウム 星空ゼミ, 品川区立五反田文化センター, 2026/3/14.
 - [71] 直川史寛, “ブラックホールを検出器として用いた暗黒エネルギー観測”, プレスリリース, 東京大学大学院理学系研究科, 2026/1/28.
 - [72] 直川史寛, 並河俊弥, 村井開, 小幡一平, 鎌田耕平 “宇宙の左右対称性を探る手がかりー宇宙複屈折の観測における不定性の軽減手法を発見ー”, プレスリリース, 東京大学大学院理学系研究科, 2026/1/28.

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。2025 年度は、LHW で生成した高エネルギー電子の物理的理解を目指して、硬 X 線測定、固体温度計測とそれらの解析を充実させた。その結果、高エネルギー電子の軌道が硬 X 線、固体温度に影響を及ぼしていることが確かめられた。硬 X 線 (HXR) 信号には時折バーストが現れるが、バーストと高エネルギー電子の閉じ込めの関係、運動している高周波磁場揺動との関係、他の信号との相関を調べ、バースト生成機構解明に向けた進展が得られた。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 (Electron Cyclotron Wave, ECW) 補助立ち上げ時の理論モデルを構築し、TST-2 での実験結果が矛盾しないことが確かめられた。QST からの委託研究では、線積分トムソン散乱計測の開発を継続し、本年度は、5 視線での温度分布測定に成功した。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おり、測定点の連続的な掃引機構を開発し、初期的な実験結果が得られた。

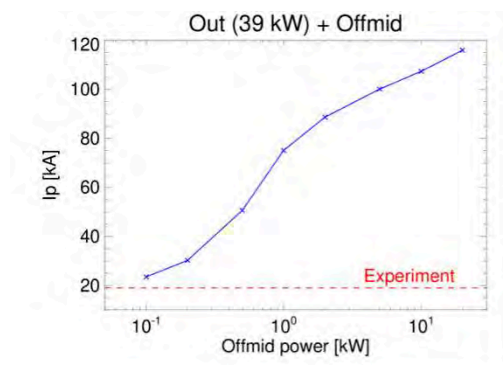


図 6.1.1: 外側アンテナの入射パワーを固定しオフミッドプレーンアンテナからの入射パワーを変化させた際の駆動電流の変化。実験においては外側アンテナから約 40 kW、オフミッドプレーンアンテナから約 20 kW を入射し、約 19 kA の駆動電流を達成している (赤線)。

6.1.2 低域混成波によるトカマクプラズマの非誘導生成

オフミッドプレーン入射シナリオ開発

TST-2 には、低域混成波 (LHW) の励起のためのアンテナが 3 系統設置されており、設置場所によって外側赤道面アンテナ、上側アンテナ、(外側) オフミッドプレーンアンテナと呼ばれている。これまでに外側赤道面アンテナと上側アンテナを用いて 27 kA のプラズマ電流を達成している。しかし、これら 2 系統によるプラズマ立ち上げシナリオでは駆動電流が周辺部に限られていた。また、入射される波動のスペクトルに対して電子の速度分布関数の変形が飽和しており、駆動電流の向上には新しいシナリオが必要である。オフミッドプレーンアンテナは、これらの問題を解決し、より磁気軸近傍での電流駆動のために設置された。

外側赤道面アンテナとオフミッドプレーンアンテナから LHW を同時に入射することで大きなプラズマ電流の駆動が期待される。光線追跡コード GENRAY とフォッカー・プランクコード CQL3D による電流駆動計算の結果を図 6.1.1 に示す。外側アンテナの入射パワーは 40 kW に固定し、オフミッドプレーンアンテナからの入射パワーを変化させた際の駆動電流の変化を図示している。計算上は、オフミッドプレーンアンテナから数 kW のパワーを重畳することで、プラズマ電流は倍増するという結果が得られた。しかしながら、赤点線で示されるように実験ではこのような顕著な相乗効果は観測されていない。図 6.1.2 に各アンテナ単独入射および両アンテナの同時入射の際の放電波形を示す。2 系統同時入射放電においては 50 ms からオフミッドプレーンアンテナ入射を外側赤道面アンテナ入射に重畳しているが、プラズマ電流の増加は 1 kA 程度に留まっている。このプ

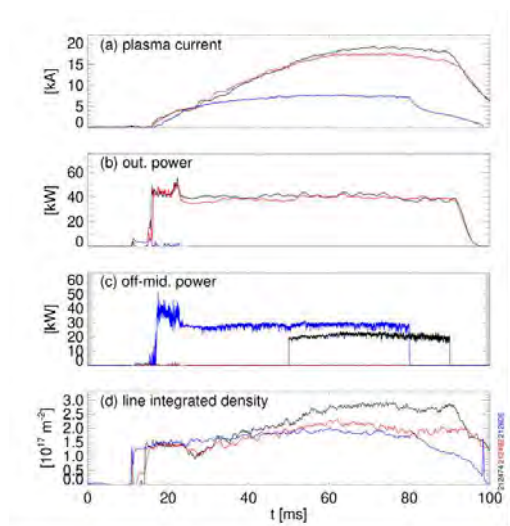


図 6.1.2: 外側アンテナとオフミッドプレーンアンテナを利用した際の放電波形。黒線は両方のアンテナを利用した場合、赤線は外側アンテナ単独の場合、青線はオフミッドプレーンアンテナ単独の場合をそれぞれ示している。

ラズマ電流の増加量は数値計算に比べて非常に小さい。したがって、数値計算において考慮されていない要因によって、オフミッドプレーンアンテナからの入射パワーが電流駆動に寄与していないことが考えられる。この要因の1つにはパラメトリック崩壊不安定性 (PDI) が考えられる。PDIにより、意図していない波数・周波数の波が励起され、計算で仮定されているような電流駆動シナリオが成立していない可能性があるためである。しかし、真空容器の上・下・外側に設置された高周波磁気プローブによる波動計測では、外側赤道面アンテナ単独入射と2系統同時入射の間で、PDIの活動に有意な差は見られなかった。今後は新たな磁気プローブを真空容器の高磁場側に設置するなど、波動計測・解析を進める予定である。

硬 X 線計測による高エネルギー電子損失解析

対向壁の各部位における高エネルギー電子損失を同定するため、多視線の硬 X 線 (HXR) 計測系を設置した (図 6.1.3)。HXR 検出器はコリメート付きシンチレータ・光電子増倍管 (PMT) で構成されており、上側リミタ、外側リミタ、センタースタック、および可動式金属プレートからの放射を同時に観測できる。高計数率条件下での運用を可能にするため、パルス掃引解析に基づく波高再構成手法を導入した。これにより、パルスの重なり (パイルアップ) が著しい状況においても、エネルギースペクトルの高精度な抽出が可能となり、高エネルギー電子の損失過程に対して、高い時間分解能を備えた解析が実現した。

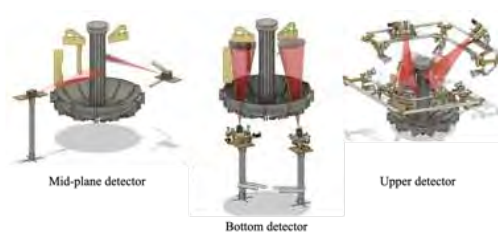


図 6.1.3: 新たに設置した多視線 HXR 計測系。

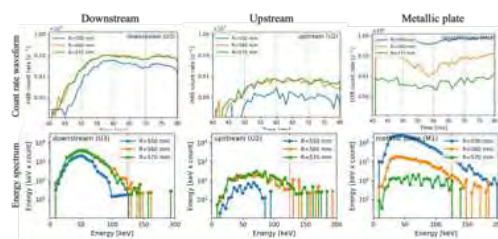


図 6.1.4: プレート挿入実験における HXR 信号の変化。

高エネルギー電子損失の空間分布を調査するため、可動式金属プレートをを用いた境界変更実験を行った (図 6.1.4)。上側入射条件下では、プレートの挿入に伴い、プレートと上側リミタ間での HXR 放射の空間分布に明確な変化が生じ、強いエネルギー依存性が確認された。これは、複数の競合する損失チャネルが存在すること、従って、電子がどこで失われるかを決定する上で軌道効果が重要な役割を果たしていることを示唆している。対照的に、外側入射条件下では、放射分布の変化は最小限であり、より局所的で制約された損失チャネルが支配的であることを示している。

ターゲットプローブによる高エネルギー電子分布推定

LHW プラズマのスクレイブオフ層 (SOL) における高エネルギー電子損失を調べるため、TST-2 の下部に、モリブデン製ターゲットプローブを新たに設置した。このシステムは、 $R = 470$ mm の地点において Z 方向に直線駆動が可能である。さらに、外側リミタおよび上側リミタには熱電対を設置した。

外側赤道面アンテナから入射した LHW プラズマにおいて、既設の外側ターゲットプローブと、新たに設置した下側プローブのスキャン実験を行った。図 6.1.5 に示す。この実験では、外側の回転式プローブを赤道面に固定し、下側の直線駆動式プローブを下側リミタから最外殻磁気面 (LCFS) に向かって Z 方向にスキャンした。結果として、下側プローブの挿入に伴い、外側プローブへの流入パワーが減少した。これは、輸送による損失よりも直接的な軌道損失の方が支配的であることを示唆している。加えて、外側および上側リミタの温度変化はプローブの移動に依存しなかった。

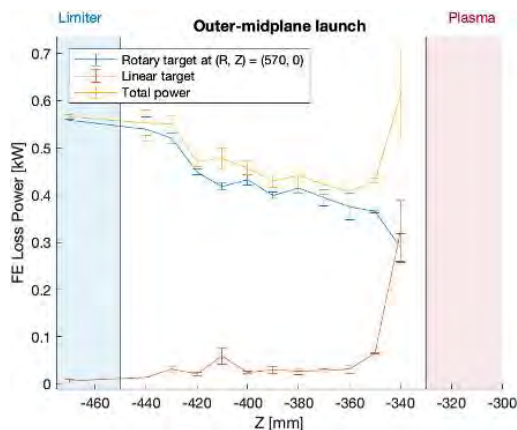


図 6.1.5: 外側及び下側ターゲットプローブ掃引実験において推定された高エネルギー電子損失電力。

LCFS で生成される高エネルギー電子の軌道を追跡するため、2D モンテカルロ軌道追跡シミュレーションコードを開発した。ポロイダル断面における 2D 磁場は平衡計算から取得したもので、トロイダル対称性を仮定している。電子軌道は、ドリフトおよび相対論的効果を考慮している。リミターの形状は 2D で考慮しているが、ターゲットの形状は 3D として扱っている。電子エネルギー依存性や、空間的な中心・偏差に対する損失パワーの依存性を含めた軌道特性を解析した。

HXR バーストの観測

LHW 運転中に観測される HXR バーストの時間特性、運転依存性、および性能への影響を調べた。40 MHz で計測した 6 チャンネル NaI(Tl) 検出器システムと、深刻なパルス重なり条件向けに設計されたパルス積分解析を用いることで、全 HXR エネルギーとバーストに伴うエネルギーの両方を一貫した手法で定量化した。結果として、HXR バーストは単一の孤立したスパイクではなく、断続的な準周期的挙動を示す複数のサブピークの集合体であることが示された。バーストの持続時間は主に 5–20 μs の範囲に集中しており、典型的な値は 11 μs 付近であった。一方、連続するピーク間の間隔は一般的に 0.8–1.0 ms 程度であった。相互相関関数の解析によれば、バースト事象は周回電圧の応答や磁気揺動と密接に関連しているが、従来の低周波 MHD 活動によって駆動されているという明確な証拠は見つからなかった。

統計的解析の主要な成果は、バースト生成を促進する運転条件を特定したことである。積算バーストエネルギー、及び全放射エネルギーに対するバーストエネルギーの割合（バーストエネルギー率）はともに外部垂直磁場 B_z の増加とともに増大し、一方で線平均電子密度が低いほどバーストが頻繁に発生した。図 6.1.6 に示すように、全 HXR エネルギーとバーストエネルギー率はともに B_z の増加に伴って上昇しており、垂直磁場が強いほどバーストに伴う

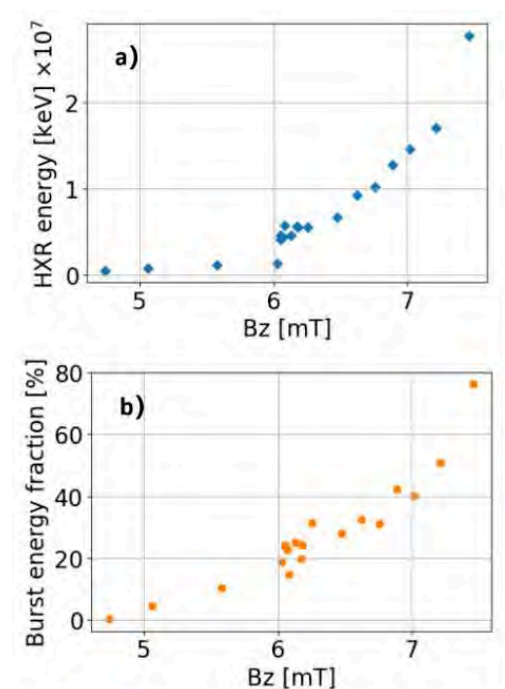


図 6.1.6: 積算バーストエネルギー a) とバーストエネルギー率 b) の垂直磁場依存性。

高エネルギー電子損失が増大することを示している。

トムソン散乱計測

TST-2 における複数視線の線積分トムソン散乱 (LITS) 計測のため、限られた真空容器内のスペースに設置可能な、小型かつ高性能なビームダンプを開発した。完全後方散乱配位の LITS システムではビームダンプからの迷光が大きな課題となるため、各種材料の反射特性を評価し、YAG レーザー（波長 1064 nm）に対する吸収性と加工のしやすさに優れた黒化処理ステンレス板を採用した。BRDF（双方向反射率分布関数）測定等により拡散反射が迷光の主因であると特定し、2 枚の板を鋭角に突き合わせる構造を導入した結果、トムソン散乱計測に影響しないレベルまで迷光を低減できた。さらに、ポリクロメーターに遮断波長幅を狭めた特注のノッチフィルターを導入し、長波長側のトムソン散乱信号への影響を最小限に抑えつつ、残存する迷光成分を大幅に除去することに成功した。

構築した複数視線の LITS システムに対し、アライメント用レーザーを用いた相対立体角測定とラマン散乱測定を組み合わせることで、各視線の相対感度校正と絶対立体角分布の算出を行った。その後、TST-2 のオーミック加熱プラズマを対象に 5 視線の LITS 計測を実施し、電子温度・密度分布を取得した（図 6.1.7）。真空容器内のコンディショニングによる放電パラメータの変化を考慮し、従来法による測定

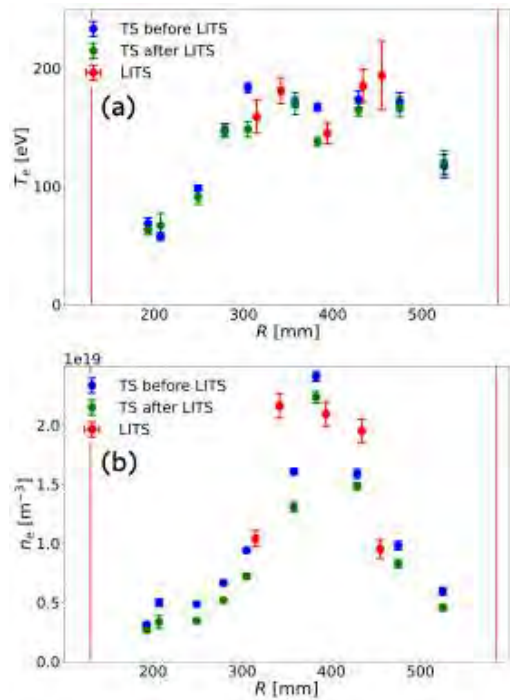


図 6.1.7: 従来型トムソン散乱法（線積分法による測定の前：青，後：緑）と線積分トムソン散乱法（赤）で計測した電子温度分布（a），電子密度分布（b）。

を線積分法による測定の前後に行った。LITS 計測によって測定された電子温度・密度分布は、プラズマの再現性及び計測領域の不確かさを考慮すると、従来型トムソン散乱法で得られた空間分布と一致した。

マイクロ波干渉偏光計

LHW 電流駆動シナリオの構築には数値計算が必須であるが、その妥当性検証のためにはプラズマ内部の電子密度と磁場分布の精密な直接計測が不可欠である。この検証精度向上を目的とし、電子密度の線積分値と内部磁場解析の要となるファラデー角の同時計測が可能な垂直 4 視線 (CH1-4) を備えたマイクロ波干渉偏光計の改良・高精度化を行っている。

2025 年度の電子密度計測においては、4 視線での計測から電子密度分布を推定し、外側入射と上側入射で分布が異なるという計測結果を得た。一方、ファラデー角計測においては、理論値が約 2° であるのに対し実測値が約 20° と大きく乖離していた。これに対し、偏光反転による系統誤差の除去を行うことで、偏光位相の系統誤差を理論値と同オーダーまで抑制することに成功した（図 6.1.8）。しかし、プラズマ由来の偏光回転では説明できないノイズ信号が残存した。

ノイズ源特定のため周波数変調実験を実施した結果、位相差に非線形な周波数依存性と振幅変動が確認され、真空容器内での反射波が計測に影響を与え

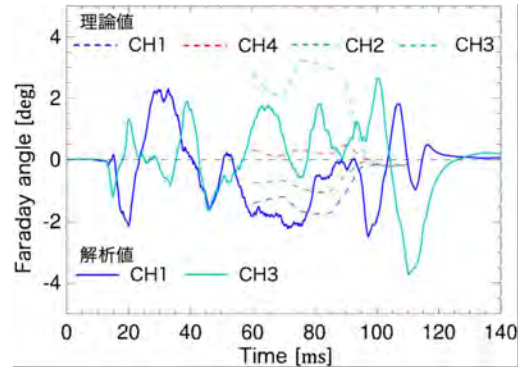


図 6.1.8: ファラデー角の計測値（実線）と平衡計算からの推定値（破線）の比較。

ている可能性が示唆された。ベンチテストと干渉モデルによる解析から、真空容器の上下壁面における反射波によってファラデー角に最大 $\pm 11^\circ$ の誤差が生じることが示された。これに対して、天井部に傾斜板を設置することで最大位相誤差を 10 分の 1 以下に抑えられる見通しを得た。今後はこの知見を TST-2 本体に適用し、高精度なファラデー角計測の確立を目指す。

トロイダル電流密度分布計測器

プラズマ内の電流密度分布を詳細に計測するため、小型ボビンレスコイルを用いた電流密度分布計測プローブ（電流プローブ）の開発を行った。本プローブは、垂直方向および水平方向の磁場を検出するピックアップコイル群を 2 本のプローブアレイ上に配置した構造を持ち、アンペールの法則の微分系を適用することで局所的なトロイダル電流密度 (j_t) 分布を計測する。2025 年度には、開発した電流プローブを TST-2 に適用し、オーミック (OH) プラズマおよび低域混成 (LH) 波駆動プラズマにおける電流密度分布計測を実施した。OH プラズマ実験の結果、規格化小半径 $r/a \simeq 0.73, 0.82, 0.91$ における j_t のピーク値として、それぞれ $-80 \text{ kA/m}^2, -40 \text{ kA/m}^2, -20 \text{ kA/m}^2$ という有意な値が得られ、電流密度分布の計測に成功した。LH プラズマにおける計測結果（図 6.1.9）では、内側の計測点 (j_{t2}) においてのみ物理的に妥当な大きさの電流密度が確認された。計測された j_{t2} は 12 kA/m^2 であり、これは平衡再構成の計算値とも概ね一致している。これらの結果から、開発されたプローブによる電流密度分布計測手法の定性的な妥当性が示された。

パラメトリック崩壊不安定性の数値モデリング

粒子シミュレーション (PIC) コード Smilei を用いて、トカマクプラズマにおける非線形波動相互作用のモデリングを行った。まず、1 次元系において低域混成周波数帯のシミュレーションを行った（図

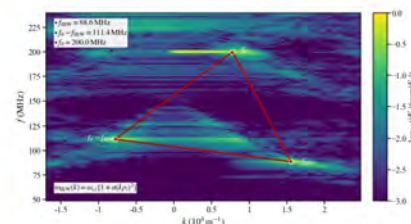


図 6.1.10: 低域混成周波数帯の 1 次元 PIC シミュレーションから得られた k - ω スペクトル.

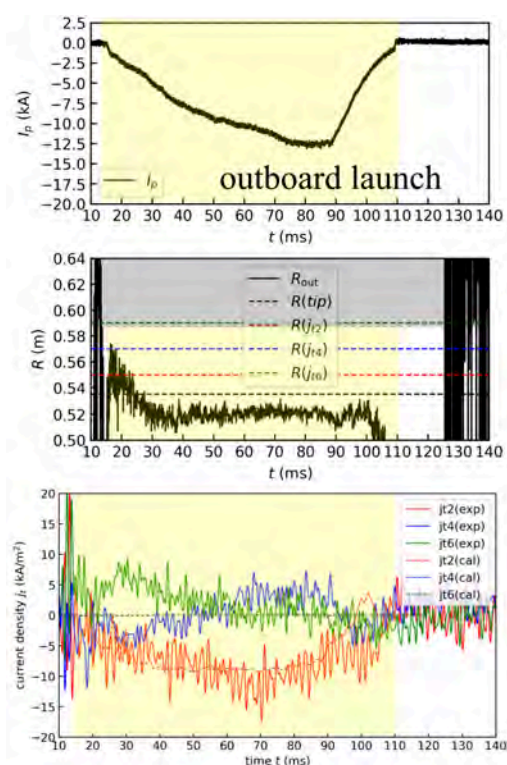


図 6.1.9: LH プラズマの (a) プラズマ電流, (b) 最外殻磁気面位置, 電流密度の計測位置, および (c) トロイダル電流密度. (c) の実線はプローブで計測された値, 破線は平衡再構成で計算された計算値である.

6.1.10). 得られた k - ω スペクトルには, イオン・バーンスタイン波 (IBW) の励起と整合するパラメトリック崩壊過程が確認された. 具体的には, 200 MHz のポンプ波に対して崩壊派のピークが 88.6 MHz および 112.2 MHz 付近に観測された. また, 高次のサイドバンドも観測された.

6.1.3 共同研究

JT-60SA の電子サイクロトロン波補助立ち上げ

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 (ECW) 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. 2025 年度は軌道平均フォッカー・プランクコードと拡張 MHD 平衡計算を統合した. 本手法を TST-2 における ECW 補助立ち上げ実験に適用した結果, 実験結果と整合する平衡配位と位相空間分布関数を推定することができた.

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の開発・運用を担当している. 2025 年度は, 東大設置分も含めて 3 台のポリクロメータの SN 比改善のために, 検出器の入れ替えを行った. QUEST 装置では 6 時間を超える長時間準定常放電が可能であり, 測定点を時間的に掃引して実効的な測定点数を飛躍的に増大させるために遠隔ファイバー移動機構を製作・試験し, 初期的な実験結果を得た.

FAST プロジェクト

国内のいくつかの大学とスタートアップ企業とともに立ち上げた FAST (Fusion by Advanced Superconducting Tokamak) プロジェクトは, 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、装置の概念設計、計測系の整備案作成に貢献した。概念設計においては、0次元解析を行い核融合出力、中性子壁負荷、装置コストの観点で設計パラメータ依存性を明らかにした。計測系においては、ITERや原型炉との違いを明確化するとともに必要な計測をリストした。

<報文>

(原著論文)

- [1] K. Shinohara, K. Tani, N. Hayashi, S. Sumida, A. Ejiri, N. Tsujii, M. Suzuki, A. Bierwage, S. Nishimura, Y. Peng, Y. T. Lin, Y. Tian, and F. Adachi, *Plasma Fusion Research* **20**, 1403017 (2025).
- [2] K. Kuroda, R. Raman, T. Onchi, Y. Otsuka, T. Motoki, M. Hasegawa, K. Hanada, M. Ono, J. A. Rogers, R. Ikezoe, H. Idei, T. Ido, M. Nagata, T. Kanki, O. Mitarai, N. Nishino, K. Kono, S. Kawasaki, T. Nagata, A. Higashijima, S. Shimabukuro, I. Niiya, I. Sekiya, K. Nakamura, A. Ejiri, and S. Murakami, *Physics of Plasmas* **32**, 042506 (2025).
- [3] A. Ejiri, Y. Takase, N. Ashikawa, T. Fujita, K. Hanada, K. Ibano, H. Igami, Y. Kume, S. Konishi, Y. Ono, K. Seko, H. Tanaka, K. Tobita, T. Tsujimura, and H. Tsutsui, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **67**, 075002 (2025).
- [4] Y. Peng, A. Ejiri, K. Shinohara, N. Tsujii, Y. T. Lin, Y. M. Tian, Z. N. Jiang, F. Adachi, Y. G. Jiang, S. Y. Wang, M. Yoshida, Y. Takechi, T. Ido, K. Kono, and Y. Nagashima, *Review of Scientific Instruments* **96**, 083507 (2025).
- [5] Y. Nagashima, K. Hanada, H. Zushi, H. Idei, M. Hasegawa, K. Nakamura, T. Onchi, R. Ikezoe, T. Ido, T. Kinoshita, A. Fujisawa, S. Kawasaki, T. Nagata, S. Shimabukuro, T. Mutaguchi, K. Kono, I. Niiya, I. Sugiyama, A. Higashijima, S. Kojima, K. Kuroda, A. Ejiri, Y. Takase, T. Shikama, A. Kuzmin, and K. Nagaoka, *Review of Scientific Instruments* **96**, 109823 (2025).
- [6] Y. Takechi, A. Ejiri, K. Shinohara, N. Tsujii, Y. Peng, Y. T. Lin, Z. Jiang, Y. Tian, F. Adachi, S. Wang, T. Ido, K. Kono, and Y. Nagashima, *Plasma and Fusion Research* **20**, 1401046 (2025).
- [7] K. Hanada, H. Idei, T. Ido, R. Ikezoe, Y. Nagashima, M. Hasegawa, T. Onchi, T. Kinoshita, K. Kuroda, M. Oya, Y. Oya, K. Nakamura, N. Yoshida, T. Nagata, A. Higashijima, S. Shimabukuro, I. Niiya, I. Sekiya, K. Kono, S. Kawasaki, A. Ejiri, S. Murakami, R. Raman, and M. Ono, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **67**, 115031 (2025).
- [8] K. Shinohara, K. Tani, N. Hayashi, S. Sumida, A. Ejiri, N. Tsujii, T. Inoue, M. Suzuki, A. Bierwage, Y. T. Lin, Y. Tian, F. Adachi, S. Abe, and Y. Takechi, *Plasma Fusion Research* **20**, 1403058 (2025).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [9] S. Wang, A. Ejiri, K. Shinohara, N. Tsujii, T. Inoue, Y. Lin, Z. Jiang, Y. Tian, F. Adachi, S. Abe, Y. Takechi, K. Yoshida, Z. Tang, Y. Taniguchi, and S. Suebsak, 9th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS DPP 2025), Fukuoka, Sep. 21–26, 2025.
- [10] A. Ejiri, N. Ashikawa, T. Fujita, K. Hanada, K. Ibano, H. Igami, Y. Kume, S. Konishi, Y. Ono, K. Seko, Y. Takase, H. Tanaka, K. Tobita, T. Tsujimura, and H. Tsutsui, 30th IAEA Fusion Energy Conference, Chengdu, China, Oct. 13–18, 2025.
- [11] 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, 30th IAEA Fusion Energy Conference, Chengdu, China, Oct. 13–18, 2025.
- [12] Y. Tian, A. Ejiri, N. Tsujii, K. Shinohara, T. Inoue, Y. Lin, Z. Jiang, F. Adachi, S. Wang, S. Abe, Y. Takechi, Y. Taniguchi, Z. Tang, K. Yoshida, and S. Suksaengpanomrung, Korea-Japan Workshop on Physics and Technology of Heating and Current Drive, Gyeongju, Korea, Feb. 23–24, 2026.
- [13] S. Wang, A. Ejiri, K. Shinohara, N. Tsujii, T. Inoue, Y. Lin, Z. Jiang, Y. Tian, F. Adachi, S. Abe, Y. Takechi, K. Yoshida, Z. Tang, Y. Taniguchi, and S. Suebsak, Korea-Japan Workshop on Physics and Technology of Heating and Current Drive, Gyeongju, Korea, Feb. 23–24, 2026.

招待講演

- [14] A. Ejiri and FAST team, 9th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS DPP 2025), Fukuoka, Sep. 21–26, 2025.
- [15] A. Ejiri, Annual Meeting of the Physical Society of Taiwan, Chiayi, Taiwan, Jan. 13–15, 2026.

(国内会議)

一般講演

- [16] 江尻晶, 桑原大介, 篠原孝司, 辻井直人, 井上孟流, 林彥廷, 蔣正男, 田一鳴, 安立史弥, 阿部隼哉, 王圣予, 武智雄大, 吉田鴻志, 唐喆軒, 谷口陽, 日本物理学会第80回年次大会, 広島大学, 2025年9月16–19日.
- [17] 井上孟流, 吉田勝, 江尻晶, 篠原孝司, 辻井直人, 林彥廷, 蔣正男, 田一鳴, 安立史弥, 阿部隼哉, 王圣予, 武智雄大, 吉田鴻志, 唐喆軒, 谷口陽, 日本物理学会第80回年次大会, 広島大学, 2025年9月16–19日.

- [18] 江尻晶, 藤田隆明, 伊庭野健造, 長谷川真, 中村祐司, 飛田健次, 林祐貴, 福山淳, 久米祥文, 岩井貞憲, 花田和明, 辻村亨, 剣持尚輝, 西村美紀, 第 42 回プラズマ・核融合学会 年会, 京都工繊大, 2025 年 12 月 1-4 日.
- [19] 辻井直人, 江尻晶, 篠原孝司, 井上孟流, 林彥廷, 蔣正男, 田一鳴, 安立史弥, 阿部隼哉, 王圣予, 武智雄大, 吉田鴻志, 唐喆軒, 谷口陽, 第 42 回プラズマ・核融合学会 年会, 京都工繊大, 2025 年 12 月 1-4 日.
- [20] 井上孟流, 吉田勝, 江尻晶, 篠原孝司, 辻井直人, 林彥廷, 蔣正男, 田一鳴, 安立史弥, 阿部隼哉, 王圣予, 武智雄大, 吉田鴻志, 唐喆軒, 谷口陽, スクサエンパノムランスエブサック, 第 42 回プラズマ・核融合学会 年会, 京都工繊大, 2025 年 12 月 1-4 日.
- [21] 吉田鴻志, 江尻晶, 武智雄大, 彭翊, 蔣正男, 篠原孝司, 辻井直人, 井上孟流, 林彥廷, 田一鳴, 安立史弥, 阿部隼哉, 王圣予, 唐喆軒, 谷口陽, スクサエンパノムランスエブサック, 井戸穀, 河野香, 永島芳彦, 第 42 回プラズマ・核融合学会 年会, 京都工繊大, 2025 年 12 月 1-4 日.
- [22] 江尻晶, 桑原大介, 篠原孝司, 辻井直人, 日本物理学会 2026 年春季大会, オンライン, 2026 年 3 月 23-26 日.
- (セミナー)
- [23] 江尻晶, 「核融合が与える社会へのインパクト〜大きく変わる?」, 放射線安全フォーラム市民公開講座 2026, 東京大学, 2026 年 3 月 15 日.

6.2 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索す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索を行う、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索す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索する基礎的研究や、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。

6.2.1 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 1）。

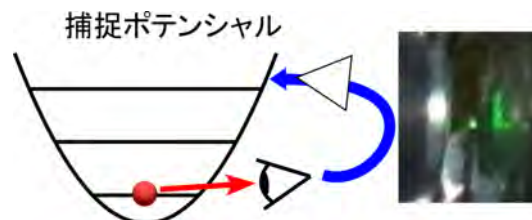


図 6.2.11: 図 1：単一ナノ粒子のフィードバック冷却。右は実際に捕捉されたナノ粒子の写真。

(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、運動の量子性を探索する研究や、高感度加速度センサーとしての応用にに向けた研究も開始している。

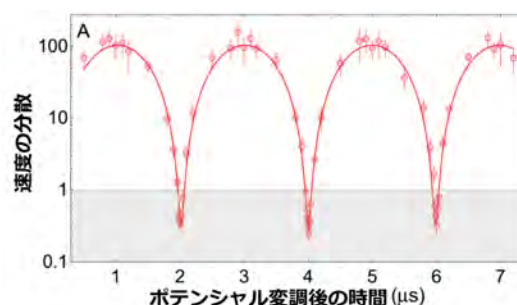


図 6.2.12: 図 2：ナノ粒子の量子スクイーミング。時間と共に速度分散が変化し、基底状態の揺らぎを最大で 5dB 程度下回る。

(3) 量子スクイーミングの実現

ナノ粒子の一方向の重心運動を基底状態へと冷却した上で、光強度の高速な変調を利用することで、ナノ粒子の運動に関する量子スクイーミングを実現した（図 2）。飛行時間法を利用し、運動量分布の揺らぎが、基底状態の揺らぎより 5dB 程度小さくなることを確認した。さらに、スクイーミングレベルの定量的な評価のため、光検出器を光格子によってキャリブレーションする新しい手法を開発し、従来手法

による位置の絶対値の測定が正確であることを検証した。この成果は、浮揚させた巨視的物体において初めて生成された非古典的な運動状態であり、今後、量子センシングや巨視的物体における量子力学の研究の端緒となることが期待される。

6.2.2 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を持つ。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。2025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、真空チャンバーおよび光源の製作を完了し、ナノ粒子の基底状態への冷却を実現した。

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。2025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、光源の製作を完了した。

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。2025年度は、既存の装置を活用し、世界で初めて、浮揚させた微粒子における非古典的な状態の生成に成功した。

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。2025年度は、真空チャンバーの構築および光源の製作を完了した。

<受賞>

- [1] 小田部 荘達、日本物理学会若手奨励賞、日本物理学会、2025年11月12日。

<報文>

(原著論文)

- [2] M. Kamba, N. Hara, K. Aikawa, Science 389, 1225-1228 (2025).

(国内雑誌)

- [3] 日本物理学会誌、「単一浮揚ナノ粒子における全機械的自由度のフィードバック冷却」、第80巻6号、2025年

(学位論文)

修士論文

- [4] 浮谷拓未、冷却原子気体による量子電流標準実現に向けた磁気光学トラップシステムの構築、修士論文、2026年3月。

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [5] Kiyotaka Aikawa, "Quantum squeezing of a levitated nanomechanical oscillator," Czech-Japan Workshop on Quantum Technologies 2025, 27 May 2025, Prague, Czech.
[6] Kiyotaka Aikawa, "Experiments with a levitated charged nanoparticle," Symposium on quantum computing and manipulation by trapped ions, 28 November 2025, RIKEN, Japan.

(国内会議)

招待講演

- [7] 相川 清隆、「浮揚ナノ粒子における量子スクイーミングの実現」、ダイキン - ipi シンポジウム「CREST 合同量子フロンティアの明日」、2025年11月26日
[8] 相川 清隆、「浮揚ナノ粒子における非古典的な運動状態の生成」、第46回レーザー学会年次大会、2026年1月15日

(セミナー)

- [9] 相川 清隆、第10回創発研究交流会、2025年12月3日
[10] 相川 清隆、駒場物性セミナー、2025年12月19日

6.3 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。2015年9月には米国のLIGOによって、重力波信号が初めて観測され、「重力波天文学」が幕をあげた。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望遠鏡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。

6.3.1 大型重力波望遠鏡 KAGRA

KAGRAは2010年に建設が開始された、岐阜県神岡の地下にある大型低温重力波望遠鏡である。2015年のAdvanced LIGOによる重力波の初観測以降、重力波望遠鏡の感度は着実に向上し、総イベント観測数はおよそ300にものぼっている。LIGO, Virgo, KAGRAの各望遠鏡は近年さらなる高感度化を目指したアップグレードを行い、2023年から2025年にかけてObservation 4 (O4)と呼ばれる長期共同観測運転を行った。アメリカ、イタリア、日本の三極での重力波同時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、一般相対性理論が预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など、様々な新しい知見が得られると期待されている。加えて技術的な側面でも、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、次世代重力波望遠鏡にとっても重要な役割を担っている。

KAGRA の現状

O4開始時点では観測可能な連星中性子星観測可能レンジ(BNSレンジ)は1Mpc程度であったが、O4中盤で約2年間のコミッショニング期間を設けて感度向上に取り組み、O4後半となる2025年5月ごろにはBNSレンジを7Mpcまで向上させて共同観測に合流した。コミッショニング期間に行われたのは鏡の冷却、干渉計パワーの増大、防振系の改良などである。現在は次期観測運転O5に向けてさらなる感度向上に向けたアップグレード作業が行われている。数年後には25Mpc以上のBNSレンジを実現してO5に参加、KAGRAで初めて重力波を観測し、国際観測網への確実な貢献を目指している。

コミッショニングと感度評価

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、定期的な変位感度の雑音バジェットとコミッショニング方針の策定、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。本年度はまず、KAGRAの感度を高周波で制限する周波数雑音の評価を行った。現在の周波数雑音の由来を特定し、雑音低減のために必要な具体的な改良手法を提案した。続いて、主干渉計の角度制御の最適化を行った。KAGRAの最も感度の高い周波数帯で現在問題となっている非定常的な雑音の原因候補のひとつが、試験質量の残留角度揺れである。多段振り子のうちの振り子にどの周波数帯でフィードバック制御を行うかという階層制御のトポロジーを改良し、残留角度揺れの最小化を目指した。さらに、次期観測運転で期待される現実的な雑音バジェットを構築した。全ての鏡の30Kまでの冷却、干渉計への入射パワーの30Wへの増大とシグナルリサイクリング、新しいサファイア鏡導入による同相雑音除去の向上などで、BNSレンジは25Mpc以上に到達する見込みである。これによりKAGRAでの初めての重力波初観測を目指す。

6.3.2 宇宙空間重力波望遠鏡

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を用いて、長距離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、減速プロセス時に使用する変位測定手法の新しい候補である、レーザー光の強度変調・復調を用いた手法の原理実証を行った。レーザー光に強度変調をかけて変調周波数で復調することで、マイケルソン干渉計の非対称性に対応した長さを測定することが可能となる。大きなレンジでの長さの絶対値測定の面では有効性を示すことが一方で、変位雑音スペクトルにおけるフロア雑音が想定よりも大きいという問題点も見つかり、その解決に取り組んだ。また、フォーメーションフライトの衛星バスシステム・スラスタ制御などを担当する工学系チームと協力して理工連携での検討会を繰り返し行い、分野の異なる理学および工学チーム同士の認識のすり合わせや制御系の改良などに繋がった。

6.3.3 ねじれ型重力波検出器 TOBA

Torsion-Bar Antenna (TOBA) とは、ねじれ振り子の水平回転を利用した新しい重力波検出器であり、既存の検出器の帯域外である低周波数帯 (0.1-10 Hz 付近) の重力波を地上で観測することができる。これにより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 30 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 の特徴として、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、光共振器での回転計測を行うことが挙げられる。これらは、Phase-III で新しく導入する技術である。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、共振器制御動作の実証や低温で低損失な懸架ファイバーの開発を行っている。

光共振器制御

2024 年度に光学系と懸架系を組み合わせた実験系を設計・開発し、懸架系の動作実証とねじれ回転角計測を行った。これによって Phase-III での基本的な構成を確立した一方で、測定は補助センサーである光てこによるものにとどまり、主センサーである光共振器の制御は未実現であった。そこで、ねじれ振り子における共振器制御手法を考案して実証し、共振器での回転角計測を行った [16]。この手法は、ねじ

れ振り子に組み込まれた 2 本の光共振器の信号を同相信号と差動信号に分離し、それぞれの信号を適切なフィルターとアクチュエーターを用いて制御するものである。実験系には、ねじれ振り子間に向き合うように取り付けられたコイルのペアに電流を流すことでねじれ振り子の動作を駆動するコイル-コイルアクチュエーターと、共振器に入るレーザー光源の周波数アクチュエーターが備えられている。本手法では、2つのコイル-コイルアクチュエーターを同相・差動モードに分離し、さらに周波数アクチュエーターを同相アクチュエーターとして用いることで、光共振器の同相・差動モードの制御を実現した。共振器制御を獲得する段階において、非制御時に共振器長が制御レンジを通過する速さに応じて制御系の応答速度が要求されるが、本手法では応答速度の速い周波数アクチュエーターにより初期の制御を獲得して段階的に各成分を制御することにより、この要求を満たした。共振器での読み出しによって光てこでの測定から大きく感度を向上し、図 6.3.13 に示すように、キャリブレーションに不定性は残るものの 0.1 Hz において $10^{-7} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ の感度を達成した。並進地面振動雑音が感度を制限していると考えられ、今後は懸架点の防振や振り子の傾き調整によって振動雑音を低減することで感度を向上する予定である。

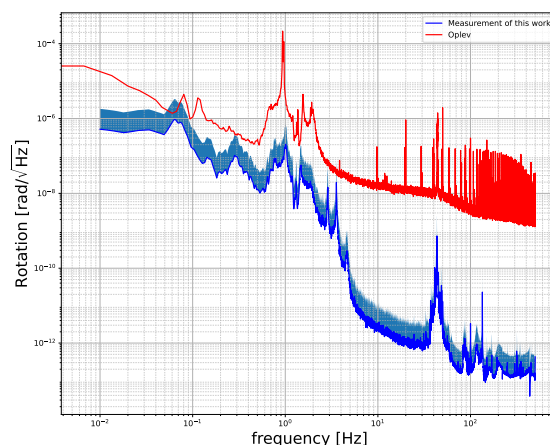


図 6.3.13: ねじれ回転角度への感度。青色の帯がキャリブレーションの不定性を含めた本研究での感度を、赤色の線が昨年度の光てこでの感度を示している。

低損失懸架ファイバの開発

目標感度を妨げる雑音の 1 つに、振り子の懸架ワイヤに起因する熱雑音がある。この熱雑音の低減のため、Phase-III TOBA では低温環境と結晶ファイバーを組み合わせる熱雑音低減を図っており、低温下で熱雑音の少ない懸架ワイヤの開発を進めている。揺れを励起し、光てこを用いて減衰を記録することで熱雑音の指標となる Q 値を測定する。昨年度までに、低温でサファイアファイバーの Q 値測定実験を

行い、4 K まで冷却された環境下で 5.458 Hz において 2.986×10^5 という Q 値を達成した。

6.3.4 アクシオンダークマター探索実験 DANCE

ダークマターとは、1933 年に行われたかみのけ座銀河団内の銀河の運動の観測から、その存在が示唆された正体不明の物質である。現在では、宇宙マイクロ波背景放射などの宇宙観測から、ダークマターは宇宙に存在する物質のうち約 8 割を占めていることが明らかになった。これまではダークマターの最有力候補の WIMP が約 40 年間探索されてきたが、未だに検出の兆候はない。そのため、近年では WIMP 以外の候補への関心も高まっている。

我々はその中でも超軽量ダークマターの候補の一つであるアクシオンに着目している。アクシオンには光子と相互作用し得る性質があり、これによりレーザー光の直線偏光が微小に回転振動する。我々は光リング共振器を用いて偏光面の回転振動を増幅し検出する実験：DANCE (Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment) を提案し、研究を行っている。DANCE では、s 偏光と p 偏光が光共振器で同時に共振することにより、広質量帯域にわたって高感度なアクシオン探索が可能となる。しかし、レーザー光がミラーで反射する際に s/p 偏光間に反射位相差が生じるため、s/p 偏光が同時に共振せず、感度が大幅に低下してしまう。そこで、現在は周回長 1 m の光リング共振器を用いたプロトタイプ実験を行い、s/p 偏光の同時共振手法の開発と雑音の評価を進めている。

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 偏光間に生じる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、広質量帯域にわたって感度を改善できる。同時共振の実現には、s/p 偏光間の反射位相差の時間変動を要求値を満たす精度まで抑える必要がある。昨年度は、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調整することにより、要求値を満たす精度での測定に成功した。本年度は、ゼロ位相差ミラーと波長可変レーザーを用いた手法の提案と昨年度行った s/p 偏光間の反射位相差測定の結果を論文として出版した [1]。

ゼロ位相差ミラーによる s/p 偏光同時共振の実証および性能試験

ゼロ位相差ミラーを用いて周回長 1 m のボウタイ共振器を構築し、レーザー波長を調整することで、

高フィネスの光リング共振器において初めて s/p 偏光の同時共振を実現した。また偏光回転測定における雑音の評価を行い、これまで非自明であったレーザー周波数雑音といった位相雑音のカップリングメカニズムを明らかにした。雑音カップリングの低減、オフライン解析による雑音除去等によって、現在は 10 Hz-100 kHz の帯域でショットノイズ限界まで一桁以内の感度に到達している。

光増幅器の性能評価

DANCE の感度は原理的にはショットノイズによって制限される。ショットノイズ限界の改善のために、光リング共振器への入射光パワーを向上することが必要不可欠である。本年度は、波長可変レーザーのシード光、および半導体光増幅器によりハイパワー化されたレーザー光について、それぞれ強度雑音と周波数雑音を測定し、その結果を比較した。強度雑音は低周波数帯において電流雑音により最大で 1 桁程度悪化した。一方、周波数雑音は一部帯域を除き、ハイパワー化による悪化は確認されなかった。今後は、ハイパワー化された波長可変レーザーを用いて s/p 偏光の同時共振を実現し、目標感度の達成を目指す。

6.3.5 基礎物理・量子光学実験

オプトメカニクス研究

当研究室では mg スケールの質量帯で量子雑音感度に到達する実験系の構築を目指している。その様な系を実現する動機は主に 2 つある。一つは量子雑音低減技術の実証プラットフォームへの応用である。重力波検出器をはじめとするレーザー干渉計を用いた精密測定では将来、低周波数帯における感度が量子輻射圧雑音で制限されることが予想される。予め量子輻射圧雑音が支配的な実験系を構築することでその様な量子雑音の低減に向けた手法の実証を行う基盤としての活用が期待される。もう一つは基礎物理検証への応用である。本研究が扱う mg スケールは量子系としては極めて巨視的であることに加え、重力相互作用の測定を現実的に行える下限の質量帯でもある。その様な質量帯で量子雑音レベル（究極的には標準量子限界感度）を達成することは未だかつてなく巨視的な量子系の性質検証になることに加え重力の量子性など現代物理学の根幹に迫る足掛かりとなる。現在はその最初の段階として質量約 38 mg のねじれ振子において、その回転モードが読み出し用レーザーの量子輻射圧雑音で駆動される状態を達成することを目指している。本年度上半期にはねじれ振子部分以外の主要な光学系、防振系等の実験系構築が完了した。下半期にはねじれ振子を直径約 6 μm のカーボンファイバーで懸架することに成功し実験系全体の構築がほぼ完了した。また、振子の機械的な曲げモードなど、より現実的な雑音を考慮した到達感度見積もりを進めた。現在の約 38 mg の

ねじれ振り子で量子輻射圧感度到達が可能であることを再確認すると同時に、振り子部分を約 100 mg のものに換装することで標準量子限界感度への到達も可能であることを確認した。今後は、2026 年度前半中を目処に量子輻射圧雑音の観測を実現することを目指す。

6.3.6 Balanced Homodyne Detection による重力波検出の実証

より多くの重力波イベントを検出するために、重力波望遠鏡の観測時間を増やすことは重要である。現在、カリフォルニア工科大学にある 40m プロトタイプ干渉計を用いて、ロックアクイジション時間の短縮を目指した研究を行っている。CARM 自由度を広帯域まで制御することにより、CARM オフセットを 0 にする間に生じる光学プラントの変化に対して、安定性を維持することで、オフセット減少中に LIGO が踏む多くのステップを省略し、85 秒ほど高速なロックアクイジションを実現した。

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。制御を導入して主共振器の動作確認の研究を進めた。

<報文>

(原著論文)

- [1] H. Takidera, *et al.*: Adjusting optical cavity birefringence with wavelength tunable laser for axion searches, *Phys. Rev. D* 112, 063048 (2025).
- [2] K. Suzuki *et al.*: Observation of an optical spring in a robustly controlled signal-recycled Michelson interferometer, *Opt. Express* 33, 40026-40039 (2025).
- [3] E. Berti, *et al.*: deci-Hz Gravitational Wave Observations on the Moon and Beyond, *arxiv:2602.05923* (2026).
- [4] Y. Michimura, *et al.*: Initial acquisition requirements for optical cavities in the space gravitational wave antennae DECIGO and B-DECIGO, *Class. Quantum Grav.* 42, 225027 (2025).

- [5] T. Ito, *et al.*: SILVIA: Ultra-precision formation flying demonstration for space-based interferometry, *PASJ psaf086* (2025).
- [6] Y. Okuma, *et al.*: Cross-correlated force measurement for thermal noise reduction in torsion pendulum, *Phys. Rev. D* 111, 082006 (2025).
- [7] A. G. Abac *et al.*: Search for Continuous Gravitational Waves from Known Pulsars in the First Part of the Fourth LIGO-Virgo-KAGRA Observing Run, *ApJ* 983, 99 (2025).
- [8] A. G. Abac *et al.*: Search for Gravitational Waves Emitted from SN 2023ixf, *ApJ* 985, 183 (2025).
- [9] A. G. Abac *et al.*: GW250114: Testing Hawking's Area Law and the Kerr Nature of Black Holes, *Phys. Rev. Lett.* 135, 111403 (2025).
- [10] A. G. Abac *et al.*: GW241011 and GW241110: Exploring Binary Formation and Fundamental Physics with Asymmetric, High-spin Black Hole Coalescences, *ApJL* 993, L21 (2025).
- [11] A. G. Abac *et al.*: GW231123: A Binary Black Hole Merger with Total Mass 190-265 Msolar, *ApJL* 993, L25 (2025).
- [12] A. G. Abac *et al.*: All-sky search for short gravitational-wave bursts in the first part of the fourth LIGO-Virgo-KAGRA observing run, *Phys. Rev. D* 112, 102005 (2025).
- [13] A. G. Abac *et al.*: GWTC-4.0: An Introduction to Version 4.0 of the Gravitational-Wave Transient Catalog, *ApJL* 995, L18 (2025).
- [14] A. G. Abac *et al.*: Black Hole Spectroscopy and Tests of General Relativity with GW250114, *Phys. Rev. Lett.* 136, 041403 (2026).

(学位論文)

- [15] Hiroki Fujimoto: Search for Ultralight Axion Dark Matter with Polarization-Degenerate Optical Ring Cavity, 博士論文 (2025 年 9 月).
- [16] 杉岡達哉: 重力波望遠鏡 TOBA のレーザー干渉計による制御動作, 修士論文 (2026 年 3 月).
- [17] 山口 由貴: ねじれ型重力波望遠鏡のための機械散逸の評価, 修士論文 (2026 年 3 月).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [18] Masaki Ando: Status of KAGRA, LVK Meeting (March 11th, 2026, Pala Todisco, Pisa, Italy).
- [19] Kentaro Komori: Decadal upgrade strategy for KAGRA toward post-O5 gravitational-wave astronomy –Hardware side–, Phenikaa International Symposium 2026 on High Frequency Gravitational Waves Astrophysics (Jan. 2026, Phenikaa University).

[20] K. Komori: Laser interferometer in space - DECIGO and SILVIA-, deciHz Gravitational Wave Observations on the Moon and Beyond (Sep. 2025, Johns Hopkins University).

[21] Masaki Ando: Status of KAGRA, LVK Meeting (September 10th, 2025, Colorado State University, USA).

一般講演

[22] Masaki Ando: Report from KSC Board, The 36th KAGRA F2F Meeting (December 15th, 2025, Yonsei University, Korea).

[23] Masaki Ando: IGWN Fundamental Documents, The 36th KAGRA F2F Meeting (December 15th, 2025, Yonsei University, Korea).

[24] Kentaro Komori et al.: Ultra-precise measurement landscape at Hongo, KAGRA Future Working Group 5th open meeting (Nov. 2025, University of Tokyo).

[25] Masaki Ando: Report from KSC Board, The 35th KAGRA F2F meeting (Aug. 2025, Toyama University).

[26] Masaki Ando: IGWN Formation Status Overview, The 35th KAGRA F2F meeting (Aug. 2025, Toyama University).

[27] Masaki Ando: IGWN Design Committee, The 35th KAGRA F2F meeting (Aug. 2025, Toyama University).

[28] Kentaro Komori: KAGRA 10yr task force - Summary of the KAGRA hardware upgrade plan, The 35th KAGRA F2F meeting (Aug. 2025, Toyama University).

[29] Tatsuya Sugioka, *et al.*: Current Status of TOrsion Bar Antenna experiment, Gravitational Wave Detector Workshop (May 2025, Florida).

[30] Hinata Takidera, *et al.*: Latest results on Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment (DANCE), FY2024 “What is dark matter? - Comprehensive study of the huge discovery space in dark matter” (April 2025, Online).

ポスター発表

[31] H. Fujimoto, *et al.*: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment DANCE: simultaneous s/p resonance, noise coupling identification and current sensitivity, March 2026 LIGO - Virgo - KAGRA (LVK) Collaboration Meeting (March 2026, Pisa, Italy).

[32] Tatsuya Sugioka, *et al.*: TOrsion-Bar Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observation, LIGO-Virgo-KAGRA collaboration meeting March 2026 (March 2026, Pisa).

[33] Ryosuke, Sugimoto, *et al.*: Development of a milligram-scale optomechanical torsion pendulum: Towards quantum radiation pressure noise-level sensitivity, The 35th KAGRA Face-to-Face meeting (Aug. 19th, 2025, University of Toyama).

[34] Tatsuya Sugioka, *et al.*: Development of Torsion Pendulum with Interferometric Readout for TOBA, The 35th KAGRA Face-to-Face meeting (August 2025, Toyama).

[35] Ryosuke, Sugimoto, *et al.*: Development of milligram-scale optomechanical torsion pendulum: Towards quantum noise-level sensitivity II, Quantum Innovation 2025 (Jul. 29th, 2025, Congress Square Grand Green Osaka, Osaka).

[36] Tatsuya Sugioka, *et al.*: Development of gravity gradient sensor TOBA; TOrsion Bar Antenna, Quantum Innovation 2025 (July 2025, Osaka).

(国内会議)

招待講演

[37] 杉本良介: 光共振器を用いた宇宙重力波検出器に向けたバックリンク干渉計の実証, キャビティー分光ユーザーズミーティング (2025 年 12 月, 理化学研究所, 和光).

[38] 安東正樹: 重力波宇宙物理学の今とこれから京都大学談話会 (2025 年 10 月 2 日, 京都大学).

[39] Kentaro Komori, Gravitational wave detectors - principle, current status, and future-, Astronomy, Cosmology, and Gravity 2025 (Oct. 2025, Myoko).

[40] 安東正樹: 重力波宇宙物理学の今とこれから東北大学談話会 (2025 年 8 月 6 日, 東北大学).

[41] Kentaro Komori, Synergy between gravitational wave detectors and macroscopic optomechanics, OIST seminar (Jul. 2025, OIST).

一般講演

[42] 瀧寺陽太, 他: 光リング共振器を用いたアクシオン暗黒物質の探索実験 DANCE (20): ショットノイズ限界の改善, 日本物理学会 2026 年春季大会 (2026 年 3 月, オンライン).

[43] 杉岡達哉, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (51): 重力波望遠鏡 TOBA のレーザー干渉計による制御動作, 日本物理学会 2026 年春季大会 (2026 年 3 月, オンライン).

[44] 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 IV, 日本物理学会 2026 年春季大会 (2026 年 3 月, オンライン開催).

[45] 赤池飛雄, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (207): 精密フォーメーションフライトに向けた非対称マイケルソン干渉計による速度測定, 日本物理学会 2026 年春季大会 (2026 年 3 月, オンライン).

[46] 小森健太郎, 他: KAGRA の周波数雑音: 現状と今後の展望, 日本物理学会 2026 年春季大会 (2026 年 3 月, オンライン).

[47] 安東正樹, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (202): DECIGO/B-DECIGO の概要, 日本物理学会 2026 年春季大会 (2026 年 3 月 24 日, オンライン).

- [48] 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13回領域会議 (2026年1月13日, 東京科学大).
- [49] 安東正樹, 他: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, CRCタウンミーティング (2025年12月13日, リモート開催).
- [50] 安東正樹, 他: 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO/B-DECIGO, 2025年第24回 DECIGO ワークショップ (2025年12月6日, 京都大学).
- [51] 矢口稜聖, 他: SIVLIAにおける光学系の設計とレーザー強度変調による速度の精密測定, 2025年第24回 DECIGO ワークショップ (2025年12月6日, 京都大学).
- [52] 小森健太郎, 他: DECIGOサイエンスレビュー論文 Chapter1: 干渉計の概要と感度, 2025年第24回 DECIGO ワークショップ (2025年12月6日, 京都大学).
- [53] 安東正樹, 他: 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO/B-DECIGO, 第69回 宇宙科学技術連合講演会 (2025年11月27日, 札幌コンベンションセンター, 北海道).
- [54] 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 (2025年11月12日, 東京大学).
- [55] 轟優里, 他: ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA(Phase-III)の開発 (50): サファイアファイバーで懸架されたねじれ振り子の低温でのQ値測定, 日本物理学会第80回年次大会 (2025年9月, 広島大学).
- [56] 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 (18): 偏光回転測定における雑音源の調査, 日本物理学会第80回年次大会 (2025年9月, 広島大学).
- [57] 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 (19): 高感度化に向けたレーザーパワーの向上, 日本物理学会第80回年次大会 (2025年9月, 広島大学).
- [58] 杉岡達哉, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III)の開発 (49): 高感度ねじれ振り子と読み取り光学系の開発, 日本物理学会第80回年次大会 (2025年9月, 広島大学).
- [59] 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 III, 日本物理学会第80回年次大会 (2025年9月, 広島大学).
- [60] 小森健太郎, 他: 超精密フォーメーションフライト実証機 SILVIA(1): 概要と現状, 日本物理学会第80回年次大会 (2025年9月, 広島大学).
- [61] 大永新一, 他: 超精密フォーメーションフライト実証機 SILVIA(2): レーザー光強度変調を用いた衛星間相対速度計測の実証, 日本物理学会第80回年次大会 (2025年9月, 広島大学).
- [62] 安東正樹, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO計画 (197): DECIGO/B-DECIGOの概要, 日本物理学会第80回年次大会 (2025年9月, 広島大学).
- [63] Kentaro Komori, High-Frequency GW experiments: Laser Interferometer, One day workshop on HFGWs (Aug. 2025, KEK).
- [64] 小森健太郎, 他: KAGRA10年計画: 高周波帯の感度向上, Japan Gravitational Wave Community 2025年研究会 (2025年5月, オンライン).

ポスター発表

- [65] 安東正樹: 高感度重力勾配センサによる地震早期アラート手法の確立, 第8回 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) シンポジウム (2026年2月2日, 伊藤謝恩ホール, 東京大学, 東京).
- [66] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO/B-DECIGO, 第25回宇宙科学シンポジウム (2025年7月31-8月1日, 宇宙科学研究所).
- (セミナー・アウトリーチ講演)
- [67] 安東正樹: 重力波宇宙物理学と量子計測技術, 第11回 創発研究交流会 (2026年3月31日, 東京大学 + オンライン).
- [68] Kentaro Komori: Listen to the Universe!, Short program equity Institut Teknologi Bandung 2026 (Feb. 2026, Online).
- [69] 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) (2025年8月, 理学部1号館).
- [70] 安東正樹: 重力波・暗黒物質・オプトメカニクス, TBN2025 (2025年6月20日, 東京大学).

6.4 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2028年放球予定のsuperHERO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、XRISM衛星・GRAMS計画・superHERO計画・COSI計画・硬X線検出器XRPIXの開発研究を行った。

6.4.1 高エネルギー天体の観測的研究

本年度は特にXRISM衛星を用いた高エネルギー天体の高分散観測を中心に様々な成果を挙げた。今年度最も際立った成果は、銀河中心にあまねくそんざいする超巨大ブラックホールの一つPDS456からの物質放出についての観測結果である。我々はPDS456

のスペクトルに、光速の 0.2–0.3 倍の速度で噴き出す鉄からの吸収線を複数本発見した。吸収線は細く、複数の速度成分があるということだ。この結果は、超巨大ブラックホールから光速に近い速度で噴き出す物質 (Ultra-fast outflow: UFO) が存在し、clumpy で何成分も存在する (図 6.4.14 参照) ことを示唆している。このような clumpy な UFO は世界で初めての発見であり、Nature に掲載され [3] 記者会見を行うなど注目を集めた。この他にも超新星残骸・中性子星などで多くの成果を挙げている。

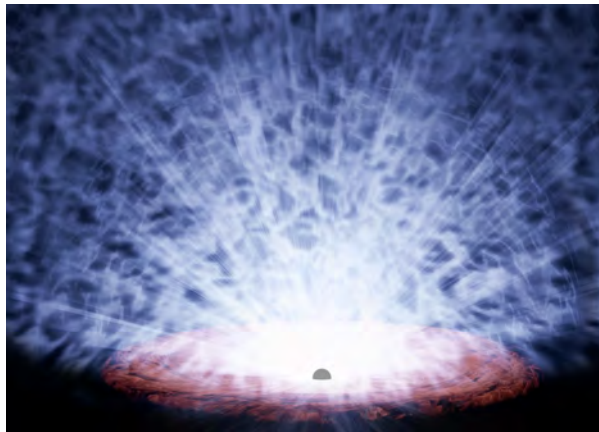


図 6.4.14: 超巨大ブラックホール PDS 456 の想像図。
(c) ISAS/JAXA

6.4.2 将来宇宙観測に向けた機器開発研究

我々は 2028 年度放球を目指した宇宙硬 X 線高空間分解気球実験 superHERO に本格的に参画し、主要機関として開発を進めた。特に主焦点面検出器の読み出しシステムの開発を担当し、2025 年度 1 年間で読み出しシステムを組み上げた [41]。2026 年 2 月には複数のメンバーが 1 か月 NASA/MSFC に滞在し、主焦点検出器のビーム試験を成功させるなど、放球に向け主導的に開発を進めている。

また、硬 X 線検出器の基礎開発として馬場研では XRPIX と呼ばれる半導体検出器の開発も行っている。我々は XRPIX のチップ内部に ADC まで組み込む完全デジタル化を目指している。宇宙用としてエネルギー分解能やゲインといったエネルギー関連の目標は達成しているが、光子到達時刻測定精度や dead time 率など時刻関連の目標についてはほとんど測定されてこなかった。我々はこれらについて初めて精密測定に成功し、時刻関連性能も宇宙用としての目標を達成されていることを示した [42]。

<報文>

(原著論文)

- [1] Aya Bamba, Manan Agarwal, Jacco Vink, Paul Plucinsky, Yukikatsu Terada, Ehud Behar, Satoru

Katsuda, Koji Mori, Makoto Sawada, Hironori Matsumoto, Lia Corrales, Adam Foster, Shin-ichiro Fujimoto, Liyi Gu, Kazuhiro Ichikawa, Kai Matsunaga, Tsunefumi Mizuno, Hiroshi Murakami, Hiroshi Nakajima, Toshiki Sato, Haruto Sonoda, Shunsuke Suzuki, Dai Tateishi, Hiroyuki Uchida, Masahiro Ichihashi, Kumiko Nobukawa, Salvatore Orlando, “Measuring the asymmetric expansion of the Fe ejecta of Cassiopeia A with XRISM/Resolve”, PASJ, 77, S144 (2025)

- [2] T. Tamba, H. Odaka, A. Tanimoto, H. Suzuki, S. Takashima, A. Bamba, “The nature of spectral variability of the accreting pulsar Centaurus X-3 unveiled by NuSTAR observation covering two orbital cycles” ApJ, 984, 126 (2025)
- [3] Tashiro, M., XRISM collaboration, “X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission”, PASJ, 77, S1 (2025)
- [4] Liyi Gu, Hiroya Yamaguchi, Adam Foster, Satoru Katsuda, Hiroyuki Uchida, Makoto Sawada, Frederick Scott Porter, Brian J. Williams, Robert Petre, Aya Bamba, Yukikatsu Terada, Manan Agarwal, Anne Decourchelle, Matteo Guainazzi, Richard Kelley, Caroline Kilbourne, Michael Loewenstein, Hironori Matsumoto, Eric D. Miller, Yuken Ohshiro, Paul Plucinsky, Hiromasa Suzuki, Makoto Tashiro, Jacco Vink, “Evidence for Charge Exchange Emission in Supernova Remnant N132D from XRISM/Resolve Observations”, PASJ, 77, S188 (2025)
- [5] XRISM collaboration, “XRISM forecast for the Coma Cluster: stormy, with a steep power spectrum”, ApJL, 985, L20 (2025)
- [6] Jacco Vink, Manan Agarwal, Aya Bamba, Liyi Gu, Paul Plucinsky, Ehud Behar, Lia Corrales, Adam Foster, Shin-ichiro Fujimoto, Masahiro Ichihashi, Kazuhiro Ichikawa, Satoru Katsuda, Hironori Matsumoto, Kai Matsunaga, Tsunefumi Mizuno, Koji Mori, Hiroshi Murakami, Hiroshi Nakajima, Toshiki Sato, Makoto Sawada, Haruto Sonoda, Shunsuke Suzuki, Dai Tateishi, Yukikatsu Terada, Hiroyuki Uchida, “Mapping Cassiopeia A’s silicon/sulfur Doppler velocities with XRISM-Resolve”, PASJ, 77, S154 (2025)
- [7] XRISM collaboration, “Constraining gas motion and non-thermal pressure beyond the core of the Abell 2029 galaxy cluster with XRISM”, PASJ, 77, S242 (2025)
- [8] XRISM collaboration, “Thermal and Kinematic Properties of Ejecta in SN1987A revealed by XRISM”, PASJ, 77, S193 (2025)
- [9] XRISM collaboration, “Structured ionized winds shooting out from a quasar at relativistic speeds”, Nature, 641, 1132 (2025)
- [10] XRISM collaboration, “Kinematic Evidence for Bipolar Ejecta Flows in the Galactic SNR W49B”, ApJL, 988, L58 (2025)

- [11] CTA collaboration, “Detection of the Geminga pulsar at energies down to 20 GeV with the LST-1 of CTAO” , *A&A*, 698, A283 (2025)
- [12] CTA collaboration, “GRB 221009A: Observations with LST-1 of CTAO and Implications for Structured Jets in Long Gamma-Ray Bursts” , *ApJL*, 988, L42 (2025)
- [13] J. Zeng, T. Aramaki, K. Aoyama, S. Arai, S. Arai, 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, N. Hiroshima, M. Ichihashi, Y. Ichinohe, Y. Inoue, K. Ishikawa, K. Ishiwata, T. Iwata, G. Karagiorgi, T. Kato, H. Kawamura, D. Khangulyan, J. Krizmanic, J. LeyVa, A. Malige, J.G. Mitchell, J.W. Mitchell, R. Mukherjee, R. Nakajima, K. Nakazawa, H. Odaka, K. Okuma, K. Perez, N. Poudyal, I. Safa, K. Sakai, M. Sasaki, W. Seligman, J. Sensenig, K. Shirahama, T. Shiraishi, S. Smith, Y. Suda, A. Suraj, H. Takahashi, S. Takashima, T. Tamba, M. Tanaka, S. Tandon, R. Tatsumi, J. Tomsick, N. Tsuji, Y. Uchida, Y. Utsumi, S. Watanabe, Y. Yano, K. Yawata, H. Yoneda, K. Yorita, M. Yoshimoto, “Antihelium-3 Sensitivity for the GRAMS Experiment” , *Astroparticle Physics*, 173, 103152 (2025)
- [14] Paul PLUCINSKY, Manan AGARWAL, Liyi GU, Adam FOSTER, Toshiki SATO, Aya BAMBA, Jacco VINK, Masahiro ICHIHASHI, Koji MORI, Hiroshi NAKAJIMA, Haruto SONODA, Shunsuke SUZUKI, Dai TATEISHI, Yukikatsu TERADA, Hiroyuki UCHIDA, Hiroya YAMAGUCHI, “XRISM Observations of Cassiopeia A: Overview, Atomic Data, and Spectral Models” , *PASJ*, 77, S171 (2025)
- [15] XRISM collaboration, “Stratified wind from a super-Eddington X-ray binary is slower than expected” , *Nature*, 646, 57 (2025)
- [16] XRISM collaboration, “Delving into the depths of NGC 3783 with XRISM II. Cross-calibration of X-ray instruments used in the large, multi-mission observational campaign” , *A&A*, 702, A147 (2025)
- [17] Xi Long, Paul P. Plucinsky, Terrance J. Gaetz, Vinay Kashyap, Aya Bamba, William P. Blair, Daniel Castro, Adam R. Foster, Charles J. Law, Dan Milisavljevic, Eric Miller, Daniel J. Patnaude, Manami Sasaki, Hidetoshi Sano, Piyush Sharda, Benjamin F. Williams, Brian J. Williams, Hiroya Yamaguchi, “Chandra Large Project Observations of the Supernova Remnant N132D: Measuring the Expansion of the Forward Shock” , *ApJ*, 993, 136 (2025)
- [18] XRISM collaboration, “Comparing XRISM cluster velocity dispersions with predictions from cosmological simulations: are feedback models too effective?” , *ApJL*, 993, L11 (2025)
- [19] CTA collaboration, “VHE γ -ray observations of bright BL Lacs with the Large-Sized Telescope prototype (LST-1) of the CTAO” , *MNRAS*, 544, 669 (2025)
- [20] XRISM collaboration, “XRISM/Resolve View of Abell 2319: Turbulence, Sloshing, and ICM Dynamics” , *PASJ*, 77, 1278 (2025)
- [21] XRISM collaboration, “Chlorine and potassium enrichment in the Cassiopeia A supernova remnant” , *Nature Astronomy*, *Nature Astronomy*, 10, 144 (2026)
- [22] CTA collaboration, “CTAO LST-1 observations of magnetar SGR 1935+2154: Deep limits on sub-second bursts and persistent tera-electronvolt emission” , *A&A*, 706, A25 (2026)
- [23] XRISM collaboration, “A XRISM/Resolve View of the Dynamics in the Hot Gaseous Atmosphere of M87” , *ApJ*, 998, 210 (2026)
- [24] Giulia Brunelli, Kaya Mori, Jaeyeon Park, Jordan Eagle, Moaz Abdelmaguid, Melania Nynka, Hongjun An, Aya Bamba, Joseph D. Gelfand, Gabriele Ponti, Samar Safi-Harb, Vito Sguera, Cristian Vignali, Jooyun Woo, Roberta Zanin, “New Hard X-Ray and Multiwavelength Study of the PeVatron Candidate PWN G0.9+0.1 in the Galactic Center Region” , *ApJ*, 998, 230 (2026)
- [25] Satoshi Takashima, Hirokazu Odaka, Ryota Tomaru, Atsushi Tanimoto, Aya Bamba, Toru Tamagawa, “X-ray Analysis and Photon-transport Simulations of SMC X-1: A Warped-disc Origin of the Superorbital Modulation” , *MNRAS*, 546, stg168 (2026)
- [26] Manan Agarwal, Jacco Vink, Liyi Gu, Paul P. Plucinsky, Aya Bamba, Toshiki Sato, Daniele Rogantini, Yuken Ohshiro, “Mapping plasma properties of Cassiopeia A with XRISM/Resolve: a Bayesian analysis via UltraSPEX” , *A&A*, 1000, 47 (2026)
- [27] Masahiro Ichihashi, Aya Bamba, Dai Tateishi, Kouichi Hagino, Satoru Katsuda, Hiroyuki Uchida, Hiromasa Suzuki, Ryo Yamazaki, Yutaka Ohira, “The Electron Temperature Distribution and the High Ionization Just behind the Shock in the Cygnus Loop” , *ApJ*, 992, 1, 30 (2026)
- [28] Nicholas E. Thomas, Hugo Allaire, Jeff A. Apple, Adrianah E. Appleman, Dhamar Astilla Munoz, Aya Bamba, Stephen D. Bongiorno, McKinley Brumback, Patrick R. Champey, Chien-Ting Chen, Renata S. Cumbee, Steven R. Ehlert, G. Fujimoto, Jessica A. Gaskin, Danielle N. Gurgew, Anthony R. Guillory, Kouichi Hagino, Philip Kaaret, Miho Katsuragawa, Fabian Kislak, Jeffery Kolodziejczak, Henric Krawczynski, Ioannis Lioudakis, W. Peter Maksym III, Kaya Mori, Brian D. Ramsey, Panini S. Singam, Patrick Slane, Chet O. Speegle, Douglas A. Swartz, Tadayuki Takahashi, Shin'ichiro Takeda, Allyn F. Tennant, Shin Watanabe, “The SuperHERO (Super-High

- Energy Replicated Optics) High-Angular Resolution, Hard-X-ray Telescope.” Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy XII, Proc. SPIE, Vol. 13626, pp. 136260Q, 2025.
- [29] Yerong Xu, Luigi C. Gallo, Kouichi Hagino, James N. Reeves, Francesco Tombesi, Misaki Mizumoto, Alfredo Luminari, Adam G. Gonzalez, Ehud Behar, Rozenn Boissay-Malaquin, Valentina Braitto, Pierpaolo Condó, Chris Done, Aiko Miyamoto, Ryuki Mizukawa, Hirokazu Odaka, Riki Sato, Atsushi Tanimoto, Makoto Tashiro, Tahir Yaqoob, and Satoshi Yamada, “Unraveling the Structure of the Stratified Ultra-Fast Outflows in PDS 456 with XRISM”. PASJ 77, S223–41, 2025.
- [30] M. Mehdipour, J. S. Kaastra, M. E. Eckart, L. Gu, R. Ballhausen, E. Behar, C. M. Diez, K. Fukumura, M. Guainazzi, K. Hagino, T. R. Kallman, E. Kara, C. Li, J. M. Miller, M. Mizumoto, H. Noda, S. Ogawa, C. Panagiotou, A. Tanimoto, and K. Zhao, “Delving into the depths of NGC 3783 with XRISM. I. Kinematic and ionization structure of the highly ionized outflows”, *Astronomy & Astrophysics*, 699, A228, 2025.
- [31] D. Bogenberger, Y. Nakatani, T. Yaqoob, Y. Ueda, R. Mushotzky, J. M. Miller, L. C. Gallo, Y. Fukazawa, T. Kayanoki, M. Tashiro, H. Noda, T. Iwata, K. Hagino, M. Mizumoto, M. Urata, F. S. Porter, and M. Loewenstein, “XRISM analysis of the complex Fe K α line in Centaurus A”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, psaf084, 2025.
- [32] H. Uchida, K. Mori, H. Tomida, H. Nakajima, H. Noda, T. Tanaka, H. Murakami, H. Suzuki, S. B. Kobayashi, T. Yoneyama, K. Hagino, K. K. Nobukawa, H. Uchiyama, M. Nobukawa, H. Matsumoto, T. G. Tsuru, M. Yamauchi, I. Hatsukade, H. Odaka, T. Kohmura, K. Yamaoka, T. Yoshida, Y. Kanemaru, D. Ishi, T. Dotani, M. Ozaki, H. Tsunemi, K. Miyazaki, K. Kusunoki, Y. Otsuka, H. Yokosu, W. Yonemaru, K. Ichikawa, H. Nakano, R. Takemoto, T. Matsushima, R. Urase, J. Kurashima, K. Fuchi, K. Hayakawa, M. Fukuda, S. Inoue, Y. Aoki, K. Takayama, T. Sako, M. Yoshimoto, K. Shima, M. Higuchi, K. Ninoyu, D. Aoki, S. Tsunomachi, T. Okajima, M. Ishida, Y. Maeda, T. Hayashi, K. Tamura, R. Boissay-Malaquin, T. Sato, M. Takeo, A. Miyamoto, G. Matsumoto, M. E. Eckart, N. Hell, M. A. Leutenegger, K. Hayashida, “In-orbit performance of the soft X-ray imaging telescope Xtend aboard XRISM”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, psaf030, 2025.
- [33] H. Noda, S. Yamada, S. Ogawa, K. Hagino, E. Behar, O. Reich, A. Ogorzalek, L. Brenneman, Y. Terashima, M. Mizumoto, F. Tombesi, P. Condó, A. Luminari, A. Tanimoto, M. E. Eckart, E. Kara, T. Okajima, Y. Ueda, Y. Aiso, M. Tashiro, “Discovery of Powerful Multi-Velocity Ultra-Fast Outflows in the Starburst Merger Galaxy IRAS 05189-2524 with XRISM”, *Astrophysical Journal Letters*, 993, 2, L53, 2025.
- [34] M. Mizumoto, J. N. Reeves, V. Braitto, E. Behar, C. Done, K. Hagino, S. B. Kraemer, G. A. Matzeu, H. Noda, M. Nomura, S. Ogawa, K. Ohsuga, A. Tanimoto, T. J. Turner, Y. Ueda, S. Yamada, S. Ganguly, and P. Somenzi, “Resolving the Multiple Component Outflows in PG 1211+143: I. The Fe-K Absorption Structure and UFO Forest”, *Astrophysical Journal*, 997, 219, 2026.
- [35] J. N. Reeves, V. Braitto, M. Mizumoto, S. B. Kraemer, E. Behar, C. Done, K. Hagino, G. A. Matzeu, H. Noda, M. Nomura, S. Ogawa, K. Ohsuga, A. Tanimoto, T. J. Turner, Y. Ueda, S. Yamada, S. Ganguly, P. Somenzi, and O. Reich, “Resolving the Multiple Component Outflows in PG 1211+143. II. The Soft X-Ray View of the Ultrafast Outflow”, *Astrophysical Journal*, 1000, 2, 170, 2026.
- (会議抄録)
- [36] H. Matsushashi, Kouichi Hagino, Aya Bamba (The Univ. of Tokyo), Ayaki Takeda, Masataka Yukumoto, Koji Mori, Yusuke Nishioka, Hiromasa Suzuki (Univ. of Miyazaki), Takeshi Tsuru, Masamune Matsuda, Takuto Narita, Yusuke Kohmura (Kyoto Univ.), Mizuki Uenomachi (Institute of Science Tokyo), Takaaki Tanaka (Konan Univ.), Ikuo Kurachi (D&S), Takayoshi Kohmura, Yusuke Uchida (Tokyo Univ. of Science), Yasuo Arai, Tomonori Ikeda, Takehiro Takayanagi (KEK), Toshifumi Imamura, Takafumi Ohmoto, Masahiro Ono (A-R-Tec), Shoji Kawahito (Shizuoka Univ.), “Development and performance evaluation of a fully digitalized SOI pixel detector for X-ray astronomy”, “SPIE optics+photonics”, U.S.A, 2025.Aug.
- [37] K. Hagino, T. Kato, T. Iwata, M. Ichihashi, H. Matsushashi, G. Fujimoto, R. Sato, H. Odaka, N. Narukage, S. Arai, T. Minami, S. Takashima, and A. Bamba, “Development of Solar Flare X-ray Polarimeter with Micro-Pixel CMOS Sensors”, *Proceedings of the SPIE*, 1362515, 2025
- [38] I. Ichiseki, Y. Ohira, “New Dynamics of Pulsar Wind Nebulae: Effects of Mass Loading,” *Proceedings of Science (ICRC2025)*, 689, 2025
- (学位論文)
- [39] 市橋正裕, “An observational study of plasma heating of collisionless-shock in supernova remnants”, Ph.D. thesis
- [40] 岩田季也, “X-ray polarimetry and general relativistic radiative transfer modeling of highly magnetized neutron stars”, Ph.D. thesis
- [41] 藤本源, 「SuperHERO 大気球実験に向けた硬 X 線撮像分光用 CdTe 検出器データ読み出しシステムの開発」, 修士論文

- [42] 佐藤璃輝、「X 線天体観測に向けたイベント駆動読み出し方式での SOI ピクセル検出器の性能評価」、修士論文
(著書)
- [43] 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 年
＜学術講演＞
(国際会議)
一般講演
- [44] A. Bamba, “Three-dimensional kinetics of Fe ejecta in Cas A with XRISM and Chandra”, “Supernova Remnants and Their Friends in the XRISM Era”, U. Tokyo, 2025, Oct. 1
- [45] A. Bamba, “Evolution from SNe to SNRs with XRISM”, “Grant-in-Aid for Transformative Research Areas (A), “Multimessenger Astrophysics”: The third annual conference”, Naruko Onsen, Japan, 2025.Nov.18-20
- [46] H. Matsushashi, K. Hagino, A. Bamba, R. Sato (The Univ. of Tokyo), A. Takeda, M. Yukumoto, K. Mori, H. Suzuki (Univ. of Miyazaki), T. G. Tsuru, M. Matsuda, T. Narita, Y. Kohmura (Kyoto Univ.), T. Tanaka (Konan Univ.), I. Kurachi (D&S), T. Kohmura, Y. Uchida (Tokyo Univ. of Science), Y. Arai, T. Takayanagi (KEK), S. Kawahito (Shizuoka Univ.), M. Uenomachi (Institute of Science Tokyo), T. Imamura, Y. Murasaka, T. “A Fully Digitalized SOI Pixel Detector for X-ray Astronomy: From Development to Performance Evaluation”, “The 7th Quantum Beam Imaging Workshop”, Japan, 2025.Nov.13-14
- [47] M. Ichihashi, “Energy leakage estimation near the shock from particle temperatures in SNRs”, “Supernova Remnants and Their Friends in the XRISM Era”, U. Tokyo, 2025, Oct. 1
- [48] M. Ichihashi, “The measurement of the energy leakage from the shock of SNRs”, Mini workshop on Galactic TeV objects - PWNe, Microquasars, TGBs, and SNRs, Chungbuk Pro Maker Center, 2026, Feb. 9-10
- [49] G. Fujimoto, T. Kato, A. Bamba, K. Hagino, D. Tateishi, M. Ichihashi, V. Sapienza, R. Yamazaki, H. Suzuki, H. Sano, J. Vink. “Toward the Identification of Particle Acceleration Sites through Broadband Analysis of the Northeast Region of RCW 86.”, “Supernova Remnants and Their Friends in the XRISM Era”, U. Tokyo, 2025, Oct. 1
- [50] R. Sato, K. Hagino, E. Behar, M. Mizumoto, M. Tashiro, R. Boissay-Malaquin, C. Done, L. Gallo, 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. Braitto, T. Iwata, A. Bamba, “Probing the geometry of soft X-ray ultra-fast outflows through their variability in PDS 456”, “Vasto Accretion Meeting: AGN 2025”, Vasto, Italy, 2025, June 30.
- [51] K. Hagino, T. Kato, T. Iwata, M. Ichihashi, H. Matsushashi, G. Fujimoto, R. Sato, H. Odaka, N. Narukage, S. Arai, T. Minami, S. Takashima, A. Bamba, “Development of Solar Flare X-ray Polarimeter with Micro-Pixel CMOS Sensors”, SPIE Optics + Photonics, San Diego, 2025, Aug.
- [52] K. Hagino, E. Behar, J. Reeves, M. Mizumoto, M. Tashiro, R. Boissay-Malaquin, C. Done, L. Galo, H. Odaka, A. Tanimoto, T. Yaqoob, S. Yamada, F. Tombesi, A. Gonzalez, A. Luminari, Y. Xu, P. Condo, R. Mizukawa, R. Sato, A. Miyamoto, V. Braitto, “Extremely energetic winds in the luminous quasar PDS 456 revealed by XRISM”, Vasto Accretion Meeting 2025: AGN, Vasto, 2025, Jul.
- [53] I. Ichiseki, M. Ichihashi, G. Fujimoto, K. Hagino, A. Bamba, S. Katsuda, O. Akita, Y. Kanemaru, S. Yamada, B. Williams, F. S. Porter, H. Suzuki, H. Tsunemi, H. Uchida, I. Hatsukade, J. Vink, K. Tamura, K. Mori, L. Gu, N. Kominato, P. Plucinsky, R. Takemoto, S. Yamauchi, T. Tanaka, T. Sato, Y. Terada, “Measuring the Fe Expansion Structure of Kepler’s SNR Using XRISM/Resolve”, “Supernova Remnants and Their Friends in the XRISM Era”, U. Tokyo, 2025, Oct. 1
- ポスター発表
- [54] H. Matsushashi, Kouichi Hagino, Aya Bamba (The Univ. of Tokyo), Ayaki Takeda, Masataka Yukumoto, Koji Mori, Yusuke Nishioka, Hiromasa Suzuki (Univ. of Miyazaki), Takeshi Tsuru, Masamune Matsuda, Takuto Narita, Yusuke Kohmura (Kyoto Univ.), Mizuki Uenomachi (Institute of Science Tokyo), Takaaki Tanaka (Konan Univ.), Ikuo Kurachi (D&S), Takayoshi Kohmura, Yusuke Uchida (Tokyo Univ. of Science), Yasuo Arai, Tomonori Ikeda, Takehiro Takayanagi (KEK), Toshifumi Imamura, Takafumi Ohmoto, Masahiro Ono (A-R-Tec), Shoji Kawahito (Shizuoka Univ.), “Development and performance evaluation of a fully digitalized SOI pixel detector for X-ray astronomy”, “SPIE optics+photonics”, U.S.A, 2025.Aug.
- [55] M. Ichihashi, A. Bamba, K. Hagino, XRISM Tycho team, “The ion temperature measurement of the northwestern region of Tycho’s SNR with XRISM/Resolve”, “XRISM International Conference 2025”, Kyoto, Oct. 20-24
- [56] S. Arai on behalf of GRAMS Collaboration, “GRAMS Experiment for MeV Gamma-ray Astronomy and Dark Matter Search”, Kyoto, Oct. 20-24
- [57] S. Arai, H. Odaka, H. Kawamura, K. Shirahama, R. Tatsumi, M. Tanaka, S. Takashima, K. Hagino,

- A. Bamba, "Charge Response Simulation of Liquid Argon Compton Cameras for Precise MeV Gamma-Ray Event Reconstruction", Taipei, Nov. 16-21
- [58] K. Fujikawa, K. Hagino, R. Sato, T. Iwata, A. Bamba, H. Odaka, A. Luminari, E. Behar, F. Tomebsi, J. Reeves, L. Gallo, M. Mizumoto, P. Condò, R. Boissay-Malaquin, Y. Xu, "Modeling X-ray Spectra from Clumpy Ultra-Fast Outflows in PDS 456 with Three-Dimensional Monte Carlo Radiative Transfer Calculations", "XRISM International Conference 2025", Kyoto, Oct. 20-24
- [59] G. Fujimoto, T. Kato, A. Bamba, K. Hagino, D. Tateishi, M. Ichihashi, V. Sapienza, R. Yamazaki, H. Suzuki, H. Sano. "Environment Study of Efficient Acceleration Sites in RCW 86 Northeastern Region with NuSTAR Hard X-ray and Radio Observations.", "XRISM International Conference 2025", Kyoto, Oct. 20-24
- [60] R. Sato, K. Hagino, E. Behar, M. Mizumoto, M. Tashiro, R. Boissay-Malaquin, C. Done, L. Gallo, 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. Braitto, T. Iwata, A. Bamba, "Probing the Geometry of Soft X-ray Ultra-Fast Outflows through Their Variability in PDS 456", "XRISM Science Meeting #8", Leiden, Netherlands, 2025, July 7-11.
- [61] R. Sato, K. Hagino, E. Behar, M. Mizumoto, M. Tashiro, R. Boissay-Malaquin, C. Done, L. Gallo, 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. Braitto, T. Iwata, A. Bamba, "XRISM and NuSTAR Observations Reveal the Geometry of Low-Ionized Ultra-Fast Outflows in PDS 456 through Soft X-ray Variability", "XRISM International Conference 2025", Kyoto, 2025, Oct. 20-24.
- [62] I. Ichiseki, Y. Ohira, "New Dynamics of Pulsar Wind Nebulae: Effects of Mass Loading", International Cosmic Ray Conference 2025, Geneva, Switzerland, 2025, Jul.
- [63] I. Ichiseki, M. Ichihashi, G. Fujimoto, K. Hagino, A. Bamba, S. Katsuda, O. Akita, Y. Kanemaru, S. Yamada, B. Williams, F. S. Porter, H. Suzuki, H. Tsunemi, H. Uchida, I. Hatsukade, J. Vink, K. Tamura, K. Mori, L. Gu, N. Kominato, P. Plucinsky, R. Takemoto, S. Yamauchi, T. Tanaka, T. Sato, "Measuring the Fe Expansion Structure of Kepler's SNR Using XRISM/Resolve", "XRISM International Conference 2025", Kyoto, 2025, Oct. 20-24.
- 招待講演
- [64] A. Bamba, "XRISM results on nearby supernova remnants", "European Astronomical Society Annual Meeting 2025", Cork, Ireland, 2025 June 23-27
- [65] A. Bamba, "Review of XRISM PV observations of SNRs and ISM", "XRISM international conference 2025", Kyoto, Japan, 2025 Oct. 20-24
- [66] A. Bamba, "High resolution X-ray spectroscopy for Galactic TeV objectives", "Mini workshop on Galactic TeV objects - PWNe, Microquasars, TGBs, and SNRs", CNBU, Choengju, South Korea, 2026 Feb. 9-10
- (国内会議)
- 一般講演
- [67] 馬場 彩, 「XRISM/Resolve と Chandra を用いた Cas A 鉄 ejecta の 3 次元膨張構造測定」, 「SNR workshop 2026」, 岐阜, 2026 年 3 月 23-24 日
- [68] 松橋 裕洋, 萩野浩一, 馬場彩, 佐藤璃輝 (東京大学), 武田彩希, 行元雅貴, 森浩二, 鈴木寛大 (宮崎大学), 鶴剛, 松田真宗, 成田拓仁, 上林暉, 上村悠介 (京都大学), 田中孝明 (甲南大学), 倉知郁生 (D&S), 幸村孝由, 内田悠介 (東京理科大学), 新井康夫, 高柳武浩 (KEK), 今村俊文, 村坂佳隆, 大本貴文 (A-R-Tec Corp.), 「SOI 技術を用いた新型 X 線撮像分光器の開発 71:XRPIX の入出力信号をデジタル化した新型 XRPIX12 の開発と性能評価」, 「日本天文学会年会 2025 秋」, 海峡メッセ下関, 2025 年 9 月
- [69] 松橋 裕洋, 萩野浩一, 馬場彩 (東京大学), 榎戸輝揚 (京都大学), 「マグネターにおける硬 X 線放射の起源解明のための系統的研究」, 「日本天文学会年会 2026 春」, 京都産業大学, 2026 年 3 月
- [70] 市橋正裕, 馬場彩, 萩野浩一, 「XRISM を用いた Tycho の超新星残骸北西部におけるイオン温度分布解析」, 「日本天文学会 2025 年秋季年会」, 海峡メッセ下関, 2025 年 9 月
- [71] 市橋正裕, 「超新星残骸の無衝突衝撃波におけるプラズマ加熱の観測的研究」, 「第 25 回高宇連研究会」, 大阪大学, 2026 年 3 月 9-11
- [72] 岩田季也, 「X-ray polarimetry and general relativistic radiative transfer modeling of highly magnetized neutron stars」, 「第 25 回高宇連研究会」, 大阪, 2026 年 3 月 9-11 日
- [73] 新井翔大, 馬場彩, 寄田浩平, 小高裕和, 河村穂登, 倉本春希, 鈴木朋広, 白濱健太郎, 高塚紗弥菜, 高橋真知花, 巽隆太郎, 田中雅士, 長尾梓生, 野口晴行, 宮本愛子, 村上海都, 高嶋聡, 荒井紳太郎, 矢野裕太郎, 渡邊知優, 米田浩基, 渡辺伸, 「GRAMS 実験 25: 液体アルゴンコンプトンカメラ原理実証機 NanoGRAMS の開発状況」, 「日本物理学会 2026 年春季大会」, オンライン, 2026 年 3 月 23-26 日
- [74] K. Fujikawa, K. Hagino, R. Sato, T. Iwata, A. Bamba, H. Odaka, E. Behar, F. Tomebsi, J. Reeves, L. Gallo, M. Mizumoto, P. Condò, R. Boissay-Malaquin, Y. Xu, 「3 次元放射輸送計算による clumpy な超高速アウトフローのスペクトルモデルの構築」, 「日本天文学会 2025 年秋季年会」, 海峡メッセ下関, 2025 年 9 月

- [75] K. Fujikawa, K. Hagino, R. Sato, T. Iwata, A. Bamba, H. Odaka, A. Luminari, E. Behar, F. Tomebsi, J. Reeves, L. Gallo, M. Mizumoto, P. Condò, R. Boissay-Malaquin, Y. Xu, 「3 次元放射輸送計算による clumpy な超高速アウトフローのスペクトルモデルの構築 II」, 「日本天文学会 2026 年春季年会」, 京都産業大学, 2026 年 3 月
- [76] 藤川一樹, 「3 次元放射輸送計算による、clumpy な超高速アウトフローのスペクトルモデルの構築」, 「ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2026」, 駒沢大学, 2026 年 3 月
- [77] 藤本 源, 桂川 美穂, 高橋 忠幸, 萩野 浩一, 武田 伸一郎, 渡辺 伸, 長澤 俊作, 馬場 彩, Nicholas E. Thomas, 「SuperHERO 大気球実験に向けた冗長かつ拡張可能なモジュール型データ読み出しシステムの開発」, 「日本天文学会 2025 年秋季年会」, 海峡メッセ下関, 2025 年 9 月
- [78] 佐藤璃輝, 萩野浩一, 馬場彩, 松橋裕洋, 島添健次, 永井寛大, 幸村孝由, 内田悠介, 志賀文哉, 藤田紗弓, 森浩二, 武田彩希, 鈴木寛大, 犬童真衣人, 鶴剛, 上林暉, 上村悠介, 上ノ町水紀, 「X 線天体観測用イベント駆動型 SOI ピクセル検出器の面積素子の性能評価」, 「日本物理学会 2025 年秋季年会」, 広島大学, 2025 年 9 月 18 日
- [79] 佐藤璃輝, 萩野浩一, 馬場彩, 松橋裕洋, 島添健次, 永井寛大, 幸村孝由, 志賀文哉, 藤田紗弓, 佐藤光, 安齋俊晟, 中谷萌乃, 内田悠介, 森浩二, 武田彩希, 鈴木寛大, 犬童真衣人, 鶴剛, 上林暉, 上村悠介, 上ノ町水紀, 「SOI 技術を用いた新型 X 線撮像分光器の開発 75: X 線天体観測に向けたイベント駆動読み出し方式での性能評価」, 「日本天文学会 2026 年春季年会」, 京都産業大学, 2026 年 3 月 5 日
- [80] 萩野浩一, 加藤辰明, 岩田季也, 市橋正裕, 松橋裕洋, 藤本源, 佐藤璃輝, 市堰いろは, 藤川一樹, 小高裕和, 成影典之, 新井翔大, 高嶋聡, 馬場彩, 「微細ピクセル CMOS センサを用いた太陽フレア X 線偏光計の開発」, 日本天文学会 2025 年秋季年会, 山口大学, 2025 年 9 月 9 日
- [81] 市堰いろは, 市橋正裕, 藤本源, 萩野浩一, 馬場彩, 秋田桜佑, 勝田哲, 金丸善朗, ほか XRISM Kepler's SNR team, 「XRISM/Resolve を用いた Kepler's SNR の膨張構造測定 1」, 「日本天文学会 2025 年秋季年会」, 海峡メッセ下関, 2025 年 9 月
- [82] 市堰いろは, 市橋正裕, 藤本源, 萩野浩一, 馬場彩, 勝田哲, 秋田桜佑, 金丸善朗, 山田真也, 小湊菜央, 森浩二, 甘日出勇, 鈴木寛大, 岳本廉央, 常深博, 内田裕之, 山内茂雄, 田中孝明, 佐藤寿紀, 寺田幸功, Brian Williams, F. Scott Porter, 田村啓輔, Jacco Vink, Manan Agarwal, Leila Godinaud, Liyi Gu, Paul Plucinsky, 「XRISM/Resolve を用いた Kepler's SNR の膨張構造測定 2」, 「日本天文学会 2026 年春季年会」, 京都産業大学, 2026 年 3 月
- [83] 市堰いろは, 市橋正裕, 藤本源, 萩野浩一, 馬場彩, 勝田哲, 秋田桜佑, 金丸善朗, 山田真也, 小湊菜央, 森浩二, 甘日出勇, 鈴木寛大, 岳本廉央, 常深博, 内田裕之, 山内茂雄, 田中孝明, 佐藤寿紀, 寺田幸功, Brian Williams, F. Scott Porter, 田村啓輔, Jacco

Vink, Manan Agarwal, Leila Godinaud, Liyi Gu, Paul Plucinsky, 「Asymmetric Fe-K Kinematics in Kepler's SNR with XRISM/Resolve」, 「SNR workshop 2026」, 岐阜, 2026 年 3 月 23-24 日

招待講演

- [84] 馬場 彩, 「XRISM 衛星で切り拓く超新星残骸と銀河中心の物理」, 日本物理学会秋季年会シンポジウム「XRISM 初期成果と高エネルギー宇宙物理学の新展開」, 広島大学, 2025 年 9 月 16-19 日

(セミナー)

- [85] 市橋正裕, 「超新星残骸の衝撃波加熱 熱環境の衝撃波速度依存性について」, 京都大学, 2025 年 11 月 12 日

6.5 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、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イクスルーとなる。

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 $1 \sim 3$ 度の角度スケールに現れる。

我々は、チリ・アタカマ高地の POLARBEAR 実験、Simons Array 実験を通して研究を進めてきた。これに加えて、2023 年に観測を開始した史上最大規模の CMB 実験である 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、高エネルギー加速器研究機構などとの共同プロジェクトを立ち上げた。

6.5.1 POLARBEAR/Simons Array 実験

POLARBEAR 実験はチリ・アタカマ高地の口径 3 m の望遠鏡に超伝導検出器を約 1000 個搭載した CMB 実験である。2016 年まで観測を行い、これまでに 10 報以上の科学論文を出版してきた。Simons Array 実験はその後継であり、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 年まで観測を行った。

日下研究室はデータ解析を中心となって率いてきた。2023 年に偏光角較正に用いられる Tau A のデータを用いた Axion-like particle 探索を発表したが、2025 年には日下研究室の卒業生と UC バークレーの共同研究者らが中心となって行ったデータ解析による、Simons Array 実験のデータを用いた $4.4 \times 10^{-22} \text{eV}$ から $7.2 \times 10^{-20} \text{eV}$ の Axion-like particle 探索の結果が出版された [4, 7]。

6.5.2 Simons Observatory 実験

Simons Observatory は、2016 年に発足した史上最大規模の地上 CMB 実験・国際共同研究グループであり、当研究室もその推進に中心的な役割を果たす。Simons Observatory 実験では、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 (SATs) 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 (LAT) 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 SAT3 台と LAT の建設が完了し、観測を開始している。

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、Simons Array 実験と ACT 実験の跡地を再利用し、新たに小口径望遠鏡 3 台の建設が進んでいる。そのうち 4 台目は日本の研究者が、5, 6 台目は英国の研究者が、中心となって開発を進めている。2025 年には望遠鏡を搭載するプラットフォームの設置が完了した。ACT 実験の跡地を再利用するために当研究室で設計した土台が無事に設置された。

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。



図 6.5.15: チリ観測所での光学筒インストール作業の様子。

6.5.3 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



図 6.5.16: チリ観測所で建設中の Simons Observatory 4 台目小口径望遠鏡の様子。

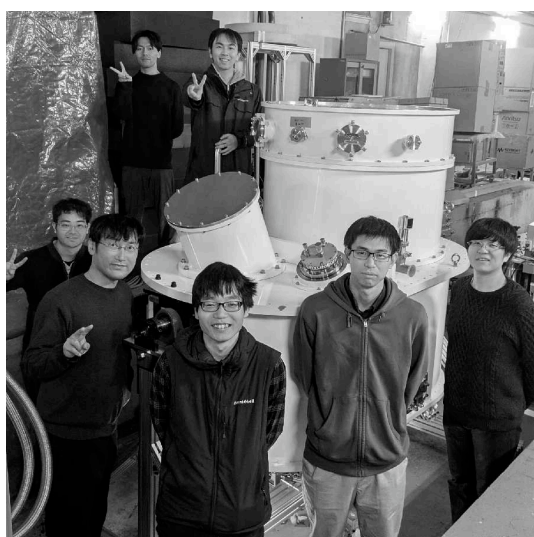


図 6.5.17: 京都大学での Simons Observatory 4 台目望遠鏡建設作業の様子。

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。

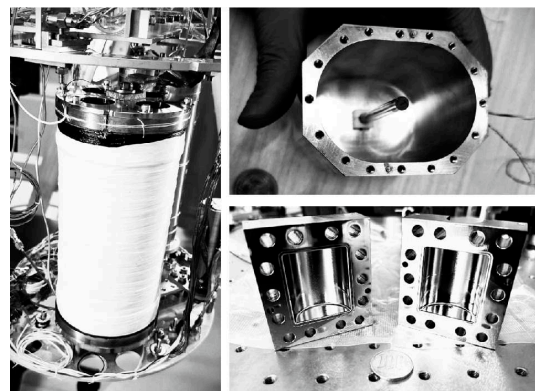


図 6.5.18: キャビティ内に直径 2mm の強磁性結晶 (YIG) の球を導入したキャビティ-マグノンハイブリッド系

6.5.4 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オ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、磁場を印加した超伝導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。

<報文>

(原著論文)

- [1] Daichi Sasaki *et al.*, “The Simons Observatory: Large Diameter and Large Load-Capacity Superconducting Magnetic Bearing for a Millimeter-Wave Polarization Modulator,” *Rev. Sci. Instrum.*, **96** 084503 (2025)
- [2] Haruaki Hirose *et al.*, “Feedback-Controlled Beam Pattern Measurement Method Using a Power-Variable Calibration Source for Cosmic Microwave Background Telescopes,” *PTEP*, **2026** 023F01 (2026)
- [3] Samuel Day-Weiss *et al.*, “Simons Observatory: on-sky performance of radio-transparent multi-

layer insulation using Styroace-II styrofoam,” *Applied Optics*, **65** 1614–1619 (2026)

- [4] Tylor Adkins *et al.*, “Constraints on the polarization angle oscillations of the Crab Nebula with the Simons Array and its applications to the search for axionlike particles,” *Phys. Rev. D*, **113** 043044 (2026)
- [5] The Simons Observatory Collaboration: I. Abril-Cabezas *et al.*, “The Simons Observatory: forecasted constraints on primordial gravitational waves with the expanded array of Small Aperture Telescopes,” arXiv:2512.15833 [astro-ph.CO] (2025).
- [6] Hironobu Nakata *et al.*, “The Simons Observatory: Detector Polarization Angle Calibration using Sparse Wire Grid with Initial Data Sets of the Small Aperture Telescope,” arXiv:2512.19102 [astro-ph.IM] (2025).

(学位論文)

博士論文

- [7] 村田雅彬, “Search for Ultra-light Dark Matter by exploring Polarization Oscillation of Crab Nebula with Simons Array experiment”
- [8] 杉山純菜, “The Initial Data Analysis of the Simons Observatory Small Aperture Telescopes”

修士論文

- [9] 内河内峻太, “GHz 帯重力波探索に向けた超伝導空洞共振器の設計と外部磁場および極低温条件下での評価”
- [10] 三木裕太, “Simons Observatory 小口径望遠鏡におけるレンズ破損問題解決に向けた低温光学筒の開発”

(国際会議)

一般講演

- [11] Daichi Sasaki, “Measurement of LBG Clustering and Its Cross-Correlation with CMB Lensing using HSC and ACT,” *Cosmology from Lyman-Break Galaxies*, University of Toronto (2025/5)
- [12] Yaman Singh Shrestha, “Enhancing axion detection with quantum sensing of magnons: A magnon counter with a superconducting qubit,” *Axions in Stockholm 2025*, Nordita (2025/7)
- [13] Yaman Singh Shrestha, “Axion dark matter search using quantum sensing of magnons: Estimation of sensitivity for Kittel mode – superconducting qubit hybrid,” *Axions in Japan, 2025*, University of Tokyo (2025/11)

(国内会議)

一般講演

- [14] Akito Kusaka, “Exploration of High-Frequency GWs Using Microwave,” *One Day Workshop on High Frequency Gravitational Waves*, KEK (2025/8)
- [15] 佐々木大地, 他, “すばる HSC-SSP による $z \sim 4$ の LBG と ACT による CMB lensing マップを用いたフリー空間でのパワースペクトル解析と σ_8 への制限,” 日本天文学会 2025 年秋季年会, 下関 (2025/9)
- [16] 杉山純菜, 他 Simons Observatory, “Simons Observatory の小口径望遠鏡のための時系列データ処理,” 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学 (2025/9)
- [17] 稲場航輝, 他, “Simons Observatory 実験における小口径望遠鏡用の Readout Harness の開発,” 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学 (2025/9)
- [18] 三木裕太, 他, “Simons Observatory 実験の小口径望遠鏡における, レンズ破損を防ぐ新しいセットアップのテストと設置状況,” 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学 (2025/9)
- [19] 小泉優, 他, “Simons Observatory 実験における低周波数帯偏光変調器の開発,” 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学 (2025/9)
- [20] 内河内峻太, 他, “GHz 帯重力波探索実験のための超伝導空洞共振器の開発と高 Q モード実現に向けた検討,” 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学 (2025/9)
- [21] 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: キッテルモード-超伝導量子ビットハイブリッド系の感度評価,” 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島大学 (2025/9)
- [22] Akito Kusaka, “Cryogenic Amplifiers and Quantum Readout in GHz Frequencies,” *Kick-off Meeting for Platform D (Cryogenics + Sensors)*, KEK (2025/9)
- [23] 内河内峻太, 他, “GHz 帯重力波および暗黒物質探索に向けた超伝導空洞共振器の極低温下評価,” 第 17 回低温科学研究センター研究交流会, 東京大学 (2026/3)
- [24] 高倉理, “CMB 観測所のためのピラミッド型赤外線雲モニタの開発,” 日本天文学会 2026 年春季年会, 京都産業大学 (2026/3)
- [25] 三木裕太, “An Improved Cryogenic Lens Mount for Mitigating Lens Failure in Simons Observatory Small Aperture Telescopes,” *国際先端ニュートリノ研究会 2026*, 東京大学 (2026/3)

6.6 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。

6.6.1 ソフトマター系の非平衡実験

磁気応答性 Quincke 回転粒子の集団運動

外場の印加は、系に摂動を与え状態の安定性を調べる上で有用な手段である。本研究では、磁気応答性 Quincke 回転粒子を使い、アクティブマターの集団運動の外場応答を調べた。無磁場状態における磁場応答性 Quincke 回転粒子の集団は、ある特徴空間スケールで分布する渦集団を形成する。この渦集団に磁場を印加すると、磁場応答性 Quincke 回転粒子の運動が渦状態から磁場に垂直なレーン構造に変化した (図 6.6.19)。また磁場を ON から OFF に切り替えた時の緩和過程では、レーン間のに分布する渦が移動して渦集団に遷移する様子が確認されており、渦の動力学により系の安定性を理解できる可能性が示唆されている。なお、磁場応答するアクティブマターについては、磁性細菌を用いた研究も展開している [32, 34, 51]。

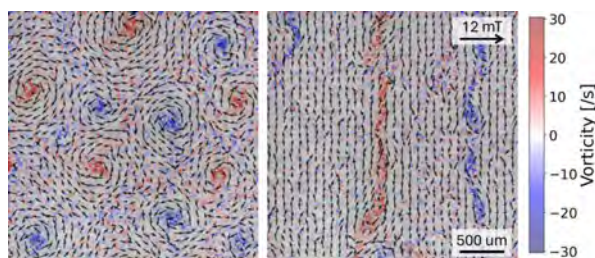


図 6.6.19: 磁気 Quincke 粒子が磁場の印加により渦集団 (左) からレーン構造 (右) に変化する様子

6.6.2 生物系の非平衡実験

バクテリア集団のガラス転移

我々は近年、均一な成長環境を維持できる微小流体デバイスで運動性大腸菌を培養することで、バクテリアの増殖に伴ってガラス転移が起こることを発見した [10, 24, 25, 47, 50]。その後、関連実験がフランスから発表され、細菌種や実験系、統計量によってガラス転移の性質が異なる可能性が提示されるなど、本研究は新たな展開を見せている。我々は、機械学習を用いた画像解析によって一細胞追跡を実現し、Lagrange 描像と Euler 描像でガラス転移の様相を比較することで本問題の解決を試みているほか、大腸菌変異株を用いて新たなバクテリアガラス転移の観察にも成功しつつある [30, 31]。

バクテリア集団運動のトポロジカル端状態

波数空間トポロジーはロバストな輸送現象を理解する上で有用な枠組みであり、アクティブマターへの拡張も理論的に提案されている。しかし、実験的

には運動のカイラリティーという構成粒子の特徴を活かした実現に留まっており、アクティブマターにおけるトポロジカル現象のデザイン可能性は非常に限定的である。本研究では、特徴的な波数空間トポロジーを持つと期待されるネットワーク構造を微細加工で作製し、そこにバクテリア懸濁液を閉じ込めることで、トポロジカルエッジ状態を実現した。結果として、非対称籠目ネットワークにおいて、バクテリア数密度がエッジからバルクに向けて減衰するエッジ局在が観察された (図 6.6.20)。また、そのトポロジカルな起源およびエッジ局在の発現に重要な幾何構造の性質を明らかにした [1, 2, 6, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 27, 28, 29, 35, 36, 48]。

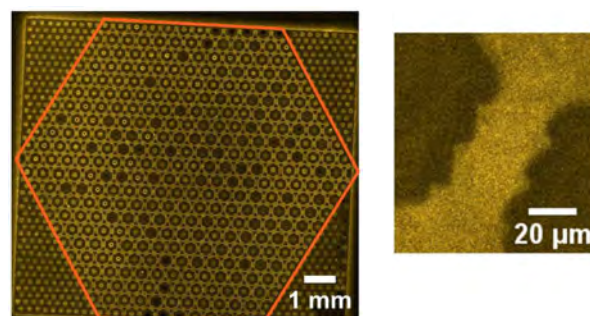


図 6.6.20: 非対称籠目ネットワークに閉じ込められたバクテリア懸濁液の共焦点顕微鏡写真 (左)[6]。非対称籠目ネットワークは右に示したラチェット型流路でつながれた円形ウェルで構成される。

光応答性バクテリアの集団運動

アクティブマターにおいて、構成粒子の自己駆動力に時空間の変調がもたらされたときに集団の動力学に何が起こるかは十分に解明されておらず、アクティブマターが示す多彩な集団現象の制御方法の確立につながる可能性がある。本研究では、光強度に応じて遊泳速度が変化する、プロテオロドプシンが発現した大腸菌変異株を用いて、高密度条件下で遊泳速度を変調した場合の集団応答を調べた [43]。均一光照射下で遊泳速度を系統的に変化させたところ、遊泳速度がある有限の値をとるときに配向秩序が最も発達し、同時に構造緩和時間が極大をとる非単調応答が確認された。この非単調な振る舞いはとくにクラスタースケールの緩和で顕著に現れ、遊泳速度を上げることが必ずしも集団の流動化をもたらすのではなく、ある有限の遊泳速度において粒子の再配置がかえって強く抑制されることを示している。さらに、光照射を止めて遊泳駆動を失わせた後の緩和過程では、配向の揃った領域が時間とともに成長し、それに伴って巨視的な速度場が一時的に立ち上がる様子が観測された。また構造緩和時間も、この過程で一度増大したのち減衰に転ずる非単調な時間発展

を示す。これらの結果は、遊泳駆動が集団の秩序形成と緩和動力学に対してそれぞれ異なる形で寄与していることを示唆しており、高密度下における集団の力学的安定性を理解する上での手がかりを与える。

トポロジカル欠陥とバイオフィーム基質分子産生

単細胞微生物は環境変動に適応するために多細胞的状态へ移行することがあり、バクテリアにおけるその代表例は、細胞外マトリクスの生産によって形成されるバイオフィームである。しかし、細菌集団において、マトリクス生産がどこでどのように開始されるかは十分に理解されていない。本研究では、大腸菌を用いて、細胞配向が不一致で生育圧力の上昇が見られるトポロジカル欠陥の周辺で、マトリクス成分であるコラン酸の生産が誘導されることを明らかにした。寒天パッド下では、生育する細胞同士の衝突に伴う三次元方向への細胞突出に続いてマトリクス生産が観察された。マイクロ流体デバイスを用いて培養チャンパーの形状を制御することで細胞の配向やトポロジカル欠陥の位置を操作でき、それに応じてマトリクス生産の空間分布も制御可能であることが示された(図 6.6.21)。これらの結果は、細胞配向パターンがバイオフィーム形成初期におけるマトリクス生産を規定することを示している [9, 20, 26, 37, 46, 47, 50]。

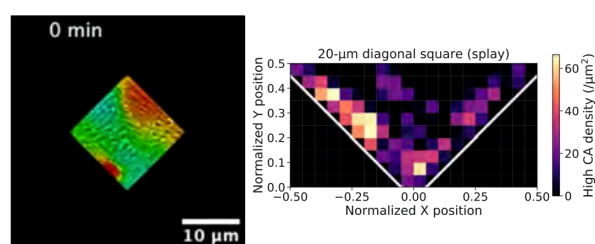


図 6.6.21: 微小流体デバイス内の細胞とその配向(左、色は配向角度を示す)、およびコラン酸生産の空間分布(右、白線はチャンパー境界を示す) [9]。

モデル土壌系実験

土壌中の複雑な生態系の基盤として、その物理構造の重要性が示唆されてきた。特に微生物は土壌粒子によって形成される微細な空隙に存在しており、閉じ込め効果によって容易に高密度状態になり得る。[54, 55]。さらに、土壌の多孔質構造に基づく空隙のネットワーク構造は生物間の相互作用や分子の輸送に大きな影響を与えており、その理解には流体力学・力学系・パーコレーションといった物理学の視点が重要である。本研究では、屈折率を調整した透明なモデル土壌系を 1 空隙スケールで 3 次元追跡し、物理学に基づいた解析から、ネットワーク構造のトポロジーに起因する生態系の普遍性質の解明を目指している。本年度においては、フォトリソグラフィ

や 3D プリント技術を用いたモデル土壌の改良に成功し、実験系を空隙ネットワークとしてモデル化するパイプラインを確立した(図 6.6.22)。近年明らかにした蛍光菌の静置培養における空間構造の重要性に関する知見 [4] と対比させる形で、蛍光菌・大腸菌・枯草菌といったバクテリアを用いた培養実験を進める予定である。

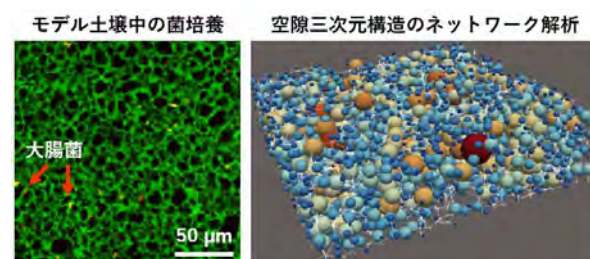


図 6.6.22: モデル土壌系における菌培養の顕微鏡画像(左)とその三次元ネットワーク解析(右)。

酢酸菌の集団運動

生物が作る体外構造の形成プロセスの理解は、バイオマテリアル利活用のための基盤的知見として重要であり、細胞集団の挙動の解明が鍵となる。酢酸菌がバイオフィームとして産生するセルロースヒドロゲル(ナタデココ)は、そのような体外構造の一例である。酢酸菌はセルロース繊維を体外に分泌、伸長しながら移動するアクティブマターであり、分泌した繊維が運動の履歴として蓄積されることで菌の運動にフィードバックするというユニークな性質を持つ [8, 42]。本研究では、酢酸菌の集団運動において秩序構造が発現する条件の解明に取り組んだ。菌一層分の厚さの観察窓を有する微小流体デバイスを作製し、密度を変えて集団運動を観察した結果、高密度条件でネマチック秩序が形成されることを見出した(図 6.6.23)。この結果は、集団運動の制御によってセルロースヒドロゲルの構造をデザインするという、アクティブマターを利用した新たな材料設計の可能性を示している。

クラミドモナス懸濁液の細胞間相互作用

遊泳微生物や自己駆動コロイドなどの微小遊泳体が遠方に及ぼす流体的相互作用は、懸濁液が境界に接している場合であっても比較的よく理解されているが、近接相互作用や、その粒子密度依存性については未解明な点が多い。そこで本研究では、藻類であるクラミドモナスを用いた実験と流体力学シミュレーションを組み合わせ、擬二次元クラミドモナス懸濁液における細胞間相関を調査した。その結果、細胞間相関は、比較的長距離の双極子モードと短距離の引き込みモードの密度依存的な共存によって理解できることが明らかになった。我々はまた、これ

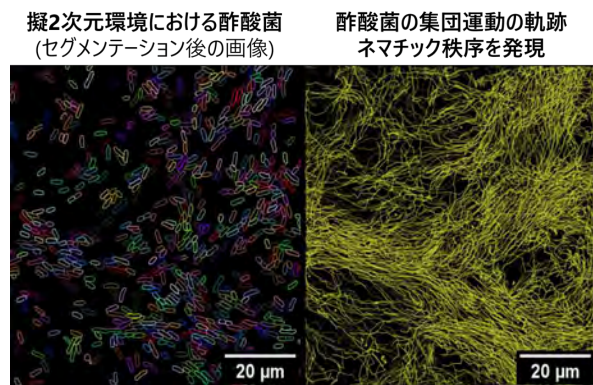


図 6.6.23: 酢酸菌集団が発現する秩序構造

ら2つのモードを励起する物理的メカニズムを特定することにも成功した。これらの発見は、マクロな集団の振る舞いがどのように個体レベルの近傍ダイナミクスに根ざしているかを解き明かし、微小遊泳体懸濁液の精緻な理解に貢献するものである。

ミナミコメツキカニの集団行動

単純な個体の集まりである群れの適応的意義を理解することは、集団行動研究における重要な課題である。我々はミナミコメツキカニにおいて、群れ密度によって外部刺激への応答性が非単調に変化し、中程度の密度でのみ環境変化への適応的な集団運動が生じる一方、高密度ではむしろ応答性が低下することを明らかにした [3]。さらに、野外ドローン映像に対して機械学習に基づく個体トラッキング手法を実装し、多数個体が存在する環境下でも安定に個体運動を抽出することに成功した [33, 40, 41]。この手法により、個体レベルの運動と群れ構造の関係を定量的に解析する基盤を確立した。

6.6.3 理論的アプローチ

Kardar-Parisi-Zhang クラスの大偏差統計

界面成長などの非平衡ゆらぎを記述する Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 普遍クラスは、ゆらぎの厳密解が実験で検証されるなど、理論と実験の両面から発展が続いている [12, 22, 23, 45]。これらの結果の多くは典型ゆらぎに関するものであり、典型値から大きく外れたゆらぎ（大偏差）については、理論研究は盛んな一方で、実験で計測された例はない。本研究では、KPZ クラスにおける大偏差の実験計測手法開発を目的とし、実験実装が可能な大偏差統計則の新たな計測手法を重点サンプリング法に基づいて開発して、1次元完全非対称単純排他過程を例に数値評価を行った。大偏差の厳密解が知られているステップ初期条件に対して、厳密解への収束を確認するとともに、厳密解のない初期条件の場合の大偏差統計則

も数値的に計測し、負の大偏差はステップ初期条件の解に収束することを見出すなどの結果を得た [7]。

<受賞>

- [1] Yoshihito Uchida, Outstanding Poster Award, 11th International Conference Engineering of Chemical Complexity, July 31, 2025.
- [2] 内田善人, 日本物理学会第 80 回年次大会学生優秀発表賞 (領域 12), 2025 年 9 月 16 日.

<報文>

(原著論文)

- [3] C. Feliciani, H. Murakami, T. Tomaru, Y. Uesugi, S. Tanida, Y. Nishiyama, X. Jia, and T. Maeda, How swarm size affects soldier crab swarming behavior. *Artif. Life. Robotics* **31**, 69 (2025).
- [4] Y. Karita, G. T. Rodríguez-Sánchez, E. Brambilla, J. C. R. Hernandez-Beltran, M. Schwarz, P. B. Rainey, Context-dependent adaptation in structured environments, *Proc. R. Soc. B*, **293**, 20252004 (2026).
- [5] A. Ochi, K. Shibamoto, Y. Toyotake, D. Fujioka, F. Yokoyama, H. Okanishi, T. Imai, D. Fujita, R. Aono, M. Inoue, M. Takizawa, R. Tobe, Y. Kanai, T. Imai, H. Mihara, Biosynthesis and Export of Membrane-Enveloped Selenium Nanoparticles by *Escherichia Coli*. *Environ. Sci. Technol.* **60**, 4213 (2026)
- [6] Y. Uchida, D. Nishiguchi, K. A. Takeuchi, Designing topological edge states in bacterial active matter. arXiv:2601.08243.
- [7] Y. Yanagibashi, K. A. Takeuchi, Population dynamics simulations of large deviations for three subclasses of the Kardar-Parisi-Zhang universality class. arXiv:2602.04357.
- [8] G. Takayama, T. Kondo, Unraveling self-assembly mechanisms in bacterial cellulose hydrogels. *bioRxiv*, doi: 10.64898/2026.01.21.700946 (2026).
- [9] F. Yokoyama, K. A. Takeuchi, Biofilm Initiation via Extracellular Matrix Production Regulated by Cell Orientation Patterning in Growing *Escherichia coli* Populations. *bioRxiv*, doi: 10.64898/2026.03.26.714369 (2026)

(会議抄録・総説)

(国内雑誌)

- [10] 竹内一将, 西口大貴, 高密度バクテリア集団で探るアクティブマターの諸物質相と集団機能. *生物物理* **66**(2), 95-99 (2026).
- [11] 上杉佑人, 若手の会だより ～物理帝国主義から生物物理へ～. *生物物理* **66**(2), 127-128 (2026).

(学位論文)

(著書)

- [12] 竹内一将, Kardar-Parisi-Zhang 普遍クラスの物理学: 成長現象から広がるゆらぎの普遍法則, 基本法則から読み解く物理学最前線シリーズ 38, 共立出版 (2026).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [13] K. A. Takeuchi, Smectic-like bundle formation of planktonic bacteria upon nutrient starvation. 11th International Conference Engineering of Chemical Complexity, talk, Tokyo (Japan), July 31, 2025.
- [14] Y. Uchida, D. Nishiguchi, K. A. Takeuchi, Edge State of Bacterial Collective Motion in Asymmetric Channel Networks. StatPhys29, poster, Florence (Italy), July 17, 2025.
- [15] Y. Uchida, D. Nishiguchi, K. A. Takeuchi, Edge State in Dense Bacterial Suspension Driven by Asymmetric Channel Networks. Workshop: Driven and active amorphous matter, talk, Göttingen (Germany), July 22, 2025.
- [16] Y. Uchida, D. Nishiguchi, K. A. Takeuchi, Seeking for Topological Edge States of Bacterial Active Matter in Asymmetric Channel Networks. 11th International Conference Engineering of Chemical Complexity, poster, Tokyo (Japan), July 31, 2025.
- [17] Y. Uchida, D. Nishiguchi, K. A. Takeuchi, Towards a Realization of Topological Transport in Bacterial Active Matter Driven by Asymmetric Channel Networks. Self-Organizing and Evolving Active Matter, poster, Dresden (Germany), September 23, 2025.
- [18] Y. Uchida, D. Nishiguchi, K. A. Takeuchi, Designing topological edge states in bacterial active matter. International Active Matter Workshop 2026, talk, Tokyo (Japan), January 23, 2026.
- [19] Y. Uchida, D. Nishiguchi, K. A. Takeuchi, Designing topological edge states in bacterial active matter. APS Global Physics Summit 2026, talk, Denver, Colorado (U.S.A.), March 19, 2026.
- [20] F. Yokoyama, K. A. Takeuchi, Biofilm Initiation Driven by Orientation Patterns in Rod-Shaped Bacterial Cells. FEMS Micro2025, talk, Milan (Italy), July 17, 2025.
- [21] F. Yokoyama, Anaerobic live-cell imaging platform with nano/microfluidics. International Symposium of Life-Nonlife Transition: Boundaries Between Life and Nonlife, talk, Tokyo (Japan), March 18, 2026.

招待講演

- [22] K. A. Takeuchi, The Kardar-Parisi-Zhang universality class for driven interfaces and... integrable spin chains?. Hydrodynamics of low-dimensional interacting systems: Advances, challenges, and future directions, invited talk, Kyoto (Japan), June 4, 2025.

- [23] K. A. Takeuchi, Introduction to the Physics of the KPZ universality class. 2025 IHES Summer School - Statistical Aspects of Nonlinear Physics, invited talk, Bures-sur-Yvette (France), June 30 - July 3, 2025.
- [24] K. A. Takeuchi, Glassy dynamics, polydispersity, and rearrangements of dense bacterial populations. Driven and active amorphous matter, invited talk, Göttingen (Germany), July 22, 2025.
- [25] K. A. Takeuchi, Active matter: towards a new materials science for life and beyond. The 2nd International Symposium on Molecular Materials for Future (ISMMF-2), invited talk, Sendai (Japan), September 5, 2025.
- [26] K. A. Takeuchi, Active liquid-crystal approaches to bacterial biofilms. Self-Organizing and Evolving Active Matter, invited talk, Dresden (Germany), September 22, 2025.
- [27] K. A. Takeuchi, Designing topological edge localization in bacterial active matter. East Asia Joint Seminars On Statistical Physics 2025, invited talk, Seoul (Korea), October 16, 2025.
- [28] K. A. Takeuchi, Designing topological edge states in bacterial active matter. Advances in Nonequilibrium Systems and Stochastic Processes, invited talk, Bangalore (India), November 27, 2025.
- [29] K. A. Takeuchi, Designing topological edge states in bacterial active matter. East Asia Joint Seminars On Statistical Physics 2025, invited talk, Dresden (Germany), March 10, 2026.

(国内会議)

一般講演

- [30] 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. 科学技術振興機構 創発的研究支援事業 第4回 融合の場, 依頼ポスター, 東京, 2025年7月29日.
- [31] 竹内一将, 高密度バクテリア集団におけるトポロジカル端状態. 科学技術振興機構 創発的研究支援事業 2025年度酒見パネル「創発の場」, 依頼ポスター, 東京, 2025年12月8日.
- [32] 後藤崇志, 西口大貴, 竹内一将, 運動する細胞集団におけるメソスケールの動的物性を測定する実験系の構築. 第65回生物物理若手の会夏の学校, ポスター, 千葉, 2025年9月1-3日.
- [33] 上杉佑人, 谷田桜子, Claudio Feliciani, 村上久, Xiaolu Jia, 西口大貴, 竹内一将, 野外観測によるミナミコメツキガニ *Mictyris guinotae* の集団逃避行動と群れサイズの効果. 第65回生物物理若手の会夏の学校, ポスター, 千葉, 2025年9月1-3日.
- [34] 後藤崇志, 西口大貴, 竹内一将, 磁性細菌による高密度アクティブマターの応答・緩和過程の測定. 日本物理学会 2025年次大会, 講演, 広島大学, 2025年9月16日.

- [35] 内田善人, 西口大貴, 竹内一将, 非対称流路ネットワークでバクテリア集団運動のトポロジカルエッジ状態をデザインする. 日本物理学会 2025 年次大会, 講演, 広島大学, 2025 年 9 月 16 日.
- [36] 内田善人, 西口大貴, 竹内一将, 非対称ネットワークが駆動するバクテリア集団運動のトポロジカルエッジ状態. 第 13 回ソフトマター研究会, 講演, 京都大学, 2025 年 11 月 6 日.
- [37] 横山文秋, 竹内一将, アクティブマター物理学とマイクロ流体工学で解き明かすバイオフィーム形成の始まり. 第 98 回日本細菌学会, ポスター, 石川県立音楽堂, 2025 年 5 月 29 日.
- [38] 榊原 紬希, 横山 文秋, 村上 裕哉, 田代 陽介, マイクロ流体デバイス NanoFlow iMM を用いた膜小胞産生の細菌-細胞解析. 日本農芸化学会 2026 年度大会, 講演, 同志社大学, 2026 年 3 月 11 日.
- [39] 榊原 紬希, 横山 文秋, 村上 裕哉, 田代 陽介, 単一細胞由来膜小胞検出を指向したマイクロ流体デバイス NanoFlow iMM の開発. 化学工学会 第 91 回年会, ポスター, 京都大学, 2026 年 3 月 17 日.
- [40] 上杉佑人, 西口大貴, 村上久, Claudio Feliciani, 竹内一将, ミナミコメツキガニ集団逃避行動の定量解析. 日本生態学会第 73 回全国大会, 講演, 京都, 2026 年 3 月 11 日.
- [41] 上杉佑人, 西口大貴, 村上久, Claudio Feliciani, 竹内一将, ミナミコメツキガニの群れにおける集団逃避運動とその個体トラッキング. Spring School for Theoretical Biology 2026, ポスター, 名古屋, 2026 年 3 月 4-6 日.
- [42] 高山剛, 近藤哲男, バクテリアセルロースヒドロゲルの 3 次元構造形成における酢酸菌の“動き”の解析: ナノビルダーによる材料設計を目指して. セルロース学会 第 32 回年次大会, ポスター, 北海道, 2025 年 7 月 10-11 日.
- [43] 伊藤将吾, 竹内一将, 光反応性バクテリア集団を用いたトポロジカルピンセットの開発. 第 70 回物性若手夏の学校, ポスター, 滋賀, 2025 年 8 月 1 日.
- [48] 内田善人, 環境の幾何構造でバクテリア集団運動のトポロジカルエッジ状態をデザインする. Young Soft Webinar 第 31 回セミナー, Online, 2026 年 1 月 21 日.
- [49] 高山剛, 「動く」微生物が作る「構造」: 酢酸菌によるセルロース生産. 生物物理若手の会 関東支部セミナー, 東京大学, 2025 年 6 月 23 日.

(アウトリーチ)

- [50] 竹内一将, 生命のための新しい物質科学を目指して”. 東京大学理学部 オープンキャンパス 2025 ライブ講演会, 依頼講演, 東京大学, 2025 年 8 月 6 日.
- [51] 後藤崇志, 生きるコンパスに磁場をかける. 第 2 回最先端クロストーク, 東京農工大学, 2025 年 7 月 12 日.
- [52] 上杉佑人, 君たちは流体の中をどう生きるか. 第 97 回東京大学五月祭「10 分で伝えます! 東大研究最前線」, 東京大学, 2025 年 5 月 24, 25 日.
- [53] 武井梓穂, 上杉佑人, 柴垣光希, 生物+物理=生物物理 (日本生物物理学会). 女子中高生夏の学校 2025, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2025 年 8 月 10 日.
- [54] 荻田裕也, 生命増えたらすぐぎゅうぎゅう. 東大 100 人論文, 東京大学, 2026 年 1 月 29 日, 30 日.
- [55] 荻田裕也, 生命現象と増える粒子の物理学. Utalk, 東京大学, 2026 年 2 月 14 日.

6.7 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」のもとで、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る。

以下では、2025 年度に小西研究で行われた研究の概要を紹介する。

招待講演

- [44] 竹内一将, 大自由度カオス系の有効自由度を決める: Lyapunov ベクトルによるアプローチ. 物性研研究会 熱場の量子論とその応用 2025, 招待講演, 千葉, 2025 年 9 月 4 日.

(セミナー・集中講義)

- [45] K. A. Takeuchi, Universality class for driven interfaces and... integrable spin hydrodynamics?. iTHEMS セミナー (招待), 理化学研究所, 和光, 2025 年 5 月 19 日.
- [46] K. A. Takeuchi, Active liquid-crystal approaches to bacterial biofilms. セミナー (招待), ESPCI, Paris (France), 2025 年 7 月 4 日.
- [47] K. A. Takeuchi, Active matter: towards a new materials science for life and beyond. 4PM セミナー, 東京大学, 2025 年 9 月 10 日.

6.7.1 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。

6.7.2 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で作製するテラヘルツモスアイ構造を用いた超広帯域完全吸収体の実現

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きた。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。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 [23][24]。

反射を抑える技術と同様に求められるのは吸収率が極めて高い構造である。広帯域吸収体は、電磁波シールド、迷光抑制、検出器の高感度化、黒体放射源など、多くの電磁波制御の用途で重要である。ここで注目される材料の一つが、熱分解炭素 (pyrolytic carbon: PyC) 薄膜である。PyC はテラヘルツから光領域において広い吸収を示すが、一般的に、平坦基板上に作製した金属的な吸収材料は、理論的にその吸収率の最大値は 50 %にとどまってしまう。この限界を超えるために我々は、レーザー加工で形成したシリコンモスアイ構造の表面に、化学気相成長 (Chemical Vapor Deposition, CVD) を用いて PyC 薄膜をコートしたハイブリッド構造を開発した [3][14][18]。

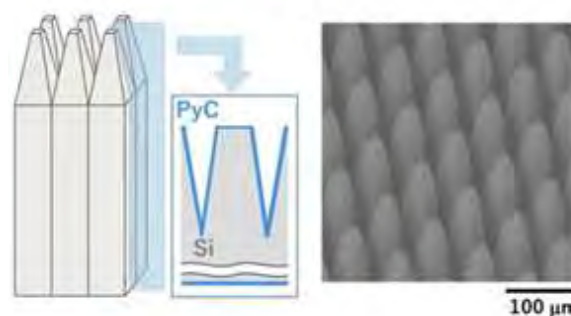


図 6.7.24: フェムト秒レーザー加工と化学気相成長で作製したカーボン薄膜でコートされたモスアイ構造の模式図と電子顕微鏡像

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、周期 67 μm 、高さ 240 μm の正方格子モスアイ構造を作製した。さらに、このシリコンモスアイ構造上に化学気相成長 (Chemical Vapor Deposition, CVD) で厚さ 100 nm の PyC を成膜した (図 6.7.24)。透過スペクトルおよび反射スペクトルの測定結果からこのハイブリッド構造の吸収率を見積もったところ、テラヘルツ領域だけでなく、1～1200 THz、すなわち波長 300 μm から 250 nm の、テラヘルツから深紫外にわたる極めて広い周波数領域で 98% 以上の吸収率が実現されていることが明らかになった (図 6.7.25)。この結果はシミュレーションでもよく再現された。シミュレーションによって、長波長側ではモスアイ

構造による実効屈折率勾配が反射を抑えて PyC との相互作用距離を増大させることによって吸収が大きくなり、短波長側ではモスアイ構造内部での多重反射と散乱によって吸収が累積する結果、非常に大きい吸収が生じるというメカニズムがあきらかになった。このように、形状効果と広帯域材料吸収を組み合わせることで、テラヘルツから深紫外までにわたる超広帯域な完全吸収体の実現できることが明らかになった。

本研究の成果は、Advance Optical Material 誌に掲載され [3], 理学系研究科よりプレスリリースを行った。さらに、黒体輻射スペクトル放射源としての応用にも展開できることを示した [4]。

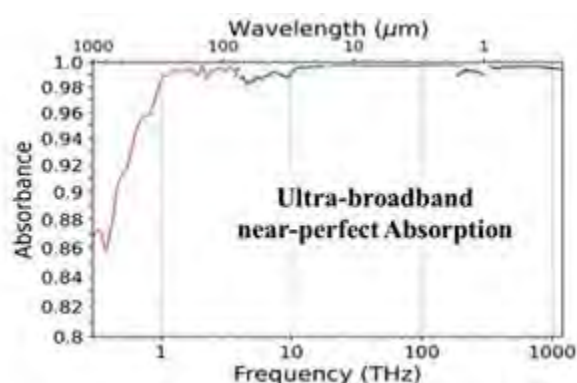


図 6.7.25: カーボン薄膜でコートされたモスアイ構造の吸収スペクトル

6.7.3 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的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。

2025 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。Nomarski 干渉計に基づく時間分解複素振幅イメージング装置を構築し、フェムト秒レーザー誘起エアプラズマのダイナミクスをサブミクロン空間分解能で観測することに成功した。従来の Nomarski 干渉計は、光学系が比較的簡便で機械振動にも強いという利点を有する一方で、空間分解能が数 $10\mu\text{m}$ 程度に制限されることが多く、得られる像が空間平均化されてしまうため、プラズマ内部の微細構造を正確に捉えることが困難であった。本研究では、Nomarski 干渉計に用いる Wollaston prism の分離角と結像系の倍率を最適化することにより、約 $0.87\mu\text{m}$ の空間分解能と高い位相定量性を両立した計測系を実現した。

この計測系を用いて、空気中に集光したフェムト秒レーザーパルスによって生成されるエアプラズマの透過像および位相像をポンプ・プローブ法により取得し、さらに位相情報に対して逆 Abel 変換を適用することで、電子密度分布の再構成を行った。その結果、レーザー照射後 1ps 程度の初期過程において、光軸近傍に形成されるプラズマの内部構造をマイクロメートルスケールで可視化することに成功した (図 6.7.26)。特に、高い開口数で集光した場合には、従来の空間分解能では識別が困難であった、電子密度分布の空間的な分裂構造が明瞭に観測された。これは、自己集束とプラズマによる発散の競合に起因する非線形伝搬ダイナミクスを反映している可能性があり、レーザー誘起プラズマ形成の理解に新たな知見を与える結果である。

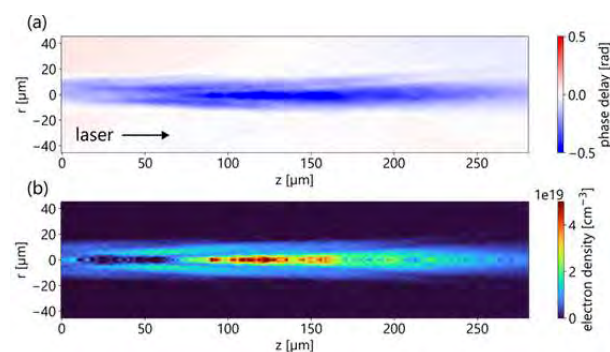


図 6.7.26: (a) 空気プラズマの位相遅延像。入射パルスエネルギーは $108\mu\text{J}$ 、時間遅延は 1ps 。(b) (a) の測定結果に逆 Abel 変換を適用して得られた電子密度分布。

さらに、得られた電子密度の時間発展を追跡したところ (図 6.7.27)、電子密度は 1ps 未満で最大となっ

た後、数 10ps の時間スケールで減衰することが明らかとなった。また、入射パルスエネルギーを変化させた系統的測定を行い、異なる集光条件におけるピーク電子密度のエネルギー依存性を評価した。これらの実験結果を、非線形シュレディンガー方程式と電子密度生成のレート方程式に基づく数値シミュレーションと比較したところ、比較的小さい開口数の条件では、広い入射エネルギー範囲にわたって良い一致が得られた。一方で、より高い開口数の条件では実験と計算の差異も見いだされ、従来モデルの適用限界や今後改良すべき点を明らかにすることができた。

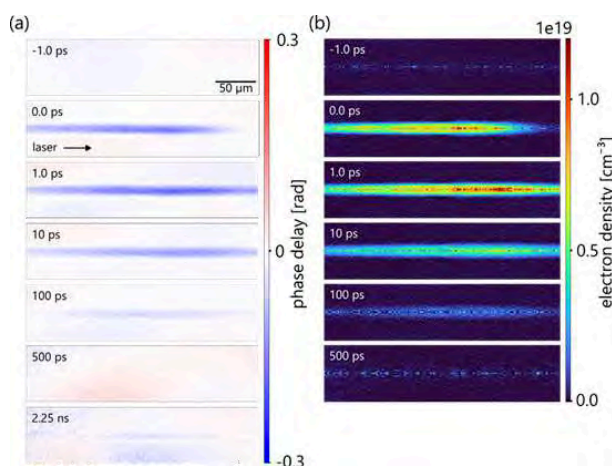


図 6.7.27: (a) 空気プラズマの時間分解位相遅延像。入射パルスエネルギーは 95 μJ 。(b) (a) の測定結果に逆 Abel 変換を適用して得られた電子密度分布の時間変化。

本研究は、フェムト秒レーザー誘起プラズマの生成・緩和ダイナミクスを高い空間分解能と定量性で可視化できる新たな実験基盤を確立したものである。この成果は、空気中における超短パルスレーザーの非線形伝搬の理解を深めるだけでなく、レーザー加工時に形成されるプラズマの役割の解明や、加工現象の高精度制御へとつながる重要な一歩である。

本研究の成果は、Physics of Plasmas 誌に掲載され [2]、Featured article や論文誌のカバーに選ばれた。

今後はレーザー加工時の超高速ダイナミクスを3次的に観察可能な系に拡張していき、レーザー加工メカニズムの全容解明を進めていく。

<受賞>

- [1] 櫻井治之、山田涼平、小西邦昭 2024 年度レーザー加工学会誌ベストオーサー賞 「フェムト秒レーザー加工の学理解明に向けた集光プロファイルの精密計測およびシミュレーション手法の開発」

<報文>

(原著論文)

- [2] Wataru Kimura, Shotaro Kawano, Ryohei Yamada, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Norikatsu Mio "Sub-micrometer spatial resolution Nomarski interferometer for time-resolved complex-amplitude imaging of femtosecond laser-induced air plasma," Phys. Plasmas **32**, 062106 (2025).
- [3] Yuki Hakamada, Maria Cojocari, Mizuho Matoba, Shotaro Kawano, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi*, Daniil Pashnev, Surya Revanth Ayyagari, Vytautas Janonis, Andrzej Urbanowicz, Saulius Tumėnas, Justinas Jorudas, Irmantas Kašalynas*, Janna Pennanen, Adigun Deborah Amos, Aleksandr Saushin, Georgy Fedorov*, Yuri Svirko, Polina Kuzhir "Carbon-Coated Moth-Eye Structure: An Ultrabroadband THz-DUV Near-Perfect Absorber," Adv. Opt. Mater. **13**, 2500948 (2025).
- [4] Isaac Appiah Otoo, Yuki Hakamada, Aleksandr Saushin, Maria Cojocari, Mikhail Gorbun, Janna Penanen, Petri Karvinen, Shotaro Kawano, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Irmantas Kašalynas Yuri Svirko Polina Kuzhir Georgy Fedorov "Reference black-body radiation source for emissivity measurements on the frequency range 3–30 THz," Appl. Phys. Lett. **127**, 091101 (2025).

(国内雑誌)

- [5] 岸田 寛之, 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平面レンズ" 光技術コンタクト 第 63 巻第 9 号, pp13 - 19, 2025 年 9 月

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [6] Kentaro Soeda Kazunori, Naganuma Yoshinori, Yamaguchi Kuniaki, Konishi Hiroharu Tamaru Norikatsu Mio, Hiroshi Ito, Tadao Nagatsuma, "WR-3.4 Hollow-Waveguide Mach-Zehnder Interferometer Composed Of Two Y-Branch Structures Fabricated Using A 3D Printer And Metal Plating," The 50th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2025) (2025/8/18, Aalto University, Espoo, Finland Oral)
- [7] Shotaro Kawano "Full-Time-Domain Complex-Field Imaging of Laser-Matter Interaction: From Carrier Excitation to Thermal Diffusion," ASPIRE-CHARTIST Joint Workshop (2025/11/17, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, Oral)
- [8] Mizuho Matoba, "Flat Optical Lenses Fabricated Entirely from Colored Photoresist through an i-line Stepper," ASPIRE-CHARTIST Joint Workshop (2025/11/17, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, Oral)

- [9] Wataru Kimura, "Nomarski interferometer with sub-micron spatial resolution for time-resolved complex-amplitude imaging of femtosecond laser-induced air plasma," ASPIRE-CHARTIST Joint Workshop (2025/11/18, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, Oral)
- [10] Yuki Hakamada, "Broadband Perfect Absorption from Terahertz to Deep-UV Enabled by Carbon-Coated Moth-Eye Structures," ASPIRE-CHARTIST Joint Workshop (2025/11/18, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, Oral)
- [11] Haruyuki Sakurai, "Precise metrology of ablation phenomena for advanced microfabrication," ASPIRE-CHARTIST Joint Workshop (2025/11/18, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, Oral)
- [12] Kuniaki Konishi, Yuki Hakamada, Liu Shuaicheng, Haruyuki Sakurai, Ceng Chih-Zong, Ho Ya-Lun, Ayako Mizushima, Yoshio Mita, "Fabrication of SiO₂ dielectric membrane metasurfaces for generating circularly polarized coherent light in the vacuum ultraviolet region," Pacificchem 2025 (2025/12/16, Hawaii, USA, Oral)
- [13] Kentaro Soeda, Kazunori Naganuma, Yoshinori Yamaguchi, Kuniaki Konishi, Hiroshi Ito, Tadao Nagatsuma, Junji Yumoto, "Monolithic fabrication of slot-coupled hollow waveguide directional couplers for the THz band and their applications," SPIE Photonics West 2026 (2026/1/21, Moscone Center, San Francisco, USA, Oral)
- [14] Yuki Hakamada, Mizuho Matoba, Shotaro Kawano, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Maria Cojocari, Daniil Pashnev, Surya R. Ayyagari, Vytautas Janonis, Andrzej Urbanowicz, Saulius Tumėnas, Justinas Jorudas, Irmantas Kašalynas, Janna Pennanen, Deborah A. Adigun, Aleksandr Saushin, Georgy Fedorov, Yuri Svirko, Polina Kuzhir, "Ultrabroadband THz-DUV absorber enabled by pyrolytic carbon-coated moth-eye structures," SPIE Photonics West 2026 (2026/1/22, Moscone Center, San Francisco, USA, Oral)
- [15] Soyeon Jun, Andreas Herbst Anchit Srivastava, Chih-Zong Deng, Kuniaki Konishi, Takuro Ideguchi, Kilian Scheffter, Hanieh Fattahi, "Super-resolution label-free fieldoscopy with attosecond temporal resolution," SPIE Photonics West 2026 (2026/1/28, Moscone Center, San Francisco, USA, Oral)
- 招待講演
- [16] Kuniaki Konishi "Optical Fresnel Zone Plate Lenses Fabricated Entirely Of colored Photoresist With I-line Stepper," The 15th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META2025) (2025/7/24, Torremolinos, Spain)
- [17] Shotaro Kawano, Keiichiro Toda, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Takuro Ideguchi "Trans-timescale imaging of deep-UV femtosecond laser ablation of dielectrics with time-resolved digital holographic microscopy," SPIE Optics + Photonics 2025 (2025/8/3, San Diego, USA)
- [18] Kuniaki Konishi "Ultra-broadband near-perfect absorber based on laser-processed moth-eye antireflection structures," The 4th International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT2025) and Symposium on Frontier of Terahertz Science XII (S-FTS 2025) (2025/10/17, Tokushima University, Japan)
- [19] Shotaro Kawano, Keiichiro Toda, Keiichiro Toda, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Takuro Ideguchi "Time-resolved complex optical-field imaging for revealing physical processes in laser processing," SPIE Photonics West 2026 (2026/1/21, Moscone Center, San Francisco, USA)
- (国内会議)
- 一般講演
- [20] 袴田 祐生, Cojocari Maria, 的場 みづほ, 川野 将太郎, 櫻井 治之, 小西 邦昭, Pashnev Daniil, Ayyagari Revanth Surya, Janonis Vytautas, rbanowicz Andrzej, Tumenas Saulius, Jorudas Justinas, Kasalynas Irmantas, Pennanen Janna, Amos Deborah Adigun, Saushin Aleksandr, Fedorov Georgy, Svirko Yuri, Kuzhir Polina "カーボン薄膜コートされたモスアイ構造による THz-DUV 超広帯域完全吸収体" 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会 (2025 年 9 月 7 日、名城大学天白キャンパス、愛知)
- [21] Chinzong Deng, Kuniaki Konishi, Vincent Tung, Chun-Wei Chen, Ya-Lun Ho "Optical Modulation via Atomically Thin Dielectrics in Membrane Metasurface" 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会 (2025 年 9 月 7 日、名城大学天白キャンパス、愛知)
- [22] 川中 厚之介, 櫻井 治之, 川野 将太郎, 陳 柏翰, 謝 景翕, 蘇 家軒, 楊 尚達, 小西 邦昭 "Yb 系固体レーザーの極超短パルスによる誘電体レーザー加工" 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会 (2025 年 9 月 9 日、名城大学天白キャンパス、愛知)
- [23] 相澤耕佑, 秋澤涼介, 川野将太郎., 小西邦昭., 前田明日香., 松村知岳., Guillermo Pascual-Cisneros., 櫻井治之., 高久諒太 "精密 CMB 偏光観測に向けたレーザー加工による大型光学素子用 W バンド反射防止サブ波長構造の開発" 日本物理学会 第 80 回年次大会 (2025 年) (2025 年 9 月 16 日、広島大学東広島キャンパス、広島)
- [24] 高久諒太, 松村知岳, 櫻井治之, 小西邦昭, 川野将太郎 "ミリ波光学素子に向けた超短パルスレーザー加工で作製する六角格子モスアイ反射防止構造" 日本物理学会 第 80 回年次大会 (2025 年) (2025 年 9 月 16 日、広島大学東広島キャンパス、広島)
- [25] LIU SHUAICHENG "Automated Fluence Mapping Method for Investigating the Wavelength Dependence of Ablation Threshold" 第 10 回フォトニ

クスワークショップ (2025 年 11 月 27 日、沖縄青年会館、那覇)

- [26] 川中 厚之助 ”極超短パルスによる誘電体レーザー加工” 第 10 回フォトニクスワークショップ (2025 年 11 月 27 日、沖縄青年会館、那覇)
- [27] 添田 建太郎、長沼 和則、山口 義紀、小西 邦昭、伊藤 弘、永妻 忠夫、湯本 潤司 ”TE10-TE20 モード変換を用いた J バンド Y 分岐導波管の低損失分波／合波特性” 電子情報通信学会 総合大会 (2026 年 3 月 13 日、九州産業大学、福岡)
- [28] 上原 光稀、小西 邦昭、添田 建太郎、湯本 潤司、百瀬 健 ”超臨界流体薄膜堆積法 (SCFD) による Cu コーティングを通じたテラヘルツ波導波管の形成” 第 73 回応用物理学会春季学術講演会 (2026 年 3 月 16 日、東京科学大学大岡山キャンパス)
- [29] 平岡 拓士、三塚 新、小林 裕太、的場 みづほ、河口 真志、小西 邦昭、林 将光 ”Te の異方軸制御によって作製したメタ表面光学素子” 第 73 回応用物理学会春季学術講演会 (2026 年 3 月 17 日、東京科学大学大岡山キャンパス)

招待講演

- [30] 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電磁波制御への応用” 2025 年度 多元技術融合光プロセス研究会 第 1 回研究交流会 (中央大学後楽園キャンパス、2025 年 7 月 30 日)
- [31] 小西邦昭 ”誘電体メンブレンメタサーフェスによる光波制御” 第 29 回プラズモニク化学シンポジウム (2025/12/5, 大阪大学東京オフィス、東京)
- [32] Kuniaki Konishi ”High-Precision Functional Microstructuring with Ultrashort-Pulse Lasers,” 光量子工学研究センター 第 13 回 RAP シンポジウム (2025/12/11, 理化学研究所, 和光)
- [33] 小西邦昭 ”フェムト秒レーザ加工の学理解明に向けた集光プロファイルの精密計測およびシミュレーション手法の開発【2024 年度レーザ加工学会誌ベストオーサー賞受賞記念講演】” 第 103 回レーザ加工学会 (2025/12/22, 大阪大学吹田キャンパス)

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ことで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 大学、St. Andrews 大学との共同研究において、コネクトミクス解析（網羅的な神経回路構造の再構築）を用い、ショウジョウバエ幼虫の運動回路の構造を系統的に決定するプロジェクトを推進している。一方、実験で得られた神経活動や回路構造に関する知見を統計解析したり数理モデル化したりすることにより、神経回路の動作原理を探る研究も推進している。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 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。

持続的な神経活動により運動出力をゲート制御する介在神経細胞群の機能解析（伊達隆久（新領域）、能瀬聡直、高坂洋史（新領域、電通大））

動物が洗練された行動を行うには、適切なタイミングでの筋収縮のみならず、適切なタイミングで筋を弛緩させることが重要である。しかし、筋弛緩状態を維持するための神経回路機構は、単一細胞レベルでは不明な点が多い。これまでに我々は、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 A02l を同定した。この細胞は、腹部神経節（脊椎動物の脊髄に相当）の各神経分節に左右一対ずつ存在する興奮性介在ニューロンである。興味深いことに、多くの神経細胞とは異なり、この細胞群は持続的な神経活動を示し、対応する体節が筋収縮を行う時に A02l の活動が一過的に抑制されるという特徴的な活動パターンを示す。コネクトミクス解析および、光遺伝学による神経活動摂動実験により、A02l が持続的に活動することで下流の抑制性介在神経細胞を介して筋弛緩状態が維持され、運動時に A02l 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。本年度は、A02l 上流回路のコネクトミクス解析を行い、A02l ニューロンにシナプス入力を与える介在神経細胞の同定を進めた。その結果、A02l を一過的に抑制する可能性のある A14a1 ニューロン、後退運動時の筋収縮後に A02l を再活性化させる可能性のある A18g ニューロンを見出すことができた。また、A02l は、典型的な神経細胞と同様に樹状突起で上流からの信号を受容するのに加え、一部の神経細胞で見られるように軸索末端でも上流からの信号を受け取る可能性があることを見出し、この軸索間シナプスを形成する上流の神経細胞の候補として、A31f ニューロンを見出した。この A31f のニューロンの機能を調べるために、A31f ニューロンを遺伝学的に標識する系統を作出し、神経活動イメージングを行ったところ、A02l と同様に筋収縮時に一過的に抑制されることが明らかになり、A02l と A31f が協調して運動出力のゲート制御を行っている可能性が新たに示唆された。本研究は、米国ニューヨーク大学の Marc Gershow 研究室、英国 St. Andrews 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、児玉優太（新領域）、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、その機能を解析した。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。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ニューロンの多くに強い入力を行うことが明らかになった。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。また、A18fを光遺伝学的に活性化すると前進運動が誘導されることから、A18fは前進運動を開始させるのに十分であることもわかった。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とある別種のニューロンとからなる回路は特定の条件下で前進波を生成でき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。分節構造に沿ったニューロン活動の伝播は、昆虫に限らずヒトを含む幅広い動物種の運動で見られる。この新しい介在ニューロンの発見は、軸性運動において分節間の活動伝播が駆動されるメカニズムの解明の一助となることが期待される。本研究は、英国 St. Andrews 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、越前良哉 (新領域)、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解明は、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、感覚入力を行動出力へとつなげ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、身体前方への接触刺激に対しては後退運動を、身体後方への接触刺激に対しては前進運動をそれぞれ示す。当研究室の先行研究では、このような部位特異的な逃避行動を制御するコマンドニューロンとして「Wave」が同定されている。Wave は A2~A7 の各体節に左右 1 対ずつ存在するが、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、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 の同時活性化は、より激しい逃避行動である回転運動を誘発する。しかし、Wave ニューロンと後退・前進運動の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達される経路は未解明であった。そこで本研究では、過去のコネクトミクス解析により a-Wave と後退運動実行ニューロン群を結ぶ中間細胞の候補として同定された、BLT および T19v ニューロンに着目し、これら候補細胞が a-Wave 由来の後退運動の発現に関与するかを検証することを目的とした。現在、BLT および T19v を特異的に標識するトランスジェニックシステムの探索、およびそれらを用いた機能解析を進めている。これまでの予備的知見として、T19v を光遺伝学的に活

性化すると後退運動が誘導され、BLT を活性化すると前進運動が停止するという結果を得ている。今後は、これらの細胞の作用機序を詳細に解析することで、Wave の下流でどのように神経活動が展開し、後退運動が惹起されるのかを解明していく予定である。

Split-Gal4 スクリーニングによるショウジョウバエ幼虫の逃避行動を制御する leucokinin 作動性下行性ニューロンの同定 (石励岩 (新領域)、松永光幸 (新領域))

動物は侵害刺激に対し、適切な逃避行動をとる必要がある。本研究では、強力な逃避行動 (C-bending や rolling) を示すショウジョウバエ幼虫をモデルとし、感覚情報の統合中枢の一つである SEZ に着目して逃避行動に関与する神経細胞の同定を試みた。まず、Split-Gal4 系と CsChrimson を用いた光遺伝学的スクリーニングにより、逃避様行動を誘導する 3 系統を見出した。そのうち、SEZ で単一の左右一対の細胞を標識する R15C01/Scr の形態・行動表現型を継承しつつ、実験的利便性の高い SS01993 系統を解析対象に選抜した。解析の結果、SS01993 の標的細胞は SEZ に細胞体を持ち、腹側神経索 (VNC) へ後方投射する左右一対の leucokinin 作動性ニューロンであることが判明した。機能解析において、CsChrimson による活性化 (gain-of-function) では tail flicking や rolling 等の逃避行動が高い再現性で誘導された。一方、GtACR による抑制実験 (loss-of-function) では、観察されていた持続的な体幹回転運動が照射中にほぼ完全に停止し、照射終了後に回復した。以上の結果は、SS01993 標識ニューロンが逃避様行動の誘導に十分であるだけでなく、その維持にも不可欠であることを示しており、逃避回路における中核的な役割を強く示唆する。今後、本細胞の入出力関係を詳細に解明し、SEZ から運動回路に至る制御の全体像を明らかにしたい。

7.1.2 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。

下行性介在ニューロンにおける Wnt/Frizzled シグナルによる軸索誘導機構の解析 (張春陽 (新領域)、渡辺逸希、能瀬聡直)

ショウジョウバエ幼虫は、刺激部位に応じて後退や前進といった方向性のある逃避行動を示す。この選択は腹側神経索の Wave ニューロンが担い、a-Wave は後退、p-Wave は前進運動をそれぞれ誘導する。Wave の軸索誘導には Wnt/Fz シグナルが関与し、Wnt4 の前後軸勾配に対し、受容体 DFz2 は前方への、DFz4 は後方への軸索伸長を促進する。しかし、Wave 下流の介在ニューロンにおける同シグナルの役割は未解明であった。

本研究では、a-Wave 下流で軸索を前後軸に沿って伸長させる下行性介在ニューロン、BLT および T19v に着目した。Gal4/UAS システムによるノックダウン・過剰発現実験の結果、BLT では DFz2 欠損で軸索が後方へ延長し、過剰発現で前方へ短縮した。一方、DFz4 欠損では軸索が短縮し、過剰発現で後方へ延長した。これは、BLT において DFz2 と DFz4 が拮抗的に作用し、軸索伸長方向を制御することを示唆する。対して T19v では、DFz2 の操作による軸索長の変動は認められたが、DFz4 の操作では有意な変化はなかった。このことから、T19v の軸索誘導は主として DFz2 に依存すると考えられる。以上の結果より、同一の Wnt4 勾配下でも、細胞種により Frizzled 受容体の利用様式が異なり、回路内での情報解釈に差異が生じることが示された。

回路階層を超えて共有される軸索誘導原理と行動進化の関連 (久保智裕、能瀬聡直)

Wnt/Fz シグナル経路が軸索伸長制御に果たす役割を追求するため、さらに下流に位置する体節相同ニューロン「Ifb-Fwd」と「Ifb-Bwd」に着目した。これらは Wave や BLT、T19v の下流に位置し、それぞれ前進・後退運動時の蠕動生成に寄与する。両ニューロンは形態・機能的に多くの共通点を有する。共にコリン作動性興奮性ニューロンであり、運動の伝播方向とは逆の隣接体節へ出力を送り、運動活性を停止(シャットダウン)させる機能を持つ。また、標的ニューロンも共有しており、それぞれの回路内でほぼ同一の役割を担っている。一方で明確な相違点もあり、Ifb-Fwd は前進時のみ、Ifb-Bwd は後退時のみ活動する。また軸索投射パターンも逆で、Ifb-Fwd は後方へ、Ifb-Bwd は前方へ投射する。この類似と相違は、これらが単一の祖先的細胞セットから発生または進化の過程で機能分化した可能性を示唆している。そこで、軸索誘導の決定メカニズムを解明すべく、Wnt 受容体 DFz2 および DFz4 を検証した。その結果、Ifb-Bwd において DFz4 をノックダウンすると異所的な後方への突起伸長が引き起こされた。これは、Wnt/Fz シグナルが回路の複数階層において軸索誘導を制御し、異なる行動を誘発するコマンド回路の分化に寄与してきた可能性を強く示唆する、進化的に重要な知見である。

水面を移動するショウジョウバエの進化 (松永光幸 (新領域))

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、種特異的な形態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学的・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際の形態学的・遺伝学的・神経学的基盤の解明を目指している。前年度までに、マメ幼虫の水上移動行動がアメンボやミズカメムシなどの水棲昆虫に類似し、体を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ことを見出していた。さらに数理解析により、この行動が表面張力を利用して成立していることを明らかにした。具体的には、水面上で尾端を後方へ長く伸ばし、それを側面に付着させることで S 字状の姿勢を形成し、身体の前部と後部を水面からわずかに持ち上げることで表面張力を発生させ、移動を可能にしている。今年度はまず、マメの S 字姿勢を模した PDMS 模型を作製し、同様の機構によって水面上を移動できるかを検証した。その結果、S 字型 PDMS の尾端を虫ピンで固定して水面を持ち上げた場合には、固定せず水面を持ち上げなかった場合と比較して、水面上を移動することが確認された。この結果は、マメ幼虫の水上移動が表面張力を利用していることを支持するものである。さらに、この水面移動が自然条件下でどの程度の頑強性を持つかを評価するため、水流が存在する条件下で近傍の壁に到達できるかを検証した。その結果、近縁種であるキイロなどでは水流に流されるのみで近傍に到達できなかったのに対し、マメでは少なくとも約 1 mm/s 程度の流速下においても、効率的に近傍の壁へ到達できることが明らかとなった。次に、尾端伸長のメカニズムを探索した。具体的には、尾端の筋肉自体による直接的な伸縮(仮説 1)と、身体前方の収縮によって体内後方の静水圧を高めて尾端を伸長させる機構(仮説 2)を検証した。抗体染色の結果、尾端付近の筋肉配置はキイロとはほぼ同様であり、大きな差異は認められなかった。一方で、尾端伸長時には身体前方の収縮が頻繁に観察された。これらの結果から、尾端伸長には静水圧を利用する仮説 2 が支持された。以上より、マメ幼虫の水上移動行動は、特異的な姿勢制御と前方収縮・尾端伸長という特徴的な運動様式によって支えられていることが示された。今後は、これらの表現型制御に関与する遺伝学的・神経学的基盤の解明をさらに進める。

<受賞>

- [1] 関崇貴, MBSJ-EMBO Poster Award 2025, 第 48 回日本分子生物学会年会, 2025.12.5
- [2] 関崇貴, Best Presentation Award, 動的脳機能創発第 2 回領域会議, 2025.12.9

<報文>

(原著論文)

- [3] 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. *Molecular Biology and Evolution* **42** (9) (2025)
- [4] N. Okamoto, Y. Mizuno, A. Watanabe, H. Kohsaka, R. Niwa. Neuroendocrine control of calcium mobilization in the fruit fly. *Nature* **649** (2025)
- [5] T. Date, Y. Liu, A. Yamaguchi, P. McNulty, R. Wu, M. Gershow, A. Nose, M.F. Zwart, H. Kohsaka. Tonically active interneurons gate motor output in *Drosophila* larvae. *bioRxiv* (2026)

(学位論文)

- [6] 久保智裕：Analysis of molecular mechanisms involved in the functional differentiation of homologous command neurons in *Drosophila* larvae (修士論文)
- [7] 石励岩：Split-GAL4-based screening identified a pair of leucokinin-positive descending neurons that drive escape behavior in *Drosophila* larvae (修士論文、新領域創成科学研究科)
- [8] 張春陽：Differential dependence on Wnt/Frizzled signaling for axon guidance in descending interneurons of *Drosophila* larvae (修士論文、新領域創成科学研究科)

(著書)

- [9] 高坂洋史、能瀬聡直 運動制御に関わる神経回路ダイナミクスとその回路基盤「脳機能ダイナミクス研究最前線」、エヌ・ティー・エス (2026)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] A. Nose, Motor Pattern Generation via Segmentally Interconnected Excitatory and Inhibitory Circuits in Larval Locomotion, Maggot Meeting 2025, 2025.9.15-18, Leipzig, Germany
- [11] X. Zhang, G. Arakawa, A. Nose, M. Fujiwara, Y. Makino, H. Kohsaka. Ultrasound-based remote intervention of fruit fly larvae for kinematic and kinetic analyses. Maggot Meeting 2025, 2025.9.15-18, Leipzig, Germany
- [12] T. Matsunaga, Meniscus climbing *Drosophilidae* larvae, Maggot Meeting 2025, 2025.9.15-18, Leipzig, Germany

- [13] T. Date, Y. Liu, A. Yamaguchi, R. Wu, P. McNulty, M. Gershow, M. Zwart, A. Nose, H. Kohsaka. Tonically active segmental interneurons maintain a resting motor state in *Drosophila* larvae. Computing Cords: Sensorimotor Control by Nerve Cord Circuits Across Species, 2025.10.12-15, HHMI Janelia Research Campus, USA

招待講演

- [14] N. Okamoto, Y. Mizuno, H. Kohsaka, R. Niwa. Neuroendocrine regulation of calcium ion homeostasis in the "boneless" fruit fly *Drosophila melanogaster*, Cold Spring Harbor Laboratory Symposium "Mechanisms of Metabolic Signaling", 2025.5.13-17, Cold Spring Harbor Laboratory, USA
- [15] A. Nose. How is motor pattern generated in *Drosophila* larva? Neurophysics of Active Sensing, 2025.8.5, UC Santa Barbara, USA

(国内会議)

一般講演

- [16] T. Matsunaga, Larval "water walking" as an evolutionary innovation in *Drosophilidae*, iTHEMS (RIKEN)-Theory Center (KEK) Joint Workshop 2025: Scientific Writing and Diversity-Equity-Inclusion, 2025.6.24, Riken
- [17] H. Kohsaka, X. Zhang, G. Arakawa, A. Nose, M. Fujiwara, Y. Makino. A remote intervention system with ultrasound to study social interaction in fruit fly larvae. 学術変革領域研究 (A)「階層的生物ナビ学」領域会議, 2025.7.13-7.14, 大阪
- [18] H. Kohsaka, X. Zhang, G. Arakawa, A. Nose, M. Fujiwara, Y. Makino. A remote intervention system with ultrasound to study social interaction in fruit fly larvae. 第48回日本神経科学大会, 2025.7.24-7.27, 新潟
- [19] T. Date, L. Yingtao, M. Zwart, A. Nose, H. Kohsaka. Functional analyses of segmental interneurons maintaining muscle relaxation in *Drosophila* larvae. 第48回日本神経科学大会, 2025.7.24-27, 新潟
- [20] T. Kubo, S. Takagi, A. Nose. Fz2-dependent axon guidance regulates synaptic patterning and behavioral output of Wave command neurons in *Drosophila* larvae. 第48回日本神経科学大会, 2025.7.24-27, 新潟
- [21] T. Matsunaga, Water traveling *Drosophilidae* larvae, Workshop on *Drosophilidae* Diversity, 2025.11, 三島
- [22] T. Kubo, S. Takagi, A. Nose. Fz2-dependent axon guidance regulates synaptic patterning and behavioral output of Wave command neurons in *Drosophila* larvae. 適応回路センサス 領域会議, 2025.10.23-25, 淡路

- [23] T. Matsunaga, Water traveling *Drosophilidae* larvae, Comparative physiology meeting, 2025.12.5-7, 早稲田
- [24] T. Seki, M. Zwart, H. Kohsaka, A. Nose. Higher-order neural circuits controlling intersegmental coordination in axial locomotion. 第48回日本分子生物学会年会, 2025.12.3-5, 横浜
- [25] L. Shi, T. Matsunaga, A. Nose. Split-Gal4 Based Screening Identified a Pair of Descending Neurons that Drives C-Bending in the *Drosophila* Larval SEZ. 第48回日本分子生物学会年会, 2025.12.3-5, 横浜
- [26] C. Zhang, A. Nose. Deciphering DFz2/DFz4-mediated Wnt signaling in axon guidance of the BLT command neuron in *Drosophila* larvae. 第48回日本分子生物学会年会, 2025.12.3-5, 横浜
- [27] T. Seki, M. Zwart, H. Kohsaka, A. Nose. Higher-order neural circuits controlling intersegmental coordination in axial locomotion. 動的脳機能創発 第2回領域会議, 2025.12.8-10, 沖縄
- [28] T. Seki, M. Zwart, H. Kohsaka, A. Nose. Higher-order neural circuits controlling intersegmental coordination in axial locomotion. Mini-DNC Workshop, 2025.12.10-12, 沖縄
- (セミナー)
- [29] 松永光幸, 植食性・湿地性ショウジョウバエの行動適応, 2025.7.12, 三重
- [30] T. Date: Tonically active interneurons gate motor output in *Drosophila* larvae. Max Planck Florida Institute for Neuroscience, 2026.2.3, Jupiter, USA

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、2025年度に報告した主な研究成果の概要を説明する。

7.2.1 光褪色しない新規蛍光プローブ Evergreen の開発

蛍光顕微鏡法では、蛍光色素あるいは蛍光タンパク質で標識された対象物のみが光るため、一分子レベルの検出や追跡が可能であり、さらに超解像イメージングも実現できる。しかし、蛍光は励起状態から低い確率で項間交差により三重項状態に入り、周囲の酸素などと反応して蛍光を発しなくなる(光褪色)。このため、同じ分子を長時間観察し続けることは困難であった。

私たちはこれまで、PREX710などの蛍光色素([1])や超耐光性緑色蛍光タンパク質 StayGold([2])の開発と応用を進め、既存の蛍光プローブより10~100倍以上の光褪色耐性を実現してきた。しかし、これらの蛍光プローブ分子もいずれは光褪色する。

そこで私たちは、大阪大学菊地研究室との共同研究により、全く新しいアプローチでこの問題の根本的な解決に取り組んだ([10])。わんこそばのように、光褪色した蛍光色素が解離し、フレッシュな蛍光色素分子が次々に結合して供給され続ければ、標識全体としては光褪色しないであろう、というアイデアである。このアイデアの実現には、標的タンパク質に融合する受容体(タグ)と、このタグに結合したときにだけ蛍光を発する蛍光色素(fluorogenic色素)の組合せが必要であり、かつ、光褪色する前に蛍光色素がタグから解離し、空のタグには次の蛍光色素が速やかに結合するという、高速かつ可逆的な結合解離のキネティクスが要求される。

一般に、タンパク質と小分子の結合において、高親和性の場合は解離が遅く、低親和性の場合は結合が遅い。結合も解離も速いという組合せは稀である。そこで私たちは、嗅上皮において匂い物質を嗅覚受容体に届ける輸送体である odorant binding protein (OBP) に注目した。OBPは、極めて低濃度の匂い物質と速やかに結合し、嗅覚受容体付近で速やかに放出するという生理機能を持つと想定されており、結合と解離の双方が速い可能性が示唆された。そこで、OBPをタグとして用い、その疎水性結合ポケットに結合したときにだけ蛍光を発する fluorogenic 色素を設計し、この組合せを Evergreen と名付けた。実際に Evergreen の結合解離キネティクスを計測し、上述の条件を定量的に満たすことを確認した。その結果、24時間以上にわたって連続的に同一分子を観察し続けることができることを実証した(図7.2.1)。従来の蛍光プローブでは高々数十秒程度に限られていた一分子追跡が、原理的に無制限に行えるようになったことで、これまでアクセスできなかった遅い分子過程や稀な事象の観察が可能になると期待される。

7.2.2 細胞質粘弾性プローブ GEM2.0 の開発

生きた細胞の細胞質は、タンパク質をはじめとする生体分子が高濃度に存在する超混雑環境である。このような環境の粘弾性は、細胞内の生化学反応や

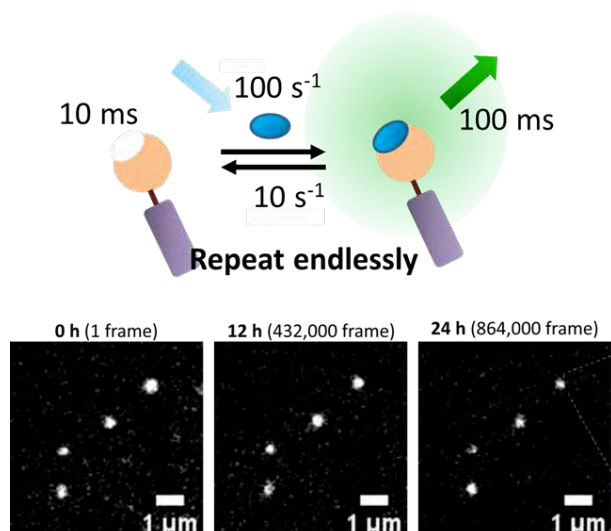


図 7.2.1: Evergreen による光褪色フリーの一分子追跡の原理と実験例 ([10])

分子輸送に大きな影響を及ぼすが、生きた細胞内で定量的に計測することは容易ではない。近年、遺伝子にコードされた多量体タンパク質ナノ粒子プローブ GEM (Genetically Encoded Multimeric nanoparticles) が、細胞質の物理的性質を計測するためのプローブとして注目されている。GEM は、細菌や古細菌に由来するエンカプスリンタンパク質を足場として、蛍光タンパク質と融合させたモノマーが自己組織化により直径数十 nm の正二十面体ナノ粒子を形成する系であり、そのブラウン運動を追跡することで、メソスケールでの細胞質の粘弾性を計測することができる (図 7.2.2)。

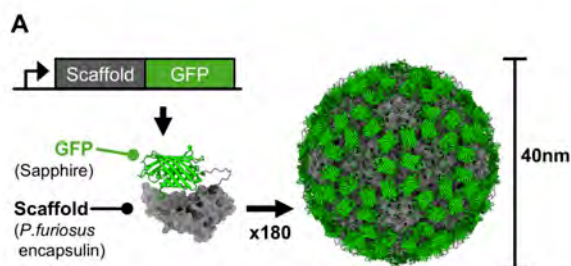


図 7.2.2: GEM の基本構造

しかし、従来の GEM にはいくつかの課題があった。従来活用されていた直径 40 nm の GEM では、完全なナノ粒子に組み上がらないモノマーや少数ユニットの不完全体がバックグラウンドノイズの原因となり、このバックグラウンドの問題のために使用可能な蛍光タンパク質が Sapphire に限られ、色違いの GEM を作ることができなかった。また、より小さ

い 20 nm の GEM も報告されていたが、暗くて実用的ではなく、異なるサイズでの計測も困難であった。

本年度は、廣兼らが、これらの課題を解決した改良版 GEM2.0 を開発した。足場タンパク質と蛍光タンパク質の組合せを系統的に検討することで不完全体によるバックグラウンドの問題を解決し (図 7.2.3)、mTurquoise2 から mIRFP に至るシアン・緑・黄・赤・近赤外の多色展開を実現した。さらに、直径 50 nm と 25 nm の 2 種類の GEM2.0 の構築にも成功した。細胞質は生体高分子が密に存在する複雑流体であるため、その粘弾性はプローブのサイズに依存する。異なるサイズの GEM2.0 を同一細胞内で同時に追跡することにより、スケール依存的な粘弾性の計測が可能となった (図 7.2.4)。

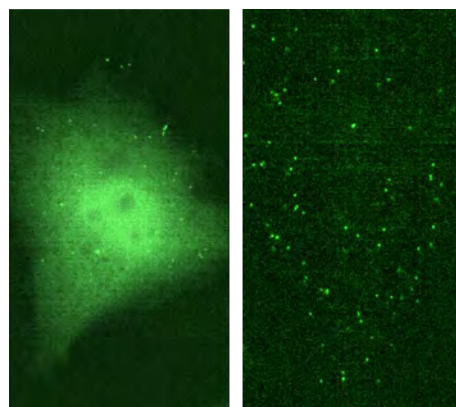


図 7.2.3: GEM 改良前後の比較。不完全体による高いバックグラウンドの問題が改良型では大幅に軽減された

7.2.3 分子モーターの非平衡エネルギー散逸の計測

分子モーターは、ATP の化学エネルギーを力学的な仕事に変換するタンパク質であるが、このエネルギー変換過程では不可逆的なエントロピー生成を伴う。分子モーターのエネルギー変換効率を定量的に議論するためには、一分子レベルでエネルギー散逸を計測する必要がある。原田・佐々等式は、非平衡定常状態におけるエネルギー散逸率が揺動散逸定理 (FDT) の破れから定量できることを示した関係式であり、光ピンセットを用いたキネシンの一分子計測に適用されてきた。しかし、将来的に生きた細胞内での計測に展開するためには、既存の手法に代わるアプローチが求められる。

福澤は、光ピンセットに代わる計測手法として電磁ピンセットを開発した ([7])。光ピンセットでは、力の校正が屈折率に依存するため、屈折率が不均一な細胞内での計測には原理的な困難がある。一方、磁気透磁率は生体内でほぼ一定であるため、電磁ピン

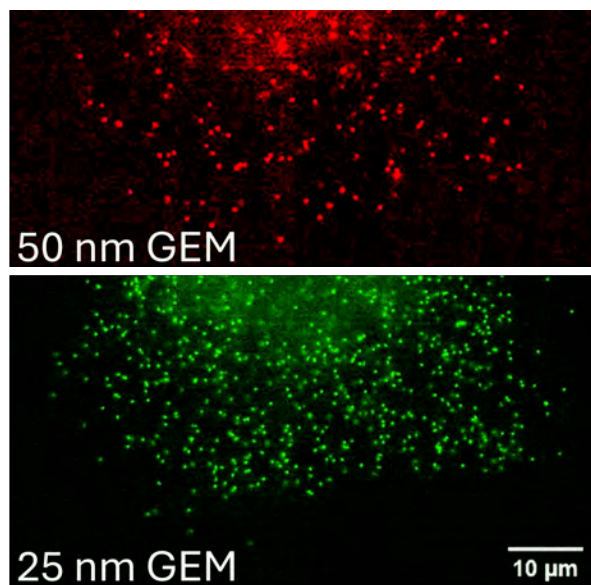


図 7.2.4: 異なるサイズの GEM2.0 による同時計測

セットでは *in vitro* での力校正をそのまま細胞内に適用することが可能である。福澤は、水平磁場配置により微小管軸方向への力印加を実現し、原田・佐々等式を用いてキネシンのエネルギー変換効率が約 20% であるという光ピンセットによる先行結果を再現し、系の妥当性を確認した。さらに、FDT の破れが ATP 濃度に依存してミカエリス-メンテン速度論に従うことを実証し、化学反応サイクルとエネルギー散逸の関係性を明らかにした (図 7.2.5)。

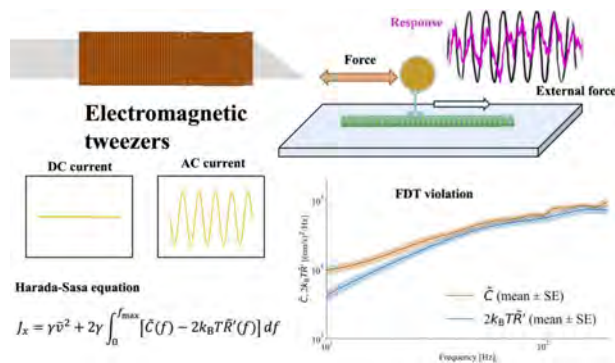


図 7.2.5: 電磁ピンセットによる原田佐々熱の計測 ([7])

一方、井原は、摂動を加えることなく軌跡データのみからエントロピー生成率を推定するアプローチに取り組んだ ([12])。本学伊藤研・沙川研において、熱力学的不確定性関係 (TUR) を短時間極限で適用すると、最適なカレントを選ぶことでランジュバン力学のエントロピー生成率を正確に推定できること

が理論的に示されている (Otsubo S, Ito S, Dechant A, Sagawa T. *Phys. Rev. E* **101**, 062106, 2020)。井原は、この枠組みを F1-ATPase の回転軌跡データに適用し、機械学習により最適カレントを探索することで、エントロピー生成率を定量的に推定することに成功した。

いずれの研究も、将来的には生きた細胞内での分子モーターのエネルギー散逸計測を見据えたものである。細胞内でも適用可能な摂動手法の開発 (福澤) と、摂動を一切必要としない推定手法の開発 (井原) という、相補的な 2 つのアプローチにより、非平衡統計力学の枠組みを生きた細胞の分子計測に適用するための基盤が整いつつある。

7.2.4 膜タンパク質の機能動態解析

膜タンパク質は、物質輸送やシグナル伝達など細胞の多様な機能を担う重要な分子群である。近年、クライオ電子顕微鏡をはじめとする構造解析技術の進展により、膜タンパク質の静的な構造に関する知見は飛躍的に蓄積されている。しかし、生きた細胞内での膜タンパク質の機能動態の観察は立ち遅れており、構造から機能への橋渡しにはイメージングによる動態解析が不可欠である。本年度は、RNA 干渉 (2006 年ノーベル生理学・医学賞) の全身性伝播を担う SID-1 と、膜張力を感知するメカノチャネル Piezo1 (2021 年ノーベル生理学・医学賞) という、いずれもノーベル賞の受賞対象となるほど重要でありながら機能動態が未解明であった 2 つの膜タンパク質について、蛍光一分子イメージングを駆使した解析を行った。

SID-1 は、線虫 *C. elegans* における全身性 RNA 干渉に必要な膜貫通タンパク質であり、二本鎖 RNA (dsRNA) の細胞内取り込みを担う。SID-1 は従来、dsRNA を直接透過させるチャネルとして機能すると考えられてきた。しかし、本学濡木研によるクライオ電子顕微鏡構造解析の結果、SID-1 の apo 状態および dsRNA 結合状態のいずれにもチャネル様のポアは見出されず、チャネル説に否定的な結果が得られた。私たちは一分子ライブセルイメージングによる動態解析を行い、SID-1 二量体が dsRNA の結合を核として多量体へと集積し、膜を変形させることでエンドサイトーシスを惹起して dsRNA を細胞内に取り込むという、全く新しいメカニズムを明らかにした (図 7.2.6)。

また、向井は、膜張力を感知するメカノチャネル Piezo1 の機能動態の可視化に取り組んだ ([13])。Piezo1 は膜張力に応じて構造が変形しチャネルが開くというモデルが提唱されているが、生きた細胞内でこの構造変化を直接観察する手段はなかった。Piezo1 はホモ三量体であるため、遺伝子にコードされた蛍光タンパク質を用いた通常の FRET センサーの設計は困難である。向井は、非天然アミノ酸の部位特異的導入により小さな蛍光色素を Piezo1 の特定部位に導入し、ホモ三量体の 3 サブユニットに同一色素が入ることを利用してホモ FRET を検出するという戦略を考案した。膜張力を精密に制御しながらイメージン

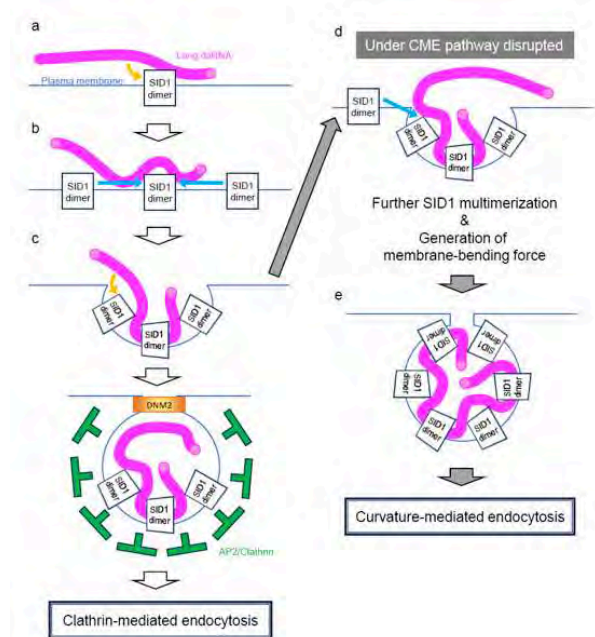


図 7.2.6: SID1 による dsRNA 取込の分子機構

グを行う評価系を構築し、膜張力に依存した Piezo1 の構造変化をホモ FRET の蛍光異方性変化として検出することに成功した。膜タンパク質にはホモ多量体を形成するものが多く、本手法は他の膜タンパク質の構造変化の可視化にも広く応用可能であると期待される。

<報文>

(原著論文)

2024 年度までの論文のうち引用したもの

- [1] Grzybowski M, *et al.*, A Highly Photostable Near-Infrared Labeling Agent Based on a Phosphorodamine for Long-Term and Deep Imaging. *Angew. Chem. Int.* **57**, 10137-10141 (2018).
- [2] Hirano M, *et al.*, A highly photostable and bright green fluorescent protein. *Nat. Biotechnol.* **40**, 1132-1142 (2022).

2025 年度に発表した論文

- [3] Kubo S, Okada Y. The ATPase asymmetry: Novel computational insight into coupling diverse FO motors with tripartite F1. *Biophys J.* **124**, 891-900 (2025).
- [4] Katoh TA, *et al.*, BMP4 regulates asymmetric Pkd2 distribution in mouse nodal immotile cilia and ciliary mechanosensing required for left-right determination. *Dev Dyn.* (2025).
- [5] Sano FK, *et al.*, Insights into G-protein coupling preference from cryo-EM structures of Gq-bound PTH1R. *Nat. Chem. Biol.* (2025).

- [6] Chen Y, *et al.*, Circumferential actomyosin bundles anchored by CCM1 drive endothelial cell contraction and vessel constriction. *Nat. Commun.* (2025).
- [7] Fukuzawa H, *et al.*, Development of electromagnetic tweezers for single-molecule energetics of kinesin. *Biophys. Physicobiol.* (2025).
- [8] Hasegawa K, *et al.*, Age-related decline in nuclear envelope LINC complex drives neuronal aging via axon initial segment dysfunction. *EMBO Rep.* (2025, accepted).

2025 年度に発表したプレプリント

- [9] Kambara T, *et al.*, Enhanced axonal transport in large vertebrates: KIF5A adaptations in giraffes and pythons. *bioRxiv.* 2025.05.04.652084 (2025).
- [10] Awazu T, *et al.*, Kinetic design of reversible probe exchange enables continuous single-molecule tracking beyond the photobleaching limit. *bioRxiv.* 10.64898/2026.03.13.711506 (2026).

(国内雑誌)

- [11] 岡田康志. 超解像顕微鏡は細胞分子動画の夢を見るか. 実験医学 (増刊) Vol. 43 No. 7 「細胞を創る・操る・観る〜構成的生物学の最前線」. 羊土社 (2025).

(学位論文)

- [12] 井原悠雅, 深層学習を用いた F1-ATPase のエントロピー生成推定 (博士論文)
- [13] 向井智哉, Piezo1 の構造変化を評価するバイオセンサーの開発 (博士論文)
- [14] Kondratiev AY, 自己教師ありトランスフォーマーによる連続細胞周期予測 (博士論文)
- [15] 福澤治幸, 磁気ピンセットを用いた分子モーターの非平衡エネルギー散逸の計測 (博士論文)
- [16] 原口結衣, 透明魚ダニオネラセブレラムのライブイメージングに向けたライトシート顕微鏡および蛍光標識技術の開発 (修士論文)
- [17] 宮廻寛人, 一次繊毛の運動とカルシウム動態の時空間解析のための深層学習パイプラインの開発 (修士論文)
- [18] Lee YL, デザイナー RNA 結合タンパク質を用いたマウス海馬ニューロンにおけるストレス顆粒成分の mRNA-タンパク質共局在の探索 (修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [19] Okada Y. Engineering Protein-Based Probes for Quantitative Live Cell Imaging. Protein Science and Engineering in the New Era, Taiwan, 2025 年 4 月 29 日
- [20] Okada Y. Elucidating Physical Aspects of Living Cells through Advanced Microscopy Development. Seminar at IAMS, Academia Sinica, Taiwan, 2025 年 5 月 2 日

- [21] Okada Y. Elucidating Physical Aspects of Living Cells through Advanced Microscopy Development. The 69th NIBB Conference, Okazaki, 2025 年 11 月 7 日
- [22] Okada Y. Elucidating Physical Aspects of Living Cells through Advanced Microscopy Development. The 4th Annual MGH Wellman/U Tokyo Graduate Students Symposium 2025, Boston, 2025 年 11 月 11 日
- [23] Okada Y. Engineering Protein-Based Probes for Quantitative Live Cell Imaging. Pacificchem 2025, Honolulu, 2025 年 12 月 17 日
- [24] Okada Y. Elucidating Physical Aspects of Living Cytoplasm through Imaging. Physics of the Cytoplasm: Linking Biophysics to Biological Function, Aspen Center for Physics, 2026 年 3 月 27 日
- [25] Iwasaki K, Iwaki M, Okada Y. Gear change to go through: Cooperation of two different kinesins enables fast and efficient axonal transport. SMB Les Houches 2026, 2026 年 2 月

(国内会議)

招待講演

- [26] 岡田康志、犬塚悠剛. 超解像蛍光顕微鏡法の限界を超える：計算位相顕微鏡法の新展開. 第 81 回日本顕微鏡学会, 福岡国際会議場, 2025 年 6 月 10 日
- [27] 岡田康志. 細胞質の凝縮系アクティブマター物理学 (を目指して). FSQP-iTHEMS 第 1 回量子生命ワークショップ, 理研東京連絡事務所, 2025 年 10 月 15 日
- [28] 岡田康志. 細胞内混雑環境と軸索輸送速度のパラドックス. 定量生物学の会福井キャラバン 2025, 福井大学, 2025 年 11 月 23 日
- [29] 岡田康志. What Makes Cells Alive? Exploring Physical Properties through Live Cell Imaging. 第 48 回日本分子生物学会年会, パシフィコ横浜, 2025 年 12 月

(アウトリーチその他)

- [30] 岡田康志. 技術開発現場からの問題提起「技術で勝っても、普及で負けている」構造的課題. JAIMA 会議, 2025 年 6 月 16 日
- [31] 岡田康志. 神様はサイコロで生き物を作った！？. 量子科学誕生 100 年記念シンポジウム, JP タワー, 2025 年 7 月 12 日
- [32] 岡田康志. 4 次元イメージング. 第 36 回細胞生物学ワークショップ, 大阪大学+オンライン, 2025 年 8 月 8 日
- [33] 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. BDR サマースクール 2025, BDR オーディトリウム, 2025 年 8 月 21 日
- [34] 岡田康志. 超すごい顕微鏡で”生命力”を探る. Liamics 研究会, グラングリーン大阪, 2025 年 9 月 27 日
- [35] 岡田康志. 超解像技術と蛍光寿命を用いた最新バイオイメージングの実用例と展望. 大阪大学生命機能研究科主催オンラインセミナー, 2026 年 2 月 9 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 変動環境下における代謝ネットワークの Bow-tie 構造による恒常性維持

生物の代謝ネットワークは、多様な外部栄養素を少数の共通中間代謝物（アミノ酸やピルビン酸など）に一度分解し、そこから再び生存に必要な多様な生体分子を合成するという「Bow-tie（蝶ネクタイ）型」の階層構造を持つことが知られている。これまで、こうした構造の意義はシグナル伝達系などの情報処理ネットワークの観点から議論されてきたが、質量保存則という厳密な物理的制約を受ける代謝システムにおいて、なぜ Bow-tie 構造が普遍的に創発するのかは明らかではなかった。

本研究では、質量保存則を厳密に満たす抽象的な人工化学反応モデルと代謝流束均衡解析 (Flux Balance Analysis; FBA) を用い、多様なネットワークトポロジーを網羅的に生成・評価した。特定の静的な環境（栄養供給と生体分子の需要が一定）のもとで増殖速度を最大化する最小反応ネットワークを抽出したところ、静的環境下では必ずしも Bow-tie 構造が有利ではなく、共通のモノマー群を経由せずに直接的に物質を変換する非 Bow-tie 型のネットワークが同等以上の増殖速度を達成できることが示された。

しかし、栄養供給や生体分子の需要バランスがランダムに変動する環境下でネットワークの頑強性を評価した結果、非 Bow-tie 型は環境変動に伴って経路上の不要な副産物を蓄積し増殖速度が著しく低下するのに対し、Bow-tie 型は高い増殖速度を維持できることが明らかとなった。これは、共通のモノマー群からなる中間層が機能的なバッファーとして働き、内部の反応流束を再分配するだけで任意の入力から出力への変換に柔軟に対応できるためである。本成果は、生命が環境の不確実性に対してどのように代謝の恒常性を維持し、普遍的なネットワーク構造を獲得してきたかという問いに合理的な設計原理を提示するものである。

7.3.2 細胞分化を引き起こす制御ネットワーク構造の定量解析

多細胞生物における細胞分化は、同一ゲノムを持つ細胞が異なる遺伝子発現状態を獲得し、異なる細胞タイプへと分岐していく現象である。この過程は遺伝子制御ネットワークによって駆動されると考えられているが、多数の遺伝子が関与する複雑なネットワークにおいて、どのような構造が分化を可能にするかは十分に明らかではない。そこで本研究では、遺伝子発現ダイナミクスと細胞間相互作用を含む力学系モデルを用いて多数の遺伝子制御ネットワークをシミュレーションし、さらにグラフニューラルネットワーク (GNN) を用いて、分化を引き起こすネットワークの共通構造を解析した。

5 遺伝子・10 本の制御経路からなるネットワークを対象に、分化する場合と分化しない場合を多数比較したところ、制御エッジの符号を一つ変えるだけでも挙動が大きく変わり、分化の可否が微細なネットワーク構造に強く依存することが示された。そこで、分化するネットワークと分化しないネットワークをそれぞれ約 5000 例ずつ用いて GNN に分類を学習させた結果、85% 以上の高い精度で予測が可能であった。さらに GNN 内部表現を解析したところ、分化するネットワークには、正のフィードバックと負のフィードバックが連結し、かつ拡散する遺伝子を含む特徴的な構造が共通して多く見られることが分かった。この Dual Feedback モチーフは、細胞分化を生じさせる一般化された構造条件を与える可能性がある。以上の結果は、力学系解析と機械学習を統合することで、複雑な遺伝子制御ネットワークにおける細胞分化の一般原理を抽出できることを示している。

7.3.3 再構成型無細胞タンパク質合成系における翻訳因子の非単調な応答とメカニズムの解明

細胞内や再構成型無細胞タンパク質合成系 (PURE system) などの複雑な生化学反応ネットワークにおいては、特定の因子の濃度を増加させても目的物の生産量が単調に増加せず、ある濃度を境に低下するという非直感的な挙動がしばしば観察される。本研究では、ペプチド鎖の伸長に不可欠な翻訳因子である EF-Tu の初期濃度とタンパク質合成量の間に見られる非単調な依存性に着目し、詳細な数理モデル (ePURE モデル) を用いてそのメカニズムの解明と実験的な検証を行った。

実験データに見られる合成ダイナミクスを定量的に再現するため、数百の構成要素と反応からなる ePURE モデルの反応速度定数を、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて最適化した。得られたパラメータを用いてシミュレーション内の各分子種の動態を解析した結果、EF-Tu が過剰に存在すると、開始 tRNA が本来の開始反応ではなく、非生産的な複合体に捕捉されてしまうことが示唆された。すなわち、この翻

訳抑制は EF-Tu による直接的な機能阻害ではなく、限られた分子リソース (開始 tRNA) を巡る反応ネットワーク上の競合によって引き起こされていることが明らかとなった。

さらに、この数理モデルからの予測に基づき、開始 tRNA およびそのホルミル化を担う酵素 (MTF) の初期濃度を実験的に増加させたところ、EF-Tu に対する非単調な依存性が消失し、タンパク質の生産量が大幅に向上することが確認された。本成果は、複雑な生化学ネットワークに潜む非直感的な入出力関係の律速要因を、構成論的な数理モデルによって紐解くことが可能であることを示しており、無細胞システムの合理的な設計や最適化に向けた強力なアプローチとなる。

7.3.4 炭素源多様性が細菌種間相互作用に与える影響

細菌群集における種間相互作用は、共存や群集安定性を左右する重要な要因である。しかし、環境中の資源組成、特に炭素源の多様性が相互作用の性質をどのように変えるかについては、十分には分かっていなかった。本研究では、以前に報告した資源競合に基づく相互作用の構造化の解析を発展させ、炭素源多様性が相互作用様式をどのように規定するかを定量的に調べた。

8 種類の細菌からなる 28 組の二者共培養系を用い、16 種の単一炭素源条件と、それらを組み合わせた混合炭素源条件を含む計 32 環境で、896 通りの相互作用を高スループットに測定した。その結果、炭素源の種類によって相互作用の傾向が大きく変化することが分かった。例えば、ラフィノースのような複雑な炭化経路を必要とする炭素源では相利的相互作用が多く、スクシネートでは競争的相互作用が増加した。一方、代謝流束解析からは、炭化経路の複雑さだけではこの違いを十分説明できないことも示された。

さらに、相互作用を競争・相利といった離散的分類ではなく、2 次元平面上の角度指標 θ により連続量として評価した。その結果、炭素源種類数と θ の間に明確な負の相関 (Spearman $\rho = -0.41$) が見出され、炭素源が多様になるほど相互作用が競争的になることが定量的に示された。また、系統ごとの固有傾向は弱く、相互作用の性質は主として環境条件によって決まることが分かった。

加えて、混合炭素源環境では、単独培養時の増殖量が単一炭素源条件の平均を上回る例が高頻度で観測された。これは、資源多様性が競争を強めるだけでなく、代謝的相補性や制約緩和を通じて増殖を促進していることを示している。これらの結果は、微生物群集の構造を、種の性質だけでなく環境中の資源組成から予測・制御できる可能性を示すものである (Ono, Tsuru, Furusawa, ISME J., 2025)。

7.3.5 IS 活性化による細菌ゲノム構造進化の加速機構

挿入配列 (insertion sequence, IS) は細菌ゲノムに広く存在する可動遺伝因子 (トランスポゾン) であり、反復的な挿入・欠失・逆位などの構造変異を通じてゲノム構造の長期的進化を駆動する主要因として考えられている。しかし、自然界で観測される IS 活性化・蓄積のプロセスは、進化速度が遅く、中間段階を含む詳細な分子過程を実験的に捉えることが困難であった。そこで我々は、高活性型の IS を組み込んだ大腸菌を作成し、実験室で長期間継代培養させることにより、IS の蓄積とそれに伴うゲノム構造の大規模進化を直接観察できる実験系を開発してきた (2023 年度年次報告「トランスポゾンの蓄積に伴う細菌のゲノム構造進化の直接観察」)。この実験系から、これまでに、多数の変異イベント (902 箇所の新規 IS 挿入イベント、54 件の逆位、363 件の欠失、40 件の重複) が検出されている。本年度は、各変異イベントをより詳細に解析した。

ゲノム規模での解析により、IS 挿入は全体としてランダムに近いが、複雑挿入 (deletion を伴う挿入) は「既存 IS 近傍」へ局在化する “local hopping” が顕著であることも示された。これは、単純挿入ではみられない特異的挙動であり、既存の IS が局所的な不安定領域を形成することで、局所的に構造変異が濃縮するホットスポット化現象が生じることを意味する。このことは、遺伝子欠損変異が、ゲノム上で均一でなく、IS 近傍の遺伝子ほど機能を失いやすいというバイアスの存在を示唆している。

さらに、詳細な解析から、実験開始時に組み込んだ IS だけでなく、複数の IS が連携してゲノム上を飛び回る、いわゆる複合トランスポゾンの自発的形成と、その活発な転移が多数検出された。具体例としては、二つの高活性 IS の間に挟まれた遺伝子領域 (例: pqqL-yddB など) が 10 kb 超の複合トランスポゾンとして 20 回植え継ぎサイクルの間に 4 箇所へ転移したことが確認された。このような大規模な遺伝子モジュールの高速移動は、自然界では抗生物質耐性遺伝子や毒性因子の拡散に関わるが、実験室で短期間に生成・追跡できたのは本研究が初めてである。

このように、本研究は IS 活性化に基づくゲノム構造進化の初期過程を短期間で再現し、その中で生じる IS 駆動の大規模な構造進化ダイナミクスを詳細に記述した点で、IS の進化的役割の理解を大きく前進させた (Kanai, Shibai, Yokoi, Tsuru, and Furusawa, *Nucleic Acids Res.*, 2025)。今後は、得られた IS 依存ゲノム動態をもとに、宿主依存進化・ゲノム縮小・耐性獲得など自然界の多様な進化現象における IS の役割を数量的に評価し、IS 活性そのものを制御対象とした新しい進化工学・微生物設計へ応用可能な基盤を構築する予定である。

7.3.6 プラスミドの宿主域を規定する生存戦略と薬剤耐性遺伝子拡散の解析

細菌は、染色体とは別にプラスミドと呼ばれる環状 DNA を持つことがあり、これが細胞間を移動することで薬剤耐性遺伝子などを広げる。特に、接合伝達性プラスミドは自ら他の細菌へ移る能力を持ち、薬剤耐性拡散の主要な担い手となる。一方で、あるプラスミドは多様な細菌種へ広がれるのに対し、別のプラスミドは限られた宿主にしか広がれず、この違いを生む原理はよく分かっていなかった。そこで本研究では、腸内細菌目由来する接合伝達性プラスミドの配列データを網羅的に解析し、宿主域の違いと、その背後にある生存戦略を調べた。

その結果、広い宿主域を持つプラスミドは、hns という遺伝子を持ち、自身の遺伝子発現を抑えて宿主細胞への負担を小さくする傾向があることが分かった。これに対し、狭い宿主域のプラスミドは、psiB など宿主側のストレス応答や防御機構を妨げる遺伝子を持つ傾向があった。前者は宿主に目立たずに入り込む「ステルス戦略」、後者は宿主機構を積極的に操作する「操作戦略」と解釈できる。宿主を直接狙う戦略は相手を選ぶため適用範囲が狭く、逆に自分自身の発現を抑える戦略は宿主に依存しにくいいため、広い宿主域につながると考えられる。

さらに、世界的に広がっている 48 種の薬剤耐性遺伝子について過去の検出記録を解析した結果、薬剤耐性遺伝子はまずステルス戦略型のプラスミドに取り込まれ、その後他の型のプラスミドへ広がっていく傾向が見出された。研究チームはこれを「ステルス・ファースト」モデルと呼んでいる。この結果は、薬剤耐性遺伝子の拡散がどの段階にあるかを見積もる手がかりを与えるだけでなく、初期拡散を担うプラスミドを狙って拡散を抑える新しい戦略につながる可能性がある。

<受賞>

- [1] 津留三良、日本進化学会研究奨励賞、日本進化学会、2025 年 6 月
- [2] 姫岡優介、第 21 回日本生物物理学会若手奨励賞、日本生物物理学会、2025 年 9 月
- [3] 沖貴裕、日本物理学会学生優秀発表賞、日本物理学会、2025 年 10 月
- [4] 姫岡優介、第 20 回日本物理学会若手奨励賞、日本物理学会、2025 年 10 月
- [5] 姫岡優介、ナイスステップな研究者 2025、科学技術・学術政策研究所、2025 年 12 月
- [6] 今野直輝、井上研究奨励賞、井上科学振興財団、2026 年 3 月
- [7] 今野直輝、日本ゲノム微生物学会若手賞、日本ゲノム微生物学会、2026 年 3 月
- [8] 金井雄樹、日本ゲノム微生物学会若手賞、日本ゲノム微生物学会、2026 年 3 月

<報文>

(原著論文)

- [9] T. Seike, N. Sakata, H. Kotani, C. Furusawa, Context-dependent activation and evolutionary buffering of a mating pheromone in fission yeast. *Commun. Biol.*, in press.
- [10] R. Ono, N. Konno, Y. Nishimura, C. Furusawa, Host range and antibiotic resistance dissemination are shaped by distinct survival strategies of conjugative plasmids. *Nucleic Acids Res.* **54**, gkaf1479 (2026).
- [11] S. Ichii, T. S. Hatakeyama, K. Kaneko, Enzyme as Maxwell's Demon: Steady-State Deviation from Chemical Equilibrium by Enhanced Enzyme Diffusion. *Phys. Rev. Lett.* **136**(3), 038401 (2026).
- [12] A. Hishida, Y. Himeoka, C. Furusawa, Analysis of metabolic stability under environmental perturbations using a kinetic model. *Biophys. Physicobiol.* **23**, e230001 (2026).
- [13] K. Fujiwara, W. Aoki, C. Furusawa, A. Hasegawa, G. Hayashi, D. Kiga, K. Mikami, S. Takada, Y. Shimizu, Mirror life at the crossroads: Report on the symposia in Japan for discussion toward mirror life synthesis. *Biophys. Physicobiol.* **23**, e230008 (2026).
- [14] N. Konno, K. Miyake, S. Nishino, K. Omae, H. Yanagisawa, S. Tsuru, Y. Nishimura, M. Kikkawa, C. Furusawa, W. Iwasaki, Repeatability of protein structural evolution following convergent gene fusions. *Nature Commun.* **16**, 8278 (2025).
- [15] C. Furusawa, Rethinking life through digital evolution. *Nature Rev. Genet.* **26**, 740–740 (2025).
- [16] Y. Kanai, A. Shibai, N. Yokoi, S. Tsuru, C. Furusawa, Laboratory evolution of the bacterial genome structure through insertion sequence activation. *Nucleic Acids Res.* **53**, gkaf331 (2025).
- [17] H. Ono, S. Tsuru, C. Furusawa, Carbon source diversity shapes bacterial interspecies interactions. *ISME J.* **19**, wrf224 (2025).
- [18] S. Tsuru, C. Furusawa, Congruence between noise and plasticity in protein expression. *Sci. Rep.* **15**, 24529 (2025).
- [19] R. Kamiura, S. Sato, S. Wang, Y. Takanashi, R. Nishiwaki, A. Shibai, C. Furusawa, Complete genome sequence of a bacterial strain, *Kurthia intestinigallinarum*. *Microbiol. Resour. Announc.* **14**, e00008-25 (2025).
- [20] A. Shibai, M. Izutsu, H. Kotani, C. Furusawa, Quantitative analysis of relationship between mutation rate and speed of adaptation under antibiotic exposure in *Escherichia coli*. *PLoS Genet.* **21**, e1011627 (2025).
- [21] Y. Himeoka, C. Furusawa, Perturbation-response analysis of in silico metabolic dynamics in nonlinear regime: Hard-coded responsiveness in the co-factors and network sparsity. *eLife* **13**, RP98800 (2025).
- (国内雑誌)
- [22] 前田智也, 古澤力, 適応の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* **63**(3), 114–122 (2025).
- [23] 津留三良, 古澤力, 進化に伴う突然変異の影響を受けやすい遺伝子, *現代化学* **652**, 8–9 (2025).
- (学位論文)
- [24] Shunsuke Ichii, Emergence of Macroscopic Nonequilibrium States from Enhanced Enzyme Diffusion (博士論文)
- [25] Keita Saito, Integrative Analysis of Evolutionary Constraints and Hierarchically Structured Variability (博士論文)
- [26] 笹森貫佑, 多細胞生物における発生過程と再生過程の力学系モデル (修士論文)
- [27] 伊與田裕大, ありうる代謝ネットワークの理論的探索 (修士論文)
- [28] 新美倫太郎, 微生物生態系における資源利用戦略の理論的研究 (修士論文)
- [29] 今村宙, 抗生物質への順応に伴う感受性変化の非対称性 (修士論文)
- (著書)
- [30] H. Takagi, C. Furusawa, S. Sawai, K. Kaneko, Theoretical Biology of the Cell: A Dynamical-Systems Perspective, Cambridge University Press (2025).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [31] Y. Himeoka, A theoretical approach to dissecting life from non-life, HELIOS 2025 Linking Earth's Past to the Habitability of Planets, Miyagi, 2025 年 6 月.
- [32] T. Maeda, K. Tanabe, A. Shibai, H. Kotani, C. Furusawa, Exploring common and unique mechanisms of antimicrobial resistance across diverse bacterial species, FEMS MICRO 2025, Milan, Italy, 2025 年 7 月.
- [33] K. Sasamori, Y. Himeoka, C. Furusawa, A Dynamical Systems Model of Regenerative Capacity and Cellular Interactions, Unifying Theories in High-Dimensional Biophysics, Bangalore, India, 2025 年 7 月.
- [34] J. F. Yamagishi, Microeconomics of Cellular Metabolism, Microbial Communities: Energetics and Dynamics Across Space and Time, Chicago, USA, 2025 年 10 月.
- [35] R. Niimi, C. Furusawa, Y. Himeoka, opulation dynamics of specialist/generalist under the feast-famine cycle, Microbial Communities: Energetics and Dynamics Across Space and Time, Chicago, USA, 2025 年 10 月.

- [36] Y. Himeoka, Computational Analysis of Metabolic Stability and Dynamics, International Conference on Bottom-up Biotechnology for Understanding and Engineering Living Systems 2025, Okinawa, 2025 年 11 月.
- [37] Y. Iyoda, C. Furusawa, Y. Himeoka, Bowtie - Structured Metabolic Networks Maintain Homeostasis under Fluctuating Environments, 2nd Workshop on Biological Control Systems, Online, 2025 年 11 月.
- [38] A. Shibai, C. Furusawa, Automation strategies for microbial adaptive evolution experiments: from benchtop devices to integrated robotic systems, SLAS2026, Boston, US, 2026 年 2 月.
- 招待講演
- [39] C. Furusawa, Exploring the universality of symbiosis: constructive and quantitative approaches to symbiotic evolution, Wolbachia Conference 2025, Okinawa, Japan, 2025 年 4 月.
- [40] Y. Himeoka, Understanding the boundary of life and death, Japan Geoscience Union Meeting 2025, Chiba, 2025 年 5 月.
- [41] Y. Himeoka, Towards a theory of transitions between life and non-life: cell death and the hardness of assembling complex chemical reaction systems, iCeMS International Symposium “Self-Assembly Science for Unlocking Life’s Secrets”, Kyoto, 2025 年 10 月.
- [42] C. Furusawa, Analysis of evolutionary constraints using bacterial experimental evolution, East Asia Joint Seminars on Statistical Physics, Seoul, Korea, 2025 年 10 月.
- [43] C. Furusawa, Toward the Prediction and Control of Evolution: Low-Dimensional Dynamics and Steering of Bacterial Phenotypes, 2nd Workshop on Biological Control Systems, Online, 2025 年 11 月.
- [44] Y. Himeoka, A theoretical basis for cell deaths, International Symposium of Life-Nonlife Transition “Boundaries Between Life and Nonlife”, Tokyo, 2026 年 3 月.
- [45] J. F. Yamagishi, Microeconomic Principles of Cellular Metabolism and Growth, International Symposium of Life-Nonlife Transition, International Symposium of Life-Nonlife Transition “Boundaries Between Life and Nonlife”, Tokyo, 2026 年 3 月.
- (国内会議)
- 一般講演
- [46] 姫岡優介, 細胞死の理論と休止状態, 第二回 多細胞休止を研究する会, 名古屋, 2025 年 7 月.
- [47] 小野大樹, 津留三良, 古澤力, 炭素源が細菌の種間相互作用と種多様性に及ぼす影響, 2025 年度 微生物研究会, 東京, 2025 年 8 月.
- [48] 金井雄樹, 芝井厚, 横井直美, 市橋伯一, 津留三良, 古澤力, トランスポゾンによるバクテリアのゲノム進化の高速化, 2025 年度 微生物研究会, 東京, 2025 年 8 月.
- [49] 芝井厚, 古澤力, Uncovering an evolutionary barrier through steering the evolution of multidrug resistance in *E. coli*, 日本進化学会第 27 回大会, 滋賀, 2025 年 8 月.
- [50] 津留三良, 古澤力, 発現量に変化しやすい遺伝子の特徴, 日本進化学会第 27 回大会, 滋賀, 2025 年 8 月.
- [51] 山本真理, 武方宏樹, 阪田奈津枝, 小谷葉月, 古澤力, 清家泰介, 沖縄産植物から単離された *Metschnikowia* 属新種酵母の全ゲノム解析, 酵母遺伝学フォーラム第 58 回研究報告会, 千葉, 2025 年 9 月.
- [52] 汪亜運, 二河成男, 金井雄樹, 古賀隆一, 津留三良, 古澤力, 深津武馬, 挿入配列の増幅によって駆動されるゲノム再編成に伴う大腸菌の共生細菌化: 進化実験による検証, 日本微生物生態学会第 38 回東京大会, 東京, 2025 年 9 月.
- [53] 金井雄樹, 芝井厚, 横井直美, 市橋伯一, 津留三良, 古澤力, トランスポゾンの活性化による細菌ゲノム進化の実験室進化, 日本遺伝学会第 97 回大会, 神戸, 2025 年 9 月.
- [54] 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の持ちうる代謝系の探索, 「細胞を創る」研究会 18.0, 東京, 2025 年 9 月.
- [55] 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 2, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島, 2025 年 9 月.
- [56] 姫岡優介, 堀口修平, 白石直人, Fanzhou Xiao, 小林徹也, 細胞死の理論と代謝システムの万能可制御性定理, 日本物理学会第 80 回年会, 広島, 2025 年 9 月.
- [57] 沖貴裕, 姫岡優介, 古澤力, 細胞分化を引き起こす制御ネットワークの定量解析: 力学系シミュレーションとグラフニューラルネットワークの統合的アプローチ, 日本物理学会第 80 回年会, 広島, 2025 年 9 月.
- [58] 笹森貫佑, 姫岡優介, 古澤力, 発生における細胞分化不可逆性の力学系解析, 日本物理学会第 80 回年会, 広島, 2025 年 9 月.
- [59] 新美倫太郎, 古澤力, 姫岡優介, 変動環境下における栄養利用戦略の集団動態, 日本物理学会第 80 回年会, 広島, 2025 年 9 月.
- [60] 姫岡優介, Theoretical Basis for Cell Deaths, 第 63 回日本生物物理学会年会, 奈良, 2025 年 9 月.
- [61] 笹森貫佑, 姫岡優介, 古澤力, Dynamical Systems Modeling of Dedifferentiation, 第 63 回日本生物物理学会年会, 奈良, 2025 年 9 月.
- [62] 伊與田裕大, 古澤力, 姫岡優介, 変動環境下での代謝恒常性を支える Bowtie 型代謝ネットワーク, 第 63 回日本生物物理学会年会, 奈良, 2025 年 9 月.
- [63] Jumpei F. Yamagishi, Tetsuhiro S. Hatakeyama, Thermodynamic Constraint on the Coupling of Currency Metabolites, 第 63 回日本生物物理学会年会, 奈良, 2025 年 9 月.

- [64] 芝井厚, 上浦六十, 佐藤駿平, 柿澤茂行, 古澤力, Quantifying Evolutionary Landscapes and the Growth–Death Trade-off in Microbial Experimental Evolution, 第 63 回日本生物物理学会年会, 奈良, 2025 年 9 月.
- [65] 菱田温規, 姫岡優介, 古澤力, Analysis of Cellular Responses to Cold Stress Using a Metabolic Kinetics Model, 第 63 回日本生物物理学会年会, 奈良, 2025 年 9 月.
- [66] 北條拓也, 古澤力, 分裂酵母 *Schizosaccharomyces pombe* の非対称な交配相手認識精度の進化的形成を調べる, 研究会「理論と実験」, 広島, 2025 年 10 月.
- [67] 新美倫太郎, 古澤力, 姫岡優介, 変動環境下における栄養利用戦略の集団動態, 第 3 回理論進化生態フォーラム, 神奈川, 2025 年 11 月.
- [68] 北條拓也, 古澤力, 分裂酵母 *Schizosaccharomyces pombe* の非対称な交配相手認識精度の進化的形成を調べる, 第 3 回理論進化生態フォーラム, 神奈川, 2025 年 11 月.
- [69] 北條拓也, 古澤力, 分裂酵母 *Schizosaccharomyces pombe* の非対称な交配相手認識精度の進化的形成を調べる, 定量生物学の会 福井キャラバン 2025, 福井, 2025 年 11 月.
- [70] 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, 2025 年度 日本農芸化学会北海道支部 第 2 回学術講演会, 札幌, 2025 年 11 月.
- [71] 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の実験室進化, 第 48 回日本分子生物学会, 横浜, 2025 年 12 月.
- [72] 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 48 回日本分子生物学会, 横浜, 2025 年 12 月.
- [73] 今村宙, 津留三良, 古澤力, ある抗生物質への順応が他の抗生物質に対する耐性に及ぼす影響, 第 48 回日本分子生物学会, 横浜, 2025 年 12 月.
- [74] 芝井厚, 細胞培養のテーラードな実験自動化ツールの開発, 第 3 回 AI ロボット駆動科学シンポジウム, 東京, 2025 年 12 月.
- [75] 芝井厚, ゼロから始められるし、ほどほどでやめていくくらいの自動化 ～大変なので～, Laboratory Automation 月例勉強会, 沖縄, 2026 年 1 月.
- [76] 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 2026 年度大会, 京都, 2026 年 3 月.
- [77] 前田智也, 古澤力, 多様な細菌に共通する抗生物質耐性機構と種特異的な適応戦略の解明, 日本農芸化学会 2026 年度大会, 京都, 2026 年 3 月.
- [78] 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 2026 年度大会, 京都, 2026 年 3 月.
- [79] 北條拓也, 古澤力, 分裂酵母 *Schizosaccharomyces pombe* の非対称な交配相手認識精度の進化的形成を調べる, 第 73 回日本生態学会大会, 京都, 2026 年 3 月.
- [80] 小野大樹, 津留三良, 古澤力, 合成細菌群集から探る種間相互作用の性質, 日本生態学会第 73 回全国大会, 京都, 2026 年 3 月.
- [81] Masaki Fujiyoshi, Chikara Furusawa, Trait-informed self-attention predicts microbial community compositions, EPIC Assembly 2026 Symposium, 東京, 2026 年 3 月.
- [82] Atsushi Shibai, Riku Kamiura, Shumpei Sato, Shigeyuki Kakizawa, Chikara Furusawa, Quantifying Evolutionary Landscapes and the Growth–Death Trade-off in Microbial Experimental Evolution, EPIC Assembly 2026 Symposium, 東京, 2026 年 3 月.
- [83] Kansuke Sasamori, Yusuke Himeoka, Chikara Furusawa, A dynamical systems model of developmental and regenerative processes in multicellular organisms, EPIC Assembly 2026 Symposium, 東京, 2026 年 3 月.
- [84] 池田雄太郎, 金子邦彦, 畠山哲央, 進化の統計物理モデルにおける環境変動への応答, 日本物理学会 2026 年春季大会, オンライン, 2026 年 3 月.

招待講演

- [85] 古澤力, 化合物潜在空間の構築による薬剤耐性進化を抑制する手法の構築, 学術変革領域研究 (A)「潜在空間分子設計」第 3 回公開シンポジウム, 神奈川, 2025 年 5 月.
- [86] 姫岡優介, Theoretical Basis for Cell Deaths, 第 63 回日本生物物理学会年会 若手招待講演シンポジウム, 奈良, 2025 年 9 月.
- [87] Chikara Furusawa, Perspective on the Evolution of Mirror-Life Based on Microbial Experimental Evolution, 第 63 回日本生物物理学会年会シンポジウム, 奈良, 2025 年 9 月.
- [88] 姫岡優介, A theory of cell death and the rarity of stably functioning biochemical systems, 第 63 回日本生物物理学会年会 シンポジウム「人工細胞そして生命–非生命の境界」, 奈良, 2025 年 9 月.
- [89] 姫岡優介, 細胞死への数理的アプローチと生命–非生命の境界, 第 63 回日本生物物理学会年会 第 11 回会員総会シンポジウム「生命とは何か? 死とは何か?」, 奈良, 2025 年 9 月.
- [90] 山岸純平, 一細胞から微生物生態系までにおける代謝の理論へ向けて, 第 3 回理論進化生態フォーラム, 神奈川, 2025 年 11 月.
- [91] 古澤力, Toward the Prediction and Control of Evolution: Low-Dimensional Dynamics and Steering of Bacterial Phenotypes, 第 48 回日本分子生物学会, 横浜, 2025 年 12 月.
- [92] 古澤力, Toward Understanding Biological Systems as Complex Systems, iTHEMS-BDR Collaboration Workshop, 和光, 2026 年 1 月.
- [93] 古澤力, Analysis of Evolutionary Constraints Using High-Throughput Bacterial Experimental Evolution, 第 14 回宇宙における生命ワークショップ, 岡崎, 2026 年 2 月.

- [94] 姫岡優介, 堀口修平, 白石直人, Fangzhou Xiao, 小林徹也, 細胞死の理論, 第 13 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム オーガナイズドセッション「数理学が拓くシステム制御の新展開」, 富山, 2026 年 3 月.
- [95] 姫岡優介, 生命と非生命の差異の解明に向けた理論研究, 日本物理学会 2026 年春季大会 領域 11 若手奨励賞受賞記念講演, オンライン, 2026 年 3 月.
- [96] 山岸純平, 細胞内代謝のミクロ経済学, 第 13 回統計物理学懇談会, オンライン, 2026 年 3 月.

(セミナー)

- [97] C. Furusawa, Toward the Prediction and Control of Microbial Evolution: Analysis of High-throughput Experimental Evolution, The 2nd BDR-BLiSC Joint Meeting, 神戸, 2025 年 4 月.
- [98] 津留三良, 進化実験で読み解く表現型進化の方向性, デジタル進化生物セミナー, オンライン, 2025 年 5 月.
- [99] 姫岡優介, 細胞死の理論と自律性, 異分野融合研究セミナー iSeminar, オンライン, 2025 年 12 月.
- [100] 姫岡優介, 細胞死の理論と自律性, 数理学セミナー & HMMC セミナー, 札幌, 2026 年 2 月.
- [101] Y. Himeoka, Theoretical basis for cell deaths and autonomy, NanoLSI Open Seminar, 金沢, 2026 年 3 月.

(アウトリーチ)

- [102] 古澤力, 生物システムが持つ普遍性を探る: 理論と実験からのアプローチ, 理研-連携大学院集中レクチャー 生命科学研究プログラム 2025, 2025 年 8 月.
- [103] 姫岡優介, 細胞死の数理的アプローチ, お茶の水女子大学 情報科学科「理学総論」, 2026 年 1 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。細胞内現象から細胞集団、生物進化、非平衡物理学まで広範囲のテーマについて、理論・数値計算・データ解析・実験グループとの連携を通じて研究を推進している。2025 年度より、理化学研究所において主任研究員ラボとして新体制に移行し、東京大学との連携のもとで研究を継続・発展させている。

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

クロマチン構造のヒストンアセチル化による直接制御

細胞核内のクロマチン構造は遺伝子発現制御の鍵であるが、ヒストン修飾がこの構造に与える物理的影響の詳細は不明であった。遺伝子スケールの長鎖

人工クロマチン繊維を試験管内で再構成する実験系を構築し、ヒストンのアセチル化が構造の揺らぎを直接増大させ、クロマチンをよりオープンな状態に転換することを示した。さらに、このアセチル化パターンのみで、細胞内で観察されるような構造パターンが再現可能であることも明らかにし、エピジェネティック修飾が直接クロマチン高次構造を規定する物理的機構を提示した [3]。

ゲノム配列によるクロマチンコンパートメント構造の普遍的予測

ゲノムは細胞核内で転写活性に応じて A・B コンパートメントに空間分離されており、この 3 次元ゲノム構造は遺伝子発現制御に深く関与する。平田研究室 (理研 BDR) との共同研究において、5 界にわたる 247 種の生物種のゲノムと染色体接触マップを系統的に解析した。GC 含量や CpG 密度など従来注目されてきたゲノム特徴との比較を通じ、コーディング配列 (CDS) の密度分布が、微細なブレイドパターンから大まかなコンパートメント構造に至る様々なスケールのクロマチンコンパートメントを最も普遍的に予測することを示した。また、10 億年を超えて隔たった種間でも、シンテニー領域では CDS 密度プロファイルの保存性に対応してコンパートメント構造が保存されることを示した [10]。

気管軟骨リングの自己組織化パターン形成

気管は均一な間隔で並ぶ軟骨リングによって支持されているが、この規則的なパターンがいかにして発生過程で形成されるかは未解明であった。森本研究室 (理研) との共同研究において、細胞外マトリクスが誘導する集団細胞移動を基盤とした自己組織化モデルを提案した。数理モデルと生体実験を組み合わせることで、ECM の空間勾配に誘導された軟骨前駆細胞の集団移動が細胞を周期的に集積させ、均一間隔の軟骨リング形成を引き起こすことを示した [12]。

7.4.2 非平衡物理学と統計物理学

アクティブマターにおけるエルミートおよび非エルミートトポロジー

アクティブマター (自己推進粒子や生体モーター系など) は、エネルギーの持続的消費により平衡系には現れない非平衡現象を生む。本レビュー論文では、エルミート系のバンドトポロジー (トポロジカル絶縁体など) の概念を非平衡・非エルミート系であるアクティブマターへ拡張する近年の研究進展を包括的にまとめた。受動系では実現できないエキゾチックなトポロジカル現象がアクティブマターにおいて発見されており、さらに非線形系へのトポロジーの

拡張についても論じた。アクティブマターが、保存系・線形系の枠を超えたトポロジカル現象の探求の場となりうることを示している [2]。

対称的遊泳ストロークの流体力学的最適性

多くの生物において対称または交互の遊泳ストロークが広く見られるが、その物理的な起源は未解明であった。石本研究室との共同研究において、粘性流体中で変形する遊泳体のストロークを特定の対称性に縛られることなく理論解析した。その結果、「流体力学的双対性」とも呼べる性質を発見した：対称ストロークと反対称ストロークは動力学的に等価であり、かつ全ストローク中で速度・効率ともに最適であることを証明した。3次元の Stokes 流シミュレーションでも検証し、自然界における対称・交互ストロークの普遍性が発生学的制約だけでなく、粘性流体中の運動における物理的最適性原理を反映することを示した [9]。

7.4.3 合成生物学・人工細胞設計

合成細胞の設計と高次タンパク質機能の構築

最小限の分子部品から細胞様機能を持つ合成細胞を構築する研究は、生命の設計原理の解明と応用技術の発展において重要な意義を持つ。本年度は、国際的な共同体制で合成細胞研究を推進するアプローチとその展望をまとめたパースペクティブ論文 [4] と、合成細胞へのタンパク質設計・最適化戦略に関する総説論文 [5] を発表した。これらの論文では、合成細胞において高次機能を実現するためのタンパク質設計原理を論じるとともに、複数研究グループの連携による合成細胞の「共同構築」アプローチの重要性を示している。

<受賞>

- [1] InaRIS フェロー, 川口喬吾, 公益財団法人稲盛財団, 2026-03.

<報文>

(原著論文)

- [2] K. Sone, K. Yokomizo, K. Kawaguchi, and Y. Ashida, Reports on Progress in Physics 89, 016501 (2026).
- [3] Y. T. Fukai, T. Kujirai, M. Wakamori, S. Kanamura, L. Yamauchi, S. Zeraati, *et al.*, and K. Kawaguchi, Science Advances 11, adx9282 (2025).
- [4] S. Giaveri, Z. Abil, S. Kohyama, *et al.*, Nature Communications (2025).
- [5] B. Frohn, S. Kohyama, P. Schwill, *et al.*, Nature Reviews Bioengineering (2025).

- [6] T. Kanazawa and K. Ishimoto, Physical Review Fluids 10 (2025).

- [7] Y. Lim, S. Lee, and J. Jo, Physical Review E (2025).

(国内雑誌)

- [8] 光山隼史, 「海外だより ～ミュンヘン, MPIB での研究～」, 生物物理 65(2), 118–119 (2025).

(その他報文)

- [9] T. Kanazawa, K. Ishimoto, and K. Kawaguchi, “Hydrodynamic origins of symmetric swimming strategies”, arXiv:2603.08444, (2026).
- [10] R. T. Cerbus, K. Kawaguchi, and I. Hiratani, “Coding sequence clustering universally predicts fine- and coarse-scale chromatin compartment landscapes”, bioRxiv:2026.02.26.708372, (2026).
- [11] K. Tomuro, T. Akaiwa, A. Harada, K. Kobayashi, N. Shiina, K. Kawaguchi, Y. Shichino, and S. Iwasaki, “Sequence grammar and dynamics of subcellular translation revealed by APEX-Ribo-Seq”, bioRxiv:2025.05.26.656194, (2025).
- [12] S. Nakayama, M. Mori, K. Kishimoto, K. Adachi, *et al.*, “Tracheal Cartilage Self-Organization through ECM-Guided Collective Migration”, SSRN:5688136, (2025).
- [13] K. Adachi, “Bubble formation in active binary mixture model”, arXiv:2505.08637, (2025).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [14] K. Kawaguchi, “Symmetry and topology in tissues and body plans”, The 2nd ASPIRE Retreat, 2026-01.
- [15] K. Kawaguchi, “The grammar of genome folding: Patterned modifications and the tree of life”, International Symposium: Genome Architecture and Function, 2025-11.
- [16] K. Kawaguchi, “Physics and molecular grammar of biological heteropolymers”, SMART Symposium (China), 2025-10.
- [17] K. Kawaguchi, “Biophysics: theory and experiment”, HFSP Science Summit Japan 2025, 2025-10.
- [18] K. Kawaguchi, “Structure and dynamics of reconstituted chromatin with defined histone modification patterns”, 第 63 回日本生物物理学会年会, 2025-09.
- [19] K. Kawaguchi, “Active matter physics in multicellular dynamics and quantum models”, Korean Physical Society Spring Meeting, 2025-04.

7.5 杉田研究室

全ての生物は細胞という基本単位を持っており、その内部にはタンパク質や核酸、脂質分子など多様な生体分子が高濃度で存在している。杉田研究室では、計算物理学を用いて生体分子の構造ダイナミクスと機能の関係を解明し、さらに、細胞内分子混雑環境における生体分子間の相互作用を予測することで、細胞機能が発現するための分子機構を深く理解することを目指している。そのためには既存の手法やソフトウェアを使うだけでは不十分であり、新しい計算手法と分子モデルの開発、さらに最先端の計算機に最適化された分子動力学シミュレーションを開発する。また、分子動力学シミュレーションと機械学習やベイズ統計など情報科学を融合した新しいアプローチの開拓もますます重要になってきた。我々が開発してきた分子動力学ソフトウェア GENESIS (<https://mdgenesis.org>) をプラットフォームとして、新規性の高い手法を開発し、それらを含む GENESIS の最新バージョンをフリーソフトウェアとして広く公開する。我々の研究室は理論・計算科学研究のみを行うが、国内外の多くの実験グループと密接に協力することで、細胞内分子混雑環境における生命現象を原子・分子レベルの解像度で理解する。

7.5.1 計算手法と分子モデルの開発

QM/MM 混合モデルを用いた自由エネルギー計算

GENESIS の分子動力学 (MD) プログラムである SPDYN に、電子状態計算プログラム QSimulate-QM と連携する量子力学/分子力学 (QM/MM) 計算用の新しいモジュールを追加した。QM/MM シミュレーションにおける周期境界条件 (PBC) は、実空間での QM 計算 (MM 電荷を複製したもの) のおよび QM と MM 電荷を用いた Particle Mesh Ewald (PME) 法を用いて計算される。QSimulate-QM には、特に DFT Tight-Binding (DFTB) 法向けに高度に最適化されたコードが実装されており、QM 領域と MM 領域間の相互作用は多極展開を用いて計算される。SPDYN の高度に並列化されたアルゴリズムと組み合わせることで、このモジュールは、QM 領域で約 100 原子、MM 領域で約 10 万原子という規模の分子系に関する DFTB に基づく MD シミュレーションを実行した場合、1 台のコンピュータノードで 1 日あたり 1ns を超える計算を実現した。これによって、GENESIS に導入された REMD、REUS、REST などの拡張アンサンブル法や、String method を用いたパスサンプリング計算などを QM/MM モデルに対しても計算可能とした。

長時間刻みを用いた NPT アンサンブルの構築

Leimkuhler と Matthews (J. Chem. Phys. 138, 174102) の手法に基づき、Langevin Dynamics 法における温度と圧力を評価するための高精度な手法を

提案した。彼らの手法は、他の Langevin Dynamics 法に比べて構造空間を正確に探索する。しかし、運動量空間における不正確さのために、圧力評価において問題が生じていた。特に、Full-time step での運動量を用いて温度を計算する際には、Time step の二乗 (Δt^2) に比例する誤差が生じた。このため、等温・等圧条件下で大きな時間ステップを採用した場合、信頼性の低い結果となっていた。圧力評価において Half-time step における運動量を用いて運動エネルギーを計算することで、この数値誤差を低減できることがわかった。我々は、改良した圧力評価法を用いて分子動力学 (MD) シミュレーションを実施し、長い時間ステップ ($\Delta t = 5$ fs) を用いても、等温・等圧 MD シミュレーションにおける精度と安定性を向上させた。

7.5.2 情報科学と計算物理学の融合

拡散モデルを用いた Backmapping

粗視化 (CG) モデルを用いた分子動力学シミュレーションは、計算コストを低減しつつ、生体分子などの複雑な分子系における構造変化のダイナミクスを高速に計算する。我々が用いている典型的な CG モデルは、アミノ酸を 1CG 粒子で近似しており、原子モデルと比較して大幅な粒子数の削減を実現している。CG モデルを用いた分子動力学シミュレーションから得られた構造から原子レベルの詳細を復元すること、すなわち Backmapping は、タンパク質や複雑な生体超分子複合体において重要な技術的課題である。最近の機械学習手法は原子レベルの詳細を再構築する上で有望視されているが、その大半は小規模な単純な系を対象としていた。特に、従来の Backmapping 法は、立体化学を保持できない、高エネルギー構造を生成してしまう、あるいは大規模な最小化計算を必要とするといった問題を抱えていた。我々は、機械学習モデルの一つである拡散モデルを用いて、CG モデルから全原子構造を再構築する Backmapping Framework 「CGBack」を提案した。CGBack は Backmapping と Refinement の手順から構成され、小規模から大規模に至る多様なタンパク質分子系の原子座標を正確に復元できる。CGBack を、タンパク質のみならず核酸、脂質など異なる生体分子に拡張していくことで、細胞内分子混雑環境の効率的なマルチスケールシミュレーションを実現する。

継続学習による効率的な ML 力場の学習

機械学習 (ML) 力場を用いたシミュレーションは高精度かつ計算効率に優れることから、計算コストの高い電子状態理論の効率的な代替手段として台頭してきた。しかし、汎用的な力場を構築する際に広大な構造空間および化学空間を探索する必要があり、その際の高い計算コストは依然として大きな課題となっている。学習データセットはこの空間の限られた領域しかカバーしておらず、その結果、外挿性能

が低下してしまう。従来の手法では、新旧のデータセットを用いてモデルをゼロから学習させることでこの問題に対処しており、高い計算コストが必要であった。外部環境ポテンシャルのない孤立系向けに設計された既存の ML 力場は、酵素反応などの複雑な凝縮系への転移性が限られていた。静電相互作用演算子のテイラー展開に基づく我々の ML/MM モデルは、いくつかの単純な溶媒中における化学反応の間で高い転移性を示した。我々はさらにこの戦略を酵素反応へと拡張し、より複雑な不均一環境間の転移性を探求した。メモリデータセットに基づく継続的学習戦略を適用し、絶え間なく流入する新規データに対する自律的かつ On-the-fly 学習を可能にした。これら 2 つの手法を組み合わせることで、様々な環境における化学反応に適用可能な力場を効率的に構築できた。

7.5.3 生体分子の構造・ダイナミクス・機能

回転する分子モーターの分子機構

F1-ATPase は、ATP 合成酵素複合体の一部を構成する回転型分子モーターである。好熱性 *Bacillus* PS3 由来の F1-ATPase は、ATP 加水分解に伴い、80° と 40° の 2 つのサブステップからなる 120° の回転を行う。我々は、全原子分子動力学 (MD) シミュレーションをスーパーコンピュータ「富岳」を用いて大規模に実行し、80° のサブステップにおける回転メカニズムを解析した。遷移経路サンプリングおよび自由エネルギー解析の結果、この回転は固定子の歪みと、回転子内部に作用する押し出し力によって駆動されることが示唆された。この「歪み・押し出し」メカニズムは、F1-ATPase における化学エネルギーから機械的エネルギーへの変換に関する理解を深め、原子レベルで機械的な力がどのように生成されるかについて詳細な知見を提供した。

7.5.4 細胞内環境における分子間相互作用

幹細胞における転写因子の不均一な凝集体

液液相分離によって形成される生体分子凝集体は、細胞内、特に核において普遍的に見られる。1~2 種類の生体分子を含む凝集体については比較的良好に説明されているが、より多様な生体分子成分を含み、内部で生体分子間の相互作用が生じている凝集体については、その実態がほとんど解明されていない。我々、各アミノ酸を 1 粒子として分子した粗視化分子動力学シミュレーションを用いて、哺乳類の胚性幹細胞における 4 つの主要な転写因子 (Oct4, Sox2, Klf4, および Nanog) を含む不均一なタンパク質凝集体を調べた。この混合系の分子動力学シミュレーションの結果、極めて不均一かつ動的な挙動が示された。タンパク質凝集体には主に Sox2, Klf4, および Nanog が含まれており、一方、Oct4 の大部分は希薄相に溶解している。凝集体は緩やかに相互作用す

るクラスターを形成しており、その中で Klf4 が最も豊富に存在することから、Klf4 が凝集体の足場として機能し、Sox2 および Nanog が凝集体を安定化させるために Klf4 に結合していることが示唆された。Oct4 は凝集体へ適度に取り込まれており、主に Sox2 との相互作用を介してクライアントとして機能していた。本研究は、不均一な生体分子成分からなる凝縮体の形成において、異なる転写因子間の分子間相互作用が重要であることを明らかにした。

<受賞>

- [1] 新津藍、杉田有治、袖岡幹子、Jung Jaewoon、2025 年度「理研栄峰賞」、理化学研究所、2026 年 3 月 9 日

<報文>

(原著論文)

- [2] M. Brosz, J. Buck, F. Grunewald, D. Monego, J. Jung, Y. Sugita, C. Aponte-Santamaria, F. Graeter, "Coarse-grained Martini 3 model for collagen fibrils", *Biophys. J.* **123**, 456789 (2025).
- [3] D. Ugarte La Torre, Y. Sugita, "CGBack: Diffusion Model for Backmapping Large-Scale and Complex Coarse-Grained Molecular Systems", *J. Chem. Inf. Model.* **65**, 9974-9986 (2025).
- [4] D. Matsuoka, Y. Sugita, T. Mori, "An Empirical Biasing Force Constant to Minimize Overfitting in Cryo-EM Flexible Fitting Refinement", *J. Chem. Inf. Model.* **65**, 9790-9799 (2025).
- [5] M. Motohashi, M. Oide, C. Kobayashi, J. Jung, E. Muneyuki, Y. Sugita, "The distortion-push mechanism for the γ subunit rotation in F1-ATPase", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **122**, e2502642122 (2025).
- [6] D. Monego, M. Brosz, J. Buck, V. Viliuga, P. Greicius, J. Jung, T. Stuehn, M. Schmies, Y. Sugita, F. Gräter, "ColBuilder: Flexible structure generation of crosslinked collagen fibrils", *Bioinformatics*, btaf278 (2025).
- [7] S. Gopi, G. B. Brandani, C. Tan, J. Jung, C. Gu, A. Mizutani, H. Ochiai, Y. Sugita, S. Takada, "In silico nanoscope to study the interplay of genome organization and transcription regulation", *Nucleic Acids Res.* **53**, gkaf189 (2025).
- [8] A. Mizutani, C. Tan, Y. Sugita, S. Takada, "Heterogeneous condensates of transcription factors in embryonic stem cells: Molecular simulations", *Biophys. J.* **124**, 1587-1598 (2025).
- [9] K. Yagi, K. Gunst, T. Shiozaki, Y. Sugita, "High-performance QM/MM Enhanced Sampling Molecular Dynamics Simulations with GENESIS SP-DYN and QSimulate-QM", *J. Chem. Theory Comput.* **21**, 4016-4029 (2025).
- [10] R. E. Amaro et al., "The need to implement FAIR principles in biomolecular simulations", *Nat. Methods* **22**, 641-645 (2025).

- [11] A. Niitsu, A. R. Thomson, A. J. Scott, J. T. Sengel, J. Jung, K. R. Mahendran, M. Sodeoka, H. Bayley, Y. Sugita, D. N. Woolfson, M. I. Wallace, "Rational Design Principles for De Novo α -Helical Peptide Barrels with Dynamic Conductive Channels", *J. Am. Chem. Soc.* **147**, 11741–11753 (2025).
- [12] J. Jung, Y. Sugita, "Langevin integration for isothermal–isobaric condition with a large time step", *J. Chem. Phys.* **162**, 104108 (2025).
- [13] Y.-K. Lei, K. Yagi, Y. Sugita, "Efficient Training of Neural Network Potentials for Chemical and Enzymatic Reactions by Continual Learning", *J. Chem. Theory Comput.* **21**, 2695–2711 (2025).
- (総説論文)
- [14] S. Ito, C. Kobayashi, K. Yagi, Y. Sugita, "Toward understanding whole enzymatic reaction cycles using multi-scale molecular simulations", *Curr. Opin. Struct. Biol.* **95**, 103153 (2025).
- [15] Y. Sugita, R. Woods, "Editorial overview: Toward cellular-scale modeling: Bigger and disordered", *Curr. Opin. Struct. Biol.* **93**, 103121 (2025).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [16] Y. Sugita, "How are enzyme reactions activated in cellular crowding environments?", *Pacificchem Symposium on Biomolecules at Interfaces Defining the Cellular Environment: From Conformational Dynamics to Informatic Approaches*, Hawaii, USA, December 2025.
- [17] Y. Sugita, "Efficient dimensional reduction methods for the free-energy landscapes of protein dynamics", *Pacificchem Symposium on Emerging Frontiers: Machine Learning Transforming Studies of Biomolecular Dynamics*, Hawaii, USA, December 2025.
- [18] Y. Sugita, "Development of enhanced conformational sampling methods for free-energy calculations of membrane proteins", *Pacificchem Symposium on Crossing the Biological Membrane: Frontiers in the Study of Membrane Transport*, Hawaii, USA, December 2025.
- [19] Y. Sugita, "Multi-Scale Molecular Dynamics Simulations of Biomolecules and Materials", *MRM2025*, Yokohama, Japan, December 2025.
- [20] Y. Sugita, "The gamma subunit rotation in F1-ATPase with atomistic molecular dynamics simulations", *The 10th iHuman Forum*, Shanghai, China, October 2025.
- [21] Y. Sugita, "Multi-scale simulations of biomolecular condensate regulations", *SMART Symposium*, Shenzhen, China, October 2025.
- [22] Y. Sugita, "Integrated enhanced conformational sampling methods for biomolecular dynamics and functions", *CECAM Workshop: When Data Science Meets Molecular Dynamics*, Lausanne, Switzerland, October 2025.
- [23] Y. Sugita, "The Distortion-Push Mechanism for the γ subunit rotation in F1-ATPase", *Tenth Polish-Korean Conference on "Protein Folding: Theoretical and Experimental Approaches"*, Gdansk, Poland, September 2025.
- [24] Y. Sugita, "The rotation mechanisms of F1-ATPase using atomistic molecular dynamics simulations", *2025 Hong Kong Symposium on Molecular Modeling and Simulation*, Hong Kong, China, May 2025.
- [25] Y. Sugita, "How to regulate protein condensation with highly charged HERO proteins", *2025 GSRC Symposium*, Seoul, Korea, May 2025.
- (国内会議)
- 招待講演
- [26] 杉田有治, Jaewoon Jung, 新津藍「膜電位を考慮した分子動力学計算を利用した膜タンパク質の動的構造と分子設計」、第19回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム、甲南大学、2025年8月
- [27] 杉田有治、「富岳を用いた大規模計算によるF1-ATPaseの回転機構」、タンパク質シンポジウム、大阪大学、2026年1月

8 技術部門

(下澤、寺山、簀口、高田)

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

2025 年 1 月から 2025 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：341 枚、総製作個数 673 個
- 加工依頼依頼元別の加工時間数の割合：物理 33.6%、素粒子センター：28.9%、化学：14.9%、地殻化学：7.9%、地球惑星：6.3%、フォトンサイエンス：4.6%、生物：3.7%、主な依頼者 (素粒子センター、物理：日下研、中辻研、小林研、地殻化学：小松)

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、高田)

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に関して、前年度から実施していたサーバーの移行作業と連携し、アクセス権限の修正やシステムからのメール配信の復旧を行った。また、SoS(理学部) アカウントの終了に伴い、海外出張報告に関するシステムの認証方法を修正した。

8.2.2 安全衛生 (寺山)

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。また専攻の安全衛生の担当者として、学生実験のガイダンスとして学部 3 年生への安全衛生教育を行ったほか、他大学から入学した大学院生や教職員を対象とした安全衛生講習会を開催した。

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。なお、昨年度から懸案であったタンクと建屋の修繕が困難となったため、今年度で液体窒素の供給を終了することが決定した。

8.2.4 IT 関連

簀口氏が産休・育休を取得したことに伴い、物理学専攻の IT 関連の通常業務はフューチャリズムワークスに委託された。

8.2.5 学生実験 (高田)

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) は対面及びオンラインのハイブリッドで開催した。

8.2.6 技術研修 (寺山、渡辺 (生物科学専攻))

理学系研究科技術部の技術研修として、ラズベリーパイ Pico を使った技術研修を行った。9 月 3 日、9 月 30 日、2 月 17 日の 3 日間、参加者 8 名で実習を実施した [1, 3]。また本年度を含む 3 年分の技術研修の取り組みに関して学内で口頭発表 [4] を行った。

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)

<学術講演>

(国内会議)

- [1] 渡辺綾子、寺山智春、綾部充、伊藤那津子、小高康熙、近藤莊平、川端美千代、高田秀一郎、森祐太郎
ラズベリーパイ Pico 技術研修 2025～活動内容と作品例の紹介～、第 37 回生物学技術研究会 (岡崎コンファレンスセンター、2026 年 2 月)。

- [2] 寺山智春 標準的な IC を用いた学生教育向けの ADC/DAC の実装、第 34 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、2026 年 3 月).
- [3] 渡辺綾子、寺山智春、綾部充、伊藤那津子、小高康熙、近藤荘平、川端美千代、高田秀一郎、森祐太郎 ラズベリーパイ Pico 集合型技術研修の作品紹介 2025、第 34 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、2026 年 3 月).
- [4] 寺山智春、渡辺綾子 はじめてのラズベリーパイ Pico ～理学部による技術研修の取り組み～、第 6 回東京大学技術発表会 (東京大学、2026 年 3 月).

II

Summary of group activities in 2025

1 Fukushima Group

Research Subjects: QCD phase diagram, Confinement, Lattice simulation, Neutron star, Chiral anomaly

Member: Kenji Fukushima, Yui Hayashi, Syo Kamata, and Arata Yamamoto

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. Definition of axial charges and anomaly in the Hamiltonian formulation of lattice gauge theory.
2. Nonlocal operators on the lattice for the Higgs-confinement phase transition.
3. Discovery of a new phase window at high temperature and low baryon density based on the large color number limit of QCD.
4. Analysis of the confined phase and the phase transition in QCD under imaginary rotation.
5. Photon polarization tensor at finite temperature and density in a magnetic field.
6. Novel formulation of relativistic spin hydrodynamics using the anti-symmetric form of the spin tensor and the derivation of the generalized Bargmann-Michel-Telegdi (BMT) equation.
7. Pseudo-gauge dependence of the energy density, pressure, and shear-force distributions inside the nucleon.
8. Reformulation of the in-in formalism incorporating vacuum instability in a constant electric field.
9. Exact-WKB analysis of two-level Floquet systems.

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 comparisons with cold atom experiments.

Highlights in research activities of this year include:

1. Quarkyonic matter from an insight based on ultracold atom physics
2. Simulating nuclear force in ultracold atoms
3. Tunneling transport at hadron-quark interface in massive neutron stars
4. Non-Hermitian renormalization group and quantum anomaly

5. Isospin symmetry breaking of nuclear interaction
6. Low-lying excited state of ^{229m}Th
7. Neural network construction of equation of state from relativistic *ab initio* calculations
8. Proton radioactivity in deformed nuclei with microscopic optical potential
9. Collective quantum tunneling with time-dependent generator coordinate method

3 High Energy Particle Theory Group

Research Subjects: Particle Physics and Cosmology

Member: Takeo Moroi, Koichi Hamaguchi, Yutaka Matsuo, Masahito Yamazaki

We are engaged in a broad range of research areas in particle physics and cosmology, including physics beyond the Standard Model, dark matter, baryogenesis, inflation, supersymmetric phenomenology, cosmology, astroparticle physics, neutrino physics, axions, quantum sensing, string theory, supersymmetric field theories, conformal field theories, generalized symmetries, and quantum gravity, among others. The specific topics studied during this academic year are summarized below:

1. Phenomenology
 - 1.1. Quantum-enhanced sensing and detection of dark matter [1, 2, 3]
 - 1.2. Non-thermal production of Higgsino dark matter [4]
 - 1.3. Topological aspects of the early universe [5]
 - 1.4. Quantum parton showers [6]
 - 1.5. Phenomenology of quantum gravity [7]
 - 1.6. Lepton flavor asymmetry [8]
 - 1.7. Sterile neutrino dark matter [9]
 - 1.8. Neutrinos from the Seyfert galaxy NGC 1068 and dark matter [10]
 - 1.9. Higgsino search with electroweak precision measurements [11, 12]
 - 1.10. Axion emission from neutron stars [13]
 - 1.11. Linear colliders [14]
 - 1.12. Inflation in grand unified theories [15]
 - 1.13. Leptogenesis [16, 17]
2. Superstring theory and formal aspects of quantum field theories
 - 2.1. Construction of two-dimensional conformal field theories [18, 19]
 - 2.2. Fracton quantum field theories [20]
 - 2.3. Anomaly and unitary operators [21]
 - 2.4. Quantum entanglement in strongly-interacting quantum field theories [22]
 - 2.5. Two-dimensional $\mathcal{N} = (0, 1)$ gauge theories [23]
 - 2.6. Four-dimensional Chern-Simons theory [24, 30]
 - 2.7. Quantum lattice models under non-invertible dualities [25, 26]
 - 2.8. BPS counting [27]
 - 2.9. Three-dimensional $\mathcal{N} = 4$ theories and vertex operator algebras [28]
 - 2.10. Ensemble averages in quantum gravity [29]

References

- [1] T. Sichanugrist, H. Fukuda, T. Moroi, K. Nakayama, S. Chigusa, N. Mizuochi, M. Hazumi and Y. Matsuzaki, “Entanglement-enhanced ac magnetometry in the presence of Markovian noise,” *Phys. Rev. A* **111**, no.4, 042605 (2025) [arXiv:2410.21699 [quant-ph]].
- [2] H. Fukuda, Y. Matsuzaki and T. Sichanugrist, “Directional Searching for Light Dark Matter with Quantum Sensors,” *Phys. Rev. Lett.* **135**, no.24, 241802 (2025) [arXiv:2506.19614 [hep-ph]].
- [3] S. Chen, H. Fukuda, Y. Iiyama, Y. Mino, T. Moroi, M. Nakahara, T. Nitta and T. Sichanugrist, “Background suppression in quantum sensing of dark matter via collective entangled-state projection,” *Phys. Rev. D* **113**, no.5, 055014 (2026) [arXiv:2510.01816 [hep-ph]].
- [4] H. Fukuda, Q. Li, T. Moroi and A. Niki, “Non-thermal production of Higgsino dark matter by late-decaying scalar fields,” *JHEP* **06**, 091 (2025) [arXiv:2410.15733 [hep-ph]].
- [5] H. Fukuda, Y. Hamada, K. Kamada, K. Mukaida and F. Uchida, “Magnetic helicity, magnetic monopoles, and Higgs winding,” *JHEP* **03**, 127 (2026) [arXiv:2509.25734 [hep-ph]].
- [6] M. Yamazaki, PoS **QCHSC24**, 260 (2025) [arXiv:2502.18059 [hep-ph]].
- [7] Y. Gouttenoire, S. F. King, R. Roshan, X. Wang, G. White and M. Yamazaki, *Phys. Rev. D* **112**, no.7, 7 (2025) [arXiv:2501.16414 [hep-ph]].
- [8] K. Akita, K. Hamaguchi and M. Ovchinnikov, “Affleck-Dine leptoflavorgenesis,” *JHEP* **12** 142 (2025) [arXiv:2509.08175 [hep-ph]].
- [9] K. Akita, K. Hamaguchi and M. Ovchinnikov, “Maximal Parameter Space of Sterile Neutrino Dark Matter with Lepton Asymmetries,” *Phys. Rev. Lett.* **136** 11, 111001 (2026) [arXiv:2507.20659 [hep-ph]].
- [10] K. Akita, A. Ibarra and R. Zimmermann, “Dark matter explanations for the neutrino emission from the Seyfert galaxy NGC 1068,” [arXiv:2507.16539 [hep-ph]].
- [11] N. Nagata and G. Osaki, “Electroweak precision data as a gateway to light higgsinos,” *JHEP* **07**, 242 (2025) [arXiv:2503.20602 [hep-ph]].
- [12] H. Baer, V. Barger, N. Nagata and D. Sengupta, “Reach of e^+e^- Higgs factory for light higgsinos via electroweak precision observables and comparison with other future facilities,” *Phys. Lett. B* **873**, 140203 (2026) [arXiv:2509.18288 [hep-ph]].
- [13] K. Hamaguchi, N. Nagata and J. Zheng, “Axion emission from proton Cooper pairs in neutron stars,” *JCAP* **06**, 038 (2025) [arXiv:2502.18931 [hep-ph]].
- [14] H. Abramowicz *et al.* [Linear Collider Vision], “A Linear Collider Vision for the Future of Particle Physics,” *Eur. Phys. J. ST* (2026) [arXiv:2503.19983 [hep-ex]].
- [15] J. Ellis, M. A. G. García, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, “Deformations of Starobinsky inflation in no-scale $SU(5)$ and $SO(10)$ GUTs,” *JCAP* **12**, 038 (2025) [arXiv:2508.13279 [hep-ph]].
- [16] G. Alessandro, K. Hamaguchi, M.E. Ramirez-Quezada, K. Shimada, J. Wada, and T. Yokoyama, “Insights on the scale of leptogenesis from neutrino masses and neutrinoless double-beta decay,” *Eur. Phys. J. C*, **85**, 778 (2025) [arXiv:2502.10093 [hep-ph]].
- [17] H. Takahashi and J. Wada, “Asymmetric Dark Matter from Low-Scale Spontaneous Leptogenesis,” [arXiv:2601.01849 [hep-ph]].
- [18] K. Kawabata and S. Yahagi, *SciPost Phys.* **18** (2025) no.5, 166.
- [19] K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda and S. Yahagi, *JHEP* **05** (2025), 105.
- [20] K. Ohmori and S. Shimamura, *JHEP* **09**, 049 (2025) [arXiv:2504.10835 [cond-mat.str-el]].
- [21] M. Okada, S. Shimamura, Y. Tachikawa and Y. Zhang, *JHEP* **11**, 122 (2025) [arXiv:2509.02989 [hep-th]].
- [22] M. Watanabe, *JHEP* **03** (2026), 237 doi:10.1007/JHEP03(2026)237 [arXiv:2506.10072 [hep-th]].
- [23] J. Bao, M. Yamazaki and D. Zhou, [arXiv:2508.06865 [hep-th]].
- [24] J. i. Sakamoto, R. Tateo and M. Yamazaki, *JHEP* **01**, 084 (2026) [arXiv:2509.12303 [hep-th]].
- [25] W. Cao, M. Yamazaki and L. Li, *Phys. Rev. Lett.* **136**, no.4, 040402 (2026) [arXiv:2502.20435 [cond-mat.str-el]].
- [26] W. Cao, Y. Miao and M. Yamazaki, *SciPost Phys. Core* **8**, 070 (2025) [arXiv:2501.12514 [cond-mat.str-el]].
- [27] J. Bao and M. Yamazaki, *SciPost Phys.* **18**, no.4, 143 (2025) [arXiv:2501.03365 [hep-th]].

- [28] I. Coman, M. Shim, M. Yamazaki and Y. Zhou, Commun. Math. Phys. **406**, no.6, 122 (2025) [arXiv:2312.13363 [hep-th]].
- [29] M. Ashwinkumar, A. Kidambi, J. M. Leedom and M. Yamazaki, Adv. Theor. Math. Phys. **29**, no.1, 1-55 (2025) [arXiv:2311.00699 [hep-th]].
- [30] M. Ashwinkumar, J. i. Sakamoto and M. Yamazaki, Adv. Theor. Math. Phys. **29**, 1509-1694 (2025) [arXiv:2309.14412 [hep-th]].

4 Nakamura Group

Research Subjects: Spectroscopic study of hypernuclei and related hadron/nuclear physics

Member: Satoshi N. Nakamura, Sho Nagao and Manami Fujita

The Nuclear EXperimental physics group (NEX) consists of two research groups: the Nakamura Group, led by Professor Nakamura and Assistant Professors Nagao and Fujita with two doctor course students and four master's course students, and the Suzuki Group, led by Associate Professor Suzuki and Assistant Professor Noritaka Kitamura. 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 strangeness nuclear physics 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
 - Study of kaonic nuclei
 - 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 and Noritaka Kitamura

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 FY2025 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 PCM2026 at the University of Aizu to discuss updates and perspectives on nuclear structure studies.
- Organizing the international workshop ADRIB26 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, Takumi Aoki, and Seisho Abe

Our group focuses on investigating the properties of neutrinos and utilizing them as probes in particle physics and astroparticle physics. We play leading roles in experiments using the Super-Kamiokande and Hyper-Kamiokande detectors, as well as the J-PARC accelerator.

T2K long-baseline neutrino oscillation experiment

We conduct research on neutrino oscillations through the T2K long-baseline neutrino experiment. In this experiment, intense neutrino and antineutrino beams produced at the J-PARC accelerator complex are detected by the Super-Kamiokande detector located 295 km away. Our primary goal is to identify a new source of CP 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 have continued data taking with the SuperFGD detector. We are leading its operation, calibration, and data analysis, aiming for 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, as well as the performance evaluation of photomultiplier tubes, development of calibration techniques, and studies of readout electronics.

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 Yorita Group

Research Subjects: High Energy Particle Physics and Astro-particle physics

Member: Kohei Yorita and Masato Kimura

Our group is engaged in high-energy accelerator experiments, in particular participating in international collaborations at the Large Hadron Collider (LHC) at CERN. Our primary research goals are the precise verification of the Standard Model and the search for new physics beyond it. At the LHC, we test the validity of the Standard Model through precision measurements of the Higgs boson and other heavy particles, while simultaneously pursuing searches for signals of unknown particles. In addition, we develop advanced data analysis techniques to improve event reconstruction and particle identification, as well as work on enhancing detector performance for future experiments. Furthermore, in connection with detector development and evaluation for cosmic dark matter searches, we conduct experimental studies using balloon-borne experiments and accelerator-based beam tests, aiming to validate detector performance under realistic conditions and to advance observational techniques. By adopting a complementary approach that integrates results from accelerator experiments with other observational and experimental methods, we aim to address fundamental open questions in particle physics.

- **High Energy Frontier Experiment**

Our group participates in the ATLAS experiment and carries out a comprehensive research program ranging from detector operation and performance evaluation to physics analyses, as well as development toward the High-Luminosity LHC (HL-LHC) upgrade. During Run 3, we achieved stable data taking and performed long-term operational studies of the tracking detectors, ensuring robust and reliable detector performance under high-luminosity conditions. We also improved sensitivity and updated limits in searches for new physics using combined Run 2 and Run 3 data. In physics analyses, we conduct precision measurements of the Higgs boson and other heavy particles, and actively search for new phenomena such as supersymmetry and other physics beyond the Standard Model. In parallel, we develop and apply advanced analysis techniques, including deep learning, to enhance event reconstruction and particle identification. We also contribute to the design, development, and mass production of next-generation tracking detectors (ITk) for the HL-LHC, playing a key role in ensuring improved performance in future high-rate environments.

- **Cosmic Dark Matter Search**

This research is based on liquid argon time projection chamber (LArTPC) technology and is being carried out as a Japan–U.S. collaboration to search for dark matter through observations of antimatter in cosmic rays. This approach is characterized by its ability to precisely measure energy loss and track information of particles in the low-energy region, providing excellent capability for antiparticle identification. In particular, antideuterons in cosmic rays are a promising probe for dark matter searches. While antiparticles produced through conventional cosmic-ray interactions (secondary production) rapidly decrease in flux at low energies, antideuterons produced via annihilation or decay of dark matter particles are predicted to exhibit a relatively enhanced flux in this region. Therefore, observations of low-energy antideuterons provide a clean search channel with high discrimination power against background. This research is being conducted in collaboration with the GRAMS experiment, a balloon-borne experiment, aiming for the world’s first high-sensitivity observation of low-energy antideuterons. This effort will enable exploration of previously inaccessible regions in cosmic-ray studies and is expected to provide new constraints on the properties of dark matter or important clues to its existence.

- **Detector R&D**

We conduct detector R&D spanning both fundamental technologies and their applications to particle physics experiments. This includes the development of superconducting detectors and quantum sensors for ultra-sensitive measurements, as well as advanced readout and reconstruction techniques. In addition, we explore technologies relevant to future facilities, including accelerator development for next-generation collider experiments including muon accelerations, aiming to bridge emerging sensor technologies with large-scale experimental systems.

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 applied a data-assimilation crystal structure search method – which uses powder diffraction experimental data to accelerate the search for crystal structures via simulation – to the structural investigation of the high-pressure phase of yttrium and the high-pressure phase of HCl–H₂ compounds. As a result, we discovered several previously unknown new structures.

To verify the hot superconductivity experimentally reported in lanthanum hydride (La-H) under high pressure, we investigated the high-pressure superconducting phases of the La-N-B-H system at 20 GPa, assuming that nitrogen (N) and boron (B) derived from the hydrogen source ammonium borane react with La-H. This investigation was conducted using evolutionary algorithms, machine learning potentials, and first-principles calculations. As a result, we identified the new compound LaBH₅ as a thermodynamically stable compound and predicted that it exhibits superconductivity at $T_c = 29.0\text{K}$.

We also investigated the superconducting properties of uniformly hole-doped perovskite-type hydride KMgH₃ using first-principles calculations, varying doping concentration and the lattice constant to account for pressures. To calculate the dynamic stability of the crystal lattice and the phonon frequencies, we employed the first-principles self-consistent phonon method developed in our laboratory. Furthermore, we employed superconducting density functional theory (SCDFT) to calculate the superconducting transition temperature, accounting for spin fluctuations that had previously been ignored. As a result, we discovered a significant spin fluctuation (SF) effect in hole-doped KMgH₃ that counteracts phonon-mediated pairing and lowers T_c . Similar calculations were performed on various hydrides, revealing that an abnormally strong SF effect is observed in hydrides where the hydrogen 1s band is isolated at the Fermi level. This highlights the importance of accounting for spin fluctuations in the search for superconducting hydrides.

We are also working on calculating the dielectric constants of liquids and polymers in the THz band. Using a machine learning model for chemical bond-based dipole moments developed previously, we performed first-principles calculations on the dielectric properties of liquid propylene glycol (PG) and liquid polypropylene glycol (PPG), demonstrating that the frequency and temperature dependencies of the dielectric function can be accurately calculated even at frequencies below the terahertz range. It was found that the model trained using data from propylene glycol dimers can also be applied to PPG with longer chains not included in the training data. This study represents a first step toward developing a general-purpose dipole model.

In addition, we have developed the DFT-1/2 method for predicting physical properties such as band gaps with minimal computational effort, and proposed a theoretical analytical method for spin dynamics in solids under circularly polarized light.

9 Todo Group

Research Subjects: Simulation algorithms for strongly-correlated systems; Novel states and critical phenomena in strongly correlated systems; Quantum computing and quantum algorithms; Machine learning and statistical mechanics

Members: Synge Todo, Hidemaro Suwa, Tsuyoshi Okubo

To understand complex many-body systems across matter, information, and computation, it is essential to reformulate the many-body Schrödinger equation and the partition functions of statistical mechanics into forms that are computationally tractable while preserving their essential features, such as quantum correlations, symmetries, and geometric structures. We address this challenge by combining tensor networks, Monte Carlo methods, variational principles, machine learning, and quantum algorithms to investigate the principles underlying states, phase transitions, dynamics, and information processing that are shared across a wide range of systems, including strongly correlated electron systems, lattice gauge theories, quantum spin systems, open quantum systems, and quantum devices. We advanced new computational methods based on tensor renormalization group techniques and unbiased sampling, foundational technologies for quantum computing, quantum error correction, and quantum tomography, as well as applications extending to materials science, mathematical finance, and machine learning. We are also developing open-source libraries for next-generation parallel computing.

- [1] T. Kobori, Y. Suzuki, Y. Ueno, T. Tanimoto, S. Todo, Y. Tokunaga, LSQCA: Resource-Efficient Load/Store Architecture for Limited-Scale Fault-Tolerant Quantum Computing, 2025 IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA) (2025).
- [2] K. Harada, T. Okubo, N. Kawashima, Tensor tree learns hidden relational structures in data to construct generative models, *Mach. Learn.: Sci. Technol.* **6**, 025002 (2025).
- [3] K. Murota, T. Kobori, Trainable Quantum Neural Network for Multiclass Image Classification with the Power of Pre-trained Tree Tensor Networks, 2025 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE) (2025).
- [4] S. Mukherjee, V. Suppakitpaisarn, Local Differential Privacy-Preserving Spectral Clustering for General Graphs, *Transactions on Machine Learning Research* (2025).
- [5] K. Kinjo, R. Sakurai, T. Kishimoto, J. Ohkubo, Permutation of Tensor-Train Cores for Computing Moments on Stochastic Differential Equations, *J. Phys. Soc. Jpn.* **94**, 084001 (2025).
- [6] K. Tamai, T. Okubo, T. V. T. Duy, N. Natori, S. Todo, Universal scaling laws of absorbing phase transitions in artificial deep neural networks, *Phys. Rev. Research* **7**, 033072 (15pp) (2025).
- [7] H. Oike, H. Suwa, Y. Takahashi, F. Kagawa, Thermally quenched metastable phase in the Ising model with competing interactions, *Phys. Rev. B* **112**, 064409 (2025).
- [8] K. Sakaue, H. Shinaoka, R. Sakurai, Adaptive sampling-based optimization of quantum tensor trains for noisy functions: Applications to quantum simulations, *SciPost Phys.* **19**, 038 (2025).
- [9] Y. Motoyama, *et al.*, TeNeS-v2: Enhancement for Real-Time and Finite Temperature Simulations of Quantum Many-Body Systems, *Comp. Phys. Commun.* **315**, 109692 (2025).
- [10] R. Kaneko and S. Goto, Seeding neural network quantum states with tensor network states, *Phys. Rev. B* **112**, 155163 (2025).
- [11] H. Kanno, S. Akiyama, K. Murakami, S. Takeda, Grassmann tensor renormalization group for the massive Schwinger model with a θ term using staggered fermions, *J. High Energ. Phys.* **2025**, 36 (2025).
- [12] T. Kobori, S. Todo, Bayesian inference of general noise-model parameters from the syndrome statistics of surface codes, *Phys. Rev. A* **112**, 052448 (14pp) (2025).
- [13] K. O. Akamatsu, K. Harada, T. Okubo, N. Kawashima, Plastic tensor networks for interpretable generative modeling, *Mach. Learn.: Sci. Technol.* **7**, 015014 (2026).
- [14] Y. Sunada, *et al.*, Efficient tomography of microwave photonic cluster states, *Phys. Rev. X Quantum* **7**, 010323 (2026).
- [15] Y. Sugimoto, S. Akiyama, Y. Kuramashi, Phase structure of (3+1)-dimensional dense two-color QCD at $T = 0$ in the strong coupling limit with tensor renormalization group, *Phys. Rev. D* **113**, 034503 (2026).
- [16] M. Gen, *et al.*, Unified Description of Spin-Lattice Coupling and Thermodynamics in the Pyrochlore Heisenberg Antiferromagnet, *Phys. Rev. Lett.* **136**, 116702 (2026).
- [17] S. Akiyama, *et al.*, Tensor renormalization group approach to critical phenomena via symmetry-twisted partition functions, *Phys. Rev. D* **113**, 074502 (2026).

10 Katsura Group

Research Subjects: Condensed Matter Theory and Statistical Physics

Member: Hosho Katsura and Hironobu Yoshida

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) spin and heat transport in localized spin systems, (iii) open quantum many-body systems, (iv) non-ergodic dynamics in non-integrable systems, and (v) exactly solvable models. In addition, we are interested in the mathematical aspects of the above-mentioned fields. Our research projects conducted in FY 2025 are the following:

- Low-dimensional correlated systems
 - η -clustering states in an extended attractive SU(3) Hubbard chain [1]
 - Fate of bosonic topological edge modes in the presence of many-body interactions [2]
- Spin and heat transport in localized spin systems
 - Scalar spin chirality Nernst effect in kagome magnets [3]
 - Magnon-induced scalar spin chirality in kagome and honeycomb ferromagnets [4]
 - Spin Nernst and thermal Hall effects of topological triplons in quantum dimer magnets [5]
- Nonequilibrium quantum dynamics
 - Classification of dark states in SU(3) Fermi-Hubbard models with three-body losses [6]
 - Weak ergodicity breaking in non-integrable models [7]
 - Systematic construction of asymptotic quantum many-body scar states [8]
- Mathematical and statistical physics
 - G₂ Affleck-Kennedy-Lieb-Tasaki chain [9]
 - Quantum circuits with free fermions in disguise [10]
 - Integrability of a family of disorder-free SYK models [11]

[1] H. Yoshida, N. Heinsdorf, and H. Katsura, Phys. Rev. A **111**, 063307 (2025).

[2] N. Heinsdorf, D. G. Joshi, H. Katsura, and A. P. Schnyder, Phys. Rev. Lett. **135**, 146702 (2025) [Selected as Editors' Suggestion].

[3] G. Go, D. Prasad Goli, N. Esaki, Y. Tserkovnyak, and S. K. Kim, Phys. Rev. Research **7**, L022066 (2025).

[4] N. Esaki, G. Go, and S. K. Kim, Phys. Rev. B **112**, 104440 (2025) [Selected as Editors' Suggestion].

[5] N. Esaki, Y. Akagi, K. Penc, and H. Katsura, Phys. Rev. B **112**, 134435 (2025).

[6] A. Marché, A. Nardin, H. Katsura, and L. Mazza, Phys. Rev. Research **7**, 043124 (2025).

[7] H. Katsura, C. Matsui, C. Paletta, and B. Pozsgay, Phys. Rev. Research **7**, 023099 (2025).

[8] M. Kunimi, Y. Kato, and H. Katsura, Phys. Rev. Research **7**, 043107 (2025).

[9] H. Katsura and D. Schuricht, SciPost Phys. Core **8**, 052 (2025).

[10] K. Fukai and B. Pozsgay, J. Phys. A: Math. Theor. **58**, 175202 (2025).

[11] K. Fukai and H. Katsura, Phys. Rev. B **113**, 115107 (2026).

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 2025:

1. Franz-Parisi Potential Analysis of Random Orthogonal Model
2. Dynamical Mean Field Analysis of Associative Memory Models with Non-monotonic Transfer Function
3. Theoretical Analysis of the Hopfield Model Incorporating the Effects of Unlearning
4. Analysis of Modern Hopfield Model with Ising Spins
5. Analysis of Dynamical Properties of Discrete Diffusion Models
6. Analysis of Discrete-Diffusion-Model-Based Two-dimensional Lattice Protein Design
7. Analysis of Task Difficulty in In-Context Learning
8. Analysis of the Impact of Spurious Correlations and Social Biases on Learning
9. Counting Fixed Points in Randomly Coupled Dynamics Using Grassmann Algebra
10. Dynamical Mean Field Analysis of Alternating Descent for Bilinear Regression
11. Statistical Mechanics Analysis of Learning without Solvability
12. Replica Analysis of Mean-Field Spin Glasses with Correlated Disorder

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 2025, we mainly worked on the following projects:

- Dynamics of superconductors
 - Collective modes in layered superconductors [1]
 - Collective modes in multiband superconductors with Lifshitz invariant [4]

- Current-enabled optical response of collective modes in unconventional superconductors [5]
 - Nonequilibrium phase transition in periodically driven superconductors [7]
 - Dynamics of open quantum many-body systems
 - Quantum active matter
 - Strongly correlated electron systems coupled to quantum electromagnetic fields [6]
 - Quantum many-body scar states
 - Dynamical response of quantum many-body systems
 - Quantum light-driven many-body dynamics [8]
 - Signature of exciton condensation in topological insulator surface states [2]
 - Tensor train methods for quantum many-body problems [3]
 - Excitons in strongly correlated materials
 - Transport phenomena in quantum many-body systems
 - Hall effect in isolated flat-band systems [9]
- [1] N. Ziereis, K. Takasan, N. Tsuji, “Light-driven interlayer propagation of collective-mode excitations in layered superconductors”, *Phys. Rev. B* **111**, 134520 (2025).
- [2] R. Mori, K. Takasan, P. Ai, S. Ciocys, K. Kawaguchi, T. Kondo, T. Morimoto, A. Lanzara, “Possible evidence of excitonic condensation in a topological insulator”, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **122**, e2422667122.
- [3] S. Matsuura, H. Shinaoka, P. Werner, N. Tsuji, “Tensor cross interpolation approach for quantum impurity problems based on the weak-coupling expansion”, *Phys. Rev. B* **111**, 155150 (2025).
- [4] R. Nagashima, T. Moulleron, N. Tsuji, “Optically active Higgs and Leggett modes in multiband pair-density-wave superconductors with Lifshitz invariant”, *Phys. Rev. B* **112**, 024503 (2025).
- [5] G. Niederhoff, R. Kataoka, K. Takasan, N. Tsuji, “Current-Enabled Optical Conductivity of Collective Modes in Unconventional Superconductors”, *Phys. Rev. B* **112**, 144507 (2025).
- [6] T. Nakamoto, K. Takasan, N. Tsuji, “One-dimensional extended Hubbard model coupled with an optical cavity”, *Phys. Rev. B* **112**, 155150 (2025).
- [7] H. Zhang, K. Takasan, N. Tsuji, “Nonequilibrium hysteretic phase transitions in periodically light-driven superconductors”, *Phys. Rev. B* **112**, L220503 (2025).
- [8] S. Imai, “Macroscopic Schrödinger-cat states of nonequilibrium electrons induced by cat-state optical driving and projective measurements on the light field”, *Phys. Rev. A* **113**, 023702 (2026).
- [9] R. Nagashima, M. Ogata, N. Tsuji, “Hall effect in topologically trivial isolated flat-band systems”, *Phys. Rev. Research* **8**, L012041 (2026).

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 2025 below.

- Open quantum systems [1, 2, 5, 7, 8, 9]
- Non-Hermitian systems [3, 4, 6]

- [1] M. Hoshino, M. Oshikawa, and Y. Ashida, Entanglement swapping in critical quantum spin chains, *Physical Review B* **111**, 155143 (2025).
- [2] K. Yokomizo and Y. Ashida, Measurement-induced phase transition in free bosons, *Physical Review B* **111**, 235419 (2025) [Editors' Suggestion].
- [3] Gauge theory for topological waves in continuum fluids with odd viscosity, *SciPost Phys. Core* **8**, 058 (2025).
- [4] T. Yoda, Y. Moritake, K. Takata, K. Yokomizo, S. Murakami, and M. Notomi, Optical non-Hermitian skin effect in uniform media, *Physical Review Research* **7**, 033214 (2025).
- [5] Y. Guo, S. Yang, and X.-J. Yu, Quantum Strong-To-Weak Spontaneous Symmetry Breaking in Decohered One-Dimensional Critical States, *PRX Quantum* **6**, 040311 (2025).
- [6] K. Sone, K. Yokomizo, K. Kawaguchi, and Y. Ashida, Hermitian and non-Hermitian topology in active matter, *Reports on Progress in Physics* **89**, 016501 (2026).
- [7] Y. Guo and Y. Ashida, Tower of Structured Excited States from Measurements, *Physical Review Letters* **136**, 050604 (2026).
- [8] M. Hoshino, M. Oshikawa, and Y. Ashida, Stabilizer Rényi Entropy and Conformal Field Theory, *Physical Review X* **16**, 011037 (2026).
- [9] M. Hoshino and Y. Ashida, Stabilizer Rényi entropy encodes fusion rules of topological defects and boundaries, *Physical Review Letters* **136**, 080402 (2026).

14 Arita Group

Research Subjects: first-principles calculation, superconductivity, magnetism,
topological phenomena, optoelectronic phenomena

Member: Ryotaro Arita, Taisei Kitamura

Research Overview of Our Laboratory

Our group explores quantum materials through theoretical and first-principles studies. We investigate magnetism, superconductivity, structural transitions, and topological phenomena by combining computational techniques with symmetry and model analysis. Our goal is to understand the microscopic origin of complex material properties and contribute to the discovery of new functional materials.

Studies on Bilayer Nickelate Superconductors: Nickel oxides have emerged as a third class of high-temperature superconductors, alongside cuprates and iron-based systems. In particular, bilayer nickelates show superconductivity near 100 K, motivating studies of their mechanism. We determined the temperature–pressure phase diagram of the crystal structure using a finite-temperature optimization method. We also studied superconductivity using a bilayer Hubbard model with cluster dynamical mean-field theory, revealing pseudogap formation, kinetic-energy-driven pairing, and a short coherence length.

Hidden Spin Textures in Antiferromagnets: We classified collinear antiferromagnets using spin space group theory and discovered hidden alternating spin splittings in systems with time-reversal symmetry. These textures arise from non-trivial symmetry breaking and may induce multiferroic and nonlinear transport responses.

Revealing Hidden Symmetries in Materials via Circularly Polarized Raman Spectroscopy: Material properties are governed by symmetry, yet crucial symmetries are often hidden. By analyzing Raman activity under different polarization configurations, we clarify the relationship between observed signals and hidden symmetry breaking.

Dirac Charge and Its Detection in Antiferromagnetic Topological Semimetals: Topological semimetals host protected band degeneracies, such as Dirac and Weyl points, whose nontrivial topology leads to unique optical phenomena. While Weyl semimetals exhibit quantized injection currents linked to Weyl charges, we reveal a hidden “Dirac charge” in antiferromagnetic Dirac semimetals. Using Berry curvature defined in spin and spin-charge mixed parameter spaces, the Dirac charge is identified as a source or sink in a generalized parameter space. Real-time simulations demonstrate that this emergent charge significantly contributes to photocurrent generation, providing a measurable signature of its existence.

Euler Class and Rotational Symmetry in Three-Dimensional Spinless Systems: We explore the relation between the Euler class and rotational symmetries in spinless systems with $C_{2z}T$ symmetry. We analyze how real Berry curvature transforms under point group operations and derive formulas relating the Euler class and rotation eigenvalues and other symmetry-protected invariants. Extending to 3D, we clarify differences between C_{4z} and C_{6z} cases and incorporate mirror symmetry. Our results predict new topological phases, confirmed by Wilson-loop and surface-state calculations on tight-binding models.

Effective Spin Interactions from First Principles: To construct low-energy effective spin models for complex magnetic materials, we developed a method combining the spin cluster expansion with the disordered local moment approach, enabling systematic evaluation of both conventional and higher-order spin interactions. By alleviating the limitations of basis functions in DFT, we showed that the method can be extended to a wide range of materials.

Our work bridges material-specific predictions with fundamental theory. By developing practical methods and uncovering new physical principles, we aim to support the advancement of electronics, spintronics, and quantum technologies.

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 atomic 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. Ex situ measurements of physical Properties are also combined when the surface and thin films are not degraded by air exposure. 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 and metal-atoms intercalated graphene
- 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
- Epitaxial growth of “quasi-crystal” bilayer graphene and its transport property

(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] R. Hobara, R. Akiyama, and S. Hasegawa: *Boron-Assisted Epitaxial Growth of Buffer-Layer-Free Graphene on the Si-face of SiC without 30° Rotation*, ACS Applied Electronic Materials **8** (6), 2225-2233 (Mar, 2026).
- [2] T. Takashiro, R. Akiyama, R. Minakawa, and S. Hasegawa: *Beyond Superexchange: Emergent Unconventional Ferromagnetism in Thin-Film Sandwich Structures of Intrinsic Magnetic Topological Insulators*, arXiv:2508.14993 (Aug, 2025).
- [3] 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, S. Hasegawa: *Superconductivity in graphene induced by atomic intercalation*, Journal of the Ceramic Society of Japan **133** (9), 508-514 (Aug, 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.

Low-temperature electrical resistivity measurements have been performed for superconducting ultrathin films on semiconductor surfaces in the presence of an in-plane magnetic field. For ultrathin In films grown on the cleaved surface of GaAs or InAs, the second harmonic magnetoresistance $R^{2\omega}$ exhibited antisymmetric behavior with respect to the direction of the in-plane magnetic field, while $R^{2\omega}$ was almost zero for ultrathin Al films whose the spin-orbit interaction is considered to be negligibly small. These results indicate that nonreciprocal charge transport occurs in the superconducting ultrathin indium films grown on semiconductor surfaces.

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 FY2025 are as follows.

1. **Nonlinear terahertz spectroscopy in high- T_c cuprate superconductors:** We performed nonlinear terahertz spectroscopy of cuprate superconductors, $\text{La}_{1.6-x-y}\text{Nd}_y\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ to elucidate the interplay between the stripe order and the superconductivity. In particular we applied a two-dimensional terahertz spectroscopy scheme to identify the c -axis Josephson couplings in those La214 compounds. Nonlinear signals originated from the Josephson current along c -axis were identified in the stripe-ordered superconducting cuprates.
2. **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. A comprehensive frequency dependence measurements revealed that the light-induced optical Hall conductivity is scaled as $1/\omega^3$ against the driving frequency ω , in accordance with the Floquet theory that predicts the light-induced chiral gauge field associated with the Floquet-Weyl state.
3. **Ultrafast time-resolved observation of current-induced magnetization switching in a non-colinear antiferromagnet Mn_3Sn :** We successfully visualized the current-induced switching dynamics in a non-colinear antiferromagnet Mn_3Sn by ultrafast time-resolved magneto-optical microscope imaging technique. Depending on the current density and the pulse duration, we have revealed the two distinct switching regimes: a non-thermal process that occurs without the transient melting of antiferromagnetic order, and a thermal-assisted process that accommodates with heating above the magnetic ordering temperature. Our work paves a way to ultrafast magnetic recording using noncolinear antiferromagnets.

References

- [1] Naotaka Yoshikawa, Shun Okumura, Yoshua Hirai, Kazuma Ogawa, Kohei Fujiwara, Junya Ikeda, Akihiro Ozawa, Takashi Koretsune, Ryotaro Arita, Aditi Mitra, Atsushi Tsukazaki, Takashi Oka, Ryo Shimano: Light-induced anomalous Hall conductivity in the massive three-dimensional Dirac semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$, *Phys. Rev. B* **111**, 245104 (2025). (Editors' suggestion)
- [2] Kota Katsumi, Yann Gallais, Ryo Shimano: Distinct terahertz nonlinear and Raman responses in cuprate superconductors $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$, *npj Quantum Materials* **10**, 91 (2025).
- [3] Naotaka Yoshikawa, Kazuma Ogawa, and Ryo Shimano: All-optical switching in ferromagnets and its application to magnetic Weyl semimetals, *J. Phys. Soc. Jpn.* **94**, 111005 (2025). (invited review article)
- [4] Daichi Yoshioka, Fumiya Sekiguchi, Naotaka Yoshikawa, and Ryo Shimano: On-Chip Terahertz Pump-Probe Spectroscopy Revealing Ultrafast Current-Induced Breakdown Dynamics in a Superconducting Nb Microstrip, *Nano Letters* **25**, 13764 (2025).
- [5] Kazuma Ogawa, Hanshen Tsai, Naotaka Yoshikawa, Takumi Matsuo, Yutaro Tsushima, Mihiro Asakura, Hanyi Peng, Takuya Matsuda, Tomoya Higo, Satoru Nakatsuji and Ryo Shimano: Ultrafast time-resolved observation of non-thermal current-induced switching in an antiferromagnetic Weyl semimetal, *Nature Materials* **25**, 434 (2026).

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 transport properties

- Electron-magnon scattering induced anomalous Hall effect in a layered ferromagnet[2]

A layered ferromagnet Cr_2Te_3 is attracting growing interest because of its unique electronic and magnetic properties. Studies have shown that it exhibits sizable anomalous Hall effect (AHE) that changes sign with temperature. The origin of the AHE and the sign change, however, remains elusive. We show experimentally that electron-magnon scattering significantly contributes to the AHE in Cr_2Te_3 through magnon induced skew scattering, and that the sign change is caused by the competition with the Berry-curvature or impurity-induced side-jump contribution. The electron-magnon skew scattering is expected to arise from the exchange interaction between the itinerant Te p -electrons and the localized Cr d -electrons modified by the strong spin-orbit coupling on Te. These results suggest that the magnon-induced skew scattering can dominate the AHE in layered ferromagnets with heavy elements.

- Strong coupling in solids

- Phonon modes of surface acoustic waves[3]

Magnon-phonon coupling has garnered increasing interest in condensed matter physics due to its rich physics and potentials for applications in devices with novel functionalities. Surface acoustic waves (SAWs) are widely used to generate coherent acoustic phonons, with magnetoelastic and magnetorotation interactions often mediating the coupling between magnons and phonons. Since these interactions are governed by the strain and rotational fields of the lattice, both of which depend on the material properties and SAW device structure, understanding their behavior is essential. However, conventional SAW devices are built on anisotropic piezoelectric substrates, such as LiNbO_3 , making experimental analyses and modeling challenging. We present a numerical analysis of SAWs on Y-cut and Y+128°-cut LiNbO_3 substrates. Key parameters, including SAW velocity, excitation efficiency, lattice displacement, strain, and rotation, are numerically calculated against the SAW propagation direction relative to the crystal axes and the electrical boundary conditions at the substrate surface. The in-plane shear strain, which contributes to phononic angular momentum, reaches nearly half the amplitude of the longitudinal strain when SAWs propagate at $\pm 45^\circ$ from the crystal X -axis on Y+128°-cut LiNbO_3 . The out-of-plane shear strain, relevant to nonreciprocal SAW transmission via magnetoelastic coupling, can be either enhanced or suppressed depending on the surface condition. Additionally, we find that the out-of-plane rotational field, which mediates magnetorotation coupling in systems with perpendicular magnetic anisotropy, can exceed the longitudinal strain by nearly a factor of three. These findings provide useful reference for designing experiments on magnon-phonon coupling and help designing advanced magnonic and phononic devices.

- Non-linear optical properties of solids

- Laser induced writing of optic axis[1]

Tellurium (Te), a two-dimensional material with pronounced structural anisotropy, exhibits exceptional electrical and optical properties that are highly sensitive to its crystallographic orientation. However, conventional synthesis offer limited control over the in-plane alignment of Te's crystallographic c -axis, hindering large-scale integration. We report a fundamentally different strategy to manipulate the c -axis orientation of Te thin films using linearly polarized picosecond laser pulses. We show that the c -axis can be omnidirectionally reoriented perpendicular to the laser polarization, even in initially polycrystalline films. The reorientation is reversible, allowing for rewritable and spatially selective control of the c -axis orientation post-deposition. This light-driven approach opens path for interconfigurable optoelectronic and photonic devices, such as active metasurfaces and CMOS-compatible architectures.

- [1] Y. Kobayashi, A. Mitsuzuka, H. Kondo, M. Shoshin, J. Uzuhashi, T. Ohkubo, M. Hayashi, M. Kawaguchi, Light-Programmable Reorientation of the Crystallographic c Axis of Tellurium Thin Films. *Nano Lett.* 26, 104 (2026).
- [2] Y. Wang, S. Wang, M. Kawaguchi, J. Uzuhashi, A. K. Patel, K. Nawa, Y. Sakuraba, T. Ohkubo, H. Kohno, M. Hayashi, Significant electron-magnon scattering in layered ferromagnet Cr_2Te_3 . *Comm. Phys.* 8, 262 (2025).

- [3] T. Kawada, M. Kawaguchi, H. Matsumoto, M. Hayashi, Model calculations of lattice strains and rotations associated with surface acoustic waves J. Appl. Phys. 138, 053905 (2025).
- [4] 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).

19 Kobayashi Group

Research Subjects: Quantum sensing and mesoscopic physics

Member: Kensuke Kobayashi and Kento Sasaki

The advancement of nanotechnology since the 1980s has led to the development of mesoscopic physics, which studies the properties of matter using miniature electronic circuits 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 a promising 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 quantum spin microscopy for various quantum sensing applications. This technique enables quantitative imaging of magnetic field and temperature distributions at submicron scales under a wide range of magnetic field, temperature, and pressure conditions. Such a capability has been challenging to achieve in the field of condensed matter physics. This approach holds promise for exploring various compelling topics, including non-equilibrium transport, spin glasses, and topological edge states.

The primary research topics in FY2025 are as follows.

- Wideband wide-field imaging of spin-wave propagation using diamond quantum sensors [1]
- Systematic investigation of dynamic nuclear polarization with boron vacancy in hexagonal boron nitride [2]
- Investigations of optical aberrations in quantum diamond microscopy toward high spatial resolution and sensitivity [3]
- Observation of chiral domain walls in an octupole-ordered antiferromagnet [4]
- GPa Pressure Imaging Using Nanodiamond Quantum Sensors [5]
- Quantitative imaging of nonlinear spin-wave propagation using diamond quantum sensors [6]

Published papers:

- [1] K. Ogawa, M. Tsukamoto, Y. Mori, D. Takafuji, J. Shiogai, K. Ueda, J. Matsuno, K. Sasaki, K. Kobayashi, *Physical Review Applied* **23**, 054001/1–22 (2025).
- [2] Y. Nakamura, S. Nishimura, T. Iwasaki, S. Nakaharai, S. Ogawa, Y. Morita, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Sasaki, K. Kobayashi, *Physical Review B* **111**, 195404/1–14 (2025) [Editors’ Suggestion].
- [3] S. Nishimura, M. Tsukamoto, K. Sasaki, K. Kobayashi, *Review of Scientific Instruments* **96**, 053706/1–17 (2025).
- [4] 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, *Physical Review B* **112**, L020404/1–7 (2025) [Editors’ Suggestion].
- [5] R. Suda, K. Uriu, K. Yamamoto, M. Sasaki, K. Sasaki, M. Einaga, K. Shimizu, K. Kobayashi, *Journal of the Physical Society of Japan* **94**, 124707/1–9 (2025) [Papers of Editors’ Choice].
- [6] K. Ogawa, M. Tsukamoto, Y. Mori, D. Takafuji, J. Shiogai, K. Ueda, J. Matsuno, Jun-ichiro Ohe, K. Sasaki, K. Kobayashi, *Physical Review B* **112**, 224411/1–11 (2025).

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 2025

1. Isothermal control of exchange bias effect in ferromagnet/Mn₃Sn [1]

The exchange bias effect observed at the interface between a ferromagnet and an antiferromagnet is widely used in spintronics research. However, its manipulation typically requires raising the temperature and field cooling. Its manipulation without any temperature change has been achieved by several methods, including spin-orbit torque switching and electrical control of magnetoelectric antiferromagnets. In this study, we used the Weyl antiferromagnet Mn₃Sn, with broken macroscopic time-reversal symmetry, as the antiferromagnetic layer to improve the controllability of the exchange bias effect [1]. We synthesized a Py(Ni₈₀Fe₂₀)/Mn₃Sn bilayer and demonstrated that the exchange bias effect can be controlled by isothermal application of a magnetic field, in addition to the conventional field cooling process. The interfacial coupling aligns the magnetization of Py antiparallel to the magnetic octupole order of Mn₃Sn; however, when the Py layer is replaced with Co, the coupling becomes ferroic.

2. Time-resolved observation of ultra-fast current-induced switching in Weyl antiferromagnet Mn₃Sn [2]

Recently, the electrical manipulation of the antiferromagnetic Weyl semimetal Mn₃Sn has attracted significant attention due to its potential for spintronics applications. On the other hand, there is an ongoing debate over whether the current switching of Mn₃Sn is dominated by joule heating, which limits the switching speed to nanosecond timescales, or by non-thermal spin-orbit torque-induced switching with picosecond-scale dynamics. To clarify the exact switching speed and the underlying spin dynamics, we directly observe the switching process using time-resolved magnetic domain imaging. We visualized the micrometer-scale magnetic domain structure of Ta/Mn₃Sn polycrystalline thin films using magneto-optical imaging with a femtosecond-pulsed laser and observed magnetization switching dynamics during sub-ns current-pulse injection. As a result, we demonstrate that the switching speed is comparable to the pulse duration and that a non-thermal switching process occurs, in which the magnetic octupole reverses while the antiferromagnetic order is preserved.

3. Demonstrating two distinct mechanisms behind antiferromagnetic SOT switching [3]

Spin-orbit torque (SOT) switching of antiferromagnetic order is predicted to occur on picosecond timescales, two to three orders of magnitude faster than ferromagnets, due to the terahertz dynamics of antiferromagnets. However, Joule heating during SOT can raise the material above its Néel temperature, triggering a slower, temperature-assisted switching mechanism occurring over tens of nanoseconds. Our study shows a crossover of the SOT switching mechanism in Mn₃Sn, a chiral antiferromagnet, as a function of thickness[1]. Thicker devices exhibit heating-dominated, slow switching. Reducing device thickness suppresses heating, preserves magnetic order, and enables faster, intrinsic SOT-driven switching with shorter current pulses. This study provides design principles for achieving high-speed, energy-efficient antiferromagnetic memory devices.

4. Tuning the transition temperatures and transport properties of antichiral antiferromagnetic Mn₃X thin films via doping [4]

The family of antichiral antiferromagnets Mn_3X ($\text{X}=\text{Sn, Ge, Ga}$) exhibits large responses, similar to ferromagnets, such as the anomalous Hall effect, despite their vanishingly small magnetization, which originates from magnetic Weyl points in their band structure. In this study, we investigate the effects of composition in sputtered $\text{Mn}_3\text{Sn}_{1-x}\text{Ga}_x$ thin films and show that the Néel temperature can be tuned between 420 K and 500 K as a function of doping, i.e., the Fermi energy, as well as the anomalous Hall conductivity between 10 S/cm and 75 S/cm at 300 K[2]. We also found that the magnetic phase transition from the antichiral antiferromagnet to a helical phase present in Mn_3Sn can be suppressed by Ga doping. This study provides insights into the optimization of the Mn_3X materials for device applications.

5. Multipole-drive superconductivity in $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ [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 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$, 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.

6. Zero-Field Hall Effect in a Strange Metal State of a Collinear Antiferromagnet $\text{V}_{1/3}\text{NbS}_2$ [6]

The interplay between strong electronic correlations and nontrivial band topology is opening new frontiers in quantum materials, enabling emergent properties and functionalities in magnetic systems. Transition metal dichalcogenides (TMDs) have emerged as a powerful platform in this direction. In their two-dimensional (2D) form, TMD heterostructures host exotic topological phases and offer exceptional tunability, enabling systematic exploration of key quantum phenomena, such as non-Fermi-liquid behavior and unconventional superconductivity. Intercalating magnetic transition-metal ions into van der Waals TMDs provides an effective means to tune the carrier density and engineer band topology, analogous to electrostatic gating in 2D systems. These magnetically intercalated compounds exhibit a rich interplay between magnetism and correlated electron physics, offering new opportunities for realizing novel quantum functionalities.

In this study, we discovered a striking magnetization-free anomalous Hall effect (AHE) in the collinear antiferromagnet V-intercalated NbS_2 , emerging in a non-Fermi-liquid regime where quasiparticles break down. This result reveals an intimate connection between strong correlations and topological electronic structure. The magnetization-free AHE, driven by Berry curvature acting as an effective magnetic field in momentum space, has previously been associated mainly with noncollinear antiferromagnets. Its realization in a collinear system significantly broadens the scope of topological antiferromagnetism and its potential applications.

- [1] M. Asakura, T. Higo, T. Matsuo, Y. Tsushima, S. Kurosawa, R. Uesugi, D. Nishio-Hamane, S. Nakatsuji “Magnetic field switching of exchange bias in a metallic FM/AFM heterostructure at room temperature” *Nano Lett.* **25**, 10294 (2025).
- [2] K. Ogawa, H. Tsai, N. Yoshikawa, T. Matsuo, Y. Tsushima, M. Asakura, H. Peng, T. Matsuda, T. Higo, S. Nakatsuji, R. Shimano “Ultrafast time-resolved observation of non-thermal current-induced switching in an antiferromagnetic Weyl semimetal” *Nat. Mater.* **25**, 434–439 (2026).
- [3] T. Matsuo, T. Higo, D. Nishio-Hamane, T. Matsuda, R. Uesugi, H. Tsai, K. Kondou, S. Miwa, Y. Otani, and S. Nakatsuji. “Crossover between intrinsic and temperature-assisted regimes in spin-orbit torque switching of antiferromagnetic order” *arXiv:2510.27138v2*
- [4] M. Raju, T. Matsuo, M. B. Balkew, D. Nishio-Hamane, T. Higo, C. Broholm, S. Nakatsuji “Tunable high Néel temperature and large anomalous Hall response in antiferromagnetic Weyl semimetal $\text{Mn}_3\text{Sn}_{1-x}\text{Ga}_x$ thin films” *Commun. Mater.* **6**, 205 (2025).
- [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).

- [6] M. K. Ray, M. Fu, *et al.*, “Zero-field Hall effect emerging from a non-Fermi liquid in a collinear antiferromagnet $\text{V}_{1/3}\text{NbS}_2$ ” *Nat. Commun.* **16**, 3532 (2025).

21 Zhang Group

Research Subjects: Condensed matter physics of nanomaterials

Member: Yijin Zhang

We are experimentally studying condensed matter physics using low-dimensional nanomaterials such as graphene and nanotubes, by taking advantage of easy structural controllability of nanomaterials. Our main research progresses in AY2025 are related to bulk photovoltaic effect and one-dimensional moiré superlattice.

The bulk photovoltaic effect (BPVE) is one of the nonlinear optical response, which can convert optical power to electrical power without need of p - n junction. BPVE has been studied in ferroelectric materials such as BaTiO_3 for a long time, but was discovered in WS_2 nanotube in 2019 followed by reports in various nanomaterials. We had adopted nanoscroll structure of Janus TMD. Janus TMD is a unique group of transition metal dichalcogenides (TMDs) in which the transition metal atom is sandwiched by two distinct chalcogen atoms from top and bottom. This structural anisotropy induces a strain that works as a driving force rolling up the two-dimensional sheet to form one-dimensional tubular nanoscroll, resembling nanotubes. We fabricated devices using Janus MoSSe nanoscroll and succeeded in observing BPVE. In addition, we had experimentally confirmed that nanoscroll structure plays an important role in inducing BPVE. Compared to nanotubes, nanoscrolls are superior in the sense that local chirality are identical in all layers. Thanks to this feature, the quantum efficiency in our devices was at best one order of magnitude larger than that of nanotubes reported before.

The second achievement was based on the van der Waals assembly technique. When two-dimensional materials are stacked together with lattice mismatch, a long-range interference pattern called moiré superlattice emerges. For homobilayers, in which two identical materials are stacked together, the moiré superlattice has been investigated in small twist angle region only. This is because the fundamental theoretical understanding of moiré superlattice predicts monotonic decrease of size of moiré superlattice and disappearance around 30° . In stark contrast, we found that moiré superlattice reappear around 60° in twisted bilayer WTe_2 . Interestingly, the moiré superlattice becomes stripe patterns around 62° and 58° [6]. We further theoretically verified that the moiré periodicity can be defined only along one direction at these two critical angles, mathematically being one-dimensional. It is found that a mirror symmetry in the constituent materials is important to reduce the dimensionality in moiré superlattice, which largely limits candidate materials to rectangular and centered rectangular lattices. To overcome this restriction, we proposed racemic van der Waals assembly to stack two flakes with opposite planar-chirality. This method creates mirror symmetry in plane projected homobilayers composed of materials without mirror symmetry. Based on this concept, we succeeded in realizing reducing dimensionality in moiré superlattice made from ReSe_2 with oblique lattice [1].

- [1] X. Yang, Y. J. Zhang, K. Sato, A. Nishimura, M. Nakashima, L. Chen, K. Aso, M. Onodera, R. Moriya, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Kawakami, N. Nakatsuji, M. Koshino, Y. Yamada-Takamura, Y. Oshima, T. Machida, “Racemic van der Waals Assembly of Planar-Chiral 2D Materials for Intrinsic One-Dimensional Moiré Superlattices”, *ACS Nano*, In press.
- [2] A. Nishimura, K. Kinoshita, R. Moriya, Y. Seo, M. Onodera, Y. J. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, T. Machida, “Negative differential resistance in $\text{ReSe}_2/h\text{-BN}/\text{ReSe}_2$ van der Waals tunnel junction”, *Appl. Phys. Lett.* **127**, 213101 (2025).
- [3] K. Kuruma, M. Onodera, S. Takahashi, I. Takahashi, Y. J. Zhang, T. Machida, Y. Ozeki, “Stimulated Raman Scattering Imaging of Atomically Thin Layers and a Strained Nanotube of Hexagonal Boron Nitride”, *Nanoscale* **17**, 26454 (2025).
- [4] K. Kinoshita, R. Moriya, M. Onodera, Y. J. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, T. Machida, “Resonant Tunneling in $\text{WSe}_2/h\text{-BN}/\text{WSe}_2/h\text{-BN}/\text{WSe}_2$ van der Waals Triple Quantum Well Device”, *ACS Nano* **19**, 35592-35600 (2025).

- [5] S. Park, R. Moriya, Y. J. Zhang, K. Watabe, T. Taniguchi, T. Machida, “Emergent photo-thermoelectricity in localized bulk quantum Hall state of graphene” , *Appl. Phys. Lett.* **127**, 103105 (2025).
- [6] X. Yang, Y. J. Zhang, L. Chen, K. Aso, W. Yamamori, R. Moriya, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, N. Nakatsuji, M. Koshino, Y. Yamada-Takamura, Y. Oshima, T. Machida, “Intrinsic One-Dimensional Moiré Superlattice in Large-Angle Twisted Bilayer WTe₂” , *ACS Nano* **19**, 13007-13015 (2025).

22 Theoretical Astrophysics Group

Research Subjects: Observational Cosmology, High-Energy Astrophysics and Artificial Intelligence

Member: Naoki Yoshida, Kana Moriwaki, Chinami Kato & 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, ionization, thermal history of the universe and reionization.

Astronomical observations discovered distant galaxies and quasars that resided 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:

2025

- Formation and Evolution of High-Redshift Galaxies Using Cosmological Simulations and Multi-Wavelength Observations
- Development of a Surrogate Model for Neutrino Radiation Transport in Core-Collapse Supernovae
- Redshift Evolution of Halo Occupation Distribution

2024

- The Nature of Dark Matter Probed by Strong Gravitational Lensing
- Long-Term Evolution and Dispersal of Protoplanetary Disks
- Impact of Reionization History on Constraining Primordial Gravitational Waves with Cosmic Microwave Background B-modes
- Probing Cosmic Large Scale Structure with Voids

2023

- Binary Blackhole Mergers Induced by Dynamical Interaction of Hierarchical Triple Systems
- Solving the Boltzmann Equation with Classical and Quantum Computers

23 Murao Group

Research Subjects: Quantum Information (Theory)

Member: Mio Murao

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 a faculty member, Mio Murao (Professor), postdoctoral researchers, Zane Marius Rossi (JSPS foreign postdoctoral fellow), Jisho Miyazaki, and graduate students, Timothy Forrer (D3), Satoshi Yoshida (D3), Kosuke Matsui (D2), Natsuto Isogai (D1), Ryotaro Niwa (M2), Manaki Arihara (M1), Ben Yordan Jumoorty (M1). We engaged in active collaborations with colleagues at Ritsumeikan University, Sorbonne Université, Tamkang University, the University of Amsterdam, University of California, Berkeley, University of Manchester, Université Paris-Saclay, Foxconn, Google Quantum AI, and NTT.

Our projects engaged in this academic year were the following:

Quantum Algorithms

- Composition of quantum protocols with knowledge (Forrer, Miyazaki, Murao)
- A Solovay–Kitaev theorem for quantum signal processing (Rossi)
- Quantum advantage in storage and retrieval of isometry channels (Yoshida, Miyazaki, Murao)
- Asymptotically optimal $SU(3)$ estimation (Yoshida, Murao)
- Implementation of quantum combs with group symmetry (Yoshida, Murao)
- Higher-order quantum algorithms with known input states (Yoshida, Murao)
- Randomized dilation superchannels (Yoshida, Niwa, Murao)
- Singular value transformation for unknown quantum channels (Niwa, Rossi, Murao)
- Purification of noisy unitary channels (Niwa, Yoshida, Murao)
- Unitary fingerprint (Jumoorty, Murao)
- Sample query conversion of block encoding (Arihara, Murao)

Distributed Quantum Information Processing

- Improving numerical accuracy of entanglement detection via algebraic geometry (Miyazaki)
- Characterizing quantum measurements realizable with no classical communication (Miyazaki)
- Feasibility of quantum computation with a limited number of qubits (Matsui, Murao)

Quantum Error Correction

- Depth reduction of color code circuits using CXSWAP gates (Yoshida)
- Threshold theorem for the Union-Find decoder (Yoshida)

Quantum Machine Learning and Computational Complexity

- Advantage of quantum machine learning from general computational advantages (Isogai, Murao)
- Derandomization of random advice for relational problems in heuristic complexity (Isogai, Murao)

24 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 FY2025 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms, nonequilibrium open systems
 - Quantum master equation for many-body systems based on the Lieb–Robinson bound [1]
 - Superfluidity of dissipative Bose–Einstein condensates [2]
 - Quantum feedback cooling of a trapped nanoparticle by using a low-pass filter [3]
- Unification of quantum physics, statistical mechanics, information theory, and machine learning
 - Proof of nonintegrability of $S = 1$ quantum spin chains [4]
 - Maxwell’s demon that rectifies quantum fluctuations [5]

- [1] Koki Shiraishi, Masaya Nakagawa, Takashi Mori, and Masahito Ueda, Phys. Rev. B **111**, 184311 (2025) [selected as Editors’ Suggestion].
- [2] Hongchao Li, Xie-Hang Yu, Masaya Nakagawa, and Masahito Ueda, Phys. Rev. Lett. **135**, 166001 (2025).
- [3] Shuma Sugiura and Masahito Ueda, Phys. Rev. A **113**, 023119 (2026).
- [4] Akihiro Hokkyo, Mizuki Yamaguchi, and Yuuya Chiba, Phys. Rev. Research **7**, 043297 (2025).
- [5] Kangqiao Liu, Masaya Nakagawa, and Masahito Ueda, Phys. Rev. A **113**, 022436 (2026).

25 Jun’ichi Yokoyama Group

Research Subjects: Theoretical Cosmology and Gravitation

Member: Jun’ichi Yokoyama

This group has long been based at the Research Center for the Early Universe (RESCEU), where we have conducted broad research in cosmology, gravitational theory, and gravitational wave physics, grounded in fundamental theoretical physics such as general relativity, quantum field theory, and particle physics. At the same time, we have actively contributed to both education and research within the Department of Physics, Faculty of Science.

Since November 2023, however, Yokoyama has assumed the position of Director of the Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe. Accordingly, he continues his duties at the Department of Physics as an adjunct professor to RESCEU. Graduate students are distributed between the Kashiwa and Hongo campuses, residing at either location depending on their preferences.

Cosmology of the early universe and gravitation

- One-loop correction on the primordial curvature perturbation from single-field inflation
- Evolution of primordial magnetic fields and their cosmological constraints
- Einstein-Cartan gravity and cosmology
- No-scale Brans-Dicke gravity and cosmology
- On shell scattering amplitude and quantum effects on black holes
- Enhancement of primordial black hole formation through variable equation of state

Observational cosmology

- Cosmic birefringence as a probe of dark components
- Time domain astronomy using Tomo-e Gozen

Gravitational wave analysis

- LIGO-Virgo-KAGRA collaboration papers

26 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

Our research laboratory focuses on magnetic confinement torus plasmas to realize fusion energy, primarily utilizing the TST-2 spherical tokamak (ST) at the Kashiwa Campus while maintaining extensive domestic and international collaborations. TST-2 is a high-performance ST with a major and minor radius of 0.36 m and 0.23 m, capable of achieving plasma currents up to 120 kA through induction and 27 kA via radio-frequency waves, specifically Lower-Hybrid Waves (LHW). In fiscal year 2025, our efforts were focused on deepening the physical understanding of high-energy electrons generated by LHW through advanced hard X-ray (HXR) and target probe based diagnostics. These studies revealed that high-energy electron orbits significantly dictate energy loss patterns to plasma-facing components. We also made strides in understanding HXR burst mechanisms by analyzing their correlation with magnetic fluctuations and loop voltage, finding that such bursts are detrimental to current drive efficiency as they represent a substantial loss channel for non-inductive current maintenance.

In our pursuit of non-inductive current start-up, we developed an off-midplane LHW launch scenario aimed at driving current closer to the magnetic axis, contrasting with conventional launchers that tend to drive current in the periphery. While numerical simulations using GENRAY and CQL3D predicted a doubling of plasma current through synergistic effects between antennas, experimental results showed only a modest increase of approximately 1 kA. Investigation into this discrepancy considered Parametric Decay Instabilities (PDI) as a possible cause for wave spectral changes, though initial magnetic probe measurements showed no significant difference in PDI activity between single and dual antenna operations, prompting plans for higher-field-side wave analysis. Furthermore, high-energy electron loss was explored through a multi-sightline HXR system equipped with pulse-height reconstruction to mitigate pile-up, which allowed us to distinguish between transiently lost electrons and those contributing to bulk current.

Diagnostic development remained a pillar of our research, highlighted by the creation of a compact, high-performance beam dump and specialized notch filters for the line-integrated Thomson scattering (LITS) system to suppress stray light. This enabled successful temperature and density distribution measurements across five sightlines, which were validated against conventional Thomson Scattering methods. Additionally, we improved microwave inter-polarimetry by identifying wall reflections as a source of Faraday rotation error and proposed a slanted-plate solution to reduce phase errors tenfold. We also successfully measured local toroidal current density distributions using a new bobbinless coil probe, providing qualitative validation of our current density profile modeling in both ohmic and LHW plasmas.

Our computational work utilized the Smilei PIC code to model non-linear wave interactions, successfully observing Ion Bernstein Wave excitation and parametric decay processes in 1D simulations, followed by 2D modeling near the Upper Hybrid Resonance. Collaborative efforts also yielded significant results, including the integration of orbit-averaged Fokker-Planck and extended MHD codes to optimize ECW-assisted start-up for JT-60SA and the development of a remote fiber-scanning mechanism for the QUEST device to enhance measurement resolution during long-pulse discharges. Finally, our laboratory contributed to the conceptual design of the FAST project, performing 0D analyses to clarify the relationships between fusion output, neutron wall loading, and cost, while establishing essential diagnostic requirements for future power demonstration technologies.

27 Aikawa Group

Research Subjects: Levitated optomechanics, ultracold atoms

Member: Kiyotaka Aikawa, Mitsuyoshi Kamba, Soutatsu Otabe, Takumi Ukiya, Yuto Kojima, Jihye Jung, Takuya Kawasaki

We experimentally explore single nanoparticles optically levitated in vacuum. Recently, we realize feedback 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 FY2025 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 Low-frequency Gravitational-Wave Antenna: TOBA (Torsion Bar Antenna)
- Dark Matter Search: DANCE
- High-precision experiments on relativity and opto-mechanics

Reference

- [1] H. Takidera, *et al.*: Adjusting optical cavity birefringence with wavelength tunable laser for axion searches, *Phys. Rev. D* 112, 063048 (2025).
- [2] K. Suzuki *et al.*: Observation of an optical spring in a robustly controlled signal-recycled Michelson interferometer, *Opt. Express* 33, 40026-40039 (2025).
- [3] E. Berti, *et al.*: deci-Hz Gravitational Wave Observations on the Moon and Beyond, *arxiv:2602.05923* (2026).
- [4] Y. Michimura, *et al.*: Initial acquisition requirements for optical cavities in the space gravitational wave antennae DECIGO and B-DECIGO, *Class. Quantum Grav.* 42, 225027 (2025).
- [5] T. Ito, *et al.*: SILVIA: Ultra-precision formation flying demonstration for space-based interferometry, *PASJ psaf086* (2025).
- [6] Y. Okuma, *et al.*: Cross-correlated force measurement for thermal noise reduction in torsion pendulum, *Phys. Rev. D* 111, 082006 (2025).
- [7] A. G. Abac *et al.*: Search for Continuous Gravitational Waves from Known Pulsars in the First Part of the Fourth LIGO-Virgo-KAGRA Observing Run, *ApJ* 983, 99 (2025).
- [8] A. G. Abac *et al.*: Search for Gravitational Waves Emitted from SN 2023ixf, *ApJ* 985, 183 (2025).
- [9] A. G. Abac *et al.*: GW250114: Testing Hawking's Area Law and the Kerr Nature of Black Holes, *Phys. Rev. Lett.* 135, 111403 (2025).
- [10] A. G. Abac *et al.*: GW241011 and GW241110: Exploring Binary Formation and Fundamental Physics with Asymmetric, High-spin Black Hole Coalescences, *ApJL* 993, L21 (2025).
- [11] A. G. Abac *et al.*: GW231123: A Binary Black Hole Merger with Total Mass 190-265 Msolar, *ApJL* 993, L25 (2025).
- [12] A. G. Abac *et al.*: All-sky search for short gravitational-wave bursts in the first part of the fourth LIGO-Virgo-KAGRA observing run, *Phys. Rev. D* 112, 102005 (2025).
- [13] A. G. Abac *et al.*: GWTC-4.0: An Introduction to Version 4.0 of the Gravitational-Wave Transient Catalog, *ApJL* 995, L18 (2025).
- [14] A. G. Abac *et al.*: Black Hole Spectroscopy and Tests of General Relativity with GW250114, *Phys. Rev. Lett.* 136, 041403 (2026).

29 Bamba Group

Research Subjects: High Energy Astrophysics, observations and developments of detectors

Member: Aya Bamba, Kouichi Hagino

This year, we achieved a variety of results, particularly focusing on high-resolution spectroscopy of high-energy astrophysical objects using the XRISM satellite. The most outstanding achievement of this year is our observational results on mass outflows from PDS 456, one of the supermassive black holes ubiquitously found at the centers of galaxies. We discovered multiple absorption lines in the spectrum of PDS 456 originating from iron outflowing at velocities of 0.2–0.3 times the speed of light. The lines are narrow, indicating the presence of multiple velocity components. These results suggest that ultra-fast outflows (UFOs), in which matter is ejected from supermassive black holes at nearly the speed of light, do exist and have a clumpy, multi-component structure. Such clumpy UFOs have been discovered for the first time in the world, attracting significant attention, including publication in *Nature* and a press conference. In addition, we have achieved many other results on supernova remnants, neutron stars, and related objects.

For future cosmic hard X-ray satellites, we develop semiconductor detectors. We have been fully participating in the space hard X-ray high spatial resolution balloon experiment superHERO, aiming for a balloon launch in FY2028, and have been leading its development as a core institution. In particular, we were responsible for developing the readout system for the focal plane detector, and successfully assembled the system within FY2025. In February 2026, several members stayed at NASA/MSFC for one month, where they successfully conducted beam tests of the focal plane detector. Through these efforts, we are taking a leading role in advancing development toward the balloon launch. In addition, as part of the fundamental development of hard X-ray detectors, the Bamba laboratory is also developing a semiconductor detector called XRPIX. We are aiming for full digitization by integrating an ADC within the XRPIX chip. While energy-related performance targets for space applications, such as energy resolution and gain, have already been achieved, timing-related performance such as photon arrival time resolution and dead time fraction has been measured. We successfully carried out precise measurements of these parameters for the first time and demonstrated that the timing performance also meets the requirements for space applications.

Selected papers:

- [1] Aya Bamba, Manan Agarwal, Jacco Vink, Paul Plucinsky, Yukikatsu Terada, Ehud Behar, Satoru Katsuda, Koji Mori, Makoto Sawada, Hironori Matsumoto, Lia Corrales, Adam Foster, Shin-ichiro Fujimoto, Liyi Gu, Kazuhiro Ichikawa, Kai Matsunaga, Tsunefumi Mizuno, Hiroshi Murakami, Hiroshi Nakajima, Toshiki Sato, Haruto Sonoda, Shunsuke Suzuki, Dai Tateishi, Hiroyuki Uchida, Masahiro Ichihashi, Kumiko Nobukawa, Salvatore Orlando, “Measuring the asymmetric expansion of the Fe ejecta of Cassiopeia A with XRISM/Resolve”, *PASJ*, 77, S144 (2025)
- [2] Tashiro, M., XRISM collaboration, “X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission”, *PASJ*, 77, S1 (2025)
- [3] XRISM collaboration, “Structured ionized winds shooting out from a quasar at relativistic speeds”, *Nature*, 641, 1132 (2025)
- [4] H. Uchida, K. Mori, H. Tomida, H. Nakajima, H. Noda, T. Tanaka, H. Murakami, H. Suzuki, S. B. Kobayashi, T. Yoneyama, K. Hagino, K. K. Nobukawa, H. Uchiyama, M. Nobukawa, H. Matsumoto, T. G. Tsuru, M. Yamauchi, I. Hatsukade, H. Odaka, T. Kohmura, K. Yamaoka, T. Yoshida, Y. Kanemaru, D. Ishi, T. Dotani, M. Ozaki, H. Tsunemi, K. Miyazaki, K. Kusunoki, Y. Otsuka, H. Yokosu, W. Yonemaru, K. Ichikawa, H. Nakano, R. Takemoto, T. Matsushima, R. Urase, J. Kurashima, K. Fuchi, K. Hayakawa, M. Fukuda, S. Inoue, Y. Aoki, K. Takayama, T. Sako, M. Yoshimoto, K. Shima, M. Higuchi, K. Ninoyu, D. Aoki, S. Tsunomachi, T. Okajima, M. Ishida, Y. Maeda, T. Hayashi, K. Tamura, R. Boissay-Malaquin, T. Sato, M. Takeo, A. Miyamoto, G. Matsumoto, M. E. Eckart, N. Hell, M. A. Leutenegger, K. Hayashida, “In-orbit performance of the soft X-ray imaging telescope Xtend aboard XRISM”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, psaf030, 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. Both POLARBEAR and Simons Array experiments concluded the observations. Our focus has been 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 has been under development since 2016, and we have now started observations. We are deploying an array of what we call “small aperture telescopes,” which are dedicated for the inflationary signal, and a six-meter-aperture “large aperture telescope,” which enables observation for the large-scale structures and the dark content of the universe. Our current focus is on the analysis of commissioning data of first three telescopes at Chile site and on fabrication of the 4th telescope.
- Research and Development for CMB experiments such as Simons Observatory 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.
- 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 qubit hybridized system to overcome SQL aiming at the axion dark matter search.
- Gravitational waves at high frequencies (MHz–GHz) remain largely unexplored, yet they hold rich potential to provide a new view of the early universe. We are launching a new experimental project to explore GHz-frequency gravitational waves by combining a superconducting resonant cavity with microwave quantum-sensing techniques.

31 Takeuchi Group

Research Subjects: Experimental statistical physics for non-equilibrium systems

Members: Kazumasa A. Takeuchi, 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 2025:

(1) Non-equilibrium phenomena in soft matter systems

(1-1) Collective dynamics of magnetic Quincke rollers

(2) Non-equilibrium phenomena in living systems

(2-1) Glass transitions of proliferating bacterial populations

(2-2) Topological edge states in collective motion of bacteria [2]

(2-3) Collective motion of light-driven bacteria

(2-4) Topological defects and extracellular matrix production in early biofilm formation [4]

- (2-5) Experimental model soil system for bacteria
- (2-6) Collective motion of *Komagataeibacter hansenii* [6]
- (2-7) Near-field interaction of *Chlamydomonas reinhardtii* in confined suspension
- (2-8) Collective behavior of soldier crabs [5]

(3) Theoretical approaches

- (3-1) Large deviations characterizing the Kardar-Parisi-Zhang universality class [7]

More detailed information can be found at the group's website, <https://lab.kaztake.org/>

References

- [1] Y. Karita, G. T. Rodríguez-Sánchez, E. Brambilla, J. C. R. Hernandez-Beltran, M. Schwarz, P. B. Rainey, Context-dependent adaptation in structured environments, *Proc. R. Soc. B*, **293**, 20252004 (2026).
- [2] Y. Uchida, D. Nishiguchi, K. A. Takeuchi, Designing topological edge states in bacterial active matter. arXiv:2601.08243.
- [3] A. Ochi, K. Shibamoto, Y. Toyotake, D. Fujioka, F. Yokoyama, H. Okanishi, T. Imai, D. Fujita, R. Aono, M. Inoue, M. Takizawa, R. Tobe, Y. Kanai, T. Imai, H. Mihara, Biosynthesis and Export of Membrane-Enveloped Selenium Nanoparticles by *Escherichia Coli*. *Environ. Sci. Technol.* **60**, 4213 (2026)
- [4] F. Yokoyama, K. A. Takeuchi, Biofilm Initiation via Extracellular Matrix Production Regulated by Cell Orientation Patterning in Growing *Escherichia coli* Populations. bioRxiv, doi: 10.64898/2026.03.26.714369 (2026)
- [5] C. Feliciani, H. Murakami, T. Tomaru, Y. Uesugi, S. Tanida, Y. Nishiyama, X. Jia, and T. Maeda, How swarm size affects soldier crab swarming behavior. *Artif. Life. Robotics* **31**, 69 (2025).
- [6] G. Takayama, T. Kondo, Unraveling self-assembly mechanisms in bacterial cellulose hydrogels. bioRxiv, doi: 10.64898/2026.01.21.700946 (2026).
- [7] Y. Yanagibashi, K. A. Takeuchi, Population dynamics simulations of large deviations for three subclasses of the Kardar-Parisi-Zhang universality class. arXiv:2602.04357.

32 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 group 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.

33 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-contract 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)

34 Okada Group

Research Subjects: Biophysics, cell biology, super-resolution microscopy, live cell imaging and single molecule imaging.

Member: Yasushi Okada, Sawako Enoki and Keigo Ikezaki

At the heart of our research lies the fundamental question, ‘What is life?’. We develop technologies for visualization and non-invasive measurement of molecular processes in living cells to bridge the gap between molecules and life.

A major breakthrough this year was EverGreen, a photobleaching-free fluorescent labeling system developed with the Kikuchi laboratory at Osaka University ([8]). Conventional fluorescent probes are destroyed by photobleaching, limiting single-molecule tracking to tens of seconds. EverGreen overcomes this through rapid, reversible exchange of fluorogenic dyes on an odorant-binding protein (OBP) tag. We defined quantitative kinetic criteria for continuous exchange-based tracking and demonstrated uninterrupted single-molecule observation for over 24 hours—extending the observation window from seconds to, in principle, infinity.

We also developed GEM2.0, improved genetically encoded multimeric nanoparticles for cytoplasmic viscoelasticity measurement. The original GEM suffered from background noise due to incomplete assembly, restricting the fluorescent protein to Sapphire. Hirokane resolved this by systematic scaffold–fluorescent protein screening, achieving multicolor variants (cyan to near-infrared) and two particle sizes (50 nm and 25 nm). Since the cytoplasm is a complex fluid whose viscoelasticity is scale-dependent, simultaneous tracking of different-sized particles enables more precise physical characterization.

In nonequilibrium biophysics, two complementary approaches were developed for molecular motor energetics. Fukuzawa developed electromagnetic tweezers ([5]) whose force calibration, unlike optical tweezers, is refractive-index-independent and thus transferable to intracellular environments. He validated the platform by reproducing kinesin’s energy conversion efficiency (20%) via the Harada-Sasa equality. Ihara took

a perturbation-free approach, applying the short-time thermodynamic uncertainty relation with machine learning to estimate entropy production rates from F1-ATPase trajectories.

Finally, we analyzed two membrane proteins whose associated phenomena were recognized by Nobel Prizes. For SID-1 (systemic RNAi, 2006 Prize), cryo-EM by the Nureki laboratory revealed no channel-like pore, and our single-molecule imaging uncovered a novel mechanism: dsRNA-dependent SID-1 multimerization triggers membrane deformation and endocytosis. For Piezo1 (mechanosensation, 2021 Prize), Mukai exploited its homotrimeric structure by incorporating small fluorescent dyes via unnatural amino acids and detecting conformational changes through homo-FRET anisotropy, establishing a general approach for homomultimeric membrane proteins.

- [1] Kubo S, Okada Y. The ATPase asymmetry: Novel computational insight into coupling diverse FO motors with tripartite F1. *Biophys J.* **124**, 891-900 (2025).
- [2] Katoh TA, *et al.*, BMP4 regulates asymmetric Pkd2 distribution in mouse nodal immotile cilia and ciliary mechanosensing required for left–right determination. *Dev Dyn.* (2025).
- [3] Sano FK, *et al.*, Insights into G-protein coupling preference from cryo-EM structures of Gq-bound PTH1R. *Nat. Chem. Biol.* (2025).
- [4] Chen Y, *et al.*, Circumferential actomyosin bundles anchored by CCM1 drive endothelial cell contraction and vessel constriction. *Nat. Commun.* (2025).
- [5] Fukuzawa H, *et al.*, Development of electromagnetic tweezers for single-molecule energetics of kinesin. *Biophys. Physicobiol.* (2025).
- [6] Hasegawa K, *et al.*, Age-related decline in nuclear envelope LINC complex drives neuronal aging via axon initial segment dysfunction. *EMBO Rep.* (2025, accepted).
- [7] Kambara T, *et al.*, Enhanced axonal transport in large vertebrates: KIF5A adaptations in giraffes and pythons. *bioRxiv.* 2025.05.04.652084 (2025).
- [8] Awazu T, *et al.*, Kinetic design of reversible probe exchange enables continuous single-molecule tracking beyond the photobleaching limit. *bioRxiv.* 10.64898/2026.03.13.711506 (2026).

35 Furusawa Group

Research Subjects: Theoretical Biophysics, Evolutionary Biology, Complex Systems

Members: Chikara Furusawa and Yusuke Himeoka

Biological systems possess both robustness and plasticity, properties that distinguish them from artificial systems and are essential for their survival. They exhibit robustness against various perturbations, including noise in gene/protein expression and unexpected environmental changes. At the same time, they are plastic in response to their surroundings, changing their states through processes such as adaptation, evolution, and cell differentiation. Although the coexistence of robustness and plasticity can be understood as a dynamical property of complex interacting networks consisting of a large number of components, the mechanisms underlying this coexistence remain largely unknown.

Our work aims to extract the universal features of cellular dynamics that give rise to robustness and plasticity in biological systems. We describe these systems using a relatively small number of degrees of freedom and macroscopic state variables. We expect that such a description will provide novel methods for predicting and controlling complex biological systems.

The current research topics in our group are as follows:

1. Laboratory evolution of bacterial cells to analyze the dynamics of phenotype–genotype mapping
2. Construction of a macroscopic state theory describing adaptation and evolution in biological systems
3. Theoretical analysis of evolutionary processes under dynamically changing environments
4. Metabolic simulations for understanding growth, lag phase, and death

References

- [1] T. Seike, N. Sakata, H. Kotani, C. Furusawa, Context-dependent activation and evolutionary buffering of a mating pheromone in fission yeast. *Commun. Biol.*, in press.
- [2] R. Ono, N. Konno, Y. Nishimura, C. Furusawa, Host range and antibiotic resistance dissemination are shaped by distinct survival strategies of conjugative plasmids. *Nucleic Acids Res.* **54**, gkaf1479 (2026).
- [3] A. Hishida, Y. Himeoka, C. Furusawa, Analysis of metabolic stability under environmental perturbations using a kinetic model. *Biophys. Physicobiol.* **23**, e230001 (2026).
- [4] K. Fujiwara, W. Aoki, C. Furusawa, A. Hasegawa, G. Hayashi, D. Kiga, K. Mikami, S. Takada, Y. Shimizu, Mirror life at the crossroads: Report on the symposia in Japan for discussion toward mirror life synthesis. *Biophys. Physicobiol.* **23**, e230008 (2026).
- [5] N. Konno, K. Miyake, S. Nishino, K. Omae, H. Yanagisawa, S. Tsuru, Y. Nishimura, M. Kikkawa, C. Furusawa, W. Iwasaki, Repeatability of protein structural evolution following convergent gene fusions. *Nature Commun.* **16**, 8278 (2025).
- [6] C. Furusawa, Rethinking life through digital evolution. *Nature Rev. Genet.* **26**, 740–740 (2025).
- [7] Y. Kanai, A. Shibai, N. Yokoi, S. Tsuru, C. Furusawa, Laboratory evolution of the bacterial genome structure through insertion sequence activation. *Nucleic Acids Res.* **53**, gkaf331 (2025).
- [8] H. Ono, S. Tsuru, C. Furusawa, Carbon source diversity shapes bacterial interspecies interactions. *ISME J.* **19**, wrsf224 (2025).
- [9] S. Tsuru, C. Furusawa, Congruence between noise and plasticity in protein expression. *Sci. Rep.* **15**, 24529 (2025).
- [10] R. Kamiura, S. Sato, S. Wang, Y. Takanashi, R. Nishiwaki, A. Shibai, C. Furusawa, Complete genome sequence of a bacterial strain, *Kurthia intestinigallinarum*. *Microbiol. Resour. Announc.* **14**, e00008-25 (2025).
- [11] A. Shibai, M. Izutsu, H. Kotani, C. Furusawa, Quantitative analysis of relationship between mutation rate and speed of adaptation under antibiotic exposure in *Escherichia coli*. *PLoS Genet.* **21**, e1011627 (2025).
- [12] Y. Himeoka, C. Furusawa, Perturbation-response analysis of in silico metabolic dynamics in nonlinear regime: Hard-coded responsiveness in the cofactors and network sparsity. *eLife* **13**, RP98800 (2025).
- [13] S. Tsuru, C. Furusawa, Genetic properties underlying transcriptional variability in *Escherichia coli*. *Nature Commun.* **16**, 2421 (2025).

36 Kawaguchi Group

Research Subjects: Biophysics, Non-equilibrium Physics

Member: Kyogo Kawaguchi, Shunshi Kohyama, Takahiro Kanazawa, Yoshizuki Fumoto, Kentaro Yamashiro, Sangwon Lee, Masahito Mori, Shoma Inoue

The Kawaguchi group aims to elucidate diverse biological and physical phenomena from a physical perspective, through theory, numerical simulation, data analysis, and experimental collaborations. In FY2025, the lab transitioned to a Chief Scientist Lab at RIKEN, continuing research at the interface of biophysics, non-equilibrium physics, and synthetic biology in coordination with The University of Tokyo.

The main research themes for the current fiscal year are as follows:

- **Histone acetylation directly controls chromatin architecture:** Using gene-scale in vitro reconstitution of long chromatin arrays, we demonstrated that histone acetylation directly increases structural fluctuations and transitions chromatin to a more open state. These modification patterns alone reproduce the structural organization observed in living cells, establishing acetylation as a direct physical regulator of higher-order chromatin structure [3].
- **Universal prediction of chromatin compartment organization from coding sequences:** In collaboration with the Hiratani lab (RIKEN BDR), we showed that coding sequence clustering universally predicts chromatin compartment structure across species from human to *Drosophila*, at both fine and coarse genomic scales, revealing a deep correspondence between primary sequence and 3D nuclear organization [10].

- **Self-organized patterning of tracheal cartilage rings:** In collaboration with the Morimoto lab (RIKEN), we proposed a mathematical model for the periodic patterning of tracheal cartilage rings based on ECM-guided collective cell migration. Model and experiment together show that spatial ECM gradients drive periodic accumulation of cartilage progenitors, generating uniformly spaced cartilage rings [12].
- **Hermitian and non-Hermitian topology in active matter:** We provided a comprehensive review of topological concepts—both Hermitian and non-Hermitian—in active matter systems, establishing a unified framework for understanding how non-equilibrium activity generates novel topological phases in biological and soft matter contexts [2].
- **Hydrodynamic optimality of symmetric swimming strokes:** In collaboration with the Ishimoto lab, we analyzed deformable swimmers in viscous fluids without constraining the stroke symmetry. We discovered a hydrodynamic duality: symmetric and anti-symmetric strokes are dynamically equivalent and proven optimal in speed and efficiency among all possible strokes. Validated by 3D Stokes flow simulations, this shows that the prevalence of symmetric gaits in nature reflects a physical optimality principle, not merely developmental constraints [9].
- **Synthetic cell design and protein function engineering:** Shunshi Kohyama contributed a perspective on the collective construction of synthetic cells and a review on protein design strategies for synthetic cells, outlining principles for engineering life-like functional systems from minimal molecular components [4, 5].

37 Sugita Group

Research Subjects: Computational Biophysics, Molecular Dynamics, Machine Learning

Member: Yuji Sugita and Diego Ugarte La Torre

All living organisms are composed of cells, the fundamental unit of life, and within these cells, a diverse array of biomolecules—such as proteins, nucleic acids, and lipids— exist in high concentrations. Our Laboratory aims to elucidate the relationship between the structural dynamics and functions of biomolecules using computational physics, and further, by predicting the interactions between biomolecules in the crowded intracellular environment, to gain a deep understanding of the molecular mechanisms underlying cellular function. To achieve this, relying solely on the existing methods and software is insufficient; it requires the development of new computational methods and molecular models, as well as molecular dynamics simulations optimized for state-of-the-art computers. Furthermore, it is important to establish new approaches that integrate physical simulations, such as molecular dynamics, with information sciences, including machine learning and Bayesian statistics. Using the molecular dynamics software GENESIS (<https://mdgenesis.org>) that we have developed as a platform, we are developing highly innovative methods and contributing to the biophysical community by widely releasing the latest version of GENESIS, which includes these methods, as free software. Our Laboratory focuses on theoretical and computational research, but we also conduct close collaborative research with many experimental groups both in Japan and abroad, aiming to understand biological phenomena in crowded intracellular environments at the atomic and molecular level.

References

- [1] M. Brosz, J. Buck, F. Grunewald, D. Monego, J. Jung, Y. Sugita, C. Aponte-Santamaria, F. Graeter, "Coarse-grained Martini 3 model for collagen fibrils", *Biophys. J.* **123**, 456789 (2025).
- [2] D. Ugarte La Torre, Y. Sugita, "CGBack: Diffusion Model for Backmapping Large-Scale and Complex Coarse-Grained Molecular Systems", *J. Chem. Inf. Model.* **65**, 9974-9986 (2025).
- [3] D. Matsuoka, Y. Sugita, T. Mori, "An Empirical Biasing Force Constant to Minimize Overfitting in Cryo-EM Flexible Fitting Refinement", *J. Chem. Inf. Model.* **65**, 9790-9799 (2025).
- [4] M. Motohashi, M. Oide, C. Kobayashi, J. Jung, E. Muneyuki, Y. Sugita, "The distortion-push mechanism for the γ subunit rotation in F1-ATPase", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **122**, e2502642122 (2025).

- [5] D. Monego, M. Brosz, J. Buck, V. Viliuga, P. Greicius, J. Jung, T. Stuehn, M. Schmies, Y. Sugita, F. Gräter, "ColBuilder: Flexible structure generation of crosslinked collagen fibrils", *Bioinformatics*, btaf278 (2025).
- [6] S. Gopi, G. B. Brandani, C. Tan, J. Jung, C. Gu, A. Mizutani, H. Ochiai, Y. Sugita, S. Takada, "In silico nanoscope to study the interplay of genome organization and transcription regulation", *Nucleic Acids Res.* **53**, gkaf189 (2025).
- [7] A. Mizutani, C. Tan, Y. Sugita, S. Takada, "Heterogeneous condensates of transcription factors in embryonic stem cells: Molecular simulations", *Biophys. J.* **124**, 1587–1598 (2025).
- [8] K. Yagi, K. Gunst, T. Shiozaki, Y. Sugita, "High-performance QM/MM Enhanced Sampling Molecular Dynamics Simulations with GENESIS SPDYN and QSimulate-QM", *J. Chem. Theory Comput.* **21**, 4016–4029 (2025).
- [9] R. E. Amaro et al., "The need to implement FAIR principles in biomolecular simulations", *Nat. Methods* **22**, 641–645 (2025).
- [10] A. Niitsu, A. R. Thomson, A. J. Scott, J. T. Sengel, J. Jung, K. R. Mahendran, M. Sodeoka, H. Bayley, Y. Sugita, D. N. Woolfson, M. I. Wallace, "Rational Design Principles for De Novo α -Helical Peptide Barrels with Dynamic Conductive Channels", *J. Am. Chem. Soc.* **147**, 11741–11753 (2025).
- [11] J. Jung, Y. Sugita, "Langevin integration for isothermal–isobaric condition with a large time step", *J. Chem. Phys.* **162**, 104108 (2025).
- [12] Y.-K. Lei, K. Yagi, Y. Sugita, "Efficient Training of Neural Network Potentials for Chemical and Enzymatic Reactions by Continual Learning", *J. Chem. Theory Comput.* **21**, 2695–2711 (2025).

III

2025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 : 日下 暁人

1. 特殊相対性理論

1.1 物理法則の対称性

1.2 Lorentz 変換

1.3 Michaelson-Morley の実験

1.4 Lorentz 変換の性質

1.5 時空のダイアグラムと timelike vs. spacelike

2. 相対論的力学

2.1 運動方程式の対称性 再考

2.2 Lorentz 変換に対称な運動方程式

2.3 テンソル・共変・反変

2.4 記法

2.5 いくつかの例

3. 電磁気学

3.1 Maxwell 方程式

3.2 Lorentz 力

3.3 四元電流密度

3.4 静電場: Coulomb の法則と Gauss の法則

3.5 静磁場: Ampère の法則・Biot-Savart の法則・Fleming の法則

3.6 静電磁場の Lorentz 変換

4. ポテンシャル

4.1 静電ポテンシャル

4.2 ベクトルポテンシャル

4.3 静的でない電磁場のポテンシャル

5. 電磁場中の荷電粒子の運動

5.1 復習: 運動方程式とローレンツ力

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 粒子加速器

5.5 一様な静電磁場中の運動

5.6 非一様な静磁場中の運動・閉じ込め

6. 電磁場のエネルギーと流れ

6.1 エネルギー密度

6.2 電磁波のエネルギー

6.3 エネルギーの湧き出し

6.4 エネルギーの流れと Poynting の定理

6.5 下準備: 連続体の運動方程式

6.6 電磁場の運動量と運動量保存

6.7 電磁場のエネルギー・運動量テンソル

1.1.2 解析力学 : 横山 順一

0. 序論

0.1 力学とは何か

0.2 ニュートンの古典力学

0.3 力学のこれまでとこれから

0.4 ベクトルとスカラー

0.5 仮想仕事の原理・ダランベールの原理

1. ラグランジュ形式

- 1.1 ラグランジアンの導出
- 1.2 運動を解くということの別の見方
- 1.3 汎関数と変分法
 - 1.3.1 汎関数
 - 1.3.2 変分法
 - 1.3.3 汎関数微分
- 1.4 最小作用の原理
 - 1.4.1 作用汎関数
 - 1.4.2 最小作用の原理
- 1.5 オイラーラグランジュ方程式の共変性
- 1.6 拘束条件の下での運動
 - 1.6.1 拘束条件
 - 1.6.2 ラグランジュの未定乗数法
 - 1.6.3 多数の拘束があるとき
- 1.7 対称性と保存則
 - 1.7.1 運動の積分
 - 1.7.2 運動量保存則
 - 1.7.3 エネルギー保存則
 - 1.7.4 空間の等方性と角運動量保存則
 - 1.7.5 ネーターの定理

2. ハミルトン形式

- 2.1 ハミルトンの正準方程式
- 2.2 ルジャンドル変換
- 2.3 変分法による正準方程式の導出

2.4 正準変換

- 2.4.1 一般の正準変換
- 2.4.2 無限小正準変換
- 2.5 ポアソンの括弧式
 - 2.5.1 時間微分とポアソン括弧式
 - 2.5.2 ポアソン括弧式の諸性質
 - 2.5.3 ヤコビの恒等式
 - 2.5.4 運動の積分とポアソン括弧式
 - 2.5.5 正準変換に対する不変性
- 2.6 位相空間とリュービルの定理
- 2.7 終点座標の関数としての作用とハミルトンヤコビ方程式
 - 2.7.1 終点座標の関数としての作用
 - 2.7.2 ハミルトンヤコビ方程式

3. 展開

- 3.1 電磁場中の荷電粒子の運動
- 3.2 断熱不変量

A. 補遺（進捗状況によっては割愛されます）

- A.1 剛体
- A.2 基底ベクトルによるベクトルの展開
- A.3 オイラー角
- A.4 独楽の運動

4. 自然法則はなぜ時間二階微分方程式で表されるか**5. 大団円：古典力学はなぜ最小作用の原理に従うか****1.1.3 量子力学Ⅰ：常行 真司****1. イントロダクション：古典力学から量子力学へ**

- 1.1 黒体放射とエネルギー量子の発見 (Planck, 1900)
- 1.2 光電効果 (Einstein, 1905)
- 1.3 原子のエネルギー準位の量子化 (Bohr, 1913)
- 1.4 コンプトン効果 (Compton, 1923)
- 1.5 ド・ブロイ仮説と物質波 (de Broglie, 1923)

2. シュレディンガー方程式

- 2.1 伸縮しない弦の横波の波動方程式
- 2.2 電子の波動方程式（シュレディンガー方程式）
- 2.3 波束の運動と群速度
- 2.4 ポテンシャルがある時のシュレディンガー方程式
- 2.5 波動関数の規格化と確率解釈
- 2.6 時間に依存しないシュレディンガー方程式
- 2.7 確率解釈と物理量の期待値
- 2.8 量子力学の古典極限

3. 1次元の束縛状態

3.1 一般的性質

3.2 無限に深い井戸型ポテンシャル

3.3 有限の深さの井戸型ポテンシャル

3.4 調和振動子

4. 1次元の散乱と非束縛状態

4.1 ポテンシャル障壁による散乱

4.2 有限深さの井戸型ポテンシャルの非束縛固有状態

4.3 波動関数の規格化

4.4 波動関数の時間発展

5. 量子力学の体系

5.1 物理量の演算子と期待値

5.2 エルミート演算子

5.3 演算子の行列表示

5.4 表現行列のユニタリ変換

5.5 演算子の交換関係と表現行列

5.6 ディラックのブラ-ケット記法

5.7 時間発展演算子

5.8 シュレディンガー描像

5.9 ハイゼンベルク描像

5.10 正準交換関係と正準量子化

5.11 調和振動子と生成・消滅演算子

1.1.4 物理実験学：鈴木 大介

1. 序論

1.1 物理学と科学的手法

2. 物理量と単位

2.1 国際単位系 SI

2.2 「キログラム」の定義改訂

2.3 「秒」の標準と時系

3. 誤差論

3.1 誤差と不確かさ

3.2 頻度主義的誤差論の基礎

3.3 母集団と確率分布

3.4 標本集団と最尤法

3.5 推定と検定

3.6 回帰法

3.7 不確かさの評価の実践

3.8 ベイズ主義的誤差論

4. 計測技術

4.1 計測技術の一般論

4.2 距離の計測

4.3 温度の計測

4.4 真空技術

1.1.5 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 ベキ級数展開による 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

1.1.6 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

1.1.7 物理学演習 I (電磁気学 I, 物理数学 I, II) : 日下 暁人、濱口 幸一、松尾 泰、高橋 昂、永田 夏海

1.

1.1 リーマン球面

1.2 正則関数の性質

1.3 Michelson-Morley の実験

2.

その場 Galilei 変換

2.1 Julia 集合・Mandelbrot 集合

2.2 収束半径

2.3 速度の合成と超光速運動

3.

その場 収束円上の挙動

3.1 複素微分と吸引的不動点・周期点

3.2 コーシーの積分公式の応用

3.3 Lorentz 変換

4.

その場 2次元流体

4.1 複素多項式の性質

4.2 孤立特異点とローラン展開

4.3 Lorentz 収縮に関するパラドックス

5.

その場 1 ローラン展開

その場 2 留数定理の応用

5.1 解析接続

5.2 留数積分 (実積分への応用 I)

5.3 留数積分 (分岐線がある場合)

5.4 粒子の崩壊

6.

その場 反陽子生成

- 6.1 定積分の計算
- 6.2 ベータ関数
- 6.3 Lorentz 変換の一般論
- 7.
 - その場 中心極限定理
 - 7.1 鞍点法
 - 7.2 熱伝導方程式 (拡散方程式)
 - 7.3 斜交座標系における反変・共変ベクトル
- 8.
 - その場 電磁場テンソル
 - 8.1 2次元 Laplace 方程式の境界値問題
 - 8.2 自己共役微分演算子と Green 関数
 - 8.3 電磁場の Lorentz 変換
- 9.
 - その場 Chebyshev 多項式
 - 9.1 Hermite 多項式
 - 9.2 電磁ポテンシャルと対称性
- 10.
 - その場 ルジャンドル多項式
 - 10.1 空洞共振器と Bessel 関数
 - 10.2 電磁波中の荷電粒子の相対論的運動

1.1.8 物理学演習 II (解析力学、量子力学 I) : 横山 順一、常行 真司、田島 裕之、森脇 可奈

- 1. 解析力学
 - 1.1 運動エネルギー、位置エネルギーと仮想仕事
 - 1.2 一般化座標
 - 1.3 振り子の運動
 - 1.4 汎関数の極値問題
 - 1.5 二重振り子
 - 1.6 ばねの振動
 - 1.7 ビリアル定理
 - 1.8 ラグランジュ未定乗数法
 - 1.9 保存量
 - 1.10 時間に陽に依存するラグランジアン
 - 1.11 分子振動
 - 1.12 対称性と保存量
 - 1.13 電磁場中の荷電粒子の運動 (サイクロトロン共鳴等)
 - 1.14 正準変換を用いた方程式積分
 - 1.15 ポアソン括弧
 - 1.16 ハミルトン-ヤコビ方程式
 - 1.17 リウビルの定理
 - 1.18 古典可積分系
- 2. 量子力学
 - 2.1 黒体放射
 - 2.2 ボーアの量子模型
 - 2.3 デバイ模型
 - 2.4 波動方程式からシュレーディンガー方程式の導出
 - 2.5 シュレーディンガー方程式
 - 2.6 2重スリットを通過する電子線
 - 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
 - 2.8 デルタ関数型ポテンシャル
 - 2.9 エネルギー固有状態
 - 2.10 波束を用いた波動関数の記述
 - 2.11 シュレーディンガー方程式と波束
 - 2.12 粒子の反射
 - 2.13 2重デルタ関数型ポテンシャル障壁の透過と反射
 - 2.14 ブロッホの定理
 - 2.15 線形ポテンシャルとエアリー関数
 - 2.16 ベイカー-キャンベル-ハウスドルフの公式

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? | 借文する；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 | 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 |
| 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? | 9. 機械翻訳を用いた英語論文作成法と注意点、辞書の使い方；短い簡潔な文を書く； Graphene |
| 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 | 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 |
| 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 | 11. 通じる英語のしゃべり方 2；連結語を使う； Volcanoes |
| 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 | 12. 通じる英語のしゃべり方 3； unnecessary 単語は省く； The Internet |
| 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 | 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：鈴木 大介、中桐 洸太、北村 徳隆 | 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 | |

1.2.3 量子力学 II：諸井 健夫

- | | |
|----------------------------|------------------|
| 1. 球対称ポテンシャルを持つシュレディンガー方程式 | 1.3 球面調和関数 |
| 1.1 3次元におけるシュレディンガー方程式 | 1.4 動径方向波動関数の扱い |
| 1.2 球対称なポテンシャルの扱い | 1.5 3次元井戸型ポテンシャル |
| | 1.6 水素原子 |

- 1.7 Rydberg 原子
- 2. 角運動量
 - 2.1 角運動量の満たす交換関係
 - 2.2 角運動量と空間回転
 - 2.3 角運動量の固有状態
 - 2.4 角運動量の合成
 - 2.5 行列を使った角運動量の表現
 - 2.6 スピン
- 3. 摂動論
 - 3.1 時間に依らない摂動
 - 3.2 時間に依る摂動
 - 3.3 WKB 近似

1.2.4 物理学演習 III (量子力学 II、電磁気学 II) : 山本 新、高三 和晃

- 1. 量子力学
 - 1.1 ブラ・ケットと波動関数、ガウスの波束
 - 1.2 不確定性関係と最小不確定状態、スピン演算子
 - 1.3 空間反転とパリティ演算子、周期的ポテンシャル
 - 1.4 時間反転対称性と時間反転演算子、角運動量の合成と量子スピン系
 - 1.5 球面調和関数、スピンの回転と SU(2) 群
 - 1.6 合流型超幾何関数、3次元調和振動子の極座標表示
 - 1.7 一定の電場における一次元調和振動子、時間に依存しない摂動 (三準位系)
 - 1.8 電場中の水素原子、非等方的摂動
 - 1.9 ある時刻から一定値をとる摂動、周期的に振動する摂動
 - 1.10 時間に依存した外場を持つ調和振動子、2電子原子系の基底状態 (変分法)
 - 1.11 WKB 近似と Hawking 温度
- 2. 電磁気学
 - 2.1 ベクトル解析
 - 2.2 磁気単極子とゲージ変換
 - 2.3 鏡像法
 - 2.4 境界条件下の Green 関数
 - 2.5 Maxwell の応力
 - 2.6 Laplace 方程式と多重極展開
 - 2.7 ベクトルポテンシャルと磁気双極子
 - 2.8 電流の作る磁場
 - 2.9 静磁場と磁性体
 - 2.10 準定常電流と表皮の厚さ
 - 2.11 虹の原理

1.2.5 現代実験物理学 I : 江尻 晶、岡田 康志

- 1. 電気回路
 - フィルター、インピーダンス、雑音、演算増幅器
- 2. 真空
 - 真空度、真空装置、電子管
- 3. 光計測基礎
 - 光源、検出器、光の性質、回折・干渉、レーザー
- 4. 歴史的実験
 - 重力定数、流体実験、ブラウン運動
- 5. 顕微鏡光学系の基礎
 - 幾何光学、結像理論
- 6. 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
- 7. 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
- 8. 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
- 9. 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・マイクロコピー

1.2.6 計算機実験Ⅰ：藤堂 眞治、石河 孝洋、諏訪 秀麿

1. 計算機実験の基礎

1.1 講義・実習の概要

1.2 環境整備

1.3 数値誤差

1.4 ニュートン法

1.5 二分法

1.6 囲い込み法

2. 常微分方程式

2.1 常微分方程式の初期値問題

2.2 陽解法と陰解法

2.3 Numerov 法

2.4 固有値問題

2.5 シンプレクティック積分法

3. 連立一次方程式

3.1 物理に現れる連立一次方程式

3.2 連立一次方程式の直接解法

3.3 連立一次方程式の反復解法

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、吉岡 信行

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. 超伝導量子コンピュータの仕組みと操作

2.1 回路量子電磁力学の基礎を学ぶ

2.2 超伝導量子ビットとは

2.3 量子ビットの操作と読み出し

3. 超伝導量子コンピュータの実機環境

3.1 超伝導量子ビットの製作

3.2 希釈冷凍機、マイクロ波制御・読み出し系

3.3 量子コンピュータ以外への応用

4. 量子回路の実装

4.1 Qiskit の基本構造を学ぶ

4.2 量子計算のプログラミング

4.3 実習：シミュレータ・実機での実行

5. 超並列計算機としての量子コンピュータ

5.1 量子フーリエ変換による足し算

5.2 量子系のダイナミクスシミュレーション

5.3 実習：ハイゼンベルグモデルの時間発展

6. エラー抑制の基礎

6.1 量子計算におけるエラー

6.2 外挿法によるエラー抑制

6.3 実習：ハイゼンベルグモデルの時間発展におけるエラー抑制

7. エラー抑制の応用

7.1 量子多体計算に特有のエラーとそのエラー抑制

7.2 実習：ハイゼンベルグモデルの基底状態におけるエラー抑制

8. エラー訂正

8.1 エラー訂正とは

8.2 小規模な量子誤り訂正符号

8.3 大規模な量子誤り訂正符号

9. ショアのアルゴリズム

9.1 量子位相推定とは

9.2 アルゴリズム本体を学ぶ

9.3 実習：シミュレータでの実行

10. 量子位相推定とエネルギー固有値問題

10.1 物理モデル

10.2 時間発展シミュレーションと位相推定

10.3 実習：シミュレータでの固有値推定

11. グローバーのアルゴリズム

11.1 アルゴリズムを幾何学的に学ぶ

11.2 量子振幅推定

11.3 実習：シミュレータと実機での実行

1.2.8 統計力学 I : 竹内 一将

1. 統計力学とは何か？

1.1 ミクロとマクロ

1.2 統計力学の分類

1.3 熱力学の復習

1.4 統計力学の基本精神

2. 準備 1 : 確率論

2.1 用語・定義

2.2 独立な部分からなる系

3. 準備 2 : 量子論

3.1 量子力学の復習・確率的な系との対応

3.2 状態数

4. 平衡統計力学の基礎

4.1 平衡状態とは何か？

4.2 等重率の原理とミクロカノニカル分布

4.3 古典系のミクロカノニカル分布

4.4 平衡状態への緩和

4.5 カノニカル分布 (導入)

4.6 カノニカル分布の性質

5. カノニカル分布の応用

5.1 理想気体

5.2 相互作用する気体 (古典系)

5.3 調和振動子

5.4 常磁性とスピン系

6. 結晶の比熱

6.1 古典論

6.2 Einstein モデル

6.3 Debye モデル

7. 黒体放射 (輻射)

7.1 熱放射の普遍性

7.2 空洞放射

8. グランドカノニカル分布

8.1 導入

8.2 性質

8.3 応用: 理想気体 (高温)

9. 量子理想気体

9.1 多粒子系の量子力学

9.2 量子理想気体の平衡状態

9.3 状態密度

9.4 理想 Fermi 気体

9.5 理想 Bose 気体

1.2.9 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 | 7.1 分子粘性と乱流粘性 |
| 6.3 ランジュバン方程式 | 7.2 電磁流体 |
| 6.4 揺動散逸定理 | 7.3 揚力 |
| 7. その他 | |

1.2.10 物理学演習 IV (統計力学 I、II) : 桂 法称、竹内 一将、横溝 和樹、渡邊 光

- | | |
|---------------------|-------------------|
| 1. 統計力学モデル | 3.1 理想フェルミ気体 |
| 1.1 ミクロカノニカルアンサンブル | 3.2 理想ボース気体 |
| 1.2 カノニカルアンサンブル | 4. スピン系 |
| 1.3 理想気体 | 4.1 Ising 模型 |
| 1.4 エントロピー | 4.2 Heisenberg 模型 |
| 1.5 グランドカノニカルアンサンブル | 4.3 転送行列 |
| 2. 波の波動 | 5. 相転移 |
| 2.1 格子振動 | 5.1 平均場近似 |
| 2.2 黒体輻射 | 5.2 Landau 理論 |
| 2.3 電磁場の量子化 | 5.3 繰り込み群 |
| 3. 量子理想気体 | |

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：横山 将志、神谷 好郎 | 7. 相転移：竹内 一将、荻田 裕也 |
| 2. メスバウアー効果：日下 暁人、高倉 理 | 8. レーザー：相川 清隆、川崎 拓也 |
| 3. 加速器実験：中村 哲、永尾 翔、藤田 真奈美 | 9. 生物物理学：川口 喬吾、光山 隼史 |
| 4. 低温：小林 研介、佐々木 健人 | 10. 顕微鏡光学系：岡田 康志、池崎 圭吾、榎 佐和子 |
| 5. 自動計測制御：張 奕勁、河口 真志 | 11. ブラウン運動：安東 正樹、小森 健太郎 |
| 6. 量子演算入門：中辻 知、酒井 明人 | |

1.3.2 光学：小西 邦昭, 井手口 拓郎

- | | |
|------------------|--------------|
| 1. イントロダクション | 8. 回折 |
| 2. マクスウェル方程式と電磁波 | 9. 干渉 |
| 3. 偏光 | 10. 幾何光学 |
| 4. 等方的媒質中の光の伝搬 | 11. ガウスビーム光学 |
| 5. 金属の光学応答 | 12. 光共振器 |
| 6. 光の反射と屈折 | 13. レーザー |
| 7. 結晶光学 | 14. 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 | 2.7 Coulomb 散乱 |
| 1.1 量子力学の復習 | 2.8 Lippmann-Schwinger 方程式 |
| 1.2 電磁場中の荷電粒子 | 3. 多粒子の量子力学 |
| 1.3 一様磁場中の粒子 | 3.1 2 粒子の量子力学 |
| 1.4 一様磁場と一様電場中の粒子 | 3.2 N 粒子の場合 |
| 1.5 Aharonov-Bohm 効果 | 3.3 ヘリウム原子 |
| 1.6 Berry 位相 | 3.4 多電子系 |
| 1.7 スピンを持つ粒子 | 4. 第二量子化 |
| 2. 散乱問題 | 4.1 調和振動子の復習 |
| 2.1 散乱断面積 | 4.2 多数の調和振動子 |
| 2.2 散乱断面積の量子力学的な扱い | 4.3 第二量子化の記法 |
| 2.3 散乱状態の波動関数が満たす方程式 | 4.4 ボソン場の演算子 |
| 2.4 Born 近似 | 4.5 フェルミオンの扱い |
| 2.5 部分波展開 | 4.6 フェルミオン場の演算子 |
| 2.6 共鳴散乱 | |

1.3.4 現代実験物理学 II : 馬場 彩、横山 将志

- | | |
|------------------------|-----------------------|
| 1. 粒子と物質の相互作用 | 5. 宇宙物理学概要 |
| 2. 粒子検出器と粒子加速器 | 6. 宇宙物理実験で使われる光子検出原理 |
| 3. 統計の基礎・実験データの解析と誤差評価 | 7. 宇宙物理実験で使われる光子以外の手段 |
| 4. 相対論的運動学 | |

1.3.5 物理学演習 V : 辻 直人, 安東 正樹, 桂 法称, 加藤 ちなみ, 福田 朝

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1. 量子力学 | 1.21 Bogoliubov 変換 |
| 1.1 調和振動子と摂動論 | 1.22 フェルミオン系と Kramers 縮退 |
| 1.2 平面回転子 | 2. 電磁気学 |
| 1.3 時間に依存する摂動 | 2.1 波動方程式の Green 関数 |
| 1.4 スピンの相互作用 | 2.2 真空中の Maxwell 方程式と対称性 |
| 1.5 結晶場分裂 | 2.3 電磁場中での荷電粒子の運動 |
| 1.6 Aharonov-Bohm 効果 | 2.4 原子の電気双極子モーメント |
| 1.7 Lyman- α 遷移 | 2.5 古典的な原子・分子模型と光ピンセット |
| 1.8 Born 近似 | 2.6 遅延ポテンシャル |
| 1.9 磁場中の原子 | 2.7 振動する電荷からの放射 |
| 1.10 合流型超幾何関数 | 2.8 Lienard-Wiechert ポテンシャル |
| 1.11 一様磁場中の荷電粒子の縮退度 | 2.9 Larmor の公式 |
| 1.12 放物線座標 | 2.10 磁気双極子放射とパルサー |
| 1.13 Coulomb 散乱 | 2.11 同軸ケーブル |
| 1.14 平面波の展開公式 | 2.12 導波管 |
| 1.15 水素分子 | 2.13 電磁場の Lorentz 共変形 |
| 1.16 同種類のフェルミ粒子 2 個からなる系 | 2.14 ロンドン方程式 |
| 1.17 同種粒子の散乱 | 3. 統計力学 |
| 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 | 3.1 2次元イジング模型 |
| 1.19 同種粒子の多体系と第二量子化 | 3.2 線形応答理論 |
| 1.20 Berry 位相とホール伝導度 | 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 | 5. パターン形成 |
| 2. 遺伝情報の流れ・タンパク質の構造と機能 | 6. 確率過程とスケールリング |
| 3. 細胞の構造と機能、細胞内相分離現象 | 7. アクティブマターとトポロジー |
| 4. 多細胞現象の理論と実験 | 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. 脳神経系における情報の流れ

12. 神経活動電位の生成とシナプス伝達

13. 神経ネットワークによる情報処理と脳高次機能

14. 脳の可塑性と記憶

1.3.7 物理数学 III : 山崎 雅人

1. 群の定義、部分群、群の同型、直積、巡回群

2. 中国剰余定理、有限アーベル群の分類、正二面体群、軌道分解、Lagrange の定理、正規部分群、商群

3. 準同型定理、置換群、ケーリーの定理

4. 群の集合への作用

5. 群の線型表現、ユニタリー表現、表現の直積、既約表現と可約表現

6. 群の表現の既約分解の例

7. Schur の補題、指標の直交性

8. 表現の既約分解への応用、テンソル積表現

9. 点群と指標表、量子力学の対称性とユニタリー演算子、テンソル演算子、対称性からの選択則と既約分解

10. 回転群 $O(3)/SO(3)$ 、オイラー角、実射影空間、無限小生成演算子と交換関係

11. リー群とリー環の一般論、リー群とリー環の対応、具体例

12. $U(n)$ と $SU(n)$ 、リー群とリー代数の関係、リー代数の直和、イデアル、商

13. Lie 代数の表現、随伴表現、Cartan-Weyl 基底、 $SU(3)$ のルート系、quark 模型、Gellman-Okubo 公式

1.3.8 固体物理学 I : 小林 研介

1. 固体物理学とは

1.1 電子の発見から量子テクノロジーまで

1.2 固体物理学とは

1.3 エネルギースケール

2. 物質の凝集機構

2.1 結合（凝集）

2.2 共有結合

2.3 イオン結合

2.4 金属結合

2.5 ファン・デル・ワールス結合

2.6 水素結合

2.7 元素の周期表

3. 結晶構造

3.1 原子の周期的配列

3.2 ブラベ格子

3.3 結晶構造の分類

3.4 結晶構造の例

3.5 ミラー指数

3.6 準結晶と非晶質

4. 逆格子

4.1 逆格子の定義

4.2 ブリルアンゾーン

4.3 結晶による回折

5. 格子振動とフォノン

5.1 1次元系の格子振動

5.2 3次元系の格子振動

5.3 フォノン

5.4 格子比熱

5.5 熱伝導

6. 自由電子論

6.1 自由電子モデル

6.2 電子比熱

6.3 ドルーデモデル

6.4 ボルツマン方程式

6.5 電気抵抗の温度依存性

6.6 ウィーデマン・フランツ則

6.7 プラズマ振動

6.8 様々なフェルミ気体

7. バンド理論

7.1 強束縛モデル

7.2 ほとんど自由な電子モデル

7.3 金属と絶縁体

7.4 ブロッホの定理

7.5 バンド構造の例

7.6 多電子系の記述

7.7 結晶中の電子の運動方程式

7.8 ホール（正孔）

7.9 Hall 効果

8. 半導体

8.1 固有半導体

8.2 不純物ドーピング

8.3 不純物半導体のキャリア密度

8.4 半導体における電気伝導

8.5 pn 接合

8.6 ショットキー接合

8.7 半導体技術の現在

9. 展望

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 : 桂 法称

1. 相転移と臨界現象

1.1 相転移, 臨界現象とは何か?

1.2 強磁性 Ising 模型

1.3 摂動論と平均場理論

1.4 Landau 理論

1.5 連続対称性をもつ系

1.6 量子古典対応

1.7 スケーリング仮説

1.8 くりこみ群

2. 線形応答理論

2.1 応答現象

2.2 Boltzmann 方程式

2.3 久保公式

2.4 固体物性への応用

3. 確率過程

3.1 ランダムウォークと拡散方程式

3.2 Brown 運動

3.3 マスター方程式

1.3.11 計算機実験 II : 藤堂 眞治、石河 孝洋、諏訪 秀麿**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：中島 康博

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. サブアトムの世界の概観 2. 素粒子物理学入門 <ul style="list-style-type: none"> 2.1 粒子の種類と相互作用 2.2 量子電磁気学 2.3 弱い相互作用 2.4 電弱統一理論 2.5 ニュートリノ | <ul style="list-style-type: none"> 3. 原子核物理学入門 <ul style="list-style-type: none"> 3.1 原子核の基本的性質 3.2 原子核の構造 3.3 核子の内部構造・クォークモデル 4. 素粒子・原子核と宇宙物理 <ul style="list-style-type: none"> 4.1 宇宙での元素合成 4.2 ニュートリノ天文学 |
|---|---|

1.4.4 計算科学概論：6名によるオムニバス講義・実習

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 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 | <ul style="list-style-type: none"> 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

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. Phase transitions, critical phenomena and universality 2. Mean-field theory, variational principle, and Landau expansion 3. ϕ^4 model and Ornstein-Zernike form 4. Ginzburg criterion 5. Migdal-Kadanoff approximation 6. Fixed-point and scaling operators 7. Critical phenomena and renormalization group | <ul style="list-style-type: none"> 8. Operator product expansion 9. Perturbative renormalization group 10. Wilson-Fisher fixed point 11. Some Applications 12. Berezinski-Kosterlitz-Thouless Transition 13. Renormalization group in tensor network representation 14. Other topics |
|--|---|

1.4.6 現代物理学入門：有田 亮太郎、山崎 雅人

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. 物質中の創発現象 2. 第一原理電子状態計算 3. スピン密度汎関数理論、密度汎関数摂動論、超伝導密度汎関数理論 4. 強相関系の低エネルギー有効モデル導出 5. 室温超伝導への挑戦 6. 機能磁性体の探索 | <ul style="list-style-type: none"> 7. 物理学の階層構造、量子重力の動機と次元解析 8. ブラックホールの熱力学 9. 余剰次元 10. 超弦理論の導入 11. 弦の相互作用、量子重力としての超弦理論 12. 超弦理論とブラックホールのエントロピー、ホログラフィー |
|---|--|

1.4.7 一般相対論：仏坂 健太

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 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 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 3. 重力場の方程式
アインシュタイン方程式の導出 4. 膨張宇宙論 | <ol style="list-style-type: none"> フリードマン方程式、宇宙の熱史、ビッグバン
元素合成 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 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 |
|--|---|

1.4.8 量子光学：相川 清隆

- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 量子力学の基礎 2. 電磁場の量子化 3. 光の量子状態 4. 量子干渉効果 5. 原子の構造 6. 原子と光の相互作用 7. レーザーの発生 | <ol style="list-style-type: none"> 8. 原子のレーザー冷却 9. 原子のレーザー捕捉 10. 原子気体のボース・アインシュタイン凝縮 11. アインシュタイン-ポドロスキー-ローゼン相関 12. 量子光学の巨視的物体への応用 13. 光共振器による物体の運動の冷却 |
|--|--|

1.4.9 固体物理学 II：長谷川 修司

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 物性物理学とノーベル賞 <ol style="list-style-type: none"> 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 <ol style="list-style-type: none"> 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 <ol style="list-style-type: none"> 3.1 格子振動とフォノン <ul style="list-style-type: none"> ・ 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 <ul style="list-style-type: none"> ・ 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 | <ol style="list-style-type: none"> 3.3 熱伝導 <ul style="list-style-type: none"> ・ 熱伝導率 ・ 熱電効果 ・ Wiedemann-Franz の法則 4. 超伝導 <ol style="list-style-type: none"> 4.1 超伝導の発見と現象論 <ul style="list-style-type: none"> ・ 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 <ul style="list-style-type: none"> ・ 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 <ul style="list-style-type: none"> ・ 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 <ol style="list-style-type: none"> 5.1 スピン <ul style="list-style-type: none"> ・ 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
- ・ ラシュバ効果
- ・ トポロジカル絶縁体

1.4.10 プラズマ物理学：辻井 直人

1. Introduction

- 1.1 Plasma parameter and Debye length

2. Particle orbits

- 2.1 ExB drift, curvature and grad-B drift
- 2.2 Magnetic moment, mirror trap and loss cone
- 2.3 Polarization drift
- 2.4 General inhomogeneous B-field

3. Collision operator

- 3.1 Fokker-Planck collision operator
- 3.2 Collision times, beam relaxation

4. Magneto-hydrodynamics (MHD)

- 4.1 MHD equation, frozen-in law

- 4.2 1D and 2D-axisymmetric equilibrium, 1D stability

5. Kinetic theory

- 5.1 Kinetic equation and H-theorem
- 5.2 Gyro-kinetic theory, drift-kinetic theory

6. Transport

- 6.1 Transport coefficients
- 6.2 Transport in a magnetized plasma: classical theory, neo-classical theory

7. Waves

- 7.1 Dielectric tensor, cold plasma waves
- 7.2 Landau damping: kinetic theory of waves
- 7.3 Quasilinear diffusion: wave-particle interactions

1.4.11 宇宙物理学：吉田 直紀

1. 星の進化

- 1.1 元素の起源
- 1.2 星の構造
- 1.3 星内部のエネルギー輸送
- 1.4 熱核融合
- 1.5 ヘリウム燃焼とトリプルアルファ反応
- 1.6 白色矮星
- 1.7 中性子星とブラックホール

2. 観測的宇宙論

- 2.1 標準宇宙モデル
- 2.2 宇宙の熱史
- 2.3 銀河形成と大規模構造
- 2.4 超巨大ブラックホール
- 2.5 ダークマター
- 2.6 将来の観測計画

1.4.12 生物物理学特論 II：川口 喬吾、伊藤 創祐、野口 博司

1. 生命現象と非平衡系（イントロ）

- 1.1 生物系のモデリングと解析手法

1.2 言語モデルの利用と実験

- 1.3 生物知の物理学に向けて

2. 力学系と神経活性のモデリング**2.1 連想記憶とホップフィールドネットワーク****2.2 生成モデル****2.3 Langevin ダイナミクスと拡散モデル****3. 生体膜の構造と機能****3.1 曲面の物理、膜小胞の形状****3.2 曲率誘導タンパク質による膜変形****3.3 赤血球、血流****1.4.13 化学物理学：酒井 明人****1. 水素型原子****2. 多電子原子****2.1 スピン角運動量****2.2 Hartree 近似****2.3 Hartree-Fock 近似****2.4 Hartree-Fock 方程式****2.5 Hartree-Fock 方程式の意味****2.6 LS 多重項****2.7 スピン軌道相互作用****3. 群論入門****3.1 群の定義****3.2 結晶点群****3.3 積表****3.4 群の表現****3.5 指標の表****3.6 可約表現の既約化****4. 結晶場****4.1 結晶場ハミルトニアン****4.2 d 電子系の結晶場と磁性****4.3 f 電子系の結晶場と磁性****5. 孤立原子を越えた取り扱い****5.1 水素分子**

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 | 7. Weak Interactions |
| 2. Basic Concepts | 8. Electroweak Theory |
| 3. Experimental Tools | 9. Quark Model and QCD |
| 4. Decay and Cross Sections | 10. Quark Mixing and CP Violation |
| 5. Dirac Equation | 11. Forefront of Particle Physics |
| 6. Quantum Electrodynamics (QED) | |

1.5.2 場の量子論 II：Simeon Hellerman

- | | |
|---|-----------------------------------|
| 1. Basic ideas of QFT | integral |
| 2. Computations in perturbation theory and introduction to the Feynman functional | 3. QFT beyond perturbation theory |

1.5.3 原子核物理学：Haozhao Liang

- | | |
|--|---|
| 1. Introduction of atomic nuclei | 3.2 Non-perturbative nature and effective interactions |
| 1.1 Basic properties | 4. Nuclear structure and its understandings |
| 1.2 Creations and decays | 4.1 Global descriptions and Hartree-Fock vs density functional theory |
| 1.3 Outstanding features | 4.2 Pairing correlations and BCS vs Bogoliubov |
| 2. Nuclear bulk properties | 5. Nuclear radioactivity and its understandings |
| 2.1 Nuclear masses and liquid drop model | 5.1 Alpha decays |
| 2.2 Nuclear saturation and Fermi-gas model | 5.2 Beta decays |
| 2.3 Magic numbers and shell model | 5.3 Gamma decays |
| 3. Nucleon-nucleon interactions | 6. Selected advanced topics and discussion |
| 3.1 Symmetries and basic properties | |

1.5.4 現代物理と機械学習：蘆田 祐人

- | | |
|-----------------------------|---|
| 1. Introduction | 3. Theory of quantum measurement and open systems |
| 2. Quantum mechanics review | 3.1 Positive operator-valued measure |
| 2.1 Fundamental concepts | 3.2 Kraus operators |
| 2.2 Ensembles | 3.3 Bayesian inference and quantum measurement |
| 2.3 Distance measures | |

- 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 固体物理学 III : 有田 亮太郎

- 1. 物質中の相互作用
- 2. 物質の応答
- 3. フェルミ液体論
- 4. 絶縁体の磁性
- 5. 金属の磁性
- 6. 近藤効果
- 7. 超伝導体の性質
- 8. BCS 理論
- 9. 整数量子ホール効果

1.5.6 非平衡科学 : 伊藤 創祐

- 1. Stochastic processes
Probability, Markov chains, Markov processes, Chapman–Kolmogorov equation, Master equation, Kramers–Moyal expansion, Fokker–Planck equation, Brownian motion, Onsager–Machlup function, Langevin equation, Ito/Stratonovich integral, Kramers equation
- 2. Stochastic thermodynamics
Flux and force, entropy production rate, the second law of thermodynamics, the first law of thermodynamics, the detailed balance condition and the local detailed balance condition, Linear irreversible thermodynamics, Onsager reciprocal relations.
- 3. Dynamical systems
Fixed points and stability, Cumulants and moments, nonlinearity, bifurcations, Limit cycles

1.5.7 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

1.5.8 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

1.5.9 物理学のための科学英語特論：小野 義正

1. 英語論文作成の概要 1

1.1 科学・技術英語 (Scientific Writing in English) とは

1.2 論文審査報告 (英文が悪い)：理由と対策

1.3 わかってもらえる英語論文は「英語の発想で」(Leggett's Trees)

1.4 日本人英語が通じない理由と対策 (脱日本的発想)

1.5 直接翻訳はするな⇒「和文和訳して、簡潔な物主構文へ」

2. 英語論文作成の概要 2

2.1 結論を先に理由を後に

2.2 英語の基本は三拍子 (パラグラフ構造)

2.3 「起承転結」から「結論が先」(序論・本論・結論)のエッセイへ

2.4 否定文を避けて肯定文で書く

2.5 「英語活用メモ」を作り英借文する

3. 英語論文の構成と作法 1

3.1 効率のよい英語論文執筆の進め方

3.2 よい英語論文の書き方

3.3 日本人英語の脱却ポイント

3.4 英語論文執筆の基本的な注意

3.5 英語論文の構成 (IMRAD 方式)

- 3.6 英語論文のフローチャート
- 3.7 英語論文の各項目の書き方 1 (表題, 著者と所属, 抄録, 略語の使用法)
- 4. 英語論文の構成と作法 2
 - 4.1 英語論文の各項目の書き方 2 (序論, 本論, 結果, 考察, 結論, 謝辞, 引用文献, 図と表)
 - 4.2 機械翻訳を用いた英語論文作成法
- 5. 作文技術 1
 - 5.1 文頭, 数字の使い分け
 - 5.2 用語の統一
 - 5.3 リスト項目の一貫性 (並列構造で書く)
 - 5.4 つづりの統一
 - 5.5 短い簡潔な文 (Simple Sentences) を書く
 - 5.6 受動態を避け能動態を使う
 - 5.7 修飾する節や句は修飾対象のすぐ近くに
 - 5.8 文意明確にする言葉 (連結語) を使う
- 6. 作文技術 2
 - 6.1 不必要な単語を省く
 - 6.2 日本人に多い間違いを直す
 - 6.3 自動詞と他動詞の取り違い
 - 6.4 動名詞と不定詞の使い方
 - 6.5 よく使われる略語
 - 6.6 注意すべき単語
- 7. 文法的事項 1
 - 7.1 動詞の適切な時制
 - 7.2 主語を明確に
 - 7.3 冠詞の使い方
 - 7.4 名詞の使い方
 - 7.5 和製英語に注意
 - 7.6 スペリングに注意
- 8. 文法的事項 2・論文投稿
 - 8.1 前置詞の使い方
 - 8.2 注意すべき句読法
 - 8.3 論文投稿の注意点
 - 8.4 審査報告書と論文修正の考え方 (査読者対策)
 - 8.5 参考書
 - 8.6 レポートのフォーマット
- 9. プレゼン 1: 英語プレゼンの概要
 - 9.1 プレゼンテーションとは
 - 9.2 プレゼンテーション (口頭発表) の心構え
 - 9.3 プレゼンテーションのプランニング
 - 9.4 英語プレゼンテーションの構成
 - 9.5 スライドの効果的な使い方
 - 9.6 標準スライド
- 10. プレゼン 2: 英語の構造としゃべり方
 - 10.1 英語の構造 (わかりやすい英語表現)
 - 10.2 講演用英語表現 vs. 論文用英語表現
 - 10.3 わかってもらえる英語のしゃべり方
 - 10.4 うまく聞こえる発音のコツ
 - 10.5 カタカナ英語 (False Friends) に注意
 - 10.6 わかってもらえる英語のしゃべり方 (事前準備)
- 11. プレゼン 3: 発表のマナー・テクニック
 - 11.1 原稿は読むべきか読んではならないか
 - 11.2 聞いてわかる原稿・メモ作成上の注意
 - 11.3 発表練習 (リハーサル)
 - 11.4 発表時のマナー・テクニック
 - 11.5 Non-verbal Communication
 - 11.6 プレゼンテーション当日のコツ
- 12. プレゼン 4: 英語プレゼンの実際
 - 12.1 口頭発表の決まり文句: 最初の挨拶
 - 12.2 プレゼンの流れと決まり文句
 - 12.3 個々のスライドの説明
 - 12.4 具体的な図表の説明
 - 12.5 数字・数式・記号の読み方
 - 12.6 グラフ表現
 - 12.7 図形
 - 12.8 言い回しの工夫
- 13. プレゼン 5: 質疑応答・ポスターセッション・まとめ
 - 13.1 質疑応答 (Q&A) の心構え・指針
 - 13.2 質問が聞きとれなかったとき・質問に答えられないときの対応
 - 13.3 ポスターセッションの利点・発表の技術
 - 13.4 プレゼンの注目点と評価のポイント
 - 13.5 チェックリスト
 - 13.6 Hints for a Successful Conference
 - 13.7 参考書
 - 13.8 補遺 1: 国際会議用アブストラクトの執筆手順
 - 13.9 補遺 2: Professional Self-Introduction

2 各賞受賞者紹介

2.1 有田亮太郎 教授、中辻知 教授

— Clarivate Highly Cited Researcher 2025 —

クラリベイト（Clarivate）社が発表した 2025 年 Highly Cited Researchers（高被引用論文著者）に、有田亮太郎教授と中辻知教授が選出されました。世界の全論文の中で被引用回数が上位 1 %に入る「高被引用論文」を複数発表し、後続の研究に顕著な影響を与えている研究者を認定するものであり、全世界の研究者の約 0.1 %に相当します。有田教授と中辻教授は主にトポロジカル電子構造を持つ物質に着目し、多数の顕著な業績をあげています。有田教授は、物質の電子状態を第一原理計算により明らかにすることで、特異な物性の予言、新たな物質の提案、実験結果の理論的解釈などを行っています。特に、複雑な磁気構造を持つ反強磁性体における新規な物性や超伝導転移温度の精密理論にもとづく新高温超伝導物質の予言など多数の優れた成果を出されています。中辻教授は、物質合成や高度な物性測定技術を駆使することで、特異な量子物性、量子状態を数々発見してきました。特に、トポロジカル磁性体における強相関・スピントロニクス現象、磁気熱電効果などで多数の優れた業績を上げています。20 年ほど前からにわかに注目を集めているトポロジカルな電子状態をもつ物質群の研究は、従来の物性物理学の概念を大幅に拡張する大きな潮流を生み出しており、それらの実デバイス等への応用展開も含めて、両教授は、この分野を強力に牽引し続けています。

2.2 山崎雅人 教授

— Best Paper Prize 2025 (J. Phys. A: Math. Theor.) —

山崎雅人教授が共著で執筆した論文が Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical の Best Paper Prize 2025 を受賞しました。対象となった論文は K. Maruyoshi, T. Okuda, J. W. Pedersen, R. Suzuki, M. Yamazaki and Y. Yoshida “Conserved charges in the quantum simulation of integrable spin chain” J. Phys. A: Math. Theor. **56**, 165301 (2023). です。量子多体系の時間発展をデジタル量子コンピュータで再現する際には、量子ノイズと Trotter 誤差が大きな課題となります。本研究では、保存量を保ちながら時間発展を離散化できる「可積分な Trotter 化」をスピン 1/2 ハイゼンベルグ XXX モデルに適用し、量子コンピュータと古典シミュレーターの両方で実装しました。その結果、本来一定である保存量の期待値がノイズによって徐々に減衰する様子を確認しました。さらに、初期時間発展の詳細な解析を通じて、量子デバイスや量子アルゴリズムのベンチマークへの応用可能性を示すとともに、高次保存量を効率的に生成する新たな方法も提案しました。

2.3 山崎雅人 教授

— 令和 8 年度文部科学大臣表彰科学技術賞 —

山崎雅人教授が令和 8 年度文部科学大臣表彰科学技術賞を受賞しました。山崎教授は、量子場理論の摂動論に基づいて可積分系をゼロから再構成する一般枠組みを構築し、超対称ゲージ理論や 4 次元チャーン＝サイモンズ型理論を用いて、ヤン＝バクスター方程式や格子模型の幾何学的起源を明らかにしました。この成果により、R 行列やヤンギアンなどの可積分構造を場の理論から統一的に導く道筋が示され、従来の断片的理解を超える包括的な理解が可能となりました。さらに、新たな可積分場の理論の無限系列や簾ヤンギアンの発見により、可積分構造の大幅な拡張にも成功しました。本成果は、可積分系・結び目理論・量子群をつなぐ共通基盤を与え、関連分野の発展を促すとともに、長期的には基礎科学や先端計算基盤の強化を通じた社会的波及効果も期待されます。

2.4 酒井 明人 講師

— 令和 7 年度丸文研究奨励賞 —

酒井明人講師が令和 7 年度丸文研究奨励賞を受賞されました。本賞は科学技術の進歩・次世代の産業創出に資する顕著な研究業績を表彰するものです。受賞業績は「トポロジカル磁性体における室温巨大異常ネルンスト効果の発見」です。酒井講師はワイル強磁性体 Co_2MnGa やノーダルウェブ磁性体 Fe_3Ga に代表される一連のトポロジカル磁性体を次々発見し、それらの物質群において従来の値より一桁以上大きい異常ネルンスト効果が室温で発現することを実験的に示してきました。これらの発見はトポロジカル磁性体の典型例を与え、とともに、異常ネルンスト効果を用いた横型熱電変換の産業応用の可能性を切り開きました。ウェアラブルデバイスやフレキシブル高感度熱流センサーとして、省エネ・脱炭素社会に貢献することが期待されます。

2.5 青木匠 助教（横山・中島研）

— ATLAS Thesis Award 2025 —

横山将志研究室の青木匠助教が、大学院生時代に参加していた ATLAS 実験における研究により、2025 年の ATLAS Thesis Award を受賞しました。青木氏は、ミューオン $g-2$ アノマリーに動機づけられた超対称性粒子探索をテーマとし、これまで十分に探索されてこなかった質量階層に着目した新たな手法を提案・実装して探索を行いました。「Search for the Slepton Cascade Decay using Final States with Opposite or Same Sign Three Leptons in the LHC-ATLAS experiment」という博士論文にまとめられたその成果が高く評価され、今回の受賞に至りました。

2.6 高三 和晃 助教（辻研）

— 第 20 回（2026 年）日本物理学会若手奨励賞 —

辻研究室助教の高三和晃氏が、「光電場・電流を利用した動的物性制御の理論的開拓」に関する研究により、第 20 回日本物理学会若手奨励賞（領域 5）を受賞しました。光電場や電流の印加によって生じる非平衡状態は、平衡状態を中心に発展してきた従来の物性物理の枠組みでは捉えきれない新たな現象が現れるフロンティアとして、近年大きな注目を集めています。高三氏はこの分野を先導し、光誘起トポロジカル超伝導、低周波電場による磁性制御、電流印加下で生じる巨大光学応答など、さまざまな理論提案を行ってきました。これらの成果が高く評価され、このたびの受賞につながりました。

2.7 姫岡 優介 助教（古澤研）

— 第 20 回（2026 年）日本物理学会若手奨励賞 —

姫岡優介氏（東京大学大学院理学系研究科）が、「生命と非生命の差異の解明に向けた理論研究」に関する研究により受賞しました。姫岡氏は、細胞増殖の指数増殖相から定常相への遷移とそれに伴うラグタイムの普遍則を理論的に明らかにするとともに、細胞死に対する理論的基盤の構築にも取り組んできました。さらに、in silico 代謝ダイナミクスに対する摂動応答解析を通じて、補因子応答や代謝ネットワーク疎性に内在するハードコードされた応答特性を示し、生命システムの動的性質に関する理解を深めました。これらの研究は、生命現象の普遍的性質を理論的に捉え、生命と非生命を分かち本質的特徴の解明に迫る先駆的成果として高く評価され、今回の受賞に至りました。

2.8 吉田 博信 助教（桂研）

— 第 20 回（2026 年）日本物理学会若手奨励賞 —

桂研究室助教の吉田博信氏が、「 $\text{SU}(N)$ ハバードモデルの基底状態および開放量子多体系の定常状態に関する厳

密な結果」に関する研究により、第 20 回日本物理学会若手奨励賞（領域 11）を受賞しました。吉田氏は量子多体系に対する厳密な理論的アプローチに取り組んでおり、近年、冷却原子系などの人工量子系で実現されつつある $SU(N)$ ハバード模型や、開放量子多体系の解析を進めてきました。具体的には、引力相互作用を持つ $SU(N)$ ハバード模型の基底状態の性質を明らかにするとともに、 η ペアリング状態と呼ばれる励起状態の拡張や、広範なクラスの開放量子系に適用可能な定常状態の一意性を判定する方法について、初等的な証明を与えました。これら一連の成果が高く評価され、今回の受賞に至りました。

2.9 小田部 莊達 特任助教（相川研）

— 第 20 回（2026 年）日本物理学会若手奨励賞 —

相川研究室の小田部氏が「重力波信号増幅システムにおける光熱効果と非線形光学効果」に関する研究により、第 20 回日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。連星中性子星の合体後に放出される高周波重力波には、高密度物質に関する重要な情報が含まれると期待されています。しかし、現在の重力波検出器は高周波帯域における感度が十分でなく、連星合体後の重力波を観測できる見込みは現状薄いと考えられています。小田部氏は、重力波検出器内に生じる「光ばね」を非線形光学効果によって硬化させる手法を実験的に実証しました。硬化した光ばねの共振を利用して重力波信号を増幅することで、高周波帯域における重力波検出器の感度を大幅に向上させられると期待されています。

2.10 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 7 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） 吉田 智治 氏、大賀 成朗 氏、西村 俊亮 氏、梅田 滉也 氏、小川 和馬 氏、藤本 知宏 氏
- 理学系研究科研究奨励賞（修士課程） 影浦 優太 氏、松浦 修大 氏、高橋 正大 氏、愛敬 公太 氏
- 理学部学修奨励賞 金田 啓 氏、山之内 達哉 氏、高山 光希 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]

寄田 浩平
加藤 ちなみ
藤田 真奈美
渡邊 真隆
BOUAZIZ JUBA
深井 康平
櫻井 理人
高山 剛
林 大寿
細谷 亮平
趙 元晟
小幡 真弓
原田 道子
小南 睦栄
高田 秀一郎
中村 展子
張 奕勁
後藤 慎平
芳野 幸奈
BAO JIAKANG
篠原 航平
井上 奈穂美
朝倉 海寛
NM AISWARYA
TATAN ALPIN NOVIANUS
北村 徳隆
澤井 周
坂本 敦子
神庭 光善
安部 清尚
VINK JACOB
渡邊 正理
杉田 有治
LEE KYUNG JIN
吉田 博信
LU SHAOCONG
本間 英
青木 匠
濱口 幸一
北村 泰晟
UGARTE LA TORRE DIEGO RENATO
木村 真人
林 優依
MENIL CHARLES, JU-JIA, SERGE
桑原 孝明
中西 優馬
苔米地 凱大

教授	R7/4/1	採用
助教 (吉田研)	R7/4/1	採用
助教 (中村研)	R7/4/1	採用
助教 (山崎研)	R7/4/1	採用
特任助教 (有田研)	R7/4/1	採用
特任研究員 (桂研)	R7/4/1	採用
特任研究員 (藤堂研)	R7/4/1	採用
特任研究員 (学振 PD・竹内研)	R7/4/1	採用
特任研究員 (学振 PD・中辻研)	R7/4/1	採用
特任研究員 (常行研)	R7/4/1	採用
特任研究員 (常行研)	R7/4/1	採用
特任研究員 (吉田研)	R7/4/1	採用
特任専門職員 (藤堂研)	R7/4/1	採用
特任専門職員 (有田研)	R7/4/1	採用
一般技術職員 (技術室)	R7/4/1	採用
主任 (物理事務)	R7/4/1	配置換え
准教授	R7/5/1	配置換え昇任
特任助教 (藤堂研)	R7/5/1	採用
特任研究員 (中辻研)	R7/5/1	採用
特任研究員 (山崎研)	R7/5/1	採用
特任研究員 (有田研)	R7/5/1	採用
特任専門職員 (物理学専攻)	R7/5/1	採用
技術補佐員 (中辻研)	R7/5/1	採用
特任研究員 (竹内研)	R7/5/16	採用
特任研究員 (中辻研)	R7/5/16	採用
助教 (鈴木研)	R7/6/16	配置換え
特任研究員 (中辻研)	R7/6/16	採用
事務補佐員 (寄田研)	R7/7/1	採用
特任研究員 (相川研)	R7/8/1	採用
特任助教 (中島研)	R7/9/1	採用
GSGC 客員教授 (馬場研)	R7/9/15	採用
特任研究員 (藤堂研)	R7/9/16	採用
教授	R7/10/1	採用
GSGC 客員教授 (中辻研)	R7/10/1	採用
助教 (桂研)	R7/10/1	採用
特任研究員 (常行研)	R7/10/1	採用
特任研究員 (岡田研)	R7/10/1	採用
助教 (横山研)	R7/11/16	採用
教授	R8/1/1	昇任
助教 (有田研)	R8/1/1	採用
助教 (杉田研)	R8/1/16	採用
助教 (寄田研)	R8/2/1	採用
助教 (福嶋研)	R8/2/1	採用
特任研究員 (中辻・酒井研)	R8/2/1	採用
特任研究員 (藤堂研)	R8/2/1	採用
特任研究員 (辻研)	R8/2/1	配置換え
技術補佐員 (中辻研)	R8/3/1	採用

[物理学教室から移られた方々]

中桐 洸太	助教（横山研）	R7/8/31	異動 配置換え昇任
BOUAZIZ JUBA	特任助教（有田研）	R7/8/31	退職
大森 寛太郎	助教（松尾研）	R7/9/30	退職
山本 新	助教（福嶋研）	R7/9/30	退職
小幡 真弓	特任研究員（吉田研）	R7/9/30	退職
VINK JACOB	客員准教授（馬場研）	R7/10/24	退職
太田 裕朗	特任研究員（中辻研）	R7/10/31	退職
LEE KYUNG JIN	客員教授（中辻研）	R7/11/30	退職
渡邊 光	助教（有田研）	R7/11/30	退職
田中 克大	特任助教（中辻・酒井研）	R7/11/30	退職
峰本 紳一郎	助教（専攻長預かり）	R7/12/31	退職
桜井 理人	特任研究員（藤堂研）	R7/12/31	退職
西川 幸江	特任研究員（中辻研）	R7/12/31	退職
NM AISWARYA	特任研究員（竹内研）	R8/1/15	退職
石河 孝洋	特任助教（常行研）	R8/2/28	退職
松尾 泰	教授	R8/3/31	定年退職
長谷川 修司	教授	R8/3/31	定年退職
高三 和晃	助教（辻研）	R8/3/31	配置換え昇任
深井 康平	特任研究員（桂研）	R8/3/31	退職
LU SHAOCONG	特任研究員（常行研）	R8/3/31	退職
日向 理華	特任研究員（中辻研）	R8/3/31	退職
阿部 恵子	特任専門職員（中辻研）	R8/3/31	退職
井上 奈穂美	特任専門職員（物理学専攻）	R8/3/31	退職
岡山 直寛	一般職員（物理教務）	R8/3/31	配置換え

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 岡田、小林 横山（将） 藤堂 中辻、古澤 濱口（理）、日下（大学院）、竹内（学生） 安東、鈴木、岡本 安東（XPS）、桂（FoPM）、古澤（IGPEES）、 有田・蘆田・島野（MERIT）、藤堂（Q-STEP）、 村尾（FoPM）	小山、島田、中村、岡山 物理教務 物理教務 物理教務 物理教務 寺山、高田 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	福嶋 島野 樺島、Liang 諸井	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 基金	濱口、竹内 山崎、有田、鈴木 横山（将）、山崎、樺島、竹内、日下	物理教務 物理教務 物理事務
【奨学金・支援】		
奨学金 博士課程学生支援制度 就職 部屋割 ネットワーク室 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 広報 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 小林 馬場 辻 中村 中島 岡本 中村（統括、試作室、安全衛生） 安東（学生実験） 岡本（低温） 藤堂（IT 関連） 諸井（理）、桂、古澤 福嶋、相川、川口 中島、酒井（明） 鈴木、小西、張 馬場 樺島 小西 藤堂、蘆田 相川 岡本 松尾、常行、中辻、辻、[宮下、湯本] 酒井（明）、Liang [馬場良子（理/URA）] 松尾（専攻長）、横山（将）（専攻主任） 松尾（専攻長）	物理教務 島田 中村（就職室）、小山 島田 物理ネットワーク担当 寺山 物理事務 寺山 下澤 寺山、高田 寺山 物理ネットワーク担当 理学図書館 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

- 2025 年 6 月 11 日（水）15:00-16:30 ※中止

Luis A. Jauregui 氏（カリフォルニア大学アーバイン校 (UC Irvine)）

“Manipulating Topological Phases and Correlated States in HfTe_5 ”

- 2025 年 6 月 19 日（木）10:30-12:00

Zhi-Xun Shen 氏 (Departments of Physics and Applied Physics Stanford University, California, USA)

“Local probe of bulk and edge states in a fractional Chern insulator”

- 2025 年 7 月 11 日（金）17:00-18:30

東後 篤史 氏（NIMS）

「第一原理フォノン計算の応用とコード実装：科学技術計算を用いた研究戦略」（ミレニアムサイエンスフォーラム 共催講演会）第 23 回（2021 年）サー・マーティン・ウッド賞受賞記念講演

- 2025 年 9 月 18 日（木）15:30-17:00

Marcos VALDES 氏（Italian National Institute for Astrophysics and VIS）

“Interactive VR, Metaverse, Hybrid Multisensory Experiences for Scientific Research and Education”

- 2025 年 10 月 7 日（火）15:15-16:40

Karsten Danzmann 氏 (Director at Max Planck Institute for Gravitational Physics / AEI Hannover)

“Low frequency Gravitational Wave Astronomy”

- 2025 年 10 月 14 日（火）10:30-12:00

Florent Krzakala 氏（EPFL）

“From Statistical Physics to Machine Learning”

- 2025 年 10 月 14 日（火）15:00-16:30

Daniel C. Worledge 氏（IBM 基礎研究所（アルマデン）および磁気ランダムアクセスメモリ（MRAM）部門）

“Spin-Transfer Torque Physics and Applications”

- 2025 年 10 月 27 日（月）15:30-17:00

Thierry Martin 氏（Aix-Marseille Université (France)）

“Anyon braiding, fractional charge, scaling dimension, and statistical angle in the fractional quantum Hall effect”

- 2025 年 11 月 4 日（火）15:00-16:30
Pawel M. Wocjan 氏（IBM T. J. Watson Research Center）
“An Introduction to Quantum Algorithms”
- 2025 年 12 月 5 日（金）15：00～17：30
長谷川 裕司 氏（ウィーン工科大学）「猫の笑いと裸の中性子 一量子干渉実験の挑戦」（第 71 回）仁科記念講演会
村尾 美緒（東京大学大学院理学系研究科）「量子の重ね合わせの不思議と情報処理」（第 71 回）仁科記念講演会
- 2025 年 12 月 23 日（火）13:00-14:30
野村 清英 氏（九州大学 理学研究院）
「ボース・アインシュタイン凝縮とゆらぎ」
- 2026 年 1 月 6 日（火）15:00-17:00
古賀 太一朗 氏、三塚 岳 氏（高エネルギー加速器研究機構）
「SuperKEKB 加速器と Belle II 実験で挑む未踏のビーム衝突性能と未知の素粒子物理」
- 2026 年 2 月 6 日（金）15:00-16:30
竹中 彰 氏（中山大學）
“First Neutrino Oscillation Measurements with the World’s Largest Liquid Scintillator Detector (JUNO, China)” 「世界最大の液体シンチレータ検出器によるニュートリノ観測」
- 2026 年 3 月 3 日（火）13:30-15:00
長谷川 修司 教授（東京大学大学院理学系研究科・最終講義）
「表面と私」
- 2026 年 3 月 3 日（火）16:00-17:30
松尾 泰 教授（東京大学大学院理学系研究科・最終講義）
「粒子を語らぬ素粒子研究者の時代」

6 物理学教室コロキウム

- 第 149 回コロキウム 2025 年 4 月 11 日（金）17:00-18:30
山崎 雅人 氏（東京大学大学院理学系研究科）
「量子重力とワームホールの謎」
- 第 150 回コロキウム 2025 年 5 月 9 日（金）17:00-18:30
鈴木 大介 氏（東京大学大学院理学系研究科）
「RI ビームによる原子核・核物質研究の新展開」
- 第 151 回コロキウム 2025 年 6 月 20 日（金）17:00-18:30
酒井 崇匡 氏（東京大学大学院工学系研究科）
「高分子ゲルの精密な物理学」
- 第 152 回コロキウム 2025 年 7 月 25 日（金）17:00-18:30
川上 則雄 氏（理化学研究所 基礎量子科学研究プログラム、立命館大学大学院理工学研究科）
「強相関系の物理とハバードモデル ～so simple yet so rich～」
- 第 153 回コロキウム 2025 年 10 月 3 日（金）16:00-17:30
Jacco Vink 氏（アムステルダム大学）
“Supernova remnants as Galactic cosmic-ray accelerators”
- 第 154 回コロキウム 2025 年 10 月 17 日（金）16:00-17:30
張 奕勁 氏（東京大学大学院理学系研究科）
「二次元物質の対称性制御による物性開拓」
- 第 155 回コロキウム 2025 年 11 月 21 日（金）16:00-17:30
Kyung-Jin Lee 氏（Korea Advanced Institute of Science and Technology）
“Longitudinal Spin Pumping and Quantum Spin Transfer”
- 第 156 回コロキウム 2025 年 12 月 26 日（金）16:00-17:30
沙川 貴大 氏（東京大学大学院工学系研究科）
「情報熱力学：歴史から最前線まで」
- 第 157 回コロキウム 2026 年 1 月 23 日（金）16:00-17:30
寄田 浩平 氏（東京大学大学院理学系研究科）
「新しい素粒子物理への挑戦：暗黒物質 × 素粒子実験 × 未来展望」

7 金曜ランチトーク

- 2025 年 5 月 9 日（金）13:00-13:25

Physics Faculty Meeting on May 9, 2025

光山 隼史 助教 (川口研究室) Shunshi Kohyama (Kawaguchi Gr.)

“Emergence of higher-order protein function in reconstituted systems”（和訳：再構成系におけるタンパク質高次機能の発現）

- 2025 年 5 月 23 日（金）13:00-13:25

Physics Faculty Meeting on May 23, 2025

蒔田 裕也 助教 (竹内研究室) Yuya Karita (Takeuchi Gr.)

“Population dynamics of proliferating microbes in spatial structure”（和訳：空間構造中で増殖する微生物の集団動態）

- 2025 年 6 月 27 日（金）13:00-13:25

Physics Faculty Meeting on June 27, 2025

高倉 理 助教 (日下研究室) Satoru Takakura (Kusaka Gr.)

“CMB polarization measurements and ice clouds”（和訳：宇宙マイクロ波背景放射偏光観測と氷雲）

- 2025 年 7 月 25 日（金）13:00-13:25

Physics Faculty Meeting on July 25, 2025

渡邊 光 助教 (有田研究室) Hikaru Watanabe (Arita Gr.)

“Theoretical study for versatile antiferromagnets”（和訳：機能性反強磁性体の理論研究）

- 2025 年 11 月 14 日（金）13:00-13:25

Physics Faculty Meeting on November 14, 2025

渡邊 真隆 助教 (山崎研究室) Masataka Watanabe (Yamazaki Gr.)

“The Only Effective Theory to Write”（和訳：たった一つの有効な理論）

- 2025 年 11 月 28 日（金）13:00-13:25

Physics Faculty Meeting on November 28, 2025

吉田 博信 助教 (桂研究室) Hironobu Yoshida (Katsura Gr.)

“Rigorous approach to quantum many-body systems: complete positivity and reflection positivity”（和訳：量子多体系に対する厳密なアプローチ：完全正值性と鏡映正值性）

- 2025 年 12 月 12 日（金）13:00-13:25

Physics Faculty Meeting on December 12, 2025

青木 匠 助教 (横山将志研究室) Takumi Aoki (M. Yokoyama Gr.)

“Search for slepton cascade decay motivated by the muon $g-2$ anomaly in the LHC-ATLAS experiment” (和訳：LHC-ATLAS 実験における、ミューオン $g-2$ アノマリーに動機づけされたスレプトンカスケード崩壊の探索)

- 2026 年 2 月 13 日（金）13:00-13:25

Physics Faculty Meeting on February 13, 2026

北村 徳隆 助教 (鈴木研究室) Noritaka Kitamura (Suzuki Gr.)

“Exploring emergent structures in unstable nuclei through nuclear spectroscopy” (和訳：不安定核に現れる新奇な構造を探る核分光研究)

8 理物同窓会

理学部物理学科・大学院理学系研究科物理学専攻（以下、「理物」）は、毎年、学部から約 70 名、修士課程から約 110 名、博士課程から約 70 名という多数の人材を社会に送り出しており、極めて大きな人的ネットワークを形成している。しかしながら、これまで理物として公式な同窓会活動は実施されてこなかった。

このような状況を踏まえ、理物に関わる卒業生・修了生・在学生・教員・職員（OBOG を含む）の親睦を深め、世代を超えたつながりを構築することによって、理物コミュニティの一層の強化を図ることを目的として、2025 年度に「理物同窓会」（会長：小林 研介 教授、年度ごとに交代）を設立した。

設立にあわせ、第一回理物同窓会を 2025 年 10 月 18 日（土）の東京大学ホームカミングデイに、本郷キャンパスおよびオンラインにて開催した。

第一回理物同窓会

日時： 2025 年 10 月 18 日（土）14:00–17:00

場所： 理学部 4 号館 1220 号室・1320 号室（オンライン配信併用）

対象： 理物の卒業生・修了生・在学生・教員・職員（OBOG を含む）および同伴者

プログラム

- 13:30 開場
- 14:00–15:00 理物同窓会 総会（司会：小林 研介 教授）
 1. 趣旨説明 横山 将志 専攻主任（5 分）
 2. 挨拶（最近の理物の状況と今後の展望） 松尾 泰 専攻長（10 分）
 3. 校友会へのお誘い 東京大学校友会 衛藤 龍 氏（5 分）
 4. ミニ談話会
 - ・ 長谷川 修司 教授（20 分）
 - ・ 山崎 雅人 教授（20 分）
- 15:00–17:00 交流会

現地参加者約 180 名、オンライン参加者約 50 名の参加を得て、盛況のうちに終了した。本同窓会の実施にあたっては、本学が利用している同窓会プラットフォームサービス「CHIMER」を活用するとともに、東京大学校友会の支援を受けた。

今後も、東京大学ホームカミングデイに合わせて、理物同窓会を毎年継続的に開催する予定である。

年次研究報告 2025年度

2026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 上 田 正 仁
編 集 鈴 木 大 介
酒 井 明 人
中 村 ち か 子