

Department of Physics
School of Science
The University of Tokyo

Annual Report

2 0 2 3

令和 5 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

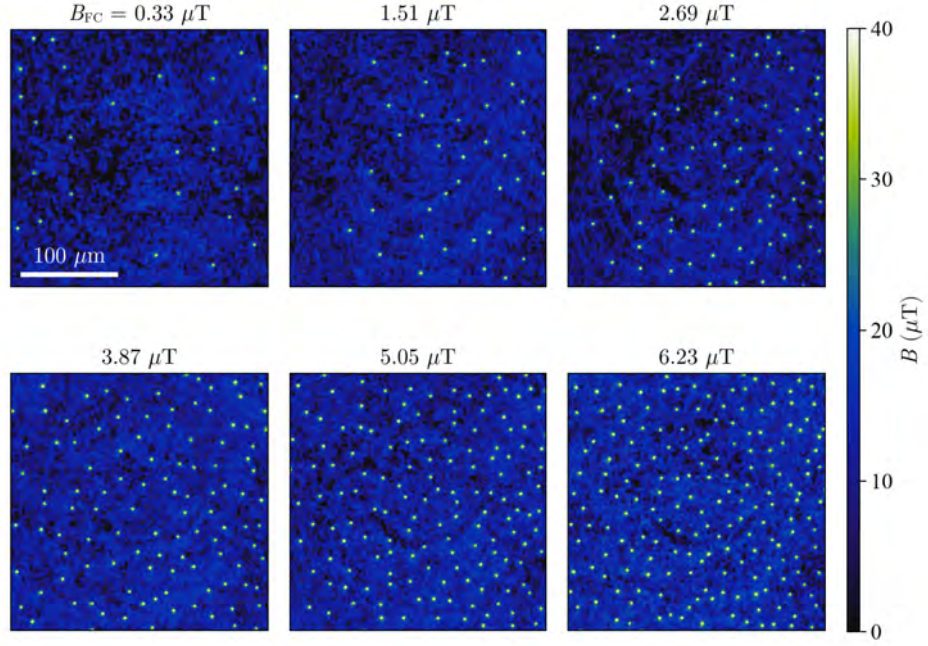


図 1: 量子スピン顕微鏡による超伝導量子渦の磁場イメージング：超伝導体を磁場中冷却すると量子渦が生じる。超伝導体直上に置いたダイヤモンドの NV 中心を用いて量子渦から発生する磁場を可視化した。用いた超伝導体は $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 薄膜（転移温度 93.9 K）であり、測定温度は 60 K である。各渦における磁場がほとんど同じ（ $\sim 40 \mu\text{T}$ ）であることは磁束の量子化を反映する。図上部に示した印加磁場 B_{FC} と渦の個数は比例する。（小林研究室）

Magnetic field imaging of superconducting quantum vortices by quantum spin microscope: Quantum vortices are generated when a superconductor is cooled in a magnetic field. The magnetic field out of them is visualized using NV centers in a diamond placed directly above the superconductor. A $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin film (critical temperature: 93.9 K) is used, and the measurement temperature is 60 K. The field from each vortex is nearly the same ($\sim 40 \mu\text{T}$), reflecting the magnetic flux quantization. The vortices increase proportionally to the applied magnetic field B_{FC} shown at the top of each figure. (Kobayashi Group)

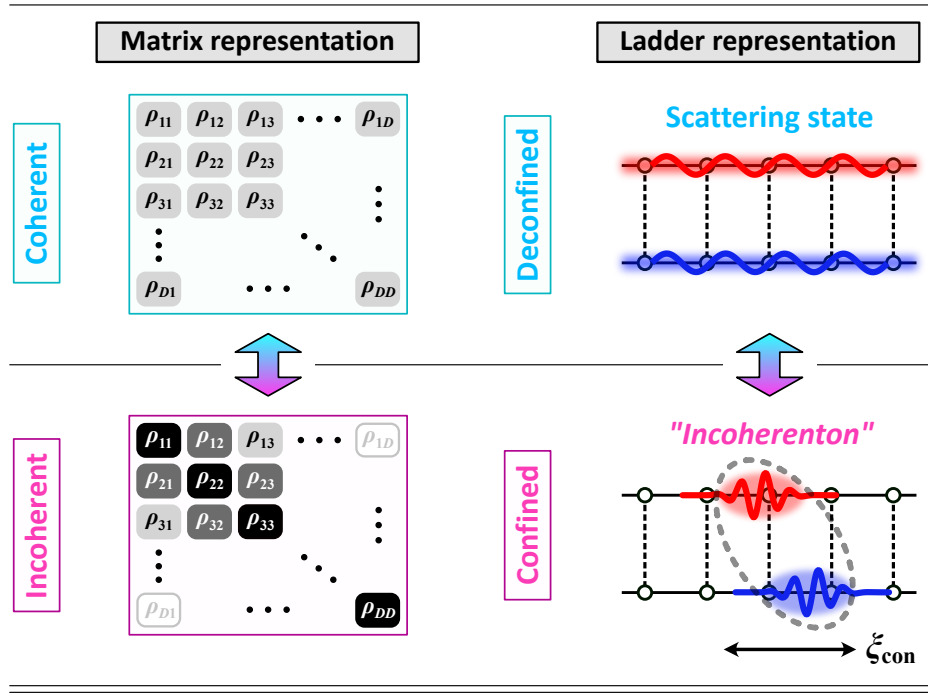


図 2: 開放量子多体系におけるデコヒーレンスを記述する準粒子の概念図。密度行列（図の左列）はベクトル表示することによりラダー上の量子状態（図の右列）にマップすることができる。ここで、ラダーの上の鎖は密度行列のケット自由度、下の鎖はブラ自由度に対応する。このマッピングによって、開放量子系の密度行列の時間発展の生成子（リウビリアン）における散逸項は、鎖間の非エルミートな相互作用項とみなせる。この相互作用によって鎖間に束縛状態（この準粒子をインコヒーレントンと呼ぶ）が形成されると、元の密度行列の言葉では非対角要素（量子コヒーレンス）が距離と共に指数的に減衰する。T. Haga *et al.*, Phys. Rev. Research **5**, 043225 (2023). (上田研究室)

Schematic illustration of a quasiparticle of decoherence processes in an open quantum many-body system. A density matrix (left column) can be mapped to a quantum state on a ladder (right column) by a vector representation. Here, the upper (lower) chain of the ladder corresponds to the ket (bra) degrees of freedom of the density matrix. With this mapping, the dissipative terms in the generator (Liouvillian) of the time evolution of the density matrix of an open quantum system can be regarded as non-Hermitian interchain interaction terms. When an interchain bound state (this quasiparticle is called an incoherenton) is formed by this interaction, the off-diagonal components (quantum coherence) of the original density matrix decay exponentially with distance. T. Haga *et al.*, Phys. Rev. Research **5**, 043225 (2023). (Ueda group)

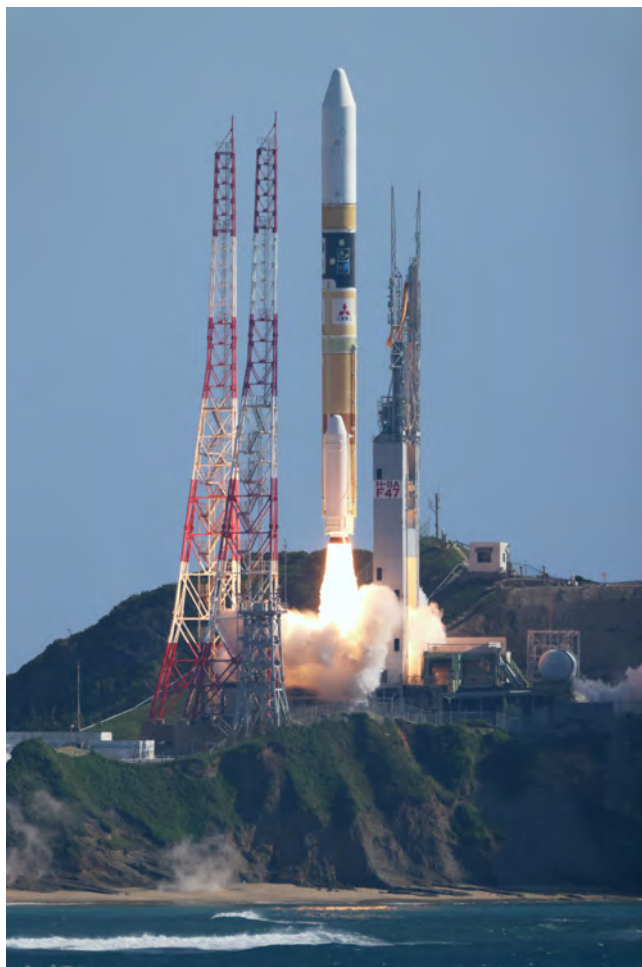


図 3: XRISM 衛星打ち上げの様子。2023 年 9 月 7 日に種子島より H2A ロケットにて打ち上げられた。衛星は 2023 年 12 月にファーストライト、2024 年 2 月には定常運用に移行し、今後順調に天体観測をしていくと期待している。(馬場研究室、提供: 三菱重工)

The launch of the XRISM satellite. The satellite was launched on September 7, 2023, from Tanegashima by an H2A rocket. The satellite succeeded to take the first light picture in December 2023 and entered the regular operation period in February 2024, and is expected to perform astronomical observations smoothly. (Bamba group, courtesy of Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

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5年度(2023年4月-2024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、准教授として、川口喬吾氏(生物物理学実験・理論:理化学研究所)が着任されました。また、浅井祥仁教授が高エネルギー加速器研究機構機構長、北川健太郎講師が本学物性研究所准教授として転出されました。また、須藤靖教授、樋口秀男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。大塚孝治名誉教授がフンボルト賞を、藤森淳名誉教授が第7回放射光科学賞を受賞されました。また、岡田康志教授が第16回中谷賞大賞を、大栗真宗氏(須藤研、現千葉大学)が日本学士院賞を、川口由紀氏(上田研、現名古屋大学)、酒井広文教授が令和5年度文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門)を、川口喬吾准教授が The Early Career Scientist Prizes を受賞されました。さらに、横溝和樹助教(蘆田研)が第40回井上研究奨励賞を受賞されました。また、天野智仁氏、稲村寛生氏、上田篤氏、平井誉主在氏、田中宏明氏が令和5年度理学系研究科研究奨励賞(博士課程)を、永山龍那氏、大嶽竜樹氏、金川隼人氏、新井翔大氏が同研究奨励賞(修士課程)を、松浦修大氏、石川雅隆氏、愛敬公太氏が令和5年度理学部学修奨励賞を受賞しました。

これまで大学の活動にいろいろな制約を及ぼしてきた新型コロナウイルス感染症が令和5年5月に5類に移行し、大学生生活が以前の状態に復帰した記念すべき1年となりました。これまで段階的に制約が緩和されてきた、学部や大学院の講義も物理学実験、物理学ゼミナール、特別実験・理論演習も対面形式に戻りましたし、また制約がある形で行われてきた五月祭、ビアパーティ、ニュートン祭、教職員親睦会、理交会などの学内イベントも以前の形で行うことができました。コロナ前に戻った生活の中で、コロナ禍で得た経験・知識をどのようにして生かしていくのかという新しいフェーズに入ったと感じます。

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。

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

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

物理学教室は、今後も社会における基礎科学の新たな役割を模索しつつ、持続可能な基礎研究・教育の実現に向けて努力してまいります。先輩の先生方、卒業生の皆様、ならびに関係各位には、引き続きご指導ご鞭撻をお願い申し上げます。

この年次研究報告は、蘆田祐人准教授、中島康博准教授、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。

2024年5月1日
物理学専攻 専攻長・物理学科 学科長
松尾 泰

目次

I	研究室別 2023 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	4
1.3	素粒子論研究室	9
1.3.1	現象論	9
1.3.2	弦理論, 場の理論全般	10
2	原子核・素粒子実験	15
2.1	原子核実験グループ (中村研究室)	15
2.1.1	JLab における Λ ハイパー核電磁生成分光実験	15
2.1.2	MAMI における崩壊 π^- 中間子分光	17
2.1.3	ELPH におけるハイパー核研究	17
2.1.4	J-PARC における次世代ハイパー核分光実験	18
2.1.5	異分野融合研究	19
2.2	横山将志・中島研究室	20
2.2.1	加速器による長基線ニュートリノ振動実験 (T2K 実験)	20
2.2.2	スーパーカミオカンデ実験	21
2.2.3	ハイパーカミオカンデ計画	22
2.2.4	新検出器開発	23
2.3	浅井研究室	25
2.3.1	LHC・ATLAS 実験での研究	25
2.3.2	小規模実験で探る標準理論を超えた新しい素粒子現象の探索	26
3	物性理論	31
3.1	小形研究室	31
3.1.1	熱応答・熱電応答の理論	31
3.1.2	強相関電子系の理論	31
3.1.3	スピン軌道相互作用	32
3.1.4	超伝導の理論	32
3.1.5	軌道磁場効果	33
3.1.6	有機伝導体の理論	33
3.1.7	カイラリティの物理	34
3.2	常行研究室	36
3.2.1	THz 領域の複素誘電率計算手法の開発	36
3.2.2	進化的アルゴリズムとニューラルネットワークポテンシャルによる構造探索	37
3.2.3	データ同化結晶構造探索	38
3.2.4	相関波動関数理論トランスコリレイティッド法の開発	38
3.2.5	水素化物ペロブスカイトの超伝導	38
3.2.6	非熱的レーザー加工の微視的シミュレーション	38
3.3	藤堂研究室	40

3.3.1	強相関係のシミュレーション手法	41
3.3.2	強相関多体系における新奇な状態・相転移現象	41
3.3.3	量子計算と量子アルゴリズム	42
3.3.4	機械学習と統計物理	43
3.3.5	次世代並列シミュレーションのためのオープンソースソフトウェア・ライブラリ	43
3.4	桂研究室	46
3.4.1	強相関係	46
3.4.2	トポロジカル磁性	47
3.4.3	散逸のある量子多体系	48
3.4.4	数理物理学・統計力学	48
3.5	樺島研究室	51
3.5.1	対角線形ネットワークを用いたスパース推定	52
3.5.2	圧縮センシングに基づくレーダー検出の性能分析	52
3.5.3	シミュレーテッドアニーリングを用いた 0/1 行列分解	52
3.5.4	グループテストの統計力学的解析	52
3.5.5	ベイズ学習による格子タンパク質デザイン	52
3.5.6	異方拡散パラメータの EM アルゴリズムを用いた推定	53
3.5.7	動的モード分解法を用いた量子多体系の実時間発展の長時間予測	53
3.5.8	自己学習の平均場理論	53
3.5.9	アンダーバギング法の平均場理論	54
3.5.10	非凸損失に対する交互最適化法のダイナミクスの解析	54
3.6	辻研究室	55
3.6.1	超伝導体のダイナミクス	56
3.6.2	量子開放系のダイナミクス	57
3.6.3	量子多体傷跡状態	58
3.6.4	量子多体系の動的応答	58
3.7	蘆田研究室	62
3.7.1	開放系・非エルミート物理	62
3.7.2	強結合量子光-物質系の物理	63
3.7.3	統計物理・機械学習	64
4	物性実験	66
4.1	長谷川研究室	66
4.1.1	表面/界面での輸送・磁性特性	66
4.1.2	新しい装置・手法の開発	68
4.2	岡本 研究室	71
4.2.1	劈開表面に形成された 2 次元電子系	71
4.2.2	金属超薄膜の超伝導	72
4.3	島野研究室	74
4.3.1	超伝導体	74
4.3.2	ディラック、ワイル半金属	76
4.3.3	時間分解磁気光学顕微鏡の開発	77
4.4	高木・北川研究室	80
4.4.1	スピン軌道相互作用を利用した擬スピン量子相	80
4.4.2	高圧物性研究	80
4.5	林研究室	84
4.5.1	スピン流物性	84
4.5.2	非線形光学効果	84
4.5.3	強結合状態の探索	84
4.6	小林研究室	87

4.6.1	量子計測	87
4.6.2	量子センサの性質と量子制御	87
4.6.3	量子センサの物性計測応用	88
4.6.4	メゾスコピック系の量子輸送	89
4.7	中辻・酒井研究室	92
4.7.1	トポロジカル磁性体における新規量子現象の探索と巨大応答	93
4.7.2	多体系における量子エンタングルメント状態	94
5	一般物理理論	98
5.1	宇宙理論研究室 (須藤・吉田)	98
5.1.1	観測的宇宙論	98
5.1.2	星・惑星形成	99
5.1.3	系外惑星	99
5.2	村尾研究室	103
5.2.1	高階量子計算	103
5.2.2	量子エラー訂正	104
5.2.3	分散型量子情報処理	105
5.2.4	量子機械学習	105
5.2.5	量子リソース理論	105
5.3	上田研究室	108
5.3.1	冷却原子気体・非平衡開放系	109
5.3.2	量子論・統計力学と情報理論・人工知能の融合	110
5.4	横山 (順) 研究室	112
5.4.1	宇宙論: 時空構造	112
5.4.2	宇宙論: 物質の起源と進化	113
5.4.3	重力波検出器 KAGRA データ解析	114
5.4.4	時間領域天文学	115
6	一般物理実験	119
6.1	江尻・辻井研究室	119
6.1.1	TST-2 実験の概要	119
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	119
6.1.3	誘導駆動プラズマ	121
6.1.4	計測器開発	121
6.1.5	高周波による誘導結合型プラズマ生成装置の開発	122
6.1.6	共同研究	122
6.2	酒井広文 研究室	125
6.2.1	レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展: 従来 of 経緯	125
6.2.2	レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展: 今年度の成果	126
6.2.3	その他	128
6.3	安東研究室	129
6.3.1	大型重力波望遠鏡 KAGRA	129
6.3.2	宇宙空間重力波望遠鏡	130
6.3.3	ねじれ型重力波検出器 TOBA	130
6.3.4	アクシオンダークマター探索実験 DANCE	132
6.3.5	基礎物理・量子光学実験	132
6.3.6	量子スクイーミングによるハイゼンベルグ限界への到達実験	132
6.4	馬場研究室	135
6.4.1	宇宙物理現象観測に関する研究	135
6.4.2	将来宇宙計画に関する開発	135

6.5	日下研究室	141
6.5.1	POLARBEAR 実験	142
6.5.2	Simons Array 実験	142
6.5.3	Simons Observatory 実験	142
6.5.4	次世代 CMB 実験用 装置開発	143
6.5.5	マグノンをういたアクシオン探索	143
6.6	竹内研究室	145
6.6.1	ソフトマター系の非平衡実験	145
6.6.2	生物系の非平衡実験	145
6.6.3	非線形動力学によるアプローチ	147
6.7	三尾研究室	150
6.7.1	レーザー加工の物理	150
6.7.2	KAGRA project	152
7	生物物理	154
7.1	能瀬研究室	154
7.1.1	神経活動ダイナミクスおよび行動出力の数理統計解析	154
7.1.2	行動制御回路を構成する神経細胞の同定と機能解析	155
7.1.3	機能的神経回路の発生と進化	157
7.2	樋口研究室	159
7.2.1	はじめに	159
7.2.2	ストレス環境下における細胞内小胞の動態に関する研究	160
7.2.3	負荷を伴う並発反応における first-passage time の 導出と生体への応用	160
7.2.4	情報理論を用いた骨格筋ミオシンの協同性の定量的評価	160
7.2.5	ダイニン分子の多彩な性質が制御の根底にある鞭毛の振動における	161
7.2.6	キネシン 1 分子の高速後進と解離を幅広い荷重下で測定	161
7.3	岡田研究室	162
7.3.1	蛍光顕微鏡のためのプローブ開発	162
7.3.2	顕微鏡技術の応用	163
7.4	古澤研究室	165
7.4.1	遺伝子制御ネットワークが持つ汎化能の解析	165
7.4.2	化学反応ネットワーク理論に基づいた、触媒反応系の可制御集合計算手法の構築	166
7.4.3	代謝動力学モデルを用いた低温における代謝ダイナミクスの解析	166
7.4.4	環境中の炭素資源が細菌種間の相互作用へ及ぼす影響	166
7.4.5	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	167
7.4.6		167
7.5	川口研究室	171
7.5.1	細胞集団運動と非平衡物理	171
7.5.2	形態進化とデータ解析	171
7.5.3	細胞内ヘテロポリマーの理論と実験	171
7.5.4	生物系にインスパイアされた理論物理	171
8	技術部門	173
8.1	実験装置試作室	173
8.1.1	利用状況	173
8.1.2	設計・加工の自動化の推進	173
8.2	技術室	173
8.2.1	論文審査会 Web システムの改修 (寺山、南野)	173
8.2.2	安全衛生 (寺山)	173
8.2.3	寒剤管理 (寺山)	173
8.2.4	IT 関連 (南野)	173

8.2.5	学生実験 (佐伯)	173
8.2.6	技術交流 (佐伯、寺山、渡辺 (生物科学専攻))	174
8.2.7	各種委員会	174
II	Summary of group activities in 2023	175
1	Fukushima Group	176
2	Liang Group	176
3	High Energy Physics Theory Group	177
4	Nakamura Group	178
5	Yokoyama(M)-Nakajima Group	179
6	Asai group	180
7	Ogata Group	181
8	Tsuneyuki Group	182
9	Todo Group	183
10	Katsura Group	184
11	Kabashima Group	185
12	Tsuji Group	185
13	Ashida Group	186
14	Hasegawa Group	187
15	Okamoto Group	188
16	Shimano Group	188
17	Takagi-Kitagawa Group	189
18	Hayashi Group	190
19	Kobayashi Group	191
20	Nakatsuji-Sakai Group	193
21	Theoretical Astrophysics Group	194
22	Murao Group	197
23	Ueda Group	199
24	Yokoyama (J) Group	200
25	Ejiri-Tsujii Group	201
26	Sakai (Hirofumi) Group	202
27	Ando Group	203
28	Bamba Group	204
29	Kusaka Group	205
30	Takeuchi Group	206
31	Mio Group	207
32	Nose Group	208
33	Higuchi Group	209
34	Okada Group	210
35	Furusawa Group	211
36	Kawaguchi Group	212
III	2023 年度 物理学教室全般に関する報告	215
1	学部講義概要	216
1.1	2 年生 A セメスター	216
1.1.1	電磁気学 I : 横山 将志	216
1.1.2	解析力学 : 常行 真司	216
1.1.3	量子力学 I : 日下 暁人	217

1.1.4	物理実験学：安東 正樹, 中島 康博	218
1.1.5	物理学演習 II (解析力学、量子力学 I)：常行 真司, 日下 暁人, 田島 裕之、横溝 和樹	218
1.1.6	物理数学 I：松尾 泰	219
1.1.7	物理数学 II：辻 直人	220
1.1.8	物理学演習 I (電磁気学 I, 物理数学 I, II)：横山 将志, 松尾 泰, 辻 直人, 石河 孝洋, 森 脇 可奈	220
1.1.9	物理学のための科学英語基礎：小野 義正	222
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：村尾 美緒	223
1.2.4	物理学演習 III：中辻 知, 村尾 美緒, 諏訪 秀磨, 高三 和晃	223
1.2.5	現代実験物理学 I：岡田 康志, 酒井 明人	224
1.2.6	計算機実験 I：藤堂 眞治, 高橋 昂, 山崎 隼汰	224
1.2.7	量子コンピューター実習：浅井 祥仁, 寺師 弘二	225
1.2.8	統計力学 I：小林 研介	226
1.2.9	流体力学：吉田 直紀	227
1.2.10	物理学演習 IV (統計力学 I、II)：小林 研介、竹内 一将、中川 大也、福田 朝	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：井手口 拓郎, 三尾 典克	228
1.3.3	量子力学 III：諸井 健夫	228
1.3.4	現代実験物理学 II：安東 正樹, 中島 康博	229
1.3.5	物理学演習 V：横山 順一, 諸井 健夫, 竹内 一将, 大森 寛太郎, 山本 新	229
1.3.6	生物物理学：樋口 秀男, 能瀬 聡直, 川口 喬吾	230
1.3.7	物理数学 III：小形 正男	230
1.3.8	固体物理学 I：林 将光	230
1.3.9	電磁気学 III：横山 順一	231
1.3.10	統計力学 II：竹内 一将	231
1.3.11	計算機実験 II：藤堂 眞治, 高橋 昂, 山崎 隼汰	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：中村 哲	234
1.4.4	計算科学概論：6 名によるオムニバス講義・実習	234
1.4.5	統計力学特論：加藤 岳生	234
1.4.6	現代物理学入門：渡利 泰山, 今井 伸明, 三部 勉	234
1.4.7	一般相対論：須藤 靖	235
1.4.8	量子光学：上田 正仁	236
1.4.9	固体物理学 II：長谷川 修司	236
1.4.10	プラズマ物理学：江尻 晶	237
1.4.11	宇宙物理学：馬場 彩	238
1.4.12	生物物理学特論 II：岡田 真人, 野口 博司, 伊藤 創祐	238
1.4.13	化学物理学：高木 英典	238
1.5	4 年生 A セメスター	239
1.5.1	素粒子物理学：田中 純一, 澤田 龍	239
1.5.2	場の量子論 II：堀 健太郎	239
1.5.3	原子核物理学：Haozhao Liang	240
1.5.4	現代物理と機械学習：蘆田 祐人	240
1.5.5	電子回路論：北川 健太郎	241

1.5.6	固体物理学 III : 酒井 明人	241
1.5.7	非平衡科学 : 伊藤 創祐	241
1.5.8	普遍性生物学 : 古澤 力	242
1.5.9	重力波物理学 : Kipp Cannon, 都丸 隆行	242
1.5.10	物理学のための科学英語特論 : 松村 知岳	243
2	各賞受賞者紹介	244
2.1	大塚 孝治 名誉教授	244
2.2	藤森 淳 名誉教授	244
2.3	岡田 康志 教授	244
2.4	大栗 真宗 氏 (須藤研、現千葉大学)	245
2.5	川口 由紀 氏 (上田研、現名古屋大学)	245
2.6	酒井 広文 教授	245
2.7	川口 喬吾 准教授	246
2.8	横溝 和樹 助教 (蘆田研)	246
2.9	理学系研究科研究奨励賞・理学部学修奨励賞	246
3	人事異動	247
4	役務分担	249
5	教室談話会	250
6	物理学教室コロキウム	252
7	金曜ランチトーク	253
8	ニュートン・カフェ	254

I

研究室別 2023年度 研究活動報告

イラル対称性に関わる性質が固有値分布に反映されることが判明した。

1 原子核・素粒子理論

1.1 原子核理論 (福嶋) 研究室

原子核理論 (福嶋) 研究室では、福嶋健二教授、山本新助教、鎌田翔特任助教、大学院生らによって世界的なフロンティアを開拓する最先端研究を精力的に行っている。特に、福嶋は中性子星の性質を明らかにするための理論研究や強磁場、回転などの極限環境下での高密度原子核クォーク物質の解明を目指している。山本は第一原理計算に基づく数値シミュレーションや、そのために必要な定式化の整備に向けた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っている。

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理論を研究している。QCD は一見すると極めて単純なラグランジアンで記述されるが、その非摂動性、非線型性のために、量子場の理論として他に類を見ないユニークな性質を持つ。この研究グループでは高温・高密度クォーク・グルーオン物質の理論、強電場・磁場中のクォーク物質の物性とトポロジー、カイラル量子異常、中性子星深部の状態方程式の計算、相対論的に高速回転するクォーク・グルーオン物質のカラー閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れなど、現象論からアカデミックな問題まで幅広く様々な難問に挑戦している。とりわけ、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。

正準量子化格子ゲージ理論におけるカイラルフェルミオン

ディラックフェルミオンの持つカイラル対称性は、物質の質量生成を記述する上で重要な性質である。格子ゲージ理論では、カイラル対称性を実現するために特別な定式化が必要であることが知られており、そのような定式化はカイラルフェルミオンと呼ばれている。従来の格子ゲージ理論では、経路積分量子化に基づいてカイラルフェルミオンを議論してきたが、正準量子化の場合については理解が不十分であった。山本らは論文 [1] で、正準量子化に基づく格子ゲージ理論において、カイラルフェルミオンの性質を議論した。ハミルトニアンとカイラリティ演算子の固有値を数値的に計算し、系のパラメータと固有値分布の関係を解析した。解析の結果、正準量子化ではカ

強磁場中のバリオンの構造と閉じ込め

カラー数を無限大に近似した QCD はパイオンの有効理論に帰着する。パイオンはボゾンだが、核子などフェルミオンであるバリオンを理論に導入するためには、パイオンのソリトンを作ればよいことが知られている。このようなトポロジ的に安定なソリトンとして記述されるバリオンをスカーミオンと呼ぶ。Chen-福嶋-Qiu は、論文 [2] において、スカーミオンの運動方程式を強磁場で数値的に解き、バリオンの磁気モーメントや変形を定量的に計算した。特に、バリオン中の圧力分布を、磁場と平行な方向と垂直な方向にそれぞれ求め、クォーク閉じ込めを実現する圧力の和則を議論した。その結果、磁場と垂直な方向には和則が破れ、ローレンツ力に起因する新たな項が出てくることを発見した。この新しい項を和則に焼き直すと、磁場由来の閉じ込め力があると解釈可能であることを示し、磁場の効果によってバリオン内のクォークがより強く閉じ込められることを見出した。

実時間カイラリティ生成の量子シミュレーション

ディラックフェルミオンには、左巻きと右巻きの2種類のカイラリティが存在する。カイラリティは古典的には保存量であるが、量子異常によって保存則が破れる。カイラリティ保存の破れはマクロな量子現象として加速器実験などで観測可能と考えられているが、それを正しく見積もることは現在の理論物理学では技術的に難しい。山本らは論文 [3] で、カイラリティ保存の破れを量子コンピュータによってシミュレーションする方法を提唱した。量子コンピュータのエミュレータを用いてシミュレーションを実行し、少自由度の系ではカイラリティの時間発展を解析することが可能であることを確認した。将来、量子コンピュータが実用化された際に、現実の系をシミュレーションすることができる可能性が示唆された。

Floquet 理論を用いた高周波数電場中のカイラル量子異常

外場として互いに平行な電場・磁場を印加すると、カイラル量子異常によってカイラリティが発生する。これは物理的なプロセスとしては、粒子対生成に対応している。とりわけ一様電磁場の場合にはシュウィンガー機構の枠組みでカイラリティの生成を理解することができる。しかし電磁場が時間的に変動する場合には理論的な取り扱いが複雑で、従来は、ミクロスコピックな物理機構を理解する手がかりがなかった。福嶋らは文献 [4] で、低次元 QED でカイラル量子異常の問題を議論した。特に時間周期的な電場によって駆動される系に Floquet 理論を適用し、

van Vleck の高周波数展開を無限の高次まで実行した。興味深いことにカイラル量子異常では高次項が互いにキャンセルし合う構造になっており、量子異常は展開の低次項だけが支配的になっていることが分かった。またカイラリティを混ぜる有限の質量が及ぼす影響についても van Vleck 展開で調べる手法を開拓した。

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Hayata, K. Nakayama, A. Yamamoto, “Chiral fermion in the Hamiltonian lattice gauge theory”, *Phys. Rev. D* **108**, 034511 (2023).
- [2] S. Chen, K. Fukushima, Z. Qiu, “Magnetic enhancement of baryon confinement modeled via a deformed Skyrmion”, *Phys. Lett. B* **843**, 137992 (2023).
- [3] T. Hayata, K. Nakayama, A. Yamamoto, “Dynamical chirality production in one dimension”, *Phys. Rev. D* **109**, 034501 (2024).
- [4] K. Fukushima, Y. Hidaka, T. Shimazaki, H. Taya, “Chiral anomaly in a (1+1)-dimensional Floquet system under high-frequency electric fields”, *Annals Phys.* **458**, 169494 (2023).
- [5] A. Yamamoto, T. Doi, “Toward nuclear physics from lattice QCD on quantum computers”, *PTEP* **2024**, 033D02 (2024).

(会議抄録)

- [6] A. Yamamoto, T. Hayata, K. Nakayama, “Chiral fermion on quantum computers”, *PoS LAT-TICE2023* 209 (2024).

(学位論文)

- [7] Shi Chen, “A Topological Origin for Generalized Symmetry”, 博士論文, 2023 年 7 月
- [8] Chengpeng Yu, “Study on the Pulsar Kick induced by Chiral Transport”, 博士論文, 2024 年 1 月

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [9] A. Yamamoto, “Chiral fermion on quantum computers”, The 40th International Symposium on Lattice Field Theory, Fermilab, Illinois, USA, July 31-Aug. 4, 2023
- [10] K. Fukushima, “Magnetic Enhancement of Baryon Confinement Modeled via a Deformed Skyrmion”, QCD in Extreme Conditions (XQCD 2023), Coimbra, Portugal, July 27, 2023.

ポスター

- [11] Y. Shimada, S. Chen, K. Fukushima, “Exploring the QCD Phase Transitions with Imaginary Rotation”, 19th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2023), Coimbra, Portugal, July 26, 2023

招待講演

- [12] K. Fukushima, “QCD phases from academism to pragmatism”, The QCD Phase Transition, Bad Honnef, Germany, April 3, 2023.
- [13] K. Fukushima, “QCD phases at high baryon density and neutron stars”, Workshop on Highly Baryonic Matter at RHIC-BES and Future Facilities beyond the critical point towards neutron stars, Tsukuba Univ., Japan, April 29, 2023.
- [14] K. Fukushima, “Anomalies in hot and dense QCD matter”, Nuclear Physics School 2023, Pukyong Univ., Pusan, Korea, July 5, 2023.
- [15] K. Fukushima, “Rotation-induced Perturbative Realization of Nonperturbative QCD Phenomena”, 7th Chirality, Vorticity and Magnetic Field in HIC, UCAS, Beijing, China (online), July 18, 2023.
- [16] K. Fukushima, “(Un)Knowns about QCD phases and prospects about dense QCD matter”, PhD School on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2023), Coimbra, Portugal, July 23-25, 2023.
- [17] K. Fukushima, “Light-driven Chirality”, Symposium on Extreme Quantum Matter from Electron Ion Collider to Tabletop Experiments, BNL, NY, USA, September 2, 2023.
- [18] K. Fukushima, “Baryons and Baryonic Matter under Strong Magnetic Field”, Strongly Interacting Matter in Extreme Magnetic Fields, ect*, Trento, Italy, September 25, 2023.
- [19] K. Fukushima, “Pulsar Kick - Anisotropy, Scattering, and Their Interplay”, Condensed Matter Physics of QCD, YITP, Kyoto, Japan, March 11, 2024.

(国内会議)

一般講演

- [20] 福嶋健二, Chengpeng Yu, “Pulsar Kick by the Chiral Conversion from Anisotropy in the Density and Magnetic Profile”, 日本物理学会 2024 年春季大会 (オンライン), 2024 年 3 月 18 日.

招待講演

- [21] 福嶋健二, “Dynamical Hadronization and An Application”, Functional Renormalization Group at Niigata 2024, 新潟大学, 新潟, 2024 年 1 月 7 日.

(セミナー)

- [22] 山本新, “Chiral fermion in the Hamiltonian lattice gauge theory”, 大阪大学, 2023 年 7 月 25 日
- [23] K. Fukushima, “Anomalous Casimir Effect and Related Subjects”, 理学研究所 (オンライン), 2023 年 11 月 17 日.

1.2 原子核理論 (Liang) 研究室

In our group, we study the properties of atomic nuclei and neutron stars based on various nuclear many-body theories. In particular, one of the main research themes is nuclear density functional theory (DFT), which aims at understanding both ground-state and excited-state properties of thousands of nuclei in a consistent and predictive way. Our research interests also include the microscopic foundation of nuclear DFT, the interdisciplinary applications in nuclear astrophysics, particle physics, condensed matter physics, etc., and the relevant studies in general quantum many-body problems. To this end, a cold atomic gas can be regarded as an ideal testing ground for many-body theories because of its controllability. In this regard, we are also interested in investigating novel many-body phenomena and developing quantum many-body theories through the comparisons with cold atom experiments.

Quantum impurity problems in neutron-rich matter

Many-body problems often involve various degrees of freedom. If one of them has a sufficiently small fraction, it can be regarded as impurities for majority components. Such a situation occurs not only in condensed matter systems but also in nuclear systems. The latter case can be found as light clusters in the surface region of neutron-rich nuclei and in neutron star matter.

Tajima and his collaborators investigated the fate of impurities such as alpha particles and protons in neutron-rich environments, based on the notion of polarons established in condensed matter physics [21, 25]. The neutron background causes the effective inter-impurity interaction resulting in multi-polaron-like bound states, of which in-vacuum counterparts are unbound (e.g., diproton, ^5He , and ^{12}C Hoyle state). These results indicate that “the nuclear chart in the neutron-rich environment” is different from that in vacuum. For proton impurities in neutron-rich matter relevant to neutron-star physics, the heavier effective mass of protons conjectured by Baym, Bethe, and Pethick in 1971 was numerically confirmed by using the many-body T -matrix approach, which can reproduce the observed properties in Fermi-polaron experiments. Moreover, it was analytically found that the polaronic proton energy is equivalent to the symmetry energy in the small proton-fraction limit.

$^3P_0$ superfluid in dilute spin-polarized neutron matter

There is a long history of studies on neutron superfluidity in neutron stars. On the basis of the properties of nucleon-nucleon interactions, $^1S_0$ and $^3P_2$ neutron superfluids have been investigated extensively. However, the $^3P_0$ nucleon-nucleon interaction is known to be stronger than the $^3P_2$ channel at low energy, but it has been neglected because its strength is weaker than the $^1S_0$ channel. Here, one should notice that the $^3P_0$ channel cannot be negligible if neutron matter is spin-polarized in the dilute regime by the strong magnetic field which suppresses the $^1S_0$ pairing.

Tajima and his collaborators explored a possible appearance of $^3P_0$ superfluid [18], which was overlooked in the previous studies. They described the ground-state phase diagram based on the low-energy universality of short-range interactions in the plane of the nucleon density and the magnetic field. Then, the $^3P_0$ superfluid critical temperature was estimated by using the separable interaction which reproduces the $^3P_0$ scattering phase shift.

Isospin symmetry breaking in nuclear structure

In textbooks of nuclear physics, it is written that the nuclear interaction has isospin symmetry, i.e., the proton-proton, neutron-neutron, and $T = 1$ channel of proton-neutron interactions are identical. However, due to the mass difference of an up quark and a down quark, this symmetry is slightly broken. Recently, thanks to the progress of nuclear experiments, the isospin symmetry breaking (ISB) of nuclear interaction has got to be paid attention.

Recently, Naito, Liang, and their collaborators performed the systematic study on the effect of the ISB interaction to ground-state properties of nuclear structure. They found that the ISB interaction affects the estimation of the slope parameter of the symmetry energy of nuclear equation of state, L , within 10 MeV [8]. Naito and his collaborators also connected the effective charge symmetry breaking interaction to the partial restoration of the chiral symmetry breaking [20]. This is the first attempt to derive the effective nuclear interaction based on the level of the quantum chromodynamics.

Nuclear charge density distribution by back-propagation neural networks

Nuclear charge density distribution is essential for extracting nuclear structure information, including the shell-structure evolution, shape coexistence,

shape transition, and neutron-skin thickness. However, due to the complexity of nuclear many-body systems, the present theoretical calculations of nuclear charge density distribution still face challenges, e.g., in describing the beyond mean-field effects and nucleon-nucleon correlations. In a recent work, Yang, Naito, Liang, and their collaborators investigated nuclear charge density distribution based on the DFT and back-propagation neural networks [12]. First, a supervised learning is performed to generate the nuclear charge density distributions based on the results of DFT calculations. Then, the charge density is further calibrated based on the experimental charge radii. It is found that, when the parity, pairing, and shell effects are taken into account, about 96% of the nuclei in the validation set fall within 2 standard deviations of the predicted charge radii. Moreover, the kink in charge radii on the Hg isotopes has been successfully reproduced.

Density-driven BEC-BCS crossover with the finite-range interactions

Thanks to the recent development of experimental techniques, the Bose-Einstein-condensate (BEC) to Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) crossover has been observed in two-dimensional materials by tuning the carrier density. In such a case, the properties of the interaction become important in contrast to the BEC-BCS crossover in ultracold Fermi gases near the broad Feshbach resonance, where the interaction can be always characterized by the zero-range interaction because of the large scattering length. In addition, since the two-body attraction in two dimensions always accompanies the two-body bound state, it is not straightforward to reach the weak-coupling BCS regime with the zero-range interaction in two dimensions.

To bridge the condensed matter and ultracold atomic systems, Sakakibara, Tajima, and Liang investigated the role of the effective range of interaction in the two-dimensional BEC-BCS crossover [9, 10]. It was found that the effective range suppresses the pairing effect in the high-density regime, because the form factor associated with the effective range reduces the attraction at high-momentum scattering events. In this regard, the weak-coupling BCS feature of the dense regime is facilitated by the finite-range effect. Moreover, they showed the peaked behavior of the pairing gap along the density evolution, which never occurs in the case with the zero-range interaction. The finite-range effect on the ground-state equation of state has also been investigated within the Brueckner G -matrix approach. Sakakibara also received his Ph.D. degree based on these studies [31].

BCS-BCS crossover in a Bose-Fermi mixture

In a Bose-Fermi mixture, both atomic and molecular Fermi superfluids can exist. One interesting open question would be *how are these two kinds of non-trivial states connected to each other?* From the viewpoint of a cold-atomic quantum simulator for dense quantum chromodynamics matter, this question is also related to another important subject for the hadron-quark continuity as *how does the superfluid state of baryons change into that of quarks with increasing number densities in neutron stars?* Guo, Tajima, Liang, and their collaborator addressed this challenging problem by considering a two-channel model describing the Feshbach resonance for the boson-fermion interaction [9]. It is found that the atomic Fermi superfluid state continuously changes into the molecular one near the Feshbach resonance without any phase transitions. Considering the perturbative regime with respect to the atom-dimer coupling, they have developed the multi-component superfluid theory, which indicates that the superfluid continuity can be understood as an analog of a two-band superfluid or superconductor.

Cooper pairing and tripling in 1D spinless fermions

In the previous work, Guo and Tajima showed the absence of both in-medium and in-vacuum three-body bound states in the one-dimensional (1D) spinless fermionic system with only two-body p -wave interaction due to the in-medium fermion-dimer repulsion. However, if some additional three-body forces exist, the three-body bound state can appear by overcoming the repulsion. In this regard, it is expected that the three-body-cluster state can be found by further introducing the three-body interactions. Guo and Tajima started with an antisymmetrized three-body interaction with a minimal momentum dependence, which can be a leading-order contribution at the low-energy limit, and investigated the three-body clustering in 1D spinless fermions with the coexistence of two- and three-body interactions [13]. They also pointed out that the results can be testified in future cold atom experiments via three-body loss measurements.

Spin tunneling current and shot noise in an itinerant Fermi gas

Spin transport phenomena have been extensively studied across various systems, including solid state and cold atomic systems. Unlike the ferromagnetic or antiferromagnetic insulators, where quasiparticle

tunneling is absent and spin-flip tunneling dominates, the study of tunneling spin transport in quantum gases has primarily focused on conventional quasiparticle processes. Therefore, distinguishing between spin-flip tunneling and one-body tunneling processes is both important and challenging.

To investigate spin-flip tunneling, which is associated with magnon transport and remains elusive in cold atomic systems, Zhang, Tajima, Liang, and their collaborators proposed a two-terminal system with an asymmetric chemical potential bias that induces spin tunneling in an ultracold Fermi gas [4, 15, 23]. By employing the Schwinger-Keldysh formalism, they analyzed the spin-tunneling current and its corresponding shot noise. It was found that the spin-current shot noise can serve as a probe of the spin-transport carrier. By analyzing the Fano factor defined as the noise-to-current ratio, it is found that as coupling strength increases the tunneling channel changes from quasiparticle-dominant to magnon-dominant. Furthermore, it is shown that the tunneling channel can be adjusted by tuning the shape of potential barrier in itinerant junctions.

<受賞>

- [1] Y.X. Guo, Asian Nuclear Physics Association & AAPPS-DNP Award for Young Physicist and A3F-CNSSS23 Young Scientists Award, A3F-CNS Summer School 2023, 2023 年 8 月 10 日.
- [2] X.X. Dong, A3F-CNSSS23 Young Scientists Award, A3F-CNS Summer School 2023, 2023 年 8 月 10 日.

<報文>

(原著論文)

- [3] Y. Sekino, H. Tajima, and S. Uchino, Phys. Rev. Research **5**, 023058 (2023).
- [4] T.Y. Zhang, H. Tajima, Y. Sekino, S. Uchino, and H.Z. Liang, Commun. Phys. **6**, 86 (2023).
- [5] H. Sakakibara, H. Tajima, and H.Z. Liang, Phys. Rev. A **107**, 053313 (2023).
- [6] T. Naito, T. Oishi, H. Sagawa, and Z.H. Wang, Phys. Rev. C **107**, 054307 (2023).
- [7] F. Minato, T. Naito, and O. Iwamoto, Phys. Rev. C **107**, 054314 (2023).
- [8] T. Naito, G. Colò, H.Z. Liang, X. Roca-Maza, and H. Sagawa, Phys. Rev. C **107**, 064302 (2023).
- [9] Y.X. Guo, H. Tajima, T. Hatsuda, and H.Z. Liang, Phys. Rev. A **108**, 023304 (2023).
- [10] H. Sakakibara, H. Tajima, and H.Z. Liang, Prog. Theor. Exp. Phys. **2023**, 083I02 (2023).
- [11] T. Naito, H. Naito, and K. Hashimoto, Phys. Rev. Research **5**, 033189 (2023).
- [12] Z.X. Yang, X.H. Fan, T. Naito, Z.M. Niu, Z.P. Li, and H.Z. Liang, Phys. Rev. C **108**, 034315 (2023).

- [13] Y.X. Guo and H. Tajima, Phys. Rev. A **108**, 043303 (2023).
- [14] C. Quirouette, D. Cresta, J.Z. Li, K.P. Wilkie, H.Z. Liang, and C.A.A. Beauchemin, Sci. Rep. **13**, 17243 (2023).
- [15] T.Y. Zhang, D. Oue, H. Tajima, M. Matsuo, and H.Z. Liang, Phys. Rev. B **108**, 155303 (2023).
- [16] H.H. Xie, T. Naito, J. Li, and H.Z. Liang, Phys. Lett. B **846**, 138232 (2023).
- [17] D.S. Hou, A. Takamine, M. Rosenbusch, W.D. Xian, S. Iimura, S.D. Chen, M. Wada, H. Ishiyama, P. Schury, Z.M. Niu, H.Z. Liang, S.X. Yan, P. Doornenbal, Y. Hirayama, Y. Ito, S. Kimura, T.M. Kojima, W. Korten, J. Lee, J.J. Liu, Z. Liu, S. Michimasa, H. Miyatake, J.Y. Moon, S. Naimi, S. Nishimura, T. Niwase, T. Sonoda, D. Suzuki, Y.X. Watanabe, K. Wimmer, and H. Wollnik, Phys. Rev. C **108**, 054312 (2023).
- [18] H. Tajima, H. Funaki, Y. Sekino, N. Yasutake, and M. Matsuo, Phys. Rev. C **108**, L052802 (2023).
- [19] Y.X. Guo and H. Tajima, Phys. Rev. A **109**, 013319 (2024).
- [20] H. Sagawa, T. Naito, X. Roca-Maza, and T. Hatsuda, Phys. Rev. C **109**, L011302 (2024).
- [21] H. Tajima, H. Moriya, W. Horiuchi, E. Nakano, and K. Iida, AAPPS Bull. **34**, 9 (2024).
- [22] T.C. Yiu, H.Z. Liang, and J. Lee, Chin. Phys. C **48**, 024102 (2024).
- [23] T.Y. Zhang, H. Tajima, and H.Z. Liang, Phys. Rev. Applied **21**, L031001 (2024).
- [24] H.H. Xie, J. Li, and H.Z. Liang, Phys. Rev. C **109**, 034309 (2024).
- [25] H. Tajima, H. Moriya, W. Horiuchi, E. Nakano, and K. Iida, Phys. Lett. B **851**, 138567 (2024).

(会議抄録)

- [26] S. Akagami, H. Tajima, and K. Iida, JPS Conf. Proc. **38**, 011010 (2023).
- [27] Y. Sekino, H. Tajima, and S. Uchino, JPS Conf. Proc. **38**, 011019 (2023).
- [28] K. Hashimoto, T. Naito, and H. Naito, 1st Workshop on the Synergy of Scientific and Machine Learning Modeling (SynS & ML) at 40th International Conference on Machine Learning (ICML2023) (Honolulu, Hawaii, United States of America).
- [29] T. Naito, G. Colò, T. Hatsuda, H.Z. Liang, X. Roca-Maza, and H. Sagawa, Nuovo Cim. C **47**, 52 (2024).

(国内雑誌)

- [30] 田島裕之, 仲野英司, 「ポーラロン」, 原子核研究 **68**, (2) 52 (2024).

(学位論文)

- [31] 榊原光, 「有限レンジ相互作用を持った低次元フェルミオン系における BCS-BEC クロスオーバー」, 博士論文.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [32] T. Naito, G. Colò, H.Z. Liang, X. Roca-Maza, and H. Sagawa, “Impact of the isospin symmetry breaking on the neutron-skin thickness and the nuclear equation of state,” the 7th International Conference on Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions (COMEX7), Università degli Studi di Catania, Catania, Italy, June 12–16, 2023.
- [33] H.Z. Liang, “Nuclear mass predictions with machine learning reaching the accuracy required by r-process studies,” the 34th IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2023), Kobe, Japan, August 4–8, 2023.
- [34] H.Z. Liang, “Towards systematic and consistent nuclear data inputs for astrophysical r-process with Bayesian approaches,” Workshop on Machine Learning and Density Functional Theory in Nuclear Structure, Anhui University, Hefei, China, August 17–22, 2023.
- [35] F. Minato, T. Naito, and O. Iwamoto, “Effects of two-particle two-hole configurations on particle emissions following muon capture,” the 6th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and Physical Society of Japan, Big Island of Hawaii, United States, November 29, 2023.
- [36] K. Ochi, E. Nakano, K. Iida, H. Tajima, and J. Takahashi, “Quasiparticle properties of an impurity trapped in a superfluid quantized vortex,” 2023 APS Meeting, Division of Nuclear Physics and Physical Society of Japan, Big Island of Hawaii, United States, November 29, 2023.
- [37] H. Tajima, K. Iida, and H.Z. Liang, “Nonrelativistic trace anomaly and its impact on equation of state in dense fermionic matter: Toward understanding hadron-quark crossover via analogue quantum simulation,” International Symposium on Quantum Electronics, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, February 13–16, 2024.

招待講演

- [38] T. Naito, “Impact of the isospin symmetry breaking on the nuclear equation of state,” the 1st IReNA-Ukakuren Joint Workshop “Advancing Professional Development in Nuclear Astrophysics and Beyond,” National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka, Japan, August 28–September 1, 2023.

- [39] H. Tajima, “Multi-component Quantum Gases in Ultracold Atoms, Condensed Matter, and Nuclear Systems,” MultiSuper 2023, University of Camerino, San Benedetto del Tronto, Italy, September 8–10, 2023.
- [40] T. Naito, “A simple method of multi-body wave function using deep neural network,” Computational Approaches to Quantum Many-Body Systems, Saitama, Japan, November 19–20, 2023.
- [41] H. Tajima, “Fate of protons in neutron-rich matter,” Workshop on Nuclear Cluster Physics (WNCP2023), Osaka University, Osaka, Japan, November 27–29, 2023.
- [42] H.Z. Liang, “Towards systematic and consistent nuclear data inputs for astrophysical r-process with Bayesian approaches,” International Workshop on Massively Parallel Programming for Quantum Chemistry and Physics, RIKEN, Wako, Japan, January 9–10, 2024.
- [43] T. Naito, “Impact of the isospin symmetry breaking on the nuclear equation of state—Towards accurate description of nuclear structure,” the 73rd OMEGA-SSANP Workshop “r-process nucleosynthesis and some specific topics for nuclear physics,” Soongsil University, Seoul, South Korea, March 15, 2024.

(国内会議)

一般講演

- [44] 田島裕之, 舟木博志, 関野裕太, 安武伸俊, 松尾衛, 「強磁場中の希薄中性子物質における 3P0 超流動」, 京都ミーティング 2023s, オンライン講演 (ハイブリッド), 理研 iTHEMS SUURI-COOL, 神戸, 2023 年 5 月 28 日.
- [45] 内藤智也, 「Multi-body wave function using deep neural network」, the 96th DFT meeting, オンライン, 2023 年 5 月 29 日.
- [46] 田島裕之, 「スピンインバランス冷却フェルミ原子気体と強磁場中性子星」, 第五回冷却原子研究会「アトムの会」, 名古屋, 2023 年 8 月 2 日–3 日.
- [47] Y.X. Guo, H. Tajima, and H.Z. Liang, 「Cooper quartet correlations in infinite symmetric nuclear matter」, A3F-CNS Summer School 2023, 理化学研究所, 和光, 2023 年 8 月 4 日–10 日.
- [48] X.X. Dong, H.Z. Liang, and L.S. Geng, 「High precision calculations of nuclear charge radii using Bayesian neural networks」, A3F-CNS Summer School 2023, 理化学研究所, 和光, 2023 年 8 月 4 日–10 日.
- [49] 田島裕之, 大上能悟, 松尾衛, 加藤岳生, 「非平衡ノイズから探る BCS-BEC クロスオーバーのペイトンネル輸送」, 日本物理学会 第 78 回年次大会, 東北大学, 仙台, 2023 年 9 月 16 日–19 日.
- [50] Y.X. Guo, 田島裕之, 「Three-body clustering in one-dimensional Fermi gas」, 日本物理学会 第 78 回年次大会, 東北大学, 仙台, 2023 年 9 月 16 日–19 日.

- [51] T.Y. Zhang, 田島裕之, 大上能悟, 松尾衛, H.Z. Liang, 「Spin transport between polarized Fermi gases」, 日本物理学会 第 78 回年次大会, 東北大学, 仙台, 2023 年 9 月 16 日–19 日.
- [52] 関野裕太, 田島裕之, 内野瞬, 「2 成分 Bose-Einstein 凝縮体におけるスピン Drude ウェイトと Andreev-Bashkin 効果」, 日本物理学会 第 78 回年次大会, 東北大学, 仙台, 2023 年 9 月 16 日–19 日.
- [53] 田島裕之, 「Polarons meet neutron stars: Fate of impurities in neutron-rich matter」, 第 9 回クラスター階層領域研究会, 理化学研究所, 和光, 2023 年 9 月 22 日–23 日.
- [54] 田島裕之, 「Pairing in a magnetar」, The 6th workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model (Sado 2023), 佐渡, 2023 年 9 月 28 日–30 日.
- [55] H.Z. Liang, 「Orbital-free DFT with machine learning」, The 6th workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model (Sado 2023), 佐渡, 2023 年 9 月 28 日–30 日.
- [56] 越智一成, 高橋淳一, 田島裕之, 飯田圭, 仲野英司, 「超流動量子渦中におけるボースポーラロンのダイナミクス」, 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン, 2024 年 3 月 18 日–21 日.
- [57] 土居孝寛, 田島裕之, 筒井翔一郎, 「複素ランジュバン法によるインバランスフェルミ原子気体の研究」, 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン, 2024 年 3 月 18 日–21 日.
- [58] 田島裕之, 関野裕太, 猪谷太輔, 土肥明, 長瀧重博, 早田智也, 「ユニタリー極限近傍の非エルミートポロジカル p 波フェルミ超流動」, 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン, 2024 年 3 月 18 日–21 日.
- [59] 吉田聡太, 佐藤健, 緒方拓巳, 内藤智也, 木村真明, 「 p -, sd -, pf -殻核 2 中性子系の量子計算」, 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン, 2024 年 3 月 18 日–21 日.
- 招待講演
- [60] 田島裕之, 「Possible $^3P_0$ pairing in magnetized neutron stars」, 大阪大学 RCNP 研究会「対相関から対凝縮相への微視的アプローチ」, 大阪大学, 吹田, 2023 年 9 月 4–6 日.
- [61] 内藤智也, 「To Be Determined: Energy Density Functional and Equation of State」, Advancing physics at next RIBF (ADRIB24), 理化学研究所, 和光, 2024 年 1 月 23 日–24 日.
- [62] H.Z. Liang, 「Towards systematic and consistent nuclear data inputs for astrophysical r-process with Bayesian approaches」, Advancing physics at next RIBF (ADRIB24), 理化学研究所, 和光, 2024 年 1 月 23 日–24 日.
- [63] 内藤智也, 「(一般シンポジウム講演) Phenomenological determination of nuclear equation of state: current status and future」, 日本物理学会 2024 年春季大会, 2024 年 3 月 18 日–21 日.
- (セミナー)
- [64] 内藤智也, 「密度汎関数理論入門—表面吸着の第一原理計算に向けて」, 島山研セミナー, 東京農工大学, 小金井, 2023 年 5 月 15 日.
- [65] T. Naito, “Low-Energy Nuclear Physics—from femtometer to kilometer,” T30d Group Meeting, Technische Universität München, Garching, Germany, 2023 年 7 月 3 日.
- [66] 田島裕之, 「Many-body aspects of impurities and clustering in nuclear matter」, 大阪大学 RCNP コロキウム, 大阪大学, 吹田, 2023 年 7 月 31 日.
- [67] H.Z. Liang, “Towards systematic and consistent nuclear data inputs for astrophysical r-process with Bayesian approaches,” Seminar in School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing, China, 2023 年 8 月 24 日.
- [68] H.Z. Liang, “Towards ab initio nuclear density functional theory,” Seminar in College of Physics, Jilin University, Changchun, China, 2023 年 9 月 14 日.
- [69] H.Z. Liang, “Colorful nuclear physics and origin of elements,” Undergraduate Lecture in College of Physics, Jilin University, Changchun, China, 2023 年 9 月 15 日.
- [70] 内藤智也, 「A simple method of multi-body wave function using deep neural network」, 酒見グループセミナー, 東京大学 大学院理学系研究科 附属原子核科学研究センター, 和光, 日本, 2023 年 10 月 27 日.
- [71] T. Naito, “Isospin symmetry breaking in nuclear ground state—Phenomenological and QCD sum rule approach,” High Energy Theory Group Seminar, 中央研究院 物理研究所, 台北, 2023 年 12 月 15 日.
- [72] 内藤智也, 「原子核構造計算と電荷半径を用いた核力の理解」, 粒子ビーム科学研究領域セミナー, 京都大学 化学研究所, 宇治, 日本, 2024 年 2 月 14 日.
- [73] H.Z. Liang, “Unraveling the origins of elements: Bridging nuclear theory with machine learning,” Spring 2024 Physics Colloquium, The University of Hong Kong, Hong Kong, China, 2024 年 3 月 6 日.
- [74] H.Z. Liang, “Pseudospin symmetry in atomic nuclei and SUSY quantum mechanics,” Seminar in School of Physics and Astronomy, Sun Yat-Sen University, Zhuhai, China, 2024 年 3 月 7 日.
- (ポスター)
- [75] K. Hashimoto, T. Naito, and H. Naito, “Neural Polytopes”, the 1st Workshop on the Synergy of Scientific and Machine Learning Modeling (SynS & ML) at the 40th International Conference on Machine Learning (ICML2023), Honolulu, United States, July 28, 2023.

- [76] Y.X. Guo, H. Tajima, and H.Z. Liang, “Cooper quartet correlations in infinite symmetric nuclear matter,” RIKEN Summer School 2023, RIKEN, Wako, September 6, 2023.
- [77] T. Naito, H. Naito, and K. Hashimoto, “A simple method of multi-body wave function using deep neural network,” International Conference on Machine Learning Physics, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan, November 13, 2023.

1.3 素粒子論研究室

1.3.1 現象論

超対称模型における電弱真空の安定性の研究

諸井は、千草・庄司とともに、超対称模型における電弱真空の安定性について、特にミュオン異常磁気能率アノマリーとの関連という観点から、解析を行なった [2]。

宇宙背景放射の物理的研究

諸井は、神野・郡・高橋・羽澄とともに、将来の LiteBIRD 実験を用いて multi-field インフレーション模型がどの程度精度良くテストできるかについて、解析を行った [3]。

Minimal gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ 模型の熱的レプトジェネシス

濱口、永田、和田、Ramirez-Quezada は、Granelli (Bologna 大) とともに Minimal gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ 模型の熱的レプトジェネシスの解析を行った [4]。

軽い slepton における Affleck-Dine レプトジェネシス

濱口、和田は鎌田 (Hangzhou Institute)、榎本 (KAIST) とともに、ミュオン $g-2$ アノマリーを超対称性模型で説明する際に仮定される、軽い slepton が Affleck-Dine レプトジェネシスに与える影響を議論した [5]。

電気双極子モーメント

永田は、金田 (東京女子大)、K. A. Olive, M. Pospelov (ミネソタ大)、L. Velasco-Sevilla (西江大) とともに、Constrained Minimal Supersymmetric Standard Model (CMSSM) における電子・核子の電気双極子

モーメントを計算し、模型に含まれる新たな複素位相に対する現行・将来実験の感度を評価した [6]。

暗黒物質直接検出

永田は、J. Ellis (King's College London, CERN), K. A. Olive (ミネソタ大), J. Zheng (上海交通大) とともに、mAMSB 模型および pure gravity mediation 模型におけるウィーノ暗黒物質と核子の弾性散乱断面積を、電弱ゲージ粒子による量子補正を含めて計算し、将来の暗黒物質直接検出実験における探索可能性を議論した [7]。

諸井、シッチャヌギリッツは千草 (カリフォルニア大)、中山 (東北大) とともにアクシオンとダークフォトン暗黒物質による MnCO_3 のマグノン励起レートを計算し、超微細相互作用の強い物質を利用した暗黒物質直接検出実験における探査可能性を議論した [8]。

福田、諸井、シッチャヌギリッツは陳、稲田、新田とともに暗黒物質とトランスモン (一種の超伝導量子ビット) との相互作用に基づき、ダークフォトン暗黒物質由来の量子ビットの直接励起の確率を計算し、将来の量子コンピューターのハードウェアを用いた暗黒物質の直接検出の可能性について議論した [9]。

中性子星加熱機構

濱口、永田、Ramirez-Quezada は、藤原 (ミュンヘン工科大) とともに、中性子超流動渦糸の運動に伴う摩擦により生じる中性子星加熱効果を研究し、この効果を加味した中性子星表面温度理論予言が観測データをうまく説明することを明らかにした [10]。また、この加熱効果が存在する場合、中性子星に暗黒物質が捕獲されることに伴う加熱効果は隠されてしまうことを議論した [11]。

GRB 221009A

Ramirez-Quezada は、S. Balaji (LP THE, ソルボンヌ大)、J. Silk (ソルボンヌ大)、Y. Zhang (東南大) とともに、最近観測された天文現象 Swift J1913.1+1946 で検出された 18 TeV 光子事象を、新たな軽いスカラー粒子を導入することで説明しうることを示した [12]。

白色矮星冷却

Ramirez-Quezada は、J. H. Zink とともに (Bologna 大)、白色矮星冷却の観測を通じてダーク・セクター模型を探索し得ることを示した [13]。

ニュートリノ電磁形状因子

Pedro Pasquini は、S. F. Ge (TDLI) とともに、最近の実験提案であるニュートリノ対放射 (RENP) を用いてニュートリノ電磁形状因子を精査する可能性を検討し、この手法が通常の散乱実験と比較して非常に高い感度を達成しうることを明らかにした。また、この方法が、各ニュートリノ電磁形状因子の行列要素を分離し、その源を特定しうる唯一の手法であることを示した [14]。加えて、軽い媒介粒子に関連するニュートリノセクターの新物理を調査する可能性についても議論して、文献 [28] にて報告した。

アクシオンの quality 問題

濱口、金澤、永田は、D. Y. Cheong, S. M. Lee, S. C. Park (Yonsei 大学) とともに、PQ スカラー場と重力の非最小結合を導入することでアクシオン模型に生じる $U(1)$ クォリティ問題を解決するシナリオについて、Palatini 形式に拡張した解析を行った [15]。

ミューオンコライダーでの WIMP 探索

福田、諸井、仁木、Wei はミューオンコライダー実験での WIMP 探索について考察し、将来実験での感度を評価した [16]。

1.3.2 弦理論，場の理論全般

無限次元量子代数の研究

松尾と野下は繩田 (Fudan 大)・朱 (Soochow 大) とともに量子トロイダル代数の表現論とその物理への応用についてレビュー論文を書いた [17]。松尾はその一部について講演を行なった [30]。

野下は、木村 (Bourgogne 大) とともに、Nekrasov が提唱するゲージ折紙分配関数を再現する qq-指標を導き、新たなクラスの簾 W 代数を系統的に構成する処方箋を与えた。また、その Bethe/Gauge 対応についても議論した [18]。

共形場理論と誤り訂正符号

川畑は、奥田 (東大駒場) と西岡 (大阪大) らとともに、量子誤り訂正符号からボソン共形場理論を構成する手法を示し [19]、フェルミオン化のもとでそれらの理論が超対称性を獲得する条件を与えた [20]。

川畑と矢萩は、古典誤り訂正符号からフェルミオン共形場理論を構成する手法を示し [21]、超対称性を持つ条件や符号を用いた分配関数の表式を与えた [22]。

川畑と矢萩は、Alam (テキサス大)、奥田 (東大駒場)、西岡 (大阪大) と共に、多準位系に対する量子誤り訂正符号からボソン共形場理論を構成する手法を示した [23]。

可解模型の研究

松尾は Bourgine (Melbourne 大) とともに Dorey, Tong, Turner により提案された非可換ホール効果を記述する行列模型に対応する Calogero 模型を導いた。また、ハミルトニアン固有関数を導き、level-rank 双対性を用いて large N 極限における Kac-Moody 対称性を導いた [50]。

共形場理論に関連する研究

奥山は、共形場理論に現れる物理量を二通りの方法で評価することによって、合流型超幾何関数の間に成り立つ恒等式を新たに幾つか発見した [24]。

ヘテロティック弦理論におけるブレーンの研究

大森は、Kaidi (ワシントン大)、立川 (Kavli IPMU)、米倉 (東北大) とともに、ヘテロティック弦理論において新たなブレーンが存在すると考えられることを、ボルディズム群の観点から指摘した [25]。

一般化対称性の研究

大森は、Kaidi (ワシントン大)、Zheng (Kavli IPMU) とともに、 S duality を表す非可逆的対称性について、それを統制する SymTFT と呼ばれる 5 次元の位相的場の理論を同定し、その性質を調べた。[26]。また、島村、大森は、部分系対称性をもつフラクトン系の場の理論である foliated BF 理論と exotic BF 理論の間の場の対応を書き下し、その等価性を示した [27]。また、大森は一般化対称性についての入門的な集中講義を東北大および基礎物理学研究所 (京都大) において行った。[93, 94]。

<受賞>

- [1] 大森寛太郎, 素粒子メダル奨励賞, 素粒子論グループ, 2023 年 9 月

<報文>

(原著論文)

- [2] S. Chigusa, T. Moroi and Y. Shoji, “Stability of electroweak vacuum and supersymmetric contribution to muon $g - 2$,” JHEP **11**, 027 (2023) [arXiv:2306.16596 [hep-ph]].
- [3] R. Jinno, K. Kohri, T. Moroi, T. Takahashi and M. Hazumi, “Testing multi-field inflation with LiteBIRD,” JCAP **03**, 011 (2024) [arXiv:2310.08158 [astro-ph.CO]].
- [4] A. Granelli, K. Hamaguchi, N. Nagata, M. E. Ramirez-Quezada and J. Wada, “Thermal leptogenesis in the minimal gauged $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ model,” JHEP **09** (2023), 079 doi:10.1007/JHEP09(2023)079 [arXiv:2305.18100 [hep-ph]].

- [5] K. Enomoto, K. Hamaguchi, K. Kamada and J. Wada, JCAP **07** (2023), 003 doi:10.1088/1475-7516/2023/07/003 [arXiv:2304.05614 [hep-ph]].
- [6] K. Kaneta, N. Nagata, K. A. Olive, M. Pospelov and L. Velasco-Sevilla, “Quantifying limits on CP violating phases from EDMs in supersymmetry,” JHEP **03**, 250 (2023) [arXiv:2303.02822 [hep-ph]].
- [7] J. Ellis, N. Nagata, K. A. Olive and J. Zheng, “Electroweak loop contributions to the direct detection of wino dark matter,” Eur. Phys. J. C **84**, no.1, 4 (2024) [arXiv:2305.13837 [hep-ph]].
- [8] S. Chigusa, T. Moroi, K. Nakayama, and T. Sihanugrist, “Dark matter detection using nuclear magnetization in magnet with hyperfine interaction,” Phys.Rev.D **108** (2023), no.9, 095007 [arXiv: 2307.08577 [hep-ph]].
- [9] S. Chen, H. Fukuda, T. Inada, T. Moroi, T. Nitta and T. Sihanugrist, “Detecting Hidden Photon Dark Matter Using the Direct Excitation of Transmon Qubits,” Phys.Rev.Lett. **131** (2023), no.21, 211001 [arXiv: 2212.03884 [hep-ph]].
- [10] M. Fujiwara, K. Hamaguchi, N. Nagata and M. E. Ramirez-Quezada, “Vortex creep heating in neutron stars,” JCAP **03**, 051 (2024) [arXiv:2308.16066 [astro-ph.HE]].
- [11] M. Fujiwara, K. Hamaguchi, N. Nagata and M. E. Ramirez-Quezada, “Vortex Creep Heating vs. Dark Matter Heating in Neutron Stars,” Phys. Lett. **848**, 138341 (2024) [arXiv:2309.02633 [hep-ph]].
- [12] S. Balaji, M. E. Ramirez-Quezada, J. Silk and Y. Zhang, “Light scalar explanation for the 18 TeV GRB 221009A,” Phys. Rev. D **107** (2023) no.8, 083038 [arXiv:2301.02258 [hep-ph]].
- [13] J. H. Zink and M. E. Ramirez-Quezada, “Exploring the dark sectors via the cooling of white dwarfs,” Phys. Rev. D **108** (2023) no.4, 043014 [arXiv:2306.00517 [hep-ph]].
- [14] S. F. Ge and P. Pasquini, “Disentangle neutrino electromagnetic properties with atomic radiative pair emission,” JHEP **12** (2023), 083 [arXiv:2306.12953 [hep-ph]].
- [15] D. Y. Cheong, K. Hamaguchi, Y. Kanazawa, S. M. Lee, N. Nagata and S. C. Park, “Axion quality problem and nonminimal gravitational coupling in the Palatini formulation,” Phys. Rev. D **108** (2023) no.1, 015007 [arXiv:2210.11330 [hep-th]].
- [16] H. Fukuda, T. Moroi, A. Niki and S. F. Wei, “Search for WIMPs at future $\mu^+\mu^+$ colliders,” JHEP **02** (2024), 214 [arXiv:2310.07162 [hep-ph]].
- [17] Y. Matsuo, S. Nawata, G. Noshita and R. D. Zhu, “Quantum toroidal algebras and solvable structures in gauge/string theory,” Phys. Rept. **1055** (2024), 1-144 doi:10.1016/j.physrep.2023.12.003 [arXiv:2309.07596 [hep-th]].
- [18] T. Kimura and G. Noshita, “Gauge origami and quiver W-algebras,” [arXiv:2310.08545 [hep-th]].
- [19] K. Kawabata, T. Nishioka and T. Okuda, “Narain CFTs from qudit stabilizer codes,” SciPost Phys. Core **6**, 035 (2023) [arXiv:2212.07089 [hep-th]].
- [20] K. Kawabata, T. Nishioka and T. Okuda, “Supersymmetric conformal field theories from quantum stabilizer codes,” Phys. Rev. D **108**, no.8, L081901 (2023) [arXiv:2307.14602 [hep-th]].
- [21] K. Kawabata and S. Yahagi, “Fermionic CFTs from classical codes over finite fields,” JHEP **05**, 096 (2023) [arXiv:2303.11613 [hep-th]].
- [22] K. Kawabata and S. Yahagi, “Elliptic genera from classical error-correcting codes,” JHEP **01**, 130 (2024) [arXiv:2308.12592 [hep-th]].
- [23] Y. F. Alam, K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda and S. Yahagi, “Narain CFTs from nonbinary stabilizer codes,” JHEP **12**, 127 (2023) [arXiv:2307.10581 [hep-th]].
- [24] Y. Okuyama, “On some identities for confluent hypergeometric functions and bessel functions,” Journal of Approximation Theory **298** (2024) 106014.[arXiv:2301.04629[math.CA]]
- [25] J. Kaidi, K. Ohmori, Y. Tachikawa and K. Yonekura, “Nonsupersymmetric Heterotic Branes,” Phys. Rev. Lett. **131**, no.12, 121601 (2023) doi:10.1103/PhysRevLett.131.121601 [arXiv:2303.17623 [hep-th]].
- [26] J. Kaidi, K. Ohmori and Y. Zheng, “Symmetry TFTs for Non-invertible Defects,” Commun. Math. Phys. **404**, no.2, 1021-1124 (2023) doi:10.1007/s00220-023-04859-7 [arXiv:2209.11062 [hep-th]].
- [27] K. Ohmori and S. Shimamura, “Foliated-exotic duality in fractonic BF theories,” SciPost Phys. **14**, no.6, 164 (2023) doi:10.21468/SciPostPhys.14.6.164 [arXiv:2210.11001 [hep-th]].
- (会議抄録)
- [28] S. F. Ge and P. Pasquini, “Probing Light Mediators and Neutrino Electromagnetic Moments with Atomic Radiative Emission of Neutrino Pairs,” Phys. Sci. Forum **8** (2023) no.1, 51.
- (国内雑誌)
- (学位論文)
- [29] 博士論文：Y. Okuyama, “Aspects of critical $O(N)$ model with boundary and defect”.
- (著書)
- <学術講演>
- (国際会議)

一般講演

- [30] Y. Matsuo, "Minimal Models from Affine Yangian/Quantum Toroidal Algebra", July 10-14 2023, STRING-MATH2023, Univ. Melbourne.
- [31] N. Nagata, "Vortex Creep Heating vs. Dark Matter Heating in Neutron Stars", KEK-PH 2023, KEK, Tsukuba, Japan, Nov 7–10, 2023.
- [32] N. Nagata, "Electroweak Loop Contributions to the Direct Detection of Wino Dark Matter", DSU 2023, ICTP-EAIFR, Kigali, Rwanda, Jul. 10–14, 2023.
- [33] T. Sichanugrist, "Dark matter detection using nuclear magnetization in magnet with strong hyperfine interaction", SI2023, Nantou County, Taiwan, Aug 21–25, 2023.
- [34] Pedro Pasquini, "Light BSM physics search using radiative emission of neutrino pair," KEK-PH 2023, KEK, Tsukuba, Japan, Nov 7–10, 2023.
- [35] Pedro Pasquini, "Neutrino Mass Measurement with Cosmic Gravitational Focusing," 25th New Physics Forum, Kavli IPMU, Chiba, Japan, Feb. 20, 2024.
- [36] Pedro Pasquini, "Neutrino Mass Measurement with Cosmic Gravitational Focusing," Berkeley Week, University of Tokyo, Tokyo, Japan, Mar. 11–15, 2024.
- [37] T. Sichanugrist, "Dark Matter direct detection using Qubits," Berkeley Week, University of Tokyo, Tokyo, Japan, Mar. 11–15, 2024.
- [38] T. Sichanugrist, "Dark Matter Detection with Qubit excitation (poster presentation)," The Future of High Energy Physics: A New Generation, A New Vision, Aspen Center for Physics, Aspen, CO, US, Mar. 24–29, 2024.
- [39] J.Wada, "Revisiting Affleck-Dine Leptogenesis with light sleptons", International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY-2023), University of Southampton, Jul. 17–21, 2023.
- [40] J.Wada, "Thermal Leptogenesis in the Minimal Gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ Model", Berkeley Week, University of Tokyo, Tokyo, Japan, Mar. 11–15, 2024.
- [41] J.Wada, "Thermal Leptogenesis in the Minimal Gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ Model", Hokkaido Workshop on Particle Physics at Crossroads, Sapporo, Japan, Mar. 7–10, 2024.
- [42] Q. Li, "Instability of the Electroweak Vacuum in Starobinsky Inflation", The 2023 Shanghai Symposium on Particle Physics and Cosmology, Shanghai, China, Sep. 22–24, 2023.
- [43] A. Niki, "Revisiting the slepton coannihilation model with light higgsino", The 30th International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions, University of Southampton, UK, Jul. 17–21, 2023
- [44] A. Niki, "Search for WIMPs at future $\mu^+\mu^+$ colliders", KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology, KEK, Tsukuba, Japan, Nov. 7–10, 2023
- [45] A. Niki, "Search for WIMPs at future muon colliders", Berkeley Week, University of Tokyo, Tokyo, Japan, Mar. 11–15, 2024

招待講演

- [46] T. Moroi, "Detecting Hidden Photon Dark Matter via the Excitation of Qubits" HPNP Workshop, (June 5 - 9, 2023), Osaka, Japan.
- [47] T. Moroi, "Introduction of Dark Matter," Dark Matter Studies in Accelerator Physics, (September 26 - 28, 2023), Padova, Italy.
- [48] T. Moroi, "Detecting Hidden Photon Dark Matter via the Excitation of Qubits," QUPosium2023, (December 11 - 13, 2023), Tsukuba, Japan.
- [49] T. Moroi, "Detecting Dark Matter with Quantum Computers," Hokkaido Workshop on Particle Physics at Crossroads, (March 7 - 10, 2024), Sapporo, Japan.
- [50] Y. Matsuo, "A Calogero Model for the Non-Abelian Hall Effect", 2024 Kanto-NTU High Energy Physics Workshop, January 15–18 2024.
- [51] N. Nagata, "Challenges in the Dark Matter Search with Neutron-Star Temperature Observations", Extreme Mass Dark Matter Workshop: from Superlight to Superheavy, YITP, Kyoto, Japan, Mar 4–22, 2024.
- [52] N. Nagata, "Axionic Wormholes and Quality Problem", 20th Recontres du Vietnam: BSM in particle physics and cosmology—50 years later, ICISE, Quy Nhon, Vietnam, Jan 7–13, 2024.
- [53] N. Nagata, "Vortex Creep vs WIMP DM Heating in Neutron Stars", SI 2023, Sun-Link-Sea Forest and Nature Resort, Nantou, Taiwan, Aug 21–25, 2023.
- [54] N. Nagata, "Neutron Star Heating: WIMP DM vs Others", TDLI-PKU BSM Workshop 2023: Looking to the Sky, Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai, China, Aug 1–4, 2023.
- [55] N. Nagata, "Neutrinos and Proton Decay in Grand Unified Theories", Neutrino Workshop @ IFIRSE, Quy Nhon, Vietnam, Jul 17–19, 2023.
- [56] N. Nagata, "Neutron Star Heating: WIMP DM vs Others", PASCOS 2023, ISEP, University of California, Irvine, CA, USA, Jun 26–30, 2023.
- [57] K. Ohmori "Non-supersymmetric heterotic branes, bordisms, 2d SCFTs", Aug. 28th-Sep. 1, Categorical Symmetries in Quantum Field Theory, Swiss MAP
- [58] K. Ohmori "Non-supersymmetric Heterotic Branes", Sep. 11–15, Strings in Seoul 2023, KIAS

- [59] K. Ohmori ”generalized symmetry in particle phenomenology”, Nov. 7-10, KEK-PH 2023, KEK
- [60] K. Ohmori ”Categorical Aspects of Symmetry in Fermionic Systems”, Mar. 18-22, Higher Categorical Tools for Quantum Phases of Matter, Perimeter Insitute
- [61] K. Ohmori ”Anomalous Symmetry in Sigma Models”, Mar. 27-29, Quantum Field Theory and Related Mathematical Aspects 2024, Osaka Metropolitan University
- [62] K. Kawabata, ”Supersymmetric CFTs from quantum stabilizer codes”, Quantum Field Theory and Related Mathematical Aspects 2024, Osaka Metropolitan University, Mar. 27-29.
- [63] M. E. Ramirez-Quezada, ”WD cooling through dark sector physics,” 24th New Physics Forum, June 13, 2023.
- [64] Koichi Hamaguchi, ”Supernova-scope for the Direct Search of Supernova Axions,” Windows on the Universe, 30th Anniversary of the Rencontres du Vietnam, ICISE, Quy Nhon, Aug. 10, 2023.

(国内会議)

一般講演

- [65] 永田夏海, ”中性子星温度観測を通じた WIMP 暗黒物質探索”, ～中性子星の観測と理論～研究活性化ワークショップ 2023, 京都大学理学研究科セミナーハウス, 2023 年 9 月 6-8 日.
- [66] 矢萩慎一郎, ”共形場理論における楕円種数と誤り訂正符号”, 日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大学, 2023 年 9 月 16-19 日.
- [67] 川畑洗貴, ”量子誤り訂正符号とフェルミオン共形場理論”, 日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大学, 2023 年 9 月 16-19 日.
- [68] 川畑洗貴, ”Fermionic CFTs from classical codes”, 場の理論と弦理論 2023, 京都大学基礎物理学研究所, 2023 年 8 月 9 日.
- [69] 和田淳太郎 ”Revisiting Affleck-Dine Leptogenesis with light sleptons”, 日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大学, 2023 年 9 月 16-19 日.
- [70] 和田淳太郎 ”Thermal Leptogenesis in the Minimal Gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ Model”, 基研研究会 素粒子物理学の進展 2023, 京都大学, 2023 年 8 月 28-9 月 1 日.

招待講演

- [71] 大森寛太郎 ”一般化対称性について”, 9 月 16 日-9 月 19 日, 日本物理学会年次大会, 東北大学
- [72] 永田夏海, ”Axionic Wormholes and Quality Problem”, Aso Workshop on Particle Physics and Cosmology 2023, 阿蘇の司, 2023 年 11 月 12-15 日.
- [73] 仁木敦也, ”固定標的実験での新物理探索”, Aso Workshop on Particle Physics and Cosmology 2023, 阿蘇の司, 2023 年 11 月 12-15 日.

(セミナー)

- [74] T. Sichanugrist, ”Detection of hidden photon dark matter using the direct excitation of transmon qubits,” KEK Theory Center, Tsukuba, Ibaraki, Jun 20, 2023.
- [75] T. Sichanugrist, ”Detection of hidden photon dark matter using the direct excitation of transmon qubits,” Osaka University Particle Physics Theory Group, Osaka, July 18, 2023.
- [76] N. Nagata, ”WIMP DM Heating in Neutron Stars,” Van Lang University, Ho Chi Minh City, Vietnam, July 21, 2023.
- [77] 永田夏海, ”超新星・中性子星冷却を用いたアクシオン探索”, 宇核連宇宙核物理セミナー, オンライン, 2023 年 11 月 20 日.
- [78] 永田夏海, ”WIMP DM Heating in Neutron Stars”, PCF2023-2024, University of Toyama, Toyama, Jan 16, 2024.
- [79] T. SICHANUGRIST, ”Wave-like Dark Matter Searches using Qubits”, RIKEN iTHEMS DMWG (online), Jan 22, 2024.
- [80] T. SICHANUGRIST, ”Wave-like Dark Matter Searches using Qubits”, Chulalongkorn University HEP group, Bangkok, Thailand, Jan 31, 2024.
- [81] M. E. Ramirez-Quezada, ”Compact Stars: a window to new physics,” Tokyo Women’s Christian University May 26, 2023.
- [82] 濱口幸一, ”Q-ball について”, 海洋技術開発機構 (JAMSTEC) 東京事務所, 2023 年 6 月 23 日
- [83] K. Hamaguchi, ”Exploring Physics Beyond the Standard Model via Temperature Observations of Neutron Stars,” Koichi Hamaguchi, KEK seminar, February 27, 2024.
- [84] 和田淳太郎, ”Revisiting Affleck-Dine Leptogenesis with light sleptons”, 大阪大学, 2023 年 5 月 23 日.
- [85] 和田淳太郎, ”Revisiting Affleck-Dine Leptogenesis with light sleptons”, Technical University of Munich (TUM), July 24, 2023.
- [86] 和田淳太郎, ”Thermal Leptogenesis in the Minimal Gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ Model”, 東北大学, 2023 年 10 月 26 日.
- [87] K. Kawabata, ”Fermionic CFTs from classical codes,” Pohang University of Science and Technology, May 17, 2023.
- [88] K. Kawabata, ”Fermionic CFTs from classical codes,” Tohoku University, July 13, 2023.
- [89] K. Kawabata, ”Supersymmetric conformal field theories from quantum stabilizer codes,” Kyoto University (YITP), Oct 20, 2023.
- [90] K. Kawabata, ”Supersymmetric conformal field theories from quantum stabilizer codes,” Korea Institute for Advanced Study (KIAS), Oct 30, 2023.

- [91] K. Kawabata, “Supersymmetric conformal field theories from quantum stabilizer codes,” Kyoto University, Nov 8, 2023.
- [92] K. Kawabata, “Supersymmetric CFTs from quantum stabilizer codes,” Tokyo Institute of Technology, Jan 10, 2024.

(集中講義)

- [93] 大森寛太郎, “場の量子論における一般化対称性とその応用”, 2023 年 10 月 11 日-10 月 13 日
- [94] 大森寛太郎, “場の量子論における一般化対称性とその応用”, 2023 年 11 月 29 日-12 月 1 日
- [95] 濱口幸一, “素粒子標準模型および「標準模型を超える物理」”, 東邦大学, 2023 年 10 月 4 日, 11 日, 18 日

2 原子核・素粒子実験

2.1 原子核実験グループ (中村研究室)

原子核実験グループ (Nuclear EXperimental Group; NEX) は 2022 年 4 月に中村教授が着任して以降、中村教授、永尾助教、修士学生 2 名の体制で研究を進めている。

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) 米国ジェファーソン研究所 (JLab)、2) ドイツマインツ大学 (MAMI)、3) 東北大学電子光理学研究センター (ELPH) というストレンジクォークを作ることができる高エネルギーの大強度電子加速器施設を拠点に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 4 つの大きな謎として 1) ハイパートライトンパズル、2) 原子番号ゼロハイパー核 ($nn\Lambda$) の存否、3) ラムダハイパー核の荷電対称性の破れ、4) ハイペロンパズル(重い中性子星がなぜ存在するのか)がある。我々は様々な実験を通してこれらの謎を解決するため研究を推進している。

2.1.1 JLab における Λ ハイパー核電磁生成分光実験

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

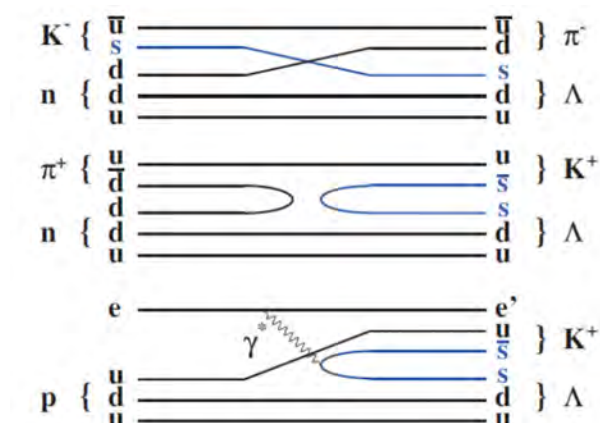


図 2.1.1: 典型的なラムダ粒子生成反応。上から (K^-, π^-), (π^+, K^+), ($e, e'K^+$) 反応

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。

中性ハイパー核 $nn\Lambda$ 探索

存在が確立している最も単純なハイパー核は陽子、中性子、ラムダ粒子が一つずつで構成される三重水素ラムダハイパー核(ハイパートライトン: ${}^3_\Lambda\text{H}$)であるが、その陽子を中性子に置き換えた $nn\Lambda$ 系が現在注目を浴びている。これまでのハイパー核に関する知見によれば $nn\Lambda$ は束縛しないと考えられるが近年ドイツの GSI 研究所において $nn\Lambda$ 系の束縛状態を観測した、という報告があり、もしそれが正しいとすると原子番号ゼロのハイパー核の最初の発見、ということになる。しかし、実験精度の制限などからその存否は未だ確定していない。トリチウム標的を用意して ${}^3\text{H}(e, e'K^+)nn\Lambda$ 反応を使うとこの状態が束縛状態でも寿命が極端に短い共鳴状態であっても探索

することが可能である。ただし、放射性物質であるトリチウムを標的として使う必要があり、実験的には難しい。しかし、我々はJLabにおいて、40 TBqの低温ガストリチウム標的を用いて本実験を行い、欠損質量分布の生成閾値付近に興味深い構造があるものの、束縛状態としてのクリアなピークが存在しないことを示し、その生成断面積に上限値を与えた。また、この反応により準自由生成されたラムダ粒子のエネルギー分布より、未だ、謎に包まれた Λn 相互作用に関する貴重な知見を得ることに成功した。

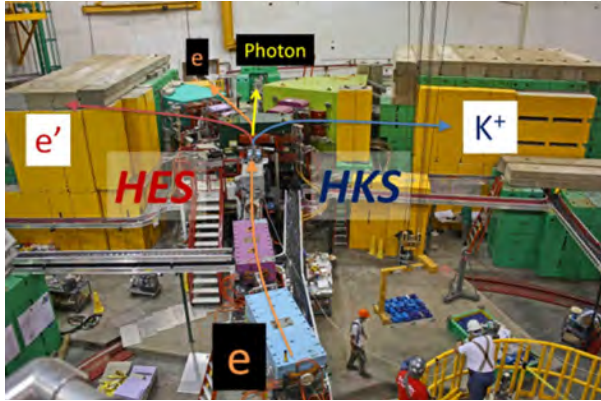


図 2.1.2: JLab Hall-C 実験室に設置した HKS(高分解能 K 中間子スペクトロメータ) と HES(高分解能電子スペクトロメータ)

ハイペロン電磁生成

$(e, e'K^+)$ 反応は陽子をハイペロンである Λ, Σ^0 に変換する反応であるため水素標的を用意し、既知の Λ, Σ^0 の質量を使うことでエネルギーの絶対値較正を極めて高い精度で行うことができる。これは $(e, e'K^+)$ 反応によるラムダハイパー核精密分光の極めて重要な実験的利点であり、中性子をハイペロンに変換する $(K^-, \pi^-), (\pi^+, K^+)$ 反応では不可能である。この $p(e, e'K^+)\Lambda/\Sigma^0$ 反応は、エネルギー較正のために重要であるが、それと同時に物理的にも興味深い研究対象である。ハイパー核電磁生成の素過程である本反応はストレンジネス電磁生成の理論に対する貴重なインプットであるにも関わらず、低運動量移行 (Q^2) 領域、超前方において信頼できるデータに乏しい。ある程度、実験データが存在する領域に関しては様々な理論計算の結果はほぼ一致しているが、低運動量移行 (Q^2) 領域、超前方においては理論予想が大きく食い違い、信頼できる実験結果が待ち望まれている。我々は低温水素ガス標的を用いて $Q^2 \sim 0.5 \text{ (GeV}/c^2)^2$, $W = 2.14 \text{ GeV}$, $\theta_K^{\text{cm}} \sim 8^\circ$ において $p(e, e'K^+)\Lambda/\Sigma^0$ 反応の微分断面積を測定することに成功した。実験データの解析と並行して、チェコ科学アカデミーの理論グループとの共同研究によりアイソバーモデルを用いたハイペロン電磁生成反応の理論計算を遂行した。ハイペロン電磁生成断

面積は横成分、縦成分とそれらの干渉項に分離して議論することができるが、今回、我々が得た実験結果と比較することで、本運動学領域においては、実光子ビームを用いた光生成反応では観測することのできない縦成分の寄与が大きいことを見出した。

η' 電磁生成

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

$(e, e'K^+)$ 反応分光

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

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

2. 原子核・素粒子実験

2.1.2 MAMI における崩壊 π^- 中間子分光

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

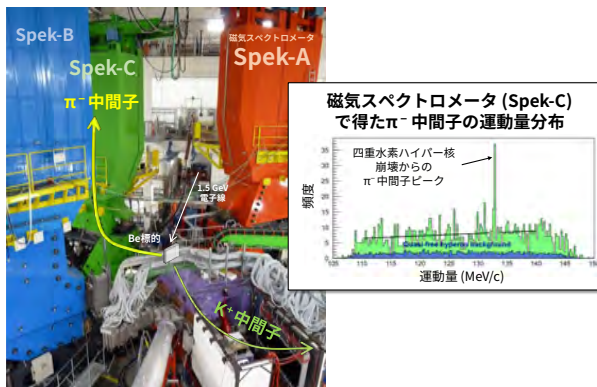


図 2.1.3: (左) MAMI の実験セットアップ。緑色の Spek-C 検出器と紫色の Kaos 検出器で崩壊 π^- と K^+ 中間子を測定する。(右) MAMI で観測した ${}^4_\Lambda\text{H}$ からの π^- 中間子ピーク。世界最高分解能、精度による観測結果。

三重水素ラムダハイパー核の高精度質量測定

近年、三重水素ラムダハイパー核 (${}^3_\Lambda\text{H}$) の質量が従来報告されている値より軽い (束縛エネルギーが大きい) のではないかという結果が米国 BNL の STAR 実験から報告されており、ハイパートライトンパズルの一端となっている。 ${}^3_\Lambda\text{H}$ は最も単純なハイパー核であり厳密三体計算が可能なることから、その質量は

より重いハイパー核に対する理論計算を遂行するために必要なインプットとしても使われる。もし本当に ${}^3_\Lambda\text{H}$ の質量が軽いとすれば、これまでの理論フレームワークを再考しなければならない可能性があり大いに注目を集めている。一方で、欧州 CERN LHC の ALICE 実験よりまた異なった ${}^3_\Lambda\text{H}$ 質量が報告されるなど、さらなる実験精度向上が望まれている状況にある。

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

この実験を実施するべく 2022 年に磁気スペクトロメータの再立ち上げと新開発の Li 標的の設置を行った。その後、実験を遂行、データを収集し、これまでの実験で測定した統計量の約 2 倍の物理データを取得することに成功した。現在、データ解析を進めている。

放射光干渉法による電子ビームエネルギーの高精度測定

崩壊 π^- 中間子分光の実験精度を保証するにあたり、磁気スペクトロメータの運動量較正が極めて重要である。MAMI では電子原子核弾性散乱からの散乱電子を用いて運動量較正しており、標的に入射する電子ビームのエネルギー精度が最終的な実験精度を決定している。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 年の 3 月より実施しており、2024 年度 5 月まで続く見込みである。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 ${}^3_\Lambda\text{H}$ 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の約 10 倍という圧倒的な精度で ${}^3_\Lambda\text{H}$ の質量を決定できると期待される。

2.1.3 ELPH におけるハイパー核研究

先述の JLab、MAMI における研究では、大強度連続電子線を利用した電磁反応によりハイパー核の

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

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

光生成したハイパー核の寿命測定実験

ラムダハイパー核は約 200 ps の寿命で弱い相互作用で崩壊するが、核種によって崩壊チャンネルや寿命が異なる。これらは束縛しているラムダ粒子とコア原子核との波動関数の重なり具合や全角運動量によって決まるので、寿命や崩壊確率を調べることはハイパー核構造や内部相互作用の研究に繋がる。近年、前述した STAR や ALICE など重イオン衝突実験から ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 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、ELPH 第二実験室にあるビームラインに新しいビームプロファイルモニターを設置し、わずか 1 秒のデータ収集によりビーム位置を約 10 μm で測定可能なシステムの構築に成功した (図 2.1.4)。また、光検出器 (SiPM) を用いた磁場下でも動作可能な高時間分解能検出器の基礎技術の確立にも成功した。

重水素標的を用いた Λn 終状態相互作用測定

ラムダハイパー核実験の解析でも重要な Λn 間相互作用は Λn の散乱実験により測定するのが最も直接的だが、実験的困難からこのような実験は未だ実施され

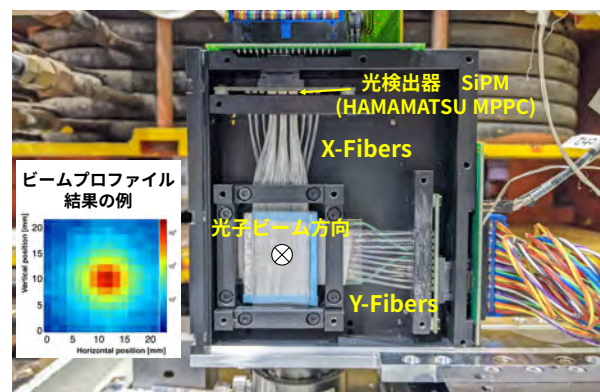


図 2.1.4: 新設した光子ビームプロファイルモニターと測定結果例。背景にあるのは荷電粒子バックグラウンドを除去するための大きな電磁石の一部。

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 における次世代ハイパー核分光実験

大強度陽子加速器施設 J-PARC のハドロン実験施設の拡張計画が現在、強力に推進されている。そこで旗頭となっている π 中間子ビームラインが高強度高分解能ビームライン (HIHR : High Intensity High Resolution beamline) である。この HIHR は運動量分散整合技術を導入することにより通常、一粒子毎に運動量を測定する必要のある入射 π 中間子の運動量を測ることなく、ラムダハイパー核の励起エネルギーを測定できる夢の研究施設である。従来は入射ビームの品質により数 MeV の分解能に制限されていた π 中間子を用いたラムダハイパー核反応実験であるが、HIHR では半値全幅 0.5 MeV を切る分解能を達成し、初めて $(e, e'K^+)$ 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」を実現するべく、現在 HIHR および次世代の (π^+, K^+) 反応によるラムダハイパー核精密分光実験のデザインを進めている。

2. 原子核・素粒子実験

2.1.5 異分野融合研究

先端検出器技術の異分野応用（基礎科学から核医学などの応用科学まで）を目指して、大強度電子ビーム下における高分解能 γ 線検出器、荷電粒子検出器の導入、関連する電子回路の開発研究を進めている。特に近代的な原子核・素粒子実験はもちろん医学目的にも広く使われている半導体光検出器 (SiPM) とプラスチックシンチレーターを組み合わせた荷電粒子検出器の読み出し回路に使われる ASIC (Application Specific Integrated Circuit) の開発を Kavli-IPMU 高橋研究室と協力して進めた。

<報文>

(原著論文)

- [1] S. Zhamkochyan *et al.*, “Advanced picosecond precision Radio Frequency Timer”, Journal of Instrumentation, **19** (2024) C02014.
- [2] K. Okuyama *et al.*, “Electroproduction of the Λ/Σ^0 hyperons at $Q^2 \sim 0.5(\text{GeV}/c)^2$ in forward angles”, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.01173>; submitted to Phys. Rev. C.

(会議抄録)

- [3] P. Klag *et al.*, “High accuracy synchrotron radiation interferometry with relativistic electrons”, Journal of Physics: Conference Series **2482** (2023) 012016.
- [4] Baha A. Balantekin and S.N. Nakamura, “American Physical Society Division of Nuclear Physics and Physical Society of Japan Joint Meeting”, Nuclear Physics News, **34(1)**, 32–33.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [5] S.N. Nakamura, “Reaction spectroscopy of Lambda hypernuclei at JLab and J-PARC”, HADRON2023, June 7 (2023), Bologna Italy.
- [6] S. Nagao “Mass Determination of Light Hypernuclei with the Decay Pion Spectroscopy -from MAMI to JLab-”, 2023 Summer Hall A/C Meeting, June 30 (2023), JLab U.S.
- [7] K. Nishi, “Development of a High-Precision Electron Beam Measurement Method in the Several Hundred MeV Range Using Undulator Synchrotron Radiation Interferometry”, HAWAII2023, November 30 (2023), Hawaii U.S.
- [8] K. Nishida, “Development of a new TOT-ASIC circuit for SiPM with a good time-resolution”, HAWAII2023, November 30 (2023), Hawaii U.S.
- [9] K. Nishi, “Undulator radiation interferometry for 200 MeV range electron beam energy measurement”, SNP School 2023, December 12 (2023), J-PARC Ibaraki.

- [10] K. Nishida, “Development of a new TOT-ASIC circuit for SiPM with a good time resolution”, SNP School 2023, December 13 (2023), J-PARC Ibaraki.
- [11] K. Nishi, “Development of multi-channel high-time-resolution ToT-ASIC for SiPM readout”, Strange Strong Force and Bound System 2024, February 17 (2024), Iwaki Ibaraki.
- [12] K. Nishida, “Undulator radiation interferometry for high resolution energy measurement of electron beam”, Strange Strong Force and Bound System 2024, February 17 (2024), Iwaki Ibaraki.

招待講演

- [13] S.N. Nakamura “Precise Spectroscopy of Lambda Hypernuclei”, ARARAT Workshop, May 4 (2023), Yerevan, Armenia.
- [14] S. Nagao “High-resolution hypernuclear decay pion spectroscopy at MAMI and future”, HADRON2023, June 8 (2023), Bologna Italy.
- [15] S. Nagao, “High-resolution Decay Pion Spectroscopy of hypernuclei at MAMI, JLab and J-PARC”, Fourth International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (HEF-ex 2024), February 19 (2024), J-PARC Ibaraki.

(国内会議)

一般講演

- [16] 中村哲, 「高エネルギー光子ビームで探る原子核内部と中性子星深部」, 新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」領域研究会, 2023 年 10 月 28 日, 理化学研究所
- [17] 永尾翔, 「SiPM 読み出し回路開発と今後の展開、応用ー原子核実験よりー」, 新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」領域研究会, 2023 年 10 月 28 日, 理化学研究所
- [18] 西田賢, 「高時間分解能での MPPC 読み出しのための ToT-ASIC の開発」, ELPH シンポジウム 2024, 2024 年 3 月 8 日, 東北大学電子光物理学研究センター
- [19] 永尾翔, 「ハイパー核崩壊パイ中間子分光の JLab への展開」, 2024 年 3 月 18 日, 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン
- [20] 西田賢, 「高時間分解能を目指した MPPC 用 TOT-ASIC の新規開発」, 2024 年 3 月 19 日, 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン
- [21] 西幸太郎, 「電子ビームエネルギー高精度測定のためのアンジュレータ放射光干渉法」, 2024 年 3 月 21 日, 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン

招待講演

- [22] 中村哲, 「ラムダハイパー核電磁生成分光」, 核談創立 70 周年記念シンポジウム ～原子核物理学の昨日・今日・明日, 2024 年 3 月 7 日, 東京工業大学 大岡山キャンパス 西 9 号館 デジタル多目的ホール

(セミナー)

- [23] 永尾翔, 「電子ビームを用いたラムダハイパー核分光実験の新展開」, ELPH Seminar, 2023 年 8 月 2 日, 東北大学電子光物理学研究センター
- [24] 永尾翔, 「汎用 MPPC 読出し用 ASIC 回路」, SPADI 勉強会, 2023 年 9 月 8 日, オンライン

(アウトリーチ)

- [25] 中村哲, 「我々の周りの物質はいつ、どうやって出来たのだろうか」, 荒川区自然科学フォーラム特別講義, 2023 年 7 月 15 日, 東京大学本郷キャンパス理学部 4 号館 1220 教室
- [26] 永尾翔, 「強い力が支える世界～加速器で探る原子核～」, 高校生のための冬休み講座, 2023 年 12 月 25 日

(国際会議・国際スクール主催)

- [27] Co-chairs: S.N. Nakamura and B. Balantekin, Sixth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of APS and JPS (HAWAII2023; 第 6 回日米物理学会合同核物理分科会), Nov. 26 - Dec. 1 (2023), Hawaii, U.S.
- [28] School Chairs: T. Takahashi, A. Hosaka and S.N. Nakamura, The 12th international school for strangeness nuclear physics (SNP School 2023), December 11-15 (2023), Tokai, Japan.

2.2 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。現在は特に、スーパーカミオカンデ実験、およびスーパーカミオカンデと大強度陽子加速器 J-PARC を使ったニュートリノ振動実験・T2K 実験を推進している。さらに研究を進展させるべく、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。また、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の電子・陽電子衝突型加速器スーパー B ファクトリーを使った Belle II 実験にも参加している。

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

2.2.1 加速器による長基線ニュートリノ振動実験 (T2K 実験)

T2K (Tokai-to-Kamioka) 実験は、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC で人工的に作り出した (反) ニュートリノビームを 295 km 離れた岐阜県飛騨市のスーパーカミオカンデで観測し、ニュートリノの種類が飛行中に自然に変化する「ニュートリノ振動」という現象を用いて、ニュートリノの性質を明らかにする実験である。T2K 実験の現在の大きな目標は、ニュートリノと反ニュートリノでのミュー

オン型から電子型への遷移確率の差異を見ることで、物質と反物質の性質の違い (CP 対称性の破れ) を観測することである。

T2K 前置検出器アップグレード

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

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

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

2023 年度には検出器本体の建設を終え、動作確認を行なったのち 10 月にはついに前置検出器ホール地下の構造体へインストールした (図 2.2.5)。信号読み出しの電子回路は全数揃っておらず約 7 割のチャンネルにとどまったが、11 月下旬からニュートリノビームによる試運転を開始し、検出器内でのニュートリノ反応を観測した (図 2.2.6)。運転時の経験をフィードバックしつつ既存の装置との統合を進め、SuperFGD 検出器を安定に運用できるシステムを確立した。今後、2024 年春には電子回路が全数揃い、夏までには全チャンネルが稼働した完全な形でのデータ収集を開始する予定である。

前置検出器の事象再構成と電子ニュートリノ事象選別 当研究室では、細分化された SuperFGD の構造を利用し、CP 対称性の破れの測定に重要な電子ニュートリノの反応断面積の測定を行うための研究を進めている。今年度は、反応点の再構成や粒子識別のアルゴリズムの改良を行い、電子ニュートリノ反応事象選別の効率向上や背景事象削減のための研究を進めた (冲永和平・小林北斗 修士論文 [12, 13])。

ニュートリノ振動の研究

スーパーカミオカンデ (SK) による大気ニュートリノの観測と T2K 実験での加速器ニュートリノの測定を合わせて解析することで、ニュートリノ振動

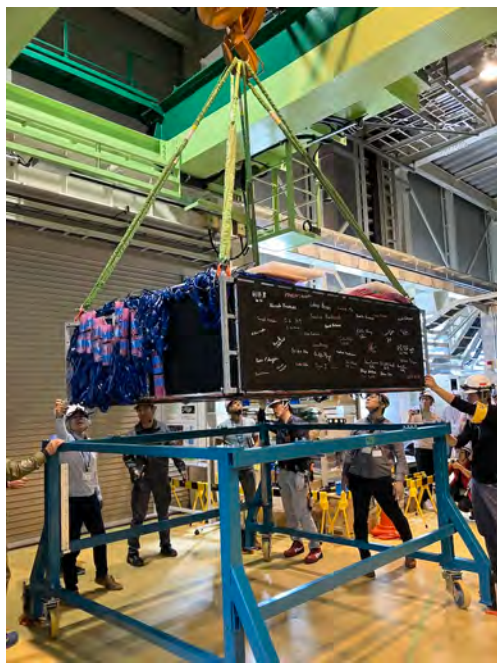


図 2.2.5: 実験ホール地下へのインストールのため SuperFGD 検出器をクレーンで釣り上げたところ。装置の外側にはグループメンバーの一部が名前を書き記している。

パラメータの測定感度を向上させることが可能となる。これまで独立に解析されてきた2種類のデータを組み合わせるために必要となるさまざまな系統誤差のチェックを完遂し、世界初の合同解析結果を公表した(江口碧 博士論文 [11])。図 2.2.7 に、SK による大気ニュートリノの観測と T2K 実験での加速器ニュートリノの測定をそれぞれ個別に解析した場合と、SK-T2K の合同解析をした場合との2次元信頼区間を示す。合同解析によって、ニュートリノ振動のパラメータにより厳しい制限を与える成果が得られた。

2.2.2 スーパーカミオカンデ実験

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

SK-Gd

スーパーカミオカンデは、2020年夏に5万トンの超純水中に13トンの硫酸ガドリニウム八水和物

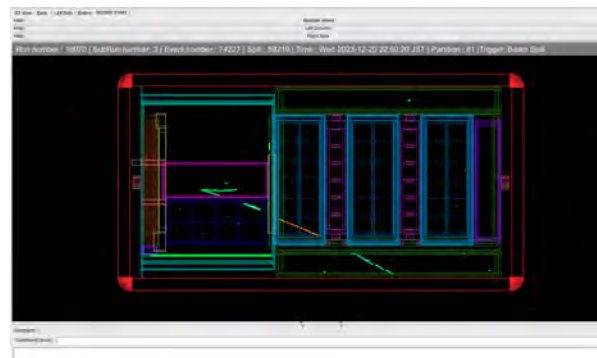


図 2.2.6: SuperFGD 検出器で観測したニュートリノ反応の例。ニュートリノビームは図中左方向から装置に飛来する。SuperFGD 内部で反応したときに生成される荷電粒子の飛跡を観測することでニュートリノの測定を行う。

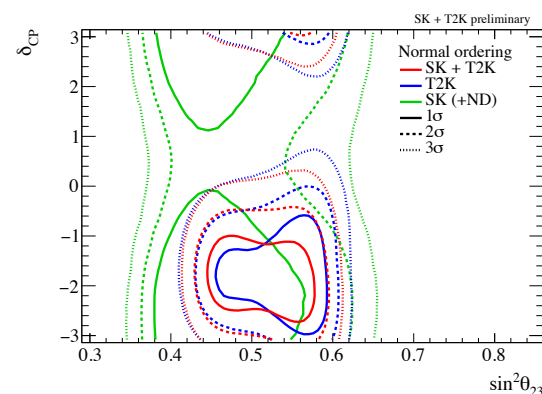


図 2.2.7: SK と T2K のそれぞれ個別の解析と、SK-T2K の合同解析による混合角 $\sin^2 \theta_{23}$ と CP 位相角 δ_{CP} の2次元信頼区間 [11]。

($\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) を添加し、SK-Gd として新たな観測を開始した。2022年には、約27トンの硫酸ガドリニウム八水和物を追加で導入し、さらなる高感度での観測をスタートさせた。

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

SK-Gd 検出器の較正 中性子の信号は、測定器の応答をよりよく理解するための新たな手段ともなる。宇宙線による原子核破砕で生成される中性子を利用することで、検出器全域にわたって連続的に応答の較正を行うことが可能となる。データ中からそのような中性子の信号を抜き出す手法を開発し、これを 2020 年のガドリニウム導入以降 3 年以上にわたるデータに適用し、スーパーカミオカンデのエネルギースケールを 0.5% より良い精度で連続的に評価することに成功した [36]。さらに、中性子の信号をスーパーカミオカンデの数 MeV - 数 10MeV 領域でのエネルギー較正に用いることを目標として、モンテカルロシミュレーションとの比較による検出器応答の研究を行っている。

超新星背景ニュートリノの探索 2020 年から 2022 年にかけて取得した、ガドリニウム濃度 0.01% での 552 日分の観測データを用いた超新星背景ニュートリノの探索を行った。ガドリニウムによる中性子検出を利用することで、従来の純水での観測に比べ、中性子を誤検出することによる背景事象を大幅に低減しつつ、信号の検出効率を約 2 倍に向上させることに成功した。この結果、552 日分の SK-Gd データで、純水での 2970 日分の観測に匹敵する感度を達成し、結果を論文にまとめ公表した [5]。現在、改善した手法によるより高感度での探索、およびガドリニウム濃度 0.03% で取得したデータを含めた解析を進めている。

ニュートリノ反応を精密に理解するための原子核実験の検討 超新星背景ニュートリノ探索において、最も問題となる背景事象が、大気ニュートリノによる中性カレント準弾性散乱である。この反応では、ニュートリノ反応およびその二次反応により生成された高励起状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の発見の鍵である。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 [22, 31, 33]。現在、実験の具体的な計画の検討を進めており、近い将来のデータ取得を目指している。

2.2.3 ハイパーカミオカンデ計画

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

ハイパーカミオカンデの建設は 2020 年に始まり、2027 年の運転開始を目指して国際協力でプロジェ



図 2.2.8: ハイパーカミオカンデ空洞上部のドーム部分が完成したときの共同研究者の集合写真。

クトを進めている。超大規模地下空洞本体の掘削は 2022 年 11 月に開始され、2023 年 10 月には空洞上部のドーム部分（直径 69m、高さ 21m）が完成した（図 2.2.8）。その後、直径 69m、高さ 73m の円筒部の掘削が進められている。

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、光電子増倍管の連鎖爆縮防止カバー、信号読み出し回路、外水槽など、海外担当分の分担調整や予算調達、スケジュール管理などのマネジメントを行うことに加え、光電子増倍管の性能検査や測定器の詳細な較正方法の確立など、検出器の性能を最大に引き出すための開発研究を行っている。

光電子増倍管の開発・生産・品質管理

ハイパーカミオカンデ用の光電子増倍管は、スーパーカミオカンデのものよりも光検出効率、電荷分解能、時間分解能などの性能がそれぞれ約 2 倍改善している。初期の大量生産品に暗計数率の不安定性が確認されたことを受けて、2022 年 5 月から原因の究明と対策の立案を進めた。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、2023 年 5 月から納入を再開した。製造者と実験グループの双方で製造品のモニターを行い、ハイパーカミオカンデ実験に要求される性能を満たす品質であることを継続的に確認している。

2024 年 3 月までに合計 8,729 本の光電子増倍管が納入された。

検出器の較正

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

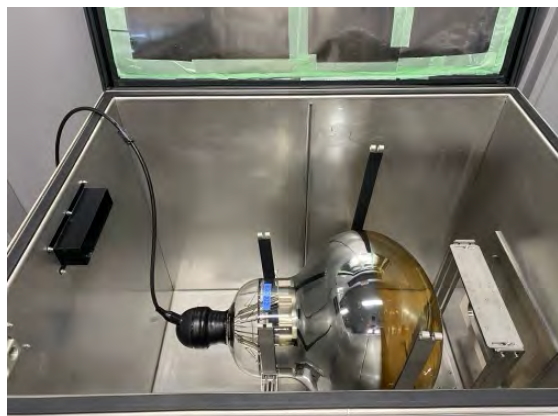


図 2.2.9: 水槽暗箱とハイパーカミオカンデ用 50 cm 径光電子増倍管。

光電子増倍管のキャリブレーションにおいて、地上でのプレキャリブレーション環境と実機の水中での環境の違いによる性能の違いを精密に理解し補正することが極めて重要である。このため、柏キャンパス内に設置した水槽暗箱（図 2.2.9）を用い、ハイパーカミオカンデに用いられる予定の 50 cm 径光電子増倍管の水中での性能の温度依存性を始めて測定した（渡辺英一朗 修士論文 [14]）。

2.2.4 新検出器開発

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

Gd を用いた無機結晶シンチレーター ニュートリノが、それ自身の反粒子であるという性質（マヨラナ性）を持つと、ある種の原子核においてニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊が起こると言われている。ガドリニウム 160 もニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($^{160}\text{Gd} \rightarrow ^{160}\text{Dy} + 2e^-$) を起こすと予想されている。これを探索するため、SK-Gd のために開発した超高純度 Gd 精製技術を応用し、Gd を含んだ高純度無機結晶シンチレーターを開発している。約 100 g の Ce ドープ GAGG 結晶 ($\text{Ce} : \text{Gd}_3\text{Al}_{12}\text{Ga}_3\text{O}_{12}$) を製作し、その放射性不純物の含有量を、結晶内部の発光の遅延同時計測、および高純度ゲルマニウム検出器や表面 α 検出器を用いた測定により評価した。また、新たな候補結晶として GPS 結晶 ($\text{Ce} : \text{Gd}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) の検討を開始した。現在、原材料および 1 cm 角の結晶の放射性不純物量および光学性能の評価を進めている [35]。

発光時定数の短い波長変換ファイバーの試験 近年新しく開発された発光時定数の短い波長変換ファイバー（クラレ社製 YS-2, 4, 6）の基本特性を測定した。実験室での LED を用いたファイバー単独の測定に加え、KEK の PF-AR テストビームラインでプ

ラスチックシンチレータと組み合わせた際の特性を測定し、結果を論文にまとめ投稿した。

<受賞>

- [1] 清水信宏、第 18 回（2024 年）日本物理学会若手奨励賞、日本物理学会、2023 年 10 月

<報文>

（原著論文）

- [2] M. Shinoki *et al.* [Super-Kamiokande], “Measurement of the cosmogenic neutron yield in Super-Kamiokande with gadolinium loaded water,” *Phys. Rev. D* **107**, no.9, 092009 (2023) doi:10.1103/PhysRevD.107.092009
- [3] K. Abe *et al.* [T2K], “Measurements of neutrino oscillation parameters from the T2K experiment using 3.6×10^{21} protons on target,” *Eur. Phys. J. C* **83**, no.9, 782 (2023) doi:10.1140/epjc/s10052-023-11819-x
- [4] K. Abe *et al.* [T2K], “First measurement of muon neutrino charged-current interactions on hydrocarbon without pions in the final state using multiple detectors with correlated energy spectra at T2K,” *Phys. Rev. D* **108**, no.11, 112009 (2023) doi:10.1103/PhysRevD.108.112009
- [5] M. Harada *et al.* [Super-Kamiokande], “Search for Astrophysical Electron Antineutrinos in Super-Kamiokande with 0.01% Gadolinium-loaded Water,” *Astrophys. J. Lett.* **951**, no.2, L27 (2023) doi:10.3847/2041-8213/acdc9e
- [6] K. Abe *et al.* [T2K], “Updated T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using 3.6×10^{21} protons on target,” *Phys. Rev. D* **108**, no.7, 072011 (2023) doi:10.1103/PhysRevD.108.072011
- [7] K. Abe *et al.* [T2K], “Measurements of the ν_μ and $\bar{\nu}_\mu$ -induced coherent charged pion production cross sections on C^{12} by the T2K experiment,” *Phys. Rev. D* **108**, no.9, 9 (2023) doi:10.1103/PhysRevD.108.092009
- [8] S. Sakai *et al.* [Super-Kamiokande], “Measurement of the neutrino-oxygen neutral-current quasielastic cross section using atmospheric neutrinos in the SK-Gd experiment,” *Phys. Rev. D* **109**, no.1, L011101 (2024) doi:10.1103/PhysRevD.109.L011101
- [9] M. Yoshida, K. Nakamura, S. Akiyama, S. Ban, J. Hikida, M. Hirose, A. K. Ichikawa, Y. Iwashita, Y. Kashino and T. Kikawa, *et al.* “High-pressure xenon gas time projection chamber with scalable design and its performance around the Q value of ^{136}Xe double-beta decay,” *PTEP* **2024**, no.1, 013H01 (2024) doi:10.1093/ptep/ptad146

（会議抄録）

- [10] Aoi Eguchi, “The T2K Near Detector Upgrade,” Phys. Sci. Forum **2023**, 8(1), 38

(学位論文)

博士論文

- [11] Aoi Eguchi, “Search for CP violation through a joint oscillation analysis of atmospheric and accelerator neutrinos,” Ph. D thesis, March 2024

修士論文

- [12] Wataru Okinaga, “Improvement of Particle Identification for Electron Neutrino Event Selection Using New T2K Near Detectors,” Master’s thesis, March 2024
- [13] Hokuto Kobayashi, “Classification of Electron-Neutrino Events Based on Final States Using New T2K Near Detectors,” Master’s thesis, March 2024
- [14] Eiichiro Watanabe, “Performance evaluation of 50-cm PMTs for calibration of the Hyper-Kamiokande detector,” Master’s thesis, March 2024

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [15] Masashi Yokoyama, “Status of T2K and Hyper-Kamiokande – Past, present, and future of our collaboration,” 2023 Joint Workshop of TYL/FJPPL and FKPL, May 10, 2023, Ochanomizu University, Tokyo
- [16] Aoi Eguchi, “Combined neutrino oscillation analysis between Super-Kamiokande and T2K,” The 22nd International Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN23), October 11, 2023, Procida, Italy
- [17] Masashi Yokoyama, “Neutrino physics, a journey from Zurich to Tokyo,” Symposium University of Tokyo – ETH Zurich, October 17, 2023, ETH Zurich, Zurich, Switzerland

一般講演

- [18] Tomochika Arai, “Alignment in the FASER Experiment,” Student Sessions 2023, August 9, 2023, CERN

ポスター発表

- [19] Aoi Eguchi and Xingyu Zhao, “Reconstruction and Selection of Neutrino Interactions In T2K ND280 Upgrade,” Symposium University of Tokyo – ETH Zurich, October 16, 2023, ETH Zurich, Zurich, Switzerland

(国内会議)

招待講演

- [20] 江口碧、「Neutrino」、第11回高エネルギー物理春の学校 2023、2023年5月18日 滋賀県彦根市 琵琶湖コンファレンスセンター

- [21] 中島康博、「新しいフェーズが始まった T2K 実験の最新状況と今後の展望」、日本物理学会 第78回年次大会、2023年9月18日 東北大学

- [22] 中島康博、「ニュートリノ原子核反応の精密理解を目指した原子核実験」、ミューオン核データ研究会 2023年12月14日 理化学研究所

- [23] 横山将志、「おわりに」、研究会「素粒子物理の今と未来」、2023年12月23日 高エネルギー加速器研究機構

一般講演

- [24] 新居智将、「ポジトロニウム崩壊による γ 線の偏光状態を用いた Bell 不等式の破れの検証」、第11回高エネルギー物理春の学校、2023年5月18日 滋賀県彦根市 琵琶湖コンファレンスセンター

- [25] 江口碧、「SK 大気ニュートリノと T2K 加速器ニュートリノの合同振動解析のための解析手法改善」、日本物理学会 第78回年次大会、2023年9月16–19日、東北大学

- [26] 沖永和平、「T2K 新型前置検出器における飛跡再構成とそれを用いた電子ニュートリノ識別手法の開発」、同上

- [27] 小林北斗、「T2K 実験新型前置検出器における陽子飛跡を利用した電子ニュートリノ反応識別手法の開発」、同上

- [28] 児玉将馬、「発光時定数が短い新型波長変換ファイバーの電子ビームを用いた性能評価」、同上

- [29] 渡辺英一朗、「ハイパーカミオカンデ実験 プレキャリブレーションのための 50cmPMT の性能評価」、同上

- [30] 新居智将、「T2K 実験新型前置検出器における再構成手法の SuperFGD 検出器内の不良チャンネルを考慮した性能評価」、第30回 ICEPP シンポジウム、2024年2月18日、志賀レークホテル

- [31] 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原子核実験」、第10回超新星ニュートリノワークショップ、2024年3月1日、岡山大学

- [32] 後藤三四朗、「ハイパーカミオカンデ実験に用いる 50 cm PMT の長期的な安定性の検証」、日本物理学会 2024 年春季大会、2024 年 3 月 18–21 日、オンライン

- [33] 水野裕介、「ニュートリノ原子核反応予測の精度向上に向けた酸素ビーム実験の検出器シミュレーション」、同上

- [34] 新居智将、「FASER シリコン飛跡検出器の性能評価」、同上

- [35] 中島康博、「ニュートリノレス二重 β 崩壊探索のための Gd を含んだ高純度結晶の開発」、同上

- [36] 室朝喜、「SK-Gd における核破砕中性子捕獲を用いた検出器全体でのエネルギースケールの連続評価」、同上

- [37] 児玉将馬、「T2K 実験における新型前置検出器 Super-FGD の試験運用と運転状況」、同上
- [38] 新居智将、「T2K 実験新型前置検出器における再構成手法の SuperFGD 検出器内の不良チャンネルを考慮した性能評価」、同上
- [39] 渡辺英一朗、「ハイパーカミオカンデ実験 プレキャリブレーションのための 50cmPMT の性能評価」、同上
ポスター発表
- [40] 後藤三四朗、「サイクロトロン製の製作と動作の検証」、第 11 回高エネルギー物理春の学校、2023 年 5 月 18 日滋賀県彦根市 琵琶湖コンファレンスセンター
- [41] 水野裕介、「分子輝線スペクトル観測で見える原始星円盤の構造と原始星の質量の推定」、同上
- [42] 後藤三四朗、「ハイパーカミオカンデ実験に用いる 50 cm PMT の長期的な安定性の検証」、第 30 回 ICEPP シンポジウム、2024 年 2 月 18–21 日、志賀レークホテル
- [43] 水野裕介、「ニュートリノ原子核反応予測の精度向上に向けた酸素ビーム実験の検出器シミュレーション」、同上
- [44] 児玉将馬、「Commissioning of New T2K Near Detector SuperFGD and Evaluation of New Wavelength-Shifting Fibers,」 WINGS-QSTEP Colloquium、2024 年 2 月 29 日 東京大学
- [45] Daniel Ferlewicz, “Early results from the SFGD at the T2K neutrino experiment,” JSPS 14th HOPE meeting, 2024 年 2 月 29 日, Kyoto International Conference Center
- [46] Daniel Ferlewicz, “Early results from the SFGD at the T2K neutrino experiment,” The 5th KMI School: “Quantum Computing and Technology for Particle Physics and Astrophysics,” 2024 年 3 月 5 日, Nagoya University
(セミナー)
- [47] 横山将志、「ニュートリノでさぐる素粒子と宇宙の謎ースーパーカミオカンデからハイパーカミオカンデへ」、お茶の水女子大学 談話会、2023 年 7 月 12 日 お茶の水女子大学
- [48] 横山将志、「核子崩壊・ニュートリノ振動実験」、早稲田大学 寄田研究室 ゼミ合宿 2023、2023 年 11 月 5 日 早稲田大学 伊豆川奈セミナーハウス
- [49] 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、2024 年 1 月 18 日、東京大学本郷キャンパス

2.3 浅井研究室

本研究室は、「真空の構造の解明」、「力の統一の実現」などを目指して、エネルギーフロンティア加速器実験と非加速器実験の両面から研究を行っている。素粒子物理国際研究センターと共同で LHC・ATLAS

実験でのヒッグス粒子や超対称性粒子や余剰次元の探索で主導的な役割を果たしてきた。これと並んで小規模な非加速器実験を多数展開し、標準理論を超えた新しい素粒子現象の探索を二つの異なる角度から行っている。特に、光を使った素粒子実験の開拓を目指している。さらに、2021 年度からは素粒子物理国際研究センター（量子 AI テクノロジー研究分野）・量子ネイティブ育成センターと協力して、基礎科学への応用を目指した量子技術研究を行っている。

2.3.1 LHC・ATLAS 実験での研究

世界最高エネルギー加速器実験 LHC(写真 2.3.10)は、2022 年から重心系エネルギーが 13.6 TeV に増強されて運転を再開している。2023 年までに、積算ルミノシティで約 63 fb^{-1} の実験データが得られ、本研究室は、素粒子物理国際研究センターと共同でヒッグス粒子の発見につづいて、ヒッグス粒子の研究や超対称性粒子探索を行っている。



図 2.3.10: LHC 加速器。

高輝度 LHC-ATLAS 実験初段ミュオントリガーのための検証機構の設計・開発・運用

LHC 加速器をアップグレードした「高輝度 LHC」は、2029 年に運転開始予定であり、アップグレード後の瞬間最高ルミノシティは $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ まで増強される。高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けて、エンドキャップ領域のミュオントリガーエレクトロニクスをすべて刷新する。本トリガー系では、TGC 検出器で観測した全ヒット情報を後段のエレクトロニクスである Sector Logic (SL) へ送信し、ミュオン飛跡を再構成する。

本研究では SL に導入する大規模論理回路のための検証機構の全体設計・開発・運用までを行なった。検証機構は SL の開発から運用段階までを見据えたものとなっており、ファームウェア開発基盤として確立されている。本検証機構では、同一のテスト入力を実機、ファームウェアシミュレータ、ハードウェア的な動作を再現する C++ ベースシミュレータの 3 つに投入し、各出力を比較することで系統的な試験・デバッグを可能にしている。

検証機構の要素として、C++ ベースシミュレータ (図 2.3.11 の①) とテスト入力パターンの生成システム (図 2.3.11 の②) を開発した。本研究により大統計のシミュレーションデータを取り扱えるようになり、単一ボード試験へのモンテカルロ (MC) シミュレーション由来のヒットパターン入力や、その出力によるトリガー能率の解析が初めて可能になった。開発初期はもっとも単純かつ必ずトリガーせねばならない直線飛跡の生成のみが予定されていたが、機構の全体設計が優れていたため、拡張性が高く、このような機能の追加を容易に行うことができた。

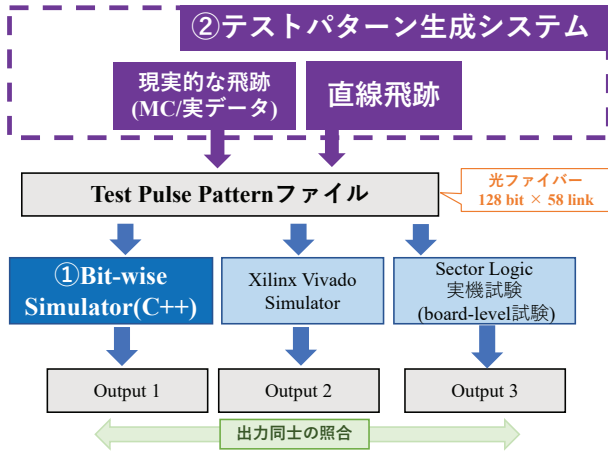


図 2.3.11: 検証機構全体図。

全体設計とシミュレータの大部分の開発は前年度までに完了しており、本年度はシミュレータの拡張 (多くの共同研究者に使用されるための開発基盤としての UI 向上も含む) および本機構の運用による SL のミュオン飛跡再構成回路の詳細な動作検証を行った (図 2.3.12)。本検証により、HDL で記述された論理回路の局所的なバグの発見や、トリガーで使用される Look Up Table の改善が達成された。

2.3.2 小規模実験で探る標準理論を超えた新しい素粒子現象の探索

大規模なエネルギーフロンティア加速器実験 (LHC / ATLAS 実験) の対極である、テーブルトップでの小規模実験も行っている。エネルギーフロンティア実験が未知の素粒子現象を直接たたき出すのに対し、テーブルトップ実験では高感度な検出器や、高精度での測定によって標準理論からのズレを探索し、間接的に未知の素粒子現象を探る。なお、最新の情報や成果はテーブルトップ実験 web ページ <https://tabletop.iccpp.s.u-tokyo.ac.jp/> に掲載し、随時更新している。

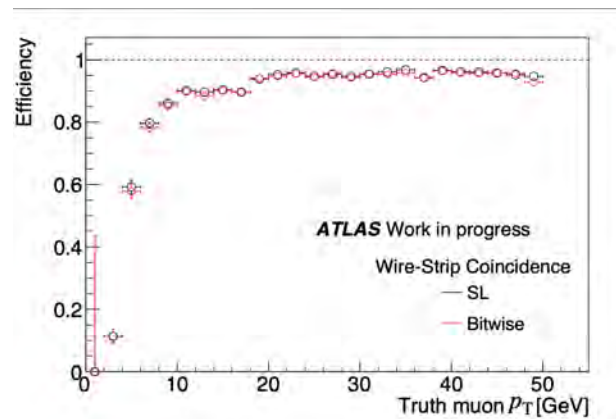


図 2.3.12: 同一のテストパターンから得られた、実機 (SL) と C++ シミュレーター (Bitwise) のトリガーの efficiency。プラトーで 95 % の efficiency が得られており、期待どおりの振る舞いである。実機とシミュレータの出力は高精度で一致している (若干の違いはすでに理解済みで今後修正予定)。

ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却

電子とその反粒子 (陽電子, e^+) の束縛系であるポジトロニウム (Positronium, Ps) はボース粒子であるため、冷却するとボース・アインシュタイン凝縮 (Bose-Einstein condensate, BEC) を起こすと考えられる。Ps-BEC を実現し、反物質にはたらく重力の研究や物質と反物質の対称性の研究、ガンマ線レーザー実現などに応用すべく研究している。本研究室では、Ps の熱化とレーザー冷却を組み合わせた新しい冷却手法を提案した。2023 年度は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 物質構造科学研究所 (IMSS) 低速陽電子実験施設 (Slow Positron Facility, SPF) の B1 ビームラインにおける 2022G087 実験課題にて、世界初の Ps レーザー冷却原理実証に成功した [3] (図 2.3.13)。また、陽電子集束装置開発 [2] や Ps 生成・濃縮・冷却材開発 [89] を行った。

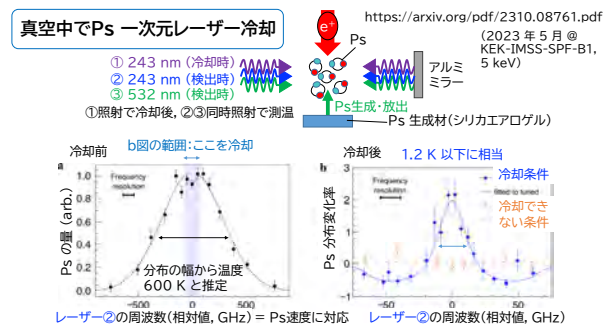


図 2.3.13: ポジトロニウム (Ps) のレーザー冷却原理実証実験 [3, 100]。上図はセットアップ概念図、下図は (a) Ps 冷却前、(b) Ps 冷却後の Ps 速度分布。

Ps 生成・濃縮・冷却材開発においては、冷凍機で冷却したシリカエアロゲルの性能評価のため、KEK-IMSS-SPF-B1 ビームラインにおける 2022G087 実験課題 [105] にて Ps レーザー遷移実験を、また KEK-IMSS-SPF-B2 ビームラインにおける 2023G157 実験課題 [104] にて Ps 飛行時間 (Time-of-flight, TOF) 測定を行った (図 2.3.14)。結果は現在解析中であり、2024 年度以降のビームタイム (2023G157, 2024G143) においてさらなる性能評価を行い、Ps-BEC 実現に最適な Ps 生成・濃縮・冷却材開発を進めていく。

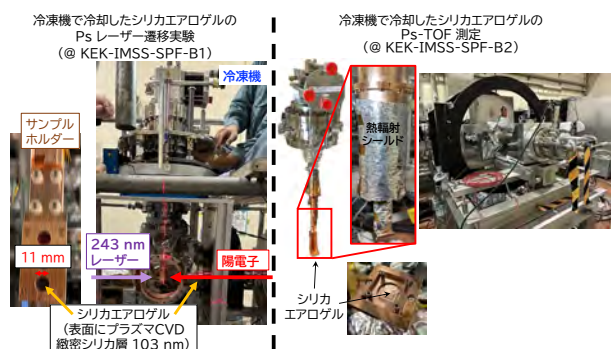


図 2.3.14: KEK-IMSS-SPF にて行った、冷凍機で冷却したシリカエアロゲルの性能評価実験 [100]。左図は SPF-B1 における Ps レーザー遷移実験、右図は SPF-B2 における Ps-TOF 測定。

パイルアップしたパルス波形の機械学習による逆畳み込み法の開発

高計数率の放射線計測においては、パルスのパイルアップがしばしば問題になる。従来、周波数フィルターを用いた逆畳み込み (Wiener deconvolution) 法によってパイルアップした波形から個別のパルス信号を識別していたが、解析に時間がかかるうえ、パイルアップ確率が高くなると識別性能が悪化する問題があった。そこでこの問題を解決するため、機械学習を用いた逆畳み込み法の開発を行っている。

2023 年度は性能向上を目指し、新たに教師なし学習を試みた [94, 103] (図 2.3.15)。現在は最適化を進めており、従来法に頼らない、より効率的かつ識別性能の高い手法の開発を継続する。

電波干渉計による暗黒物質の間接探索

宇宙の 27 % を占める暗黒物質の正体として有力な候補の一つが超対称性粒子である。特に、ミュー粒子の異常磁気能率の測定結果などから、質量 500 GeV 程度のニュートラリーノが示唆される。矮小楕円体銀河の中心では、ニュートラリーノ暗黒物質が対消滅し、高エネルギーの電子を放出すると予想されるが、その電子からのシンクロトン放射のシグナルを地上の電波干渉計で観測しうることを示した。た

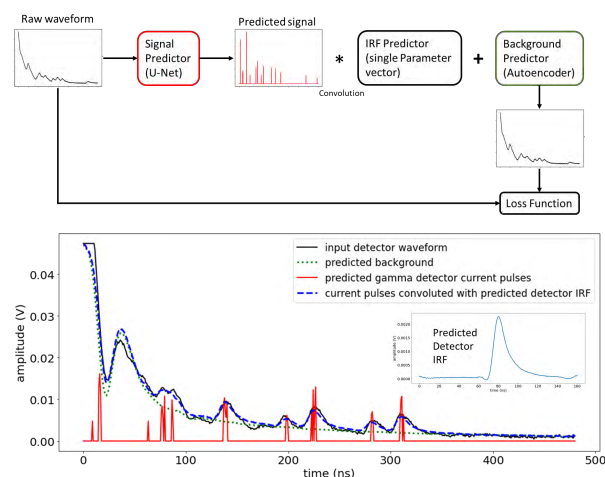


図 2.3.15: 教師なし学習のアーキテクチャ (上図) と暫定結果 (下図)。生の波形が直接ネットワークに供給され、逆畳み込み結果および装置応答関数 (Instrument Response Function, IRF) ならびにバックグラウンド波形が同時に予測される。[103]

だし、観測の際は AGN などがバックグラウンドとなるため、背景の電波点源の同定が重要である。このため、電波干渉計で (1)「高角度分解能での点源測定」、(2)「広がりをもった電波源に対する高感度測定」という二段階の観測をおこなひ、暗黒物質を探索する提案をおこなった。提案は JVLA 電波干渉計で採用され、今後測定をおこなう。

ミリ波を用いた光と弱い結合をもつ粒子の探索

暗黒物質の別の候補として、パラフォトンが挙げられる。パラフォトンとは標準模型を超えた物理で予言される extra $U(1)$ ゲージボソンであり、電磁場と微小な混合をおこす。この混合を利用し、導体板を用いて暗黒物質パラフォトン電磁波に変換し、高感度な超伝導 SIS 検出器によって検出する測定をおこなった。超伝導 SIS 検出器はミリ波に感度を持ち、局部発振周波数を変更することで測定周波数帯を変更できる。220–268 GHz と比較的広い領域のスキャン測定をおこなっている。データ解析の際に問題となるのが、局部発振周波数やスペクトルアナライザに混入する偽のノイズである。このようなノイズと偽のパラフォトンシグナルを区別するため、検出器校正時のデータに混入したスパイクノイズを利用し、ノイズを除去する手順を確立した。また、スペクトルに対して予想されるシグナル波形でフィッティングをおこなった。今後、データのさらなる解析によって、世界最高感度での暗黒物質の発見を目指す。

超伝導量子ビットを用いた暗黒物質探索

ダークフォトンとは暗黒物質の有力な候補の一つであり、光子と相互作用することで電磁場を生じる。

超伝導量子ビットはこの光子と相互作用する暗黒物質から生じる電磁場によって励起可能であり、量子ビットの励起確率の測定を通じて暗黒物質を探索する実験の提案がなされている。量子ビットの共鳴周波数を変えて励起確率をスキャンすると、量子ビットの共鳴周波数がダークフォトンの質量に対応する周波数に一致したときに、励起確率がピークになるというものだ (Phys. Rev. Lett. **131**, 211001 (2023))。この探索を実際に行うのが本研究である。

そのために、探索に用いる超伝導量子ビットを自作した (図 2.3.16)。これはコンデンサと SQUID からなる非線形 LC 回路である。SQUID というのはジョセフソン結合 2 つからなるループのことで、非線形インダクタとして働く。この回路の基底状態・第一励起状態を、量子ビットの $|0\rangle \cdot |1\rangle$ として使用する。また SQUID ループを貫く磁束を通じて、量子ビットの共鳴周波数を変えることができる。

さらに作成した量子ビットを用いて、読み出しテストを行った。あらかじめ $|0\rangle \cdot |1\rangle$ に操作した量子ビットの状態を読み出し、操作した状態と読み出した状態の差をエラーとして評価する測定である。このエラー率によって探索可能な領域が決まる。直近の測定では、 $|0\rangle$ に操作したものを $|1\rangle$ と読むエラーが 5 %、 $|1\rangle$ に操作したものを $|0\rangle$ と読むエラーが 35 % 程度あった。前者の原因は量子ビットの冷却が不十分で熱励起が起きていること、後者の原因は量子ビットの寿命が足りておらず読み出し完了前に脱励起していることが原因と考えている。今後はまずこれらを改善すべく、量子ビットの真の温度の調査と量子ビットの長寿命化の 2 点に力を入れて取り組む予定である。

* 測定は、東京大学低温科学研究センター共同利用装置を使用して行いました。

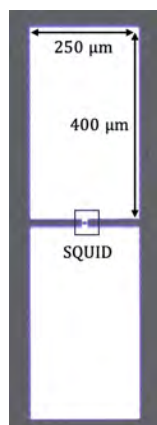


図 2.3.16: 作成した超伝導量子ビットの 10 倍顕微鏡写真。

<受賞>

- [1] 渡邊香凜, The Outstanding Poster Award at the 5th KMI school (KMI school 2024), 名古屋大学素粒子宇宙起源研究所, 2024 年 3 月 7 日。

<報文>

(原著論文)

- [2] H. Higaki, K. Michishio, A. Ishida, and N. Oshima, “The Buncher and the Magnetic Lens for the LINAC Based Low Energy Positron Beams at AIST”, Plasma and Fusion Research **18**, 1406023 (2023).
 [3] K. Shu, A. Ishida, K. Yamada, R. W. Gladen, T. Namba, S. Asai *et al.*, “Laser cooling of positronium”, arXiv:2310.08761 [physics.atom-ph] (2023).

The ATLAS Collaboration

- [4] Phys. Rev. D **108**, no.5, 052003 (2023)
 [5] JHEP **07**, 199 (2023)
 [6] JHEP **07**, 033 (2023)
 [7] Phys. Rev. Lett. **131**, no.17, 172301 (2023)
 [8] Eur. Phys. J. C **83**, no.8, 728 (2023)
 [9] Eur. Phys. J. C **83**, no.9, 774 (2023)
 [10] JHEP **07**, 090 (2023)
 [11] JHEP **07**, 085 (2023)
 [12] Phys. Lett. B **847**, 138292 (2023)
 [13] Phys. Lett. B **842**, 137963 (2023)
 [14] JHEP **07**, 176 (2023)
 [15] Phys. Rev. D **108**, no.3, 032019 (2023)
 [16] JHEP **2306**, 200 (2023)
 [17] Phys. Rev. D **108**, 032012 (2023)
 [18] JHEP **07**, 086 (2023)
 [19] Phys. Rev. Lett. **131**, no.18, 181901 (2023)
 [20] Phys. Rev. C **108**, no.2, 024906 (2023)
 [21] JHEP **07**, 166 (2023)
 [22] JHEP **09**, 004 (2023)
 [23] Eur. Phys. J. C **83**, no.11, 1075 (2023)
 [24] JHEP **07**, 118 (2023)
 [25] JHEP **06**, 199 (2023)
 [26] Phys. Lett. B **846**, 138154 (2023)
 [27] Phys. Lett. B **847**, 138316 (2023)
 [28] Eur. Phys. J. C **83**, no.6, 496 (2023)
 [29] JHEP **07**, 141 (2023)
 [30] Eur. Phys. J. C **83**, no.8, 761 (2023)
 [31] Phys. Rev. Lett. **131**, no.16, 162301 (2023)
 [32] Eur. Phys. J. C **84**, no.2, 157 (2024)
 [33] Phys. Lett. B **846**, 138223 (2023)
 [34] Phys. Rev. D **108**, no.7, 072003 (2023)
 [35] Phys. Rev. Lett. **131**, no.15, 151902 (2023)
 [36] Eur. Phys. J. C **83**, no.12, 1164 (2023)
 [37] JHEP **07**, 234 (2023)
 [38] JHEP **07**, 125 (2023)

- [39] Eur. Phys. J. C **83**, no.11, 1081 (2023)
- [40] Phys. Rev. D **108**, no.1, 012012 (2023)
- [41] Phys. Rev. D **108**, no.9, 092007 (2023)
- [42] Phys. Lett. B **846**, 138172 (2023)
- [43] JHEP **08**, 153 (2023)
- [44] JHEP **11**, 150 (2023)
- [45] JHEP **10**, 079 (2023)
- [46] JHEP **09**, 189 (2023)
- [47] Eur. Phys. J. C **83**, no.9, 824 (2023)
- [48] JHEP **10**, 001 (2023)
- [49] JHEP **10**, 060 (2023)
- [50] Phys. Rev. Lett. **132**, no.2, 021802 (2024)
- [51] Phys. Lett. B **848**, 138324 (2024)
- [52] Phys. Lett. B **846**, 138222 (2023)
- [53] Phys. Rev. D **108**, 052009 (2023)
- [54] Phys. Rev. Lett. **131**, no.25, 251801 (2023)
- [55] JINST **18**, no.11, P11006 (2023)
- [56] Eur. Phys. J. C **84**, no.1, 78 (2024)
- [57] JHEP **02**, 107 (2024)
- [58] Phys. Rev. Lett. **132**, no.8, 081801 (2024)
- [59] JHEP **10**, 009 (2023)
- [60] Phys. Rev. D **108**, no.11, 112005 (2023)
- [61] Phys. Rev. D **109**, 032010 (2024)
- [62] JHEP **12**, 081 (2023)
- [63] Chin. Phys. C **48**, no.2, 023001 (2024)
- [64] JHEP **09**, 199 (2023)
- [65] JHEP **11**, 168 (2023)
- [66] Phys. Lett. B **848**, 138400 (2024)
- [67] JHEP **11**, 112 (2023)
- [68] Phys. Rev. Lett. **131**, no.25, 251802 (2023)
- [69] Phys. Lett. B **847**, 138315 (2023)
- [70] JHEP **12**, 073 (2023)
- [71] Phys. Lett. B **848**, 138376 (2024)
- [72] JHEP **01**, 004 (2024)
- [73] Phys. Rev. Lett. **132**, no.10, 102301 (2024)
- [74] Phys. Rev. Lett. **132**, no.2, 021803 (2024)
- [75] Phys. Lett. B **848**, 138394 (2024)
- [76] JINST **19**, no.02, P02009 (2024)
- [77] JHEP **12**, 195 (2023)
- [78] Eur. Phys. J. C **84**, no.2, 169 (2024)
- [79] JHEP **12**, 107 (2023)
- [80] JHEP **12**, 167 (2023)
- [81] JHEP **02**, 037 (2024)
- [82] Eur. Phys. J. C **84**, no.2, 195 (2024)
- [83] JHEP **01**, 066 (2024)
- [84] JHEP **02**, 197 (2024)
- [85] JHEP **02**, 128 (2024)
- [86] Phys. Lett. B **850**, 138536 (2024)
- (学位論文)
- [87] 荻野恭輔, “超伝導検出器を用いたミリ波帯域におけるパラフォトン暗黒物質の探索”, 修士論文 (2023).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [88] E. Yamashita, “Phase-II L0 Muon Endcap Trigger: Development of Trigger Electronics Verification System and Using the System for Firmware Debugging”, Tokyo-Roma ATLAS Workshop, December 7, 2023, Online.
- 招待講演
- [89] A. Ishida, “Recent progress towards positronium Bose-Einstein condensation”, The XXXIII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC 2023), July 27, 2023, Ottawa, Canada.
- ポスター
- [90] E. Yamashita, “Phase-II L0 Muon Endcap Trigger: Development of trigger electronics verification system”, ATLAS TDAQ Week in Kyoto, September 18–22, 2023, Kyoto.
- [91] E. Yamashita, “Phase-II L0 Endcap Muon Trigger: Development of Trigger Electronics Verification System and Using the System for Firmware Debugging”, ATLAS Week, February 14, 2024, Geneva.
- [92] K. Watanabe, “Study for the dark matter search using excitation of superconducting qubits”, The 5th KMI school (KMI school 2024), March 5, 2024, Nagoya University.
- (国内会議)
- 一般講演
- [93] 石田明, “ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム生成用ナノ材料開発”, 第60回アイソトープ・放射線研究発表会, 2023年7月6日, 東京.
- [94] 石田明, “GANを用いたガンマ線検出器信号解析手法の改良”, JST 創発的研究支援事業 融合の場 深層学習がもたらすブレイクスルーと可能性, 2023年9月5日, 東京.
- [95] 山下恵理香, “HL-LHC ATLAS 実験初段ミュオントリガー論理回路開発 - 実機プロトタイプを用いた試験システムの高度化”, 計測システム研究会 2023@RCNP, 2023年11月21日, 大阪.

- [96] 渡邊香凜, “超伝導量子ビット直接励起を用いた暗黒物質探索の準備研究”, 第 30 回 ICEPP シンポジウム, 2024 年 2 月 18 日, 長野.

日本物理学会: 第 78 回年次大会 (2023 年): 東北大学: 2023 年 9 月

- [97] 石田明, “低温シリカエアロゲルのポジトロニウム飛行時間測定”.

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

日本物理学会: 2024 年春季大会: オンライン開催: 2024 年 3 月

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

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

- [101] 石田明, “ポジトロニウムのボース・アインシュタイン凝縮 (高密度化・冷却の現状と今後の方針)”.

- [102] 渡邊香凜, “超伝導量子ビット直接励起を用いた暗黒物質探索”.

ポスター

- [103] R. W. Gladen, “Pulse Pile-up Deconvolution Methods via Machine Learning”, 日本物理学会第 78 回年次大会 (2023 年), 2023 年 9 月 17 日, 東北大学.

2023 年度量子ビームサイエンスフェスタ: 水戸: 2024 年 3 月

- [104] R. W. Gladen, “Evaluation of Positronium Cooling in cold Nano-Porous Oxide Materials by Time-of-flight Measurement”.

- [105] R. W. Gladen, “Influence of Positronium Annihilation in Nano-vacancies on Positronium Laser Cooling”.

3 物性理論

3.1 小形研究室

小形研では強相関電子系 (高温超伝導、モット絶縁体)、トポロジカル物質、ディラック電子系、巨大応答の熱電物質、フラストレーションやスピン軌道相互作用のある磁性体、有機伝導体などを柱に研究している。凝縮系、とくに量子現象が顕著に現れる多電子系の理論が中心である。

3.1.1 熱応答・熱電応答の理論

カルコパイライト $\text{Cu}_{1+x}\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$ におけるマグノンドラッグ効果の理論的研究

自然界に豊富に存在するカルコパイライト $\text{Cu}_{1+x}\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$ は、823K で反強磁性体に転移する磁性半導体である。この物質のゼーベック係数は常温付近において大きなピーク構造を示すが、その起源は明かにされていない。そこで本研究では微視的理論によりゼーベック係数を解析し、このピークの起源として反強磁性マグノンドラッグの可能性があることを明らかにした [3, 25, 33, 52]。

フォノンドラッグによる Nernst 係数および熱 Hall 伝導度

電子格子相互作用を通じ、電子と格子が運動量を受け渡すことにより生じる輸送現象をフォノンドラッグという。この効果は、Seebeck 効果において数十 K 程度の低温で大きな寄与をもたらしていることが知られており、近年その微視的な理論が構築された。一方、希薄金属 $\text{SrTiO}_{3-\delta}$ において大きな Nernst 係数及び熱 Hall 効果が観測され、これがフォノンドラッグによるものであると提案されていた。我々は、線形応答理論を用い、磁場の効果を摂動論的に取り入れることで、フォノンドラッグの Nernst 係数・熱 Hall 伝導度への寄与を計算する一般的な公式を導出した。また、これを $\text{SrTiO}_{3-\delta}$ に適用することで、我々の理論が実験結果を非常によく再現することを確認し、巨大な応答係数がフォノンドラッグによるものであることを示した。[9, 27, 37]

データ駆動型アプローチによる熱電物質の伝導度スペクトルの推定

熱電効果 (ゼーベック効果) は熱流の種類に依存し多様な起源があるが、電子の寄与による熱電効果に関して電流と熱流に関する Sommerfeld-Bethe 関係式と呼ばれる関係式が成立する。この関係式を用いると、伝導度スペクトルのみによりゼーベック係数を求めることができるため、第一原理計算による大規模な物質探索において新たな熱電物質を見つける上で重要な手法となりつつある。しかし、伝導度スペクトルは状態密度や群速度に加えて電子の輸送緩和時間に依存するため、理論的に求めることは難しいという問題がある。そこで、機械学習の手法により Sommerfeld-Bethe 関係式の逆問題を解くことで、電気伝導度とゼーベック係数の実験データから伝導度スペクトルや化学ポテンシャルを推定する手法を開発した。この手法を Ta_4SiTe_4 の実験データに適用することで伝導度スペクトルや化学ポテンシャルに加えて電子の寄与による熱伝導率や性能指数の上限を予測できることを明らかにした。さらに、伝導度スペクトルや化学ポテンシャルのドーピング依存性も明らかにした。[21]

3.1.2 強相関電子系の理論

強相関フェルミ液体金属の電気抵抗率、ゼーベック係数、熱電出力因子

Ce をベースとする重い電子系金属のゼーベック係数 S と電気抵抗率 ρ の実験事実は、フェルミ液体の縮退温度 $T_F \equiv (\pi^2 k_B / 2) n / \gamma$ を用いると、 $S \sim 425 \mu\text{V}/\text{K}^2 \times T/T_F$ 、 $\rho \sim \rho_0 + 16835 \mu\Omega\text{cm} \times (T/T_F)^2$ のように整理される。ただし、 n は電子数密度、 γ は電子比熱係数であり、残留抵抗率 ρ_0 は $1 \mu\Omega\text{cm}$ 程度である。このような金属の熱電出力因子 $\text{PF} = S^2 / (\rho_0 + AT^2)$ は、 $T = 0.1 T_F$ 程度の温度で $1\text{mW}/(\text{K}^2 \cdot \text{m})$ というユニバーサルな値をもつ。

本研究では、ハーフフィリング、すなわち a を格子定数として $na^3 = 1$ のときに上のユニバーサルな値を再現するスピン-1/2 強相関フェルミ液体模型を考え、PF の電子数依存性を調べた。ここで重要なことは ρ の T^2 項の係数 A はウムクラップ散乱がないと生じないことである。電子数の減少とともにフェルミ面は小さくなっていくので、ある電子数以下ではフェルミ面上でのウムクラップ散乱が許されなくなり $A = 0$ となる。一方、 S の符号は反転し $A = 0$ の領域では $S = -\gamma T / en$ のように 1 電子あたりの比熱に等しくなることがわかった。その結果、PF はウムクラップ散乱が有効な領域と無効な領域の境目で非常に大きくなることを見出した (図 3.1.1)。[38, 43, 46, 48, 51]

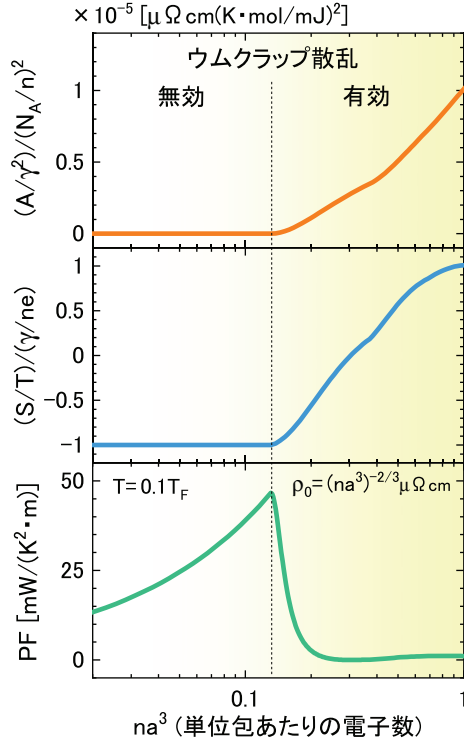


図 3.1.1: ハーフフィリング ($na^3 = 1$) で $(A/\gamma^2)/(N_A/n)^2 = 1.0 \times 10^{-5} \mu\Omega\text{cm}/(\text{K} \cdot \text{mol}/\text{mJ})^2$ (門脇-Woods 則)、 $S = \gamma T/en$ 、 $\text{PF} = 1\text{mW}/(\text{K}^2 \cdot \text{m})$ となる強相関フェルミ液体模型における電気抵抗率の T^2 項の係数 A 、ゼーベック係数 S 、熱電出力因子 PF の単位胞あたりの電子数依存性。

電子ホール散乱による半金属の輸送現象

近年観測された、半金属における Wiedemann-Franz 則の破れに起因して、電子ホール散乱を持つ半金属の輸送現象が議論されている。我々は、電子ホール散乱を持つ半金属の Boltzmann 方程式を、非弾性散乱を正確に扱うことのできる変分法によって解析した。熱電効果の解析や、磁場下における磁気抵抗のふるまいや Hall Lorenz 比の Wiedemann-Franz 則の破れなどの議論を行った。[12, 28, 56, 57]

3.1.3 スピン軌道相互作用

原子間スピン軌道相互作用 tight-binding 模型の微視的定式化とカイラルスピン軌道相互作用

スピン軌道相互作用 (SOC) は、電子のスピン自由度と軌道自由度を交絡させる役割を果たすことで、多彩なトポロジカル物性や電気磁気効果のような交

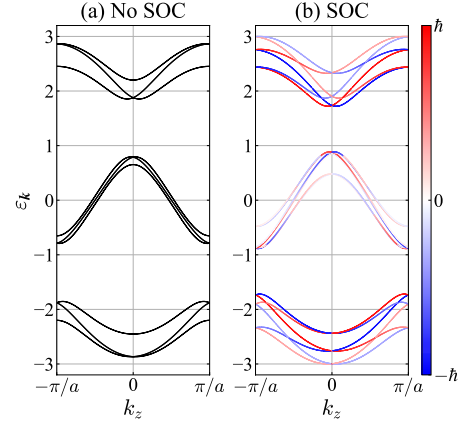


図 3.1.2: 三角螺旋格子の tight-binding 模型に基づく分散関係。スピン軌道相互作用によるホッピングを (a) 含まない場合と (b) 含む場合についての結果を示す。カラーバーは z 軸方向のスピン大きさを表す。

差相関応答現象を創発することが知られている。また、SOC による原子間ホッピングは、電子の軌道運動とスピンの相互作用を生み出し、スピンホール効果やカイラル系におけるスピン依存伝導であるカイラリティ誘起スピン選択性といった特異な輸送現象に寄与する。本研究では、SOC の一般的なハミルトニアンと原子軌道を用いてスピン依存ホッピング積分をパラメトライズする方法を考案した。本手法は Slater-Koster によるスピンに依存しない二中心ホッピング積分を拡張したものである。スピン依存ホッピング積分を任意の原子軌道の組と任意のホッピング方向に対して定式化し、具体的に s, p, d 軌道間のホッピング積分についてあらわな表式を書き下した。さらに、この結果を螺旋構造を持つカイラル格子上の tight-binding 模型に適用し、多極子理論による対称性の解析を行うことで、カイラル系に特有のスピン分裂を生む SOC の表式を導出することに成功した [図 3.1.2]。[10, 42, 55]

3.1.4 超伝導の理論

ノーダルライン半金属における超伝導の理論

一次元のバンド交差を持つノーダルライン半金属は、非自明なバンド・トポロジーを持つ超伝導の舞台として注目を集めており、上部臨界磁場に特異な振る舞いを持つ物質が報告されている。我々は、ノーダルライン半金属の有効モデルに対して準古典グリーン関数の手法を適用して上部臨界磁場の計算を行った。それにより、上部臨界磁場の異方性および急峻な温度依存性の起源を解明した。特に、低温での上部臨界磁場の線形な温度依存性が、ノーダルラインに起因する特異なフェルミ面の形状に由来していることを、理論的に示すことに成功した。[8]

3.1.5 軌道磁場効果

軌道-Zeeman 交差帯磁率の量子化

帯磁率には軌道、スピン Zeeman 効果、およびそれらの交差項 (軌道-Zeeman 項) の 3 つの寄与がある。なかでも軌道-Zeeman 項は 2 次元のトポロジカル絶縁体で普遍的な値に量子化されることが最近の我々の研究で明らかになっている。我々は 2 次元トポロジカル絶縁体の模型の 1 つである Kane-Mele 模型において、これら 3 つの寄与について詳細に評価した。この手法では、ブリルアンゾーン全体、またエネルギー的に離れたバンドを含むすべてのバンドの寄与を取り込むことができる。その結果、内核電子の反磁性等の補正が得られた。また、軌道-Zeeman 項の量子化が確認され、絶縁体状態および金属状態における振る舞いが明らかになった。さらに、この量子化を実験的に検出する方法について議論した。[14]

エネルギー変化のあるノーダルライン模型における常磁性-反磁性異方性

近年、トポロジカル物質における軌道磁気応答が興味を持たれている。その中で、ノーダルライン半金属 ZrSiS において磁場の向きによって常磁性と反磁性が入れ替わる現象が実験的に見出された。その解明に向けて我々はノーダルライン上でエネルギーが変化するようなシンプルな模型を提案し、その軌道帯磁率を調べた。その結果、波数空間の 2 次元面内にあるノーダルラインに関して垂直な磁場に対しては常磁性が、平行な磁場には反磁性が発生することが明らかになった [15]。また、この研究の過程で、松原和を高速に計算する ir-basis の手法が軌道帯磁率の計算にも応用可能であることを示した。[16]

ホール伝導度と軌道帯磁率との厳密な関係

固体中の磁場効果は非常に基本的な問題であるが、未だに理解されていない点も多く残されている。軌道帯磁率はランダウとパイエルスの初期の研究以来調べられているが、ブロッホ・バンドの電子状態に対する軌道帯磁率は複雑な様相を示す。一方、もう 1 つの軌道磁場効果であるホール係数については、ブロッホ・バンド電子に対する一般公式が福山によって得られており、軌道帯磁率とかなり近い形となっていることが知られていた。しかしホール伝導度と軌道帯磁率の厳密な関係は分かっていなかった。我々はまず、遅延グリーン関数と先進グリーン関数を用いて、ホール伝導度に対する新しい公式を導いた。この公式は、散逸を表す寄与と熱力学的な寄与に分けることができるが、後者の寄与は軌道帯磁率と密接な関係があることを見出した。その物理的な意味も明らかになった。さらに、さまざまなモデルにおいて、この関係式を検証した。とくに、キャリア密度が非常に小さいディラック電子系でのバンド端にお

いては、熱力学的な寄与が主たる寄与となることも明らかになった。[1]

3.1.6 有機伝導体の理論

Floquet 理論を用いた光誘起相転移の理論研究

近年のレーザー技術の著しい発展に触発され、我々は光照射下の α -(BEDT-TTF)₂I₃ の振舞いをフロケ理論を用いて解析した。その結果、円偏光を照射したときは Chern 絶縁体への相転移を、直線偏光を照射したときは 2 つの Dirac 点に対応して生じる創発的反平行磁束量子ペアが対消滅することを予言した。また、円偏光と直線偏光の間とも言える楕円偏光を照射したときは、2 つの Dirac 点の衝突・崩壊を伴う Chern 絶縁体から通常のバンド絶縁体へのトポロジカル相転移が起こることを示した。さらに電荷秩序を含めた解析を行うことで、バンド構造にある 2 つの Dirac 点のうち片方の Dirac 点でギャップレスで、もう片方の Dirac 点でギャップが開くハーフバレーメタル相の実現を予言した。[23, 31]

有機伝導体におけるシフト電流の理論研究

バルク光起電力の理論研究を直線偏光照射下の α -(BEDT-TTF)₂I₃ について行った。まず摂動論を用いて、 α -(BEDT-TTF)₂I₃ のシフト電流と光の振動数との関係を明らかにした。さらに、光電場の高次の項の影響を明らかにするために Floquet 理論を用いた解析を行い、実現可能な強度のレーザーであっても高次の項が光起電力に大きな影響を与えることを明らかにした。[5, 23, 29, 30, 36, 40, 41]

円偏光照射下の有機伝導体における光電流の理論研究

円偏光ガルバニック効果とは、物質に右または左周りの円偏光を照射すると、その回転方向に依存した電流が生じる現象であり、外部電場を必要としない光電流発生法として注目を集めている。この背景から、我々は有機伝導体に円偏光を照射したときの光電流の理論研究を行った。まず、摂動論を用いた解析により、この物質では電荷秩序に起因して、振動数が小さいときに大きな光電流が流れることを明らかにした。さらに、光電場の高次の項の影響を明らかにするためにフロケ理論を用いた解析を行い、非摂動効果により流れる光電流が強く抑制されることを示した。[6, 23, 39]

有機伝導体における 2 次元ディラック電子系のゼーベック係数

圧力下の α -(BEDT-TTF)₂I₃ は 2 次元ディラック電子系を持つと考えられているが、そのゼーベック

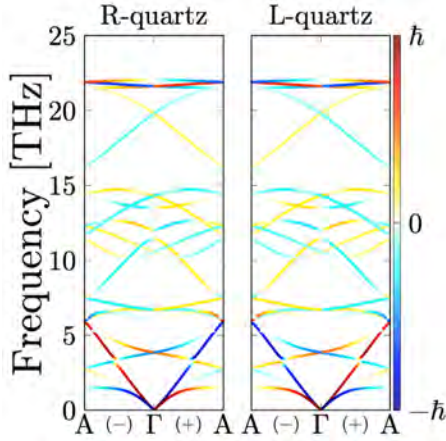


図 3.1.3: α -quartz のフォノンの分散関係。カラーバーはフォノンが持つ角運動量の大きさを表す。

係数を不純物散乱の効果と電子格子相互作用を考慮して調べた。第一原理計算に基づいたモデルを構成し、そのモデルにおける計算によって電気伝導度およびゼーベック係数の異方性について実験と一致する結果が得られた。また、ゼーベック係数は高温で正であり、ある温度において最大値を取ったのち、低温でゼロに向かうという温度依存性を示すことがわかった。これは分子の積層方向に並行な成分においても、垂直な成分においても生じる。この温度依存性は、有機導体中のディラック電子系特有の化学ポテンシャルの温度依存性からくることが分かった。[17]

3.1.7 カイラリティの物理

カイラルフォノンの輸送理論

結晶中の原子が平衡位置周りを回転運動するモードであるカイラルフォノンが近年注目されている。カイラルフォノンは角運動量を持ち、特定の結晶に温度勾配を印加することでフォノンの角運動量を生成できることが知られている。これまでに、フォノン版の Einstein-de Haas 効果などカイラルフォノンの検出に関する理論的な提案がなされたが、輸送現象を用いた検出の詳細な温度依存性に関する研究は乏しい。今回、カイラルな結晶構造を持つ α -quartz について、熱伝導率の測定実験と適合するように緩和時間を決定し、カイラルフォノンの角運動量生成に関する熱輸送係数の温度依存性を詳細に解析することに成功した (図 3.1.3)。[2, 32, 42, 55]

キラリティ誘起スピン選択性

キラリティ誘起スピン選択性 (CISS) と呼ばれる現象のメカニズムの解明を目的に研究を行った。CISS

とは、キララル物質を通過した電子が物質のキラリティに依存したスピン偏極を受ける現象のことであり、キララル物質を通過させるだけで簡単にスピン偏極が得られることで注目を集めている。本研究ではキララル物質特有のスピン磁化の発現に必要なホッピングおよびスピン軌道相互作用を特定するために、特定の強束縛模型のスピン磁化を多極子を用いて微視的に解析した。その結果、スピン磁化の出現には、キララル特有の多極子である G_0 をもつスピン軌道相互作用が必要であることに加え、波数空間における並進とスピン反転操作による対称性を破るホッピングが必要であることが明らかとなった。

<報文>

(原著論文)

- [1] M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 013703 (2024). “Theory of Hall Conductivity and Its Exact Relationship to Orbital Magnetic Susceptibility”
- [2] K. Ohe, H. Shishido, M. Kato, S. Utsumi, H. Matsuura, and Y. Togawa: Phys. Rev. Lett. **132**, 056302 (2024). “Chirality-induced selectivity of phonon angular momenta in chiral quartz crystals”
- [3] H. Matsuura, M. Ogata, N. Tujii, and T. Mori: in preparation. “Theory of thermoelectric effect based on antiferromagnetic magnon drag in natural chalcopyrite $\text{Cu}_{1+x}\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$ ”
- [4] H. Matsuura, A. Riss, F. Garmroudi, M. Parzer, and E. Bauer: in preparation.
- [5] K. Kitayama and M. Ogata: arXiv:2311.07176 (2023). “Nonlinear optical response in multiband Dirac-electron system”
- [6] K. Kitayama and M. Ogata: in preparation. “Charge order induced circular photogalvanic effects in α -type organic conductors”
- [7] K. Kitayama and M. Ogata: in preparation. “Momentum and energy tuning of Weyl points in Floquet Weyl semimetal by using bicircular light”
- [8] J. Endo, H. Matsuura, and M. Ogata: Phys. Rev. B **107**, 094521 (2023). “Theoretical analysis of anisotropic upper critical field of superconductivity in nodal-line semimetals”
- [9] J. Endo, H. Matsuura, and M. Ogata: in preparation. “Phonon drag effect in Nernst effect and thermal Hall effect: General theory and application to dilute metal”
- [10] M. Kato and M. Ogata: in preparation. “Interatomic spin-orbit coupling in atomic orbital-based tight-binding models”
- [11] M. Kato, H. Matsuura, and M. Ogata: in preparation. “Temperature dependence of the thermal transport property of chiral phonons”
- [12] K. Takahashi, H. Matsuura, H. Maebashi, and M. Ogata: Phys. Rev. B **107**, 115158 (2023). “Thermoelectric properties in semimetals with inelastic electron-hole scattering”

- [13] H. Maebashi and C. M. Varma: arXiv:2207.11982. “Quantum-critical transport of marginal Fermi-liquids”
- [14] S. Ozaki and M. Ogata: Phys. Rev. B **107**, 085201 (2023). “Topological contribution to magnetism in the Kane-Mele model: An explicit wave-function approach”
- [15] S. Ozaki, I. Tateishi, H. Matsuura, T. Koretsune, and M. Ogata: in preparation. “Dia- to paramagnetic anisotropy of the orbital magnetic susceptibility emerging from the nodal line with energy variation”
- [16] M. Wallerberger, S. Badr, S. Hoshino, S. Huber, F. Kakizawa, T. Koretsune, Y. Nagai, K. Nogaki, T. Nomoto, H. Mori, J. Otsuki, S. Ozaki, T. Plaikner, R. Sakurai, C. Vogel, N. Witt, K. Yoshimi, and H. Shinaoka: Software X **21**, 101266 (2023). “sparse-ir: Optimal compression and sparse sampling of many-body propagators”
- [17] Y. Suzumura, T. Tsumuraya, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 054704 (2024). “Seebeck coefficient of two-dimensional Dirac electrons in an organic conductor under pressure”
- [18] G. Qu, M. Hayashi, M. Ogata, and J. Fujimoto: Phys. Rev. B **108**, 064404 (2023). “Anisotropy of the spin Hall effect in a Dirac ferromagnet”
- (国内雑誌)
- [19] 小形正男、松浦弘泰、尾崎壮駿：固体物理 **58**, 775 (2023). “ギャップのある傾いたディラック電子系の異常スピン輸送現象—擬 2 次元有機伝導体 α -(BETS) $_2$ I $_3$ を念頭に—”
- [20] 米谷民明、小形正男：数理科学 **10** 月号, 5,68 (2023). “対談：素粒子物理と物性物理”
- [21] 廣澤智紀、前橋英明、松浦弘泰、小形正男：固体物理 **59**, 27 (2024). “データ駆動型アプローチによる熱電物質の伝導率スペクトルの推定”
- [22] 松浦弘泰、高橋英史、片瀬貴義：固体物理 **59**, 85 (2024). “フォノンドラッグ効果—熱電性能向上への新アプローチ—”
- (学位論文)
- [23] 北山圭亮：“Photoinduced phenomena in organic conductors” (有機伝導体における光誘起現象) (東京大学大学院理学系研究科・博士論文)
- [24] 文賢泰：“ノーダルライン半金属における磁場中ゼーベック係数” (Seebeck coefficient under magnetic field in a nodal-line semimetal) (東京大学 大学院理学系研究科・修士論文)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [25] H. Matsuura, M. Ogata, N. Tujii, and T. Mori: 39th Annual International Conference on Thermoelectrics (ICT2023) (University of Washington, Seattle, USA, June 21–25, 2023). “Theory of thermoelectric effect based on antiferromagnetic magnon drag in natural chalcopyrite Cu $_{1+x}$ Fe $_{1-x}$ S $_2$ ”
- [26] M. Ogata, M. Hosoi, I. Tateishi, and H. Matsuura: 39th Annual International Conference on Thermoelectrics (ICT2023). “Possible large Seebeck effect by the drumhead surface states of nodal-line semimetals”
- [27] J. Endo, H. Matsuura, and M. Ogata: ICT2023. “Phonon Drag Effect in Nernst Effect and Thermal Hall Effect: General Theory and Application to Dilute Metal”
- [28] K. Takahashi, H. Matsuura, H. Maebashi, and M. Ogata: ITC2023. “Thermoelectric properties in semimetals with electron-hole scattering”
- [29] K. Kitayama and M. Ogata: International Symposium on Quantum Electronics 2024. (Ito International Research Center, Tokyo, Japan, February 13–16, 2024). “Nonlinear optical responses in α -type organic salt”
- [30] K. Kitayama and M. Ogata: CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials 2024 (Akihabara, Tokyo, Japan, February 20–22, 2024). “Nonlinear optical responses in α -type organic salt”
- [31] K. Kitayama, Y. Tanaka, M. Ogata, and M. Mochizuki: APS March Meeting (Minneapolis, USA, March 15–19, 2024). “Predicted Novel Type of Photoinduced Topological Phase Transition Accompanied by Collision and Collapse of Dirac-cone Pair in Organic Salt α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ ”
- [32] M. Kato, H. Matsuura, Y. Togawa, and M. Ogata: Advanced Materials Research Grand Meeting (MRM2023) (Kyoto, Japan, December 11–16, 2023). “Thermal-angular momentum conversion by chiral phonons: a case study of α -quartz”
- 招待講演
- [33] M. Ogata, T. Mori, E. Bauer, H. Matsuura, H. Maebashi, and J. Endo: Advanced Materials Research Grand Meeting (MRM2023) (Kyoto, Japan, December 11–16, 2023). “Enhancement of Seebeck Coefficient by Phonon- and Magnon-Drag”
- [34] M. Ogata, H. Yokoyama, K. Kobayashi, and T. Watanabe: Workshop on Quantum Monte Carlo Methods at Work for Describing Novel States of Matter (ICTP Trieste, Italy, July 10–14, 2023). “Excited states beyond Mott gap in half-filled Hubbard model + Impurity effects near half-filling”
- (国内会議)
- 一般講演

- [35] 小形正男、尾崎壮駿、松浦弘泰：日本物理学会、東北大学 2023, 9.16–9.19 (年次大会). “ノーダルネット電子状態における軌道帯磁率”
- [36] 北山圭亮、小形正男：日本物理学会、東北大学. “有機導体における非線形光学応答の理論研究”
- [37] 遠藤純矢、松浦弘泰、小形正男：日本物理学会、東北大学. “フォノンドラッグによる磁場中の Nernst 効果・熱 Hall 効果の理論”
- [38] 前橋英明、高橋慶伍、松浦弘泰、小形正男：日本物理学会、online 2024, 3.18–3.21 (春季大会). “強相関金属の熱電出力因子に対するフェルミ液体効果”
- [39] 北山圭亮、小形正男：日本物理学会、online (春季大会). “円偏光照射下の有機導体における光電流の理論研究”
- [40] 北山圭亮、小形正男：電気・熱・光応答研究会 2023, 9.8–9.9. “有機導体における非線形光学応答の理論研究”
- [41] 北山圭亮、小形正男：有機固体若手の会 2023 冬の学校 2023, 11.24–11.25. “有機導体における非線形光学応答の理論研究”
- [42] 加藤将貴、松浦弘泰、戸川欣彦、小形正男：キラル若手研究会 (愛媛大学) 2023, 11.27–11.29. “カイラリティの微視的起源とスピン-軌道-格子の角運動量転送”
- [43] 前橋英明：熱電意見交換会 (熱電塾) (東京大学本郷キャンパス) 2023, 10.2. “ハバードモデルでの Wiedemann-Franz 則について”
- [44] 松浦弘泰：熱電意見交換会 (熱電塾). “(TMTSF)₂PF₆ のゼーベック係数”
- [45] 小形正男：熱電意見交換会 (熱電塾). “CaAgX の熱電効果”
- [46] 前橋英明：熱電意見交換会 (熱電塾) (東京理科大学神楽坂キャンパス) 2024, 3.28. “Thermoelectric power factor of Fermi liquids in a lattice”
- [47] 小形正男：熱電意見交換会 (熱電塾). “ディラック系、ノーダルライン系におけるゼーベック係数”
- [52] 松浦弘泰：九州大学工学研究院機械工学部門宮崎研、集中講義・セミナー, 2023, 5.12 (九州大学). “熱電理論の基礎・ドラッグ由来の熱電効果における理論的研究”
- [53] 松浦弘泰：大阪公立大学戸川研究室セミナー, 2023, 10.18 (大阪公立大学). “磁性入門”
- [54] Masao Ogata: Seminar at Technische Universität Wien, TUW, 2023, 3.23. “Enhancement of Seebeck Coefficient by Phonon- and Magnon-Drag”
- [55] M. Kato: Invited seminar (Paul Scherrer Institut), 2024, 3.14. “Thermal CISS in chiral quartz and the microscopic origin of chiral spin-orbit coupling”
- [56] 高橋慶伍：名古屋大学・機能性物質物性研究室, 2023, 4.24. “電子ホール散乱をもつ半金属の輸送現象: Wiedemann-Franz 則を中心に”
- [57] 高橋慶伍：豊田工業大学・エネルギー材料研究室, 2023, 5.9. “電子ホール散乱をもつ半金属の輸送現象: Wiedemann-Franz 則を中心に”

3.2 常行研究室

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

招待講演

- [48] Hideaki Maebashi: 物性研究所短期研究会「熱電材料の高性能化はどこまで行くか」(東京大学物性研究所, 2023, 12.5–12.6). “Lorenz Ratio in Strongly Correlated Electron Systems: Effects of Umklapp Scattering”
- [49] Masao Ogata: 物性研究所短期研究会「熱電材料の高性能化はどこまで行くか」“Recent Development of Electrothermal Transport Properties in Microscopic Theory”
- [50] 小形正男：日本物理学会、東北大学 2023, 9.16–9.19 (年次大会) 領域 7, 領域 3, 領域 8, 領域 11 合同シンポジウム「量子スピン液体—未解決問題の理解と新展開—」“はじめに”
- [51] 前橋英明、高橋慶伍、松浦弘泰、小形正男：電気・熱・光応答研究会 (三次, 2023, 9.8–9.9) “強相関電子系の電気・熱伝導とウムクラップ散乱”

(セミナー)

3.2.1 THz 領域の複素誘電率計算手法の開発

近年、産業応用への期待から、GHz、THz 帯での物質の誘電特性計算の必要性が高まっている。この周波数帯では、格子振動に伴う電子状態変化 (分極変化) が本質的に重要であり、それらを第一原理から取り扱うためには課題も多い。そこで我々は、密度汎関数理論に基づ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。本年度は、高分子材料の誘電率計算への応用を念頭に、分子性液体の複素誘電率を高精度計算する手法の開発と実証を行なった [6, 7, 11, 14, 18, 24, 31, 28, 44]。

前年度まで開発してきた、非調和効果を取り入れた格子力学計算とボルン有効電荷から複素誘電率を計算する手法によれば、比較的少ない計算量で結晶

の誘電率を高精度に計算することができる [25]。ところが高分子材料や分子性液体は、誘電率を決める構造揺らぎが極めて大きいため、平衡点の周りの調和振動から出発する上記手法の適用が難しい。そのような場合には、分子動力学法を用いて長時間の時間発展計算を行い、各時間での系全体の双極子モーメントを計算して、その時間相関関数から線形応答理論により誘電率を計算することができる。系に含まれる分子の双極子モーメントは、分子の内部構造だけでなく、周囲の分子との相互作用によっても大きく変わるため、古典電荷モデルのような単純なモデルではなく、第一原理計算により見積もる必要があるが、これは計算コストが非常に高く、長時間にわたる相関関数の計算は困難である。そこで短時間の第一原理分子動力学計算の結果から、化学結合ごとの価電子の重心（ワニエ中心）位置を予測する機械学習モデルを作成し、これと分子動力学法を組み合わせることで、現実的な計算時間内に材料の誘電特性を高精度計算することができる手法を開発した [?]。この手法は予測能力に優れるだけでなく、小規模な分子で得られた機械学習モデルを大きな分子にも利用できる点で拡張性が高く、高分子材料開発にも有用である。

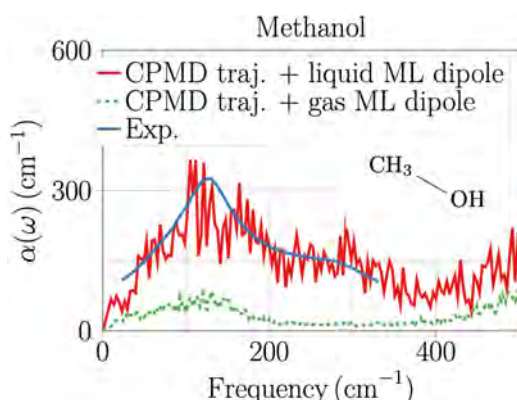


図 3.2.4: 液体メタノール (CH_3OH) の誘電率の第一原理計算から計算される、室温でのテラヘルツ領域の吸収係数とその実験値。分子間の相互作用による分極を無視した計算値 (緑の点線) は吸収係数を大幅に過小評価するが、正しく考慮した計算値 (赤の実線) は実験値 (なめらかな青の実線) とよく一致する。

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

2019 年に、170 GPa 以上まで加圧したランタン水素化物 (La-H) が 260 K で超伝導になることが発見され、室温超伝導まであと一步に迫っている [39]。試料に対して加熱と冷却を繰り返すことにより、この

超伝導転移温度 (T_c) が 550 K まで上昇することが最近報告されたが、その真偽についてはまだ明らかになっていない。この高温超伝導は、 La-H がダイヤモンドアンビルセルの試料室内に存在する他の物質と反応して多元系水素化物が形成されたことに起因すると考えられている。そこで我々は、その候補のひとつである N が反応した場合を想定して、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、密度汎関数理論 (DFT) を用いた第一原理計算を使って La-N-H 系における高圧安定相と超伝導相を探索し、高温超伝導についての検証を行なった。

組成比と結晶構造を網羅的に変化させて得られる形成エネルギー凸包の形状から安定相が予測できるため、これまでの研究で、形成エネルギー凸包を進化的アルゴリズムで効率良く構築していく手法を開発した [40]。しかし、この手法では大量の構造最適化計算を実行する必要があるため、DFT 計算だけでは膨大な計算コストがかかる。そこでこの手法を高汎用性ニューラルネットワークポテンシャルを用いたシミュレータの Matlantis と連動させることによって安定相探索の高速化・効率化を行なった。20 GPa における La-N-H 系 ($\text{La}_x\text{N}_y\text{H}_{1-x-y}$) に適用させた結果、実験ではまだ観測されていない新たな安定相を複数予測することに成功した (図 3.2.5)。これらのうち、三方晶系の構造をとる準安定相の La_2NH_2 が最も高い T_c 値となる 14.4 K を示した [2, 4, 10, 17, 21, 26, 30, 33]。一方、実験で報告されている高温超伝導の兆候は本研究の条件下では得られなかったため、N を他の候補元素に置換し、圧力を変化させて更なる検証を引き続き行う [38]。

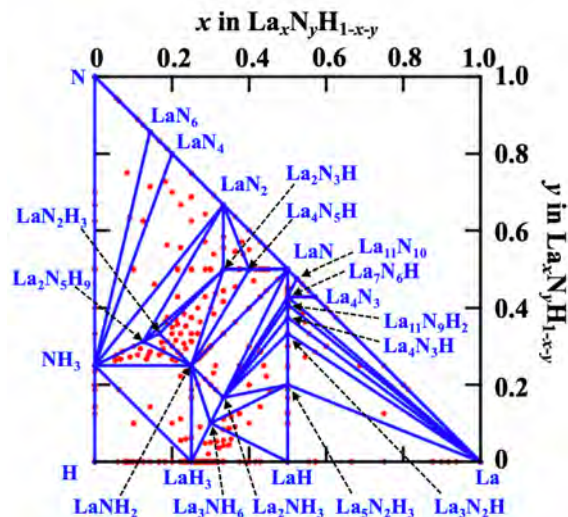


図 3.2.5: 20 GPa における La-N-H 系の安定・準安定化合物。形成エンタルピー凸包を xy 面に投影しており、青線が凸包のエッジ、青線の交点が凸包の頂点 (安定化合物)、赤点は準安定化合物を示す。

3.2.3 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、今後も効率的に材料開発を進める上で不可欠な要素になると考えられるが、構造が複雑になればなるほど組合せ爆発による計算コストの増大が深刻になり、現実的な時間内での構造予測ができなくなる。そこで我々は、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、データ同化構造探索手法を開発している [9]。

これまでの研究で、粉末回折実験データから格子定数が予測できる場合は、データ同化が有効であることが確認されてきた。2023 年度は前年度に引き続き、実験的に格子定数の予測が困難な場合や、実験試料が複数の異なる構造の結晶を含む場合に、格子定数の事前予測なしに構造探索できるよう、手法の拡張・改良を行った [5, 8, 12, 16, 20, 32, 35, 37]。この新しい手法を繰り返し適用することで、複雑な結晶構造として知られている SiO_2 の結晶多形が混在した回折データからでも、それぞれの相の結晶構造を決定できることが確認された (Fig.3.2.6)。

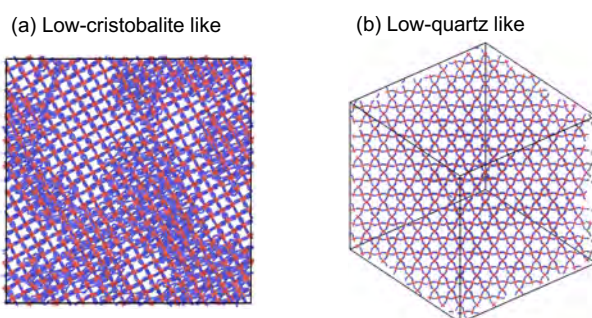


図 3.2.6: SiO_2 の多形構造である low-quartz と low-cristobalite の回折ピークが混在したデータを用いて、データ同化により得られた (a) low-quartz 構造と (b) low-cristobalite 構造。

3.2.4 相関波動関数理論トランスコリレイティッド法の開発

第一原理計算には、密度汎関数理論 (DFT) もしくは波動関数理論 (WFT) に基づく手法が用いられる。このうち結晶やアモルファス、表面・界面、大規模分子の計算に利用できるのは、事実上、計算コストと計算精度のバランスに優れた DFT のみである。ところが現状の DFT は強相関電子系の電子状態を記述できないことに加え、系統的な精度向上の方法がない。そこで我々は、電子間距離に依存する項を用いて電子相関効果を取り入れることのできる相関波動関数理論トランスコリレイティッド (TC) 法の開発を続けている。本年度は、TC 法の枠組みにおけるグリーン関数法の定式化を行った [22, 29, 36]。

3.2.5 水素化物ペロブスカイトの超伝導

近年、硫化水素の高圧相 H_3S など、極めて高い超伝導転移温度を示す水素化物が複数見つかったが、いずれも 100GPa を超える超高压でしか安定に存在しない。そこで常圧でも安定で高压下の H_3 とよく似た立方晶の結晶構造を持つ絶縁体のペロブスカイト型水素化物 KMgH_3 に着目し、どのようなドーパ量や圧力で動的安定性が維持できるかを、自己無撞着フォノン法を用いて調べ、マクミランの公式を用いて超伝導転移温度を予測した [13, 15, 19, 23, 27, 34]。現在、さらに信頼性の高い超伝導密度汎関数理論による転移温度計算を行っている。

3.2.6 非熱的レーザー加工の微視的シミュレーション

フェムト秒からピコ秒程度の超短パルスによる非熱的レーザー加工は、長パルスや CW レーザーに比べて標的の熱的損傷が少ないことから、微細加工への応用が期待されているが、パルス幅による違いの原因は明らかになっていない。一方、産業上望ましい加工結果を得るためには、レーザー強度やパルス幅などのパラメータの最適化が重要になる。そこでレーザー加工の背景にある学理解明と、各パラメータが与える影響を理論計算によって評価・予測する手法の開発を行ってきた。本年度は、これまでの研究で重要性が明らかになった電子エントロピーを取り入れた、新しい分子動力学シミュレーション手法に関して論文で発表した [1]。また、よりマクロな取り扱いを目指した流体力学的な定式化によるシミュレーション手法についても、論文にまとめた [3]。

<報文>

(原著論文)

- [1] Y. Tanaka and S. Tsuneyuki, "Microscopic mechanism of ultrashort-pulse laser ablation of metals: a molecular dynamics study incorporating electronic entropy effects", J. Phys. D: Appl. Phys. 56, 385310 (2023).
- [2] T. Ishikawa, Y. Tanaka, and S. Tsuneyuki, "Evolutionary search for superconducting phases in the lanthanum-nitrogen-hydrogen system with universal neural network potential", Phys. Rev. B 109, 094106 (2024).
- [3] S. Watanabe, R. Akashi, T. Ishikawa, Y. Tanaka and S. Tsuneyuki, "Hydrodynamic simulation of laser ablation with electronic entropy effects included", submitted.

(会議抄録)

- [4] T. Ishikawa and S. Tsuneyuki, "Evolutionary Search for Superconducting Phases in the Lanthanum-Nitrogen-Hydrogen System with Universal Neural Network Potential PFP", Springer Proceedings in Physics: CCP2023 - 34th IUPAP Conference on Computational Physics (Accepted).

- [5] Y. Kubo, R. Sato, Y. Zhao, T. Ishikawa and S. Tsuneyuki, "Crystal Structure Prediction of Multi-Phase Materials by Data Assimilation", Springer Proceedings in Physics: CCP2023 - 34th IUPAP Conference on Computational Physics (Accepted).
- [6] T. Amano, T. Yamazaki, S. Tsuneyuki, "The first-principles study of THz dielectric properties with a machine learning model for dipole moment", submitted to Springer Proceedings in Physics.

(学位論文)

- [7] T. Amano, "First-principles and machine learning study of anharmonic vibration and dielectric properties of materials" (物質の非調和振動と誘電特性の第一原理及び機械学習による研究), 東京大学, 2024 年 3 月博士 (理学) .
- [8] Y. Kubo, "A data assimilation method to determine crystal structures in multiphase materials" (多相系材料における結晶構造決定のためのデータ同化法), 東京大学, 2024 年 3 月修士 (理学) .

(著書)

- [9] 常行真司「データ同化手法を用いた結晶構造探索」, 現代化学増刊 48「マテリアル・機械学習・ロボット」(東京化学同人, 2024) .

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] T. Ishikawa and S. Tsuneyuki, "Evolutionary Search for Superconducting Phases in the Lanthanum-Nitrogen-Hydrogen System with Universal Neural Network Potential PFP", CCP2023 - 34th IUPAP Conference on Computational Physics, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, Aug. 4-8, 2023.
- [11] T. Amano, T. Yamazaki, S. Tsuneyuki, "The first-principles study of THz dielectric properties with a machine learning model for dipole moment" 34rd IUPAP Conference on Computational Physics, Kobe, Japan, Aug. 5, 2023.
- [12] Y. Kubo, R. Sato, T. Ishikawa, S. Tsuneyuki, "Crystal Structure Prediction of Multi-Phase Materials by Data Assimilation", 34th IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2023), Kobe International Conference Center, Aug. 5, 2023.
- [13] S. Lu, R. Akashi, S. Tsuneyuki, "On the Stability and Electron-phonon Coupling of Hole-doped KMgH_3 ", 34th IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2023), Kobe International Conference Center, Aug. 7, 2023.
- [14] T. Amano, T. Yamazaki, S. Tsuneyuki "The first-principles study of THz dielectric properties with a machine learning model for dipole moment", International Workshop on Theory of Many-Body Problems: Hierarchical Structure and Machine Learning (HISML) 2023, Chiba, Japan, Oct. 10, 2023.
- [15] S. Lu, R. Akashi, S. Tsuneyuki, "First-principles study of electron-phonon coupling on hole-doped KMgH_3 ", Hierarchical Structure and Machine Learning (HISML) 2023, Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, Oct. 2-13, 2023.
- [16] Y. Kubo, R. Sato, T. Ishikawa, S. Tsuneyuki, "Crystal Structure Determination of Multiple Phases by Data Assimilation", Hierarchical Structure and Machine Learning (HISML) 2023, Institute for Solid State Physics, Oct. 4, 2023.
- [17] T. Ishikawa and S. Tsuneyuki, "Evolutionary Search for Superconducting Phases in the Lanthanum-Nitrogen-Hydrogen System with Universal Neural Network Potential PFP", MRM2023/IUMRS-ICA2023 Grand Meeting, Kyoto, Japan, Dec. 11-16, 2023.
- [18] T. Amano, T. Yamazaki, S. Tsuneyuki "The first-principles study of THz dielectric properties with a machine learning model for dipole moment" Advanced Materials Research Grand Meeting MRM2023, Kyoto, Japan, Dec. 12, 2023.
- [19] S. Lu, R. Akashi, S. Tsuneyuki, "First-principles Study on the Stability and Electron-Phonon Coupling of Hole-Doped Perovskite Hydride KMgH_3 ", Advanced Material Research Grand Meeting (MRM2023/IUMRS-ICA2023), Kyoto International Conference Center, Dec. 11-16, 2023.
- [20] Y. Kubo, R. Sato, T. Ishikawa, S. Tsuneyuki, "Crystal Structure Prediction of Multi-Phase Materials Using Insufficient Diffraction Data", MRM2023/IUMRS-ICA2023, Kyoto International Conference Center, Dec. 13, 2023.
- [21] T. Ishikawa and S. Tsuneyuki, "Search for superconductivity in La-N-H by evolutionary algorithm, neural network potential, and density functional theory", International Symposium on Quantum Electronics, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, Feb. 13-16, 2024.
- [22] Takumi Chida, Shinji Tsuneyuki, 「Calculation of the Green function and ionization energy based on the transcorrelated method」, International Symposium on Quantum Electronics, The University of Tokyo, Feb. 14, 2024.
- [23] S. Lu, R. Akashi, S. Tsuneyuki, "Superconductivity in Hole-Doped Perovskite Hydride KMgH_3 ", International Symposium on Quantum Electronics, The University of Tokyo, Feb. 14, 2024.
- [24] T. Amano, T. Yamazaki, S. Tsuneyuki "First-principles study of THz dielectric properties of liquid molecules with a machine learning model for dipole moments", American Physics Society March Meeting 2023, Minneapolis, USA, Mar. 7, 2024.

招待講演

(国内会議)

一般講演

- [25] 天野智仁, 山崎民雄, 明石遼介, 只野央将, 常行真司, 「ルチル型 $\text{TiO}_{\text{sub}i2i/\text{sub}i}$ の格子誘電特性: 自己無撞着フォノン法による第一原理的研究」計算物質科学の新展開 2023, 千葉, 2023 年 4 月 3 日
- [26] 石河孝洋, 常行真司, 「Matlantis と進化的アルゴリズムの連動によるランタン-窒素-水素系超伝導の探索」, 日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大学 (青葉山キャンパス, 川内キャンパス), 2023 年 9 月 16 日 19 日.
- [27] S. Lu, R. Akashi, S. Tsuneyuki, "On the Stability and Electron-Phonon Coupling of Hole-doped Perovskite Hydride KMgH_3 ", 日本物理学会 2023 年秋季大会, 東北大学, 2023 年 9 月 16 日.
- [28] 天野智仁, 山崎民雄, 常行真司, 「局所双極子モーメントの機械学習による高分子の誘電特性計算」日本物理学会 2023 秋期大会, 仙台, 2023 年 09 月 17 日
- [29] 千田拓実, 常行真司, 「Transcorrelated 法に基づいた Green 関数の計算とイオン化エネルギー」, 日本物理学会 第 78 回年次大会 (2023 年), 東北大学, 2023 年 9 月 17 日.
- [30] 石河孝洋, 「進化的アルゴリズムとニューラルネットワークポテンシャルによるランタン-窒素-水素系超伝導の探索」, ipi - ダイキン シンポジウム, 東京大学小柴ホール, 2023 年 10 月 24 25 日.
- [31] 天野智仁, 山崎民雄, 常行真司, 「双極子モーメントの機械学習モデルによる誘電特性の研究」 ipi ダイキン シンポジウム 2023, 東京, 2023 年 10 月 24 日
- [32] 久保祐貴, 佐藤龍平, 石河孝洋, 常行真司, 「データ同化による多相系物質の結晶構造決定」, ipi - ダイキン シンポジウム, 東京大学小柴ホール, 2023 年 10 月 24 日.
- [33] 石河孝洋, 田中悠太, 常行真司, 「進化的アルゴリズムとニューラルネットワークポテンシャルによるランタン-窒素-水素系超伝導の探索」, 第 63 回高压討論会, さわやかちば県民プラザ (柏市), 2023 年 11 月 1 日 3 日.
- [34] 陸劭聡, 明石遼介, 常行真司, 「水素化物ペロブスカイトにおける安定性の圧力依存性」, 第 64 回高压討論会, さわやかちば県民プラザ (千葉県柏市), 2023 年 11 月 3 日.
- [35] 久保祐貴, 佐藤龍平, 石河孝洋, 常行真司, 「X 線回折データ同化計算による複数相の結晶構造決定」, 第 64 回高压討論会, さわやかちば県民プラザ (柏市), 2023 年 11 月 3 日.
- [36] Takumi Chida, Shinji Tsuneyuki, 「Calculation of Green function and ionization energy based on the transcorrelated method」, Second Workshop on Fundamentals in density functional theory (DFT2024), RIKEN Kobe Campus, 2024 年 2 月 21 日.
- [37] 久保祐貴, 佐藤龍平, 石河孝洋, 常行真司, "Determination of Crystal Structures in Multiphase Materials by Data Assimilation", Second Workshop on Fundamentals in Density Functional Theory (DFT2024), 理化学研究所神戸キャンパス, 2024 年 2 月 21 日.

- [38] 石河孝洋, 田中悠太, 常行真司, 「Matlantis と進化的アルゴリズムの連動によるランタン-白金-水素系超伝導の探索」, 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン, 2024 年 3 月 18 日 21 日.

招待講演

- [39] 石河孝洋, 「水素化物高温超伝導について最近の研究から」, 第 36 期 CAMM フォーラム本例会, オンライン (Zoom) と東京・田町「ビジョンセンター田町」203 会議室, 2023 年 4 月 7 日.
- [40] 石河孝洋, 「進化的アルゴリズムによる新物質探索」, 2023 年度 東京大学研究所 社会連携研究部門 & データ連携部会合同シンポジウム, 柏の葉キャンパス駅前サテライト 1 階 多目的ホール, 2023 年 6 月 26 日.
- [41] 常行真司 「材料研究のためのデジタルツイン～液体、アモルファスから多結晶まで～」, 新学術領域「蓄電固体界面科学」第 5 回公開シンポジウム, 2023 年 9 月 26 日 (オンライン) .
- [42] 常行真司 「物質構造シミュレーションとデータ同化」, ipi-ダイキンシンポジウム, 東京大学小柴ホール, 2023 年 10 月 24 日.
- [43] 常行真司 「「富岳」成果創出加速プログラムの概要紹介」, 「パネルディスカッション: 計算科学の未来, AI との融合」, 第 3 回スーパーコンピュータ「富岳」シンポジウム 「富岳百景」, 2023 年 12 月 1 日 (オンライン) .

(セミナー)

- [44] T. Amano "First-principles and machine learning study of anharmonic vibration and dielectric properties of materials", Theory Seminar at the Institute for Solid State Physics, Chiba, Japan, 2024/1/26

3.3 藤堂研究室

物質の状態を知るには、多体のシュレディンガー方程式を解き、統計力学の分配関数を求めればよい。しかしながら、現代のスーパーコンピュータの計算能力をもってしても、多体のシュレディンガー方程式を完全に解くことはできない。そこで、対称性や量子相関など、もとの方程式の中に含まれている物理的に重要な性質を失うことなく、シミュレーションを実行しやすい形へ表現しなおすことが、計算物理における重要な鍵となる。

藤堂研究室では、モンテカルロ法などのサンプリング手法、経路積分に基づく量子ゆらぎの表現、特異値分解やテンソルネットワークによる情報圧縮、統計的機械学習の手法などを駆使し、量子スピン系から現実の物質、さらには量子コンピュータにいたるまで、さまざまな量子多体系に特有の状態、相転移現象、ダイナミクスの解明を目指している。また、次世代大規模シミュレーションのためのオープンソースソフトウェアの開発・公開も進めている。さらに、「量子ソフトウェア」寄付講座や JST 共創の場形成

支援プログラム「サステナブル量子 AI 研究開発拠点」の活動を通じて、サンプリングやテンソルネットワークに基づく量子アルゴリズムや量子機械学習手法の研究開発も行っている。

3.3.1 強相関係のシミュレーション手法

テンソルネットワーク法

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

量子モンテカルロ法における負符号問題

量子多体系に対する量子モンテカルロ法は広く使用されている計算手法である。しかし、一部の量子格子模型においては負符号問題が生じ、低温では統計誤差が指数関数的に増大するという問題がある。この問題に対処するため、我々は表示基底変換とリウエイティング手法を統合し、負符号問題を最適化問題として再定義した。特に、Frustration-Free 系を仮定することで最適化関数を単純化し、負符号を効果的に軽減できることを明らかにした。数値シミュレーションにより、提案手法は解析解が存在するスピン系だけでなく、解が未知のフラストレーションフリー系においても高い性能を発揮することを確認した。

連続空間系における量子モンテカルロ法

He_4 のような相互作用するボーズ粒子系では、超流動密度や凝縮率といった量子統計性に関する物理量のサンプリングが困難である。従来のモンテカルロ更新では経路の巻きつき数を変更することができないためである。我々は、連続空間多体系に対する経路積分量子マルコフ連鎖モンテカルロ法に、スピングラス系のシミュレーションで開発された交換モンテカルロ法とポピュレーションアンニリングを組み込んだ。異なる虚数時間スライスでゆっくりと相互作用をオンにし、相互作用のない状態から完全に相互作用する状態へと移行させることで、巻きつき数の更新が素早く実現することを確認した。

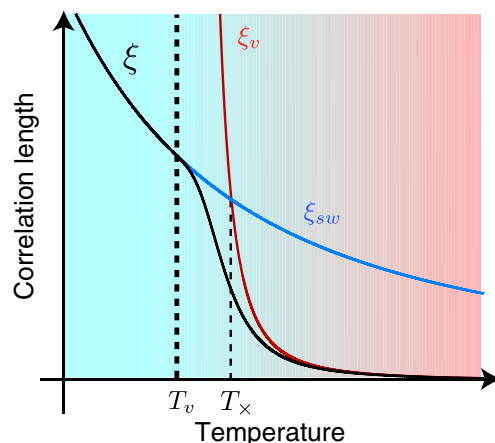


図 3.3.7: トポロジカル転移におけるスピン相関長と渦の長さスケールの振る舞い

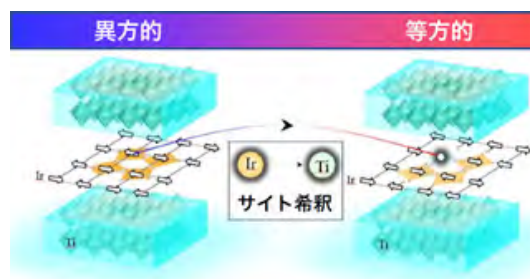


図 3.3.8: スピン希釈による巨大磁場応答

3.3.2 強相関多体系における新奇な状態・相転移現象

フラストレート磁性体におけるトポロジカル欠陥による相転移

相互作用が競合するフラストレート磁性体において、通常の強磁性体とは異なる傾いた磁気秩序が現れる。二次元のフラストレート磁性体では、新規構造として $\mathbb{Z}_2$ 渦と呼ばれるトポロジカル励起が現れ、その解離・凝集に伴う相転移の可能性が議論されてきた。 $\mathbb{Z}_2$ 渦が関与する相転移には、二つの長さスケールが存在するが、スピン相関長が発散しないまま渦の長さスケールが発散し、スピンの秩序化を伴わないトポロジカル転移になることが期待されている。我々は、大規模モンテカルロシミュレーションを用いて、有限温度でのトポロジカル相転移の可能性を検討し、相転移温度での相関長が従来見積もられていた数千格子間隔よりも大幅に長く、10 万格子間隔以上に伸びていることを明らかにした。

スピン希釈による巨大磁場応答

反強磁性スピンは互いに反対向きに揃うため、正味の磁化が打ち消し合い操作が難しい。通常、スピン軌道結合によるわずかなスピンの傾きを利用した磁場操作が試みられるが、スピンの異方性により磁場応答が低下する問題があった。この問題に対し、我々は二次元反強磁性スピンでスピン等方的な状態を保ちながら傾いた磁気秩序を実現し、巨大な磁場応答を得るアプローチを提案した。サイト希釈を用いてスピン異方性を制御し、理論と実験で巨大磁場応答を実証した。量子モンテカルロ法による計算と組み合わせることで、実験的に観測された転移温度の上昇を定量的に説明した。

格子フェルミオン系に対する Grassmann テンソルネットワークの応用

格子フェルミオンを含む量子多体系は、素粒子物理学では格子量子色力学など物理学の様々な分野において現れる。我々は、Grassmann テンソルネットワークに基づき、格子フェルミオン系の経路積分を計算する手法の研究を進めている。特に、フレーバー自由度を伴う格子フェルミオン系に対して行列積分分解のアイデアに基づいてメモリコストを線形増大にまで削減し、2 フレーバーおよび 3 フレーバーの Gross-Neveu-Wilson 模型におけるゼロ温度の有限密度領域に特有の相転移現象を捉えることに成功した。また、スタaggerドフェルミオンと結合した 1+1 次元の SU(2) Yang-Mills 理論では、初期テンソルの結合次元は少なくとも 10^2 のオーダーになるが、効率的な初期テンソル圧縮スキームを導入することで、熱力学的極限における数密度やフェルミオン凝縮などの物理量の計算に成功した。

キタエフ・スピン液体の量子性の実験的観測方法

α -RuCl₃ を含むキタエフ・スピン液体の候補物質では、その量子性を観測する方法が重要な未解決問題である。最近キタエフ磁性体に対する STM を用いた実験や提案が盛んに行われているが、我々はそれによってマヨラナ準粒子間の非局所相関が見られるという理論的な提案を行った。特に「量子テレポーテーション」がスピン欠陥の間のスピン・スピン相関に見られる可能性があり、それを介したキタエフ・スピン液体の量子性の実証が期待される。

長距離相互作用系における有効次元の変化

量子臨界現象において、長距離相互作用は、空間・時間の異方性を相互作用の減衰率で制御することにより、系の有効次元を変化させることができるという点で注目されている。しかし、相互作用を支配する追加の自由度を持つ広範な探索空間や強い有限サイズ効果のため、包括的かつ高精度な数値解析は依然として困難であった。我々は、「空間/虚時間軸方向の相関比を同一かつ最適な値にする」という指導原理のもとでモデルのパラメータを自動的に調整することにより、この問題を大幅に改善出来ることを

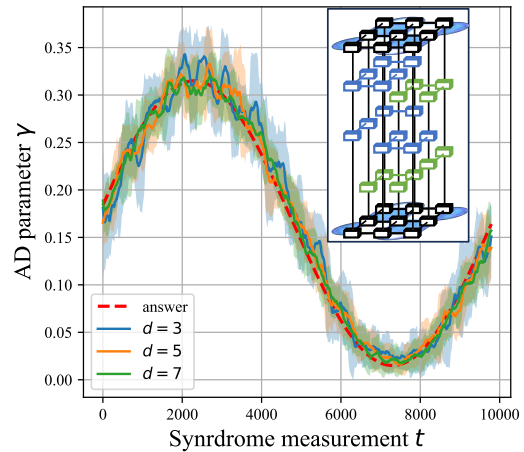


図 3.3.9: シンドローム統計に基づく時間変化するノイズモデルの推定

示し、さらに、一次元横磁場イジング模型の量子相転移におけるユニバーサリティクラス境界を決定に成功した。

3.3.3 量子計算と量子アルゴリズム

表面符号のシンドローム統計に基づくノイズモデル推定

現在、誤り耐性量子計算において表面符号が実用的な誤り訂正符号として注目されている。表面符号の復号アルゴリズムはノイズモデルの情報を利用することで性能が向上するが、ノイズモデルの情報をトモグラフィで前もって用意する必要があり、追加の計算が必要であること、また時間変化するノイズモデルでの性能低下が問題である。そこで、表面符号の復号中に得られるシンドローム測定の結果に基づいてノイズモデルを推定することで、追加の量子計算なしに性能の低下を防ぐことが可能である。我々は、表面符号のテンソルネットワークミュレータとモンテカルロの手法を組み合わせたパウリノイズを超えるノイズモデルのパラメータが推定可能な手法を開発した。時間変化する振幅減衰ノイズモデル等、様々なノイズモデルの推定に成功し、また推定結果を使用することで復号アルゴリズムの性能向上も確認された。

量子特異値分解による量子多体系の実時間発展シミュレーション

量子特異値分解は、量子コンピュータのアルゴリズム研究で注目されている技術である。この手法は、グローバールアルゴリズムやハミルトニアンシミュレーションなどの従来の量子アルゴリズムを包括的に記

述可能であり、空間計算量や精度の面での向上が期待されている。例えば、量子特異値分解を利用した実時間発展シミュレーションは、 Trotter 分解を用いた従来の方法よりも計算効率が優れている。量子コンピュータの応用先としては、量子化学計算や組み合わせ最適化が挙げられており、これらの分野での計算が精度や計算量の面で改善されることが期待されている。我々は、横磁場イジング模型の実時間発展シミュレーションに量子特異値分解を用い、磁化の実時間発展が正しく計算できることを確認した。この成果は、大規模なシステムサイズで従来の古典コンピュータでは計算不可能だった物理量を量子コンピュータで直接計算できる可能性を示している。

グラフ理論を用いたテンソルネットワークの縮約の最適化

テンソルネットワークの縮約順序は二分木として表される。一般のテンソルネットワークについて、その最適縮約木を見つける問題は NP 困難であることが知られている。しかし、特定のクラスのテンソルネットワークについては効率的な方法が知られている。これには、有限木幅グラフ、平面グラフ、1 量子および 2 量子ビットゲートを持つ量子回路などが含まれる。我々は、コンダクタンス、接続性、パス幅などのグラフパラメータを用いてテンソルネットワーク縮約の複雑さの分析を進めている。また、実際の問題に現れるテンソルネットワーク (例えば量子回路シミュレーション) のための最適縮約アルゴリズムの開発も進めている。

3.3.4 機械学習と統計物理

統計力学的なアプローチによる深層ニューラルネットワークの解析

人工ニューラルネットワークを用いた深層学習は近年様々な分野で顕著な成果を挙げているが、動作原理の理解にむけた基礎研究はまだ発展途上の段階にある。我々は、人工ニューラルネットワークにおける信号伝播過程を統計力学的手法で明らかにすることを目指して研究を展開している。特に、最急降下法に基づくニューラルネットワークの訓練過程を解析し、信号伝播過程と吸収状態転移のアナロジーが深層学習過程およびネットワークの設計に対して示唆するところを明らかにした。

論理的/局所的異常の両方を検知する異常検知モデル

画像異常検知モデルの開発はコンピュータビジョンの分野で重要な課題であり、傷や穴といった局所的な異常だけでなく、数量やラベルの不一致といった論理的な異常も検知できるモデルの需要が高まっている。多くの既存手法は異常箇所を異常マップ上で一意に指定できることを前提としているが、数量が間違っているなどの論理的な異常は異常マップ上で一意に表現することが原理的に困難であるため、

別のアプローチが必要であると考えられる。我々は、特徴マップの空間情報を集約した特徴空間上での分布外検知を利用する新たな手法に着目した。特徴空間上で単純な分布外検知手法を組み込んだ結果、提案手法はその単純さにもかかわらず、MVTec LOCO AD データセットで最高性能を達成した。

3.3.5 次世代並列シミュレーションのためのオープンソースソフトウェア・ライブラリ

物質科学シミュレーションのポータル MateriApps

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

また、任意の 2 次元格子上のスピン模型に対してテンソルネットワーク法を適用して基底状態を計算できるソルバー TeNeS、量子モンテカルロ法など量子格子模型のための汎用シミュレーションソフトウェア ALPS や ALPSCore、並列厳密対角化パッケージ $H\Phi$ 、多変数変分モンテカルロ法 mVMC の開発・高度化も進めた。

行列ライブラリの統一と最適化

行列ライブラリのパフォーマンス最適化において、「小行列」と「大行列」の 2 つのシナリオでは異なる最適化戦略が必要である。我々は、一般行列積 (GEMM) などの行列操作を実装するための統一されたアルゴリズムを提案している。この手法は、小さな問題と大きな問題の両方に対して高いパフォーマンスを実現することが可能である。その鍵となるのは、「パッキング」と呼ばれる操作で、メモリ内の連続レイアウトにデータをコピーし、そのデータに対する最初の計算「パス」と融合させることである。このアプローチは、高性能レベル 3 BLAS 「GotoBLAS」を拡張することができる。また、FLAME の手法を応用して、反対称行列の LTLt 分解の計算アルゴリズムを (ピボットの有無にかかわらず) その正しさの証明とともに導出した。このアプローチにより、既知のアルゴリズムだけでなく新しいアルゴリズムも得られる。特に、2011 年の Wimmer による Pfapack 用アルゴリズムに比べて計算量が半分のアルゴリズムが発見された。

<報文>

(原著論文)

- [1] Shinichiro Akiyama, Matrix product decomposition for two- and three-flavor Wilson fermion: benchmark results in the lattice Gross-Neveu model at finite density, *Phys. Rev. D* **108**, 034514 (2023).
- [2] Tsuyoshi Okubo and Naoki Kawashima, Possibility of a topological phase transition in two-dimensional RP3 model, *J. Phys. Soc. Jpn.* **92**, 114701 (2023).
- [3] Shinichiro Akiyama, Yoshinobu Kuramashi, Critical endpoint of (3+1)-dimensional finite density Z3 gauge-Higgs model with tensor renormalization group, *J. High Energy Phys.* **10**, 77 (2023).
- [4] Hidemaro Suwa, Reducing rejection exponentially improves Markov chain Monte Carlo sampling, *Physica A: Stat. Phys. Appl.* **633**, 129368 (2023).
- [5] Masahiro O. Takahashi, Masahiko G. Yamada, Masafumi Udagawa, Takeshi Mizushima, Satoshi Fujimoto, Nonlocal Spin Correlation as a Signature of Ising Anyons Trapped in Vacancies of the Kitaev Spin Liquid, *Phys. Rev. Lett.* **131**, 236701 (2023).
- [6] Junyi Yang, Hidemaro Suwa, Derek Meyers, Han Zhang, Lukas Horak, Zhan Zhang, Evguenia Karapetrova, Jong-Woo Kim, Philip J. Ryan, Mark P. M. Dean, Lin Hao, Jian Liu, Extraordinary Magnetic Response of an Anisotropic 2D Antiferromagnet via Site Dilution, *Nano Letters* **23** (24), 11409–11415 (2023).
- [7] Sayan Mukherjee, Exact generalized Turán number for K3 versus suspension of P4, *Discrete Mathematics* **347**, 113866 (7pp) (2024).
- [8] Kota Ido, Mitsuaki Kawamura, Yuichi Motoyama, Kazuyoshi Yoshimi, Youhei Yamaji, Synge Todo, Naoki Kawashima, Takahiro Misawa, Update of $\mathcal{H}\Phi$: Newly added functions and methods in versions 2 and 3, *Comp. Phys. Comm.* **298**, 109093 (2024).
- [9] Sayan Mukherjee, Extremal numbers of hypergraph suspensions of even cycles, *Eur. J. Comb.* **118**, 103935 (2024).
- [10] K. Imamura, Y. Mizukami, O. Tanaka, R. Grasset, M. Konczykowski, N. Kurita, H. Tanaka, Y. Matsuda, M. G. Yamada, K. Hashimoto, and T. Shibauchi, Defect-Induced Low-Energy Majorana Excitations in the Kitaev Magnet α -RuCl₃, *Phys. Rev. X* **14**, 011045 (2024).
- [11] H. Yamaguchi, T. Okubo, A. Matsuo, T. Kawakami, Y. Iwasaki, T. Takahashi, Y. Hosokoshi, and K. Kindo, Quantum spin state stabilized by coupling with classical spins, *Phys. Rev. B* **109**, L100404 (2024).

(会議抄録)

- [12] Hidemaro Suwa, Shang-Shun Zhang, Cristian D. Batista, BCS-BEC Crossover of Triplet Exciton Condensation in Bilayer Systems, *JPS Conf. Proc.* **38**, 011168 (6pp) (2023).
- [13] 玉井敬一, 大久保毅, ヴィン チュオン ズイ チュオン, 名取直毅, 藤堂眞治, 人工深層ニューラルネットワークが示す吸収状態転移, 人工知能学会全国大会論文集 **JSAI2023**, 2Q6OS20b02 (2023).
- [14] RuQing G. Xu, Field G. Van Zee, Robert A. van de Geijn, Towards a Unified Implementation of GEMM in BLIS, *ICS '23: Proceedings of the 37th International Conference on Supercomputing* 111–121 (2023).
- [15] Shinichiro Akiyama, Raghav G. Jha, Judah Unmuth-Yockey, Tensor renormalization group study of 3D principal chiral model, *Proceedings of The 40th International Symposium on Lattice Field Theory PoS (LATTICE2023)* **453**, 355 (2023).
- [16] Shinichiro Akiyama, Implementation of bond-weighting method for the Grassmann tensor renormalization group, *Proceedings of The 40th International Symposium on Lattice Field Theory PoS (LATTICE2023)* **453**, 370 (2023).

(学位論文)

- [17] Ruixiao Cao, Improvement of numerical algorithm for quantum dimer models (博士論文)
- [18] Keisuke Murota, Strategies for mitigating the negative-sign problem in quantum spin systems: basis rotation and reweighting method (修士論文)
- [19] Takumi Kobori, Application of tensor network simulation for Bayesian inference of noise model from surface code's syndrome statistics (修士論文)
- [20] Sora Shiratani, Stochastic approximation analysis of dynamical quantum critical phenomena in long-range transverse field Ising chain (修士論文)

(著書)

- [21] Kenji Harada, Hiroaki Matsueda, Tsuyoshi Okubo, Application of Tensor Network Formalism for Processing Tensor Data in Advanced Mathematical Science for Mobility Society, ed. Kazushi Ikeda, Yoshiumi Kawamura, Kazuhisa Makino, Satoshi Tsujimoto, Nobuo Yamashita, Shintaro Yoshizawa, Hanna Sumita, pp. 79–100 (Springer, Singapore, 2024).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [22] Sora Shiratani, Kazumasa A. Takeuchi and Daiki Nishiguchi, “Route to polar active turbulence under confinement,” *Frontiers in nonequilibrium physics*, August 2023, YITP.

- [23] S. Akiyama, “Bond-weighting method for the Grassmann tensor renormalization group,” 40th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice2023), August 2023, Fermilab.
 - [24] Takumi Kobori, Syngé Todo, “Bayesian inference of general noise models based on syndrome measurement in surface code,” CCP2023: 34th IUPAP Conference on Computational Physics, August 2023, Kobe.
 - [25] Zhao Todo, “Application of Exchange Monte Carlo and Population Annealing on Continuous Space Path Integral Monte Carlo Simulation,” CCP2023: 34th IUPAP Conference on Computational Physics, August 2023, Kobe.
 - [26] Sora Shiratani and Syngé Todo, “Stochastic approximation analysis of dynamical quantum critical phenomena in long-range transverse field Ising chain,” CCP2023: 34th IUPAP Conference on Computational Physics, August 2023, Kobe.
 - [27] Hidemaro Suwa, Gia-Wei Chern, Kipton Barros, and Cristian D. Batista, “Semiclassical dynamical simulation of the Hubbard model,” CCP2023 - 34th IUPAP Conference on Computational Physics, August 2023, Kobe.
 - [28] Tohru Mashiko, Kiyohide Nomura, “Critical phenomena in the vicinity of the SU(3) symmetric tricritical point of a spin-1 chain,” STATPHYS28, August 2023, Tokyo.
 - [29] Tsuyoshi Okubo, “Finite temperature simulation of (extended) Kitaev model by tensor network approach,” CCP2023: 34th IUPAP Conference on Computational Physics, August 2023, Kobe.
 - [30] Syngé Todo, “Markov-Chain Monte Carlo in Tensor-Network Representation,” CCP2023: 34th IUPAP Conference on Computational Physics, August 2023, Kobe.
 - [31] Sora Shiratani, Kazumasa A. Takeuchi and Daiki Nishiguchi, “Route to polar active turbulence under confinement,” STATPHYS28, August 2023, Tokyo.
 - [32] Hidemaro Suwa, Shang-Shun Zhang, and Cristian D. Batista, “Magnetic excitations of intermediate coupling antiferromagnets near quantum critical point,” STATPHYS28, August 2023, Tokyo.
 - [33] Keiichi Tamai, “Entropy production of absorbing phase transitions,” STATPHYS28: 28th International Conference on Statistical Physics, August 2023, Tokyo.
 - [34] S. Akiyama, Y. Kuramashi, X. Luo, Y. Yoshimura, “Particle Physics with Tensor Network Scheme,” 15th Symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, October 2023, Tsukuba.
 - [35] Hidemaro Suwa, “Giant magnetic response of a two-dimensional $J=1/2$ antiferromagnet,” MPI-UBC-UTokyo workshop, December 2023, Kashiwa.
 - [36] Masahiko G. Yamada, Masahiro O. Takahashi, Takumi Sanno, Yutaka Akagi, Hidemaro Suwa, Satoshi Fujimoto, Masafumi Udagawa, “,” Japan-Germany Workshop on Trends in Quantum Materials and beyond, February 2024, Würzburg.
 - [37] Hidemaro Suwa, Junyi Yang, Lin Hao, and Jian Liu, “Emergent isotropic spin fluctuations from a diluted 2D anisotropic antiferromagnet,” Symposium on Quantum Electronics, February 2024, Tokyo.
 - [38] Hidemaro Suwa, Junyi Yang, Lin Hao, and Jian Liu, “Field-tunable antiferromagnetic ordering temperature of an iridate superlattice,” CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials 2024, February 2024, Tokyo.
 - [39] Hidemaro Suwa, Gia-Wei Chern, Kipton Barros, and Cristian D. Batista, “Semiclassical approach to dynamics of Mott systems in the intermediate-coupling regime,” APS March Meeting 2024, March 2024, Minneapolis, USA.
 - [40] Masahiko G. Yamada, “Developing SUNDMRG.jl,” SQAI-NCTS Workshop on Tensor Network and Quantum Embedding, March 2024, Tokyo.
- 招待講演
- [41] S. Akiyama, “Tensor renormalization group approach to higher-dimensional quantum fields on a lattice,” Tensor Networks in Many Body and Quantum Field Theory, April 2023, University of Washington.
 - [42] Tsuyoshi Okubo, “Quantum-classical entangled approach with tensor networks to investigating quantum spin liquid,” Advanced Study Group: Tensor Network Approaches to Many-Body Systems, July 2023, Daejeon, Korea.
 - [43] Syngé Todo, “Markov-Chain Monte Carlo in Tensor-Network Representation,” Advanced Study Group: Tensor Network Approaches to Many-Body Systems, July 2023, Daejeon, Korea.
 - [44] Syngé Todo, “Markov-Chain Monte Carlo in Tensor-Network Representation,” Extreme Universe Collaboration - 18th Colloquium, July 2023, online.
 - [45] S. Akiyama, “Tensor renormalization group approach to the four-dimensional lattice gauge theories,” Quantum Information, Quantum Matter and Quantum Gravity (QIMG2023) 4th week: ExU-YITP Workshop on Condensed Matter Physics and Quantum Information, September 2023, Kyoto University.
 - [46] S. Akiyama, “Tensor network method for lattice field theory,” 2023 CCS-EPCC Workshop, October 2023, University of Tsukuba.
 - [47] S. Akiyama, “Tensor renormalization group approach to lattice fermions,” Seminar at Xie’s

- group, Renmin University of China, January 2024, online.
- [48] Tsuyoshi Okubo, “Quantum-classical entangled approach using tensor networks for investigating quantum spin liquid,” Mini-workshop: Tensor Network algorithms and applications 2024, January 2024, National Taiwan University, Taipei, Taiwan.
- [49] Tsuyoshi Okubo, “Tensor-Network-Based Approach to Kitaev Spin Liquid,” Annual Meeting of the Physical Society of Taiwan 2024, January 2024, National Central University, Taiwan.
- [50] S. Akiyama, “Tensor network approach for lattice field theories in particle physics,” 2024 KISTI-CCS Workshop, February 2024, Yonsei University.
- [51] Synge Todo, “Markov-Chain Monte Carlo in Tensor-Network Representation,” Recent Developments in Computer Simulation Studies in Condensed Matter Physics, February 2024, University of Georgia.
- (国内会議)
- 招待講演
- [52] 秋山進一郎, 「Tensor renormalization group approach to higher-dimensional quantum fields on a lattice」, 離散的手法による場の時空とダイナミクス 2023, 2023 年 9 月, 筑波大.
- [53] 大久保毅, 「テンソルネットワークと量子計算」, 場の理論の新しい計算方法 2023, 2023 年 10 月, 大阪大.
- [54] 大久保毅, 「テンソルネットワーク状態による二次元フラストレート 磁性体の解析と有限温度への拡張」, Tensor Network 2023, 2023 年 11 月, 筑波大.
- [55] 藤堂眞治, 「TensorMC: テンソルネットワーク・モンテカルロ法」, Tensor Network 2023, 2023 年 11 月, 筑波大.
- [56] 藤堂眞治, 「逆問題と量子コンピューティング」, 日本薬学会デジタル製剤学 FG 第 1 回シンポジウム (基調講演), 2023 年 12 月, 星薬科大.
- [57] 諏訪秀麿, 「確率の流れを操作するモンテカルロ法」, 物性物理学研究室セミナー, 2024 年 2 月, 三重大.
- [58] 諏訪秀麿, 「モンテカルロ法入門から効率的 MCMC へ」, 計算物理春の学校 2024, 2024 年 3 月, 那覇.
- [59] 藤堂眞治, 「マルコフ連鎖とテンソルネットワーク」, 計算統計物理学の今日と明日, 2024 年 3 月, 東大.
- (セミナー)
- [60] 秋山進一郎, 「Bond-weighting method for the Grassmann tensor renormalization group」, 素粒子論セミナー, 2023 年 6 月, 筑波大.
- [61] 大久保毅, 「テンソルネットワークによる情報圧縮と物理への応用」, セミナーシリーズ「物理学・応用数学の数値計算最前線」, 2023 年 5 月, オンライン.
- [62] 白谷空, 「閉鎖領域中のアクティブ流体モデルが辿る乱流化過程」, Young Soft Webinar, 2023 年 5 月, オンライン.
- [63] Keiichi Tamai, 「Non-Equilibrium Phase Transitions in Artificial Deep Neural Networks」, 知の物理学研究センター定期セミナー (ipi seminar), May 2023, 東大.
- [64] Keiichi Tamai, 「Universal Scaling Laws of Absorbing Phase Transitions in Complex Systems」, 統計力学セミナー, June 2023, 東大.
- [65] 大久保毅, 「テンソルネットワークによる情報圧縮とその展開」, 大阪大学物性理論セミナー, 2023 年 7 月, 大阪大.
- [66] 玉井敬一, 「深層ニューラルネットワークと非平衡臨界現象: ディープラーニングに潜む普遍的な法則の探求」, 第 55 回ディープラーニングと物理学セミナー, 2023 年 11 月, 上智大.
- [67] Synge Todo, 「Tensor network and Markov chain Monte Carlo」, 統計力学セミナー, December 2023, 東大.
- [68] Tsuyoshi Okubo, 「Quantum-classical entangled approach using tensor networks for investigating quantum spin liquid」, 立教大学理論物理学教室コロキウム, 2023 年 12 月, 立教大.
- [69] 藤堂眞治, 「TensorMC: テンソルネットワーク表現に基づくマルコフ連鎖モンテカルロ法」, セミナーシリーズ「物理学・応用数学の数値計算最前線」, 2024 年 3 月, オンライン.

3.4 桂研究室

物性理論・統計力学の基礎的な問題に関する理論的研究を行っている。特に、相関の強い多体系における創発的な物性の解明および予言を目指している。またこれらの系に対して、平均場近似などの従来の手法や、場の理論的手法、数値的対角化などを組み合わせて多角的にアプローチしている。同時に、平衡および非平衡量子多体系や可解模型に関する数理論理学的研究も行っている。

3.4.1 強相関系

SU(N) Hubbard 模型および近藤格子模型における平坦バンド強磁性の一般論

近年、冷却原子系の実験技術の向上により様々な量子系のシミュレーションが可能となっている。冷却原子系を用いることで、従来知られていたモデルのシミュレーションができるだけでなく、これまで物質中には見られなかったような系も実現可能である。そのような系のひとつに、光学格子中の SU(N) 対称性を持つ N 成分フェルミオン系がある。この系は SU(N) Hubbard 模型でよく記述され、これは固体中の強相関電子系を記述する SU(2) Hubbard 模型の一般化とみなせる。冷却原子系を用いた SU(N) 対称なフェルミオン系の実現を契機に、SU(N) Hubbard

模型への理論的な関心も増しており、新奇な相を示すことなどが期待されている。

一方で、 $SU(N)$ Hubbard 模型の解析は一般に困難であり、特に数学的に厳密な結果に注目すると、 $SU(2)$ Hubbard 模型と比較してもそのような結果は少数に限られている。例えば $SU(2)$ Hubbard 模型で知られている厳密な結果の一つに、平坦バンド強磁性が挙げられる。平坦バンドとは巨視的な縮退を持つ一体のエネルギースペクトル構造のことを指し、平坦バンド強磁性とはこの巨視的な縮退に由来して、多体系の基底状態が強磁性を示すことである。特に $SU(2)$ の場合、一般的な平坦バンドを持つ Hubbard 模型の強磁性に関する一般論が確立されており、強磁性を示すための必要十分条件が得られていた。しかしこれに対応する $SU(N)$ Hubbard 模型における平坦バンド強磁性の一般論は確立されていなかった。

田村と桂は、一体のエネルギースペクトルの最低エネルギーに縮退がある $SU(N)$ Hubbard 模型を考え、平坦バンド強磁性の一般論を確立した。その結果、一体の最低エネルギー状態への射影行列がある種の既約性を満たすことが、 $SU(N)$ 強磁性の発現の必要十分条件であることが証明された。さらにこの結果が、 $SU(N)$ 強磁性近藤格子模型にも適用可能であることを見出した。具体的には一体のエネルギースペクトルに縮退があるような $SU(N)$ 近藤格子模型を考える。この時、上述の射影行列の既約性が満たされ、かつ一体の最低エネルギー固有状態全体が考えている格子を覆える場合に $SU(N)$ 強磁性が現れることが厳密に証明された。これらの結果は原著論文 [2] にまとめられた。

$SU(N)$ Hubbard 模型における resonating-flavor-singlet 状態

Hubbard 模型における厳密な結果として、長岡の定理が古くから知られている。この定理の帰結である長岡強磁性とは、オンサイト斥力が無限大の系にひとつホールを導入した場合に、基底状態が強磁性になることを指す。通常のホッピングの符号が正の Hubbard 模型に対しては、この定理は格子が二部グラフでない場合には適用できない。しかしこのような二部グラフでない格子上的 Hubbard 模型に対しても、ある種のクラスの格子については厳密な結果を得ることができる。 $SU(2)$ Hubbard 模型については、例えばデルタ鎖や伏見カクタスと呼ばれる格子上の基底状態がスピナー重項であり、resonating-valence-bond (RVB) 状態であることを示すことができる [K.-S. Kim, Phys. Rev. B **107**, L140401 (2023)]。

Kim (Stanford 大) と桂は、この結果を $SU(N)$ Hubbard 模型に拡張した。具体的には、connectivity condition と呼ばれる条件を満たす N サイトの部分グラフからなるツリー状のグラフを考えた場合、基底状態が $SU(N)$ 一重項であり、 $SU(2)$ の場合の RVB 状態の自然な拡張 (resonating flavor singlet 状態) であることを、Perron-Frobenius の定理などを用いて明らかにした。また、この結果は $SU(N)$ t - J 模型やそ

の拡張に対しても、同様に成立することを明らかにした。これらの結果は、国際学会 [35] で発表されたほか、原著論文 [8] にまとめられた。

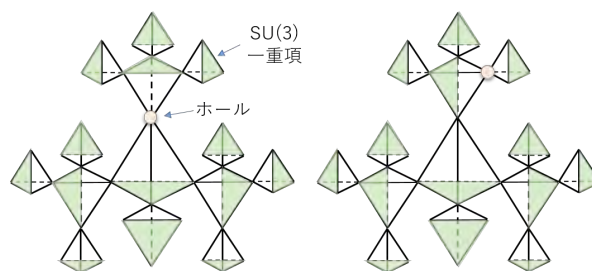


図 3.4.10: 伏見カクタス上のホールと $SU(3)$ 一重項の配置の例

3.4.2 トポロジカル磁性

空間反転対称な遍歴磁性体におけるスカラスピンカイラリティの光制御

磁気スキルミオンをはじめとする非共面的・非共線的なスピントクスチャとその創発磁場がもたらす新奇物性が広く関心を集めている。そのような磁気構造はスカラスピンカイラリティ等で特徴付けられ、空間反転対称性のない系で存在する Dzyaloshinskii-守谷相互作用等の反対称相互作用によって安定化されることが知られている。また、空間反転対称性を持つ磁性体においても、幾何学的フラストレーションやフェルミ面の不安定性に起因してスキルミオン結晶相やスカラスピンカイラル相が現れることが示されている。近年、これらのスピントクスチャの光制御の可能性についても盛んに議論されており、レーザー光の加熱効果を利用したスキルミオン生成等が提案・報告されている。しかしながら、これらの多くは反対称相互作用の存在が本質的であり、空間反転対称性を持つ系におけるスピントクスチャの光制御に関する研究はほとんどなされていない。

赤城と小野 (東北大) は、空間反転対称性を持つ三角格子上的強磁性近藤格子模型において、テラヘルツ電場の印加によって誘起される実時間ダイナミクスの数値解析を行った。ここで、ハミルトニアンは伝導電子のホッピング項ならびに伝導電子と古典局在スピンの間の強磁性交換相互作用項のみからなり、外部電場は伝導電子系のパイエルス位相として取り入れられる。結果として、強磁性金属相の基底状態を初期状態として直流電場を印加した場合は、およそ数百フェムト秒に相当する時間スケールで強磁性秩序が融解し、その後数ピコ秒でスカラスピンカイラル状態 [図 3.4.11 参照] や 120 度ネール状態が現れることが見出された。また、この非平衡スカラーカイラル状態においては、カイラリティの符号が円偏光の左右によって制御できることも明らかになった。これらの非平衡状態における磁気構造は、電場

により駆動された電子の非平衡分布によって安定化され、反対称相互作用を必要としない。このことは、空間反転対称な遍歴磁性体がスピントクスチャの高速光制御の有望な舞台となる可能性を示唆している。これらの成果は論文 [3] にまとめられた。

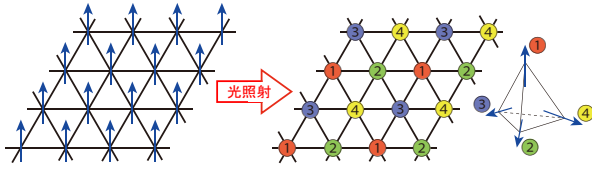


図 3.4.11: 強磁性金属相への光照射で誘起されるスカラーสปินカイラル状態

量子ダイマー磁性体における電場誘起のトリプルの熱ホール効果

近年、磁性体における熱ホール効果がマグノンなどの素励起の性質の探索、特にバンド構造のトポロジの検出に有用であることから注目集めている。量子ダイマー磁性体においても、トリブロン励起由来の熱ホール効果の理論提案が主に $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ という物質に対して行われてきた。しかし、トリブロン熱ホール効果はいまだに観測されていない。

そこで、江崎・赤城・桂は新たな候補物質としてトリブロンの Bose 凝縮や電気磁気効果の観点から注目されてきた量子ダイマー磁性体 XCuCl_3 ($X = \text{Ti, K}$) の Bose 凝縮相を対象に、トリブロン熱ホール効果の可能性を探索した。その結果、電場が 0 の時には対称性から熱ホール効果が生じないが、電場がその対称性を破ることで、観測可能な大きさの熱ホール効果を誘起できることを見出した。また、電場の向きや大きさを変化させることで、熱ホール流の向きや大きさを制御することも見出した。これらの成果は、国際学会 [22, 27, 29, 30, 33] および国内学会 [60] で発表されたほか、プレプリント [9] にまとめられた。また、江崎は、これらの結果を修士論文としてまとめた [10]。

3.4.3 散逸のある量子多体系

開放量子多体系における定常状態の一貫性

開放量子系とは、外部の環境と相互作用する系である。外部との相互作用は系に散逸を引き起こし、十分時間が経つと、系は定常状態に落ち着く。定常状態の性質は、開放量子系における最も基本的な性質のひとつである。中でも、定常状態の縮退度は様々な先行研究によって調べられており、例えば系の対称性によって定常状態に縮退が出ることが知られている。一方で、定常状態が一貫であるための条件には未解明な点が残っている。

そこで吉田は、定常状態が一貫であるための十分条件と、その証明を与えた。この十分条件は先行研究と比較し、定常状態に対する事前の知識を必要としないことや、証明は先行研究と比べて簡単であり、初等的な線形代数の知識で理解できるといった利点がある。また、この十分条件の有用性を示すために、散逸のある横磁場 Ising 模型や XYZ 模型、tight-binding 模型といった量子多体系の典型的な例に対する応用も示した。これらの結果は国際学会 [13, 26, 28] および国内学会 [44, 46, 58] で発表されたほか、原著論文 [7] にまとめられた。

非エルミートなフェルミオン 2 次形式のジョルダン分解

非エルミートなフェルミオン 2 次形式は、散逸のある自由フェルミオン系のダイナミクスを記述する際に自然に現れるもので、一見単純に見えるが、その非エルミート性に由来して高次の例外点など非自明な構造を持ちうる。このような非エルミートなフェルミオン 2 次形式が、どのようなジョルダンブロックに分かれるかということに関して、Prosen による予想 [T. Prosen, J. Stat. Mech. **2010** P07020 (2010)] があったが、この予想の厳密な証明はなかった。

北浜と吉田、桂は、豊田 (Texas A & M 大学) と、この Prosen の予想を証明した。証明の鍵となるのは、非エルミートなフェルミオン 2 次形式のべき零部分が sl_2 リー代数の生成子のひとつとみなせる点である。このリー代数を閉じる残りの二つの演算子を明示的に構成することで、固有空間の次元、すなわちジョルダンブロックの数を sl_2 代数の既約表現の次元に関連づけることができる。より一般的に、組合せ論における既知の結果を適用することで、広義固有空間の次元を q -二項係数の係数を用いて明示的に得ることができる。これらの結果は散逸系に限らず、非エルミートなフェルミオン 2 次形式一般に広く適用可能である。例えば、(ランダムポテンシャルのない) 片方向 Hatano-Nelson 模型の多体のハミルトニアンジョルダン分解にも直接適用できる。これらの成果は、国際学会 [15, 19, 24, 25, 31, 43] および国内学会 [47, 64] で発表されたほか、論文 [5] にまとめられた。

3.4.4 数理物理学・統計力学

多体相互作用を持つスピン鎖における量子多体傷跡状態

孤立量子多体系における熱化 (もしくは平衡化) の問題は、ミクロな量子力学とマクロな統計力学を繋ぐ非常に重要な問題として、長年精力的に調べられている。可積分系や多体局在系、ヒルベルト空間の断片化といった特別な構造を持たない通常の量子多体系の熱化過程は、全てのエネルギー状態が熱的状态であるという仮説 (固有状態熱化仮説) をもとに

説明されていた。ところが、そのような特別な構造を持たない量子多体系であっても、量子多体傷跡状態 (Quantum Many-Body Scars; QMBS) と呼ばれる非熱的状态を持つ系が存在することが実験的・理論的に示され、現在活発に研究されている。

真田と桂は Yuan Miao (IPMU) とともに、QMBS を持つ系を系統的に構成する方法を二つ提案した。ひとつは可積分境界状態とよばれる可積分系の奇数次の保存量の固有状態を利用する方法であり、もうひとつは制限スペクトル生成代数のような既存の方法の拡張に基づく方法である。最初の方法により、フラストレーションフリー系の典型例である Majumdar-Ghosh 模型や Affleck-Kennedy-Lieb-Tasaki 模型の基底状態が QMBS として現れる模型を構成することができた。これらの模型のハミルトニアンは、三体相互作用のひとつであるスカラースピンカイラリティを含む。またより高次の相互作用を含む模型を無限に構成できることを明らかにした。第二の方法では、1 次元と 2 次元の両方でスカラースピンカイラリティを含むスピン 1 模型の大きなクラスを構築することができた。さらに、この方法で構成した模型の中には複数個の QMBS を持つものがあり、それらの QMBS を初期状態とするダイナミクスは熱平衡状態に緩和せず、周期的に振動する振る舞いを示すことを明らかにした。これらの結果は、国際学会 [17, 32, 39] および国内の学会・研究会 [48, 54, 65] で発表されたほか、原著論文 [4] にまとめられた。

<受賞>

- [1] Hironobu Yoshida: Uniqueness of the steady state in various GKSL equations, Best Poster Award, PHYSICS OF OPEN SYSTEMS AND BEYOND, Satellite Meeting of STATPHYS28

<報文>

(原著論文)

- [2] Kensuke Tamura and Hosho Katsura: Flat-band ferromagnetism in the $SU(N)$ Hubbard and Kondo lattice models, *J. Phys. A* **56**, 395202 (2023).
- [3] Atsushi Ono and Yutaka Akagi: Photocontrol of spin scalar chirality in centrosymmetric itinerant magnets, *Phys. Rev. B* **108**, L100407 (2023).
- [4] Kazuyuki Sanada, Yuan Miao, and Hosho Katsura: Quantum many-body scars in spin models with multibody interactions, *Phys. Rev. B* **108**, 155102 (2023).
- [5] Shunta Kitahama, Hironobu Yoshida, Ryo Toyota, and Hosho Katsura: Jordan Decomposition of Non-Hermitian Fermionic Quadratic Forms, *J. Stat. Mech.* **2024**, 013101 (2024).
- [6] Md. Maruf Hossain, Nanse Esaki, and Hirofumi Sakai: All-optical three-dimensional orientation of asymmetric-top molecules with combined linearly and elliptically polarized two-color laser fields, *Phys. Rev. A* **108**, 063109 (2023).

- [7] Hironobu Yoshida: Uniqueness of steady states of Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad equations: a simple proof, *Phys. Rev. A* **109**, 022218 (2024).
- [8] Kyung-Su Kim and Hosho Katsura, Exact hole-induced $SU(N)$ flavor singlets in certain $U = \infty$ $SU(N)$ Hubbard models, *Phys. Rev. Research* **6**, 013307 (2024).
- [9] Nanse Esaki, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura: Electric field induced thermal Hall effect of triplons in the quantum dimer magnets $XCuCl_3$ ($X = \text{Ti, K}$), Preprint (2023). arXiv:2309.12812

(学位論文)

- [10] 江崎蘭世: Theoretical Studies of the Electric Field Induced Thermal Hall Effect in Quantum Dimer Magnets (修士論文).
- [11] 野下隼: 複数の欠陥がある自由フェルミオン鎖でのエンタングルメントエントロピー (修士論文).
- [12] 真田兼行: Construction of Quantum Many-Body Scars in Spin Models with Multibody Interactions (博士論文).

(著書)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [13] Hironobu Yoshida: The uniqueness of the steady-state solution of the Lindblad equation, *Open-QMBP2023: New perspectives in the out-of-equilibrium dynamics of open many-body quantum systems*, Paris, France, June 2023.
- [14] Hironobu Yoshida: Exact analysis of the Liouvillian gap for the $SU(N)$ Fermi-Hubbard model with two-body loss, *OpenQMBP2023: New perspectives in the out-of-equilibrium dynamics of open many-body quantum systems*, Paris, France, June 2023.
- [15] Shunta Kitahama: Jordan Decomposition of Non-Hermitian Fermionic Quadratic Forms, *Open-QMBP2023: New perspectives in the out-of-equilibrium dynamics of open many-body quantum systems*, Paris, France, June 2023.
- [16] Hosho Katsura (Dirk Schuricht): Constructing frustration-free models via Witten's conjugation, *StatPhys28*, Tokyo, Aug. 2023.
- [17] Kazuyuki Sanada (Yuan Miao, Hosho Katsura): Quantum many-body scars in spin models with multi-body interactions, *StatPhys28*, Tokyo, Aug. 2023.
- [18] Hironobu Yoshida (Hosho Katsura): Liouvillian gap and single spin-flip dynamics in the dissipative Fermi-Hubbard model, *StatPhys28*, Tokyo, Aug. 2023.

- [19] Shunta Kitahama (Ryo Toyota, Hironobu Yoshida, Hosho Katsura): General theory of non-Hermitian quadratic Majorana Hamiltonians, *StatPhys28*, Tokyo, Aug. 2023.
- [20] Shoichi Tsubota (Hong Yang, Yutaka Akagi, Hosho Katsura): Symmetry-protected quantization of complex Berry Phases in non-Hermitian many-body systems, *StatPhys28*, Tokyo, Aug. 2023.
- [21] Yutaka Akagi: Topological magnetism in quantum spin-nematics, *International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023 (QLC2023)*, Hokkaido, Aug. 2023.
- [22] Nanse Esaki (Yutaka Akagi, Hosho Katsura): Electric field controllable thermal Hall effect of triplons in the quantum dimer magnets $XCuCl_3$ ($X = \text{Ti, K}$), *International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023 (QLC2023)*, Hokkaido, Aug. 2023.
- [23] Yuki Amari (Yutaka Akagi, Sven Bjarke Gudnason, Muneto Nitta, Yakov Shnir): Realization of spin nematic Skyrmion crystals in cold atom systems, *International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023 (QLC2023)*, Hokkaido, Aug. 2023.
- [24] Shunta Kitahama: Generalized eigenstates of non-Hermitian quadratic Majorana Hamiltonians, *Non-Hermitian Topology: from Classical Optics to Quantum Matter*, Dresden, Germany, Aug. 2023.
- [25] Shunta Kitahama: General theory of non-Hermitian quadratic Majorana Hamiltonians, *STATPHYS28 Satellite Meeting: Physics of Open Systems and Beyond*, Hokkaido, Aug. 2023.
- [26] Hironobu Yoshida: Uniqueness of the steady state in various GKSL equations, *STATPHYS28 Satellite Meeting: Physics of Open Systems and Beyond*, Hokkaido, Aug. 2023.
- [27] Nanse Esaki (Yutaka Akagi, Hosho Katsura): Electric field controllable thermal Hall effect of triplons in quantum dimer magnets $XCuCl_3$ ($X = \text{Ti, K}$), *The 14th APCTP Workshop on Multiferroics*, Tokyo, Oct. 2023.
- [28] Hironobu Yoshida: Uniqueness of the non-equilibrium steady state in open quantum many-body systems, *International Symposium on Quantum Electronics*, Tokyo, Feb. 2024.
- [29] Nanse Esaki (Yutaka Akagi, Hosho Katsura): Theoretical studies of the electric field induced thermal Hall effect in the quantum dimer magnets $XCuCl_3$ ($X = \text{Ti, K}$), *International Symposium on Quantum Electronics*, Tokyo, Feb. 2024.
- [30] Nanse Esaki (Yutaka Akagi, Hosho Katsura): Theoretical studies of the electric field induced thermal Hall effect in the quantum dimer magnets $XCuCl_3$ ($X = \text{Ti, K}$), *CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials 2024*, Tokyo, Feb. 2024.
- [31] Shunta Kitahama: Jordan Decomposition of Non-Hermitian Fermionic Quadratic Forms, *Quantum Simulators*, Paris, France, Feb. 2024.
- [32] Kazuyuki Sanada (Yuan Miao, Hosho Katsura): Quantum Many-Body Scars Constructed from Integrable Boundary States, *APS March Meeting 2024*, Minneapolis, USA, Mar. 2024.
- [33] Nanse Esaki (Yutaka Akagi, Hosho Katsura): Electric field induced thermal Hall effect of triplons in the quantum dimer magnets $XCuCl_3$ ($X = \text{Ti, K}$), *APS March Meeting 2024*, Minneapolis, USA, Mar. 2024.
- [34] Masaya Kunimi (Takafumi Tomita, Hosho Katsura, Yusuke Kato): Proposal for realizing quantum spin models with Dzyaloshinskii-Moriya interaction using Rydberg atoms, *APS March Meeting 2024*, Minneapolis, USA, Mar. 2024.
- [35] Kyung-Su Kim (Hosho Katsura): Exact hole-induced resonating-valence-bonds in certain infinite U Hubbard models, *APS March Meeting 2024*, Minneapolis, USA, Mar. 2024.
- [36] Jong-Yeon Lee (Haruki Watanabe, Hosho Katsura): Spontaneous breaking of $U(1)$ symmetry at zero temperature in one dimension, *APS March Meeting 2024*, Minneapolis, USA, Mar. 2024.
- [37] Nic Shannon (Leilee Chojnacki, Rico Pohle, Han Yan, Yutaka Akagi): Gravitational wave analogues in spin nematics and cold atoms, *APS March Meeting 2024*, Minneapolis, USA, Mar. 2024.
- [38] Hosho Katsura (Soshun Ozaki): Disorder-free Sachdev-Ye-Kitaev models, *Exactly Solved Models and Quantum Computing*, Leiden, Netherlands, Mar. 2024.

招待講演

- [39] Hosho Katsura: Algebraic construction of quantum many-body scars, *Periodically and quasi-periodically driven complex systems*, Bangalore, India, June 2023.
- [40] Yutaka Akagi: Topological textures and CP^2 Skyrmion crystals in quantum spin-nematics, *The 13th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics [META 2023]*, Paris, France, July 2023.
- [41] Hosho Katsura: Integrable dissipative spin chains and ladders, *Workshop on exactly solvable models of open quantum systems*, Moscow, Russia (and online), Sept. 2023.
- [42] Hosho Katsura: Integrable SYK models, *ExU-YITP Workshop on Condensed Matter Physics and Quantum Information*, Kyoto, Japan, Sept. 2023.
- [43] Hosho Katsura: Jordan blocks of non-Hermitian quadratic Hamiltonians, *Random Operators and Related Topics*, Sendai, Japan, Oct. 2023.

(国内会議)

一般講演

- [44] 吉田博信: Lindblad 方程式における定常状態の一意性, アトムの会, 2023 年 8 月, 名古屋.
- [45] 赤城裕: SU(3) 近藤格子模型における CP^2 triple-Q state, 日本物理学会第 78 回年次大会, 2023 年 9 月, 東北大学.
- [46] 吉田博信: 様々な Lindblad 方程式における定常解の一意性, 日本物理学会第 78 回年次大会, 2023 年 9 月, 東北大学.
- [47] 北濱駿太, 桂法称, 吉田博信, 豊田遼: 非エルミート自由フェルミオン系の例外点の構造, 日本物理学会第 78 回年次大会, 2023 年 9 月, 東北大学.
- [48] 真田兼行, 桂法称: 多体相互作用を持つスピン模型における量子多体傷跡状態, 日本物理学会第 78 回年次大会, 2023 年 9 月, 東北大学.
- [49] 尾崎壮駿, 桂法称: 乱れない Sachdev-Ye-Kitaev 模型のダイナミクス, 日本物理学会第 78 回年次大会, 2023 年 9 月, 東北大学.
- [50] 國見昌哉, 富田, 桂法称, 加藤雄介: Rydberg 原子系で実現する Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を有する量子スピン系での量子多体傷跡状態, 日本物理学会第 78 回年次大会, 2023 年 9 月, 東北大学.
- [51] 羽田野直道, 桂法称, 川畑幸平: ベーテ格子上的非エルミート系における量子輸送, 日本物理学会第 78 回年次大会, 2023 年 9 月, 東北大学.
- [52] Myles Scollon, Masaki Oshikawa, Hosho Katsura: Spin dynamics near the field-induced gap-closing transition in 1D magnets - II, 日本物理学会第 78 回年次大会, 2023 年 9 月, 東北大学.
- [53] 赤城裕: Generalized Skyrmions in spin-1 quantum magnets, ipi 知の物理学研究センター×ダイキン シンポジウム, 2023 年 10 月, 東京大学.
- [54] 真田兼行: 可積分境界状態に紐づいた量子多体傷跡状態, ipi 知の物理学研究センター×ダイキン シンポジウム, 2023 年 10 月, 東京大学.
- [55] 赤城裕: CP^2 triple-Q state in the SU(3) Kondo lattice model, 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会, 2023 年 12 月, 東京大学.
- [56] 甘利悠貴 (赤城裕, Sven Bjarke Gudnason, 新田宗士, Yakov Shnir): Skyrmion crystals with spin-nematic order in SU(3) chiral magnets, 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会, 2023 年 12 月, 東京大学.
- [57] Nic Shannon (Leilee Chojnacki, Rico Pohle, Han Yan, 赤城裕): Gravitational wave analogues in quantum liquid crystals, 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会, 2023 年 12 月, 東京大学.
- [58] 吉田博信: Uniqueness of the non-equilibrium steady state in open quantum many-body systems, *The 2nd young researchers' workshop of the Extreme Universe Collaboration*, 2024 年 2 月 滋賀.
- [59] 小野淳, 奥村駿, 今井渉平, 赤城裕: スピンスカラーカイラル状態における高次高調波発生, 日本物理学会, 2024 年 3 月, オンライン.
- [60] 江崎蘭世, 赤城裕, 桂法称: $XCuCl_3$ ($X = \text{Ti, K}$) の BEC 相におけるトポロジカルトリプルの熱ホール効果の理論, 日本物理学会, 2024 年 3 月, オンライン.
- [61] 尾崎壮駿, 桂法称: 乱れない Sachdev-Ye-Kitaev 模型の有限温度ダイナミクス, 日本物理学会, 2024 年 3 月, オンライン.
- [62] 國見昌哉, 富田隆文, 桂法称, 加藤雄介: Rydberg 原子系で実現する Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を有する量子スピン系での漸近的量子多体傷跡状態, 日本物理学会, 2024 年 3 月, オンライン.
- [63] Myles Scollon, Masaki Oshikawa, Hosho Katsura: Spin Dynamics Near the Field-Induced Gap-Closing Transition in 1D Magnets - III, 日本物理学会, 2024 年 3 月, オンライン.
- [64] 北濱駿太, 吉田博信, 豊田遼, 桂法称: 非エルミート自由フェルミオン系の例外点の構造, 計算物理春の学校, 2024 年 3 月, 沖縄市町村自治会館.

招待講演

- [65] 桂法称: 量子多体傷跡状態と関連する話題, 熱場の量子論とその応用, 2023 年 8 月, 高エネルギー加速器研究機構.

(セミナー)

- [66] Hosho Katsura: Duality, criticality, topology, and integrability in quantum spin-1 chains, 統計力学セミナー, 2023 年 5 月, 東京大学.
- [67] Hironobu Yoshida: Liouvillian gap and single spin-flip dynamics in the dissipative Fermi-Hubbard model, 生産技術研究所・羽田野研セミナー, 2023 年 5 月, 東京大学.
- [68] Hironobu Yoshida: The uniqueness of the steady-state solution of the Lindblad equation, *Quantum seminar*, 2023 年 7 月, LPTMS - Université Paris-Saclay.
- [69] 吉田博信: GKSL マスター方程式における定常解の一意性, 2023 年 11 月, 芝浦工業大学.
- [70] Yutaka Akagi: CP^2 triple-Q state in the SU(3) Kondo lattice model, 2024 年 3 月, Okinawa Institute of Science and Technology
- [71] Hosho Katsura: Frustration-free systems and beyond, *LPTMS seminar*, 2024 年 3 月, LPTMS - Université Paris-Saclay.

3.5 樺島研究室

2023 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、D2:1 名、M2:1 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、2023 年度に得られた主な研究成果の概要を記す。

3.5.1 対角線形ネットワークを用いたスパース推定

対角線形ネットワークは、ニューラルネットワークモデルの一種であり、通常のニューラルネットワークのパラメータをさらに過剰パラメータ化することに対応する。この再パラメータ化の影響は、学習に対して正則化項を付け加えることに相当し、この等価性によって今まで困難であると考えられていた L_p ($0 < p < 1$) 正則化付きの学習が、凸最適化の反復や微分可能な問題として定式化できるようになることが知られている。

我々は、この対角線形ネットワークを L_1 及び $L_{1/2}$ 正則化付きのノイズなし圧縮センシングモデルに対して適用した。従来研究では $L_{1/2}$ 正則化付き最適化問題を効率的に解くためのアルゴリズムは知られていたが、その解析的な性能評価は行われていなかった。我々はまず統計力学的な解析によって $p = 1/2$ の場合の 2 乗誤差の期待値を与え、既存のアルゴリズム、及び対角線形ネットワークがこの理論的な性能限界に対してどこまで迫ることができるかについて検討した。この結果は [20] で報告した。

3.5.2 圧縮センシングに基づくレーダー検出の性能分析

少数の観測データから対象物の有無を検出する技術として圧縮センシングレーダー検出が注目されている。しかしながら、従来理論では、技術的な制約から各要素が独立な乱数からなる単純化された観測行列に関する性能分析に終始していた。我々は、統計力学とランダム行列理論を組み合わせることで、フーリエ行列など実際の観測行列に対し検出に際して誤検出率を制御できる方法を開発し、また、その性能を詳細に分析した。この結果は [1] で報告した。

3.5.3 シミュレーテッドアニーリングを用いた 0/1 行列分解

0/1 行列分解とは、要素が 0 または 1 を取る行列の一部が与えられた際に、その行列を論理 AND と OR で定義される行列積の形に分解する問題である。このような分解はデータを生成する要因を調べる分析手法として需要がある。

一般に行列分解は計算量的に難しい問題であり効率的な近似解法が求められている。行列分解をエネルギー最小化問題として定式化しシミュレーテッドアニーリングによって解探索を行う方法はこうした要求への素朴な回答を与える。しかしながら、論理演算で行列積が定義されている場合には、エネルギーランドスケープに平坦な斜面を持つプラトーが多く存在するため効率的な探索が難しくなる。この困難を緩和するため、我々は最近のアニーリングマシン

で容易に利用できる修正線形タイプのコスト関数を使用して、エネルギーランドスケープに勾配を適用することで解決プロセスを促進する方法を提案した。提案法の有効性はノイズのない人工データと実データに対して数値実験を実施することで確認した。この結果は [3] で報告した。

3.5.4 グループテストの統計力学的解析

グループテストとは、状態 (正常/異常) が不明な要素 (アイテム) の集合に対して、個別に状態を検査するのではなく、アイテムの小集団 (プール) に対してテストを行うことで、テスト回数を減らす方法の総称である。一般に、グループテストにおけるテスト回数はアイテムの数より少なく設計される。そのため、テスト結果からアイテムの状態を推定することは劣決定問題である。しかし異常なアイテムの数が小さいと仮定すると、アイテムの状態を一意に特定できる場合がある。これはスパース性の仮定と対応するため、グループテストにおける状態推定問題は、圧縮センシングや LASSO といった類似の問題と同様に、情報科学的、統計力学的な解析が行われてきた。

グループテストにはさまざまな設定が存在し、主にテストの出力法とプールの作成法により分類される。まず、テストの出力に関する設定について、一般的なグループテストでは、プール内に一つでも異常なアイテムがあれば 1、それ以外の場合は 0 を返すように設計される [2]。一方で定量的グループテストでは、プール内の異常なアイテム数を出力として返すテストを扱う。また、プール作成法については、あらかじめプールを作って固定する非適応的グループテストと、テスト結果に応じて次にテストを行うプールを作成する適応的グループテストに分けられる。本発表では、定量的なテストにおける適応的なデータ取得を考える。

これまでの研究では、 $\{0, 1\}$ を出力するグループテストについて適応的なテスト法を扱ってきた。この方法では、新しくテストを行う候補となるプールの出力についての予測分布を構成し、最もエントロピーの高いテストを実際に行う。2 値出力の場合、予測分布を 1 つのパラメータで表すことができるため、このパラメータに注目して適応的テストを行うことができた。一方で定量的なテストは出力が一般に $\{0, 1, \dots, K\}$ となるため、既存法をそのまま用いることができない。我々は、定量的グループテストに関して統計力学的な解析を行い、適応的データ取得により改善が見込まれるパラメータ領域を吟味し、改善するための具体的な方法を与えた。この結果は [23] で報告した。

3.5.5 バイズ学習による格子タンパク質デザイン

タンパク質の立体構造は膨大な可能性の中でごく一部のものしか現存していない。これはタンパク質

に限らず生物の表現型全体に成り立っている。タンパク質では、例えば、球状タンパク質であれば α ヘリックスというらせん状の構造や β シートという直線状の構造が折り返して平行に向き合っているような部分構造が普遍的に見られる。

我々はこの事実が観測される理由を格子タンパク質模型に対するタンパク質デザイン問題を分析することによって得ようとしている。タンパク質デザインとは立体構造を与えた際に、その構造を実現するアミノ酸配列を設計する問題である。今回は、アミノ酸配列の出現確率を表す事前確率がスピニングラス模型の西森条件を満たしている、という仮定の下で分析を行った。特に、水との相互作用について分析するため、デザインの精度を最大化する水の化学ポテンシャルの付近で自由エネルギーが最小になる立体構造を他の立体構造と比較した。その結果、そうした条件を満たす立体構造は他の立体構造と比較して α ヘリックス様の部分構造が多く含まれることがわかった。この結果は [22] で報告した。

3.5.6 異方拡散パラメータの EM アルゴリズムを用いた推定

流体中の粒子はブラウン運動に支配され、位置自由度ならびに回転自由度に関して拡散する。そのため、粒子の位置及び方向は時間と共にランダムに変化するが、粒子が等方的であればその統計はガウス分布に従う。一方で、生体内の粒子が常に等方的な粒子でモデル化されるとは限らない。特に 2 次元の拡散過程であれば、位置について 2 つの異なる拡散係数を持った異方的な楕円体としてモデル化する方が相応しいと考えられる。このとき、粒子の位置の確率分布は非ガウスのになることが知られている。さらに、一般に異方的な粒子がどの方向を向いているかを測定することは困難であるため、その統計性を考えることは非常に複雑な問題になる。

我々は、粒子の拡散の軌跡のみが観測できる状況で、位置及び角度に関する拡散係数を推定する問題を考察した。位置などの状態変数に観測ノイズが乗ったものを観測する時系列過程は状態空間モデルと呼ばれ、多くの状態空間モデルの推定問題は粒子フィルタという近似手法が用いられる。しかし、今回の拡散モデルでは、向きに関する物理量が隠れ変数になっており観測できないことに起因して、通常の粒子フィルタの手法をそのまま適用することが困難であることがわかった。その上、パラメータ推定には軌跡の統計の「ガウス分布との差異」が重要になる一方で、その違いは実際には非常に小さく、統計性に注目する方法でも、粒子の軌跡が短い場合の推定は特に困難であることが確認された。

我々は、Expectation-Maximization アルゴリズムと粒子フィルタによって実装された確率伝搬法を組み合わせたアルゴリズムを用いることでこの問題を解決し、軌跡が比較的短い場合でも十分に推定できることを示した。この結果は [15] で報告した。

3.5.7 動的モード分解法を用いた量子多体系の実時間発展の長時間予測

量子多体系において物理量の時間発展を予測することは難しい問題である。最も直接的な方法は、時間に依存した Schrödinger 方程式を解いて各時刻での波動関数を求めるやり方である。例えば、厳密対角化では少数系の計算は可能だが、系のサイズに対して指数関数的にメモリが増加するため大規模な系の計算は困難である。テンソルネットワーク法では空間 1 次元系のダイナミクスの計算は可能だが、空間 2 次元以上の系における長時間のダイナミクスの計算は困難である。時間依存変分モンテカルロ法では大規模な系の長時間のダイナミクスの計算も可能になりつつあるが、依然として計算コストが高い。

量子多体系において短時間の物理量の観測結果から長時間の物理量の時間発展を予測することができれば、それは非常に有用である。その際、必ずしも時間発展した波動関数を直接計算する必要はない。近年、機械学習手法を適用して物理量の時間発展を予測する試みが多数報告されている。今回、我々は流体解析の分野で広く使用される動的モード分解法 (dynamic mode decomposition 法、DMD 法) に着目した。DMD 法は、隣接するデータの時間が等間隔な時系列データに対して容易に適用できる手法である。計算コストは、短時間の時系列データから生成される行列を特異値分解するコストで決まり、時間依存した波動関数を直接計算するようなダイナミクスの計算コストよりも大幅に小さい。

本研究では、DMD 法が量子多体系の時間発展の予測にどこまで有効かについて事例研究を通して調べた。とくに、時系列データに多数の振動成分が含まれる場合と、そのデータに臨界的な冪減衰が含まれる場合について検討した。前者は有限系の横磁場 Ising 模型におけるクエンチ後の同時刻スピン相関関数において、後者は無限系の横磁場 Ising 模型における臨界点直上の基底状態の異時刻スピン相関関数において、それぞれ観測される。いずれの場合も、時系列データの入力時間幅の 5 倍から 10 倍程度の時間スケールまでの予測が可能であることがわかった。この結果は [21] で報告した。

3.5.8 自己学習の平均場理論

少数のラベルありデータと、大量のラベルなしデータを組み合わせて学習を行う半教師あり学習の基本的なアルゴリズムである自己学習を考察した。自己学習アルゴリズムとは、手元の学習済みモデルによってラベルなしデータ点のラベルを予測し、その予測を真のラベルであるかのように扱って改めて教師あり学習で学習しなおす手続きを何度も繰り返す手法である。

自己学習を 2 成分混合モデルにおける線形モデルの学習に適用した際の平均場理論を構築し、その性質についての詳細な解析を進めた。その結果、自己学習は学習の繰り返し回数が少ない場合には、若干のノイズを含んだラベルに対してモデルをフィットさせる

という直感的な描像のもとに動作し、信頼度の低いラベルをデータから省く疑似ラベル選択 (Pseudo-label selection, PLS) というヒューリスティクスが非常に有用であることが明らかとなった。これは先行研究において、総繰り返し回数が10回程度の場合にはPLSの導入が重要であるという実験の報告と整合的である。一方、総反復回数が大きい場合には一回一回の更新におけるパラメータの変動量を小さくし、微少な更新を積み重ねる戦略が有効であることが明らかとなった。これは、疑似ラベルの損失が、パラメータ更新時に蓄積されうるノイズを打ち消す正則化のような役割を果たすためである。これまでも自己学習の反復を長時間行うことで、特定の場合にベイズ最適な分類器が得られるという理論的な成果が報告されていたが、本研究はその背後にある描像を明確にしたものとも言える。この結果は [9, 24, 28, 29, 30] で報告した。

3.5.9 アンダーバギング法の平均場理論

機械学習の分類問題において、取得ラベルの割合に大きな偏りが生じている設定で有用なヒューリスティクスの一つであるアンダーバギング法を考察した。アンダーバギング法は、マジョリティクラスの一部をランダムに間引いて、マイノリティクラスとデータ数を釣り合わせたうえで学習した結果を、様々な間引き方の実現値に対して平均するという手法である。高次元モデルの学習において有効であるとされる手法であるが、近年、線形モデルにおいてはバギングと ℓ_2 正則化がほぼ同等な効果を与えるとされており、計算コストの大きなアンダーバギング法と正則化が異なる結果を与えるのか否かが論点であった。

2成分混合ガウスの分類において線形分類器を学習する設定におけるアンダーバギング法の平均場理論を構築し解析した。この結果、データの不均衡度が大きな場合には、データを間引いて正則化を行う (平均化なし) 方法やコスト関数を調整する手法と比べて、アンダーバギング法を用いて構築したモデルのほうが F_2 スコアの意味で汎化性能が高いことが明らかになった。これは、アンダーバギング法を用いたほうが全体として用いる学習データの量が多いためであると考えられる。この結果は [12, 24] で報告した。

3.5.10 非凸損失に対する交互最適化法のダイナミクスの解析

双線形回帰に対して交互最適化法を用いた場合の最適化ダイナミクスを考察した。双線形回帰においては、最適化変数の一部を選んで最適化する手続きを行う場合、各ステップで用いる損失関数は凸となるため、変数の一部を最適化する操作を繰り返す交互最適化法がしばしば用いられている。一方、全変数に対する損失関数は非凸であるため、局所的に凸な最適化を繰り返す手続きによってどのような解が得られるかという点に対する一般的な保証はない。

そこで、交互最適化法に対応する動的汎関数をレプリカ法を用いて解析することによって、その最適化ダイナミクスの動的平均場理論を導出して分析した。その結果、データ数と最適化変数の次元が同じオーダーで発散する熱力学極限においては、ランダム初期条件から有限回数の反復を行ってもデータが持つ信号成分を得ることが出来ないことが明らかとなった。一方で、初期条件において、データの持つ信号成分と非ゼロの相関をもつ場合には、その相関の強さによって有限回数の反復による信号の復元が可能・不可能となる境目があることが示唆される結果を得た。この結果は [25] で報告した。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Siqi Na, Tianyao Huang, Yimin Liu, Takashi Takahashi, Yoshiyuki Kabashima, Xiqin Wang, IEEE Transactions on Signal Processing **71**, pp. 2668 - 2682 (2023)
- [2] Ayaka Sakata, Yoshiyuki Kabashima, IEEE Transactions on Information Theory **69**, pp. 5902 - 5920 (2023)
- [3] Makiko Konoshima, Hirotaka Tamura, Yoshiyuki Kabashima, Journal of The Physical Society of Japan **93**, 044002-(1-7) (2024)

(会議抄録)

- [4] Koki Okajima, Xiangming Meng, Takashi Takahashi, Yoshiyuki Kabashima, Proceedings of The 26th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (PMLR**206**), pp. 11317-11330 (2023)
- [5] Xiangming Meng, Tomoyuki Obuchi, Yoshiyuki Kabashima, Proceedings of The 26th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (PMLR**206**), pp. 6783-6805 (2023)

(著書)

- [6] Yoshiyuki Kabashima and Toshiyuki Tanaka, "Spin Glass Theory & Far Beyond -40 years of Replica Symmetry Breaking- (pp. 405-422), Chapter 21. Information and Communication", Patrick harbonneau, Enzo Marinari, Marc Mézard, Giorgio Parisi, Federico Ricci-Tersenghi, Gabriele Sicro, Francesco Zamponi eds., World Scientific, June (2023)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [7] Koki Okajima, Xiangming Meng, Takashi Takahashi, Yoshiyuki Kabashima, "Average case analysis of Lasso regression under ultra-sparse conditions", STAPHYS28, August 7-11, 2023, The University of Tokyo, Tokyo, ポスター発表

- [8] Tomoei Takahashi, George Chikenji, and Kei Tokita, “Statistical mechanics of protein design”, STAPHYS28, August 7-11, 2023, The University of Tokyo, Tokyo, 口頭発表
- [9] Takashi Takahashi, “A Statistical Mechanics Analysis of Iterative Self-Training”, STAPHYS28, August 8, 2023, The University of Tokyo, Tokyo
- [10] Xiangming Meng, Yoshiyuki Kabashima, “QCS-SGM+: Improved Quantized Compressed Sensing with Score- Based Generative Models”, AAAI-24, February 22-25, Vancouver Convention Center - West, Vancouver, Canada, ポスター発表

招待講演

- [11] Y. Kabashima, “Compressed sensing based on diffusion models”, Workshop on Learning and Inference from Structured Data: Universality, Correlations and Beyond — (smr 3850, July 3-7. 2023, ICTP, Trieste, Italy.
- [12] Takashi Takahashi, “Exploring bagging with structured data: Insights from precise asymptotics”, Workshop on Learning and Inference from Structured Data: Universality, Correlations and Beyond — (smr 3850), July 3rd, 2023, ICTP, Trieste, Italy
- [13] Y. Kabashima, “Replica analysis of Lasso for ultra-sparse signals”, East Asia Joint Seminar on Statistical Physics, October 11-13, 2023, パシフィコ横浜, 横浜市

(国内会議)

一般講演

- [14] 樺島祥介, “拡散モデルに基づく圧縮センシング”, 第1回 学術変革領域「学習物理」物性関係討論会, 上智大学, 7月26日 (2023)
- [15] 高波海斗, 谷口大相, 岡田康志, 樺島祥介, “EM アルゴリズムを用いた異方拡散のパラメータ推定”, 日本物理学会第78回年次大会, 東北大学, 9月17日 (2023)
- [16] 高橋智栄, 千見寺浄慈, 時田恵一郎, 樺島祥介, “ベイズ学習による格子タンパク質デザインにおける水の化学ポテンシャルの推定”, 日本物理学会第78回年次大会, 東北大学, 9月17日 (2023)
- [17] 高橋昂, “高次元モデルにおける不均衡データ分類”, 日本物理学会第78回年次大会 東北大学 2023年9月16日 (2023)
- [18] 岡島 光希, Xiangming Meng, 高橋 昂, 樺島 祥介, “極スパース状況下における Lasso の平均場解析”, 第46回情報理論とその応用シンポジウム, 湯田温泉かめ福オンプレイス, 山口市, 12月1日 (2023)
- [19] 樺島祥介, “ホップフィールドモデルの想起過程に関する動的平均場解析”, 第2回 学術変革領域「学習物理」物性関係討論会, 上智大学, 1月5日 (2024)
- [20] 高波海斗, 樺島祥介, “対角線形ネットワークを用いた LASSO の解法アルゴリズム”, 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン, 3月18日 (2024)

- [21] 金子隆威, 樺島祥介, 大槻東巳, 今田正俊, “動的モード分解法を用いた量子多体系の実時間発展の長時間予測”, 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン, 3月19日 (2024)
- [22] 高橋智栄, 千見寺浄慈, 時田恵一郎, 樺島祥介, “経験ベイズ法を用いたタンパク質のアミノ酸残基間相関関数の解析”, 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン, 3月19日 (2024)
- [23] 坂田綾香, 樺島祥介, “定量的グループテストにおける適応的データ取得”, 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン, 3月21日 (2024)
- [24] 高橋昂, “疑似ラベルの構成法について”, 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン 2024 年3月21日 (2024)
- [25] 岡島光希, 高橋昂, “交互最適化法のダイナミクスについて”, 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン 2024 年3月21日 (2024)

招待講演

- [26] 樺島祥介, “拡散モデルに基づく圧縮センシング”, 第52回情報計測オンラインセミナー, オンライン, 2月24 (2024)
- [27] 樺島祥介, “大自由度システムの統計学としての統計力学”, 2024 年第71回応用物理学会春季学術講演会, 東京都市大学, 3月23日 (2024)

(セミナー)

- [28] 高橋昂, “レプリカ法による線形モデルの精密評価”, 応用統計ワークショップ, 東京大学, 2023 年4月7日 (2023)
- [29] 高橋昂, “疑似ラベルを用いた学習のレプリカ解析”, 第57回統計的機械学習セミナー, 東京大学, 2023 年8月28日 (2023)
- [30] 高橋昂, “疑似ラベルを用いた自己学習の平均場解析”, 滋賀大学データサイエンスセミナー, 滋賀大学 2024 年1月22日 (2024)

3.6 辻研究室

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

2023 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、修士課程の Huanyu Zhang 氏、牛原啓氏、西村俊祐氏、永島来悟氏、中本大河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などの研究テーマに取り組んだ。なお、高橋

氏、開田氏の研究成果については小形研究室の欄に記載されている。

当研究室は11月に本郷キャンパスにおいて国内研究会「非平衡固体物性の最前線」を主催し、固体の非平衡物性を最前線で研究する国内の若手研究者を集め、実験・理論の枠を超えて議論を行った。

3.6.1 超伝導体のダイナミクス

超伝導体のヒッグスモードと非線形応答

超伝導体には、超伝導秩序パラメーターの振幅(すなわち超流動密度)が集団的に振動する集団励起モードが存在し、素粒子のヒッグス粒子との類似から近年ではヒッグスモードと呼ばれている。ヒッグスモードは電氣的・磁氣的に中性のため光と線形で結合せず、近年まで電荷密度波と超伝導が共存する系を除いて観測するのが困難であった。ところが非線形応答まで考えるとヒッグスモードと光を直接相互作用させることができる。この非線形結合を使うと、超伝導体に照射した光の周波数の2倍が超伝導ギャップエネルギーに一致するときにヒッグスモードと光が共鳴し、それに伴って巨大な三次高調波が発生する。実際に高強度のテラヘルツ波を用いた実験により三次高調波の共鳴が観測され、ヒッグスモード由来の応答と整合する結果が得られている。辻はこれら超伝導体のヒッグスモードを含む、物性物理における集団励起モードの研究の最近の発展を総説にまとめ[1](段下氏(近畿大)、土屋氏(中央大)と共著)、セミナー[43]や招待講演[44]を行った。

マルチバンド超伝導体のレゲットモードとリフシツツ不変量

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、近年の理論研究により特定の理論模型には線形応答領域にレゲットモードが現れることが指摘された(図3.6.12参照)。永島、辻はTian氏、Manske氏(Max Planck研)、およびHaenel氏(British Columbia大(当時))との共同研究で、レゲットモードが光に対して線形に応答するのは熱力学的な自由エネルギーにリフシツツ不変量と呼ばれる対称操作によって変わらない不変量が存在するときであることを見出した。また、この項が現れうるのはどのような時かを群論を利用してすべての結晶構造とクーパー対に対して調べ上げ、その分類理論をカゴメ超伝導体に対して適用した。これらの結果を原著論文にまとめ[5]、プレスリリースを出し[67]、複数の研究会等で発表した[11, 34, 45, 39, 55, 61, 63]。

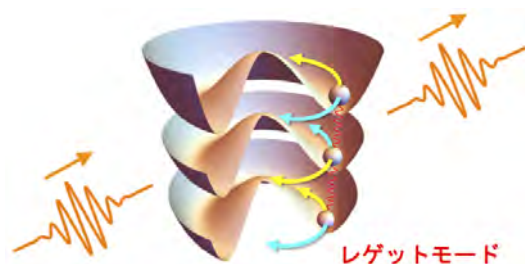


図 3.6.12: マルチバンド超伝導体のレゲットモードを媒介した光応答の概念図。各バンドの自由エネルギー面上を球で示した秩序変数が互い違いの方向に円周に沿って運動し、入射光の振幅に比例した振幅の光が放出される。

超伝導体のフロッケ状態

時間的に周期的な外場によって駆動された量子多体系では、外場の衣をまとったフロッケ状態と呼ばれる非平衡定常状態が現れる。フロッケ状態においては準粒子の質量やエネルギーギャップ、寿命などが外場の効果によって変化し、平衡状態には見られなかった物理的性質を示すことがある。Zhang、高三、辻は、BCS理論をフロッケ・ケルディッシュ形式に拡張することで、時間的に周期的な電場によって駆動された超伝導体のフロッケ状態を理論的に解析した。散逸の効果を取り込むために自由フェルミオン熱浴と結合したBCS模型を考え、平均場近似の範囲で超伝導相を扱った。その結果、電場の周波数が大きい場合は動的局在効果によって引力相互作用が増強し、電場駆動によって常伝導相から超伝導相に転移する場合があることがわかった。電場の周波数を小さくしていくと、フェルミエネルギー付近の電子分布が平衡状態のものから大きくはずれて有効温度が上昇し、超伝導秩序が抑制される。さらに周波数を超伝導ギャップ以下に小さくしていくと、熱励起によって生じた電子が周期電場駆動によってフェルミエネルギー付近から取り除かれ、Eliashberg効果に類似して超伝導秩序が増強される場合があることを見出した。これらの結果について研究会等で発表し[28, 36, 57]、Zhangは修士論文にまとめた[8]。また、辻はフロッケ状態についての最近の発展を総説にまとめた[2]。

多層超伝導体における集団励起モード

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。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研究会等で発表した [40, 41]。

3.6.2 量子開放系のダイナミクス

近年、人工量子系などにおいて散逸を制御したり設計する技術が発展してきたことにより、量子開放系は非平衡量子多体系の物理を展開する新しいクラスとして注目されている。

量子マスター方程式によるエネルギー流の解析

量子開放系のダイナミクスはマルコフ型の量子マスター方程式 (GKSL 方程式) によって記述されることが多いが、その際に用いる近似が量子多体系では正当化されない場合があったり、エネルギー流 (熱流) を正しく記述しない場合があることが知られている。牛原、高三、辻は量子多体系に適用可能な局所 GKSL 方程式を用いて、異なる温度の熱浴に結合した 1 次元ハバード模型のエネルギー流を解析した。Redfield 方程式の結果と比較することで、電子間相互作用が強い時、または熱浴が高温の場合に局所 GKSL 方程式によって精度よく記述されることがわかった。二つの熱浴の温度差を大きくしていった時に、エネルギー流や粒子流が非線形な応答を示すことも明らかにした。特に、粒子流の符号が非線形応答領域において反転する振る舞いを見出し、その物理的解釈を与えた。これらの結果を研究会等で発表し [26, 27, 29, 33, 38, 52, 65]、牛原は修士論文にまとめた [9]。また、局所 GKSL 方程式を 2 体ロスを持つ Hubbard 模型に適用した場合の結果も得ている [30]。

量子多体系におけるフィードバック制御

多体系の量子状態を制御する方法として、観測してその結果に応じてユニタリー操作をすることを繰り返す量子フィードバック制御がある。量子系に特有の性質として観測による反作用が必ずあり、その効果を使うことで観測誘起相転移を引き起こすことができる。観測に加えてフィードバック制御をすることによりさらに新しい量子状態を安定化させることができると期待される。西村、高三、辻は $U(1)$ 対称性を持ったランダムユニタリー量子回路に $U(1)$ 電荷を輸送するフィードバック制御をかけた時の時間発展の数値シミュレーションを行った。開放境界条件の場合は電荷が片方の端に蓄積して定常的な状態に落ち着くのに対し、周期境界条件の場合は Resta の公式に従って得られた分極の値が増加していくのに伴って分極の揺らぎも増大する。分極の揺らぎが増大する速さは測定・フィードバックの確率に対し

て非単調に依存する。これらの結果を研究会等で発表し [31, 35, 56]、西村は修士論文にまとめた [10]。

量子アクティブマター

鳥や魚などの「自ら動く要素の集団」はアクティブマターと呼ばれ、近年、統計物理学や生物物理学において盛んに研究されている。これまでの研究は、古典系が中心であったが、高三は、足立氏 (理研)・川口氏 (東大) と共に、アクティブマター物理を量子多体系に拡張する研究を推進している。その非平衡性に起因して、平衡では生じない相転移やパターン形成を示すアクティブマターを量子系に拡張することは、新しい非平衡量子現象の発見につながることを期待される。最近の論文 [7] 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 (フロッピング転移) の量子対応物と考えられる。本研究では、数値シミュレーションのみならず、解析的なアプローチも組み合わせることで、強磁性のメカニズムも明らかにすることができた。高三は、本研究に関する論文 [7] を出版した他、国際会議や研究会等で発表を行った [13, 15, 20, 18, 19, 21, 22, 23, 46, 53, 54, 60, 64]。

不純物をドープしたスピン鎖におけるスピン流

量子多体系における輸送は非平衡状態の中でも基本的な現象の一つであり、系の熱化や可積分性に関係する。量子開放系において可積分性が果たす役割を明らかにするために、辻は松井氏 (数理解科学研究科) と共同で、不純物をドープしたスピン鎖の両端でスピンの注入・放出が起こる系において発生するスピン流を解析した。バルク部分の可積分性が保たれている場合にはスピン流は不純物の影響を受けないにも関わらず、不純物の近傍に電流によって誘起された局所磁化が現れることがわかった。一方で可積分性が破れると、不純物をドープすることでスピン流や局所磁化は抑制される。これらの結果を原著論文にまとめ [6]、研究会で発表した [17]。

量子電磁場と超強結合したモット絶縁体

共振器に光子を閉じ込めて光子と物質の相互作用を増強されることで、光の量子性を保ちながら物質と結合させて物質の性質を制御する試みが近年盛んにされている。このような量子電磁場と物質の結合の影響は様々な物理量に現れる。中本、高三、辻は、量子電磁場と超強結合したモット絶縁体の光学伝導度スペクトルと光子占有数を厳密対角化法を用いて解析した。上部 Hubbard バンドと繰り返された光子の周波数が交差する所で光学伝導度に準位反発の構造が現れる。また、光子占有数は結合定数を増やしていくと、最初は増大するものの、あるところから

減少に転じる振る舞いが見られた。これらの結果を、その解釈も含めて研究会で発表した [62]。

3.6.3 量子多体傷跡状態

量子多体系においてエネルギー固有状態が個々に熱的な振る舞いを示すことが期待されているが、例外的に非熱的な性質を示す量子多体傷跡状態と呼ばれるエネルギー固有状態が存在することがわかってきた。その文脈において、特に η ペアリング状態という、長距離の超伝導相関を示すエネルギー固有状態の存在が知られている。今井、辻は、これまで知られていた η ペアリング状態を非従来型のペア対称性を持つ場合に拡張する方法を提案した。そのために三体以上の多体相互作用を導入し、ペアが重なったときに生じる二体相互作用の増加分を多体相互作用によって相殺することで非従来型の η ペアリング状態をエネルギー固有状態にすることができる。この考えを多体相互作用を持つ 2 次元 Hubbard 模型に応用し、 d 波の η ペアリング状態が厳密な固有状態になることを示した。また、準位統計やエンタングルメントエントロピーの数値解析によって、模型が非可積分であり d 波 η ペアリング状態が量子多体傷跡状態とみなせることがわかった。これらの結果について研究会等で発表した [37, 42, 51, 58, 59]。また、 η ペアリング状態と電磁場が結合することで現れる η ペアポラリトンの性質について研究会等で発表した [16, 25]。

3.6.4 量子多体系の動的応答

固体電子系におけるアト秒パルス発生

強いレーザー光によって駆動された非平衡電子系は、高次高調波発生をはじめとする様々なアト秒領域の超高速現象を誘起する。しかし強電場によるトンネル励起過程や駆動中の波束分散過程の複雑さによって、固体電子系でアト秒オーダーのパルスを発生させる方法はいまだ確立されていない。そこで今井は、小野淳氏（東北大）と共同で、Sauter ポテンシャル中の massive Dirac 模型から得られる厳密解を拡張することで、バンド絶縁体中の電子波束のダイナミクスを制御する方法を確立し、理論限界に近いアト秒スケールの超短パルスを実現できることを示した。これらの結果について、原著論文にまとめ [4]、国内招待講演 [48] や学会発表 [32, 50] を行った。

時間分解ラマン分光

ラマン分光は、入射した光の周波数とは異なる周波数の光が散乱される現象を利用して、低エネルギーの励起モードの情報を得る分光手法である。励起光とラマン駆動光を組み合わせることで電子状態の励起構造を時間分解しながら調べることに使える（時間

分解ラマン分光）。辻は Philipp Werner 氏 (Fribourg 大)、Martin Eckstein 氏 (Hamburg 大) と共同で、非平衡動的平均場理論に基づいて共鳴ラマン散乱振幅を計算する方法を構築した。この方法では、ラマン駆動光を古典的に扱うことで共鳴ラマン散乱振幅を 2 点相関関数の計算に帰着させることができる。この方法をポンプ光によって励起された Holstein-Hubbard 模型に応用し、光励起されたモット絶縁体の時間分解ラマン分光スペクトルを得た。これらの結果について原著論文にまとめ [3]、研究会で発表した [49]。

<報文>

(総説)

- [1] Naoto Tsuji, Ippei Danshita, Shunji Tsuchiya, “Higgs and Nambu-Goldstone modes in condensed matter physics”, *Encyclopedia of Condensed Matter Physics* (2nd ed.), Vol. 1, pp. 174 (2024).
- [2] Naoto Tsuji, “Floquet states”, *Encyclopedia of Condensed Matter Physics* (2nd ed.), Vol. 1, pp. 967 (2024).

(原著論文)

- [3] Philipp Werner, Martin Eckstein, Naoto Tsuji, “Nonequilibrium DMFT approach to time-resolved Raman spectroscopy”, *Phys. Rev. B* **108**, 245157 (2023).
- [4] Shohei Imai, Atsushi Ono, “Theory for Fourier-limited attosecond pulse generation in solids”, *Phys. Rev. B* **109**, L041303 (2024).
- [5] Raigo Nagashima, Sida Tian, Rafael Haenel, Naoto Tsuji, Dirk Manske, “Classification of Lifshitz invariant in multiband superconductors: An application to Leggett modes in the linear response regime in Kagome lattice models”, *Phys. Rev. Research* **6**, 013120 (2024).
- [6] Chihiro Matsui, Naoto Tsuji, “Exact steady states of the impurity-doped XXZ spin chain coupled to dissipators”, *J. Stat. Mech.* 033105 (2024).
- [7] Kazuaki Takasan, Kyosuke Adachi, Kyogo Kawaguchi, “Activity-induced ferromagnetism in one-dimensional quantum many-body systems”, *Phys. Rev. Research*, in press.

(学位論文)

- [8] Huanyu Zhang, “Floquet many-body theory for light-driven superconductors”, 修士論文, 2023 年 9 月.
- [9] 牛原啓, “Quantum master equation for nonlinear thermal transport in many-body systems”, 修士論文, 2024 年 3 月.
- [10] 西村俊祐, “Transport phenomena in a random unitary circuit with quantum feedback control”, 修士論文, 2024 年 3 月.

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [11] Naoto Tsuji, “Leggett mode and Lifshitz invariant in multiband superconductors”, ENS Paris-UTokyo workshop (Paris, France), March 2024.
- [12] Kazuaki Takasan, “Light-induced topological superconductivity”, Conference on Laser and Synchrotron Radiation Combination Experiment 2023 (LSC2023), Pacifico Yokohama (Yokohama, Japan), April 2023.
- [13] Kazuaki Takasan, “Activity-induced quantum phase transitions: A proposal for quantum active matter”, Trends in the Theory of Quantum Materials 2023 (TTQM2023), The University of Tokyo (Kashiwa, Japan), October 2023.
- [14] Kazuaki Takasan, “Light-induced topological superconductivity”, POSTECH Signature Conference 2023 (ICPQT2023), POSCO International Center (Pohang, South Korea), November 2023.
- [15] Kazuaki Takasan, “Activity-induced quantum phase transitions: A proposal for quantum active matter” German-Japanese Workshop, University of Würzburg (Würzburg, Germany), February 2024.

一般講演

- [16] Naoto Tsuji, “Quantum many-body scar states with light-matter interaction”, 28th International Conference on Statistical Physics (STATPHYS28), University of Tokyo (Tokyo, Japan), August 2023.
- [17] Chihiro Matsui, Naoto Tsuji, “Steady state of the impurity-doped XXZ spin chain coupled to dissipators”, 28th International Conference on Statistical Physics (STATPHYS28), University of Tokyo (Tokyo, Japan), August 2023.
- [18] Kazuaki Takasan, “Activity-induced quantum phase transitions: A proposal for quantum active matter”, Frontiers in nonequilibrium physics: Active matter, topology and beyond, Yukawa Institute for Theoretical Physics (Kyoto, Japan), July 2023.
- [19] Kazuaki Takasan, “Activity-induced quantum phase transitions: A proposal for quantum active matter”, Perspectives on Non-Equilibrium Statistical Mechanics: The 45th Anniversary Symposium of Yamada Science Foundation, Yukawa Institute for Theoretical Physics (Kyoto, Japan), August 2023.
- [20] Kazuaki Takasan, “Activity-induced quantum phase transitions: A proposal for quantum active matter”, 28th International Conference on Statistical Mechanics (STATPHYS28), University of Tokyo (Tokyo, Japan), August 2023.
- [21] Kazuaki Takasan, “Activity-induced quantum phase transitions: A proposal for quantum active matter”, Physics of Open Systems and Beyond, Hokkaido University (Sapporo, Japan), August 2023.
- [22] Kazuaki Takasan, “Quantum active matter: A new class of nonequilibrium phases of matter”, ExU-YITP Conference Quantum Information and Theoretical Physics, Yukawa Institute for Theoretical Physics (Kyoto, Japan), September 2023.
- [23] Kazuaki Takasan, Kyosuke Adachi, Kyogo Kawaguchi, “Activity-induced ferromagnetism in one-dimensional quantum many-body systems”, American Physical Society March Meeting 2024, Minneapolis Convention Center, (Minneapolis, USA), March 2024.
- [24] Ryo Mori, Kazuaki Takasan, Ping Ai, Samuel Cioacs, Kaishu Kawaguchi, Takeshi Kondo, Takahiro Morimoto, Joel E. Moore, Alessandra Lanzara, “Investigation of excitonic topological states”, American Physical Society March Meeting 2024, Minneapolis Convention Center, (Minneapolis, USA), March 2024.

ポスター発表

- [25] Naoto Tsuji, “Nonequilibrium superconductivity in high energy states”, Dynamical Control of Quantum Materials (DCQM23), Dresden, Germany, May 2023.
- [26] Hiromu Ushihara, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Analysis of energy current based on quantum master equations applicable to many-body systems”, Perspectives on Non-equilibrium Statistical Mechanics: The 45th Anniversary Symposium of Yamada Science Foundation, Yukawa Institute for Theoretical Physics (Kyoto, Japan), August 2023.
- [27] Hiromu Ushihara, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Analysis of energy current in spin chains based on quantum master equations applicable to many-body systems”, 28th International Conference on Statistical Mechanics (STATPHYS28), University of Tokyo (Tokyo, Japan), August 2023.
- [28] Huanyu Zhang, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Floquet many-body theory for driven BCS superconductors: nonlinear response and drive-induced phase transition”, 28th International Conference on Statistical Physics (STATPHYS28), University of Tokyo (Tokyo, Japan), August 2023.
- [29] Hiromu Ushihara, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Analysis of energy current in the Hubbard model based on microscopically-derived quantum master equation”, Physics of Open Systems and Beyond, Hokkaido University (Sapporo, Japan), August 2023.
- [30] Hiromu Ushihara, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Derivation of the quantum master equation

- for the Fermi-Hubbard model with two-body losses”, ExU-YITP Workshop on Condensed Matter Physics and Quantum Information, Yukawa Institute for Theoretical Physics (Kyoto, Japan), September 2023.
- [31] Shunsuke Nishimura, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Asymmetric Spin Transport in U(1) Symmetric Random Unitary Circuit with Quantum Feedback Controls”, ExU-YITP Workshop on Condensed Matter Physics and Quantum Information, Yukawa Institute for Theoretical Physics (Kyoto, Japan), September 2023.
- [32] Shohei Imai, Atsushi Ono, “Theory for Fourier-limited attosecond pulse generation in crystalline solids”, Trends in the Theory of Quantum Materials 2023 (TTQM2023), University of Tokyo (Kashiwa, Japan), October 2023.
- [33] Hiromu Ushihara, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Thermal transport in an open Hubbard model: Quantum master equation approach”, Trends in the Theory of Quantum Materials 2023 (TTQM2023), University of Tokyo (Kashiwa, Japan), October 2023.
- [34] Raigo Nagashima, Sida Tian, Rafael Haenel, Naoto Tsuji, Dirk Manske, “Classification of Lifshitz invariant in multiband superconductors and its application to Leggett mode”, Trends in the Theory of Quantum Materials 2023 (TTQM2023), University of Tokyo (Kashiwa, Japan), October 2023.
- [35] Shunsuke Nishimura, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Asymmetric Spin Transport in U(1) Symmetric Random Unitary Circuit with Quantum Feedback Controls”, Trends in the Theory of Quantum Materials 2023 (TTQM2023), University of Tokyo (Kashiwa, Japan), October 2023.
- [36] Huanyu Zhang, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Floquet many-body theory for light-driven BCS superconductors”, Trends in the Theory of Quantum Materials 2023 (TTQM2023), University of Tokyo (Kashiwa), October 2023.
- [37] Shohei Imai, Naoto Tsuji, “Systematic construction of unconventional η -pairing states in multi-body interacting systems”, International Symposium on Quantum Electronics, University of Tokyo (Tokyo, Japan), February 2024.
- [38] Hiromu Ushihara, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Microscopically-derived quantum master equation for a boundary-driven Hubbard model and its application to nonlinear thermoelectric effect”, International Symposium on Quantum Electronics, University of Tokyo (Tokyo, Japan), February 2024.
- [39] Raigo Nagashima, Sida Tian, Rafael Haenel, Naoto Tsuji, Dirk Manske, “Classification of Lifshitz invariant in multiband superconductors and its application to Leggett mode”, International Symposium on Quantum Electronics, University of Tokyo (Tokyo, Japan), February 2024.
- [40] Niklas Ziereis, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Light-driven interlayer propagation of collective mode excitations in layered superconductors”, Quantum Matter Out of Equilibrium, Granada, Spain, September 2023.
- [41] Niklas Ziereis, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Light-Induced Pseudospin Precession In Josephson Coupled Layered Superconductors”, 28th International Conference on Statistical Physics (STATPHYS28), University of Tokyo (Tokyo, Japan), August 2023.
- セミナー
- [42] Naoto Tsuji, “Quantum many-body scars with unconventional pairings”, College de France, Paris, France, March 2024.
- [43] Naoto Tsuji, “Nonlinear response in superconductors and beyond”, Max Planck Institute for Solid State Research, Stuttgart, Germany, May 2023.
- (国内会議)
- 招待講演
- [44] 辻直人, “Recent development of Higgs mode in condensed matter physics”, 対相関から対凝縮相への微視的アプローチ, 大阪大学 RCNP, 2023 年 9 月.
- [45] 辻直人, 「マルチバンド超伝導体における Leggett モードと Lifshitz 不変量」, 強相関電子系のフロンティア研究会, 名古屋大学, 2023 年 8 月.
- [46] 高三和晃, 「自己駆動性が誘起する量子相転移: “量子アクティブマター”の提案」, 量子凝縮相研究における新潮流, 京都大学 益川ホール, 2023 年 6 月.
- [47] 高三和晃, 「光電場・電流を利用した超伝導体の動的制御」, 非平衡固体物性の最前線, 東京大学 本郷キャンパス, 2023 年 11 月.
- [48] 今井渉平, 「固体における電子波束のサブサイクルダイナミクスとアト秒パルス発生」, 日本物理学会 2024 年春季大会シンポジウム, オンライン, 2024 年 3 月.
- 一般講演
- [49] 辻直人, Martin Eckstein, Philipp Werner, 「光励起されたモット絶縁体の時間分解ラマン分光の理論」, 日本物理学会 2023 年年次大会, 東北大学, 2023 年 9 月.
- [50] 今井渉平, 小野淳, 「光電場駆動された固体電子による Fourier 限界アト秒パルス発生」, 熱場の量子論とその応用, 高エネルギー加速器研究機構, 2023 年 8 月.
- [51] 今井渉平, 辻直人, 「三体相互作用を持つ系における p 波 η ペアリング状態」, 日本物理学会 2023 年年次大会, 東北大学, 2023 年 9 月.
- [52] 牛原啓, 高三和晃, 辻直人, 「多体系に適用可能な量子マスター方程式に基づくエネルギー流の解析」, 日本物理学会 2023 年年次大会, 東北大学, 2023 年 9 月.

- [53] 高三和晃, 川口喬吾, 足立景亮, 「量子多体系におけるアクティブ性が誘起する強磁性: モデルと相図」, 日本物理学会 2023 年年次大会, 東北大学, 2023 年 9 月.
- [54] 高三和晃, 川口喬吾, 足立景亮, 「量子多体系におけるアクティブ性が誘起する強磁性: 摂動論と平均場理論」, 日本物理学会 2023 年年次大会, 東北大学, 2023 年 9 月.
- [55] 永島来悟, Rafael Haenel, Sida Tian, 辻直人, Dirk Manske, 「マルチバンド超伝導体におけるリフシット不変量の分類と Leggett モードへの応用」, 日本物理学会 2023 年年次大会, 東北大学, 2023 年 9 月.
- [56] 西村俊祐, 高三和晃, 辻直人, 「U(1) 対称ランダム量子回路での量子フィードバック制御による非対称なスピン輸送」, 日本物理学会 2023 年年次大会, 東北大学, 2023 年 9 月.
- [57] Huanyu Zhang, Kazuaki Takasan, Naoto Tsuji, “Floquet many-body theory for light-driven superconductivity”, 日本物理学会 2023 年年次大会, 東北大学, 2023 年 9 月.
- [58] 今井渉平, 辻直人, 「三体相互作用系における非従来型 η ペアリング状態」, 超伝導研究の発展と広がり, 京都大学基礎物理学研究所, 2023 年 12 月.
- [59] 今井渉平, 辻直人, 「非従来型超伝導多体傷跡状態の系統的な構成法」, 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン, 2024 年 3 月.
- [60] 高三和晃, 「量子アクティブマター」, 非平衡系の物理, 京都大学 理学研究科セミナーハウス, 2024 年 3 月.

ポスター発表

- [61] 永島来悟, Rafael Haenel, Sida Tian, 辻直人, Dirk Manske, 「マルチバンド超伝導体におけるリフシット不変量の分類と Leggett モードへの応用」, 超伝導研究の発展と広がり, 京都大学 基礎物理学研究所, 2023 年 12 月.
- [62] 中本大河, 高三和晃, 辻直人, 「量子電磁場と超強結合した Mott 絶縁体」, 計算物理春の学校 2024, 沖縄市町村自治会館, 2024 年 3 月.
- [63] 永島来悟, Rafael Haenel, Sida Tian, 辻直人, Dirk Manske, 「マルチバンド超伝導体におけるリフシット不変量の分類と Leggett モードへの応用」, 計算物理春の学校 2024, 沖縄市町村自治会館, 2024 年 3 月.

(セミナー)

- [64] 高三和晃, 「自己駆動性が誘起する量子相転移: “量子アクティブマター”の提案」, 量子物理学・ナノサイエンス第 363 回セミナー, 東京工業大学 大岡山キャンパス, 2023 年 5 月.
- [65] Hiromu Ushihara, “Microscopically-derived quantum master equation for a boundary-driven Hubbard model and its application to nonlinear thermoelectric effect”, Hatano lab seminar, Institute of Industrial Science (Kashiwa, Japan), November, 2023.

(集中講義)

- [66] 高三和晃, 「非平衡物質相の物理」, 埼玉大学 理工学研究科博士前期課程 物質科学専攻 集中講義, 2023 年 8 月 30 日-9 月 1 日.

(アウトリーチ)

プレスリリース

- [67] 永島来悟, 辻直人, Rafael Haenel, Sida Tian, Dirk Manske, 「超伝導秩序が光に反応するのはどのようなときか? —光に線形で応答する超伝導秩序を持つ物質の分類理論を構築」, 2024 年 1 月 30 日.

3.7 蘆田研究室

量子力学の世界では、系のミクロな情報を得ることの代償として、ハイゼンベルグの不確定性関係に起因する測定の反作用が量子ダイナミクスに本質的な影響を及ぼす。近年の原子・分子・光物理分野における革新的な実験技術の進歩により、大自由度の量子系 - 量子多体系 - を単一量子レベルで観測/制御することが可能になった。

一方で、観測/制御下における量子系の研究は、これまで主として量子光学の分野で少数自由度系を対象に精力的に行われてきた。本研究室では、これら二つの分野 - 量子多体物理と量子光学 - の境界領域における理論研究を行っている。特に、摂動のおよび非摂動的領域の非平衡開放系の物理について、量子測定理論・繰り込み群・トポロジー・場の理論・機械学習などの考え方/手法も援用しながら研究を行ってきている。

3.7.1 開放系・非エルミート物理

外界環境や観測者の影響下の物理系は「非平衡開放系」として記述される。これまで我々は開放系の中でも、特に非エルミート系と呼ばれるクラスの物理系に着目し、量子臨界現象やトポロジカル物性などの枠組みを拡張することで、エルミート系に類のない新たな物理現象を探究してきた。特に、今年度はこれら開放系の物理に関する集中講義も京都大学で行った [29]。

2次元非エルミート系における非ブロッホバンド

1次元非エルミート系における非ブロッホバンド理論は、非エルミート表皮効果によって空間的な局在を示す固有状態のエネルギーバンドを計算する方法を確立した。横溝は、東工大村上研と共同研究を行い、1次元非エルミート系で確立された方法によってエネルギーバンドを計算できる2次元非エルミート系のクラスを見出した。例えば、1方向にのみ非エルミート表皮効果が発生している2次元系がこのクラスに属する。そして、このクラスに属する非エルミートチャーン絶縁体の一般化ブリルアンゾーンを計算し、エネルギー固有値が再現されることを明らかにした。さらに、一般化ブリルアンゾーンからチャーン数を計算することでバルクエッジ対応が示された。以上の成果は論文を通じて発表された [4]。

浮揚ナノ粒子アレイの非エルミート物理

非エルミート物理は、冷却原子などの量子系からアクティブマターなどの古典系まで、様々な物理系で研究されている。このような従来の物理系では、非相反相互作用を高い制御性の下で実現することは難しかった。横溝、蘆田は、浮揚ナノ粒子アレイが

非エルミート系として理想的なプラットフォームになることを理論的に提案した。浮揚ナノ粒子間に働く双極子-双極子相互作用に起因して、これまでに実現することが困難であった負の相互作用や非相反長距離相互作用を実現することができる。また、このような相互作用はトラップレーザーのパラメータを通じて効率的に制御することができる。非ブロッホバンド理論を用いた解析により、非エルミート表皮効果によって誘起される臨界相や非相反長距離相互作用に起因したバンド構造の特異点を見出した。今後、従来の物理系では実現が容易ではなかった非エルミート現象が浮揚ナノ粒子アレイを用いて検証されることが期待される。以上の成果は論文を通じて発表された [6]。

一般化固有値問題における非エルミートブロッホバンド理論とフォトニック結晶への応用

従来の非エルミート系は、非エルミート演算子の固有値方程式によって記述されてきた。一方、一般化固有値方程式で記述される物理系も知られており、このような系は内因的に非エルミート性を含んでいる。横溝、蘆田は、一般化固有値方程式で記述される連続体模型における非ブロッホバンド理論を構築した。この理論により、一般化固有値方程式から計算できる転送行列の固有値を用いて一般化ブリルアンゾーンとバンド構造を計算することができる。また、東工大納富研と共同研究を行い、構築した理論を用いてカイラルメタマテリアルで構成されたフォトニック結晶を解析した。非エルミート表皮効果が発生する状況において、解析計算によって求められた固有状態の局在長が数値シミュレーションの結果と一致した。このことから、カイラルパラメータによって導入される光学的利得・損失が非エルミート表皮効果を生じさせていることを結論付けた。また、固有状態の偏光に依存して局在の位置が変化することを見出した。今後、非エルミート表皮効果を示す固有状態の励起の様子を解析し、過渡的なダイナミクスの中で特異な現象が発見されることが期待される。以上の成果は、論文や国内会議での一般講演を通じて発表された [9, 22]。

確率過程・非線形系の非エルミート物理

確率過程における確率分布の時間発展を記述する方程式は、非エルミート演算子により形式的に記述される。したがって、非エルミート物理で培われてきた知見や手法は確率過程の解析にも有用な可能性がある。蘆田は東大工学系の沙川研とともに、1次元古典確率過程の緩和過程において非エルミートバンドトポロジーが果たす役割について理論的に明らかにした。特に、バンドの巻きつき数が緩和時間のサイズスケーリング依存性を特徴付けることを見出した。また、バンドトポロジーの概念を古典非線形系にも拡張することで、非線形系における端状態の有無がトポロジカル不変量で特徴付けられることを

見出した。チャーン絶縁体を非線形領域に拡張したモデルを考え、チャーン数を拡張することで、トポロジカル不変量 - 非線形チャーン数 - を具体的に構成し、その値が端状態の頑健性と密接に関連することを数値的に検証した。以上の成果は、論文や国際会議での招待講演を通じて発表された [8, 10, 18]。

3.7.2 強結合量子光-物質系の物理

古典電磁場を周期外場として物質を駆動し、その過渡的な物性変化を引き起こす可能性が精力的に調べられてきた。一方、量子的な電磁場環境により量子多体物性を制御する可能性は多くが未解明である。近年の実験技術の発展により、共振器中に閉じ込められた量子電磁場と物質が強く相互作用する物理系 - 共振器物質系 - が実現しつつある。我々はこの物理系が持つ可能性に注目し、そこで発現する新たな物理現象の発見を目指し研究を行っている。

ジョセフソン接合系における量子散逸相転移

抵抗に繋がれたジョセフソン接合系における量子散逸相転移（超伝導-絶縁体転移）の有無は、物性・統計物理学において長年議論されてきた課題である。増木、蘆田は東大物性研の押川研と共同研究を行い、非摂動的な繰り込み群の手法を用いることで系の基底状態の相図を明らかにした。特に、数値的繰り込み群と汎関数繰り込み群という2つの独立な繰り込み群解析の結果から、今まで非有意と考えられてきた項の非摂動効果によって、絶縁体相が実現するパラメータ領域が強く制限されることを明らかにした。また、増木、蘆田は理研の横田氏と協力することで、この研究をさらに発展させ、LPA 近似を超えた汎関数繰り込み群による解析を行った。これによりジョセフソン接合系に限らず、スピン - ボソンモデルなどより広いクラスの強結合開放系の正確な非摂動解析が可能となった。以上の成果は論文などを通じて発表された [2, 7, 12]。

ファンデルワールス物質を用いた共振器による超強結合

これまで単一電子レベルでの光物質超強結合は、マイクロ波領域では実験的に達成されているものの、固体物質の制御で重要となるテラヘルツ領域では未達成である。これは従来の Fabry-Perot 型あるいはプラズモニク型の共振器では集団的な増強なしに超強結合に到達することが困難と考えられているためである。蘆田はファンデルワールス物質における双極分散を持つフォノンポラリトンモードを用いることで、テラヘルツ領域の電磁場をナノスケールに閉じ込め単一電子レベルでの超強結合を実現する可能性を理論的に指摘した（スイス連邦工科大学との共同研究）。原理実証のための具体例として、2層グラフェンが六方晶窒化ホウ素 (hBN) 薄膜で形成され

る共振器に閉じ込められた系を考え、フォノンポラリトンの真空揺らぎにより、グラフェン内の電子の励起スペクトラムが修正を受けることを理論的に示した。以上の成果は、論文や国際会議での招待講演などを通して発表された [5, 17, 25]。

超結合領域における量子幾何とトポロジー

量子電磁場と結合する量子系における量子幾何やトポロジーの解析は、強束縛モデルへのパイレース代入といった現象論的なモデルに基づく解析が主であった。一方、超強結合領域においても有効な解析手法は知られていなかった。増木、蘆田は電磁場 - 物質間の量子もつれを漸近的に解くユニタリ変換を用いることで、全結合領域で有効な量子幾何解析の理論を構築した。特に、構築された一般論をディラック電子系に適用することで、量子電磁場モードとの結合によって起こるトポロジカル相転移の性質を明らかにした。以上の成果は論文を通じて発表された [3]。

量子電磁場を用いた捻り二層系の磁性制御

二層の二次元物質を僅かにずれた角度で重ねると、単層の周期構造に比べて遥かに大きな超周期構造が現れる。こうした捻り二層物質系では、特定の角度で電子の運動エネルギーが強く抑制されて強相関効果が増大することが知られている。増木、蘆田は摂動論に基づき、六方晶窒化ホウ素 (hBN) などのヘテロ接合系からなる「hyperbolic 共振器」と結合した捻り二層物質系の低エネルギー有効ハミルトニアンを求める理論を構築した。特に、 $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ という具体的な捻り二層物質系に理論を適用し、hyperbolic 共振器との結合によって電子スピン間の磁性フラストレーションを増強できることを明らかにした。以上の成果は、国内会議での一般講演やポスター発表などを通じて発表された [15, 20, 28]。

共振器によって増強される近藤効果

固体物理・量子多体系の中心的概念として知られている近藤効果が、強い量子電磁場との結合の下でどのように変化するかは、共振器物質系を理解する上で重要な課題である。持田、蘆田は共振器物質系における近藤効果の制御を理論的に探求した。本研究では、異なる自由度を分離するユニタリ変換を活用することで、共振器中の有効的な磁性不純物モデルを導出した。このモデルに対して数値変分計算を用いることで、共振器相互作用が電子系の長距離相互作用を誘発し、近藤効果を増強させることを示した。また、量子電磁場環境と近藤状態が強い量子相関をもつことで、新しい近藤効果の普遍性関係を創発することも発見した。以上の成果は、国際会議でのポスター発表や国内会議での一般講演などを通じて発表された [13, 16, 21, 23]。

3.7.3 統計物理・機械学習

解釈可能な量子機械学習の探索

変分量子回路と古典的なニューラルネットワークは、ブラックボックス的な性質からしばしば比較され、解釈可能性という課題を提示している。解釈可能な機械学習の手法の中で用いられている Feature Attribution 法は、古典的な機械学習モデルの理解を高めるように設計されている。周、蘆田は様々な構造の変分量子回路にこの手法を適用することの有効性を探り、説明結果を用いて量子モデルの解釈を試みた [11]。

くりこみ群に基づく生成モデルの構築

拡散モデルと呼ばれる生成モデルでは、ディノイズングと呼ばれるプロセスによってガウシアンノイズからノイズを除去していくことで画像や音声などの複雑なデータを生成することができる。増木、蘆田はノイズ除去の過程が統計力学で知られる汎関数繰り込み群の逆過程と対応づけられることに着目し、くりこみ群に基づいた拡散モデルの構築を行なった。特に、2次元画像のデータセットに対してこの生成モデルを適用し、従来の拡散モデルにくらべて計算コスト的に有利であることや画像サイズの変化に対してロバストである可能性を見出した。以上の成果は国際会議での一般講演などを通じて発表された [12, 14]。

系-環境エンタングルメントの相転移・臨界現象

近年、測定に誘起される相転移・臨界現象が活発に研究されている。しかし、その観測のためには測定結果の事後選択が必要であり、その成功確率が系のサイズに対して指数的に減衰してしまうことが共通の困難として認識されている。蘆田はそのような事後選択が必要とならない「測定結果に条件づけない密度行列」においても相転移・臨界現象が生じることを、1次元系の普遍性クラスである朝永-Luttinger 液体の解析を通じて理論的に見出した（物性研押川研、慶大古川研との共同研究）。以上の成果は国際会議での招待講演などを通じて発表された [19, 26]。

<受賞>

- [1] 横溝和樹、第 40 回井上研究奨励賞、井上科学振興財団、2023 年 12 月 14 日。

<報文>

(原著論文)

- [2] T. Yokota, K. Masuki, and Y. Ashida, Functional-renormalization-group approach to circuit quantum electrodynamics, *Physical Review A* **107**, 043709 (April, 2023).

- [3] K. Masuki and Y. Ashida, Berry phase and topology in ultrastrongly coupled quantum light-matter systems, *Physical Review B* **107**, 195104 (May 2023).
- [4] K. Yokomizo and S. Murakami, Non-Bloch bands in two-dimensional non-Hermitian systems, *Physical Review B* **107**, 195112 (May 2023).
- [5] Y. Ashida, A. Imamoglu, and E. Demler, Cavity Quantum Electrodynamics with Hyperbolic van der Waals Materials, *Physical Review Letters* **130**, 216901 (May 2023).
- [6] K. Yokomizo and Y. Ashida, Non-Hermitian physics of levitated nanoparticle array, *Physical Review Research* **5**, 033217 (September 2023).
- [7] K. Masuki, H. Sudo, M. Oshikawa, and Y. Ashida, Masuki et al. Reply, *Physical Review Letters* **131**, 199702 (November 2023).
- [8] T. Sawada, K. Sone, R. Hamazaki, Y. Ashida, and T. Sagawa, Role of Topology in Relaxation of One-Dimensional Stochastic Processes, *Physical Review Letters* **132**, 046602 (January 2024).
- [9] K. Yokomizo, T. Yoda, and Y. Ashida, Non-Bloch band theory of generalized eigenvalue problems, *Physical Review B* **109**, 115115 (March 2024).
- [10] K. Sone, M. Ezawa, Y. Ashida, N. Yoshioka, and T. Sagawa, Nonlinearity-induced topological phase transition characterized by the nonlinear Chern number, *Nature Physics* (in press).

(学位論文)

- [11] Zinan Zhou, “Toward Interpretable Quantum Machine Learning: Feature Attribution and Variational Quantum Circuits”, 修士論文, 2023.
- [12] 増木貫太, “Generative Model with Inverse Functional Renormalization Group Flows”, 修士論文, 2023.
- [13] 持田隼, “Theoretical study of the Kondo effect in cavity QED materials”, 修士論文, 2023.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [14] K. Masuki and Y. Ashida, Diffusion model motivated by Renormalization Group, IPI-Daikin symposium, Tokyo, Oct. 24 - 25, 2023.

ポスター発表

- [15] K. Masuki and Y. Ashida, Cavity Moiré Materials: Controlling Magnetic Frustration with Quantum Light-Matter Interaction, Okinawa School in Physics: Coherent Quantum Dynamics, Okinawa, Sept. 26 - Oct. 5, 2023.

- [16] J. Mochida and Y. Ashida, Variational approach for Kondo problem with Quantum Light-Matter interaction, Okinawa School in Physics 2023: Coherent Quantum Dynamics, Okinawa, Sep. 26 - Oct. 5, 2023.

招待講演

- [17] Y. Ashida, Cavity QED control of quantum materials, Periodically and quasi-periodically driven complex systems, Bengaluru, India, June 12 - 23, 2023.
- [18] Y. Ashida, Hermitian and non-Hermitian topological phenomena in active matter, Frontiers in nonequilibrium physics: Active matter, topology and beyond, Kyoto, Japan, July 31 - Aug. 2, 2023.
- [19] Y. Ashida, System-Environment Entanglement Phase Transitions, Correlation and Topology in Quantum Matter, Seoul, Korea, Dec.18 - 21, 2023.

(国内会議)

一般講演

- [20] 増木貫太, 蘆田祐人, 量子光物質相互作用による共振器モアレ物質系における磁性制御, 日本物理学会 2023 年次秋季大会, 宮城, 2023 年 9 月 16 日 - 19 日.
- [21] 持田隼, 蘆田祐人, 共振器物質系の超強結合領域における近藤問題, 日本物理学会 2023 年秋季大会, 宮城, 2023 年 9 月 16 日 - 19 日.
- [22] 横溝和樹, 養田大騎, 蘆田祐人, 一般化固有値問題における非エルミートブロッホバンド理論, 日本物理学会 2023 年秋季大会, 宮城, 2023 年 9 月 16 日 - 19 日.

ポスター発表

- [23] 持田隼, 蘆田祐人, 共振器物質系の超強結合領域における近藤問題, IPI-ダイキン シンポジウム, 東京, 2023 年 10 月 25 日 - 26 日.

招待講演

- [24] 蘆田祐人, 強化学習とその物理への応用, 「学習物理学」領域会議, 東京大学, 2023 年 9 月 25 日 - 26 日.
- [25] 蘆田祐人, 共振器/回路量子電磁力学の多体物理, 非平衡固体物性の最前線, 東京大学, 2023 年 11 月 13 日 - 14 日.
- [26] 蘆田祐人, 量子測定と相転移・臨界現象, KEK 連携研究会 2024, KEK, 2024 年 3 月 25 日 - 26 日.

(セミナー)

- [27] 蘆田祐人, 強化学習とその量子制御への応用, 上智大学セミナー, 上智大学, 2023, Nov. 8.
- [28] K. Masuki, Cavity QED control of quantum materials, StatPhys Seminar, Tokyo, 2023, Nov. 17.

(集中講義)

- [29] 蘆田祐人, 開放系の物理, 京都大学, 2023 年 10 月 25-27 日.

4 物性実験

4.1 長谷川研究室

9月にはGUO Yuxiaoが博士課程を修了し、中国に帰国して就職した。3月には皆川遼太郎が修士課程を修了し、指導教員の定年までの年限制限のため中辻研究室に移籍して博士課程に進学した。

当研究室では、表面物性、特に「表面輸送」をキーワードにして実験的研究を行っている。おもに半導体や金属、トポロジカル絶縁体結晶表面上に形成される種々の表面超構造や原子層、多層膜(超格子)構造、ヘテロ接合界面などを利用し、原子尺度の低次元電子系に固有な電子状態や電子輸送特性、スピン状態・スピン流を明らかにし、機能特性として利用することをめざしている。最近の主な話題は、トポロジカル(結晶)絶縁体結晶の表面電子状態、超伝導グラフェン、ラッシュバ超伝導、原子層超伝導、非相反光電流などの研究である。このようなナノマテリアルを様々な実験手法を用いて多角的に研究を行っている。とくに、分子線エピタキシー(MBE)法によってナノマテリアルを作成し、試料を空気にさらすことなく物性測定を超高真空中で「その場 *in situ*」で行うことが本研究室の実験手法の特徴であり、そのための新しい手法・装置の開発・改良も並行して行っている。以下に、本年度の成果を述べる。

4.1.1 表面/界面での輸送・磁性特性

トポロジカル結晶絶縁体 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ を用いた多チャンネル量子異常ホール効果の観測

$\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ (略してPST) は、結晶の鏡映対称性に保護された表面状態を有するトポロジカル結晶絶縁体であり、(111)面は $\bar{\Gamma}$ 点に1個、 $\bar{M}$ 点に3個の計4つのDirac錐がある。この性質により $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ (略してBST) などの Z_2 型トポロジカル絶縁体(TI)で観測されている量子異常ホール効果(QAHE)よりもチャーン数の大きい量子化抵抗値の実現が理論的に予測されているが、まだ観測には至っていない。本研究で Z_2 型TIでQAHE観測温度が向上した事例に倣い、CrをBST層に変調ドーブした層でPST層を挟むサンドイッチ構造試料作製し、QAHE観測を目指した。これまでRHEEDとXRDにより狙い通りの試料が作製できていることを確認し、SQUIDに

より強磁性が発現していることも確認できた。またQAHEを目指す上で重要なバルク絶縁性が最も向上するPb/Sn比と膜厚を明らかにした。今後、より低温におけるホール効果測定やゲート電圧の印加によりフェルミ準位を精緻調整することで初の多チャネルQAHE観測を目指す。

Si(111) 表面上の(Tl,Sn) 2原子層における円偏光誘起非相反電流の観測

スピン軌道相互作用が強い物質では、バンドのスピン縮退が解けたり、スピンホール効果でアップスピンとダウンスピンを持つ電子がそれぞれ逆方向に偏向されるといった現象が見られる。こういった物質に円偏光を照射してスピン注入することでスピン流を簡便に発生させ、それを電氣的に検出する試みがなされている。本研究では2原子層表面超構造物質である $\text{Si}(111)-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(\text{Tl,Sn})$ を作成し、超高真空 *in situ* で円偏光を照射し非相反光電流を測定した。その結果、試料の右端と左端で非相反光電流の流れる方向が反転する光電流が観測され、光誘起逆スピンホール効果(PISHE)を示唆した。しかし、円偏光を斜め入射にするとこの光電流が増大し、面直スピンにより生じるPISHEの直観的な描像と反する振る舞いを見せた。この現象の解釈は困難を極めたが、円偏光フォトンドラッグ効果(CPDE)の原理を参考にしてスピン軌道相互作用による歳差運動でスピンの面内・面直変換というモデルを立てることで説明できた。今後はバンド分散の条件に加え、原子層物質内でのスピンの動きについて調査していく。

トポロジカル超伝導体の水素修飾の影響

トポロジカル超伝導体は、物質の表面や端に現れるマヨラナ粒子を持つ新しい量子状態を伴う超伝導である。その代表的な候補物質として $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ と Pb/TlBiSe_2 が知られているが、超伝導転移温度 T_C はそれぞれ3.8 Kと10 Kとまだ低い。一方、最近トポロジカル超伝導体として報告されている $\text{Fe}(\text{Se,Te})$ は、最も高い超伝導転移温度 ~ 14 Kを持つ。また、これはファンデルワールス物質であるため、表面への吸着以外に、層間へ原子や分子のインターカレーションも期待される。我々は、 $\text{Fe}(\text{Se,Te})$ 結晶を真空中で劈開し、水素やアルカリ金属で修飾することにより、デバイ周波数とキャリア密度を増加させ、 T_C を向上させた。独立駆動4探針プローバーにより電気抵抗を超高真空中でその場測定したところ、水素曝露により T_C は10.2 Kから12.3 Kに上昇した。我々は、条件を最適化することにより、 T_C のさらなる向上を目指している。今後は水素以外の元素修飾による変化を見ることでキャリア密度とデバイ振動数への影響を分離したい。(低温科学研究センターとの共同研究)

トポロジカル結晶絶縁体 SnTe 上での α -Sn 原子層の成長と超伝導の発現

バルク結晶の α -Sn は超伝導体ではないが、数原子層厚の超薄膜にすると PbTe(111) 上で超伝導になると報告されていた。我々はこれを受けて、同じ結晶系で格子定数だけ若干異なるトポロジカル結晶絶縁体 SnTe に注目し、この表面上に数原子層の α -Sn ができればトポロジカル超伝導の候補になると考え研究を行った。まず低温で SnTe の上に Sn を蒸着し、その後アニールをすることで平坦な単結晶の数層 α -Sn が成長できることを見出した。さらに、 α -Sn の層数が 3 を超えるとパウリ限界を超える 2 次元超伝導となることを発見し、その磁場角度依存性から 2 次元性を持つことが分かった。また 3 層厚ではこのバンドは ARPES から確認でき、面内臨界磁場の温度依存性は KLB 理論で説明され、スピン軌道散乱の強い超伝導であることも分かった。また本系はトポロジカル結晶絶縁体と超伝導の接合系となっており、両者のバンドは混成しているため、マヨラナ粒子の発現が期待されるトポロジカル超伝導が実現できる可能性がある。(物質・材料研究機構との共同研究)

Yb インターカレートグラフェンの超伝導と強磁性の発現

グラフェン層間に金属原子をインターカレートすると積層構造および電子構造が大きく変化し、様々な物性を変調できる。Yb 原子をインターカレートしたグラフェンにおいて強磁性が観測されたことを既に当研究室から発表しているが、この系では超伝導の発現も理論的に予測されていた。

SiC 基板上に作製したグラフェンを加熱しながら Yb 原子を蒸着することで Yb をグラフェン層間にインターカレートすることができ、挿入された Yb 原子がグラフェンに対して $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ の周期に配列することを電子回折によって確認した。さらにこの試料に対して超高真空中 *in situ* で電気伝導測定を行ったところ、オンセットの転移温度が 1.6 K の超伝導を観測することに成功した。また、磁場印加によって、Berezinskii-Kosterlitz 転移を確認した。

一方、Yb インターカレートグラフェンの異常ホール効果を *ex situ* で測定した結果、キュリー温度が約 100 K の強磁性を示すことも示されていたが、その原因を探るため、放射光施設 SPring-8 において内殻光電子分光法および光電子回折法の測定を行ったところ、Yb²⁺ のほかに Yb³⁺ の成分が確認され、Yb³⁺ の開殻状態によって強磁性が発現している可能性が示唆された。(奈良先端大学との共同研究)

高濃度ドーブ表面層の電気伝導特性の解析

パワーデバイスの素材として有用なワイドギャップ半導体が近年注目されている。特に SiC は大型単結晶の作成が容易になったこともあり、ダイオード

やトランジスタなどドーピングの単純な半導体としては利用がすすんでいる。IC などより高度なデバイス作成のためには、部分的なドーピングや濃度勾配のあるドーピングなど、複雑なドーピングが必要となるが、SiC は化合物半導体ということもあり、現状では困難である。

ギガフォトン株式会社はレーザー技術を用いて SiC 表面近傍に大量の窒素をドーブすることに成功したが、ドーパントとしての特性は不明であった。我々は、このレーザードーブ SiC の表面近傍の詳細なキャリア輸送特性の測定・解析を行った。高濃度にドーブされた窒素からのキャリアは縮退半導体となるほど高濃度になっており、表面近傍は金属的になっていた。また、キャリアの伝導度は想定よりも 10 倍以上低く、移動度が低下していることが示唆された。(ギガフォトン株式会社との共同研究)。

ホウ化水素フレークの電気伝導測定

我々はホウ化水素 (HB) シートの電気伝導性に注目し、伝導測定を試みている。HB シートは MgB₂ から Mg を水素置換して合成するので、大きさ数 μm 程度の微小なフレークとなる。このため、通常のプローバーや伝導測定装置では測定できない。当研究室が保有する 4 探針プローバーをもちいることで、この微小なフレークの電気伝導測定が可能となった。本年度はフレークの最適な滴下条件を探し、伝導性を示すフレークが存在することを確認した。来年度はフレークの多探針測定を行い、さらに極低温まで冷却することでその伝導メカニズムや超伝導性を検証する。(物性研究所との共同研究)。

テラヘルツ光を用いたサイクロトロン共鳴による BiSb 薄膜結晶の物性研究

Bi は固体物理学の発展と共にあったほどに研究の歴史の長い物質であるが、今なお興味の尽きない物質である。Bi 薄膜は内部の伝導電子の閉じ込め効果によって量子井戸現象を示し、膜厚によりバンド構造が半金属・半導体転移を起こすことが報告された。また、その表面電子状態は、ラッシュバ効果によってスピン分裂していることを当研究室で示した。また Sb との合金化によってバンド構造が複雑に変化し、トポロジカル絶縁体にも転移することが知られている。そこで、Si(111) 面に成長した Bi_{1-x}Sb_x(111) 単結晶薄膜での強磁場・テラヘルツ光を用いたサイクロトロン共鳴により、各バンド構造でのキャリアの正確な有効質量やバンド構造の変化を明らかにする研究を行っている。昨年度の分光実験では Bi 単結晶膜では初めてとなる明瞭な吸収が観測され、磁場依存するエネルギーバンドの重なりを示唆する結果が得られた。現在ではさらに膜厚、Sb 置換量を細かく振った試料群を作成し終え、膜厚・Sb 置換による価電子帯・伝導帯の重なりの変化を追っている。(物質・材料研究機構との共同研究)

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2次元系の超伝導を発見してきたが、近年注目される非従来型超伝導を観察・解明するには伝導測定だけでは不十分である。そこで、伝導測定と同時にトンネル分光測定、さらには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、装置の大幅改造を始めている。本年度はショット雑音測定のために必要な事項を洗い出し、その製作および部品の発注を開始した。具体的には内部除振機構の追加、マイクロ4端子ホルダーの改良、移送機構改良を製作した。来年度は、ショット雑音測定用「ライデンアンプ」を設置して装置全体の組み立てを行い、トンネル分光測定およびショット雑音測定を実現する予定である。

スピン検出プローブの開発

スピンを利用する技術分野であるスピントロニクスの研究が盛んであるが、現在は、微細加工技術によって基板上にスピン流の生成回路や測定回路を作りこむ手法が主流である。しかし、この手法では微細加工で作成できる試料しか測定できず、トポロジカル絶縁体など特異なスピン伝導特性を持つことが期待される試料を測定することが困難な場合も多い。このため、本研究室では、原子間力顕微鏡 AFM や走査トンネル顕微鏡 STM、多端子プローバーに搭載でき、任意の場所でスピン流の生成・測定ができるスピン注入プローブの開発を行ってきた。本年度は、去年に引き続きスピン圧を直接測定できるプローブの製作を行っている。空間分解能とスピン分解能を両立する素子としてグラフェンが候補にあり、微細加工に耐えるグラフェン素子の製作を行った。

超高真空中 *in situ* 偏光制御中赤外光照射系の開発

電子のスピンを利用するスピントロニクスに光を用いる手法がある。円偏光はスピン角運動量を持つため、円偏光の右/左回りに応じて物質中の電子をスピン選択的に励起することができるので、円偏光を用いた手法は近年盛り上がりを見せている。本研究室では超高真空装置内で試料を作成し、*in situ* 測定する手法を取っているが、光を真空装置内に導入する際にビューポートにより円偏光が僅かに歪んでしまう。そこで円偏光生成機構を、ビューポートを介さず真空装置へと接続するためのチャンバーと光学系を製作し、既存のチャンバーに接続した。この設計により研究室に既存のレーザー波長 635 nm、1550 nm に加えて、2~9 μm と広い波長範囲の中赤外光に対応した円偏光が生成でき、様々な励起エネルギーに応じた円偏光誘起光電流が測定できると期待

できる。この波長域は、トポロジカル絶縁体のバルクギャップやラッシュバ効果の典型的なエネルギー分裂幅である 100~300 meV をカバーしており、エネルギー分裂幅に対応した波長での高効率なスピン生成が期待できる。現在は組み立てと動作確認がほぼ完了したが、光学系チャンバー内の真空度が不十分なので、その改善に努めている。2024 年度内には本装置を稼働させて実験する予定である。

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われた。

- ・日本学術振興会 科研費 基盤研究 (A) 「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 学術変革領域研究 (A) 「軽元素添加によって実現する界面超伝導の転移温度高温化」(代表 秋山了太)
- ・日本学術振興会 科研費 挑戦的研究 (萌芽) 「グラフェンを用いたスピン圧検出プローブとそれを用いたスピン実空間観察手法の開発」(代表 保原麗)
- ・日本学術振興会 科研費 挑戦的研究 (萌芽) 「スピン輸送現象の実空間その場観察手法の開発」(代表 保原麗)

<受賞>

- [1] 谷内 息吹; *Helicity-dependent photocurrent induced by circularly polarized infrared light at atomic bilayer superstructure $\text{Si}(111)-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(\text{Te}, \text{Sn})$* , 2023 年日本表面真空学会学術講演会講演奨励賞スチューデント部門, 2023 年 12 月 8 日.
- [2] 谷内 息吹; 原子層表面超構造 (Te, Sn)/ $\text{Si}(111)$ における赤外円偏光誘起ヘリシティ依存光電流, 日本物理学会第 78 回年次大会学生優秀発表賞 (領域 4), 2023 年 10 月 27 日.
- [3] 佐藤 瞬亮; Yb インターカレートグラフェンの電子構造と電気伝導特性, 日本物理学会第 78 回年次大会学生優秀発表賞 (領域 9), 2023 年 9 月 17 日.
- [4] 長谷川 修司; 超高真空中 4 探針電気伝導計測法の開発と表面・ナノ電子輸送研究, 応用物理学会第 17 回 (2023 年度) フェロー表彰, 2023 年 5 月 11 日.
- [5] 谷内 息吹; 巨大ラッシュバ効果表面超構造合金における円偏光フォトガルバニック効果, 日本表面真空学会関東支部 2023 年度学術講演大会講演優秀賞, 2023 年 4 月 14 日.

<報文>

(原著論文)

- [6] Y. Endo, M. Li, R. Akiyama, X. Yan, C. Brandl, J. Z. Liu, R. Hobara, S. Hasegawa, W. Wan, K. S. Novoselov and W.-X. Tang: *Dynamic topological domain walls driven by lithium intercalation in graphene*, *Nature Nanotechnology* **18**, 1154-1161 (Jul, 2023).
- [7] T. Kobayashi, Y. Toichi, K. Yaji, Y. Nakata, Y. Yaoita, M. Iwaoka, M. Koga, Y. Zhang, J. Fujii, S. Ono, Y. Sassa, Y. Yoshida, Y. Hasegawa, F.

Komori, S. Shin, S. Ichinokura, R. Akiyama, S. Hasegawa, T. Shishidou, M. Weinert, K. Sakamoo: *Revealing the hidden spin-polarized bands in a superconducting Tl bilayer crystal*, Nano Letters **23** (16), 7675-7682 (Aug, 2023).

- [8] I. Taniuchi, R. Akiyama, R. Hobara, and S. Hasegawa: *Surface Circular Photogalvanic Effect in Tl-Pb Monolayer Alloys on Si(111) with Giant Rashba Splitting*, under review (<https://arxiv.org/abs/2308.02485>).

(総説)

- [9] S. Hasegawa: *Surface and Interface Physics Driven by Quantum Materials*, APEX Review, under review.

(国内雑誌)

- [10] 秋山了太: 室温ウェットティング層形成法による原子層レベルで平坦な SnTe(001) 薄膜の成長とその電気伝導測定談話室 (受賞者紹介), 表面と真空 **66** (8), 496 (Aug, 2023).
- [11] 高城: 拓也: 強磁性トポロジカル絶縁体を用いた超薄膜における新奇磁気構造の発見 (談話室: 新博士登場), 表面と真空 **67** (3), 132 (Mar, 2024).

(その他)

- [12] 長谷川修司: 全国物理コンテスト「物理チャレンジ」から国際物理オリンピックへ, じっしょう理科資料 **93**, 20-23 (実教出版, April, 2023).
- [13] 長谷川修司: 物理学会のほどよいサイズは? 一会長就任にあたりー, 日本物理学会誌 **78** (4), 177, 巻頭言 (April, 2023).
- [14] 長谷川修司: ベテラン会員諸氏, 大会では英語で一般講演をしよう!, 日本物理学会誌 **79** (1), 1, 巻頭言 (Jan, 2024).
- [15] 長谷川修司: 基礎講座: 今聞こう、魅力的な予算申請の執筆方法, 応用物理、印刷中 (Jul, 2024).

(学位論文)

- [16] GUO Yuxiao: *Fabrication of α -Sn(111)/SnTe(111) heterostructures and exploration of their electronic band structures and electrical transport properties* (博士論文).
- [17] 皆川遼太郎: トポロジカル結晶絶縁体 $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ ベースの磁性ヘテロ接合における構造・電気伝導・磁気特性 (修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [18] S. Hasegawa: *Quantum materials, their structures, electronic states, and electronic transport*, MPI-UBC-UTokyo Workshop 2023, 物性研 (柏), 2023 年 12 月 13 日.

- [19] R. Akiyama: *Superconductivity emergence by atomic intercalation of Ca and Yb into few-layer graphene*, The 9th TsinghuaU - UTokyo Joint Symposium on Trans-scale Materials Science, (Nov. 9, 2023). Hongo, University of Tokyo, 2023 年 11 月 9 日.

- [20] S. Hasegawa: *Graphene with Intercalation of Foreign Atoms*, The 3rd IBS Conference on Surface Atomic Wires and The 2nd IBS-RIKEN STM Workshop, Gyeongju (Korea), 2023 年 8 月 23 日.

- [21] S. Hasegawa: *Quantum Materials boost quantum technology* (Plenary), International Workshop on Advanced Quantum Materials 2023, Aix-Marseille University, Marseille (France), 2023 年 6 月 7 日.

一般講演

- [22] Y. Endo, X. Yan, M. Li, R. Akiyama, C. Brandl, J. Z. Liu, R. Hobara, S. Hasegawa, W. Wan, K. S. Novoselov, and W.-X. Tang: *Graphene with Intercalation of Li Atoms*, International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices in Winter 2024 (ALC-W 2024), Furano (Japan), 2024 年 1 月 19 日.

- [23] S. Shimizu, R. Akiyama, R. Hobara, S. Hasegawa: *Effect on superconducting transition temperature of topological superconductor $\text{Fe}(\text{Se}, \text{Te})$ modified with light elements*, MPI-UBC-UTokyo Workshop 2023, 物性研 (柏), 2023 年 12 月 12 日.

- [24] S. Sato, R. Akiyama, R. Minakawa, Y. Miyai, Y. Kumar, A. Kumar, J. Jehong, S. Ideta, K. Shimada, S. Hasegawa: *Emergence of superconductivity in few-layer Yb-intercalated graphene*, MPI-UBC-UTokyo Workshop 2023, 物性研 (柏), 2023 年 12 月 12 日.

- [25] I. Taniuchi, R. Akiyama, R. Hobara, S. Hasegawa: *Circular photogalvanic effect in monolayer surface superstructures with huge Rashba-splitting*, International Conference on Complex Orders in Condensed Matter: Aperiodic order, local order, electronic order, hidden order, Evian (France), 2023 年 9 月 29 日.

- [26] S. Sato, R. Akiyama, R. Minakawa, J. Jung, R. Hobara, S. Hasegawa: *Electronic structure and electronic transport properties of Yb-intercalated epitaxial graphen*, International Conference on Complex Orders in Condensed Matter: Aperiodic order, local order, electronic order, hidden order, Evian (France), 2023 年 9 月 28 日.

- [27] R. Akiyama, S. Kaneta-Takada, S. Ohya, S. Shimizu, H. Horiuchi and S. Hasegawa: *Atomically flat SnTe(001) thin films made by the room temperature wetting layer method and its electrical transport properties*, International Conference on Complex Orders in Condensed Matter: Aperiodic order, local order, electronic order, hidden order, Evian (France), 2023 年 9 月 27 日.

(国内会議)

招待講演

- [28] 長谷川修司: 量子物質表面の構造・電子状態・電子輸送, 表面界面スペクトロスコーピー 2023, 物性研究所(柏), 2023 年 12 月 21 日,.

一般講演

- [29] Y. Endo, X. Yan, M. Li, R. Akiyama, C. Brandl, J. Z. Liu, R. Hobara, S. Hasegawa, W. Wan, K. S. Novoselov, W.-X. Tang: *Real-time LEEM observation of Li-intercalation into graphene*(領域 9), 日本物理学会春季大会(オンライン), 2024 年 3 月 19 日.
- [30] 佐藤 瞬亮, 秋山 了太, 鄭 帝洪, 宮井 雄大, Yogendra Kumar, Amit Kumar, 皆川 遼太郎, 出田 真一郎, 島田 賢也, 長谷川 修司: *Yb インターカレートグラフェンにおける超伝導の発現とその原子・電子構造*(領域 4), 日本物理学会 2024 年春季大会(オンライン), 2024 年 3 月 18 日.
- [31] 清水 翔太, 秋山 了太, 保原 麗, 藤井武則, 上 蘭 優, 大塚 匠, 渡辺 孝夫, 長谷川 修司: *トポロジカル超伝導体 $Fe(Se, Te)$ 薄片への軽元素修飾による影響*, 超秩序構造科学第 7 回成果報告会, 岡山大学 50 周年記念館(ハイブリッド), 2024 年 3 月 4 日.
- [32] 清水 翔太, 秋山 了太, 保原 麗, 長谷川修司: *トポロジカル超伝導 $Fe(Se, Te)$ 劈開薄片への軽元素修飾による影響*, 第 15 回低温科学研究センター交流会, 武田先端知ビル(東京大学), 2024 年 2 月 16 日.
- [33] 谷内息吹, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司: *原子層表面超構造 $(Tl, Sn)/Si(111)$ における赤外円偏光誘起ヘリシティ依存光電流*, 第 15 回低温科学研究センター研究交流会, 武田先端知ビル(東京大学), 2024 年 2 月 16 日.
- [34] 谷内息吹: *原子層表面超構造 $Tl, Sn/Si(111)$ における赤外円偏光誘起ヘリシティ依存光電流*, 表面界面スペクトロスコーピー 2023, 物性研究所(柏), 2023 年 12 月 20 日.
- [35] 佐藤瞬亮, 秋山 了太, 皆川 遼太郎, 宮井 雄大, Yogendra Kumar, Amit Kumar, 鄭 帝洪, 出田 真一郎, 島田 賢也, 長谷川 修司: *Yb インターカレートグラフェンにおける超伝導の発現*, 表面界面スペクトロスコーピー 2023, 物性研究所(柏), 2023 年 12 月 20 日.
- [36] 谷内息吹, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司: *原子層表面超構造 $(Tl, Sn)/Si(111)$ における赤外円偏光誘起ヘリシティ依存光電流*, ISSP ワークショップ「表面界面スペクトロスコーピー 2023」, 東京大学物性研究所, 2023 年 12 月 20 日.
- [37] 清水 翔太, 秋山 了太, 保原 麗, 長谷川修司: *トポロジカル超伝導 $Fe(Se, Te)$ 劈開薄片への軽元素修飾による影響*, ISSP ワークショップ, 東京大学物性研究所, 2023 年 12 月 20 日.
- [38] 長谷川修司: *グラフェンインターカレーションによる物性発現*, 令和 5 年度東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会『量子物質の制御と機能開拓およびそのデバイス応用』, 奥州秋保温泉(仙台市), 2023 年 10 月 27 日.

- [39] 宇佐見康継, 妹川要, 納富良一, 柿崎弘司, 保原麗, 長谷川修司: *レーザードーピングによる n 型 4H-SiC の低コンタクト層形成*, 第 84 回応用物理学会秋季講演会, 熊本城ホール, 2023 年 9 月 21 日.

● 2023 年日本表面真空学会学術講演会 JVSS 2023, 2023 年 10 月 31 日 ~ 11 月 2 日, 名古屋国際会議場.

- [40] I. Taniuchi, R. Akiyama, R. Hobara, S. Hasegawa: *Helicity-dependent photocurrent induced by circularly polarized infrared light at atomic bilayer superstructure $Si(111)-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(Tl, Sn)$* , 11 月 2 日.
- [41] S. Shimizu, R. Akiyama, R. Hobara, S. Hasegawa: *Effect of modifying with light elements on properties of a topological superconductor $Fe(Se, Te)$* , 10 月 31 日.
- [42] Y. Guo, R. Akiyama, T. Konoike, S. Ichinokura, Y. Hattori, T. Takashiro, R. Hobara, T. Terashima, T. Hirahara, S. Uji, S. Hasegawa: *Two-dimensional superconductivity in $\alpha-Sn(111)/SnTe(111)$ heterostructures*, 10 月 31 日.
- [43] Y. Endo, X. Yan, M. Li, R. Akiyama, C. Brandl, J. Z. Liu, R. Hobara, S. Hasegawa, W. Wan, K. S. Novoselov, W.-X. Tang: *Topological domain walls induced by lithium intercalation in graphene*, 10 月 31 日.
- [44] R. Minakawa, R. Akiyama, Y. Guo, R. Hobara, S. Hasegawa: *Magnetism and electrical transport properties of heterostructures with topological crystalline insulator $Pb_xSn_{1-x}Te$ and magnetic layer $Cr_x(Bi_{1-y}Sb_y)_{2-x}Te_3$* , 10 月 31 日.
- [45] S. Sato, R. Akiyama, R. Minakawa, Y. Miyai, Y. Kumar, A. Kumar, J. Jung, S. Ideta, K. Shimada, S. Hasegawa: *Electronic structure and electrical transport properties of Yb-intercalated epitaxial graphene*, 11 月 1 日.

● 日本物理学会第 78 回年次大会, 2023 年 9 月 16 日 ~ 19 日, 東北大学.

- [46] 遠山晴子, 秋山了太, 一ノ倉聖, 橋爪瑞葵, 飯森拓嗣, 遠藤由大, 保原麗, 松井朋裕, 堀井健太郎, 佐藤瞬亮, 平原徹, 小森文夫, 長谷川修司: *SiC 基板上的 Ca インターカレートグラフェンが示す 2 次元超伝導: グラフェンと基板の界面に注目して*(領域 4), 9 月 16 日.
- [47] 皆川 遼太郎, 秋山了太, 郭宇嘯, 長谷川修司: *トポロジカル結晶絶縁体 $Pb_xSn_{1-x}Te$ と磁性層 $Cr_x(Bi_{1-y}Sb_y)_{2-x}Te_3$ のヘテロ接合の磁性と電気伝導特性*(領域 4), 9 月 16 日.
- [48] 谷内息吹, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司: *原子層表面超構造 $(Tl, Sn)/Si(111)$ における赤外円偏光誘起ヘリシティ依存光電流*(領域 4), 9 月 19 日.
- [49] 佐藤瞬亮, 秋山了太, 皆川遼太郎, 宮井雄大, Yogendra Kumar, Amit Kumar, 鄭帝洪, 出田真一郎, 島田賢也, 長谷川修司: *Yb インターカレートグラフェンの電子構造と電気伝導特性*(領域 9), 9 月 16 日.
- [50] 清水翔太, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司: *軽元素修飾したトポロジカル超伝導体 $Fe(Se, Te)$ の超伝導転移温度への影響*(領域 9), 9 月 16 日.

- [51] 末元徹, 五十嵐美樹, 石川真理代, 市原光太郎, 一宮彪彦, 右近修治, 海老崎功, 大嶋孝吉, 大塚洋一, 川村康文, 岸澤真一, 毛塚博史, 小池洋二, 小林一人, 小牧研一郎, 近藤泰洋, 櫻井一充, 佐々田博之, 真梶克彦, 鈴木功, 武士敬一, 西野友年, 長谷川修司, 林壮一, 深津晋, 松本益明, 松本悠, 真砂卓史, 三木一司, 水谷紫苑, 味野道信, 山崎詩郎, 吉村勇治: 物理チャレンジ 2023 報告⑧: 第 2 チャレンジ実験問題 (領域 13), 9 月 17 日.
- [52] 松本益明, 東辻浩夫, 栗原進, 吉岡大二郎, 上杉智子, 大原仁, 岡部豊, 興治文子, 金子朋史, 柴橋博資, 杉山忠男, 田中忠芳, 中西秀, 並木雅俊, 鈴木功, 佐藤誠, 安藤静敏, 毛塚博史, 近藤泰洋, 斎藤輝文, 佐藤杉弥, 真梶克彦, 末元徹, 中屋敷勉, 長谷川修司, 光岡薫, 竹中涼: アジア物理オリンピック 2023 モンゴル大会報告 (領域 13), 9 月 17 日.
- [53] 東辻浩夫, 栗原進, 吉岡大二郎, 上杉智子, 大原仁, 岡部豊, 興治文子, 金子朋史, 柴橋博資, 杉山忠男, 田中忠芳, 中西秀, 並木雅俊, 鈴木功, 佐藤誠, 安藤静敏, 毛塚博史, 近藤泰洋, 斎藤輝文, 佐藤杉弥, 真梶克彦, 末元徹, 中屋敷勉, 長谷川修司, 松本益明, 光岡薫, 吉見光祐: 国際物理オリンピック 2023 日本大会報告 (領域 13), 9 月 17 日.
- [54] 谷内息吹, 秋山了太, 保原例, 長谷川修司: 巨大ラッシュバ効果表面超構造合金における円偏光フォトガルバニック効果, 日本表面真空学会関東支部 2023 年度学術講演大会 (オンライン), 2023 年 4 月 14 日.
- [55] 清水翔太, 秋山了太, 保原例, 長谷川修司: 軽元素修飾したトポロジカル超伝導体 $Fe(Se, Te)$ の超伝導転移温度への影響, 日本表面真空学会関東支部 2023 年度学術講演大会 (オンライン), 2023 年 4 月 14 日.
- (セミナー)
- [56] 秋山了太: 電気を通すか、通さないか、それが問題だ, 第 36 回 東京大学理学部 公開講演会「理学が拓く世界」, 小柴ホール (東京大学), 2024 年 3 月 8 日.
- [57] 秋山了太: グラフェンへの原子インターカレーションが引き起こす物理、2023 年度駒場物性セミナー、東京大学総合文化研究科物理部会、東京大学駒場キャンパス (ハイブリッド), 2024 年 1 月 26 日.
- (講義等)
- [58] 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), 2023 年 5 月 20, 27 日.
- [59] 長谷川修司: 固体物理 II (学部 4 年生), 2023 年度 S セメスター (本郷) .
- [60] 長谷川修司, 秋山了太, 佐藤瞬亮 (TA), 谷内息吹 (TA), 清水翔太 (TA): 物理学実験 II (学部 3 年生) 電子回折, 2023 年度 A セメスター (本郷) .
- (アウトリーチ)
- [61] 長谷川修司, 谷内息吹: 東大の研究室をのぞいてみよう: 物性物理学、とくに表面物理学の紹介と実験室見学, 理学部 1 号館, 2024 年 3 月 25 日.
- [62] 長谷川修司: プレチャレンジ: 実験レポートの書き方と LED 特性の測定実験, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 栃木県立大田原高等学校 (栃木), 2024 年 3 月 3 日.
- [63] 長谷川修司: 物理チャレンジ対策講座 (女子プレチャレンジ): 実験レポートの書き方と LED 特性の測定実験, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 栃木県立宇都宮女子高等学校 (栃木), 2024 年 2 月 3 日.
- [64] 長谷川修司, 佐藤瞬亮, 清水翔太: 中国清華大学物理学 学部学生見学, 理学部 1 号館, 2024 年 1 月 29 日.
- [65] 研究室総出: 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, 2023 年 11 月 28 日.
- [66] 研究室総出: サクラサイエンス研究室訪問 (インドの学部学生), 理学部 1 号館, 2023 年 9 月 28 日.
- [67] 研究室総出: 福井県立敦賀高校 模擬授業と研究室見学, 理学部 1 号館, 2023 年 9 月 28 日.
- [68] 研究室総出: 茨城県立土浦第一高校 模擬授業と研究室見学, 理学部 1 号館, 2023 年 8 月 4 日.
- [69] 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, 2023 年 8 月 3 日.
- [70] 研究室総出: 明秀学園日立高校 模擬授業と研究室見学・懇談, 理学部 1 号館, 2023 年 5 月 17 日.

4.2 岡本 研究室

本研究室では、低次元電子系等における新奇な物理現象の探索と解明を行っている。 ^3He - ^4He 希釈冷凍機を用いた 20 mK までの極低温および 15 T までの強磁場環境において、さまざまな独自技術により新しい自由度を持たせた研究を行っている。

4.2.1 劈開表面に形成された 2 次元電子系

量子ホール効果などの 2 次元系における重要な輸送現象は、主としてデバイス中に閉じ込められた界面 2 次元系に対して行われてきた。一方、InAs や InSb の清浄表面に金属原子などを堆積させることにより表面に形成される 2 次元電子系は、表面に堆積させる物質の自由度や走査型プローブ顕微鏡との相性の良さなどから非常に大きな可能性を持つ。我々のグループでは、p 型 InAs および InSb を超高真空中で劈開して得られた清浄表面に金属を付着させて誘起した 2 次元電子系に対する面内電気伝導の測定手法を確立し、整数量子ホール効果などの現象の観測に成功している。

半導体劈開表面に形成された 2 次元電子系を用いた新奇な磁性不純物効果の探索

我々の研究室では吸着原子が誘起する表面 2 次元電子系に対して、走査トンネル分光顕微鏡 (STM/S)

による観測と電気伝導測定を同時に行える装置を用いて、微視的・巨視的な側面から量子ホール効果の研究を行ってきた。最近では、吸着原子に磁性体を用いて、スピンに絡む新奇な物理現象の探索を行っている。磁性不純物を吸着させる半導体表面に高電子移動度をもつ2次元電子系を作成しているため、STM/Sを用いた測定からスピンの情報を含んだトンネル電流を観測することが可能であると考えている。これまでFeやCoなどを用いた2次元電子系の作成に成功し、STM/Sによる磁性不純物の空間分布の観測に成功している。今後、局在スピン(磁性不純物)と伝導電子、局在スピン間の交換相互作用をトンネル分光法により実空間で精密に測定することにより、新奇な磁気物理現象の観測を目指す。

4.2.2 金属超薄膜の超伝導

近年、我々のグループでは、GaAs絶縁基板の劈開表面上に形成された金属超薄膜に対する研究を行っている。劈開表面の平坦さを反映して、PbおよびInに対して単原子層領域での超伝導が観測されている。絶縁体基板上に形成された単原子層膜は、完全な2次元系というだけではなく、空間反転対称性が破れているという点からも魅力がある系だと考えている。

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

面内磁場印加可能な極低温走査トンネル顕微鏡の開発

半導体表面に形成された単原子層超伝導体は半導体基板と真空に挟まれているため、2次元面に対して垂直方向にポテンシャル勾配が生じ、空間反転対称性が破れている。さらに、Pbなどの重い原子を用いた場合、強いスピン軌道相互作用により大きなRashba効果が生じ、スピン方向に依存してフェルミ面が分裂した系が実現すると考えられている。このような系において、強い面内磁場を印加した場合、有限の運動量をもったクーパー対が実現する可能性がある。我々は、このFFLO状態に類する超伝導状態の実空間での直接観測を目指している。現在、ヘリウム3冷凍機温度で動作する面内磁場印加可能な走査トンネル顕微鏡の開発を行っている。

GaAs 劈開表面上に形成された超伝導薄膜における非相反伝導に関する研究

空間反転対称性と時間反転対称性が破れた系では電流-電圧特性が電流の向きに依存する非相反伝導が期待される。通常、この効果は比較的小さな補正項であるが、超伝導物質を用いた場合、非常に大きな非相反伝導が観測されることが知られている。また、この効果は超伝導整流デバイスなどへの応用面から

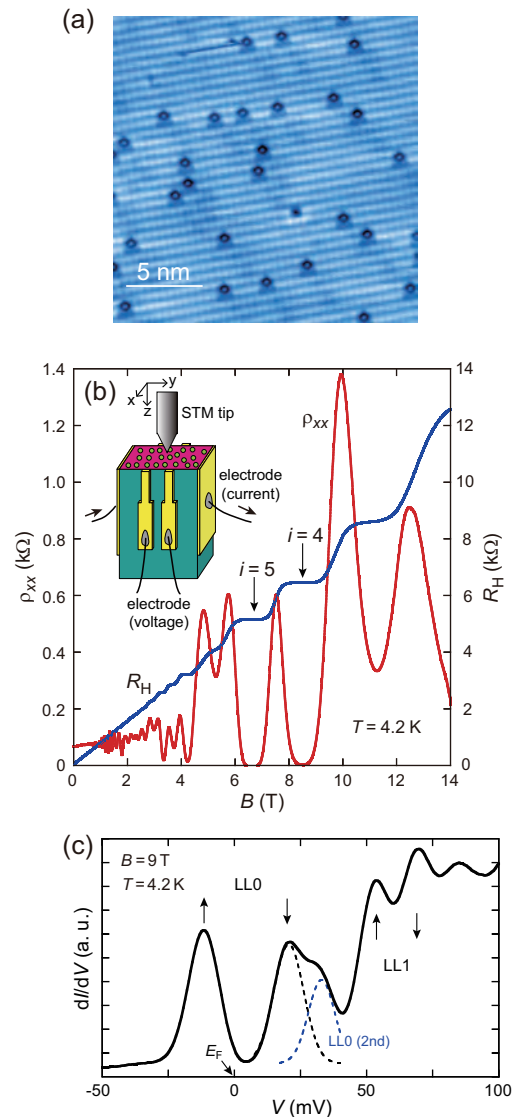


図 4.2.1: (a) InSb 劈開表面に鉄を 0.01 ML つけた場合の STM 像 ($20 \times 20 \text{ nm}^2$)。黒い輪郭を持った丸が Fe であり、明るい縞模様が Sb の格子である。(b) 4.2 K における縦抵抗率とホール抵抗の磁場依存性。明瞭な整数量子ホール効果が観測されている。(c) 走査トンネル分光の測定例。微分コンダクタンスから 2 次元電子系の状態密度を調べることができる。ここでは、スピン分裂したランダウ準位が観測されている。

も注目されている。我々は近年研究してきた GaAs 劈開表面上に作成された超伝導薄膜において、垂直(面直)磁場下および平行(面内)磁場下で非相反伝導が生じるか検証を行った。

垂直磁場下での研究

超伝導薄膜に垂直磁場を印加した場合には渦糸（ボルテックス）の運動により非相反伝導が生じる可能性がある。本研究では超伝導薄膜を作成する GaAs 基板のエッジに非対称な構造を作成して空間反転対称性を破った。鉛とアルミの超薄膜（0.3 – 2 nm 程度）に対して垂直磁場下で電気伝導測定を行うと、第二高調波から得られる電気抵抗が垂直磁場の正負に対して反対称になることがわかった。さらに、この電気抵抗は超薄膜の超伝導転移温度以下で観測されることがわかった。このことから、GaAs 劈開表面上に作成された超薄膜においても超伝導により増強された非相反伝導が生じている可能性が高いと考えられる。現時点においては、試料端より渦糸が侵入する際、試料端の形状により異なるポテンシャルエネルギーを感じるため、侵入方向に依存したボルテックスラチェット効果による非相反伝導が生じていると考えている。さらに今年度はこの整流効果の実用性を調べるために、超伝導薄膜に流す電流の値を変化させて測定を行った。その結果、1 μ A 程度までの電流を整流できていることがわかった。超伝導ダイオードなどの実用面を考えるとまだ十分な値とは言えないが、今後、空間反転対称性を破る構造の工夫や超伝導物質の改良により大きな整流効果をもつデバイスの開発を目指す予定である。

平行磁場下での研究

半導体基板の表面に作成された超伝導薄膜は半導体基板と真空に挟まれているため、鉛直方向に空間反転対称性が破れている。さらに、鉛などの重い原子を用いた場合、強いスピン軌道相互作用により大きなラッシュバ効果が期待される。このような試料に対して電流の方向に直交するように平行磁場を印加した場合、電流の方向若しくは磁場の方向に依存した非相反伝導が期待される。今年度は、鉛単体、鉛とビスマスとインジウムの積層構造をもつ超薄膜に対して測定を行った。現時点においては超伝導臨界電流値における非相反効果は現れていない。今度、イオン液体などを用いて強い電場勾配をかける手法を用いて非相反効果の実現とその検出を目指す予定である。また、従来の電気伝導測定に加えて、トンネル分光による測定も実施する予定である。ラッシュバスピン軌道相互作用により生じる非従来型超伝導では超伝導ギャップ構造が非等方的になる可能性がある。この場合、電気伝導測定では特出した異常が現れなくとも、トンネル分光測定には超伝導ギャップ構造を反映した特異なスペクトルが検出される可能性がある。試料作成方法のみならず、多様な測定方法により非従来型超伝導の実現と非相反伝導の検出を目指す予定である。

Pb 超薄膜の超伝導と表面磁性体の近藤効果

Pb 超薄膜に磁性体を吸着あるいは混入させると超伝導転移温度 T_c は減少する。近藤温度 T_K が T_c よりも十分に低い場合には、磁性不純物は自由磁気モーメントとして振る舞い、磁気散乱によって超伝導を破壊する。例えば、磁性不純物として Ce を用いた庭田らの実験では、磁気散乱が強磁場で抑制されることに

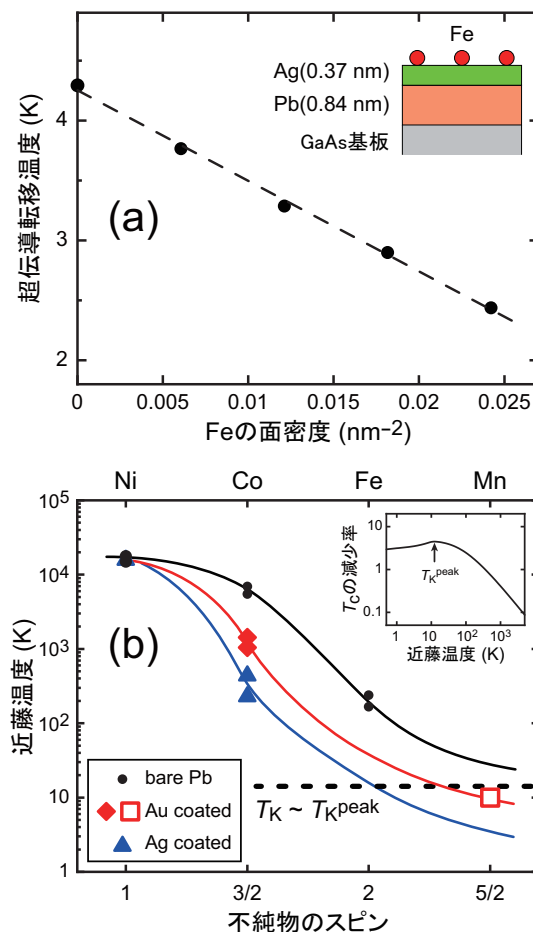


図 4.2.2: (a) Pb 超薄膜の表面を Ag でコートした後に Fe を堆積させた場合の超伝導転移温度 T_c の変化。(b) 磁性不純物量に対する T_c の減少率を理論曲線（一例を挿入図に示す）と比較することにより得られた近藤温度 T_K 。3d 磁性金属のスピンに対してプロットしている。黒は Pb に磁性体を直接乗せた場合、赤と青は Pb 超薄膜表面を 1.5 原子層程度の Au または Ag でコートした後に磁性体に乗せた場合の結果である。

よる磁場誘起超伝導が観測されている（PRL2017）。一方、 $T_K \gg T_c$ の場合には、近藤一重項が形成され磁性体の磁気モーメントは消失し、クーパ対を形成する電子間の実効的な斥力が対破壊の原因となると考えられている。

図 4.2.2(a) に、Ag でコートした Pb 超薄膜に Fe を段階的に蒸着した場合の結果を示す。この例のように T_c は磁性不純物の蒸着量に対して直線的に減少するが、その傾きは磁性不純物の種類や Au や Ag のコーティングによって大きく変わることが明らかになった。実験から得られた傾きを、図 4.2.2(b) の挿入図に示したような計算と比較することにより、理

論が信頼できる $T_K \gg T_c$ では T_K を決定することができる。その結果を●◆▲として図 4.2.2(b) に示した。また、 $T_K \lesssim T_c$ での磁性不純物量に対する T_c の減少率や T_c の平行磁場依存性からの見積もり(□としてプロット)から推定されるおおよその振る舞いを曲線で示した。磁性不純物を Pb 超薄膜に直接堆積させた場合と Pb 超薄膜の表面を 1.5 原子層程度の Au または Ag で覆った場合のいずれでも、 T_K は磁性原子のスピン大きさ S に対して急激に減少することが明らかになった。これは Hund 結合によって近藤一重項の形成が抑制された結果として理解できる。貴金属などをホストとしたバルクの希薄磁性合金でも同様の T_K の S 依存性が知られている。また、Pb 超薄膜の表面を 1.5 原子層程度の Au または Ag で覆った後に Co または Fe を蒸着すると、直接蒸着した場合よりも T_K が大きく減少する。磁性体に隣接する原子が Pb よりも価数が小さな金属に置き換わった結果として理解することができる。

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。ナノデバイスへの応用面での期待が大きいことなどから一流誌に掲載された報告も多いが、その妥当性に疑問を持たざるを得ない報告も少なからずある。今後、同一の磁性体とホストの組み合わせに対して、 T_c の変化より見積もった T_K との比較を行う。

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領域にわたる広いエネルギー範囲の先端光源開発、非線形レーザー分光法、超高速分光法などの観測技術の開発を並行して進めている。本年度は、以下に挙げる研究を進めた。

4.3.1 超伝導体

銅酸化物高温超伝導体の光誘起超伝導

銅酸化物高温超伝導体は電荷やスピン、格子の自由度が複雑に絡み合った系であり、その相図上には超伝導と並んで電荷・スピン密度波といった多彩な秩序相が現れる。これらの秩序と超伝導は密接に関係していると考えられており、その関係性を理解することは高温超伝導の機構解明に向けた重要課題の一つである。特に一部のランタン系銅酸化物において見られる電荷・スピン密度波はストライプ秩序と呼ばれて

おり、超伝導に対する競合秩序として知られている。近年、このストライプ秩序を示す銅酸化物高温超伝導体に対して強い光パルス照射すると、超伝導転移温度以上であるにも関わらず超伝導の発現を示唆する信号が得られることが報告され、「光誘起超伝導」現象として関心を集めている。我々はこの現象の観測を通して電荷密度波と超伝導との関係性を明らかにすることを目的に研究を続けており、ストライプ秩序を示す代表物質の 1 つである $\text{La}_{1.6-x}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LNSCO)、および長距離の電荷秩序相をもたない $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LSCO) を対象に、光励起状態の検証を進めている。

昨年度までの研究により、LNSCO を超伝導転移温度以上で光励起すると、試料 c 軸方向のテラヘルツ帯反射率スペクトルにプラズマエッジが現れることが確認されていた。特にそのプラズマ周波数は、LSCO が超伝導相で特徴的に示すジョセフソンプラズマ共鳴の周波数と一致しており、LNSCO の光励起状態で現れるプラズマエッジが超伝導の性質を反映していることが強く示唆された。この現象はストライプ秩序が発達する温度域でのみ観測されたため、ストライプ秩序の光による破壊で生じた現象であると考えられる一方で、ストライプ秩序の性質が光励起状態に与える影響については明らかになっていなかった。

本年度は光誘起プラズマエッジとストライプ秩序の関係性をより詳細に調べるため、長距離相関のストライプ秩序を示す LNSCO に加えて、短距離の電荷密度波状態しかもたない LSCO も対象に、それぞれ 3 種類のドーピング濃度の試料を用いて光励起状態の系統調査を行った。LNSCO ではいずれのドーピング濃度の試料においても光誘起プラズマエッジが観測された。そのプラズマ周波数は対応するドーピング濃度の LSCO におけるジョセフソンプラズマ共鳴と一致しており、この結果は光誘起プラズマエッジがクーパー対のジョセフソントンネリングによって生じていることを強く示唆する。さらに同様の実験を超伝導転移温度以上の LSCO に対しても行ったところ、長距離のストライプ秩序を持たないにも関わらず LNSCO と同様の光誘起プラズマエッジを示すことが明らかになった。このことは、光誘起プラズマエッジの発現に長距離なストライプ秩序は必ずしも必要ないことを示しており、ランタン系に限らず一般の銅酸化物高温超伝導体でも光誘起プラズマエッジが生じる可能性を示唆するものである。

さらに詳細な解析を行ったところ、LNSCO に比べて LSCO では光励起状態の光学伝導度が低周波側で抑制される振る舞いを示すことが分かった。このスペクトル形状は超流動密度が空間的に不均一になっていると仮定することで説明できることから、LSCO の光励起状態は LNSCO に比べてより不均一性が強いと結論付けられる。このような不均一性は、光励起前に発達していた電荷密度波の相関長が短距離であることに起因すると考えられ、電荷密度波の長さスケールが光励起状態にも反映されていることが示唆される。

鉄系超伝導体 FeSe における低エネルギー集団励起モードの観測

鉄系超伝導体 FeSe は BCS-BEC クロスオーバー領域の超伝導など、さまざまな特異な超伝導状態を示す可能性から多くの注目を集めている物質である。超伝導発現機構や超伝導の性質を理解するうえでは、その秩序変数を明らかにすることが必須であるが、FeSe の超伝導秩序変数については未だ明確な結論には至っていない。特に近年、時間反転対称性の破れた (TRSB) 超伝導状態が実現している可能性が議論されており、最近では μ オンスピン緩和からも TRSB を示唆する結果が得られており、超伝導秩序変数を明らかにすることが重要な課題となっている。時間反転対称性といった超伝導秩序変数の対称性は、その揺らぎに対応する集団励起モードの性質に反映される。その固有エネルギーは超伝導ギャップエネルギーと同程度のテラヘルツ周波数にあることが予想される。我々はこれまで、従来型金属超伝導体に対して、第三高調波発生 (THz-THG) の測定からその集団励起モード、具体的には Higgs モードの観測を行う手法を開拓してきた。そこで、FeSe における集団励起モードの観測からその秩序変数に関する情報を得ることを目的として THz-THG の測定を行った。THz-THG の位相の温度依存性と励起周波数依存性について系統的な測定を行ったところ、超伝導ギャップ 2Δ よりも十分に低エネルギーの位置に、集団励起モードの存在を示唆する共鳴構造があることが明らかになった。この低エネルギーモードの起源を明らかにするため、複素数のギャップ関数を含む 2 ギャップ超伝導モデルを用いて集団励起モードのエネルギーに関するシミュレーションを行った。その結果、ギャップ間の相対位相が $\pi/2$ の場合には、集団励起モードのエネルギーがソフト化し実験で観測されたものと同程度の値になることが明らかとなった。ギャップ間の相対位相が $\pi/2$ である状態は、時間反転対称性の破れた超伝導状態であることに対応しており、FeSe において TRSB 超伝導状態が実現していることを示唆する結果が得られたと考えられる。

高強度テラヘルツ光渦の発生と超伝導 Higgs モード励起への応用

光渦は、自由空間を伝搬する光の横モードの一つであり、螺旋状の波面を持つ。その大きな特徴として、円偏光のヘリシティに由来するスピン角運動量とは独立に、光渦を特徴づけるモード指数 l に比例した軌道角運動量を運ぶ。近年、光渦の軌道角運動量を物性の制御や計測に応用しようという研究が活発になっている。今回我々は、超伝導体における集団励起モードの一つである Higgs モードの励起に光渦を適用することを試みた。Higgs モードの固有エネルギーは超伝導ギャップ 2Δ に等しく、従来型超伝導体の場合、典型的には数 meV のエネルギースケールを持つ。また、Higgs モードは電磁場と線形に結合しないため、その観測は電磁波と非線形相互作用を介することで可能になる。このためには光子エネルギーが数 meV 程度の高強度の THz 波が必要となる。

そこで、高強度のテラヘルツ光渦を発生し、その特性の評価を行った。まず有機非線形結晶 BNA を用いて、電場尖塔値 40 kV/cm 級の高強度 THz 波を発生させた。発生直後の THz 波はガウシアンビームであるが、螺旋位相板と呼ばれる、螺旋階段状の素子を光路上に配置することで、光渦へとモード変換を行うことが可能となる。発生させた THz 光渦は、結像光学系で電気光学サンプリングを行うことで、強度がドーナツ状の分布を持つこと、および位相が方位角方向に一周して 2π 変化することを確認し、螺旋位相板によってガウシアンビームから光渦へとモード変換されることを確かめた。現在は、発生させた THz 光渦を励起光として、s 波超伝導体 NbN を対象とした THz ポンプ-THz プロブ分光を行っている。NbN における Higgs モードは通常のガウシアンビーム THz 波によって系統的な測定が行われてきたが、THz 光渦の軌道角運動量を反映した新奇な非線形光学応答が現れる可能性を模索している。

オンチップテラヘルツ分光系の開発

テラヘルツ分光法は、フォノンやマグノンといった素励起や超伝導ギャップなど、固体における特徴的な低エネルギー応答を測定する手法として広く普及している。しかし、自由空間を伝搬するテラヘルツ波を試料に集光した場合、テラヘルツ波の波長以上の大きさのスポット径 (典型的には 1 mm 以上) となり、分光には非常に大きな面積をもつ試料が必要となる。近年、この問題を回避する手法として、オンチップテラヘルツ分光が注目を集めている。これは、基板上に配線した微細な導波路上を伝播するテラヘルツパルスを用いて分光を行う手法であり、回折限界よりはるかに微小な試料の測定が可能になるため、様々な物性現象の測定に応用され始めている。

我々はこの手法を超伝導体の分光に適用することを目指して装置開発を行っている。典型的な金属超伝導体はテラヘルツ周波数帯のエネルギーに超伝導ギャップをもち、Higgs モードなどの興味深い集団励起モードがテラヘルツパルスによって励起できるが、さらに試料に直流電流を流すことで集団励起の電磁応答を増強できることを我々は過去に報告した。しかし、大面積の試料の実験には大きな電流量が必要になり、また電流の空間不均一性も大きくなる。そこで、微小な超伝導薄膜について制御性の高い実験を行うため、低温下で測定が可能なオンチップテラヘルツ分光系の開発に取り組んだ。半導体基板上に金薄膜による導波線路をパターンし、基板をフェムト秒パルスにより光励起することでテラヘルツパルスを発生させる。さらに導波路を伝播した電圧パルスをもう一つの光パルスを用いて時間分解検出する (図 4.3.3 参照)。図下側に、実際に発生・検出したテラヘルツパルスの波形とスペクトルを示す。自由空間に放射されるテラヘルツ波と比較して、本セットアップで得られたスペクトルは 1THz 以下の低周波数帯域をカバーしていることが分かる。現在は、この導波路上に超伝導薄膜を作製して分光を試みると

ともに、集団励起モードを敏感に検出できる実験系への拡張を行っている。

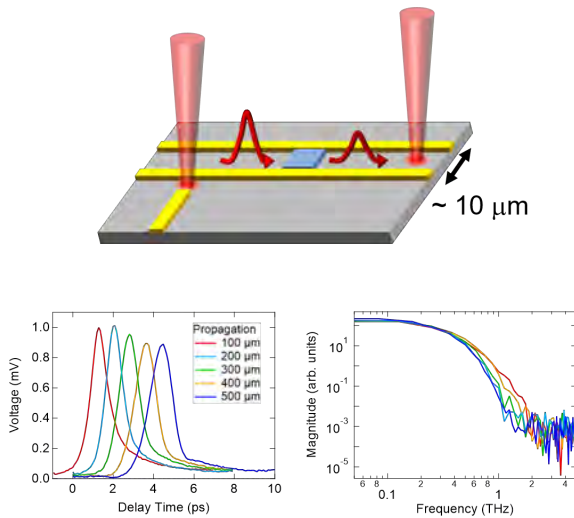


図 4.3.3: オンチップテラヘルツ分光系の概念図と、実際に発生・検出したテラヘルツパルスの波形とパワースペクトラム。色の違いは異なる伝送距離による波形およびスペクトラムの変化を示す。

4.3.2 ディラック、ワイル半金属

ディラック電子系 Bi におけるフロッケディラック・ワイル変換

固体において時間あるいは空間反転対称性が破れている場合、「ワイル半金属」と呼ばれる特殊な半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や巨大なベリー曲率双極子に起因するカイラル異常、フェルミアーク表面状態、巨大な異常ホール効果など様々な特徴的な物性が発現する舞台として現在盛んに研究されている。このようなワイル半金属状態を自在に作り出す方法として「フロッケエンジニアリング」と呼ばれる枠組みが注目を集めている。このアプローチの最大の特徴は、ワイル状態実現に必要な対称性の破れという性質を、物質そのものではなく外部から照射する光などの周期外場に担わせることができるという点である。これによって高い制御性でワイル状態を実現できると期待されており、理論・実験の両面で大変注目を集めている。これまで我々は、3次元ディラック電子を有する半金属であるビスマスの単体を対象に、中赤外ポンプ・テラヘルツファラデープローブ分光測定を行うことでフロッケエンジニアリングによるワイル状態生成の実験的な実証に取り組んでおり、光がディラック電子と共鳴的に結

合する場合は共鳴領域が異常ホール効果に重要な寄与をもたらすことを見出してきた。また、理論的考察を進めることによりこの共鳴領域においては「フロッケ二重ワイル状態」が実現することを見出していた。

本年度はさらにこの考察を進め、このフロッケ二重ワイル状態のディラック電子の異方性や質量項に対する振る舞いを系統的に調べた。その結果、異方的なディラック電子においてフロッケ二重ワイル点はさらに二つのワイル点に分裂するなどの振る舞いが明らかになり、さらに楕円偏光を使うことでこの分裂の度合いも制御することができると明らかになった。一方で質量項の大きさはワイル点の性質を大きく変えることはなく、3次元ディラック電子一般と光の相互作用の根底にはワイル性があることを示唆しているといえる。共鳴領域のワイル点が楕円率によって制御できるという知見を受け、実験的にもこの兆候を捉えることにも試みた。シリコン基板上に MBE 成長させた単結晶ビスマス薄膜試料に対して中赤外楕円偏光ポンプ・テラヘルツファラデープローブ測定を行った結果、光励起によるファラデー回転は楕円率に対して単調ではなく、結晶方位によっては符号変化も含む複雑なものになった。この振る舞いは共鳴領域のワイル状態を取り入れたモデルで定性的に再現することができ、楕円率を通した共鳴フロッケ・ワイル状態の制御の片鱗を捉えることができたと考えている。

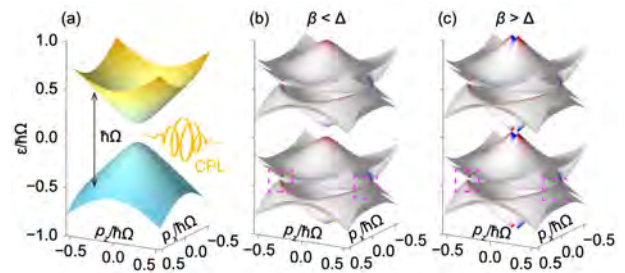


図 4.3.4: (a) 円偏光で駆動した質量のある 3 次元ディラック電子と、(b) 対応するフロッケ状態。一光子共鳴領域に二つのノードが存在しているが、これがフロッケ二重ワイル点ペアである。(c) 質量項が小さい場合のフロッケ状態。前述のフロッケ二重ワイル点ペアとは別に、ゼロエネルギー付近にもワイル点ペアが現れる。質量項の大きさに依らず普遍的に共鳴領域に表れるのがフロッケ二重ワイル状態の特徴である。

Co₃Sn₂S₂ における円偏光誘起異常ホール効果

前節でも述べたように、フロッケエンジニアリングによって電子系のトポロジーを制御する試みが注

目を集めており、3次元ディラック半金属を円偏光で駆動した際に現れるフロッケワイル半金属状態の実現が望まれている。我々は3次元ディラック電子系であるカゴメ格子金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ に着目して、フロッケワイル状態の実現を目指して実験を進めている。 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ は、キュリー温度 (およそ 185 K) 以下で強磁性を発現する磁性ワイル半金属であるが、キュリー温度以上の常磁性相では3次元のディラック半金属状態を示すため、この常磁性相を研究対象とした。

スパッタリング法によって成膜した室温の $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 薄膜に円偏光の中赤外光パルス照射し、フロッケワイル半金属状態となることで現れる異常ホール効果を THz 波のファラデー回転を利用して観測する実験を行った。昨年度までの研究で、実際に光パルス照射中のみ誘起される即時的な異常ホール効果を観測した。しかし、円偏光に誘起される異常ホール効果の起源として、フロッケワイル半金属状態をもたらすバンド変調由来のもの以外にも、前節のビスマスに対する研究でも示唆されたような1光子共鳴点での Berry 曲率分布の寄与や、電子正孔の実励起に起因する効果が考えられ、その切り分けは困難であった。今年度は光誘起異常ホール効果の起源を解明するために、50-120 THz に及ぶ広い周波数帯域における駆動周波数依存性を調べた。フロッケ状態における非共鳴なバンド変調と非ゼロの Berry 曲率分布に由来する異常ホール効果は駆動周波数の -3 乗に従うことが期待される。一方で、ビスマスの系で観測された1光子共鳴点のフロッケ状態に由来する異常ホール効果は駆動周波数に鈍感である。また、実励起に由来する効果は1光子共鳴励起に関わる電子状態の吸収係数や群速度に依存するため、 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ に対する中赤外光励起のように複雑な多軌道バンドの様々な共鳴が関わる場合においてその駆動周波数依存性が1つの冪に従うとは考えにくい。実験結果は、光誘起異常ホール伝導度が周波数の -3 乗に従うことを示した。これは、 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の常磁性相において周期駆動によるフロッケ状態のバンド変調と有限 Berry 曲率分布が実現していることを示しており、フロッケワイル状態の実現にも繋がる結果である。

4.3.3 時間分解磁気光学顕微鏡の開発

電流駆動磁壁移動ダイナミクスの可視化

フェリ磁性体は、大きさの異なる磁気モーメントを持つ磁性原子が二つの副格子を形成し、互いに反対方向に向くために、反強磁性的に結合した磁化を持ちながらも強磁性体のように正味の自発磁化をもつ特徴がある。そのため、磁場による磁化の制御が可能で、反強磁性体同様に超高速な磁化ダイナミクスが期待される。特に、スピントロニクス材料として電流を用いた磁化制御が盛んに研究され、電流駆動によるフェリ磁性体の磁壁速度が、副格子の角運動量が打ち消し合う温度 (角運動量補償点温度 T_A) において高速になることが知られている。しかし、このような磁性体を用いたメモリやロジックなどのス

ピントロニクスデバイスを設計する上では、磁壁のデピニングや慣性などを含めたダイナミクスを正確に理解し、制御する必要がある。

そこで我々はシングルショット撮像が可能な時間分解磁気光学イメージング法を開発し、フェリ磁性体 GdFeCo における電流駆動磁壁移動を可視化した。初期状態として全光学的磁化反転を応用し、単一磁壁をワイヤー中に生成し、パルス幅 1 ns 程度の電流パルス注入下の磁壁移動のストロボ観察を実証した。約 160 ps の時間分解能と約 0.15 μm の不確かさで磁壁の変位を決定することに成功した。時間分解測定の結果、磁壁速度はパルス注入中に時間変動していることが明らかになった。特に、電流注入開始からおよそ 1 ns 秒後に磁壁の加速が顕著である。これは、電流注入で生じるジュール熱により電流パルス注入中に温度が変化しており、温度が T_A 近傍のときに磁壁が高速化した結果だと考えられる。この系における磁壁移動が電流による温度ダイナミクスにも大きく支配されていることを明らかにしたものであり、スピントロニクスデバイスの設計において重要な指針になると考えられる。

<受賞>

- [1] 平井誉主在、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、2024年2月16日
- [2] 平井誉主在、理学系研究科研究奨励賞、2024年3月18日

<報文>

(原著論文)

- [3] Morihiko Nishida, Kota Katsumi, Dongjoon Song, Hiroshi Eisaki, Ryo Shimano: Light-induced coherent interlayer transport in stripe-ordered $\text{La}_{1.6-x}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, *Phys. Rev. B* **107**, 174523 (2023).
- [4] Kota Katsumi, Morihiko Nishida, Stefan Kaiser, Shigeki Miyasaka, Setsuko Tajima, and Ryo Shimano, *Phys. Rev. B* **107**, 214506 (2023).
- [5] Kazuma Ogawa, Naotaka Yoshikawa, Mio Ishibashi, Kay Yakushiji, Arata Tsukamoto, Masamitsu Hayashi, and Ryo Shimano, Ultrafast stroboscopic time-resolved magneto-optical imaging of domain wall motion in Pt/GdFeCo wires induced by a current pulse, *Phys. Rev. Res.* **5**, 033151 (2023).
- [6] Sachiko Nakamura, Haruki Matsumoto, Hiroki Ogawa, Tomoki Kobayashi, Fuyuki Nabeshima, Atsutaka Maeda, Ryo Shimano, Picosecond Trajectory of Two-dimensional Vortex Motion in $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ Visualized by Terahertz Second Harmonic Generation, arXiv:2401.07397.
- [7] Yoshua Hirai, Shun Okumura, Naotaka Yoshikawa, Takashi Oka, and Ryo Shimano, Floquet Weyl states at one-photon resonance: An origin of nonperturbative optical responses in three-dimensional materials, *Phys. Rev. Res.* **6**, L012027 (2024).

(会議抄録)

- [8] Ryo Shimano, Yoshua Hirai, and Naotaka Yoshikawa, Floquet Engineering of 3-Dimensional Dirac Semimetals, Nonlinear Optics 2023, Tu1B.1.

(学位論文)

- [9] 平井誉主在, Terahertz anomalous Hall effect of light-driven three-dimensional Dirac electrons in bismuth (博士論文)
- [10] 西田森彦, Light-induced Josephson plasma resonance in high- T_c cuprate superconductors $\text{La}_{1.6-x}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (博士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [11] H. Matsumoto, S. Nakamura, H. Ogawa, T. Kobayashi, F. Nabeshima, A. Maeda, and R. Shimano, Superconducting pairing symmetry of FeSe studied by terahertz third-harmonic generation, International Conference on Low-Energy Electrodynamics in Solids (LEES) 2023, Sankt Pölten, June 29, 2023. (poster)
- [12] K. Tanaka, F. Sekiguchi, N. Yoshikawa, R. Shimano, Nonlinear light-matter interaction in s-wave superconductor NbN with using terahertz vortex beam, Summer school - MPG-UBC-UTokyo Center for Quantum Materials, Max-Planck-Institute of Chemical Physics of Solids, Dresden, Sep. 27-28, 2023. (poster)
- [13] T. Tomiyasu, M. Nishida, N. Yoshikawa and R. Shimano, Exploring fingerprint of Floquet topological superconducting state by measuring Higgs mode in d-wave superconductors, Summer school - MPG-UBC-UTokyo Center for Quantum Materials, Max-Planck-Institute of Chemical Physics of Solids, Dresden, Sep. 27-28, 2023. (poster)
- [14] H. Matsumoto, S. Nakamura, H. Ogawa, T. Kobayashi, F. Nabeshima, A. Maeda, and R. Shimano, Observation of a low energy collective mode in FeSe by terahertz third-harmonic generation, MPI-UBC-UTokyo for Quantum Materials, Workshop 2023, ISSP, Kashiwa, Dec. 12, 2023. (poster)
- [15] K. Ogawa, N. Yoshikawa, K. Fujiwara, J. Ikeda, A. Tsukazaki, R. Shimano, Terahertz emission from paramagnetic 3D Dirac semimetal phase of topological Kagome magnet $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$, MPI-UBC-UTokyo for Quantum Materials, Workshop 2023, ISSP, Kashiwa, Dec. 12, 2023. (poster)
- [16] K. Ogawa, N. Yoshikawa, K. Fujiwara, J. Ikeda, A. Tsukazaki, R. Shimano, Terahertz emission from paramagnetic 3D Dirac semimetal phase of $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ under circularly polarized light irradiation, The 2024 Gordon Research Conference on Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems, Lucca, Italy, Feb. 7-8, 2024. (poster)

- [17] K. Ogawa, N. Yoshikawa, M. Ishibashi, A. Tsukamoto, M. Hayashi, R. Shimano, Stroboscopic magneto-optical imaging of current-induced domain wall dynamics in ferrimagnet GdFeCo, TSQS International Symposium on Quantum Electronics 2024, Itoh Hall, Tokyo, Feb. 13, 2024. (oral)
- [18] K. Tanaka, F. Sekiguchi, N. Yoshikawa, R. Shimano, Nonlinear optical response of a s-wave superconductor NbN with using terahertz vortex beam, TSQS International Symposium on Quantum Electronics 2024, Itoh Hall, Tokyo, Feb. 15, 2024. (poster)

招待講演

- [19] R. Shimano, Nonequilibrium dynamics of photoexcited cuprate superconductors in the stripe phase, International Workshop on Dynamical Control of Quantum Materials, Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Dresden, May 23, 2023.
- [20] R. Shimano, Light-induced coherent c-axis charge carrier responses in stripe-ordered cuprate superconductors, International Symposium on Ultrafast Dynamics and Ultrafast Bandgap Photonics, Heraklion, Crete, Greece, June 4, 2023.
- [21] R. Shimano, Floquet Engineering of 3-Dimensional Dirac Semimetals 2023 Optica Nonlinear Optics Topical Meeting, Alohilani Resort Waikiki Beach, Hawaii, July 11, 2023.
- [22] R. Shimano, Light-induced superconductivity in $\text{La}_{2-x-y}\text{Nd}_y\text{Sr}_x\text{CuO}_4$: Intertwining of charge order and superconductivity above T_c , Ringberg Symposium on Exotic States of Quantum Condensed Matter, Max Planck Institute, Nov.13, 2023.
- [23] N. Yoshikawa, Light control of Dirac/Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ using mid-infrared circularly polarized pulses, MPI-UBC-UTokyo for Quantum Materials, Workshop 2023, ISSP, Kashiwa, Dec. 13, 2023.
- [24] R. Shimano, Terahertz nonlinear responses of collective modes in conventional and unconventional superconductors, Workshop on new directions for nonlinear and nonequilibrium probes of many-body systems, Flatiron Institute Center for Computational Quantum Physics, Simons Foundation, New York, Jan. 22, 2024.
- [25] R. Shimano, Light-induced superconductivity emergent from charge order in $\text{La}_{2-x-y}\text{Nd}_y\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, Symposium on Nonlinear Optical Effects in Superconductors, APS March Meeting, Minneapolis, Mar. 6, 2024.
- [26] R. Shimano, Floquet engineering of three-dimensional Dirac electron systems, ENS-UTokyo Workshop, Institute of Henri Poincaré, Paris, Mar. 26, 2024.

(国内会議)

一般講演

- [27] 松本陽行, 中村祥子, 小川浩生, 小林友輝, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮, テラヘルツ第三高調波発生を用いた鉄系超伝導体 FeSe の低エネルギー集団励起モードの観測, 名古屋大学研究会「強相関電子系のフロンティア」, 名古屋大学, 坂田・平田ホール, 2023 年 8 月 21 日 (ポスター)

● 日本物理学会 第 78 回年次大会 (2023 年 9 月 16-19 日、東北大学)

- [28] 西田森彦, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮, 銅酸化物高温超伝導体 $\text{La}_{2-x-y}\text{Nd}_y\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の電荷ストライプ相における光誘起超伝導, 2023 年 9 月 16 日 (口頭発表)
- [29] 吉川尚孝, 鳴坂潮, 松岡秀樹, 田中勇貴, 武蔵摩紀, 中野匡規, 岩佐義宏, 島野亮, 高強度テラヘルツ波パルスによる $3\text{R-Ta}_{1+x}\text{Se}_2$ 電荷密度波相の非熱的融解ダイナミクス, 2023 年 9 月 16 日 (口頭発表)
- [30] 小川和馬, 吉川尚孝, 石橋未央, 薬師寺啓, 塚本新, 林将光, 島野亮, フェリ磁性体 GdFeCo の電流駆動磁壁移動の時間分解シングルショット磁気光学イメージング, 2023 年 9 月 17 日 (口頭発表)
- [31] 平井誉主在, 吉川尚孝, 奥村駿, 岡隆史, 島野亮, 異方的な 3 次元ディラック電子の一光子共鳴点におけるフロッケ・ワイル状態, 2023 年 9 月 19 日 (口頭発表)

● 第 15 回低温科学研究センター研究交流会 (2024 年 2 月 16 日、東京大学)

- [32] 西田森彦, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮, ランタン系銅酸化物高温超伝導体の光誘起超伝導 (口頭発表)
- [33] 富安泰成, 西田森彦, 吉川尚孝, 島野亮, 銅酸化物高温超伝導体 $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ におけるコヒーレントフォノン分光 (ポスター発表)
- [34] 関口文哉, 吉岡大地, 島野亮, 低温オンチップテラヘルツ分光系の開発 (ポスター発表)
- [35] 吉川尚孝, 鳴坂潮, 松岡秀樹, 田中勇貴, 武蔵摩紀, 中野匡規, 岩佐義宏, 島野亮, テラヘルツ波励起による $3\text{R-Ta}_{1+x}\text{Se}_2$ の電荷密度波の非熱的融解 (ポスター発表)
- [36] 小川和馬, 吉川尚孝, 藤原宏平, 池田絢哉, 塚崎敦, 島野亮, カゴメ磁性体 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の常磁性 3 次元ディラック半金属相における円偏光誘起テラヘルツ放射 (ポスター発表)
- [37] 平井誉主在, 吉川尚孝, 谷内息吹, 秋山了太, 長谷川修司, 奥村駿, 岡隆史, 島野亮, ビスマスにおける楕円偏光誘起異常 Hall 効果 (ポスター発表)
- [38] 田中康太郎, 関口文哉, 吉川尚孝, 島野亮, テラヘルツ光渦による s 波超伝導体 NbN の非線形光学応答 (ポスター発表)

● 日本物理学会 2024 年春季大会 (2024 年 3 月 18-21 日、オンライン)

- [39] 田中康太郎, 関口文哉, 吉川尚孝, 島野亮, テラヘルツ光渦による s 波超伝導体 NbN の非線形光学応答, 2024 年 3 月 18 日 (口頭発表)
- [40] 小川和馬, 吉川尚孝, 藤原宏平, 池田絢哉, 塚崎敦, 島野亮, 強磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の室温常磁性ディラック半金属相における円偏光誘起テラヘルツ放射, 2024 年 3 月 18 日 (口頭発表)
- [41] 松本陽行, 中村祥子, 小川浩生, 小林友輝, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮, テラヘルツ第 3 高調波発生による鉄系超伝導体 FeSe の低エネルギー集団励起モードの観測, 2024 年 3 月 20 日 (口頭発表)

招待講演

- [42] 島野亮, 銅酸化物高温超伝導体の電荷・スピンストライプ秩序と光誘起超伝導, 名古屋大学研究会「強相関電子系のフロンティア」, 名古屋大学 坂田・平田ホール, 2023 年 8 月 21 日
- [43] 島野亮, 磁性ワイル半金属の光制御, 日本物理学会 第 78 回年次大会シンポジウム「磁性ワイル物質の最近の進展」, 東北大学, 2023 年 9 月 17 日
- [44] 吉川尚孝, 3 次元ディラック半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ における円偏光誘起異常ホール効果, 非平衡固体物性の最前線, 東京大学, 2023 年 11 月 14 日
- [45] 吉川尚孝, 中赤外円偏光パルスを用いた 3 次元ディラック・ワイル半金属の光制御, レーザー学会学術講演会第 44 回年次大会, 日本科学未来館, 2024 年 1 月 18 日

(コロキウム、セミナー等)

- [46] R. Shimano, Light-control of quantum materials, Sorbonne-UTokyo WS, Takeda Frontier Science Bldg, Oct. 4, 2023.
- [47] 吉川尚孝, 中赤外光パルスによる $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ のディラック・ワイル半金属相の物性制御, 物性物理オンラインセミナー, 2023 年 7 月 29 日
- [48] R. Shimano, Hunting of exotic particles in quantum materials by terahertz light, Colloquium at collaborative research center Elasto-Q-Mat (Frankfurt-Karlsruhe-Mainz), Jan.11, 2024.
- [49] Y. Hirai, Terahertz anomalous Hall effect of light-driven three-dimensional Dirac electrons in bismuth, Angel Rubio Gr., Max Planck Institute for the Structure and Dynamics of Matter, QED & Materials Seminar, (online), 26 Feb. 2024.
- [50] Y. Hirai, Terahertz anomalous Hall effect of light-driven three-dimensional Dirac electrons in bismuth, Michael Schüler Gr., University of Fribourg, (online), 26 Feb. 2024.
- [51] R. Shimano, Dynamical Control of quantum materials by light, Riken-CEMS Colloquium, Riken, Wako, Feb. 28, 2024.
- [52] R. Shimano, Nonlinear optical responses of unconventional superconductors, Seminar at Physics Department, University Paris Cité, Mar. 27, 2024.

4.4 高木・北川研究室

物質中に新しい物理を創ることを目指し、固体中の新奇な量子電子相の探索と相形成のメカニズム解明の研究を推進している。令和5年度は、スピン軌道相互作用と電子相関、格子の対称性との協奏の結果生じるエキゾチックなトポロジカル電子相、特にキタエフ量子スピン液体関連物質、磁性共存超伝導相、及び量子磁性相の探索のための高圧下測定技術開発に注力した。

4.4.1 スピン軌道相互作用を利用した擬スピ量子相

新しい量子スピン液体と新しいキタエフ系物質

多体量子スピン物理において、絶対零度まで磁性スピンが量子的に絡み合った状態、量子スピン液体の実現はマイルストーンである。量子スピン液体は一次元スピン模型では理論も実験も共に確立されているが、二次元以上ではそうではなく、これまでの実験報告例である三角格子物質等ではハミルトニアンに厳密解が存在せず、量子スピン液体の「発見」の証拠に必要な素励起（準粒子）の研究さえ困難であった。10年強前にキタエフによって二次元の蜂の巣型格子でスピン液体の厳密解が理論的に示されてからこのキタエフ量子スピン液体の実現が盛んに模索されてきた。キタエフ蜂の巣格子模型では、スピンハミルトニアンをマヨラナフェルミ準粒子として一体問題に帰着した厳密解が得られる。さらに、マヨラナ粒子を操作することができればトポロジカル量子計算も可能とされている。しかし、異方的イジング相互作用であるキタエフ型相互作用が卓越している、「真のキタエフ液体物質」の物質開発は成功例がないのが現状の課題である。

キタエフ物質を創るには、非従来型の異方的相互作用を導入する必要がある、スピン-軌道相互作用が大きいイリジウム酸化物、4f電子系などに対する実現性が提唱されてきた。当研究室では、キタエフ模型の初の実証例を目指してイリジウム酸化物 $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ に着目し、磁化率、比熱、核磁気共鳴測定において少なくとも50 mKまで液体であり続ける量子液体物質であることを報告してきた（2018年2月理学部プレスリリース）。ただし、やはり他の相互作用が大きいことと不純物誘起励起の為、量子液体のモデルは特定出来ていない。従って、キタエフ型相互作用を持ちうる広い物質群に対して物質スクリーニングを推進している。

一つの方向性として、ここ数年来キタエフ候補物質の新しい舞台として理論的に提案されたランタノイド化合物群がある。その中の有力候補である、4f¹のPr⁴⁺化合物 $\alpha, \beta\text{-Na}_2\text{PrO}_3$ の磁性状態を明らかにしてきた。 α 相（二次元ハニカム格子）では²³Na-NMR測定とその解析から、理論予想の相図上で反強磁性キタエフスピン液体に近い磁性状態にあることが示唆された。また、強磁場下でキタエフスピン液体に

なっている可能性を示唆する磁化過程が見られた。本年度までに、物性がこれまでに報告されていない β 相（三次元ハイパーハニカム格子）の Na_2PrO_3 の基礎物性を明らかにした。 α 相に類似して基底状態は反強磁性であったが、三次元の格子にも関わらずある程度の短距離秩序が見られたため、キタエフ型相互作用に起因するフラストレーションが存在している可能性がある。

別のアプローチとして、第一原理計算データベースを利用して計算機上で安定解と知られている元素比を元に、経験的な結晶合成技術を組み合わせて物質開発を進めている。実際に4年生特別実験で新しく見つかった希土類のSm蜂の巣格子化合物 Cu_3SmTe_3 を量子スピン液体候補として研究している。キタエフ型相互作用が期待できる Γ_7 クラマース二重項基底で数K以上の相互作用を持つハニカム化合物としては、Pr酸化物系に続く2例目となる。この系は半金属であるため、電荷ドーピングまたは圧力印加による伝導電子増加を介した基底状態制御が考えられる。新しい切り口のキタエフ系物質開発として推進している。本年度は、この物質にさらに電気伝導を付与すべく、TeのAsへの置換によって、キャリア（ホール）ドーピングした多結晶体を得ることに成功した。理論的にはキタエフスピン液体へのホールドーピングにより超伝導相の発現が提案されていた。一方、本置換系では未置換物質に比べて反強磁性への転移幅がブロードになったことを除き大きな変化はみられず、Teサイトへの置換では伝導キャリアと4f電子局在磁性のカップリングが十分ではないことが判明した。今後は、Teとは異なるサイトへの置換効果を調べて伝導電子による新しいキタエフ系物性の発現を追求する必要がある。

4.4.2 高圧物性研究

量子磁性研究のための高圧下精密磁化測定技術の開発

高圧力は物質の基底状態を連続的に変化することができるため、固体物理の研究手法の一つとして広く活用されている。例えば200 GPa（万気圧）と非常に高い圧力下で室温近くの水素化物超伝導の発見報告の一部にダイヤモンドアンビルセル（DAC）とSQUID磁束計が利用されてきた。しかし、量子スピン系のような弱い磁性体の研究には数GPa程度の圧力下であっても殆ど利用されていなかった。当研究室は、小型の高圧装置と高感度な市販のSQUID磁気計を組み合わせる高圧磁化測定手法に多面的な改良を施すことにより、興味深い量子相を示す物質を迅速にスクリーニングするための手段を開発しており、7 GPaまで高精度（体積磁化率で $\sim 10^{-4}$ ）の磁化測定を可能にした（2021年6月にJPSJ紙で注目論文）。弱い常磁性を含む高圧磁性研究全般にとって非常に有用であり、Crハニカム化合物における新しい高圧下半金属強磁性相の発見につながった。高圧下精密磁性測定手段をさらに発展させるべく、本年度は2種類の技術開発に着手した。一つはSQUID磁気計内で使用するセルの進化系である。低磁性の

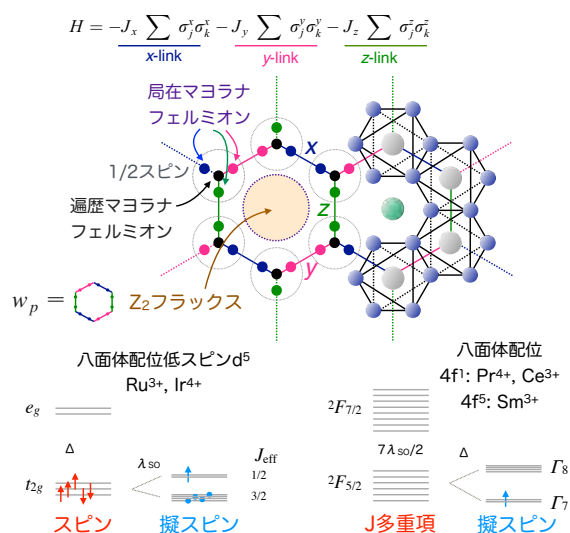


図 4.4.5: ハニカム格子・ハイパーハニカム格子系における量子スピン液体 (左) Kitaev Honeycomb 模型ハミルトニアンのスピンとマヨラナフェルミオンの関係。(右) 異方的相互作用を持つ擬スピン 1/2 での八面体配位結晶場分裂 Δ とスピナー軌道相互作用 λ_{SO} の関係。(左) 現在まで Mott 転移、主要なキタエフ候補物質の研究対象とされてきた代表的な $4d^5$, $5d^5$ 電子。(右) 最近キタエフ型相互作用の実現が提唱された電子配置。

CuTi 合金とモアッサナイトの採用により、同様の磁化検出精度を保ちつつ 14 GPa までの加圧を可能とした。この手法は絶対値測定であるため誤差の範囲で定量的測定が可能であるが、最高発生圧力の上昇とともに試料体積は急激に減少するため、体積磁化率の測定精度が悪化する。もう一つの方向性は、極低温・超高压・磁場下の複合極限環境下に対応した光検出磁気共鳴 (固体量子センシング) 技術の開発である。本年度は、独自に光学設計したプローブとノイズ対策技術により、通常の超伝導マグネット装置とクランプ型高压装置で構成された装置に組み込むことが可能な光検出磁気共鳴システムを開発した。こちらの技術は、10 万気圧を超えるような高い圧力での磁性研究、または多数の試料をスクリーニングする必要がある超伝導探索を初めて可能にする。

超高压下の新しい超伝導相研究

近年、超高压下 (1 万気圧以上) の実験技術がますます進展しており、それに伴い新しい超伝導体が発見されてきている。以前は磁性が強すぎて超伝導になるとは思われていなかった Mn, Cr 化合物もそれらの一つである。そのような変わった超伝導 (磁気量子臨界点近傍の超伝導) では、超伝導相が現れる直

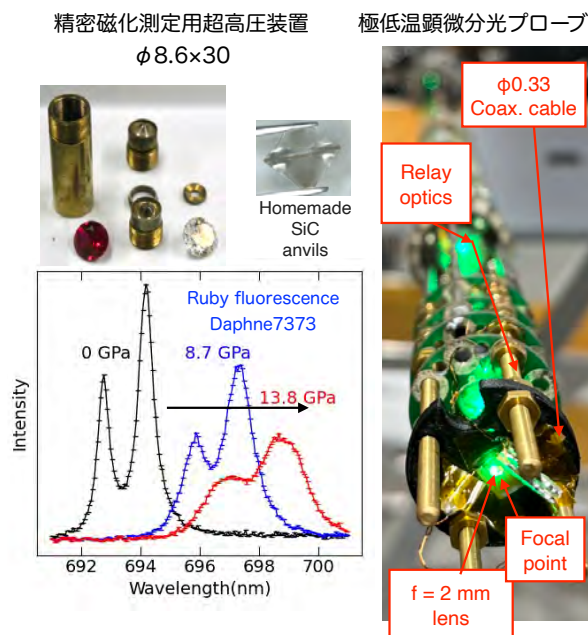


図 4.4.6: (左) 2023 年に新たに開発した精密磁化測定用モアッサナイトアンビル超高压加圧装置。(右) 複合極限環境下で顕微分光と固体量子センシングを可能にする装置。

前にどういう磁性状態になっているか、また、超伝導相と磁性相がどのように競合または共存して現れるか? という問いが重要になっている。当研究室では、独自に開発した最先端の超高压下磁化測定、核磁気共鳴測定技術を持っており、10 万気圧程度の圧力下でこれらのメカニズムを調べている。前述の精密磁化測定技術で大まかに磁性状態を把握し、以前開発した超高压下核磁気共鳴法を用いて超伝導相と磁性相がどのように競合または共存して現れるかを精密に測ることで研究している。MnP では、高压らせん磁性相が過去の報告よりも高压側に生き残っており、超伝導相と何らかの共存の可能性が高いことを発見した。CrSiTe₃ においては、新たな半金属強磁性相が見つかり、相図上では超伝導相と共存している。今後は、両物質において、本質的な磁性超伝導共存状態があるのかどうか注意深く吟味していく必要がある。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Ulrike Niemann, Yu-Mi Wu, Ryosuke Oka, Daigorou Hirai, Yi Wang, Y. Eren Suyolcu, Minu Kim, Peter A. van Aken, and Hidenori Takagi: "Crystallization of heavy fermions via epitaxial strain in spinel LiV₂O₄ thin film", *Proceedings of the National Academy of Sciences* **120**, e2215722120 (2023).
- [2] Shogo Yoshida, Kentaro Kitagawa, Takehide Koyama, Haruhiko Yamada, Yoshinori Haga,

- Yusuke Nakai, Koichi Ueda, Takeshi Mito: “Nonmagnetic-magnetic Transition in SmS Studied by 33S-NMR under High Pressure”, *Proceedings of the 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) JPSCP* **38**, 011093 (2023).
- [3] K. von Arx, Qisi Wang, S. Mustafi, D. G. Mazzone, M. Horio, D. John Mukkattukavil, E. Pomjakushina, S. Pyon, T. Takayama, H. Takagi, T. Kurosawa, N. Momono, M. Oda, N. B. Brookes, D. Betto, W. Zhang, T. C. Asmara, Y. Tseng, T. Schmitt, Y. Sassa, J. Chang: “Fate of charge order in overdoped La-based cuprates”, *npj Quantum Mater.* **8**, 7 (2023).
- [4] T. F. Schweizer, U. Niemann, X. Que, Q. He, L. Zhou, M. Kim, H. Takagi, and D. Huang: “Epitaxial growth and scanning tunneling microscopy of LiV2O4 thin films on SrTiO3(111)”, *APL Mater.* **11**, 021109 (2023).
- [5] Edoardo Baldini, Alfred Zong, Dongsung Choi, Changmin Lee, Marios H Michael, Lukas Windgaetter, Igor I Mazin, Simone Latini, Doron Azoury, Baiqing Lv, Anshul Kogar, Yifan Su, Yao Wang, Yangfan Lu, Tomohiro Takayama, Hidenori Takagi, Andrew J Millis, Angel Rubio, Eugene Demler, Nuh Gedik: “The spontaneous symmetry breaking in Ta2NiSe5 is structural in nature”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **120**, e2221688120 (2023).
- [6] L. Zhou, Q. He, X. Que, A. W. Rost, and H. Takagi: “A spectroscopic-imaging scanning tunneling microscope in vector magnetic field”, *Review of Scientific Instruments* **94**, 033704 (2023).
- [7] A. Kumar, D. Bérardan, D. Dragoe, E. Riviere, T. Takayama, H. Takagi and N. Dragoe: “Magnetic and electrical properties of high-entropy rare-earth manganites”, *Materials Today Physics* **32**, 101026 (2023).
- [8] W. A. MacFarlane, M. Oudah, R. M. L. McFadden, D. Huang, A. C. Chatzichristos, D. Fujimoto, V. L. Karner, R. F. Kiefl, C. D. P. Levy, R. Li, I. McKenzie, G. D. Morris, M. R. Pearson, M. Stachura, J. O. Ticknor, E. Thoeng, H. Nakamura, and H. Takagi: “8Li beta-NMR studies of Epitaxial Thin Films of the 3D topological Dirac semimetal Sr3SnO”, *J. Phys.: Conf. Ser.* **2462**, 012057 (2023).
- [9] Takumi Mitsuoka, Yu Takahashi, Takeshi Suzuki, Mario Okawa, Hidenori Takagi, Naoyuki Katayama, Hiroshi Sawa, Minoru Nohara, Mari Watanabe, Jiadi Xu, Qianhui Ren, Masami Fujisawa, Teruto Kanai, Jiro Itatani, Kozo Okazaki, Shik Shin, Takashi Mizokawa: “Quasi One-Dimensional Band Structure of Photoinduced Semimetal Phase of Ta2Ni1-xCoxSe5 (x = 0.0 and 0.1)”, *Journal of the Physical Society of Japan* **92**, 023703 (2023).
- [10] Yu Takahashi, Takeshi Suzuki, Masaki Hattori, Mario Okawa, Hidenori Takagi, Naoyuki Katayama, Hiroshi Sawa, Minoru Nohara, Yigui Zhong, Kecheng Liu, Teruto Kanai, Jiro Itatani, Shik Shin, Kozo Okazaki, Takashi Mizokawa: “Temporal Evolution and Fluence Dependence of Band Structure in Photoexcited Ta2Ni0.9Co0.1Se5 Probed by Time- and Angle-Resolved Photoemission”, *Journal of the Physical Society of Japan* **92**, 064706 (2023).
- [11] Masaki Hattori, Giovanni Tomassucci, Genki Hayashi, Mario Okawa, Marek Kopciuszynski, Alexey Barinov, Yangfan Lu, Hidenori Takagi, Naurang L. Saini, Takashi Mizokawa: “Robustness of excitonic coupling in Ta2NiSe5 against electronic inhomogeneity introduced by S Substitution for Se”, *Advanced Quantum Technologies* **6**, 2300034 (2023).
- [12] Shuo Dong, Samuel Beaulieu, Malte Selig, Philipp Rosenzweig, Dominik Christiansen, Tommaso Pincelli, Maciej Dendzik, Jonas D. Ziegler, Julian Maklar, R. Patrick Xian, Alexander Neef, Avaise Mohammed, Armin Schulz, Mona Stadler, Michael Jetter, Peter Michler, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Hidenori Takagi, Ulrich Starke, Alexey Chernikov, Martin Wolf, Hiro Nakamura, Andreas Knorr, Laurenz Rettig, Ralph Ernstorfer: “Observation of ultrafast interfacial Meitner-Auger energy transfer in a Van der Waals heterostructure”, *Nature Commun* **14**, 5057 (2023).
- [13] Hongguang Wang, Jiawei Zhang, Chen Shen, Chao Yang, Kathrin Küster, Julia Deuschle, Ulrich Starke, Hongbin Zhang, Masahiko Isobe, Dennis Huang, Peter A. van Aken and Hidenori Takagi: “Direct visualization of stacking-selective self-intercalation in epitaxial Nb1+xSe2 films”, *Nature Commun* **15**, 2541 (2024).
- [14] Shogo Yoshida, Hajime Ueda, Tetsuya Mutou, Shun Katakami, Masato Okada, Yuichi Yokoyama, Masaichiro Mizumaki, Naoka Hiraoka, Kentaro Kitagawa, Yoshinori Haga, Takuto Fujii, Yusuke Nakai, and Takeshi Mito: “Unique Band Structure of Pressure Induced Semiconducting State in SmS Characterized by 33S-Nuclear Magnetic Resonance Measurements”, *Journal of the Physical Society of Japan* **93**, 013702 (2024).
- [15] Go Fujita, Fumiya Kawanabe, Hideto Fukazawa, Tetsuo Ohama, Yoh Kohori, Kentaro Kitagawa, Kaisei Iwamoto, Shingo Araki, Tatsuo C. Kobayashi: “Zero-Field NMR of α -Mn up to 5GPa”, *Journal of the Physical Society of Japan* **93**, 023707 (2024).
- [16] C. Pughe, O. H. J. Mustonen, A. S. Gibbs, S. P. Lee, R. Stewart, B. Gade, C. N. Wang, H. Luetkens, A. Foster, F. C. Coomer, H. Takagi, E. J. Cussen: “Partitioning the Two-Leg Spin Ladder in Ba2Cu1-xZnxTeO6: From Magnetic Order

through Spin-Freezing to Paramagnetism”, Chem. Mater. **2023**

(学位論文)

博士論文

- [17] 露木 裕太：ハニカム格子希土類酸化物の磁性 (Magnetism of honeycomb-lattice rare-earth oxides)

修士論文

- [18] 土場優雅：ハニカム格子磁性体 Cu_3SmTe_3 における キャリアドーピング効果 (Carrier-doping effect in the honeycomb magnet Cu_3SmTe_3)
- [19] 合田 翔：超 10GPa 高圧下精密磁化測定技術の開発と電子相転移への応用 (Development of technique for high-precision magnetization measurement under high pressures over 10 GPa and its application to electronic phase transition)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [20] H. Takagi: “Thermal transport in quantum spin liquids”, H. Takagi, KITP Conference on “Topology, Symmetry and Interactions in Crystals: Emerging Concepts and Unifying Themes”, Santa Barbara, USA, 04/04/2023.
- [21] H. Takagi: “Thermal Transport as a Probe for Magnetic Excitations in Quantum Spin Liquids”, H. Takagi, TopoMag23 – Topology and Fractionalization in Magnetic Materials, Ohio State University, USA, 17/05/2023.
- [22] H. Takagi: “Thermal transport in quantum magnets”, H. Takagi, KITP workshop on “Dynamical Response and Transport in Quantum Magnets”, KAVLI Institute, Santa Barbara, USA, 28/08/2023.
- [23] H. Takagi: “Light and Shadow in the Materialization of Quantum Spin Liquids” (Keynote Lecture), H. Takagi, workshop on “Materials Aspect of Novel Quantum Materials” (MANQ2023), Weisstadt, Germany, 12/09/2023.
- [24] H. Takagi: “Quantum critical 2D Bose gas in the honeycomb antiferromagnet YbCl_3 ”, H. Takagi, workshop on “Quantum Materials in the Quantum information era”, cpfs Dresden, Germany, 28/09/2023.
- [25] K. Kitagawa: “Observation of Quantum Magnetisms at High Pressures”, Tsinghua Univ – Univ of Tokyo 8th joint symposium on physics & materials (Trans-scale Materials Science), Tokyo, 10/11/2023

- [26] H. Takagi: “What is the heat carrier of planar thermal Hall conductivity in the Kitaev quantum spin liquid candidate RuCl_3 ?”, H. Takagi, ICTP Conference on Fractionalization and Emergent Gauge Fields in Quantum Matter, Trieste, Italy, 07/12/2023.
- [27] K. Kitagawa: “Precision magnetometry techniques under pressure and van der Waals magnetisms”, Kashiwa, Chiba, 11/12/2023.
- [28] H. Takagi: “Highly Mobile Quantum Critical Bose Gas in 2D Limit in the Honeycomb Antiferromagnet YbCl_3 ”, H. Takagi, Workshop on “strange metals”, Bad Honnef, Germany, 14/12/2023.
- [29] H. Takagi: “Towards the realization of Kitaev Quantum Spin Liquid State in 4d and 5d Honeycomb Magnets and beyond”, H. Takagi, EMA 2024 Basic Science and Electronic Materials Meeting, ACerS Denver, USA, 14.02.2024.
- [30] H. Takagi: “What is the heat carrier of thermal Hall effect in the Kitaev QSL candidate RuCl_3 ?”, H. Takagi, CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials 2024, Japan, 21.02.2024
- [31] H. Takagi: “Crystallization of heavy fermions via epitaxial strain in spinel LiV_2O_4 thin film”, H. Takagi, APS March meeting, Minneapolis, USA, 07/03/2024.

(国内会議)

一般講演

- [32] 荒井悠太郎, 平岡奈緒香, Jinguang Cheng, Wei Wu, Jianlin Luo, 上床美也, 北川健太郎, 高木英典: 高圧 NMR を用いた MnP のらせん磁性に隣接した超伝導の研究日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大青葉山キャンパス, 16pA404-2, 2023 年 9 月 16 日.
- [33] 合田翔, 平岡奈緒香, 鳴海康雄, 萩原政幸, 千星聡, 北川健太郎, 高木英典: 10GPa 級高圧下精密磁化測定技術の開発日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大青葉山キャンパス, 17aB103-3, 2023 年 9 月 17 日.
- [34] 光検出磁気共鳴による高圧下磁化測定技術の開発北川健太郎, 樋口一輝, 松崎浩之, 徳山裕憲, 山形武靖, 合田翔, 立石真之, 高木英典: 日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大青葉山キャンパス, 17aB103-4, 2023 年 9 月 17 日.
- [35] 合田 翔, 平岡 奈緒香, 鳴海 康雄, 萩原 政幸, 千星 聡, 北川 健太郎, 高木 英典: 10GPa 級高圧下精密磁化測定技術の開発第 64 回高圧討論会, さわやかちば県民プラザ, 2C01, 2023 年 11 月 2 日
- [36] 14 GPa 級高圧下精密磁化測定技術の開発正木景大, 合田翔, 平岡奈緒香, 鳴海康雄, 萩原政幸, 千星聡, Pascal Puphal, Minu Kim, 北川健太郎, 高木英典日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン開催, 18pPSC-3, 2024 年 3 月 18 日.

招待講演

北川 健太郎: 体積効率を重視した対向アンビル型装置による磁性測定第 64 回高圧討論会, さわやかちば県民プラザ, 2A03, 2023 年 11 月 2 日.

(セミナー)

[37] 高木英典: “Quantum critical 2D Bose gas in the honeycomb antiferromagnet YbCl_3 ”, University of Toronto, Canada, 23/05/2023.

[38] 高木英典: “Mystery of heavy fermion formation in the mixed-valent spinel oxide LiV_2O_4 ”, University of British Columbia, Canada, 25/05/2023.

[39] 北川健太郎: “超高压環境下で磁性を観る”, 第 5 回創発研究交流会, 2023 年 8 月 25 日

4.5 林研究室

物性物理学において、電子がもつ角運動量「スピン」は磁性や電気伝導、光応答や超伝導など、多くの局面で重要な働きをすることが知られています。電子や光子、物質中の素励起であるフォノン (格子振動) やマグノン (磁気励起) など、スピンを持つ粒子や波動は物質の中でどのように躍動し、どのような物性を誘起するのか。これらの疑問に答え、スピンの物理学を確立することが林研の目標です。

4.5.1 スピン流物性

電子はスピンを有しているため、電子が動くことで「スピン流」と呼ばれる電子の流れが生じることが最近研究でわかってきました。スピン流とは、逆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、下向きのスピンを持つ電子は左方向に移動した場合、右から左にスピン流が生じたということになります。電流が電荷を運ぶのに対し、スピン流は角運動量を運搬します。

スピントロニクスではスピン流に関する研究が活発化しています。スピン流を磁石に注入すると、磁石を動かすことなく、N 極の向きを反転できることが明らかになってます。また、特定の物質にスピン流を流すと電流が発生することもわかってきました。これらの現象がどのようにして起きるのか、スピントロニクスはその背後にある物理を解明する基礎科学だけでなく、情報記憶技術や環境発電技術にも応用できるとして工学的観点からも注目されています。

軌道流の光検出 [3]

スピン軌道相互作用が大きい物質に電流を流すとスピン流が発生する現象はスピンホール効果として知られています。スピン流はスピン角運動量が移動する電子の流れですが、角運動量を運搬する電子の流れとして、軌道角運動量の流れを指す軌道流が最

近注目されています。軌道ホール効果は軌道流を誘起することができ、スピン軌道相互作用が小さい $3d$ 遷移金属で大きくなることが理論的に予想されています。林研では磁気光学 Kerr 効果を利用して、物質の表面に蓄積する磁気モーメントを決定する手段をこれまでに確立しました。その手法を用いて、スピン軌道相互作用が小さい V (バナジウム) において、軌道ホール効果による軌道磁気モーメントの蓄積の観測に成功しました。ただ、実験結果から、軌道ホール伝導度を直接求めることはできないため、今後の課題となっています。

4.5.2 非線形光学効果

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

ラマン散乱とカイラルフォノン [8]

ファンデルワールス層状物質の 1 つである PtSe_2 において、円偏光の旋回性に依存するラマンスペクトルを観測しました。厚みが数原子層の PtSe_2 では、旋回性に依存するラマン禁制モードが発現することがわかりました。ラマン遷移の選択則から、角運動量を有するカイラルフォノンが励起されていることが示唆されます。カイラルフォノンの存在は近年物性研究で注目されており、有効な観測・制御手段の確立が求められています。 PtSe_2 などのファンデルワールス層状物質でカイラルフォノンを制御できるか、今後検証が必要です。

4.5.3 強結合状態の探索

電子、光子、フォノン、マグノンなど物質中の粒子や波動はお互いと結合することが知られています。結合強度が大きくなると、2 つの特性を合わせた新たな状態が現れることがあります。粒子や波動間の結合に関する研究は近年、量子技術応用を念頭に活発化しています。本研究では強結合状態を実現できる条件を解明し、量子力学に本質に迫る研究を行います。

人工反強磁性体におけるマグノン・フォノン結合 [9]

人工反強磁性体におけるマグノンと弾性波で誘起されたフォノンの「マグノン・フォノン結合」を物質パラメータを用いて定式化しました。人工反強磁性体は非磁性薄膜を2つの強磁性薄膜で挟み、強磁性層の磁化が反平行となる構造を持っています。強磁性層が2層あるため、音響モード、光学モードの2つのマグノンが存在します。モデル計算から、音響マグノンモードが弾性波フォノンと強く結合する一方、光学マグノンモードは弾性波フォノンとの結合が弱いことがわかりました。マグノン・フォノン結合を強くするための設計指針が明らかにになり、実験による検証をこれから行います。

薄膜ヘテロ構造における磁気弾性結合の決定 [6]

薄膜ヘテロ構造における磁気弾性結合を決定する手段を確立しました。圧電基板上に対向電極を配置し、電極間に電圧を印加すると、圧電効果を利用して基板に歪みを誘起できます。基板上には強磁性体を含む薄膜ヘテロ構造を成膜し、基板に誘起された歪みは薄膜にも作用します。強磁性体が歪むと、磁気弾性結合通して磁化の向きが変化します。この磁化の向きの変化は強磁性体のプレーナーホール効果を利用して推測することができます。実験では、プレーナーホール測定を利用して、磁気弾性結合の大きさを決定できることを実証しました。この手法は様々な強磁性薄膜に適用できるため、磁気弾性結合を系統的に調査するための有効な手段であると考えられます。

<受賞>

- [1] 安田 偉, Evaluation of magnetoelastic coupling by acoustic spin Hall effect in heavy-metal/ferromagnet/rare-earth tri-layer, スピントロニクス研究会第20回英語講演奨励賞, 応用物理学会, 2024年1月25日.
- [2] 近藤春央, Pulsed Laser Induced Chirality Switching in Tellurium Thin Films, スピントロニクス研究会第18回英語講演奨励賞, 応用物理学会, 2023年1月25日.

<報文>

(原著論文)

- [3] Y. Marui, M. Kawaguchi, S. Sumi, H. Awano, K. Nakamura, M. Hayashi, Spin and orbital Hall currents detected via current-induced magneto-optical Kerr effect in V and Pt. Phys. Rev. B 108, 144436 (2023).
- [4] T. Taniguchi, S. Isogami, S. Okame, K. Nakada, E. Komura, T. Sasaki, S. Mitani, M. Hayashi, Probability of spin-orbit torque driven magnetization switching assisted by spin-transfer torque. Phys. Rev. B 108, 134431 (2023).

- [5] K. Ogawa, N. Yoshikawa, M. Ishibashi, K. Yakushiji, A. Tsukamoto, M. Hayashi, R. Shimano, Ultrafast stroboscopic time-resolved magneto-optical imaging of domain wall motion in Pt/GdFeCo wires induced by a current pulse. Phys. Rev. Res. 5, 033151 (2023).
- [6] T. Kawada, I. Yasuda, M. Kawaguchi, M. Hayashi, On-chip all-electrical determination of the magnetoelastic coupling constant of magnetic heterostructures. Appl. Phys. Lett. 123, 092403 (2023).
- [7] G. Qu, M. Hayashi, M. Ogata, J. Fujimoto, Anisotropy of the spin Hall effect in a Dirac ferromagnet. Phys. Rev. B 108, 064404 (2023).
- [8] I. Yasuda, T. Kawada, H. Matsumoto, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Helicity-resolved Raman spectroscopy of mono-and a few-layers-thick PtSe₂. Appl. Phys. Exp. 16, 053005 (2023).
- [9] M. Asano, H. Matsumoto, M. Hayashi, D. Hatanaka, Cavity magnomechanical coupling with coupled magnon modes in a synthetic antiferromagnet. Phys. Rev. B 108, 064415 (2023).

(学位論文)

- [10] 近藤春央, カイラル結晶テルル薄膜のパルスレーザー誘起構造転移, 修士論文 (2024).
- [11] 安田 偉, 希土類/強磁性ヘテロ構造における磁気弾性結合, 修士論文 (2024).
- [12] Shunzhen Wang, Structural and transport properties of topological insulator thin films, 修士論文 (2023).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [13] Y. Marui, M. Kawaguchi, M. Hayashi, The accuracy of the harmonic Hall measurements on spin orbit torques in W/CoFeB (poster). International Symposium on Quantum Electronics. 2/14/2024, The University of Tokyo, Tokyo, Japan.
- [14] T. Kawada, H. Matsumoto, M. Kawaguchi, H. Kohno, M. Hayashi, Acoustic spin Hall effect induced by piezoelectric acoustic waves The 13th Joint European Magnetic Symposia (JEMS), 8/30/2023, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Spain.
- [15] H. Matsumoto, T. Kawada, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Spin wave resonance probed via acousto-electric current in a metallic thin film (poster). The 13th Joint European Magnetic Symposia (JEMS). 8/28/2023, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Spain.

- [16] H. Matsumoto, D. Hatanaka, M. Asano, T. Kawada, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Cavity Magnomechanics in a Synthetic Antiferromagnet with Surface Acoustic Waves. 8th Magnonics 2023. 8/2/2023, Le Touquet, Paris, France.
- [17] H. Matsumoto, T. Kawada, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Nonreciprocity of Surface Acoustic Waves Traversing Tri-layer Synthetic Antiferromagnet (poster). 11th International Symposium on Metallic Multilayers (MML). 7/27/2023, Korea University, Seoul, South Korea.
- [18] I. Yasuda, T. Kawada, H. Matsumoto, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Acoustic Spin Hall Effect in Heavy-Metal/Ferromagnet/Rare-Earth Tri-layers (poster). 11th International Symposium on Metallic Multilayers (MML). 7/27/2023, Korea University, Seoul, South Korea.
- [19] H. Kondo, M. Kawaguchi, J. Uzuhashi, T. Ohkubo, M. Hayashi, Pulsed Laser Induced Structural Change of Te Thin Films (poster). 11th International Symposium on Metallic Multilayers (MML). 7/27/2023, Korea University, Seoul, South Korea.
- [20] M. Ishibashi, K. Yakushiji, M. Kawaguchi, A. Tsukamoto, S. Nakatsuji, M. Hayashi Error Rate of a Ferrimagnetic Spin Shift Resister. 11th International Symposium on Metallic Multilayers (MML). 7/25/2023, Korea University, Seoul, South Korea.
- 招待講演
- [21] M. Hayashi, Spin and orbital currents in Dirac semimetals and topological insulators, 8th International Symposium on Magnetism and Superconductivity (ICSM2023), Liberty Lykia hotel, Fethiye, Turkey, May. 8, 2023.
- (国内会議)
- 一般講演
- [22] Y. Marui, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Anatomy of the harmonic Hall measurements of spin orbit torque. 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 2024 年 3 月 23 日, ハイブリッド開催 (東京都市大学世田谷キャンパス).
- [23] Y. Marui, M. Kawaguchi, S. Sumi, H. Awano, K. Nakamura, M. Hayashi, Optical detection of spin and orbital Hall currents in V and Pt. 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 2024 年 3 月 23 日, ハイブリッド開催 (東京都市大学世田谷キャンパス).
- [24] 早川雄人, 石橋未央, 林将光, 河野浩, 電流誘起フェリ磁壁移動の加速・減速過程. 日本物理学会 2024 年春季大会, 2024 年 3 月 19 日, オンライン.
- [25] 松本啓岐, 川田拓弥, 河口真志, 浅野元紀, 畑中大樹, 林将光, 音響電流測定によるフォノン-マグノン変換の検出. 第 47 回日本磁気学会学術講演会, 2023 年 9 月 27 日, 大阪大学豊中キャンパス.
- [26] 三塚新, 安田偉, 河口真志, 森戸智, 上野啓司, 林将光, 二次元層状物質 NbOI₂ の光学応答第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 熊本城ホール, 熊本, 2023 年 9 月 23 日.
- [27] I. Yasuda, T. Kawada, H. Matsumoto, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Evaluation of magnetoelastic coupling by acoustic spin Hall effect in heavy-metal/ferromagnet/rare-earth tri-layer. 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 熊本城ホール, 熊本, 2023 年 9 月 23 日.
- [28] 戸高安裕, 安田偉, 松本啓岐, 河口真志, 林将光, フォノン-マグノン結合による表面弾性波の伝搬制御. 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 熊本城ホール, 熊本, 2023 年 9 月 23 日.
- [29] 宮崎稜大, 河口真志, 林将光, キャリアドープしたディラック半金属における円偏光誘起電流. 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 熊本城ホール, 熊本, 2023 年 9 月 21 日.
- [30] S. Wang, Y. Marui, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Current-induced magneto-optical Kerr effect in topological insulator thin films 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 熊本城ホール, 熊本, 2023 年 9 月 21 日.
- [31] Y. Mao, S. Wang, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Current direction dependent transverse signal in topological insulator/ferromagnet heterostructures. 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 熊本城ホール, 熊本, 2023 年 9 月 20 日.
- [32] H. Kondo, M. Kawaguchi, J. Uzuhashi, T. Ohkubo, M. Hayashi, Pulsed Laser Induced Structural Change of Chiral Te Thin Films. 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 熊本城ホール, 熊本, 2023 年 9 月 20 日.
- [33] Y. Wang, M. Kawaguchi, S. Wang, J. Uzuhashi, T. Ohkubo, M. Hayashi, Scaling of the anomalous Hall effect of MBE-grown Cr₂Te₃ thin films. 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 熊本城ホール, 熊本, 2023 年 9 月 19 日.
- [34] 小川和馬, 吉川尚孝, 石橋未央, 薬師寺啓, 塚本新, 林将光, 島野亮, フェリ磁性体 GdFeCo の電流駆動磁壁移動の時間分解シングルショット磁気光学イメージング. 日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大学川内キャンパス, 仙台, 9/17/2023.
- [35] 塚本萌太, 顧豪, 中村祐貴, 中弘周, 岩崎拓哉, 渡邊賢司, 谷口尚, 河口将志, 林将光, 佐々木健人, 小林研介, hBN 量子センサによる磁性体薄膜の磁気イメージング. 日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大学川内キャンパス, 仙台, 9/16/2023.
- 招待講演
- [36] M. Hayashi, Acoustic phonon induced spin dynamics. 第 47 回日本磁気学会学術講演会, 2023 年 9 月 28 日, 大阪大学豊中キャンパス.

4.6 小林研究室

4.6.1 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。その一つが量子力学の原理を用いた精密測定技術=量子計測（量子センシング）である。我々のねらいは量子計測を用いた精密物性物理学の構築にある。我々は特に結晶に存在する色中心を量子センサとして用いる量子計測に注力している。代表例がダイヤモンドにおける NV 中心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 4.6.7）。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。

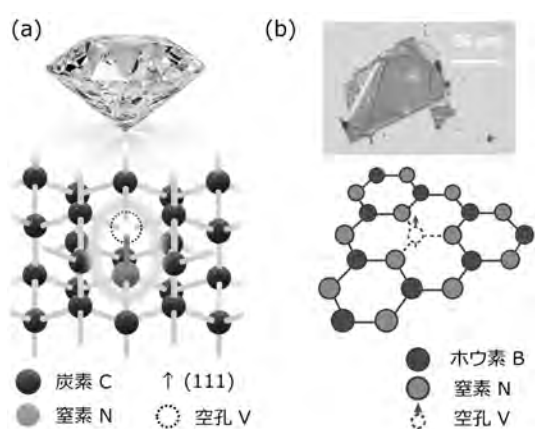


図 4.6.7: (a) ダイヤモンド結晶と NV 中心。(b) hBN 結晶とホウ素空孔欠陥。

まず NV 中心について説明する。これはダイヤモンド結晶の中に安定して存在する格子欠陥の一種であり、となり同士の 2 個の炭素原子が窒素（nitrogen）と原子空孔（vacancy）のペアに置き換わった構造を持つ。ダイヤモンドには 100 種類以上の色中心が知られているが、NV 中心は光励起後の過程に電子スピンの依存する独特の経路を持つ点でユニークである。この性質を利用すれば単一の NV 中心の電子スピン状態を光学的に読み出せることが 1997 年に示された。この手法を光検出磁気共鳴（optically detected magnetic resonance, ODMR）と呼ぶ。長年の研究により NV 中心内の電子スピンや原子核スピンの量子状態が室温においても極めて長く保持されることがわかっていく。さらに 2008 年、NV 中心と ODMR を利用した局所磁場観察の手法が提案された。2020 年には hBN 内のホウ素空孔欠陥でも同様の ODMR が起こることが示された。

我々は、これらの量子センサを用いて量子スピン顕微鏡を開発し様々な物性計測に適用することを目指している。この手法は幅広い磁場領域・温度領域で適用可能でありサブミクロンスケールで磁場や温度の分布を定量的にイメージングできる。物性物理

学にはこれまでに存在しなかった手法であり、この先には、非平衡輸送・スピングラス・トポロジカル端状態・永久電流など、重要で魅力的な数多くのテーマが横たわっている。

2023 年度は、小林研介教授、佐々木健人助教、大学院博士課程 2 年生の小河健介氏、塚本萌太氏、博士課程 1 年生の中村祐貴氏、西村俊亮氏、修士課程 2 年生の顧豪氏、山本航輝氏、修士課程 1 年生の小林拓氏、須田涼太郎氏のメンバーで研究を行った。顧氏 [16]、山本氏 [17] が修士学位を取得した。

研究は (1) 量子センサの性質と量子制御、(2) 量子センサの物性計測応用 の二本立てで行っている。また以前から行ってきたメゾスコピック系における量子輸送についても成果を得た。順に紹介する。

4.6.2 量子センサの性質と量子制御

幾何学的非断熱ダイナミクス

1932 年に発表されたランダウ・ツェナー（LZ）モデルは、量子二準位系における障壁の制御速度と量子トンネル確率を結びつけるものであり、今日でも量子制御の基本モデルとして役に立っている。本研究では、LZ モデルに幾何学的な“ねじれ”効果を取り入れた新しい「ねじれランダウ・ツェナー（TLZ）モデル」を実証することに世界で初めて成功した。精密にプログラムしたマイクロ波パルスによって二準位系である NV 中心の電子スピンを制御することで TLZ モデルを実現し、平均 95.5 % という高確率で量子トンネル効果を実現できることを証明した（図 4.6.8）。本成果は様々な量子系で普遍的に生じるダイナミクスの理解やその制御方法にとって有意義であり、量子制御の新技术として量子コンピュータ・核磁気共鳴など様々な応用が期待される [5, 67]。

動的核スピン偏極における多体ダイナミクス

動的核スピン偏極（DNP）は、電子スピン制御を用いて核スピンを偏極する技術であり、核磁気共鳴の感度向上や核スピン量子ビット（例えば、ダイヤモンド中の炭素核スピン）の初期化に利用されている。本研究では、パルス制御型の DNP で複数の核スピンを偏極させる場合、核スピン拡散のようなありふれた脱偏極過程がなくても、達成可能な偏極が抑制されるメカニズムを調査した。解析的・数値的な計算により、今まで考慮されてこなかったユニタリダイナミクスの高次成分が偏極抑制に寄与することを発見した。本知見は、核スピン量子工学や高精度な DNP プロトコルの設計に指針を与える [13]。

ODMR スペクトルの励起光強度依存性

最近、低磁場における単一ナノダイヤモンド中の NV 中心の ODMR スペクトルが励起光強度依存性

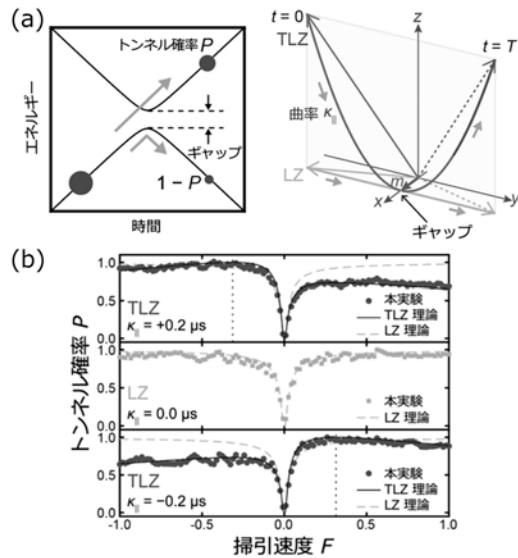


図 4.6.8: (a) LZ モデル (左) と曲率がある場合の量子トンネル効果の模式図 (右)。 (b) 掃引速度を変えながら外場で駆動した場合の二準位系 (NV 中心) におけるトンネル確率 P の測定結果。

を持つために、温度測定の確度が低下することが報告された [M. Fujiwara *et al.*, *Phys. Rev. Res.* **2**, 043415 (2020)]。この現象は微弱な磁場測定においても確度を低下させる。特に、CMOS カメラと NV 中心アンサンブルを利用した磁場や温度の広視野イメージングにおいては、視野内の励起光強度の不均一さがアーティファクトを引き起こす可能性があるため、重要な課題である。我々は、複数の NV 中心試料を用いてスペクトルの励起光強度依存性を調査した。まず、ナノダイヤモンドにおける NV 中心のスペクトルの励起光強度依存性を調査し、先行研究の結果を再現した。さらに、この振る舞いが指数関数で表され励起光強度が大きくなると飽和することを明らかにした。次に、単結晶ダイヤモンドでも同様の傾向を確認し、この現象が NV 中心の本質的な性質に由来すると結論した。このような ODMR スペクトルの系統的な励起光強度依存性は本研究で初めて明らかとなった。本現象のメカニズムとしては、何らかの局所的な歪み（例えば光励起によって動的に誘起される NV 中心近傍の電場の不均一性）が考えられる [7]。

hBN 量子センサの複合パルス制御

hBN 中のホウ素空孔欠陥はダイヤモンド中の NV 中心と同様な ODMR を示すことが 2020 年に報告された [A. Gottscholl *et al.* *Nat. Mat.* **19**, 540 (2020)]。hBN は 2 次元ファンデルワールス物質であるため、ダイヤモンドよりも容易に測定対象に密着できる。そのため、ホウ素空孔欠陥は NV 中心よりも

測定対象からの磁場をさらに感度良く検出でき、高い空間分解能を得られる可能性がある。我々は hBN 量子センサを物性測定に適用するために基本的な制御方法から研究を開始した。ホウ素空孔欠陥の ODMR スペクトルは 7 つの小さなディップ構造を持つ。これらの分裂は欠陥の第 1 近傍の 3 つの窒素の核スピンの超微細相互作用によって生じる。NV 中心のスペクトルにはない特徴であり、幅広いスペクトルは磁場の測定感度を低下させる。我々はこの状況でも精密な交流磁場測定を可能とするプロトコルを開発した。超微細相互作用を取り入れた複数の周波数を含む複合パルスを印加することで、Rabi 振動のコントラストを 2.2 倍向上させた [4]。

hBN 量子センサにおける同位体効果

量子センサの感度を高めるには、その周囲に擾乱の要因となる核スピンの少ないことが重要である。hBN 量子センサの場合、B にも N にも核スピンの存在するため ODMR スペクトルの線幅が大きくなり、ダイヤモンド NV 中心に比べて感度を上げることが困難である。我々は窒素の同位体濃度を制御することを試みた。窒素の同位体には ^{14}N (核スピン $I = 1$) と ^{15}N ($I = 1/2$) の 2 つがあり、天然の存在比は前者が 99.6 %、後者は 0.4 %である。そこで $h\text{B}^{15}\text{N}$ を用いることができれば、量子センサの感度が向上することが予想される。我々は ^{15}N 同位体の濃度を制御し、天然存在比の場合 (0.4%)、増やした場合 (約 60%)、完全に ^{15}N にした場合 (100%) の 3 種類の場合の hBN 量子センサについて同位体効果を調べた。 ^{15}N の濃度を増やしていくと、予想通りスペクトルの構造が単純になり鋭くなることを実証した。このことは量子センサの感度向上に直結する。hBN 量子センサにおける窒素同位体制御は本成果が世界初である [8]。

4.6.3 量子センサの物性計測応用

hBN 量子センサナノ配列

hBN の極薄膜に量子センサをナノスケールで配列することによって、高分解能な磁場イメージングを行った。具体的には、厚さ 66 nm の hBN 薄膜を用い、ヘリウムイオン顕微鏡からのヘリウムイオンビームを狙った場所に $100 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$ サイズで照射することで、そのスポットにホウ素空孔欠陥アンサンブルからなる量子センサを生成した (図 4.6.9)。このセンサをナノメートル精度で配列させ、各センサから得られる磁場データを適切に処理することによって、高空間分解能で磁場をイメージングできることを実証した。本研究は測定対象表面の狙った位置にナノサイズの方位磁針を作る技術を確認したものである [6, 68]。

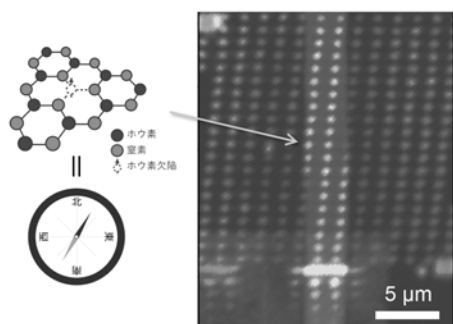


図 4.6.9: hBN 量子センサナノ配列の発光像。

マイクロ波イメージング

NV 中心は共鳴周波数 2.87GHz のマイクロ波に敏感であるため、これを利用してマイクロ波デバイスの評価や磁性体中のマグノンの可視化などが可能である。しかし共鳴周波数付近以外では測定が難しいという制約があった。そこで新しいプロトコルとして提案されたのが AC ゼーマン効果を用いる方法である。AC ゼーマン効果とは、マイクロ波照射下で NV 中心の共鳴周波数がわずかにシフトすることを指す。我々は広視野顕微鏡とアンサンブル NV 中心を用いて、AC ゼーマン効果を用いたイメージングに初めて成功した。具体的には、マイクロ波平面リングアンテナの周波数応答やオメガ型アンテナ上のマイクロ波振幅の空間分布を広帯域に視覚化した。更に、ダイナミカルデカップリングを導入することで感度を大幅に向上させた [11]。

超伝導体における量子渦の観測

超伝導体に侵入する磁束は量子化する。この量子渦（磁束量子）は様々な手法で可視化されてきた。我々は、ダイヤモンド結晶中で [111] 方向に完全配向した NV 中心を持つ高感度な薄膜センサを用いて、典型的な高温超伝導体である $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) 薄膜中の量子渦を調べた。その結果、量子渦周囲の磁束密度分布を広視野かつ定量的に可視化することに成功した (図 4.6.10)。測定された量子渦からの漏れ磁場は統計誤差 10% で量子化していることを示しており、得られた磁場分布が理論モデルとよく整合することを実証した。本手法は超高压下など様々な環境における超伝導体の反磁性や量子渦の観測に利用できる [9, 69]。

4.6.4 メゾスコピック系の量子輸送

量子ドットにおける近藤温度の決定

我々は 15 年以上にわたって近藤効果によって形成された量子液体の性質を平衡状態から非平衡状態

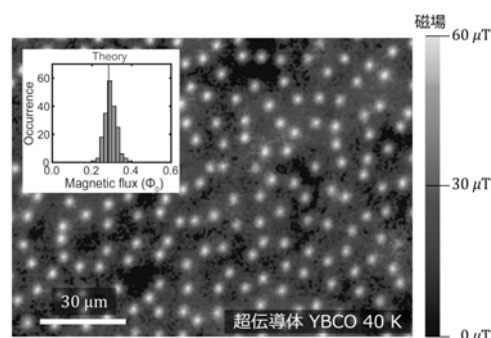


図 4.6.10: 磁場中冷却した超伝導体における量子渦の磁場イメージングと磁束量子化を実証した結果。

まで精密に調査してきた。近藤効果にとって最も重要なエネルギースケールは近藤温度である。我々は $\text{SU}(2)$ アンダーソン不純物モデルに対して数値繰り込み群と Bethe ansatz 厳密解を用いた定式化を行い、線形領域にある電気伝導度の磁場依存性の実験データ・数値計算データから局所フェルミ液体理論で定義される近藤温度を評価する方法を開発した [10]。

<受賞>

- [1] 西村 俊亮、2023 年春季大会 日本物理学会学生優秀発表賞 (領域 6)、「ダイヤモンド量子センサを用いた超伝導体薄膜の磁束量子の定量的観測」(2023 年 4 月)。
- [2] S. Nishimura, Young Researcher Award, International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023 (QLC2023) (Sapporo, Japan, August 8–10, 2023).
- [3] M. Tsukamoto, Best Poster Award, International Symposium on Quantum Electronics (The University of Tokyo, Tokyo, February 12–16, 2024).

<報文>

(原著論文)

- [4] H. Gu, Y. Nakamura, K. Sasaki, and K. Kobayashi, “Multi-frequency composite pulse sequence for magnetic field sensitivity enhancement in hexagonal boron nitride quantum sensor,” *Applied Physics Express* **16**, 055003 (2023).
- [5] K. Sasaki, Y. Nakamura, T. Teraji, T. Oka, and K. Kobayashi, “Demonstration of geometric diabatic control of quantum states,” *Physical Review A* **107**, 053113 (2023).
- [6] K. Sasaki, Y. Nakamura, H. Gu, M. Tsukamoto, S. Nakaharai, T. Iwasaki, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Ogawa, Y. Morita, and K. Kobayashi, “Magnetic field imaging by hBN quantum sensor nanoarray,” *Applied Physics Letters* **122**, 244003 (2023) [AIP Publishing Showcase に選定].
- [7] S. Ito, M. Tsukamoto, K. Ogawa, T. Teraji, K. Sasaki, and K. Kobayashi, “Optical-power-dependent splitting of magnetic resonance in

- nitrogen-vacancy centers in diamond,” *Journal of the Physical Society of Japan* **92**, 084701 (2023) [Papers of Editors’ Choice に選定].
- [8] K. Sasaki, T. Taniguchi, and K. Kobayashi, “Nitrogen isotope effects on boron vacancy quantum sensors in hexagonal boron nitride,” *Applied Physics Express* **16**, 095003 (2023).
- [9] S. Nishimura, T. Kobayashi, D. Sasaki, T. Tsuji, T. Iwasaki, M. Hatano, K. Sasaki, and K. Kobayashi, “Wide-field quantitative magnetic imaging of superconducting vortices using perfectly aligned quantum sensors,” *Applied Physics Letters* **123**, 112603 (2023).
- [10] R. Sakano, T. Hata, K. Motoyama, Y. Teratani, K. Tsutsumi, A. Oguri, T. Arakawa, M. Ferrier, R. Deblock, M. Eto, and K. Kobayashi, “Kondo temperature evaluated from linear conductance in magnetic fields,” *Physical Review B* **108**, 205147 (2023) [Editors’ Suggestion に選定].
- [11] K. Ogawa, S. Nishimura, K. Sasaki, and K. Kobayashi, “Demonstration of highly-sensitive wideband microwave sensing using ensemble nitrogen-vacancy centers,” *Applied Physics Letters* **123**, 214002 (2023) [Editor’s Pick に選定].
- [12] R. Okaniwa, T. Mikawa, Y. Matsuzaki, T. Yamaguchi, R. Suzuki, N. Tokuda, H. Watanabe, N. Mizuochi, K. Sasaki, K. Kobayashi, and J. Ishi-Hayase, “Frequency-tunable magnetic field sensing using continuous-wave optically detected magnetic resonance with nitrogen-vacancy centers in diamond,” *Journal of Applied Physics* **135**, 044401 (2024).
- [13] K. Sasaki and E. Abe, “Suppression of pulsed dynamic nuclear polarization by many-body spin dynamics,” *Physical Review Letters* **132**, 106904 (2024).
- (国内雑誌)
- [14] 佐々木健人:「ダイヤモンドでミクロな世界を見る」、応用物理 第92巻 11号 688 (2023).
- [15] 佐々木健人、小林研介:「量子センサを自在に並べる!」、東京大学理学系研究科・理学部ニュース 第55巻 3号 6 (2023).
- (学位論文)
- [16] 顧豪:「窒化ホウ素量子センサの作製と制御」、修士論文、2024年3月。
- [17] 山本航輝:「ダイヤモンド量子センサによる温度および磁場測定技術の開発」、修士論文、2024年3月。
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [18] R. Sakano, T. Hata, K. Motoyama, Y. Teratani, K. Tsutsumi, T. Arakawa, M. Ferrier, R. Deblock, M. Eto, K. Kobayashi, and A. Oguri, “Evaluation of the Kondo temperature from linear conductance measurements in magnetic fields in a carbon nanotube quantum dot,” The 25th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-25) (Grenoble, France, July 10–14, 2023) [poster].
- [19] K. Sasaki, Y. Nakamura, H. Gu, M. Tsukamoto, S. Nakaharai, T. Iwasaki, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Ogawa, Y. Morita, and K. Kobayashi, “Magnetic field imaging by hexagonal boron nitride quantum sensor nanoarray,” Quantum Sensing Gordon Research Conference (Vaud, Switzerland, July 23–28, 2023) [poster].
- [20] S. Nishimura, T. Kobayashi, D. Sasaki, T. Tsuji, T. Iwasaki, M. Hatano, K. Sasaki, and K. Kobayashi, “Quantitative imaging of superconducting vortices penetrating a thin film using diamond quantum sensor,” International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023 (QLC2023) (Sapporo, Japan, August 8–10, 2023) [poster] [Young Researcher Award].
- [21] M. Tsukamoto, K. Yamamoto, M. Kawaguchi, M. Hayashi, K. Sasaki, and K. Kobayashi, “Simultaneous magnetic imaging using the nitrogen-vacancy center and magneto-optical Kerr effect,” International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023 (QLC2023) (Sapporo, Japan, August 8–10, 2023) [poster].
- [22] K. Sasaki, “Magnetic field imaging by hexagonal boron nitride quantum sensor nanoarray,” The 8th Joint Symposium on Trans-scale Materials Science (Tokyo, November 9–10, 2023) [oral].
- [23] 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, and K. Kobayashi, “Observation of domain wall in chiral antiferromagnet,” CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials 2024 (Tokyo, Japan, February 20–22, 2024) [poster].
- [24] R. Sakano, T. Hata, K. Motoyama, Y. Teratani, T. Arakawa, M. Ferrier, R. Deblock, M. Eto, K. Kobayashi, and A. Oguri, “Theory and Experiment of Current Noise through Kondo Dot under Magnetic Fields,” APS March Meeting 2024 (Minneapolis, USA, March 4–8, 2024) [oral].
- [25] 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, and K. Kobayashi, “Observation of domain wall in chiral antiferromagnet Mn_3Sn realized perpendicular magnetization,” APS March Meeting 2024 (Minneapolis, USA, March 4–8, 2024) [oral].

12th Workshop on Semiconductor /
Superconductor Quantum Coherence

Effect and Quantum Information (Tochigi, Japan, September 27–29, 2023)

- [26] K. Ogawa, S. Nishimura, K. Sasaki, and K. Kobayashi, “Broadband microwave sensing using diamond quantum sensor” [oral].
- [27] M. Tsukamoto, H. Gu, Y. Nakamura, S. Nakaharai, T. Iwasaki, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. Kawaguchi, M. Hayashi, K. Sasaki, and K. Kobayashi, “Magnetic imaging of magnetic film using h-BN quantum sensor” [oral].
- [28] S. Nishimura, T. Kobayashi, D. Sasaki, T. Tsuji, T. Iwasaki, M. Hatano, K. Sasaki, and K. Kobayashi, “Quantitative visualization of quantum vortices penetrating a superconductor using quantum diamond microscope” [poster].
- [29] T. Kobayashi, S. Nishimura, K. Ogawa, T. Tsuji, T. Iwasaki, M. Hatano, K. Sasaki, and K. Kobayashi, “Measurement of Quantum Vortices in Ultra-Small Superconductors Using Diamond Quantum Sensors” [poster].
- [30] K. Yamamoto, M. Tsukamoto, K. Sasaki, and K. Kobayashi, “Observation of magnetic dynamics on magnetite using diamond quantum sensors” [poster].
- [31] Y. Nakamura, H. Gu, M. Tsukamoto, S. Nakaharai, T. Iwasaki, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Sasaki, and K. Kobayashi, “Toward the study of multiferroics by quantum sensing of electric and magnetic fields” [poster].
- [32] H. Gu, M. Tsukamoto, Y. Nakamura, S. Nakaharai, T. Iwasaki, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Ogawa, Y. Morita, K. Sasaki, and K. Kobayashi, “Creating quantum sensors in hBN using He ion microscopy” [poster].
- [33] R. Suda, K. Sasaki, K. Kobayashi, K. Uriu, M. Sasaki, M. Einaga, and K. Shimizu, “Development of Quantum Sensing under High Pressure: Visualization of Pressure and Magnetic Field” [poster].

International Symposium on Quantum

Electronics (The University of Tokyo, Tokyo, Japan, February 13–16, 2024)

- [34] R. Suda, K. Sasaki, K. Kobayashi, K. Uriu, M. Sasaki, M. Einaga, and K. Shimizu, “Development of Quantum Sensing under High Pressure: Visualization of Pressure and Magnetic Field” [poster].
- [35] S. Nishimura, T. Kobayashi, D. Sasaki, T. Tsuji, T. Iwasaki, M. Hatano, K. Sasaki, and K. Kobayashi, “Quantitative imaging of superconducting vortices penetrating a thin film using diamond quantum sensor” [poster].
- [36] 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, and K. Kobayashi, “Observation of domain wall in chiral antiferromagnet” [poster] [**Best Poster Award**].

招待講演

- [37] K. Sasaki, “Development of quantum sensing techniques for condensed matter physics research,” 12th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (Tochigi, September 27–29, 2023).
- [38] K. Kobayashi, “Magnetic Field Imaging Using Quantum Sensors for Condensed Matter Physics,” Quantum Innovation 2023 (Tokyo, November 16, 2023).
- [39] K. Kobayashi, “Imaging of superconducting vortices using diamond quantum sensors,” 36th International Symposium on Superconductivity (ISS2023) (New Zealand, November 28–30, 2023).

(国内会議)

一般講演

- [40] 小林研介：「量子スピン顕微鏡で切り拓く極限物性の探索」、CREST さきがけ「量子フロンティア」、第1回合同領域会議・キックオフ（東京&オンライン、2023年10月20日–21日）（口頭）。
- [41] 小林研介：「量子スピン顕微鏡による磁場イメージング」、令和5年度新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会（東京大学物性研究所、2023年12月26–28日）（口頭）。
- [42] 塚本萌太、Z. Xu、肥後友也、近藤浩太、佐々木健人、朝倉海寛、坂本祥也、P. Gambardella、三輪真嗣、大谷義近、中辻知、C. L. Degen、小林研介：「カイラル反強磁性体の磁壁の観測」、日本物理学会2024年春季大会（オンライン、2024年3月18–21日）（口頭）。
- [43] 佐伯彰彦、秦徳郎、本山海司、寺谷義道、阪野壘、荒川智紀、M. Ferrier、R. Deblock、小林研介、小栗章：「カーボンナノチューブ量子ドットの近藤状態における磁場誘起SU(4)-SU(2)クロスオーバーに対する3体的Fermi流体効果II」、日本物理学会2024年春季大会（オンライン、2024年3月18–21日）（口頭）。
- [44] 阪野壘、秦徳郎、本山海司、荒川智紀、M. Ferrier、R. Deblock、江藤幹雄、小林研介、小栗章：「スピン近藤効果による量子ドットの電流ノイズの磁場応答の理論と実験」、日本物理学会2024年春季大会（オンライン、2024年3月18–21日）（口頭）。
- [45] 岡庭龍聖、見川巧弥、松崎雄一郎、山口達万、鈴木琉生、徳田規夫、渡邊幸志、水落憲和、佐々木健人、小林研介、早瀬潤子：「NV センターを用いた簡便かつ周波数可変な交流磁場センシング」、スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク (Spin-RNJ) シンポジウム（東北大学、2024年3月17–18日）（ポスター）。
- [46] 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, and K. Kobayashi, “Observation of domain wall in chiral antiferromagnet Mn₃Sn,” 第71回応用物理学会春季学術講演会（東京都市大学&オンライン、2024年3月22–25日）（口頭）。

日本物理学会第 78 回年次大会（2023）（東北大学、仙台、2023 年 9 月 16–19 日）

- [47] 小河健介、西村俊亮、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド量子センサを用いた広帯域マイクロ波センシング」（口頭）。
- [48] 塚本萌太、顧豪、中村祐貴、中弘周、岩崎拓哉、渡邊賢司、谷口尚、河口将志、林将光、佐々木健人、小林研介：「hBN 量子センサによる磁性体薄膜の磁気イメージング」（口頭）。
- [49] 顧豪、塚本萌太、中村祐貴、中弘周、岩崎拓哉、渡邊賢司、谷口尚、小川真一、森田行則、佐々木健人、小林研介：「ヘリウムイオン顕微鏡を用いた hBN 中の量子センサの作製」（口頭）。
- [50] 西村俊亮、小林拓、小河健介、辻起行、岩崎孝之、波多野睦子、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド量子センサによる超伝導体量子渦の測定におけるパルス技術の適用」（口頭）。
- [51] 佐々木健人、中村祐貴、顧豪、塚本萌太、中弘周、岩崎拓哉、渡邊賢司、谷口尚、小川真一、森田行則、小林研介：「ナノ精度配置した量子センサによる磁場イメージング」（口頭）。
- [52] 山本航輝、塚本萌太、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド量子センサによるマグネタイトの磁気ダイナミクスの観測」（ポスター）。
- [53] 須田涼太郎、佐々木健人、小林研介、瓜生健心、佐々木岬、榮永茉莉、清水克哉：「高圧力下での量子計測の試み：圧力と磁場の可視化」（ポスター）。
- [54] 瓜生健心、清水克哉、須田涼太郎、佐々木健人、小林研介：「高圧力下での量子計測の試み：量子センサの導入」（ポスター）。
- [55] 小林拓、西村俊亮、小河健介、辻起行、岩崎孝之、波多野睦子、佐々木健人、小林研介：「ダイヤモンド量子センサを用いた微小超伝導体における量子渦の測定」（ポスター）。
- [56] 中村祐貴、顧豪、塚本萌太、中弘周、岩崎拓哉、渡邊賢司、谷口尚、佐々木健人、小林研介：「電場と磁場の同時量子計測によるマルチフェロイクスの研究に向けて」（ポスター）。

ipi-ダイキンシンポジウム（東京大学、2023 年 10 月 24–25 日）

- [57] 塚本萌太：「ダイヤモンド量子センサの物性応用とその解析」（口頭）。
- [58] 小林拓：「ダイヤモンド量子センサを用いた量子渦測定」（ポスター）。
- [59] 山本航輝：「機械学習を用いたナノダイヤモンド量子温度計」（ポスター）。
- [60] 須田涼太郎：「高圧力下での量子計測の試み：圧力と磁場の可視化」（ポスター）。
- [61] 中村祐貴：「Toward the study of multiferroics by quantum sensing of electric and magnetic fields」（ポスター）。

招待講演

- [62] 佐々木健人：「六方晶窒化ホウ素中の色中心を用いた量子センシング」、第 84 回応用物理学会秋季学術講演会 シンポジウム「光と物質の相互作用が創り出す二次元材料研究の新しい潮流」（熊本、2023 年 9 月 19–23 日）。
- [63] 佐々木健人：「六方晶窒化ホウ素中の欠陥を用いた局所磁場計測」、一般社団法人ニューダイヤモンドフォーラム 2023 年度第 1 回研究会「ナノカーボン・二次元材料の量子エレクトロニクス応用」（東京大学生産技術研究所、2023 年 10 月 3 日）。
- [64] 小林研介：「量子スピン顕微鏡の開発」、東北大通研共同プロジェクト研究会「量子物質の制御と機能開拓およびそのデバイス応用」（仙台、2023 年 10 月 27–28 日）。
- [65] 小林研介：「量子スピン顕微鏡による物性計測技術の開発」、2024 年第 71 回応用物理学会春季学術講演会（東京都市大学&オンライン、2024 年 3 月 22–25 日）。

（セミナー）

- [66] 小林研介：「量子スピン顕微鏡による物性計測」、駒場物性セミナー（東京、2023 年 6 月 9 日）。

（プレスリリース）

- [67] 「量子制御に新手法―“ねじれ”で量子トンネル確率を自在に制御―」（東京大学）、2023 年 5 月 27 日。
- [68] 「量子センサを自在に並べる！一狙った位置にナノサイズの“方位磁針”をつくる―」（東京大学）、2023 年 6 月 14 日。
- [69] 「量子の渦、数えます！―ダイヤモンド量子センサによる超伝導研究の新手法―」（東京大学）、2023 年 9 月 16 日。

（アウトリーチ）

- [70] 小林研介：研究室訪問受け入れ（ヴィアートル学園洛星高等学校、2023 年 8 月 28 日）。
- [71] 小林研介：「ナノテクノロジーと量子力学」、令和 5 年度「東大の研究室をのぞいてみよう！～多様な学生を東大に～」（オンライン、2024 年 3 月 26 日）。

4.7 中辻・酒井研究室

今、物性分野で重要な発見が相次いでいます。これまでの磁性や超伝導、スピントロニクスといった分野が、トポロジ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

- 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
 - 量子スピナイスの磁気単極子、フォトン
- 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
- 強相関電子系における量子相転移
 - 多極子揺らぎによる異常金属相・高温超伝導

4.7.1 トポロジカル磁性体における新規量子現象の探索と巨大応答

ベリー曲率は量子ホール系における整数（チャーン数）に相当する量であり、垂直方向の量子伝導を誘起する。その端緒は TKNN 公式 (Thouless-Kohmoto-Nightingale-den Nijs) として知られ、Thouless はこの功績で 2016 年にノーベル物理学賞を受賞している。一方、異常ホール効果はゼロ磁場で発現するホール効果であり、同様のベリー曲率機構による理解が進んでいたものの、19 世紀の発見以来、強磁性体でしか観測例がなかった。その中、我々は磁性体 Mn_3Sn を用い、世界で初めて反強磁性状態において巨大異常ホール効果を観測した [Nature (2016)]。この物質は強磁性体の 1/1000 の磁化しか持たないため、ベリー曲率が極端に大きくなる機構の解明が課題であった。そこで、ベリー曲率は波数空間の仮想磁場であり、ワイル点を源として現れることに着目し、電子状態の解明やカイラル異常の研究を行い、物質中に磁気ワイルフェルミオンがいることをその世界初の例として明らかにした [Nat. Mater. (2017)]。これらの現象はすべて室温で現れることから、巨大な磁気熱電効果 [Nat. Phys. ('17, '18), Nature ('20), Nat. Commun. ('21), Sci. Adv. ('22)] や、反強磁性スピントロニクス [Nature ('19, '20, '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。

多結晶 Co_2MnGa 薄膜における巨大異常ネルンスト効果

Co_2MnGa はトポロジカルバンド構造であるワイルコーンを持つことで、最大の異常ネルンスト効果を室温で示すホイスラー合金である。従来、薄膜において大きな異常ネルンスト効果を引き出すためには基板材料に単結晶基板を用いるエピタキシャル成長や、 AlN などの結晶化しやすい材料との界面を用いて結晶成長を促進させる方法が用いられてきた。本

研究では成膜プロセスを改良することで、安価で汎用的な熱酸化 SiO_2 付き Si 基板上に直接成膜した多結晶 Co_2MnGa 薄膜においても、高価な単結晶基板を用いた薄膜と同程度である $-5.4 \mu\text{V/K}$ の異常ネルンスト効果を得ることができた [4]。 $L2_1$ 構造を取る Co_2MnGa の結晶粒を高温で成膜し高密度化できたことが要因であると考えられる。成長下地を選ばない成膜方法は、異常ネルンスト効果を用いた熱電変換素子への普及につながるだけでなく、任意の材料との接合界面を用いるスピントロニクスデバイスにおけるトポロジカル物性の応答につながることが期待される。

カゴメ格子トポロジカル反強磁性体 Mn_3Ga における異方的な異常輸送特性

トポロジカル反強磁性体 Mn_3Ga は、 $D0_{19}$ 構造のトポロジカル反強磁性体 Mn_3X ($X=\text{Sn, Ge, Ga}$) の中で、480 K という最も高いネール温度を持つため、熱安定性の観点から反強磁性体を用いた超高速スピントロニクスの実現に適している。しかしながら、作製の難しさなどの理由でこれまであまり研究の行われてこなかった物質でもある。本研究では複数の基板上にスパッタ法を用いて Mn_3Ga 薄膜試料の製膜を行った。結晶構造、電気輸送特性、光学測定から、ワイル磁性体の特性を示す純良なエピタキシャル薄膜の作製が、異なる結晶方位に対して成功したことを確認した。また、磁気構造に応じた巨大応答が THz 周波数帯でも観測され、 Mn_3Ga 薄膜における磁気状態の高速読み出しが実証された [2]。

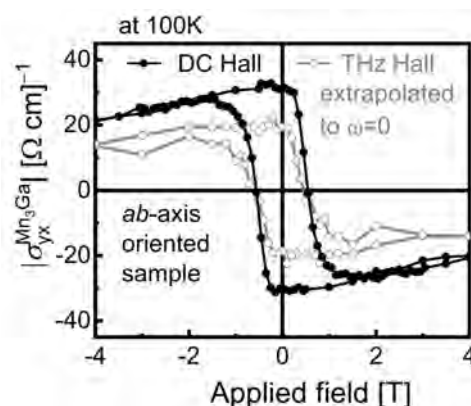


図 4.7.11: 図 Mn_3Ga における THz 周波数帯 (灰色) と DC の信号 (黒色) の磁場依存性の比較

トポロジカル磁性体を用いた熱の流出入を高精度に計測可能なフレキシブル熱流センサ

異常ネルンスト効果は量産に適した薄膜関連技術が適用できるため、従来の熱電効果であるゼーベッ

ク効果に比べて、安価、かつ、大量に、大面積・フレキシブル性の高いデバイスが作製できるという利点があり、熱流センサへの応用が期待されている。その一方で、異常ネルンスト効果を用いたセンサでは、測定対象である物体表面に対して垂直方向の熱の流入（面直熱流）の検出精度が低く、これが社会実装に進む上での課題だった。本研究では、ノイズの原因となる測定体表面の温度ムラ由来のオフセット信号を打ち消すことができる素子構造（サーモパイル構造をつくるトポロジカル磁性体 Fe-Ga と電極材料のゼーベック係数差を 0 とする素子構造）を導入することで、高感度に面直熱流が測定可能な薄膜型センサを開発することに成功した。開発したセンサは量産プロセスで用いられる Roll-to-Roll スパッタ法で PET 基板に作製可能であり、本研究では、低コスト化・フレキシブル化・大面積化・量産化といった磁気熱電効果を用いた素子開発上の利点が初めてフルに発揮された実使用可能な熱流センサを世界に先駆けて実現した [9]。

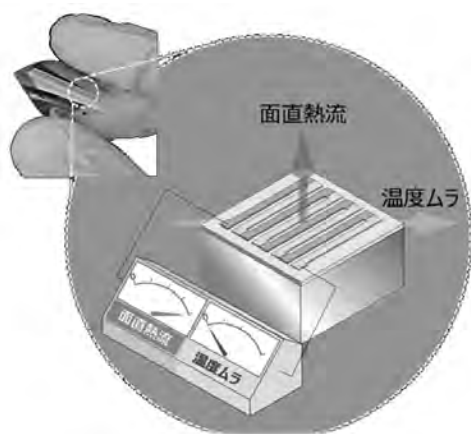


図 4.7.12: 面直熱流のみを選択的に検出可能なフレキシブル熱流センサ

反強磁性体 Mn_3Sn を用いたトンネル磁気抵抗効果の観測

トンネル磁気抵抗 (TMR) 効果は、磁性金属で絶縁体を挟んだ磁気トンネル接合を流れるトンネル電流が、磁性金属層の持つ磁気モーメントの向きによって変化する現象であり、磁気抵抗メモリなどに応用されている。TMR 効果は、強磁性金属層/絶縁体層/強磁性金属層で構成される接合系で主に観測されており、反強磁性体は磁化が補償しているため磁性金属層として用いることは困難であると考えられてきた。本研究では、異常 Hall 効果など強磁性体と類似の応答を示す反強磁性体である Mn_3Sn に着目し、 $\text{Mn}_3\text{Sn}/\text{MgO}/\text{Mn}_3\text{Sn}$ 磁気トンネル接合系を作製した。磁気抵抗効果測定の結果、 Mn_3Sn を用いた接合系において室温で TMR 効果を観測することに成功

した [14]。反強磁性体は強磁性体よりも高速な THz 帯での応答が可能であるため、本研究は、反強磁性 TMR 効果の学理開拓のみならず、今後、高速動作メモリの開発などの産業応用へも繋がると期待される。

トポロジカル磁性体の異常ホール効果の超高速ダイナミクス

磁性体に電場を印可すると、それと平行方向だけでなく垂直方向にも電流が生じることが知られている。これは異常ホール効果と呼ばれ、近年では物質の持つトポロジカルな性質とも深く関わりがあることが明らかにされている。一方、不純物由来の散乱による異常ホール効果も存在し、異常ホール効果が観測されるたびにその微視的機構がどちらに起因するものかが必ず議論の対象となっている。本研究ではトポロジカル磁性体 Mn_3Sn にフェムト秒光パルス照射しそれによって生じる異常ホール効果の変化を、テラヘルツ波パルスの偏光回転を通して調べる実験を行った。その結果、縦伝導は 3% しか変化しないにも関わらず、ホール伝導は 0.5 ps ほどの時間で 40% も変化することが明らかとなった [11]。この実験結果は、トポロジカルな性質が起源だとするとよく説明できる一方、不純物散乱由来だとすると全く説明できない。すなわち、本研究は光パルスを当てた直後の異常ホール効果を調べることで、その微視的機構を解明する新手法を開拓したものである。また、異常ホール効果は磁性体の磁気情報を電流によって読み出す手段としても重要であるが、本研究成果は磁気記録媒体への情報書き込みおよび読み出しの速度限界を決める機構を明らかにするものとしても注目される。

4.7.2 多体系における量子エンタングルメント状態

個々の量子状態の直積に分解できない状態は量子もつれ (Quantum entanglement) と呼ばれ、非局所性を始めとする量子力学特有の現象をもたらす。量子コンピュータにおいてはは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。

$\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ における巨大な磁気抵抗と異方的輸送特性

通常金属は低温でフェルミ液体となるが、銅酸化物高温超伝導体を始め一部の物質では量子ゆらぎにより異常金属 (非フェルミ液体) となることが知られている。一方、四極子近藤効果はそれとは異なる機構で異常金属状態を形成し、多極子による新たな

多体量子状態が生じる。 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ はそのような四極子近藤格子系であり、高温で電気抵抗に近藤効果 $\rho_{4f} \sim -\ln T$ を示すと同時に、 $T_Q \sim 2 \text{ K}$ で強四極子秩序、および $T_c \sim 0.2 \text{ K}$ で超伝導を示す。本研究では $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ が巨大な磁気抵抗効果 ($\sim 10^3 \%$) を示すことを明らかにし、またその異方性は温度に応じてフェルミ面のトポロジーや四極子秩序の異方性を反映したものになっていることを明らかにした [1]。この発見は多極子と伝導電子の混成を考える上で重要な基盤となる。

異常金属における超低速臨界電子電荷ゆらぎの観測

$\beta\text{-YbAlB}_4$ は常圧ゼロ磁場で外場によるチューニングのいらない異常金属状態と重い電子超伝導を示すことで知られており、その背景には Yb の価数のゆらぎが重要であると考えられてきた。本研究では電子と原子核の相互作用を測定するメスバウアー吸収分光法を用いて電子電荷の揺らぎ（ダイナミクス）を直接調べることに成功した [13]。その結果、異常金属状態において超低速で Yb の価数が揺らいでいることが新たにわかった。この超低速臨界的電子電荷揺らぎの観測は、異常金属状態と超伝導発現の起源に新たな知見を提供する。

<受賞>

- [1] M. Asakura, Best poster Award in US-German WE-Heraeus-Seminar
- [2] 酒井明人, 第2回 (2024年) AAPPS-JPS Award
- [3] 上杉 良太, 2023年春季 第70回応用物理学会英語講演奨励賞

<報文>

(原著論文)

- [4] Takachika Isomae, Akito Sakai, Mingxuan Fu, Takanori Taniguchi, Masashi Takigawa, and Satoru Nakatsuji “Extremely large magnetoresistance and anisotropic transport in the multipolar Kondo system $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ ” *Phys. Rev. Research* **6**, 013009 (2024).
- [5] M. Raju, Ralph Romero, III, Daisuke Nishio-Hamane, Ryota Uesugi, Mihiro Asakura, Zhenisbek Tagay, Tomoya Higo, N. P. Armitage, Collin Broholm, and Satoru Nakatsuji “Anisotropic anomalous transport in the kagome-based topological antiferromagnetic Mn_3Ga epitaxial thin films” *Phys. Rev. Mater.* **8**, 014204 (2024).
- [6] C. Mielke III, D. Das, J. Spring, H. Nakamura, S. Shin, H. Liu, V. Sazgari, S. Jöhr, J. Lyu, J. N. Graham, T. Shiroka, M. Medarde, M. Z. Hasan, S. Nakatsuji, R. Khasanov, D. J. Gawryluk, H. Luetkens, and Z. Guguchia “Microscopic study of the impurity effect in the kagome superconductor $\text{La}(\text{Ru}_{1-x}\text{Fe}_x)_3\text{Si}_2$ ” *Phys. Rev. B* **109**, 134501 (2024).

- [7] R. Uesugi, T. Higo, and S. Nakatsuji “Giant anomalous Nernst effect in polycrystalline thin films of the Weyl ferromagnet Co_2MnGa ” *Appl. Phys. Lett.* **123**, 252401 (2023).
- [8] M. Wu, K. Kondou, Y. Nakatani, T. Chen, H. Ishiki, T. Higo, S. Nakatsuji, and Y. Otani “Magnetic octupole domain evolution and domain-wall structure in the noncollinear Weyl antiferromagnet Mn_3Ge ” *APL Materials* **11**, 081115 (2023).
- [9] H. Tanaka, T. Higo, R. Uesugi, K. Yamagata, Y. Nakanishi, H. Machinaga, and S. Nakatsuji “Roll-to-Roll printing of anomalous Nernst thermopile for direct sensing of perpendicular heat flux” *Advanced Materials* **35**, 2303416 (2023).
- [10] M. Wu, K. Kondou, T. Chen, S. Nakatsuji, and Y. Otani “Temperature-induced anomalous magnetotransport in the Weyl semimetal Mn_3Ge ” *AIP Advances* **13**, 045102 (2023).
- [11] T. Matsuda, T. Higo, T. Koretsune, N. Kanda, Y. Hirai, H. Peng, T. Matsuo, N. Yoshikawa, R. Shimano, S. Nakatsuji, and R. Matsunaga “Ultrafast Dynamics of Intrinsic Anomalous Hall Effect in the Topological Antiferromagnet Mn_3Sn ” *Physical Review Letters* **130**, 126302 (2023).
- [12] N. Budai, H. Isshiki, R. Uesugi, Z. Zhu, T. Higo, S. Nakatsuji, and Y. Otani “High-resolution magnetic imaging by mapping the locally induced anomalous Nernst effect using atomic force microscopy” *Applied Physics Letters* **122**, 102401 (2023).
- [13] Hisao Kobayashi, Yui Sakaguchi, Hayato Kitagawa, Momoko Oura, Shugo Ikeda, Kentaro Kuga, Shintaro Suzuki, Satoru Nakatsuji, Ryo Masuda, Yasuhiro Kobayashi, Makoto Seto, Yoshitaka Yoda, Kenji Tamasaku, Yashar Komijani, Premala Chandra, and Piers Coleman “Observation of a critical charge mode in a strange metal” *Science* **379**, 908-912 (2023).
- [14] Xianzhe Chen, Tomoya Higo, Katsuhiko Tanaka, Takuya Nomoto, Hanshen Tsai, Hiroshi Idzuchi, Masanobu Shiga, Shoya Sakamoto, Ryoya Ando, Hidetoshi Kosaki, Takumi Matsuo, Daisuke Nishio-Hamane, Ryotaro Arita, Shinji Miwa and Satoru Nakatsuji “Octupole-driven magnetoresistance in an antiferromagnetic tunnel junction” *Nature* **613**, 490-495 (2023).
- [15] M. Ishibashi, K. Yakushiji, M. Kawaguchi, A. Tsukamoto, S. Nakatsuji, and M. Hayashi “Reversal of current-induced domain wall motion in TbFeCo ferrimagnetic thin films across the magnetization compensation point” *Japanese Journal of Applied Physics* **62**, 013001 (2023).

(学位論文)

- [16] 梶原 悠人 “トポロジカル物質の異方的輸送現象の実験的研究” (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・修士論文) (2024).

- [17] 小池 祐樹 “トポロジカル磁性体の異方的熱電効果の発現とその機構の実験的解明” (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・修士論文) (2024).
- [18] 柚木崎 正彦 “3 端子磁気トンネル素子の作製と電流誘起磁化反転の局所的検出” (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・修士論文) (2024).
- [19] Yangming Wang “Experimental studies of giant transverse thermoelectric effect in topological magnets” (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・博士論文) (2024).
- [20] 上杉 良太 “ワイル強磁性体 Co_2MnGa 薄膜における巨大異常ネルンスト効果” (東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻・博士論文) (2024).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [21] T. Higo, “Electrical manipulation and detection of topological antiferromagnetic state in Mn_3Sn -based epitaxial heterostructures” International Symposium on Quantum Electronics 2024 2024/02/13 - 2024/02/16
- [22] Akito Sakai, “Ferroic multipole order in the quadrupole Kondo lattice $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ studied by magnetostriction and thermal expansion” International Symposium on Quantum Electronics 2024 2024/02/13 - 2024/02/16
- [23] K. Tanaka, “First-principles study on tunnel magnetoresistance effect with antiferromagnets” International Symposium on Quantum Electronics 2024 2024/02/13 - 2024/02/16
- [24] Ryota Uesugi, “Large anomalous Nernst effect in polycrystalline thin films of the Weyl ferromagnet Co_2MnGa ” APS March Meeting 2024 2024/3/4
- [25] T. Higo, “Perpendicular Switching of Noncollinear Antiferromagnetic Order in the Chiral Antiferromagnet Mn_3Sn by Electric Current” 11th International Symposium on Metallic Multilayers (MML2023) 2023/7/25
- [26] M. Ishibashi, “Error Rate of a Ferrimagnetic Spin Shift Resister” 11th International Symposium on Metallic Multilayers (MML2023) 2023/7/25
- [27] A. Sakai, “Unveiling Multipole Ordering in $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ by Magnetostriction and Thermal Expansion” SCES2023 2023/7/3
- [28] T. Matsuo, “Crystal Orientation Control of the Weyl Antiferromagnet Mn_3Sn in its Film Capped with a Tantalum Layer” InterMag 2023 2023/5/16
- 招待講演
- [29] S. Nakatsuji, “Manipulation of Weyl semimetallic states in the chiral antiferromagnet Mn_3Sn ” US-German WE-Heraeus-Seminar “Engineered Quantum Materials” 2024/1/11
- [30] Satoru Nakatsuji, “Manipulation of Weyl Semimetallic state in the chiral antiferromagnet Mn_3Sn ” CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials 2024 2024/2/20
- [31] T. Higo, “Electrical manipulation and detection of non-collinear spin textures in the chiral antiferromagnet Mn_3Sn ” APS March Meeting 2024 2024/3/5
- [32] S. Nakatsuji, “Anomalous transport and its electrical manipulation in chiral Antiferromagnetic” KITP Program of Scientific Activities for Dynamical Response and Transport in Quantum Magnets 2023/8/28
- [33] S. Nakatsuji, “Electrical Writing and Reading of Weyl Semimetallic States in the Chiral Antiferromagnet Mn_3Sn ” 11th International Symposium on Metallic Multilayers (MML2023) 2023/7/24
- [34] S. Nakatsuji, “Topological and multipolar magnets and spintronics” 2023 Principles and Applications of Symmetry in Magnetism Summer School 2023/7/11
- [35] M. Fu, “Ordered phases, non-Fermi liquid, and quantum criticality driven by entanglement between multipoles and conduction electrons” Condensed Matter Seminar 2023/7/11
- [36] A. Sakai, “Anomalous transport properties and ferroic multipole order in the quadrupole Kondo lattice $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Ti}, \text{V}$)” Quantum Magnetism and Topology 2023 (QMT2023) 2023/6/28
- [37] S. Nakatsuji, “Quantum Anomalous Transport using Weyl Antiferromagnets” 2023 Topological and Correlated Matter, Gordon Research Conference 2023/5/31
- (国内会議)
- 一般講演
- [38] Mihiro Asakura, “Observation of exchange bias effect in a polycrystalline chiral-antiferromagnet/collinear-antiferromagnet bilayer” 2024 年第 71 回応用物理学会春季学術講演会 2024/3/22
- [39] 朝倉 海寛, “磁気界面結合を用いたカイラル反強磁性体の磁気特性制御” 日本物理学会第 78 回年次大会 (2023 年) 2023/9/18
- [40] 松本卓也, “フェリ磁性体 GdCo_2 における磁気輸送特性” 日本物理学会第 78 回年次大会 (2023 年) 2023/9/18
- [41] Zhiyi Duan, “Doping Effect in Weyl Antiferromagnet Mn_3Sn ” 日本物理学会第 78 回年次大会 (2023 年) 2023/9/18
- [42] 田中克大, “カイラル反強磁性体 Mn_3Sn を用いたトンネル磁気接合素子におけるトンネル磁気抵抗効果の第一原理計算” 日本物理学会第 78 回年次大会 (2023 年) 2023/9/17

- [43] 対馬湧太郎, “ワイル反強磁性体 Mn_3Sn 薄膜の磁気輸送特性に対する Cr ドーピング効果” 日本物理学会第 78 回年次大会 (2023 年) 2023/9/17
- [44] 肥後友也, “カイラル反強磁性体 Mn_3Sn 磁気トンネル接合素子における磁気抵抗効果” 日本物理学会第 78 回年次大会 (2023 年) 2023/9/17
- [45] 黒沢駿一郎, “カゴメ強磁性体 Fe_3Sn 薄膜における磁気熱電効果” 日本物理学会第 78 回年次大会 (2023 年) 2023/9/17
- [46] 上杉良太, “ワイル強磁性体 Co_2MnGa 薄膜におけるトポロジカル電子構造に由来した横熱電応答の規則度依存性” 日本物理学会第 78 回年次大会 (2023 年) 2023/9/17

招待講演

- [47] Satoru Nakatsuji, “Designing Topological Magnetic Materials for Innovative Quantum Electronics” Max Planck Lecture 2023/9/29
- [48] Satoru Nakatsuji, “磁性ワイル半金属の異常量子伝導とその制御” 日本物理学会第 78 回年次大会 (2023 年) 2023/9/17
- [49] Satoru Nakatsuji, “Mn 系合金の異常ホール効果” 日本磁気学会第 244 回研究会/第 7 回磁気センサ専門研究会 磁性金属の異常ホール・ネルンスト効果と磁気および熱流センサへの応用 2023/9/15

5 一般物理理論

5.1 宇宙理論研究室 (須藤・吉田)

宇宙は、微視的スケールから巨視的スケールにわたる多くの物理過程が複雑に絡まりあった物理系であり、研究テーマは多岐にわたっている。しかしそれらの共通のゴールは、宇宙の誕生から現在、さらには未来に至る進化史を物理学によって記述することである。そのためには、常に学際的かつ分野横断的な活動が本質的であり、ビッグバン宇宙国際研究センター、カブリ数物連携宇宙研究機構を始め、国内外の他研究機関と積極的に共同研究を行っている。

現在我々のグループが行っている中心的課題は、宇宙のダークエネルギーとダークマター、太陽系外惑星、第一世代天体形成、高エネルギー天文現象の4つである。これらについて簡単に説明を加える。

宇宙論的観測データから、宇宙の全エネルギー密度の7割がダークエネルギー、1/4がダークマター、残りの約5パーセントが通常の元素、という結論が得られている。これが宇宙の「標準モデル」である。しかしながら宇宙の主成分の正体が全く理解されていないという驚くべき事実は、宇宙・素粒子物理学のみならず、21世紀科学全体に対して根源的な謎を突きつけている。

最近の深宇宙探査から、130億年以上も前、つまり宇宙が誕生してから数億年という早期の銀河やブラックホールが発見されている。ビッグバンの後文字通り暗黒となった宇宙にいつ、どのように光り輝く天体が生まれたのか。宇宙初期の巨大なブラックホールはどのように成長したのだろうか。第一世代天体はその後の銀河形成や宇宙の進化に大きな影響を及ぼす現代天文学のホットトピックの一つである。次世代の大型望遠鏡によりそれらの観測が飛躍的に進むものと期待されている。

第2の地球は存在するか。荒唐無稽にも聞こえかねないこの疑問に対して、現在の天文学は確実に科学的に迫りつつある。1995年の初発見以来、2009年3月に打ち上げられたケプラー衛星を経て、太陽系外惑星はすでに4000個以上が発見されている。そのなかの地球型惑星に生命の兆候をいかにして見出すか。これは、物理学のみならず、天文学、地球惑星学、生物学などを総動員して取り組むべき、まさに理学部横断的な研究テーマである。

さらに、重力波直接観測に代表される最近の発展を念頭に置き、重力波・ニュートリノ・電磁波の観測による全粒子時間軸天文学、ブラックホールや中性子星の誕生や合体、宇宙初期の超新星爆発といった爆発的突発現象の系統的研究にも取り組んでいる。

5.1.1 観測的宇宙論

Fuzzy Dark Matter ハローのコア・ハロー質量関係

FDM ハローにはソリトンコアという量子力学的効果に由来する特有な構造が存在することが分かっている。しかし、FDM ハローの構造を特徴づけるコア・ハロー質量関係に関する統一的な理解はなされていない。本研究では、あるハロー質量に対し、緩和時間条件によって中心部分で質量再分配が起きてコアが形成するものと仮定してコア質量を計算することで、コア・ハロー質量関係を導いた。その結果、既存のシミュレーションを再現できることが分かり、またハローの質量集中度の分散がコア・ハロー質量関係の分散に一部由来していることが分かった。

強重力レンズ効果の臨界曲線近傍の超高増光率像

銀河団をレンズ天体とする強重力レンズ効果において、非常に高い増光率の単独の星などの光源が近年観測されている。これらの超高増光率の光源は、レンズ天体の臨界曲線と呼ばれる曲線の近傍で観測され、その形状や分布はレンズ天体内の質量分布に依存する。臨界曲線近傍で見つかる超高増光率像の観測例は今後増えていくことが期待されており、観測頻度や位置を統計的に理解し予言することが重要となる。本研究では Glafic と Gerlumph と呼ばれる重力レンズ効果のシミュレーション結果を基に、超高増光率像の確率密度関数に関する統計的理論モデルを構築した。特に銀河団内の星の量と、像の大局的臨界曲線からの距離を2つのパラメータとし、確率密度関数のパラメータ依存性を調べた。我々は「独立した局所臨界曲線の個数」を定義し、それが確率密度関数を表すために重要な物理量になることを発見した。

宇宙再電離期における相互相関シグナルの予測

宇宙年齢数億年に宇宙全域で起きた相転移現象、宇宙再電離現象がどのように起きたかを理解することは、銀河などの天体の形成・進化過程を明らかにするとともに、宇宙論のパラメータを制限するにあたって重要となる。我々は、数値計算を用いて宇宙再電離期における中性水素からの21cm線シグナルの分布と銀河の分布の相関が銀河モデルによってどのように変化するかを探り、シグナルの符号が変化する場所を捉えることでモデルに制限を与えることができることを示した。

宇宙初期の密度揺らぎパワースペクトル

James Webb 宇宙望遠鏡による遠方銀河の観測により、赤方偏移動7以上の遠方（早期）の宇宙では質

量の大きな明るい銀河が従来の予想よりも多くみつき、銀河形成モデルや宇宙モデルに修正が必要なのではないかと示唆されている。早期宇宙の構造形成は、初期密度揺らぎの振幅に大きく依存する。本研究ではおよそ銀河サイズ以下の長さスケールでの密度揺らぎを変えた N 体シミュレーションを系統的に行い、最近の銀河の質量関数や光度関数から得られる揺らぎのスペクトルの制限を導いた。[15]。

遠方銀河の力学的進化

2022 年 7 月から運用が開始された NASA の宇宙望遠鏡 JWST は高い空間分解能をもち、遠方銀河の内部構造が詳細に観測されつつある。観測された銀河の多成分 (クランプ) 構造の起源を明らかにすべく、大規模・高解像度の宇宙論的銀河形成シミュレーションで得られるデータから、複数のクランプ構造を同定するプログラムを開発した。数千スナップショットの銀河を調べたところ、銀河同士の衝突の際に周囲のガスが圧縮されることでクランプ構造が形成されることを示した。

量子コンピューターによる無衝突ボルツマン方程式の高速化

昨年度作成した無衝突ボルツマン方程式を解く量子アルゴリズムは、そのままでは情報の取り出しの部分に難があり計算量を著しく悪化させていた。計算対象を絞り、量子コンピューターから取り出す情報を制限しても計算結果が大きく損なわれないようにすることで計算量が改善した。また、古典コンピューターによる proof of concept でのテスト計算も交えて、本アルゴリズムが適用できる計算対象を指定した。

5.1.2 星・惑星形成

5.1.3 系外惑星

紫外線加熱による惑星大気散逸及びその惑星進化への影響の理論的理解

太陽系外には恒星の近くを数日程度で公転する惑星が多数存在する。こうした短周期惑星は恒星からの強い紫外線によって大気が加熱され膨張することで大気が散逸していることが知られており、実際に散逸した大気中の水素による Lyman- α の吸収やヘリウムによる吸収が観測されている。一方で近年の観測により散逸大気による吸収が見られない短周期惑星が発見されてきている。大気散逸を決める特徴的な温度を恒星の紫外線強度及び惑星パラメータから定義し、観測された惑星を分類分けすることで紫外線強度が小さいために吸収が見られないのか他の要因によって吸収が阻害されているのかを場合分けすることができた [19]。また、こうした惑星大気の散逸

は短周期惑星の質量や半径、軌道をも左右する過程である。詳細な大気散逸の効果を取り入れた惑星進化計算を行い、惑星進化には大気散逸効率の紫外線強度依存性やマグネシウムなどの金属による冷却の効果が重要であることを明らかにした [34, 37, 48]。

原始惑星系円盤の 1 次元進化計算

前主系列星周りには、ガスとダストでできた原始惑星系円盤がある。惑星系は円盤内部で円盤物質から形成されるため、惑星系形成過程の解明において、原始惑星系円盤の散逸過程の理解は必須である。そこで、主な円盤散逸過程である降着、磁気円盤風、光蒸発に加え、星進化に伴う光度の変化を取り入れた、円盤 1 次元長期進化計算コードを開発した。計算から、3 太陽質量の星周りで、一番光度進化による影響が大きく、星進化を考慮しない場合に比べて、円盤寿命は半分となった。これは、数百万年で中心星が主系列星に到達し、光蒸発を駆動する遠紫外線 (FUV; 6-13.6 eV) の放射強度が 2 桁増加することによって、光蒸発による質量損失が効果的になるためである。

Gaia で発見されたブラックホール候補が連星である可能性の検証

Gaia により、ブラックホールと恒星からなる連星候補が 2 つ (Gaia BH1, Gaia BH2) 発見された。我々はそのような系が実は 3 体系で、中心に単独ブラックホールではなく連星ブラックホールが存在している場合の観測的兆候を計算してきており、今回はこの 2 つの天体について定量的な予言を行った。その後 Caltech グループが行った追観測では、そのような観測的兆候は検出されなかったが、次期の公開データリリースで同様の連星候補が数多く発見されることが期待されており、ブラックホールを含む 3 体系が初検出されるかもしれない [10]。

原始星からの単極アウトフロー形成モデル

原始星がアウトフローを伴う例は数多く発見されている。そのほとんどは双極アウトフローであるが、なかには一方向しか吹き出さない単極アウトフローである系も知られている。しかし、それが観測者との幾何学的配置によって、見かけ上一方向しか観測されていないだけなのか、あるいは実際に単極アウトフローであるのかは確定していない。我々は磁場を考慮した SPH シミュレーションを実行し、単極アウトフローが形成される条件を調べた。その結果、磁場のエネルギーと乱流のエネルギーの比で決まる無次元パラメータが、双極と単極を決めていることを発見した。相対的に磁場が弱い場合は、乱流の効果によって磁場の向きが乱され、双極アウトフローとならない。さらに単極アウトフローの場合には、そ

の反作用によって系が一方方向に加速されることを発見し、原始星ロケット効果と名付けた。[13]。

ブラックホールのスピンと母銀河の角運動量ベクトルのなす角度の理論予言

太陽系外惑星系では、主星の自転軸と惑星の公転軸がずれている場合が珍しくないことがわかってきた。その起源は諸説あるもののまだ理解されていない。我々は全く異なるスケールをもつ系である、銀河と中心の巨大ブラックホールからなる系に注目し、その公転軸と自転軸のなす角度の分布関数を宇宙論的流体シミュレーションによって評価した。その結果、45度以内に整列しているものは3割程度しかなくことを見出した。なかには、他の銀河との相互作用を通じて、ブラックホールのスピンと母銀河の角運動量ベクトルがほぼ反平行状態にある系も存在することがわかった。[17]。

<報文>

(原著論文)

- [1] R. Ura, *et al.* (incl. Y. Nakazato and N. Yoshida), *ApJ*, 948, 1 (2023)
- [2] K. Moriwaki, T. Nishimichi, N. Yoshida, *Reports on Progress in Physics*, 86(7):076901 (2023)
- [3] B. Dzieciol, I. Osadchuk, J. Cukras, J. Lundell, *Molecules*, 28(13), 5148 (2023)
- [4] Y. Tamura, *et al.* (incl. K. Moriwaki and N. Yoshida), *ApJ*, 952, 9 (2023)
- [5] T. Hashimoto, *et al.* (incl. Y. Nakazato and N. Yoshida), *ApJL*, 955, 8 (2023)
- [6] A. Bayer, *et al.* (incl. Y. Zhong), *Phys. Rev. D* 108, 043521 (2023)
- [7] K. Hirashima, K. Moriwaki, *et al.*, *MNRAS*, 526, 4054 (2023)
- [8] W. Lake, *et al.* (incl. Y. Nakazato and N. Yoshida), *ApJL*, 956, 1 (2023)
- [9] D. Tsuna, Y. Nakazato, T. Hartwig, *MNRAS*, 526, 4 (2023)
- [10] T. Hayashi, Y. Suto, A.A. Trani, *ApJ*, 958, 26 (2023)
- [11] C.E. Williams, *et al.* (incl. Y. Nakazato and N. Yoshida), *ApJL*, 960, 2, 16 (2024)
- [12] K. Miyamoto, S. Yamazaki, F. Uchida, K. Fujisawa, N. Yoshida, *Physical Review Research*, 6, 013200 (2024)
- [13] D. Takaishi, *et al.* (incl. Y. Suto), *ApJ*, 963, 20 (2024)
- [14] A. Komaki, R. Kuiper and N. Yoshida, *ApJ*, 953, 81 (2024)
- [15] Hirano, S., Yoshida, N., *ApJ*, 963, 2 (2024)

- [16] Y. Zhong, K. Kashiyama, S. Takasao, *et al.*, *ApJ*, 963, 26 (2024)
- [17] S. Peirani, Y. Suto, *et al.*, *A&A*, (2024), in press. (会議抄録)
- [18] H. Jiang, *Proceedings of the Big Data Analytics in Astronomy, Science, and Engineering* (2024)
- [19] H. Mitani, R. Nakatani, N. Yoshida, *IAUS*, 370, 155 (2023)
- [20] K. Hirashima, K. Moriwaki, *et al.*, in *NeurIPS 2023 AI for Science Workshop* (2023)

(国内雑誌)

- [21] 須藤 靖: “2022 年度 仁科記念賞: 小松英一郎氏”、日本物理学会誌 **78**(2023) pp.287–288.
- [22] 須藤 靖: “注目の多い雑文 その六十二: 門前の AI 習わぬ経を読む”、東京大学出版会 **UP 608**(2023)6 月号, pp.30–37.
- [23] 須藤 靖: “マルチバースとしてのメタバースを巡るメタな考察” 集英社クオータリー kotoba **52** 2023 年夏号 pp.76–83.
- [24] 須藤 靖: “コペルニクス生誕 550 年”、日本天文学会誌 天文月報 **116**(2023) pp.461–468.
- [25] 須藤 靖: “注目の多い雑文 その六十三: AI なき世界”、東京大学出版会 **UP 611**(2023) 9 月号, pp.43–49.
- [26] 須藤 靖: “注目の多い雑文 その六十四: いまここにある宇宙とぼくの起源について”、東京大学出版会 **UP 614**(2023) 12 月号, pp.27–35.
- [27] 須藤 靖: “注目の多い雑文 その六十五: UP を向いて歩こう”、東京大学出版会 **UP 617**(2024) 3 月号, pp.13–19.

(学位論文)

- [28] 稲熊穂乃里, “階層的三体系の力学進化によるブラックホール連星合体” (修士論文)
- [29] 山崎壮一郎 “古典計算と量子計算による新たなボルツマンソルバー” (修士論文)
- [30] Bartosz Dzieciol, “White Dwarf Populations from a Semi-Analytical Star Formation Model”, Master thesis
- [31] Yuting Lu, “Observational studies of stellar rotation using high precision photometric data”, Ph.D thesis

(著書)

- [32] 文系のための光の不思議 (吉田直紀監修 ニュートンプレス 2023/6/12)
- [33] 須藤靖: “宇宙する頭脳 物理学者は世界をどう眺めているのか?”、朝日新書 (2024 年 3 月刊行、288 ページ)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [34] H. Mitani, “Effects of atmospheric escape on planetary evolution”, “Protostars and Planets VII”, Kyoto University (April 2023)
- [35] R.L. Zhang, “Fast semi-analytical method for generating mock line intensity maps tracing the large-scale structure”, Future Science with CMB x LSS workshop, YITP, Kyoto University, (April 2023)
- [36] R.L. Zhang, “Fast generation of mock line intensity maps using hydrodynamical simulations”, Present and Future of Line-Intensity Mapping, Max Planck Institute for Astrophysics, (April 2023)
- [37] H. Mitani, “Radiation Hydrodynamic Simulation of Metal-rich Hot Jupiters”, JpGU, Makuhari (June 2023)
- [38] Y.Nakazato, “Simulations of high-redshift [OIII] emitters: Chemical evolution and multi-line diagnostics”, Shedding new light on the first billion years of the Universe (July 2023)
- [39] H. Kawai, “An analytic model for the core-halo mass relation in fuzzy dark matter halos”, XV International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology (ICGAC15), Kolon Hotel at Gyeongju in Korea (July 2023)
- [40] Y. Suto, “Dynamics of a triple system comprising an inner binary black hole in a mutually inclined orbit”, Kavli-IAU symposium 382, University of Namur, Belgium (July 2023)
- [41] Y.Nakazato, “Modeling of Optical emission lines and recent JWST observations”, One-day workshop on galaxies in the era of JWST/ALMA, The University of Tokyo (August 2023)
- [42] Y.Nakazato, “Simulations of high-redshift [OIII] emitters: Chemical evolution and bursty star formation history”, RESCEU summer school, Shinshu University (August 2023)
- [43] H. Jiang, “Search for M-dwarf Flares by Machine Learning Method”, RESCEU summer school 2023, Shinshu University (August 2023)
- [44] K. Moriwaki, “Deep learning for line intensity mapping: reconstruction of the large-scale structure of the universe”, Astro AI with Fugaku, Tsukuba University (September 2023)
- [45] R.L. Zhang, “Importance of the scatter in the SFR-halo mass relation in analysing galaxy survey and line intensity mapping data”, ASJ Autumn annual meeting 2023, Nagoya University (September 2023)
- [46] Y. Zhong, “Spindown of Pulsars Interacting with Companion Winds: Implications for the Double Pulsar PSR J0737-3039”, HEPRO VIII : High Energy Phenomena in Relativistic Outflows, Paris, France (October 2023)
- [47] H. Kawai, “Analytic model for the statistics of ultra-high magnification events”, The 14th RESCEU International Symposium, University of Tokyo (November 2023)
- [48] H. Mitani, “Atmospheric Escape of Hot Jupiters”, 14th RESCEU Symposium, The University of Tokyo (November 2023)
- [49] Y.Nakazato, “FirstLight simulations: Chemical evolution and bursty star formation history of high-redshift [OIII] emitters”, Resolving the Extragalactic Universe with ALMA & JWST, Waseda University (November 2023)
- [50] H. Kawai, “Analytic model for the statistics of ultra-high magnification events”, Zooming PRIN - latest developments and future perspectives, University of Milan (November 2023)
- [51] Y. Yamada, “Target selection of [OII] emission line galaxies for PFS observation”, The 14th RESCEU International Symposium, University of Tokyo (November 2023)
- [52] H. Jiang, “Searching for Short M-Dwarf Flares by Machine Learning Method”, the 11th International Conference on Big Data Analytics in Astronomy, Science, and Engineering (BDA) 2023, Aizu University (December 2023)
- [53] Y. Zhong, “Spindown of Pulsars Interacting with Companion Winds”, The 32nd Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, Shanghai, China (December 2023)
- [54] Y. Nakazato, “Formation and evolution of galaxies in the early Universe by 3D hydrodynamical simulation”, International Symposium on Quantum Electronics (February 2024)

招待講演

- [55] N. Yoshida, “Formation of the First Stars and Galaxies”, Neutral Hydrogen as a Cosmological Probe Across Cosmic Time, Nazareth, Israel, (May 2023)
- [56] K. Moriwaki, “Galaxy formation with cosmological simulation and machine learning”, NECO Summer School, Kyoto University (September 2023)
- [57] K. Moriwaki, “Deep learning application to large-scale structure of the universe traced by line intensity”, The 14th RESCEU Symposium, From Large to Small Structures in the Universe, The University of Tokyo (October 2023)
- [58] N. Yoshida, “Putting the Universe in a computer”, From Large to Small Structures in the Universe, University of Tokyo (October 2023)
- [59] Y. Suto, “From N to 3”, the 14th RESCEU symposium “From Large to Small Structures in the Universe”, The University of Tokyo (November 2023)
- [60] N. Yoshida, “Small-scale density fluctuations and early structure formation”, Multi-Messenger Astronomy - Bridging Transients, Lensing, and Dark

Matter, The Chinese University of, China (November 2023)

- [61] N. Yoshida, “Simulating Cosmic Structure Formation”, International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics, Hong Kong SAR, China (November 2023)
- [62] Y. Suto, “Dynamics of a tertiary body orbiting an inner binary black hole”, RESCEU-NBIA workshop on gravitational-wave sources, The University of Tokyo (December 2023)
- [63] K. Moriwaki, “Reconstruction of the Large-Scale Structure of the Universe with Conditional GAN”, AI-driven discovery in physics and astrophysics, The University of Tokyo (January 2024)
- [64] K. Moriwaki, “Machine Learning in Cosmology and Astrophysics”, Third Mini-Workshop on the Early Universe, Ishigaki (February 2024)
- [65] N. Yoshida, M. Takada, M. Chiba, “Subaru Prime Focus Spectrograph”, 4MOST Science Meeting, Uppsala University, Sweden (February 2024)

(国内会議)

一般講演

- [66] 仲里佑利奈, “Zoom-in simulations of high-redshift galaxies & emission line modeling for JWST and ALMA”, 微細構造線研究会, 愛媛大学 (2023 年 9 月)
- [67] 森脇可奈, “数値シミュレーションを用いた再電離期における 21cm 線と輝線銀河の相関シグナルの推定”, 日本天文学会 2023 年 秋季年会, 名古屋大学 (2023 年 9 月)
- [68] 山田祐佳, “PFS 観測に向けた $z \sim 1.6-2.4$ の [OII] 輝線銀河のターゲットセレクション”, 日本天文学会 2023 年秋季年会, 名古屋大学 (2023 年 9 月)
- [69] 仲里佑利奈, “銀河形成シミュレーションを用いた電離期における clumpy 銀河の形成”, 日本天文学会 2023 年秋季年会, 名古屋大学 (2023 年 9 月)
- [70] 森脇可奈, “条件付き生成モデルによって探る遠方銀河の性質と宇宙再電離の関連”, 日本天文学会 2024 年春季年会, 東京大学 (2024 年 3 月)
- [71] 河合宏紀, “臨界曲線近傍の超高増光率像に関する統計的理論モデル”, 日本天文学会 2024 年春季年会, 東京大学 (2024 年 3 月)
- [72] 駒木彩乃, 三谷 啓人, 吉田直紀, “原始惑星系円盤の散逸過程: 中心星の進化による影響”, 日本天文学会 2024 年春季年会, オンライン (2024 年 3 月 11 日-15 日)

招待講演

- [73] 森脇可奈, “機械学習を用いた銀河サーベイデータ解析手法のレビュー”, 第 53 回 天文・天体若手夏の学校, 東京大学 (2023 年 8 月)
- [74] 吉田直紀, “遠方銀河と宇宙論”, 輝線銀河研究会, 名古屋大学 (2023 年 9 月)

- [75] 吉田直紀, “革新的画像解析技術を用いた広域宇宙撮像データ分析”, ipi-ダイキンシンポジウム, 東京大学 (2023 年 10 月)

(講演)

- [76] 須藤靖, “太陽系外惑星とその先にある世界”, 学術フロンティア講義 第 9 回, 東京大学駒場キャンパス (2023 年 6 月)
- [77] 須藤靖, “A single black hole or a binary black hole: how to detect a star orbiting a binary black hole”, Astrophysics Colloquium, Ludwig-Maximilians-University, Munich, (July 2023)
- [78] 須藤靖, “加速膨張する宇宙と加速する観測的宇宙論”, 日本物理学会 第 16 回 オンライン物理講話 (2023 年 9 月)
- [79] 須藤靖, “地平線の先に世界はあるか - マルチバースと人間原理 -”, 名古屋大学物理学教室 Uxg 研セミナー (2023 年 9 月)
- [80] 須藤靖, “見えないブラックホールの探し方”, 日本物理学会四国支部講演会, 高知大学朝倉キャンパス (2023 年 9 月)
- [81] 須藤靖, “地球を相対化して世界を知る”, 公開シンポジウム 「われわれはどこから来て、どこへ行くのか」 そのストーリーと新たな博物館の可能性, 国立科学博物館 上野 (2023 年 10 月)
- [82] 須藤靖, “Precision Cosmology before Einstein: Neptune and Vulcan as dark matter in the 19th century”, Physics Department Colloquium, Kyoto University (October 2023)
- [83] 須藤靖, “工科大生はこの本を読み (秋)”, 理工学のフロンティア 第 6 回, 高知工科大学 online (2023 年 10 月)
- [84] 吉田 直紀, “科学 x AI”, 三井住友 Pre-EMP プログラム, 東京大学 (2023 年 12 月)
- [85] 須藤靖, “加速する宇宙と加速する宇宙論”, プラネタリウム 100 周年 連続宇宙講座 第 10 回, コスモプラネタリウム渋谷 (2024 年 1 月)
- [86] 須藤靖, “宇宙における偶然と必然”, 早稲田大学 オープンカレッジ (2024 年 1, 2 月)
- [87] 須藤靖, “宇宙する人生”, 最終講義, 東京大学小柴ホール (2024 年 3 月)

(セミナー)

- [88] K. Moriwaki, “Deep Learning Application for Reconstruction of Large-Scale Structure of the Universe”, Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics (June 2023)
- [89] N. Yoshida, “Formation of the First Stars, Galaxies, and Black Holes”, Kavli Colloquium, University of Cambridge, UK (October 2023)
- [90] Y. Nakazato, “Chemical and dynamical evolution of high-redshift [OIII] emitters in FirstLight simulation”, Universidad Autónoma de Madrid (December 2023)

- [91] Y. Nakazato, “Chemical evolution and bursty star formation history of high-redshift galaxies from ALMA to JWST”, Centro de Astrobiología, (CAB, CSIC-INTA), Madrid (December 2023)
- [92] H. Kawai, “Cosmological structure formation with fuzzy dark matter”, University of Warsaw (January 2024)
- [93] H. Kawai, “Analytic model for strong lensing events near critical curves with microlenses and substructures”, University of Barcelona, January 2024)
- [94] H. Kawai, “Analytic model for strong lensing events near critical curves with microlenses and substructures”; Seminar (Institution of Physics of Cantabria (January 2024)
- [95] N. Yoshida, “Formation of the First Stars and Black Holes in the Universe”, Origins Colloquium/KVA-JSPS Seminar, Chalmers University of Technology, Sweden (February 2024)
- [96] N. Yoshida, “Machine Learning for Observational Cosmology”, Oskar Klein Center/KVA-JSPS Seminar, Royal Institute of Technology, Sweden (February 13, 2024)
- [97] N. Yoshida, “Formation of the First Stars and Black Holes in the Universe”, AlvaNova Colloquium/KVA-JSPS Seminar, Stockholm University, Sweden (February 2024)

5.2 村尾研究室

量子情報とは、0と1のみならず0と1の任意の重ね合わせ状態を取ることができるような量子力学的な状態で表される情報である。量子力学の許す範囲で状態を自由に操作して変換することによって、古典力学に基づいた状態の変換として表される古典情報処理より優位な情報処理を実行しようとするのが量子情報処理であり、古典情報処理の限界を超えるブレイクスルーの候補として近年注目を集めている。

本研究室では、計算アルゴリズムや情報処理を効率よく実行するための装置としてだけではなく、量子力学的に許されるすべての操作を自由に行うことができる装置として量子コンピュータをとらえ、量子コンピュータを用いることで現れる量子力学的効果に関する理論的研究を行っている。我々の研究は、「情報と情報処理という操作論的な観点から量子力学への基盤的理解を深める」という基礎科学的なアプローチと、「エンタングルメントなどの量子力学特有の性質を情報処理、情報通信、量子学習、量子精密操作、機械学習などに役立てる」という応用科学的なアプローチの相乗効果により、量子情報理論の分野の発展に貢献する基盤的成果をあげている。国内外の多彩な背景を持つ研究者との共同研究や研究協力を実施し、研究を遂行していることも特色である。

今年度は、村尾美緒教授、山崎隼汰助教、日本学術振興会外国人研究員の Philip Taranto 博士、博士

課程大学院生の田中雄氏、Timothy Forrer 氏、吉田智治氏、修士課程大学院生の大嶽竜樹氏、磯貝夏斗氏、大学院研究生の松井浩介氏、USTEP 大学院生の Ludvig Lindström 氏、インターン生の Vanessa Brzic 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 高階量子計算

アイソメトリ操作の共役化アルゴリズム

既存の高階量子アルゴリズムは、入力量子操作がユニタリ操作で与えられる場合が多かった。本研究では非ユニタリ操作への拡張として、ユニタリ反転という高階量子アルゴリズムをアイソメトリ操作の場合に拡張する系統的な方法を提案し、提案手法の最適性を示した。本研究は添田彬仁博士（国立情報学研究所）との共同研究である。（担当：吉田、村尾）

1 量子ビットユニタリ演算を決定論的かつ正確に反転するアルゴリズム

未知の1量子ビットユニタリ演算を決定論的かつ正確に反転するアルゴリズムを構成した。また、本アルゴリズムにおいて、補助系の出力状態に入力ユニタリ演算の情報が保存されていることを示し、この情報をユニタリ反転アルゴリズムにおける触媒として用いることができることを示した。本研究は添田彬仁博士（国立情報学研究所）との共同研究である。（担当：吉田、村尾）

ユニバーサルなハミルトニアン固有値変換アルゴリズム

本研究ではある未知のハミルトニアンに従う量子物理系の時間発展を別のハミルトニアンに従う時間発展に変換する方法を解析した。特に未知のハミルトニアンの固有値を（微分可能性条件を満たす）任意の関数によって変換し、元のハミルトニアンのダイナミクスのみを用いて変換後のハミルトニアンに従った時間発展を実行する手法を提案した。本研究は Hlér Kristjánsson 博士（Perimeter Institute for Theoretical Physics）との共同研究である。（担当：大嶽、Taranto、村尾）

縮約プロセスの内部化

複数の部分系からなる量子系の状態変換をあるプロセスとして数学的に記述する際、部分系における局所的な状態変換は、全系に渡る元のプロセスに対して行列の縮約に相当する計算を行うことで縮約プロセスとして数学的に記述することができる。しかし

こうした方法で計算して得られた縮約プロセスは、プロセスが満たすべき公理を常に満たすとは限らない。本研究ではこうした縮約プロセスが矛盾なく定式化できる理論体系について解析を行い、理論がいくつかの単純な合成公理を満たすとき、縮約プロセスが常にプロセスの公理を見たし理論内に内部化されることを示した。本研究は Matt Wilson 博士 (University College London) との共同研究である。(担当: Forrer, 村尾)

既知の入力量子状態に対する高階量子計算

通常の高階量子計算においては、入力となる量子状態と量子演算のいずれも未知である。この条件を緩めて、入力量子演算は未知であるが入力量子状態は既知である場合について、ユニタリ演算の複素共役化と転置化の二つの高階量子計算を考察した。その結果、入力量子状態が既知であってもユニタリ演算の複素共役化に必要な未知入力ユニタリ演算のコル数を減らすことはできないが、ユニタリ演算の転置化については、同じコル数で時間反転を上げることができるという相違を見出した。本研究は Marco Tulio Quintino 博士 (Sorbonne University) との共同研究である。(担当: Brzic, 村尾)

古典メモリを伴う複数時刻量子過程の階層化

古典情報のみを先の時刻に送れるメモリを伴う複数時刻量子過程を解析し、様々な「古典メモリ」の定義に応じて顕著に異なる時間的な振る舞いが現れること示した。さらに量子力学におけるメモリ効果の階層を系統的に構築し、それらの階層の多くが二時刻のケースでは崩壊することを示すことで、我々の結果が真に複数時刻的な現象だと示した。本研究は Marco Tulio Quintino 博士 (Sorbonne University) 及び Simon Milz 氏 (Trinity College Dublin) との共同研究である。(担当: Taranto, 村尾)

隠れた量子メモリ

元々隠れているが適切にプローブされることで活性化される「隠れた量子メモリ」という新たな量子効果を発見した。この効果は古典的には実現し得ないため、量子と古典の違いを示す新たな例となる。本研究は Thomas Elliott 氏 (University of Manchester) 及び Simon Milz 氏 (Trinity College Dublin) との共同研究である。(担当: Taranto)

5.2.2 量子エラー訂正

ロバストなエラー蓄積抑制

ダイナミカルデカップリングなどに基づく量子ゲートのエラー抑制手法の多くでは、新たに挿入するゲ

ト自体に生じるノイズの形に仮定を置いているため適用範囲が制限されていた。本研究では実行したい量子ゲートの前後に(ノイズのある)パウリゲートをランダムに挿入することでエラーの蓄積を抑制する手法を提案し、挿入するパウリゲート自体のノイズについて強い仮定を置かなくてもエラーの抑制が達成できることを示した。本研究は吉岡信行博士(東京大学)、井床利生氏、Kunal Sharma 氏、Antonio Mezzacapo 氏 (IBM) との共同研究である。(担当: 大嶽、Taranto、村尾)

パウリノイズに対するランダム量子符号とテンソルネットワークデコーダーの開発

近年の研究 [M. J. Gullans et al., Phys. Rev. X **11**, 031066 (2021)] により、1次元・ n 量子ビット・ $O(\log n)$ 回路長のランダムクリフォード量子回路で定義される量子エラー訂正符号を用いると、正の符号化レートを達成できることが示された。しかし先行研究の結果の適用範囲は、シンプルなイレーサーエラーモデルの下に限定されていた。これに対し本研究では、テンソルネットワークの手法を用いて、1次元・ n 量子ビット・ $O(\log n)$ 回路長のランダムクリフォード量子回路に対し効率的に動作する最尤デコーダーを構築することで、より一般的なパウリノイズモデルについてもこうした正の符号化レートが達成されることを数値的に実証した。本研究は Andrew S. Darmawan 氏 (京都大学)、中田芳史博士 (京都大学)、田宮志郎氏 (東京大学) との共同研究である。(担当: 山崎)

時間オーバーヘッドが短い定数空間オーバーヘッド誤り耐性量子計算

誤り耐性量子計算に必要な量子ビット数を減らす手法として量子 low-density parity-check (LDPC) 符号を用いた定数空間オーバーヘッド誤り耐性量子計算プロトコルが注目されている。しかし既存の定数空間オーバーヘッドプロトコルには、時間オーバーヘッドが多項式的にかかるという問題があった。これに対し本研究では量子 LDPC 符号ではなく接続符号を用いる手法を開発することで、時間オーバーヘッドが短い定数空間オーバーヘッド誤り耐性量子計算プロトコルを構築した。本研究は小芦雅斗博士 (東京大学) との共同研究である。(担当: 山崎)

接続符号を用いた定数空間オーバーヘッド誤り耐性量子計算の最適化と定量的評価

誤り耐性量子計算の実現に向けて、空間オーバーヘッドが大きなボトルネックになっている。本研究では [H. Yamasaki and M. Koashi, Nat. Phys. **20**, 247 (2024)] で提案された量子ハミング符号の接続に基づく定数空間オーバーヘッドプロトコルを最適化

し、数値計算による定量的な性能評価により、高い閾値を保ちつつ表面符号などの従来手法に比べて空間オーバーヘッドを大幅に削減できることを示した。本研究は田宮志郎氏（東京大学）との共同研究である。（担当：吉田、山崎）

5.2.3 分散型量子情報処理

誤り耐性をもつ分散型量子計算プロトコル

量子コンピュータにノイズが生じる現実的な状況では、ノイズがない理想化された状況とは異なり量子エラー訂正が必要となるが、こうした現実的な状況下において分散型量子計算を実行しようとする、分散型量子計算に必要な量子通信コストも量子エラー訂正処理ともなって増加するはずである。本研究では、こうした量子通信コストの増加量を明らかにし量子通信コストの削減方法を提案するために、誤り耐性をもつ分散型量子計算プロトコルの解析を行なった。本研究は、Min-Hsiu Hsieh 博士（Foxconn）および Jun-Yi Wu 博士（Tamkang University）との共同研究である。（担当：松井、山崎、村尾）

スタビライザー符号の分散復号

スタビライザー符号は、量子エラー訂正だけでなく、量子秘密共有などの複数の量子コンピュータで行う分散プロトコルにも広く用いられる。本研究では1論理量子ビットが複数の物理量子ビットに任意のスタビライザー符号で符号化されている際に、各物理量子ビットに対する局所操作・古典通信を用いて論理量子ビットの状態を復号し物理量子ビットの状態として出力するタスクを解析し、量子通信やエンタングルメントといったリソースを用いずに局所操作・古典通信のみでこうした復号を達成する量子プロトコルを構築した。本研究は白石航暉氏（東京大学）との共同研究である。（担当：山崎、村尾）

2 者間ユニタリ演算への高階量子計算の LOCC 実装

分散型量子計算の枠組みにより、2 者間ユニタリ演算に対する高階量子演算を局所操作と古典通信 (LOCC) のみを用いて実行するアルゴリズムを考察した。高階量子演算としてユニタリ複素共役化とユニタリ反転を LOCC のみで確率的に正確に実装するアルゴリズムを見出した。（担当：Lindström、Taranto、村尾）

5.2.4 量子機械学習

一般的な量子計算優位性を利用した量子機械学習

本研究以前の量子機械学習では、ショアのアルゴリズムで解ける問題の構造に依存した学習問題でのみ

古典機械学習に対する優位性が示されていた。これに対し本研究では量子計算の優位性が現れる任意の計算問題に基づいて量子優位性が現れる学習問題が構成できることを示した。（担当：山崎、磯貝、村尾）

自由二分決定図による量子状態生成

量子状態生成を行うための実用的なアルゴリズムの多くは、その生成する量子状態が何らかの圧縮可能なデータ構造で記述できることを仮定している。本研究では、新たに複素重みつきエッジを持つ自由二分決定図によって量子状態を古典的に記述する方法を構築し、与えられた自由二分決定図から対応するその量子状態を生成する量子回路を構成するアルゴリズムを開発した。（担当：田中、山崎、村尾）

量子リッジレット変換による量子機械学習

量子機械学習における重要な課題の1つに、ニューラルネットワークを用いた学習などの一般的な機械学習タスクの中で、量子計算を適用すると大幅な高速化が達成できるような応用先を発見することがある。本研究では、量子状態のリッジレット変換を高速に実行する量子アルゴリズムを開発し、さらにその応用先として、大規模なニューラルネットワークを与えられた際に、学習可能で疎なサブネットワークを探索する問題を効率的に解く量子アルゴリズムを構築した。本研究は Sathyawageeswar Subramanian 博士（University of Warwick）、早川知志氏（University of Oxford）、園田翔博士（RIKEN AIP）との共同研究である。（担当：山崎）

5.2.5 量子リソース理論

非凸型量子リソースの操作論的優位性

量子リソース理論は量子力学に現れる基礎的性質を量子情報処理のリソースとみなして操作論的に解析するのに有用な理論的枠組みであり、先行研究ではエンタングルメントやコヒーレンスといった凸型の量子リソースが常に何らかの量子情報処理タスクを優位に行うためのリソースとして活用できることがわかっていた。これに対して本研究では凸性を仮定しない一般的な量子リソース理論において、一般化ロバストネス (generalized robustness) と呼ばれる量子リソースの尺度を操作論的に意味づける方法を開発し、非凸型を含む幅広い量子リソースについてその有用性を示した。本研究は黒岩広大氏（University of Waterloo）、高木隆司博士（東京大学）、Gerardo Adesso 博士（University of Nottingham）との共同研究である。（担当：山崎）

無限次元量子系でのエンタングルメントコスト

局所操作・古典通信により2量子ビット最大エンタングル状態を変換し所定の2体混合状態を作る際に漸近的に必要な2量子ビット最大エンタングル状態の数の最小値をエンタングルメントコストと呼ぶ。エンタングルメントコストは漸近的には regularized entanglement of formation と呼ばれるエンタングルメント尺度で与えられることが知られていたが、その証明の適用範囲は局所操作・古典通信が有限次元量子系を操作する場合に限られていた。これに対し本研究では、局所操作・古典通信が無限次元量子系を操作する一般的な場合においてもエンタングルメントコストが漸近的に regularized entanglement of formation で与えられることを証明した。本研究は黒岩広太氏 (University of Waterloo)、Patrick Hayden 博士 (Stanford University)、Ludovico Lami 博士 (University of Amsterdam) との共同研究である。(担当：山崎)

<受賞>

- [1] 大嶽竜樹、理学系研究科研究奨励賞、東京大学理学系研究科、2024年3月

<報文>

(原著論文)

- [2] Philip Taranto, Thomas J. Elliott, Simon Milz, *Hidden Quantum Memory: Is Memory There When Somebody Looks?*, *Quantum* **7**, 991 (2023).
- [3] Qingxiuxiong Dong, Marco Túlio Quintino, Akihito Soeda and Mio Murao, *The quantum switch is uniquely determined by its action on unitary operations*, *Quantum* **7**, 1169 (2023).
- [4] Jun-Yi Wu, Kosuke Matsui, Tim Forrer, Akihito Soeda, Pablo Andrés-Martínez, Daniel Mills, Luciana Henaut and Mio Murao, *Entanglement-efficient bipartite-distributed quantum computing with entanglement-assisted packing processes*, *Quantum* **7**, 1196 (2023).
- [5] Hayata Yamasaki, Sathyawageeswar Subramanian, Satoshi Hayakawa, Sho Sonoda, *Quantum Ridgelet Transform: Winning Lottery Ticket of Neural Networks with Quantum Computation*, Proceedings of The Fortieth International Conference on Machine Learning (ICML2023), Proceedings of Machine Learning Research **202**, 39008 (2023).
- [6] Satoshi Yoshida, Akihito Soeda, Mio Murao, *Reversing Unknown Qubit-Unitary Operation, Deterministically and Exactly*, *Physical Review Letters* **131**, 120602 (2023).
- [7] Hayata Yamasaki, Masato Koashi, *Time-Efficient Constant-Space-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation*, *Nature Physics* **20**, 247 (2024).
- [8] Tatsuki Otake, Hlér Kristjánsson, Akihito Soeda and Mio Murao, *Higher-order quantum transformations of Hamiltonian dynamics*, *Phys. Rev. Research* **6**, L012063 (2024)

- [9] Kohdai Kuroiwa, Ryuji Takagi, Gerardo Adesso, Hayata Yamasaki, *Every quantum helps: Operational advantage of quantum resources beyond convexity*, *Physical Review Letters*, **132**, 150201 (2024).
- [10] Kohdai Kuroiwa, Ryuji Takagi, Gerardo Adesso, Hayata Yamasaki, *Robustness and weight resource measures without convexity restriction: Multicopy witness and operational advantage in static and dynamical quantum resource theories*, *Physical Review A*, **109**, 042403 (2024).
- [11] Andrew S. Darmawan, Yoshifumi Nakata, Shiro Tamiya, Hayata Yamasaki, *Low-depth random Clifford circuits for quantum coding against Pauli noise using a tensor-network decoder*, *Physical Review Research*, accepted (2024).

(学位論文)

- [12] Tatsuki Otake, *Higher-order quantum transformations of Hamiltonian dynamics* (ハミルトニアン力学の高階量子変換), Master thesis.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [13] Tatsuki Otake, Hlér Kristjánsson, Akihito Soeda, and Mio Murao, “Higher-order quantum transformations of Hamiltonian dynamics”, *Quantum Physics and Logic 2023 (QPL2023)*, Paris, France, July 2023. (talk)
- [14] Satoshi Yoshida, Akihito Soeda, Mio Murao, “Universal, deterministic, and exact protocol to reverse qubit-unitary and qubit-encoding isometry operations”, *Quantum Physics and Logic 2023 (QPL2023)*, Paris, France, July 2023. (talk)
- [15] Satoshi Yoshida, Akihito Soeda, Mio Murao, “Universal, deterministic, and exact protocol to reverse qubit-unitary and qubit-encoding isometry operations”, *18th Conference On the Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography (TQC2023)*, Aveiro, Portugal, July 2023. (talk)
- [16] Hayata Yamasaki, Simon Morelli, Markus Miethlinger, Jessica Bavaresco, Nicolai Friis, Marcus Huber, “Activation of genuine multipartite entanglement: Beyond the single-copy paradigm of entanglement characterisation”, *23rd Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2023)*, Seoul, Korea, August 2023. (talk)
- [17] Satoshi Yoshida, Akihito Soeda, Mio Murao, “Universal, deterministic, and exact protocol to reverse qubit-unitary and qubit-encoding isometry operations”, *23rd Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2023)*, Seoul, Korea, August 2023. (talk)

- [18] Mio Murao, “Higher-order quantum operations of blackbox unitaries”, *Foundations and Developments of Quantum Information Theory*, Kyoto, Japan, September 2023. (talk)
 - [19] Satoshi Yoshida, Akihito Soeda, Mio Murao, “Universal, deterministic, and exact protocol to reverse qubit-unitary and qubit-encoding isometry operations”, *Foundations and Developments of Quantum Information Theory*, Kyoto, Japan, September 2023. (talk)
 - [20] Hayata Yamasaki, Masato Koashi, “Time-Efficient Constant-Space-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation”, *6th International Conference on Quantum Error Correction (QEC23)*, Sydney, Australia, October 2023. (talk)
 - [21] Florian Meier, Hayata Yamasaki, “Energy-Consumption Advantage of Quantum Computation”, *Quantum Resources 2023*, Singapore, December 2023. (talk)
 - [22] Kohdai Kuroiwa, Ryuji Takagi, Gerardo Adesso, Hayata Yamasaki, “Every quantum helps: Operational advantage of quantum resources beyond convexity”, *Quantum Resources 2023*, Singapore, December 2023. (talk)
 - [23] Philip Taranto, Marco Tulio Quintino, Mio Murao, Simon Milz “Characterising the Hierarchy of Multi-time Quantum Processes with Classical Memory”, *International Conference on Quantum Energy*, Melbourne, Australia, December 2023. (talk)
 - [24] Hayata Yamasaki, Kohdai Kuroiwa, Patrick Hayden, Ludovico Lami, “Entanglement cost for infinite-dimensional physical systems”, *Quantum Information Processing 2024 (QIP2024)*, Taipei, Taiwan, January 2024. (talk)
 - [25] Hayata Yamasaki, “Open Problem: Efficient Maximum-Likelihood Decoder for High-Rate Concatenated Codes”, *Advances in Quantum Coding Theory*, Berkeley, United States, February 2024. (lightning talk)
 - [26] Tim Forrer, Matt Wilson, Mio Murao, “Computations of reduced processes always internalise”, *20th International Conference on Quantum Physics and Logic (QPL2023)*, Paris, France, July 2023. (poster)
 - [27] Hayata Yamasaki, Sathyawageeswar Subramanian, Satochi Hayakawa, Sho Sonoda, “Quantum Ridgelet Transform: Winning Lottery Ticket of Neural Networks with Quantum Computation”, *The Fortieth International Conference on Machine Learning (ICML2023)*, Hawaii, United States, July 2023. (poster)
 - [28] Hayata Yamasaki, Sathyawageeswar Subramanian, Satochi Hayakawa, Sho Sonoda, “Quantum Ridgelet Transform: Winning Lottery Ticket of Neural Networks with Quantum Computation”, *23rd Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2023)*, Seoul, Korea, August 2023. (poster)
 - [29] Hayata Yamasaki, “Fast and Versatile Quantum Machine Learning”, *4th Japanese-American-German Frontiers of Science (JAGFOS) Symposium*, Dresden, Germany, October 2023. (poster)
 - [30] Florian Meyer, Hayata Yamasaki, “Energy-Consumption Advantage of Quantum Computation”, *Quantum Innovation 2023*, Tokyo, Japan, November 2023. (poster)
 - [31] Hayata Yamasaki, Sathyawageeswar Subramanian, Satochi Hayakawa, Sho Sonoda, “Quantum Ridgelet Transform: Winning Lottery Ticket of Neural Networks with Quantum Computation”, *Quantum Innovation 2023*, Tokyo, Japan, November 2023. (poster)
 - [32] Tatsuki Otake, Hlér Kristjánsson, Akihito Soeda, and Mio Murao, “Higher-order quantum transformations of Hamiltonian dynamics”, *Quantum Innovation 2023*, Tokyo, Japan, November 2023. (poster)
 - [33] Satoshi Yoshida, Akihito Soeda, Mio Murao, “Universal, deterministic, and exact protocol to reverse qubit-unitary and qubit-encoding isometry operations”, *Quantum Innovation 2023*, Tokyo, Japan, November 2023. (poster)
 - [34] Philip Taranto, Marco Tulio Quintino, Mio Murao, Simon Milz “Characterising the Hierarchy of Multi-time Quantum Processes with Classical Memory”, *Quantum Innovation*, Tokyo, Japan, Nov 2023. (poster)
 - [35] Yu Tanaka, Hayata Yamasaki, Mio Murao, “Quantum State Preparation via Efficiently Represented Boolean Function”, *27th Annual Quantum Information Processing conference (QIP2024)*, Taipei, Taiwan, January 2024. (poster)
 - [36] Satoshi Yoshida, Akihito Soeda, Mio Murao, “Optimal protocols for universal adjointation of isometry operations”, *Quantum Information Processing 2024 (QIP2024)*, Taipei, Taiwan, January 2024. (poster)
 - [37] Tatsuki Otake, Hlér Kristjánsson, Akihito Soeda, and Mio Murao, “Higher-order quantum transformations of Hamiltonian dynamics”, *Quantum Information Processing 2024 (QIP2024)*, Taipei, Taiwan, January 2024. (poster)
 - [38] Philip Taranto, Thomas Elliott, Simon Milz “Hidden Quantum Memory: Is Memory There When Somebody Looks?”, *Quantum Information Processing (QIP2024)*, Taipei, Taiwan, January 2024. (poster)
- 招待講演
- [39] Hayata Yamasaki, “Time-Efficient Constant-Space-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation”, *QI2023 satellite workshop*, Osaka, Japan, November 2023.

- [40] Mio Murao, “Advanced fully-quantum learning: Higher-order quantum algorithm for inversion of an unknown unitary operation”, *Nagoya-KAIST GEnKO 2023 Workshop on Quantum Entanglement and Open Quantum Systems*, Nagoya, Japan, December 2023.
- [41] Mio Murao, “Higher-order quantum transformations of black box unitaries”, *Japanese-French Quantum Information workshop (JFQI2023)*, Tokyo, Japan, December 2023.
- [42] Tatsuki Otake, “Higher-order quantum transformations of Hamiltonian dynamics”, *Japanese-French Quantum Information workshop (JFQI2023)*, Tokyo, Japan, December 2023.
- [43] Yu Tanaka, “Quantum State Preparation via Free Binary Decision Diagram”, *Japanese-French Quantum Information 2023 workshop (JFQI2023)*, Tokyo, Japan, December 2023.
- [44] Hayata Yamasaki, “Energy-Consumption Advantage of Quantum Computation”, *Japanese-French Quantum Information workshop (JFQI2023)*, Tokyo, Japan, December 2023.
- [45] Tim Forrer, “Computations of reduced processes always internalise”, *Quantum TUT workshop 2024 on quantum statistics and quantum information theory*, Toyohashi, Japan, February 2024.
- [46] Hayata Yamasaki, “Concatenate codes, save qubits”, *2024 YITP Quantum Error Correction Workshop*, Kyoto, Japan, March 2024.
- [47] Mio Murao, “Advanced fully-quantum learning: Higher-order quantum algorithm for inversion of an unknown unitary operation”, *ENS-UTokyo Workshop*, Paris, France, March 2024.

(国内会議)

一般講演

- [48] Hayata Yamasaki*, Natsuto Isogai*, Mio Murao, (*: equal contribution) “Advantage of Quantum Machine Learning from General Computational Advantages”, 第 49 回量子情報技術研究会 (*QIT49*), December 2023. (talk)
- [49] Satoshi Yoshida, Akihito Soeda, Mio Murao, “Optimal protocols for universal adjointation of isometry operations —Protocol design by quantum supersupermaps—”, 第 49 回量子情報技術研究会 (*QIT49*), Okinawa, Japan, December 2023. (talk)
- [50] Satoshi Yoshida, “量子コンピュータを用いた「時間反転」のシミュレーション”, *ipi-ダイキン シンポジウム*, Tokyo, Japan, October 2023. (talk)
- [51] Kohsuke Matsui, Jun-Yi Wu, Akihito Soeda, Mio Murao, “An entanglement-efficient distributed implementation for multiple global controlled-unitary gates and its application for quantum circuits”, 第 49 回量子情報技術研究会 (*QIT49*), Okinawa, Japan, December 2023. (poster)

招待講演

- [52] Hayata Yamasaki, “高速な量子機械学習の理論基盤の構築 (Construction of Theoretical Foundation of High-Speed Quantum Machine Learning)”, 第 3 回「量子ソフトウェア」寄付講座 (*3rd Quantum Software Workshop*), Tokyo, Japan, August 2023.
- [53] 村尾美緒, “量子系をプログラミングする!”, *Kawasaki Quantum Summer Camp*, Kawasaki, Japan, August 2023.
- [54] Hayata Yamasaki, “高速な量子機械学習の基盤構築 (Foundation of High-Speed Quantum Machine Learning)”, 「量子情報処理」×「革新的コンピューティング」合同セミナー, Fukuoka, Japan, September 2023.
- [55] Hayata Yamasaki, “高速な量子機械学習の基盤構築 (Foundation of High-Speed Quantum Machine Learning)”, さきがけ量子情報処理領域領域公開シンポジウム (2 期生成果報告会), Tokyo, Japan, March 2024.
- [56] Hayata Yamasaki, “量子機械学習 (Quantum Machine Learning)”, 計算物理春の学校 2024 (*Computational Physics Spring School 2024*), Okinawa, Japan, March 2024.

5.3 上田研究室

近年のナノサイエンスの発展により、原子や分子、光子を量子 1 個のレベルで精密に測定し、制御することが可能になってきた。当研究室では、このような高い制御性を有する系での量子多体問題の解明と、その基礎となるナノスケールの熱力学・統計力学の構築を目指して理論研究を行っている。特に近年の中心的テーマとなっているのは、冷却原子気体・非平衡開放系の研究、および、量子論・統計力学と情報論・人工知能の融合である。レーザー冷却により絶対零度近くまで冷却された原子系においては、高い制御性のもので、ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) などの巨視的量子現象や、固体物理、宇宙物理とも類似した現象を創り出し、その普遍的性質と新しい量子多体物理の可能性を探究することができる。私たちは、環境への散逸や量子測定の反作用の影響下にある冷却原子系の非ユニタリダイナミクス、非平衡開放系における相の分類、人工ゲージ場中での量子ホール効果や渦格子、孤立量子系の熱平衡化などについて研究を行っている。同時に私たちは、情報をキーワードとして量子論や統計力学の基礎概念を捉え直し、物理と情報を融合させた新分野の構築を目指す研究にも取り組んでいる。特に測定やフィードバック制御を行うもと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

並進対称なスピン系における固有状態熱化仮説

冷却原子系などにおける実験技術の発展により孤立量子系が実現され、ユニタリ時間発展下での量子多体系の熱平衡化が観測された。この熱平衡化機構として有力視されているのが、固有状態熱化仮説 (Eigenstate thermalization hypothesis, ETH) である。ETH は、量子多体系の全てのエネルギー固有状態は、限られたクラスの物理量に着目する限りミクロカノニカル集団と区別できないという仮説であり、様々な系といくつかの物理量について具体的なモデルに基づく数値計算によって確かめられてきた。一方で、対称性を持つ系においては対称性に付随する保存量は時間発展せず、したがって ETH を破る。このような系では、ETH は各対称性セクター内部において個別に成立すると考えられている。しかし、いくつかの数値計算において、並進対称性を有する系においても局所的物理量であれば対称性セクターに分けずとも ETH が成り立つことが報告されている。本研究では、並進対称性を持つ 1 次元スピン系のランダム行列領域において、系の半分以上に作用する局所量であれば、ランダム行列理論から予測される最適な収束速度で ETH を満たすことを証明した [4]。ランダム行列領域におけるハミルトニアンは一般に極めて多体かつ非局所的な項を含むが、我々は局所相互作用のみをもつハミルトニアンについての数値計算を行い、その場合にもランダム行列領域における結果が成り立つことを実証した。

BCS 超伝導における Yang-Lee の零点

Yang と Lee は、相転移における特異性の起源を理解するために、Yang-Lee の零点と呼ばれる分配関数の零点による一般的なアプローチを発展させた。彼らは、常磁性相と強磁性相の間の有限温度相転移を理解するために、複素磁場の存在下での古典 Ising 模型の分配関数の零点の分布を調べ、零点がフガシティの複素平面における単位円上にのみ分布すること、すなわち Lee-Yang の円定理を証明した。我々は、超伝導量子相転移における真性特異点の起源を理解するために、Yang-Lee 理論を BCS 超伝導に一般化した [5]。我々は引力相互作用の強度を複素数に拡張することで BCS 模型の分配関数の零点を見出し、その数が Fermi 面不安定性によって真性特異点をもつ超伝導ギャップと対応することを示した。また、我々は Yang-Lee の零点が相互作用強度の複素平面上で半円上に分布することを見出した。この Yang-Lee の零点の半円分布の一般性を示すためにくりこみ群解析を適用し、中立有意な結合定数を持つ量子多体系における Yang-Lee の零点は、元の Lee-Yang 円定理とは対照的に、一般に複素相互作用平面上の半円上に分布することを示した。さらに、我々は BCS 超伝導における Yang-Lee 特異性に起因する非ユニタリ臨界現象も調べた。

Yang-Lee 端特異性の実験的観測

Yang-Lee 端特異性 (Yang-Lee edge singularity) とは、古典 Ising 模型の複素磁場平面における Yang-Lee の零点分布の端点付近で起こる特異性を指す。1978 年に Fisher によって非ユニタリ臨界現象の典型例として指摘されて以来、Yang-Lee 端特異性は相転移・臨界現象の研究において重要な位置を占めていたが、この臨界現象は虚数磁場下で起こるため、その実験的実現は難しいものとされてきた。本研究では、実験グループとの共同研究により、ロスのある単一光子を用いて虚数磁場を実験的に実現し、Yang-Lee 端特異性の初の直接観測に成功した [9]。具体的には、光子の偏光をスピン自由度とし、1 次元古典 Ising 模型と量子古典対応によって等価となる $(0+1)$ 次元量子スピン系を実現した。この方法の目覚ましい点は、ロスのある光子の非ユニタリ時間発展により虚数磁場下の Ising 模型の実・虚時間発展を直接シミュレートできる点である。この方法を用いて、虚数磁場下の分配関数および物理量を実験的に測定し、臨界指数を決定した。さらに、物理量の温度依存性の測定から、古典 Ising 模型には現れない量子臨界現象特有の新たなスケーリングとそれに伴う臨界指数も見出した。本実験結果は、Yang-Lee 端特異性の初の直接観測という意義に留まらず、開放量子系を用いて平衡統計力学を探究する新たな可能性に繋がるものと期待される。

開放量子多体系のデコヒーレンスを記述する準粒子

量子多体系が環境と相互作用することによるデコヒーレンスを記述することは、量子力学的な大自由度と環境による散逸を共に取り入れなければならないため複雑な問題である。一方で、量子多体系における多くの現象は素励起 (準粒子) を基本単位として記述することができる。我々は、開放量子系の時間発展の生成子 (リウビリアン) の固有モードにおいてデコヒーレンス過程を記述する準粒子の存在を見出し、インコヒーレントと名付けた [6]。リウビリアンをラダー上の非エルミートハミルトニアンとみなすと散逸項が非エルミートな相互作用項として表されることを用いると、この準粒子は散逸によって密度行列のケット自由度とブラ自由度の間に形成される束縛状態に対応する (図 5.3.1)。位相緩和による散逸下のボソン系の数値計算から、このような準粒子の束縛・非束縛転移がダイナミクスにおけるコヒーレントな振動からインコヒーレントな減衰への転移を引き起こすことを示し、この転移は準粒子の最小束縛エネルギーに対応するスペクトルギャップ (量子コヒーレンスギャップ) の消失によって特徴づけられることを示した。さらに、Bethe 仮説による厳密解を用いて、多体系におけるこのような準粒子の存在とその束縛・非束縛転移の存在を厳密に示した。

冷却分子における散逸によって形成される準安定強磁性クラスター

極低温に冷却された異核二原子分子気体は、大きな電気双極子モーメントをもつことから強い長距離相互作用を有する量子多体系の実現舞台として大きな注目を集めている。しかし、冷却分子系には多くの場合に化学反応による分子のロスが存在し、極低温・高密度の分子気体の生成にとって大きな壁となってきた。我々は、分子ロスを量子マスター方程式を用いて記述し、1次元光格子中の双極子相互作用するフェルミ分子系のダイナミクスを解析した [3]。その結果、分子間の強い長距離相互作用と分子ロスによる散逸の協力効果により、ロスレートから予想される寿命よりも非常に長い時間のあいだ存在する準安定状態を見出した。この準安定状態は、強い長距離相互作用によって運動が凍結することで形成された分子クラスターが強磁性状態となり、パウリの排他律からオンサイトのロスが禁止されることによって生じる。さらに、スピン間相互作用の対称性に応じて様々なスピン状態のクラスターが形成され、特にSU(2) 対称な場合には準安定状態はスピン S のハイゼンベルグ模型に対応したコヒーレントなダイナミクスを示すことを見出した。本研究結果は、物理学科4年生が上田研で行った理論演習で得られた成果が元となったものである。

5.3.2 量子論・統計力学と情報理論・人工知能の融合

深層ネットワークを学習させる基礎理論

現代的なニューラルネットワークは数多くの対称性を持つ。つまり、モデルのアウトプットを変えることなく、ニューラルネットワークのパラメータを変換する方法が複数存在する。我々は最近の研究で、自己教師あり学習における学習ダイナミクスが損失関数の対称性に起因して階段状の曲線を描くことを示した [1]。また、別の研究では、我々は対称性が訓練後のパラメータのスパース性と関係することを示し、対称性を用いてスパース性を実現する学習アルゴリズムの設計を行った [2]。

<報文>

(原著論文)

- [1] James B. Simon, Maksis Knutins, Liu Ziyin, Daniel Geisz, Abraham J. Fetterman, and Joshua Albrecht: On the stepwise nature of self-supervised learning, International Conference on Machine Learning 2023 (ICML2023).
- [2] Liu Ziyin and Zihao Wang: Sparsity by Redundancy: Solving L1 with SGD, International Conference on Machine Learning 2023 (ICML2023).
- [3] Naoki Hara and Masaya Nakagawa: Metastable ferromagnetic clusters in dissipative many-body

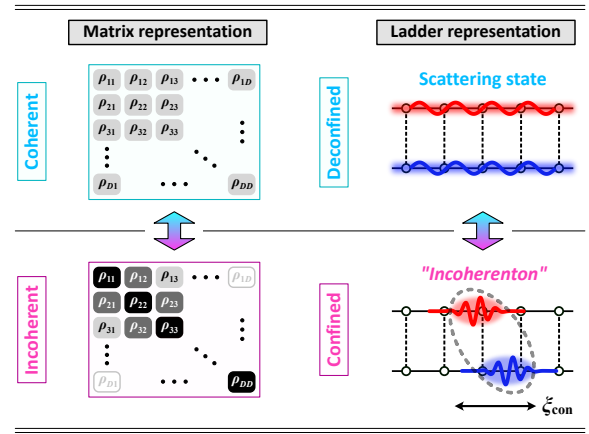


図 5.3.1: 開放量子多体系のデコヒーレンスを記述する準粒子の概念図 [6]。密度行列はベクトル表示することによりラダー上の量子状態にマップすることができる。ラダー上で上の鎖（ケット自由度）と下の鎖（ブラ自由度）の間に束縛状態（インコヒーレントン）が形成されると、密度行列の言葉では非対角要素（量子コヒーレンス）が距離と共に減衰する。

systems of polar molecules, Phys. Rev. A **108**, 013306 (2023).

- [4] Shoki Sugimoto, Joscha Henheik, Volodymyr Riabov, and László Erdős: Eigenstate Thermalisation Hypothesis for Translation Invariant Spin Systems, J. Stat. Phys. **190**, 128 (2023).
- [5] Hongchao Li, Xie-Hang Yu, Masaya Nakagawa, and Masahito Ueda: Yang-Lee Zeros, Semicircle Theorem, and Nonunitary Criticality in Bardeen-Cooper-Schrieffer Superconductivity, Phys. Rev. Lett. **131**, 216001 (2023).
- [6] Taiki Haga, Masaya Nakagawa, Ryusuke Hamazaki, and Masahito Ueda: Quasiparticles of decoherence processes in open quantum many-body systems: Incoherentons, Phys. Rev. Research **5**, 043225 (2023).
- [7] Liu Ziyin and Masahito Ueda: Zeroth, first, and second-order phase transitions in deep neural networks, Phys. Rev. Research **5**, 043243 (2023).
- [8] Federico Roccati, Miguel Bello, Zongping Gong, Masahito Ueda, Francesco Ciccarello, Aurélia Chenu, and Angelo Carollo: Hermitian and non-Hermitian topology from photon-mediated interactions, Nat. Commun. **15**, 2400 (2024).
- [9] Huixia Gao, Kunkun Wang, Lei Xiao, Masaya Nakagawa, Norifumi Matsumoto, Dengke Qu, Haiqing Lin, Masahito Ueda, and Peng Xue: Experimental observation of the Yang-Lee

quantum criticality in open quantum systems,
To be published in Physical Review Letters
(arXiv:2312.01706).

(国内雑誌)

(学位論文)

- [10] Liu Ziyin: Symmetry Breaking in Deep Learning (博士論文) .
- [11] Liu Kangqiao: Theoretical Study on Information Engines for Quantum Transport (博士論文) .
- [12] Shoki Sugimoto: Theoretical Study on Thermalization in Isolated Quantum Systems (博士論文) .
- [13] Li Hongchao: Quantum Many-Body Theory of Dissipative Superfluidity (修士論文) .
- [14] Shuma Sugiura: Theoretical Study of the Dynamics of a Trapped Particle under Continuous Measurement and Feedback (修士論文) .

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [15] Masahito Ueda: Beyond Hermitian Quantum Physics, Non-Hermitian Topology: from Classical Optics to Quantum Matter (NHTOP23), Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Germany, 2023.8.15.
- [16] Masahito Ueda: Eigenstate thermalization hypothesis: locality and range of interactions, Nonequilibrium physics - current trends and future perspectives, Physikzentrum Bad Honnef, Germany, 2023.8.28.
- [17] Masaya Nakagawa: Exact Liouvillian spectrum of a one-dimensional dissipative Hubbard model, Workshop on exactly solvable models of open quantum systems, Steklov Mathematical Institute, online, 2023.9.14.
- [18] Masahito Ueda: Maxwell's demon, Gibbs paradox, and thermodynamic energy cost of information processing, Quantum Energy Initiative (QEI), NUSS Kent Ridge Guild House, Singapore, 2023.11.22.
- [19] Masahito Ueda: Beyond-Hermitian Quantum Physics, Ultracold Atomic Gases: Thirty Years of Activities and Looking Forward, The University of Hong Kong, China, 2023.12.8.
- [20] Masahito Ueda: Yang-Lee zeros, semicircle theorem and nonunitary criticality in open quantum dynamics, Quantum many-body systems out-of-equilibrium, Institut Henri Poincare, Paris, France, 2024.3.19.

一般講演

- [21] K. Shiraishi, M. Nakagawa, T. Mori and M. Ueda: Derivation of the quantum master equation based on the Lieb-Robinson bound, Statphys28, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2023.8.7.
- [22] S. Sugimoto, R. Hamazaki, and M. Ueda: Rigorous Bounds on Eigenstate Thermalization, Statphys28, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2023.8.8.
- [23] M. Nakagawa and M. Ueda: Dissipative Fermi-Hubbard model, Statphys28, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2023.8.9.
- [24] S. Sugimoto, R. Hamazaki, and M. Ueda: Typicality of the Eigenstate Thermalization for Realistic Systems with Few-body Interactions, Physics of Open System and Beyond, Hokkaido University, Sapporo, Japan, 2023.8.19.
- [25] K. Shiraishi, M. Nakagawa, T. Mori and M. Ueda: Derivation of the quantum master equation based on the Lieb-Robinson bound, Physics of Open System and Beyond, Hokkaido University, Sapporo, Japan, 2023.8.20.
- [26] K. Shiraishi, H. Yamasaki, and M. Murao: Efficient decoding of stabilizer code by single-qubit local operations and classical communication, Quantum Innovation 2023, Tokyo Convention Hall, Tokyo, Japan, 2023.11.16.
- [27] K. Shiraishi, H. Yamasaki, and M. Murao: Efficient decoding of stabilizer code by single-qubit local operations and classical communication, QIP 2024, Taipei International Convention Center, Taipei, Taiwan, 2024.1.16.
- [28] A. Hokkyo and M. Ueda: No-Go Theorem from Eigenstate Thermalization Hypothesis about Work Extractability in Locally Interacting Systems, International Symposium on Quantum Electronics, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2024.2.14.
- [29] H. Li, X. Yu, M. Nakagawa, and M. Ueda: Yang-Lee zeros, semicircle theorem, and nonunitary criticality in Bardeen-Cooper-Schrieffer superconductivity, International Symposium on Quantum Electronics, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2024.2.14.

(国内会議)

招待講演

- [30] 中川大也: 開放量子系の多体物理とその展開、量子凝縮相研究における新潮流、京都大学、2023.6.10.
- [31] 上田正仁: Beyond Hermitian Quantum Physics、情報物理学の新展開、理化学研究所、2024.3.22.

一般講演

- [32] 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、日本物理学会第 78 回年次大会、東北大学、2023.9.18.

- [33] 杉本昇大, Joscha Henheik, Volodymir Riabov, László Erdős: 並進対称なスピン系における物理量の局所性と固有状態熱化仮説、日本物理学会第 78 回年次大会、東北大学、2023.9.18.
- [34] 杉本昇大、濱崎立資、上田正仁: 純粋状態にある量子多体系の熱平衡化、ipi-ダイキン シンポジウム、東京大学、2023.10.24.
- [35] 石井敬直: ニューラルネットワークによる非平衡定常状態の計算、ipi-ダイキン シンポジウム、東京大学、2023.10.24.
- [36] 法橋頭広: 一般確率論から見た熱平衡化、第 3 回量子情報・量子基礎論研究会、オンライン、2023.11.04.
- [37] 中川大也、上田正仁: 対称性に保護されたトポロジカルフィードバック制御、日本物理学会 2024 年春季大会、オンライン、2024.3.18.
- [38] 酒本悠暉、上田正仁: 正則グラフ上の繰り返しゲームにおけるピンクノイズダイナミクス、日本物理学会 2024 年春季大会、オンライン、2024.3.19.
- [39] 杉本昇大、濱崎立資、上田正仁: 典型的な非可積分系において固有状態熱化仮説を満たす物理量のクラス、日本物理学会 2024 年春季大会、オンライン、2024.3.20. (セミナー)
- [40] 中川大也: 開放量子多体系における磁性と超流動、セミナー、日本原子力研究開発機構、2023.6.27.
- [41] 中川大也: 1 次元散逸 Hubbard 模型の厳密解、セミナー、東京工業大学、2023.7.28.
- [42] 中川大也: 冷却原子気体で探る開放量子多体系の物理、セミナー、東京理科大学、2023.11.1.
- [43] Shoki Sugimoto: Typicality of Thermalization in Isolated Quantum Systems, Seminar, University of Gdańsk, 2023.11.10.
- [44] Masaya Nakagawa: Topology of discrete quantum feedback control、セミナー、東京大学生産技術研究所、2023.11.27.
- [45] Shoki Sugimoto: Eigenstate Thermalization for Translation Invariant Spin Systems, StatPhys Seminar, The University of Tokyo, 2023.12.01. (その他)
- [46] 法橋頭広: 様々な第 2 法則と熱力学との関係、第 68 回物性若手夏の学校、奥琵琶湖マキノパークホテル&セミナーハウス、2023.08.12.
- [47] 石井敬直: ニューラルネットワークによる非平衡定常状態の計算、第 68 回物性若手夏の学校、奥琵琶湖マキノパークホテル&セミナーハウス、2023.08.12.
- [48] A. Hokkyo and M. Ueda: Universal bound on Work Extractability in Quantum Many-Body Systems, SQP2024, 2024.02.21, poster presentation award.
- [49] 石井敬直: Spin 1/2 dissipative Heisenberg model における定常解、計算物理春の学校 2024、沖縄市町村自治会館、2024.03.13.

5.4 横山 (順) 研究室

当研究室はビッグバン宇宙国際研究センターを本拠として、一般相対性理論、場の量子論、素粒子物理学等の基礎物理学理論に基づいて宇宙論と重力理論の理論的研究を幅広く行うとともに、理学部物理学教室の教育と研究に参画しています。横山は 2021 年 9 月から 2023 年 9 月まで KAGRA 科学会議議長を、2023 年 4 月よりビッグバン宇宙国際研究センター長を務めていますが、同年 11 月よりカブリ数物連携宇宙研究機構長を併任することになったため本務はそちらに移り、理学系研究科の業務は兼務教授として続けています。また鎌田助教は中国科学院杭州高等研究院に栄転し、神野特任助教は本年度末を以て神戸大学准教授に栄転しました。

5.4.1 宇宙論: 時空構造

アインシュタイン・カルタン形式のインフレーション

我々はアインシュタイン・カルタン形式においては Nieh-Yan 項を加えることによって計量形式と Palatini 形式が滑らかに接続することに注目し、標準模型のヒッグス場にリッチスカラーとの結合を加えてインフレーションを実現する模型におけるカットオフスケールの振る舞いを評価した [6]。

またこの形式において $f(R)$ 理論は一般的に新たな自由度が存在しないと知られているが、Nieh-Yan 項および Holst 項を導入することにより、新たな自由度が出て、Starobinsky inflation およびその変形が実現できることを示した [49, 71]。

複数場インフレーション由来の B-mode シグナル

複数場インフレーション模型、特にスペクテーター模型においては、単一場インフレーション模型において成り立ついわゆる consistency 関係が成り立たなくなることが知られている。LiteBIRD による宇宙背景放射 (CMB) の B-mode 偏光の観測を通じて、原始テンソル揺らぎの振幅および波数依存性に対して成り立つ consistency 関係を精査することにより、複数場インフレーション模型の検証が可能であることを示した [7]。

連星系の post-Minkowskian 理論計算に対する機械学習の適用可能性

連星系の運動を解析する post-Minkowskian 理論の予言を確定させるには、そこに現れるファインマン積分を次元正則化パラメータ ϵ の展開として知る必要があるが、一定のループ次数以上においては積分自体の複雑さがボトルネックとなり、この展開を解析的に行うことが難しい。我々はそれを回避する方法として数値ブートストラップ法に注目し、こ

に機械学習を用いたモンテカルロ積分のサンプリング手法である normalizing flow を適用する可能性を研究した [9]。

単一場インフレーション中の原始ブラックホール生成における 1-loop 補正

原始ブラックホール (PBH) の種となるような大振幅揺らぎがもたらす、宇宙背景放射 (CMB) の揺らぎに対する 1-loop 補正の研究を、昨年度に引き続いて推進した。以前はスローロールパラメータ η の時間変化が階段関数的であるようなインフレーションモデルにおいて 1-loop 補正を計算していたが、本年度はその時間変化が連続的であるようなモデルを考察した [43, 44, 45, 46, 58, 59]。

インフラトン振動期における原始ブラックホール生成

R^2 インフレーションモデルを代表とする数々のインフレーションモデルにおいて、インフラトン振動期中における原始ブラックホールの過剰生成が指摘されてきたが、我々は、その振動期中における非球対称性の効果が無視できないことに着目して、原始ブラックホールの生成が大きく抑制されることを示した [26, 54, 76]。

5.4.2 宇宙論: 物質の起源と進化

カイラル磁気流体力学

我々は高温の初期宇宙において大きなレプトンフレーバー非対称がある状況下ではカイラル磁気効果によりハイパー磁場の増幅が起こり、そこからバリオン数への転換が生じることを発見し、それにより初期宇宙におけるレプトンフレーバー非対称の上限を定めた [29, 83]。我々はまた、フェルミオンのカイラルリティの磁気ヘリシティがちょうど打ち消し合うような初期条件を持つ系の発展を数値的に解き、カイラルリティと磁気ヘリシティの対消滅は時間のべき関数で進み、それは Hosking integral という量の保存で説明できることを発見した [3, 5, 81, 82]。

軽いスレプトンの存在下での Affleck-Dine 機構

我々は量子効果と熱的効果を詳しく解析し、超対称性理論の Affleck-Dine 機構が適切に働き、現在の宇宙を実現するような条件を定めた [4]。

一次相転移と重力波生成

宇宙論的一次相転移で生じる重力波の数値計算の新たな手法である Higgsless scheme を提案した [31]。また、一次相転移が一時的なドメインウォール生成を伴う場合、ウォールができない場合と比べて流体の運動が重力波生成を引き起こしやすいことを、3次元数値シミュレーションの結果とともに指摘した [8]。他にも、相転移に伴って相互作用の弱い粒子が生成される場合があるが、その際の重力波シグナルが特徴的なものになることを指摘した [32, 33, 34]。

渦上のニュートリノゼロモードとトポロジカル不変量

物性理論で用いられる、運動量空間におけるトポロジカル不変量を用いて、Z-string の安定性をより現代的な方法で理解・検証した [66]。

Axion inflation 中の粒子生成による反作用

axionic inflaton と U(1) ゲージ場の間に Chern-Simons 結合があると、偏極に依存したタキオン不安定性によってゲージ場が成長する。荷電粒子が存在する場合は荷電粒子生成によるゲージ場への反作用 [86] を考慮する必要がある一方、それらが存在しない場合は成長したゲージ場からインフラトンへの反作用が問題となる。我々はこの後者の場合に生成するインフラトン揺らぎの性質を明らかにするため、確率形式のアプローチを開発している [35]。

重力外場によるフェルミオンのカイラルリティ生成

重力的カイラル量子異常は、左右非対称な円偏極の重力波のもとでフェルミオンのカイラルリティが生成することを予言している。一般にフェルミオンのカイラルリティには励起された“粒子”が運ぶものと真空に蓄えられたものの2種類が存在しているが、上述の重力場背景のもとでは後者の寄与が卓越するであろう、というこれまでの現象論的研究では見過ごされていた新たな示唆を得た [88]。

初期磁場の時間発展とバリオン等曲率揺らぎ生成問題

我々は、磁気流体力学の保存量 Hosking integral を考慮し、初期磁場の時間発展則を解析的に記述した。さらにこれを用いて、電弱対称性が回復した相における磁場生成シナリオが一般的に抱えるバリオン等曲率揺らぎ生成問題を、ボイド磁場に対する観測的制限と比較して議論した。その結果、ビッグバン元素合成との整合性により、ボイド磁場の起源としては電弱対称性が破れた相における磁場生成シナリオが有望であることが確かめられた [14, 24, 67, 68, 91, 92]。

無衝突ボルツマン方程式の量子アルゴリズム

我々は、量子アルゴリズムと古典計算の併用によって無衝突ボルツマン方程式を効率的に解く手法を二通りのアプローチで提案した。一方では reservoir 法と呼ばれる手法と量子計算の相性が良いことに着目し、自己重力 (非線形) 系を扱う計算アルゴリズムを提案した。他方では Hamiltonian シミュレーションと呼ばれる量子計算手法によって、暗黒物質および物質が作る重力場中のニュートリノ分布関数の線形な時間発展を解くことを提案した [15, 89]。

複合ソリトン

アクシオン電磁気学において、磁場とアクシオン勾配の内積が実効電荷を生じる。われわれは、この実効電場によって安定化し得る解として、トーフト=ポリャコフモノポールを球殻状のアクシオンドメインウォールが包むような配位の性質と宇宙論的な役割を調べている [39, 90]。

Stochastic inflation の相関関数

Borel 総和の手法を用いて相関関数の発散を処理し、正しい時間発展が得られることを示した。また Borel 空間における特異点の解析から、本研究で扱った $\lambda\phi^4$ 模型では非摂動効果が存在しないことが示唆された [16, 25, 40, 41, 62, 94]。

インフレーション宇宙における確率選択現象

我々は制約付き確率過程の理論を拡張するとともに、場の配位空間で示される極稀な軌道を解析し、一見相反する理論と観測の隔たりに自然な説明を与えた。すなわち、複数場が存在する状況から出発しても、観測可能な宇宙では単一場による記述に帰着することを示した [1, 25, 42, 69, 93]。

スファレロン脱結合によるバリオン非対称生成機構

近年、素粒子標準模型内で実現できるバリオン数非対称生成のシナリオについて、まだ脱結合していないスファレロンによる、できたバリオン数を消す効果を考慮したところ、このシナリオで生成できるバリオン数が僅少にとどまることを示した [17]。

場の配位の鞍点解を計算する数値手法

初期宇宙の現象を考察するとき、場の配位の鞍点解が重要になる場合がある。場の配位の鞍点解の新しい数値手法を研究し、それを用いてバウンス解および sphaleron 解を解いた [18, 30, 47, 48, 16, 65, 70]。

宇宙複屈折

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の複屈折の重力レンズ効果を取り入れた精密計算結果を報告した [20]。開発された計算ツールによる計算結果と現行の観測結果との比較から、特定の初期暗黒エネルギーモデルに対する制限につながった [19]。

偏光面の回転角には位相不定性があることを考慮すると、物理的に許されるが見過されている解が大量にあることを見出した [53, 73]。宇宙複屈折の起源として着目されるアクシオン型粒子 (ALP) について、ポテンシャルを転がり落ちるケースで、宇宙複屈折のシグナルに違いが現れるかどうかを調べた [50, 51, 52, 74]。

インフレーション後の再加熱とバリオン数生成

R^2 インフレーション理論に三世代の重いマヨラナニュートリノを付け加えることで、バリオン非対称とニュートリノ振動実験を同時に説明することができる。マヨラナニュートリノの湯川結合行列の成分に階層性がある場合、マヨラナニュートリノ優勢期が実現することを示し、CMB 観測によるマヨラナニュートリノの探索の可能性を提示した。[26, 21, 75]

5.4.3 重力波検出器 KAGRA データ解析

環境モニターを用いた雑音除去手法の開発

重力波検出器の感度向上のため、環境チャンネルのデータと重力波信号を含むストレインチャンネルのデータを併用し、それらの分布の非ガウス性を使って信号源を分離する独立成分解析に取り組んでいる。本年度は、変分原理を用いることにより、任意の非線形相互作用をする複数の信号を分離する方法の開発に成功した [22, 27, 28]。

粒子放射と重力波を用いた宇宙ひもの観測的制限

宇宙ひものループが重力波の放射と素粒子の放射のどちらによって崩壊するかについて、素粒子と重力波双方の放出を仮定した上での解析を可能とする定式化を行い、近年のパルサータイミングアレイの観測結果等を用いた制限を導出した [10, 87]。

軽量ダークマター探索

近年、干渉計を利用した軽量ダークマター探索実験が盛んになっている [61]。我々は軽量ベクトル場ダークマターの統計的性質を明らかにし [12]、新たに開発したパイプラインを用いて重力波検出器 KAGRA による初の B-L ゲージボゾン探索を執り行った [36, 38]。また、同パイプラインをアクシオン探索実験にも適用し、結合定数への上限値を導出した [11]。

KAGRA 全著者論文, LVK 論文

横山、糸、上野はKAGRAの著者となっています。今年度はLIGO-Virgo-KAGRAのものを含め、5編の全著者論文を出版しましたが、そのリストは割愛します。

5.4.4 時間領域天文学

Tomo-e Gozen を用いた高空間分解観測

東京大学木曽観測所の105センチシュミット望遠鏡に搭載されているTomo-e Gozenカメラの高い時間分解能を活用することで、高い空間分解を実現する観測をコミュニティに提案した[73]。

<受賞>

- [1] K. Tokeshi, Outstanding Presentation Award Gold Prize, 32nd Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG32), 2023/11/27-12/01.

<報文>

(原著論文)

- [2] V. Domcke, K. Kamada, K. Mukaida, K. Schmitz, M. Yamada, “New Constraint on Primordial Lepton Flavor Asymmetries”, *Physical Review Letters* **130** (2023) 261803.
- [3] A. Brandenburg, K. Kamada, J. Schober, “Decay law of magnetic turbulence with helicity balanced by chiral fermions”, *Phys. Rev. Res.* **5** (2023) L022028.
- [4] K. Enomoto, K. Hamaguchi, K. Kamada, J. Wada, “Revisiting Affleck-Dine leptogenesis with light sleptons”, *JCAP* **07** (2023) 003.
- [5] A. Brandenburg, K. Kamada, K. Mukaida, K. Schmitz, J. Schober, “Chiral magnetohydrodynamics with zero total chirality”, *Physical Review D* **108** 2023, 063529.
- [6] M. He, K. Kamada, K. Mukaida, “Quantum corrections to Higgs inflation in Einstein-Cartan gravity”, *JHEP* **01** (2014) 014.
- [7] R. Jinno, K. Kohri, T. Moroi, T. Takahashi and M. Hazumi, “Testing multi-field inflation with LiteBIRD”, *JCAP* **03**, 011 (2024).
- [8] R. Jinno, T. Konstandin, H. Rubira and I. Stomberg, “Higgsless simulations of cosmological phase transitions and gravitational waves”, *JCAP* **02**, 011 (2023).
- [9] R. Jinno, G. Kälin, Z. Liu and H. Rubira, “Machine learning Post-Minkowskian integrals”, *JHEP* **07**, 181 (2023).
- [10] M. Hindmarsh and J. Kume, “Multi-messenger constraints on Abelian-Higgs cosmic string networks”, *JCAP* **04** (2023), 045.

- [11] Y. Oshima, H. Fujimoto, J. Kume, S. Morisaki, K. Nagano, T. Fujita, I. Obata, A. Nishizawa, Y. Michimura and M. Ando, “First results of axion dark matter search with DANCE,” *Phys. Rev. D* **108** (2023) no.7, 072005.
- [12] H. Nakatsuka, S. Morisaki, T. Fujita, J. Kume, Y. Michimura, K. Nagano and I. Obata, “Stochastic effects on observation of ultralight bosonic dark matter,” *Phys. Rev. D* **108** (2023) no.9, 092010.
- [13] R. Jinno, J. Kume and M. Yamada, “Super-slow phase transition catalyzed by BHs and the birth of baby BHs,” *Phys. Lett. B* **849** (2024), 138465.
- [14] F. Uchida, M. Fujiwara, K. Kamada, and J. Yokoyama, “New description of the scaling evolution of the cosmological magneto-hydrodynamic system”, *Phys. Lett. B* (2023) 138002.
- [15] K. Miyamoto, S. Yamazaki, F. Uchida, K. Fujisawa, and N. Yoshida, “Quantum algorithm for collisionless Boltzmann simulation of self-gravitating systems”, *Phys. Rev. Res.* **6** (2024) 1, 013200.
- [16] M. Honda, R. Jinno, L. Pinol, and K. Tokeshi, “Borel resummation of secular divergences in stochastic inflation”, *JHEP* **08** (2023) 060.
- [17] M. Hong, K. Kamada and J. Yokoyama, “Baryogenesis from sphaleron decoupling”, *Physical Review D* **108** (2023) 6, 063502.
- [18] M. Hong and R. Jinno, “Quartic Gradient Flow”, *Physics Letters B* **849** (2024) 138441.
- [19] J. Eskilt *et al.* (incl. F. Naokawa) “Constraints on Early Dark Energy from Isotropic Cosmic Birefringence”, *Phys. Rev. Lett.* **131**, 121001 (2023).
- [20] F. Naokawa & T. Namikawa “Gravitational lensing effect on cosmic birefringence”, *Physical Review D* **108**, 063525 (2023).
- [21] H. Jeong, K. Kamada, A. Starobinsky, J. Yokoyama, “Reheating process in the R^2 inflationary model with the baryogenesis scenario”, *JCAP* **11** (2023) 023.

(会議抄録)

- [22] J. Yokoyama, “Developing a New Nonlinear Independent Component Analysis Scheme,” *PoS ICRC2023* (2023)1572

(国内雑誌)

- [23] 横山順一 「横山教授に聞く科学のふしぎ」 子ども新聞「風っ子」連載 上毛新聞。

(学位論文)

- [24] F. Uchida, “Probing the Early Universe with the Evolution of Primordial Magnetic Fields”, (博士論文).
- [25] 渡慶次孝気, “Stochastic Selection in the Inflationary Universe” (博士論文).

- [26] 鄭玄, “ R^2 インフレーション再加熱機における物質と時空の進化 (Cosmological evolution after R^2 inflation)” (修士論文).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [27] J. Yokoyama, “Developing a New Nonlinear Independent Component Analysis Scheme,” (poster) 10th KAGRA International Workshop, 2023/5/29 National Tsing Hua University.
- [28] J. Yokoyama, “Developing a New Nonlinear Independent Component Analysis Scheme,” (poster) ICRC 2023 Nagoya University, 2023/8.
- [29] K. Kamada, “Baryon (over)production from large lepton flavor asymmetry”, PLANCK 2023, 2023/5/25.
- [30] R. Jinno, “Quartic Gradient Flow,” Higgs as a Probe of New Physic, Osaka Univ., 2023/6.
- [31] R. Jinno, “Higgsless simulations of first-order phase transitions and gravitational wave production,” 2023 Shanghai Symposium on Particle Physics and Cosmology: Phase Transitions, Gravitational Waves, and Colliders, TD Lee Institute, Shanghai, China, 2023/9.
- [32] R. Jinno, “Gravitational waves from feebly-interacting particles in a first-order phase transition,” CTPU homecoming workshop, 2023/10.
- [33] R. Jinno, “Gravitational waves from feebly-interacting particles in a first-order phase transition,” Gravitational Wave Probes of Physics Beyond Standard Model, Osaka City University, 2023/11.
- [34] R. Jinno, “Gravitational waves from feebly-interacting particles in a first-order phase transition,” Jeju workshop, 2023/11.
- [35] Jun’ya Kume, “Back-reactions in axion inflation with U(1) gauge field” (poster), RESCEU Summer School 2023, 2023/8.
- [36] Jun’ya Kume, “Updates on KAGRA B-L vector boson search”, LIGO-Virgo-KAGRA collaboration meeting September 2023, Toyama International Conference Center, Japan, 2023/9.
- [37] Jun’ya Kume, “A fate of catalyzed first order phase transition -black holes from primordial black holes-”, INFN TAsP meeting, Università di Torino, Italy, 2024/11.
- [38] Jun’ya Kume, “Ultralight dark matter search with KAGRA -the O3GK result and toward the O4 analysis-”, FY2023 “What is dark matter? - Comprehensive study of the huge discovery space in dark matter”, YITP, 2024/3.
- [39] F. Uchida, and R. Jinno, “Monopole-wrapping axion domain wall”, COSMO’23, IFT, Madrid, 2023/9/11.
- [40] K. Tokeshi, “Borel resummation for secular divergences in stochastic inflation”, Planck 2023, Warsaw University, Poland, 2023/05/22-26.
- [41] K. Tokeshi, “Borel resummation for secular divergences in stochastic inflation”, RESCEU Summer School 2023, Shinshu University, Japan, 2023/08/09-12.
- [42] K. Tokeshi, “Stochastic selection effect in the early Universe, 32nd Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG32), Nagoya University, Japan, 2023/11/27-12/01.
- [43] J. Kristiano, “One-loop correction in primordial black hole formation from single-field inflation” The 26th International Conference on Particle Physics and Cosmology (COSMO), IFT, Spain, 2023/09/11-15.
- [44] J. Kristiano, “Superhorizon evolution of the squeezed bispectrum” Correlators in Cortona, Italy, 2023/09/18-22.
- [45] J. Kristiano, “One-loop correction in primordial black hole formation from single-field inflation” Focus Week on Primordial Black Holes, Kavli IPMU, 2023/11/13-17.
- [46] J. Kristiano, “Superhorizon evolution of the squeezed bispectrum” The 32nd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG), Nagoya University, 2023/11/27.
- [47] M. Hong, “Quartic Gradient Flow” (poster), RESCEU Summer School 2023, Shinshu University, 2023/8/9-12.
- [48] M. Hong, “Quartic Gradient Flow”, The 32nd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, Nagoya University, 2023/11/27-12/1.
- [49] M. Hong, “Starobinsky Inflation and beyond in Einstein-Cartan Gravity”, Berkeley Week at the University of Tokyo, The University of Tokyo, 2024/3/11-15
- [50] F. Naokawa, “The rotation of axion by the rotation of photon”, RESCEU Summer School, Nagano, Japan, 2022/8/12.
- [51] F. Naokawa, “Cosmic birefringence by rotating ALP”, Large Scale Parity Violation Workshop, ASIAA, Taiwan, 2023/12/5.
- [52] F. Naokawa, “Rotating axion and cosmic birefringence”, Extreme Mass Dark Matter Workshop, YITP, Japan, 2024/03/06.
- [53] F. Naokawa, “A phase uncertainty of cosmic birefringence”, What is dark matter? -Comprehensive study of the huge discovery space in dark matter-, YITP, Japan, 2024/03/07.
- [54] H. Jeong, “Are primordial black holes produced after R^2 inflation?”, The 32nd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, Nagoya University, 2023/11/27-12/1.

招待講演

- [55] J. Yokoyama, “Closing remarks,” KAGRA International Workshop 10, 2023/5/30, National Tsing Hua University, Taiwan.
- [56] J. Yokoyama, “Status of KAGRA,” Siam Physics Congress 2023, 2023/6/15, Chengmai, Thailand.
- [57] J. Yokoyama, “Inflation, Primordial Black Holes, and Gravitational Wave Background,” Gravitational Wave Probes of Physics Beyond Standard Model, 2023/11/6 Osaka Metropolitan University.
- [58] J. Yokoyama, “Primordial Black Holes from Single-field Inflation?,” Future Perspectives on PBHs 2023/12/12 Rome, Italia.
- [59] J. Yokoyama, “Primordial Black Holes from Single-field Inflation?,” IBS CTPU-CGA 2024 Workshop on (Primordial) Black Holes and Gravitational Waves 2024/3/18
- [60] Jun’ya Kume, “Effects of gravitation on the hydrodynamics during cosmological first order phase transition”, Korea - Japan joint workshop on Particle Physics, Cosmology, and Gravity, Jeonbuk National University, Korea, 2023/5 Instituto de Física Teórica.
- [61] Jun’ya Kume, “Ultralight Dark Matter Searches with Laser Interferometers”, 10th KAGRA International Workshop (KIW-10), National Tsing Hua University, Taiwan, 2023/5.
- [62] K. Tokeshi, “Borel resummation in stochastic inflation”, YITP International Molecule-type Workshop, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Japan, 2023/07/13-28.
- [63] J. Kristiano, “Progress on one-loop correction in PBH formation from single-field inflation”, Revisiting cosmological non-linearities in the era of precision surveys, YITP International Molecule-type Workshop, Kyoto University, 2023/07/13-28.
- [64] J. Kristiano, “Comparing smooth and sharp transition of the second SR parameter”, Extreme Mass Dark Matter Workshop: from Superlight to Superheavy, YITP International Molecule-type Workshop, Kyoto University, 2024/03/4-22.

(国内会議)

一般講演

- [65] R. Jinno, “Quartic Gradient Flow / Tunneling potential formalism,” Second Mini-workshop on the Early Universe, Suwa lake, Nagano, 2023/7/3-5.
- [66] 神野隆介, “渦上のニュートリノゼロモードとトポロジカル不変量,” 日本物理学会 2023 年年次大会, 東北大学, 2023/09/16-19.
- [67] F. Uchida, “Do primordial magnetic fields survive until today?,” Second Mini-workshop on the Early Universe, Suwa lake, Nagano, 2023/7/3.
- [68] F. Uchida, “The baryon isocurvature problem of primordial magnetic fields”, Berkeley week, the University of Tokyo, Hongo, Tokyo, 2024/3/15.
- [69] K. Tokeshi, “確率形式における制約付き Langevin 方程式”, 日本物理学会 2023 年年次大会, 東北大学, 2023/09/16-19.
- [70] 洪木子, “四次グラディエントフロー法”, 日本物理学会 第 78 回年次大会 (2023 年), 東北大学, 2023/9/16-19.
- [71] 洪木子, “アインシュタイン・カルタン重力における Nieh-Yan 項および Holst 項によるインフレーション”, 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン, 2024/3/18-21
- [72] 直川史寛, “Tomo-e Gozen の時間分解能を空間分解へ活かす”, 木曾シュミットシンポジウム 2023, 木曾, 2023/5/30.
- [73] 直川史寛, “宇宙複屈折の位相不定性”, 日本天文学会 2024 年春季年会, 東京大学+オンライン開催, 2023/3/13.
- [74] 直川史寛, “旋回するアキシオンによる宇宙複屈折”, 日本物理学会 2024 年春季年会, オンライン開催, 2023/3/24.
- [75] 鄭玄, “ R^2 インフレーション理論におけるバリオン数生成”, 日本物理学会 第 78 回年次大会 (2023 年), 東北大学, 2023/9/16-19.
- [76] 鄭玄, “ R^2 インフレーション再加熱期における原始ブラックホール生成”, 日本物理学会 2024 年春季年会, オンライン開催, 2023/3/18-21.

招待講演

- [77] 神野隆介, “高エネルギー初期宇宙における一次相転移と重力波生成,” 研究会「熱場の量子論とその応用」, KEK, 2023/8/28-30.
- [78] R. Jinno, “First-order phase transitions and gravitational wave production in the early Universe,” Joint workshop on General Relativity and Cosmology, Chiba, 2024/3/6-8

(セミナー)

- [79] J. Yokoyama, “Primordial Black Holes from Single-field Inflation?” Universiti a’ Degli Studi di Milano Bicocca 2023/3/21
- [80] J. Yokoyama, “Primordial Black Holes from Single-field Inflation?” Universiti di Padova 2023/3/25
- [81] K. Kamada, “Axion inflation meets chiral magnetohydrodynamics”, Nordita, 2023/5/31.
- [82] K. Kamada, “Axion Inflation as the origin of Baryon asymmetry of the Universe”, 早稲田大学宇宙物理学研究室, 2023/6/30.
- [83] 鎌田耕平, “カイラル磁気不安定性による初期宇宙のレプトンフレーバー非対称性への制限”, 横浜国立大学素粒子理論研究室, 2023/7/21.
- [84] 神野隆介, “高エネルギー初期宇宙における一次相転移と重力波生成,” 宇宙物理学コロキウム, 立教大学, 2023/5/9.

- [85] R. Jinno, “First-order phase transitions & GW production in the early Universe,” Kobe University, 2023/5/24.
- [86] Jun’ya Kume, “U(1) gauge field production in axion inflation -backreaction from charged particles-”, Institute for Basic Science, Center for Cosmology, Gravity and Astroparticle physics (CGA), Korea, May 2023.
- [87] Jun’ya Kume, “Cosmic strings in the Abelian-Higgs model and the recent results of Pulsar Timing Array”, University of Münster, Germany, December 2023.
- [88] Jun’ya Kume, “How is fermion chirality produced by chiral gravitational waves?”, University of Münster, Germany, December 2023.
- [89] F. Uchida, “Quantum algorithm for collisionless Boltzmann simulation”, 東京大学素粒子論研究室セミナー, 2023/5/29.
- [90] F. Uchida, “Monopole wrapped by domain wall?”, RESCEU Summer School, Shinshu University, Nagano, 2023/8/9.
- [91] F. Uchida, “BBN constraint on the origin of the cosmological magnetic field”, internal seminar at NORDITA, 2023/9/25.
- [92] F. Uchida, “BBN constraint on the origin of the cosmological magnetic field”, internal seminar at Waseda University, 2023/11/24.
- [93] K. Tokeshi, “Constrained random processes in stochastic inflation”, 立教大学理論物理学コロキウム, 立教大学, 2023/11/07.
- [94] K. Tokeshi, “Borel resummation in stochastic formalism of inflation”, 東北大学 TUHEP セミナー, 東北大学, 2023/12/07.
- [95] J. Kristiano, “Bispectrum and one-loop correction in PBH formation from single-field inflation”, Zooming in on Primordial Black Holes Seminar, Leiden University, The Netherlands, 2023/04/03 (Online).
- [96] J. Kristiano, “Primordial black holes from single-field inflation?”, Leung Center for Cosmology and Particle Astrophysics (LeCosPa) Seminar, National Taiwan University, Taiwan, 2023/04/17 (Online).
- [97] J. Kristiano, “Exploring possibilities of the inflationary potential”, Colloquium, Rikkyo University, 2023/04/18.
- [98] J. Kristiano, “Bispectrum and one-loop correction in PBH formation from single-field inflation”, Department of Physics (Particle Theory and Cosmology Group) Seminar, Tohoku University, 2023/05/18.

(アウトリーチ)

- [99] 横山順一 「宇宙：始まりと終わり」 新島学園短期大学創立 40 周年記念講演会 高崎市文化センター 2023/10/14

6 一般物理実験

6.1 江尻・辻井研究室

当研究室では、核融合エネルギーの実現を目標に磁場閉じこめ型トラスプラズマの研究を行っている。柏キャンパスに設置された TST-2 装置を用いた実験的研究を行うと共に、量子科学技術研究開発機構、核融合科学研究所、九州大学、筑波大学等との共同研究を進めており、英国トマカクエナジー社等の海外機関との共同研究も実施している。TST-2 では強力な波動加熱により、プラズマ中に高エネルギー電子を発生させ、電流を駆動し、極めて自律的で非線形性の大きいプラズマを生成している。当研究室では、波動や高エネルギー電子が生み出す多彩な物理に取り組んでいる。

6.1.1 TST-2 実験の概要

TST-2 は球状トカマク (ST) 型の装置であり、プラズマの主半径、小半径はおおよそ 0.36, 0.23 m, 電磁誘導、高周波波動を用いた最大プラズマ電流はそれぞれ 120, 27 kA であり、国内の大学の一研究室規模としては、もっとも高温のプラズマを生成することが可能な装置である。TST-2 では、主として低域混成波 (Lower-Hybrid Wave, LHW) を用いて高エネルギー電子を生成し、それにより電流を駆動する研究を行っている。2023 年度は、古いコンデンサー電源 2 系統を新しいものに更新するとともに、電源 1 系統の組み換えを行った。また、各種計測機器の拡充を図ると共に、新オフミッドプレーンアンテナでの実験を本格化させた。LHW で生成した高速電子の分布等をより直接的に測定するために、モリブデン板をプラズマに挿入し、そこで発生する制動 X 線や、温度を反映する赤外光を測定した。高周波シースの形成や温度増加に起因するモリブデンのたたき出しが確認される一方で、高速電子が必ずしも外側で損失するわけではなく、上側や下側の固体構造 (リミター) で損失している可能性が示唆された。パラメトリック崩壊不安定性 (Parametric Decay Instability, PDI) は、イオン加熱を引き起こし、電流駆動効率を悪化させる可能性がある。イオン温度計測からイオン加熱パワーを推定したところ、LHW 入射パワーに対して十分小さいことが分かり、少なくともイオン加熱が LHW による電流駆動効率を著しく悪化させているわけではないことが確認された。新たな計測機器として開発中のダブルパストムソン散乱計測では、電磁誘導駆動プラズマを対象にして電子温度の非等方性の測定に成功した。誤差が大きいものの、

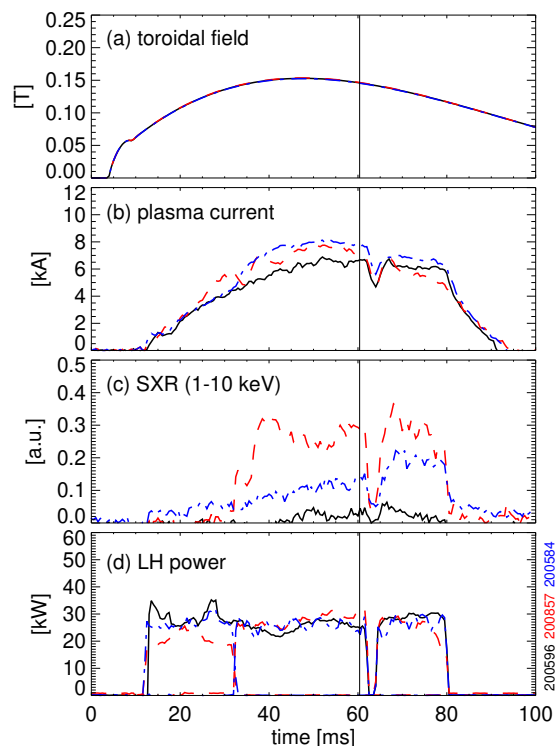


図 6.1.1: 赤道面入射 (黒実線) 及び上側入射 (赤波線)、オフミッドプレーン入射 (青一点鎖線) 低域混成波アンテナによる放電波形. (a) トロイダル磁場 (b) プラズマ電流 (c) 軟 X 線 (d) LH 電力.

理論予測と大きく変わらない温度非等方性が確認された。理論研究では、積分型誘電率を用いた新たな波動計算手法を開発するとともに、磁力線方向損失による電子温度非等方性への影響を研究した。共同研究として、JT-60SA の捕捉粒子配位における高速電子輸送解析から、電子サイクロtron波補助立ち上げ時に高速電子閉じ込めのよくなる配位を調査した。九州大学の QUEST 装置では、トムソン散乱計測器を担当しており、空間測定点数を増やすための準備 (ポリクロメーターの増設、ファイバーホルダーの改造、新たなデジタイザーの導入) を行うと共に、レーザービームの自動アライメントシステムの開発を行っている。

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

オフミッドプレーン入射アンテナの特性を調べた。図 6.1.1 に放電波形を示す。オフミッドプレーン入射放電は X 線放射強度が上側入射に比べて小さく、高速電子損失が抑えられていることがわかる。最適化さ

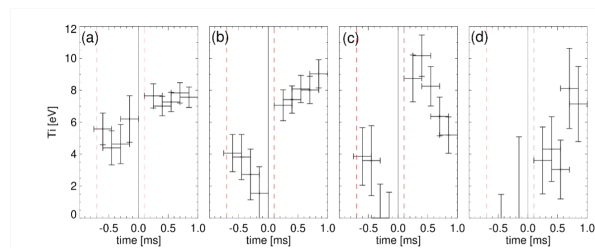


図 6.1.2: (a) $R_{\text{tan}} = 0.40$ m, (b) 0.45 m, (c) 0.49 m, (d) 0.54 m での LHW 電力がオンになる時刻周辺のイオン温度の時間発展。

れた条件下では、オフミッドプレーン入射アンテナによる駆動電流は、既存の外側及び上側入射アンテナの駆動電流の半分弱にとどまった。拡張 MHD、光線追跡と軌道平均運動論によるシミュレーションを行ったところ、オフミッドプレーン入射、赤道面入射、上側入射実験においてそれぞれ観測されたプラズマ電流値 8 kA, 15 kA, 21 kA に対して、シミュレーション予測値はそれぞれ 11.7 ± 0.3 kA, 13.9 ± 4.1 kA, 24.8 ± 4.5 kA となり、概ね妥当な結果であることがわかった。現状、電源電力 100 kW に対して、アンテナのアークにより、プラズマへの入射電力は 30 kW にとどまっている。より大きな電力を安定にプラズマに入射するため、現在、アンテナ及びリミター位置を最適化する改造を行っている。

パラメトリック崩壊による非線形イオン加熱

TST-2 では、パラメトリック崩壊不安定性 (PDI) がしばしば観測されており、その強度とイオン温度との間に正の相関があることが確かめられていた。今回 PDI の数値的な推測と、イオンの加熱場所を推定するための実験を行った。崩壊波の推測、また PDI の励起される条件を調べるため、PDI の分散関係を実際のプラズマのパラメータを入れて解いた。PDI の成長率は低磁場側で大きい傾向があり、TST-2 のパラメータではアンテナ近傍の他にプラズマ内部でも成長率が大きいことが確かめられた。準モードと LHW に崩壊するモードを調べたところ、イオンサウンド準モード (ISQM)、電子ランダウ準モード (ELQM)、イオンサイクロトロン準モード (ICQM) の 3 種類が見つかった。ICQM と ISQM はイオンの電気感受率の虚数部分が大きいことから、PDI により発生してすぐに減衰し、イオンを加熱することが期待された。

イオンの加熱場所を推定するため、LHW のパワーに変調をかけて実験を行った。イオン温度は可視分光器を用い、不純物である C^{2+} のラインスペクトルのドップラー広がりから求めた。LHW の電力変調に対するイオン温度変調からイオン加熱電力を求め、各ショットで分光器の視線を変えることで空間分布を計測した。視線ごとのイオン温度の時間発展を図 6.1.2 に示す。イオン加熱電力として、 $R = 0.49$ m でピークをとるような分布が得られた。PDI の励起箇所は、高周波磁気プローブから得られる PDI の周波

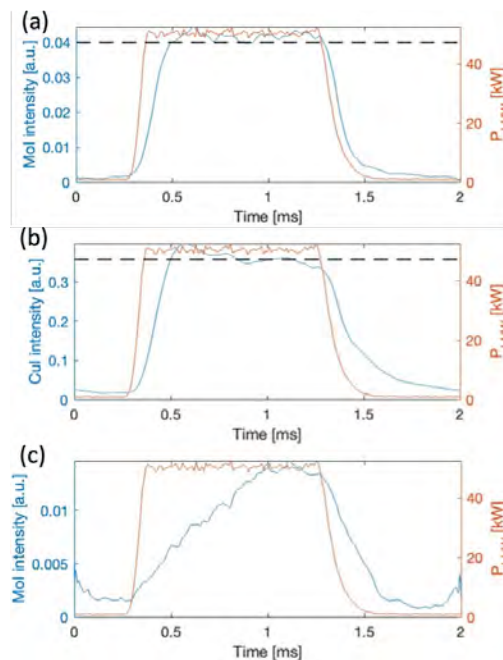


図 6.1.3: RF 電力変調波形と対応する (a) リミター近傍での MoI 放射 (b) リミター近傍での CuI 放射 (c) ターゲット板からの MoI 放射。

数から $R = 0.50$ m と推定され、イオンの加熱箇所と一致した。数値計算からも該当箇所での高い成長率をもつことが分かっており、PDI の強度とイオンの温度との間に正の相関があることも含め、PDI によって発生した波によってイオンが加熱されていることが、より確かとなった。

静電結合進行波アンテナによる不純物生成

分光計測により、LHW プラズマにおける不純物生成メカニズムを調査した。LHW 電力変調に対する不純物放射の応答を計測した。図 6.1.3(a) に示すように、リミター近くの MoI 放射は LHW 電力に対して速い応答を示した。同様の挙動は、CuI (図 6.1.3(b)) でもよく観測され、銅でできているアンテナ上の RF シースパッタリングによるものと考えられる。

図 6.1.3(c) はモリブデンターゲット板からの MoI 放射である。これは加熱による不純物生成によるものと考えられる。高速カメラを用いてターゲット板の温度変化を調べた。ターゲット板の角度に対する発光分布の変化を図 6.1.4 に示す。ターゲット板の温度 (発光強度) は 90 度のときに最大であり、 0 度のときに最小であった。これはターゲット板に衝突した高速電子からの X 線放射計測とも整合している。

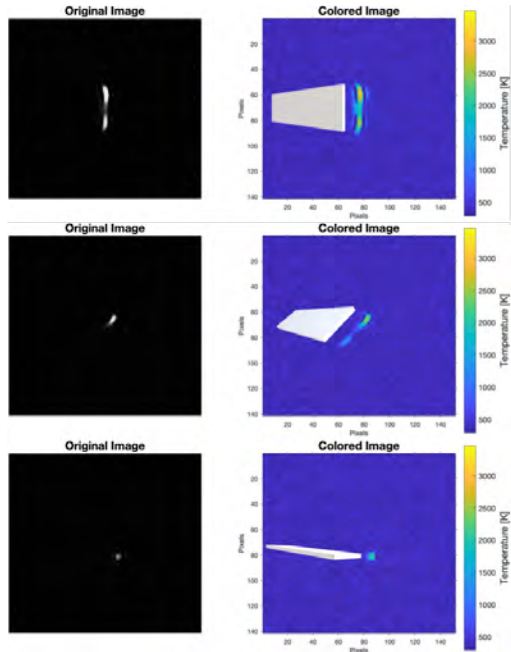


図 6.1.4: 可視高速カメラで計測したターゲット板の (左) 発光分布と (右) 推定温度. ターゲット板角度 (上) 90° (中) 45° (下) 0°.

有限要素法による熱いプラズマシミュレーション

LHW の伝播・吸収の評価には全波計算が重要である. これまでの全波計算の多くはスペクトル法に基づいていたが, アンテナを含む複雑な計算領域を扱うには適していなかった. ただし実験においては, 波動と境界プラズマやアンテナとの相互作用が問題となることがあり, これらの領域と炉心プラズマを統一的にモデリングすることは重要である. 有限要素法による全波計算は効率的に複雑な形状を扱えることが大きな利点であり, 上に述べたモデリングを可能にする. しかし, プラズマの応答を表す誘電率は一般には積分演算子となり, 代数積となるスペクトル法に比べて実装は単純ではなくなる.

有限要素法において積分形誘電率を用いて 2 次元軸対称系における LHW の全波計算を行った. 計算には実験で得られたプラズマ平衡を用いた. 非局所的となる運動論に基づくプラズマの応答は反復計算によって導入した. 単純な反復では計算が不安定になったため, それまでに得られている複数個の解を用いて次の反復の入力を求めるという操作をアルゴリズムに導入した. 図 6.1.5 は初期解と収束解に対して得られた吸収分布を示している. 収束解において吸収に対する誤差は 0.1 % 以下であった.

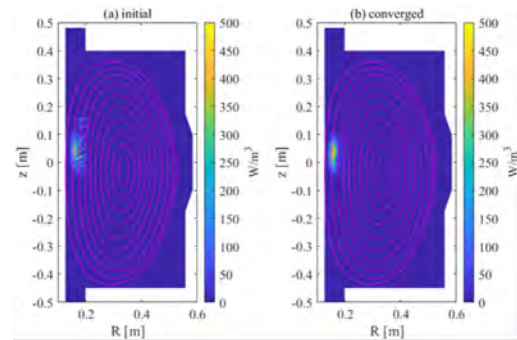


図 6.1.5: (a) 初期解と (b) 収束解に対する吸収分布.

6.1.3 誘導駆動プラズマ

ダブルパストムソン散乱計による非等方電子温度計測

誘導駆動プラズマの電子温度非等方性を計測するために, ダブルパストムソン散乱計測を行った. 系統誤差の影響を排除するため, プラズマ電流を反転した実験を行い, 通常の場合と比較した. 結果を図 6.1.6 に示す. 前方散乱と後方散乱信号から, 磁場配位を考慮して磁場に垂直な方向と並行な方向の電子温度を評価した. 大半径 193 と 207 mm では前方散乱と後方散乱信号が独立な計測とならないが, それより外側の計測点では有意な非対称性が観測された.

6.1.4 計測器開発

プラズマ内部磁場計測のための偏光計開発

LHW による効率的な電流駆動シナリオを実現するには数値計算が必要である. その妥当性検証と精度向上のため, プラズマ内部磁場分布を直接計測可能なマイクロ波偏光計を開発している. 2023 年度は偏光計のマイクロ波回路などの回路改善と性能評価を卓上試験で行った. その結果, 円形導波管を使用した場合, 時間経過 (数週間) と共に誤差が増大した. これは, 円形導波管ではほぼ縮退した 2 つのモードを重ね合わせて伝送しているため, 少しの導波管の変形によって偏光が変化してしまい, 無視できない位相誤差を作ってしまうためと考えられた. そこで, 伝播モードの縮退がない矩形導波管 2 本を用いて伝送路を組み直したところ, 位相誤差を 4° 以下に抑えることができた (図 6.1.7).

小型磁気プローブ開発

プラズマにより近い領域にプローブを侵入させ計測を行うため, 直径 5 mm 巻き数 300 の小型磁気プローブを作成した. 小型のコイルを用いるため, ノイズに対して求める信号の強度が小さく, 当初は LHW

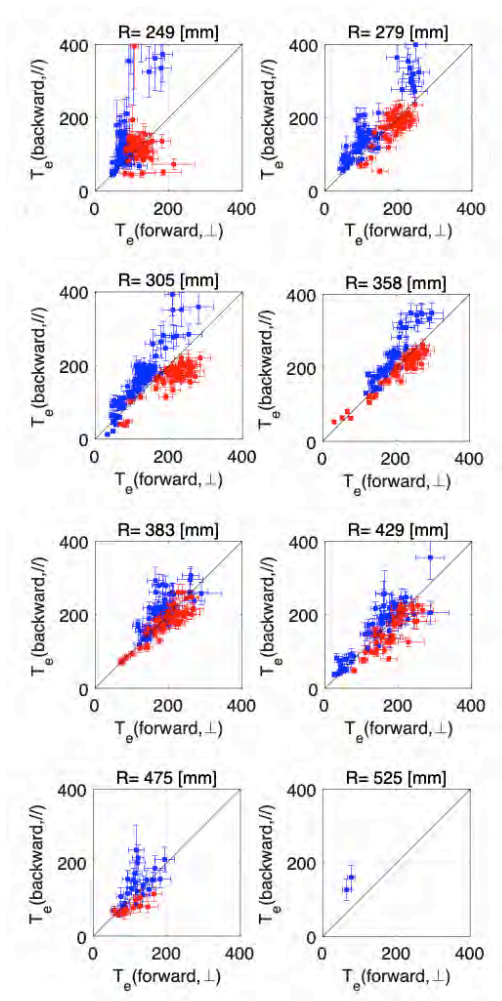


図 6.1.6: ダブルパストムソン散乱計測結果. 青: 順方向プラズマ電流, 赤: 逆方向プラズマ電流.

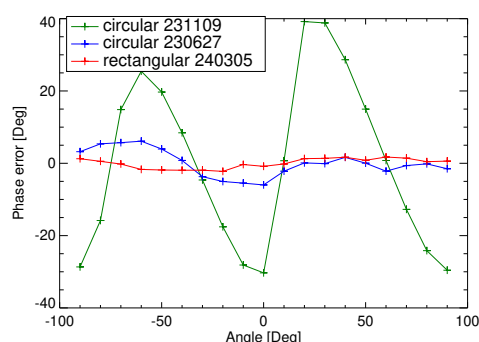


図 6.1.7: 計測された位相の系統誤差の偏光角依存性. 円形導波管 (circular) を用いた場合, 矩形導波管 (rectangular) を用いた場合に比べて位相誤差が大きくなりやすかった.

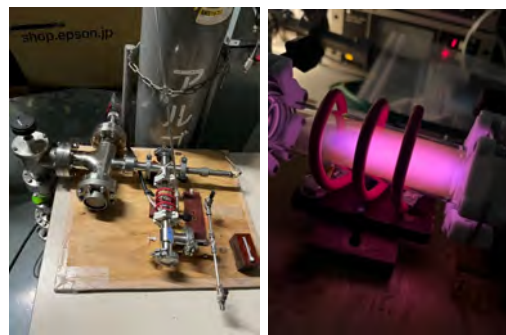


図 6.1.8: (左) プラズマ生成装置の概観. (右) プラズマが生成される様子.

によるノイズが大きく乗り, 磁気計測が困難であるという問題があった. 計測器に電磁波を遮蔽する対策を施し, 積分回路のパラメータを改良することでノイズの問題が改善された. TST-2 装置に取り付けて真空磁場を計測したところ, 誤差は 0.5 % 程であった.

6.1.5 高周波による誘導結合型プラズマ生成装置の開発

本研究室では特別実験の授業の一環として高周波 (10–20 MHz) を用いた誘導結合型プラズマ装置の開発を行っている. 2023 年度では図 6.1.8(左) の様な真空容器を組み立て, 空気とアルゴンガスを導入できる様にガス系統を整備した. 高周波発振機としてはアマチュア無線で使われるリニアアンプを導入することで数十 W の高周波をアンテナに印加することができ, 図 6.1.8(右) の様なプラズマ生成に成功した. また, ガス種やガス圧などによるプラズマの着火条件を調べることで, より効率よくプラズマを生成することができた. プラズマの計測としては分光計測を試み, カス種や高周波のパワーによる変化が見られた. 今後は高周波の周波数やアンテナ形状などの最適化とプローブを用いた詳細なプラズマ計測を行う予定である. 安定したプラズマの生成方法が確立すると, TST-2 に導入する計測器のテストや校正に活用できると期待される.

6.1.6 共同研究

JT-60SA における電子サイクロトロン波補助立ち上げ

磁場閉じ込め核融合炉の長時間運転には超伝導コイルにより磁場を作る必要があるが, 中心ソレノイドを超伝導化した場合, プラズマの生成に必要な周回電場が小さくなってしまうため, プラズマ立ち上げが難しくなる. そのため, 電子サイクロトロン波 (Electron Cyclotron Wave, ECW) による立ち上げ

補助が有効であるが、これに最適な磁場配位は明らかではない。そこで、JT-60SA の様々な磁場配位に対して ECW により生成される高速電子の閉じ込めを評価し、閉じ込め特性の良い磁場配位を明らかにした。

QUEST におけるトムソン散乱計測

2009 年度より九州大学の QUEST グループと共同研究を行っており、電子密度電子温度分布測定装置であるトムソン散乱システムを設置し、システムの性能向上を図りながら、種々のプラズマの測定を行っている。2023 年度は、空間測定点を増やすために、2 台のポリクロメーターの増設の準備、新たな ADC の試験を行うとともに、長時間放電での測定精度を確保するための自動アライメントシステムの構築を行った。以下、自動アライメントシステムについて記す。トムソン散乱の光学系は、特定のビーム位置に対して最適化されており、ビーム位置のずれは、信号強度の低下を引き起こす。一方、QUEST では、室温変化に呼応してビーム位置が移動することがわかっている。これまで、ビーム位置の測定、手動によるビーム位置の設定を行ってきたが、本年度は、この自動化を試みた。現在、一つのミラーを自動的に駆動することで制御することに成功し、さらに、もう一つのミラーでのビーム位置をも同時に制御するための開発を行っている。

<報文>

(原著論文)

- [1] A. Ejiri, Y. Lin, S. Jang, Y. Peng, K. Shinohara, T. Ido, K. Kono and Y. Nagashima, Plasma Fusion Res. **18**, 2402025 (2023).
- [2] N. Tsujii, I. Yamada, Y. Ko, A. Ejiri, K. Shinohara, O. Watanabe, S. Jang, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Lin, Y. Shirasawa, T. Hidano, Y. Tian and F. Adachi, Plasma Fusion Res. **18**, 1402051 (2023).
- [3] N. Yoneda, T. Shikama, F. Scotti, K. Hanada, H. Iguchi, H. Idei, T. Onchi, A. Ejiri, T. Ido, K. Kono, Y. Peng, Y. Osawa, G. Yatomi, A. Kidani, M. Kudo, R. Hiraka, K. Takeda, R.E. Bell, A. Maan, D.P. Boyle, R. Majeski, V.A. Soukhanovskii, M. Groth, A.G. McLean, R.S. Wilcox, C. Lasnier, K. Nakamura, Y. Nagashima, R. Ikezoe, M. Hasegawa, K. Kuroda, A. Higashijima, T. Nagata, S. Shimabukuro, I. Niiya, I. Sekiya and M. Hasuo, Nucl. Fusion **63**, 096004 (2023).
- [4] H. Kasahara, T. Seki, K. Saito, D. Moseev, N. Tsujii, G. Nomura and M. Kanda, Plasma Fusion Res. **18**, 2402065 (2023).
- [5] Y. Ko, N. Tsujii, A. Ejiri, O. Watanabe, S. Jang, K. Shinohara, K. Iwasaki, Y. Peng, Y. Lin, Y. Shirasawa, T. Hidano, F. Adachi and Y. Tian, Nucl. Fusion **63**, 126015 (2023).
- [6] K. Kuroda, R. Raman, T. Onchi, M. Hasegawa, K. Hanada, M. Ono, B.A. Nelson, J. Rogers, R. Ikezoe, H. Idei, T. Ido, M. Nagata, O. Mitarai, N. Nishino, Y. Otsuka, Y. Zhang, K. Kono, S. Kawasaki, T. Nagata, A. Higashijima, S. Shimabukuro, I. Niiya, I. Sekiya, K. Nakamura, Y. Takase, A. Ejiri and S. Murakami, Nucl. Fusion **64**, 014002 (2024).
- [7] K. Iwasaki, A. Ejiri, N. Tsujii, K. Shinohara, O. Watanabe, S. Jang, Y. Peng, Y. Lin, F. Adachi and Y. Tian, Plasma Fusion Res. **18**, 1402089 (2023).
- [8] Y. Tian, A. Ejiri, N. Tsujii, Y. Lin, K. Shinohara, S. Jang, Y. Peng, K. Iwasaki and F. Adachi, Plasma Fusion Res. **19**, 1402010 (2024).
- [9] T. Komiyama, T. Shikama, K. Hanada, T. Ido, T. Onchi, K. Kono, A. Ejiri, M. Hasegawa, S. Inoue, M. Hasuo, H. Idei, Q. Yue, K. Kuroda, A. Higashijima and P. Prapan, Plasma Phys. Control. Fusion **66**, 045018 (2024).

(国内雑誌)

- [10] 江尻晶, 辻井直人, 篠原孝司, 「TST-2 装置の概要, 国内大学のトカマク実験装置の概観」 NIFS-MEMO-93 (Sep. 1, 2023, 7 Pages).

(学位論文)

- [11] 岩崎光太郎: “Study of ion heating mechanism in lower hybrid wave sustained TST-2 plasmas”
- [12] Y. Tian: “Spectroscopic Study of Molybdenum Impurity Generation in Lower Hybrid Wave Sustained Plasma”
- [13] 安立史弥: “Full Wave Simulations of Lower Hybrid Waves with the Finite Element Method using the Integral Form Dielectric Tensor”

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [14] K. Kono, T. Ido, A. Ejiri, K. Hanada, M. Hasegawa, Y. Peng, H. Idei, R. Ikezoe, T. Onchi, K. Kuroda, T. Kinoshita, Y. Nagashima, and S. Jang, 20th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics, Sep. 10–14, 2023, Kyoto Garden Palace Hotel, Kyoto, Japan.
- [15] Y. Peng, A. Ejiri, K. Shinohara, N. Tsujii, S. Jang, O. Watanabe, K. Iwasaki, Y. Lin, Z. Jiang, Y. Tian, F. Adachi, T. Ido, K. Kono, and Y. Nagashima, 20th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics, Sep. 10–14, 2023, Kyoto Garden Palace Hotel, Kyoto, Japan.
- [16] N. Tsujii, A. Ejiri, Y. Ko, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Lin, K. Shinohara, O. Watanabe, S. Jang, T. Hidano, Y. Shirasawa, Y. Tian, F. Adachi and C.P. Moeller, 29th IAEA Fusion Energy Conference, London, UK, October 16–21, 2023.

- [17] A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, O. Watanabe, K. Shinohara, 29th IAEA Fusion Energy Conference, London, UK, October 16–21, 2023.
- [18] T. Nasu, T. Tokuzawa, M. Nakata, K. Ida, T. Kobayashi, S. Inagaki, Y. Yoshimura, M. Nishimura, K. Tanaka, R. Yanai, M. Yoshinuma, K.Y. Watanabe, I. Yamada, A. Ejiri, 29th Fusion Energy Conference, London, UK, October 16–21, 2023.
- [19] K. Hanada, M. Hasegawa, T. Onchi, N. Yoshida, Y. Oya, M. Oya, T. Shikama, I. Takagi, H. Idei, T. Ido, R. Ikezoe, Y. Nagashima, K. Kuroda, K. Kono, S. Kawasaki, T. Nagata, A. Higashijima, S. Shimabukuro, I. Niiya, I. Sekiya, K. Nakamura, Y. Takase, A. Ejiri, S. Murakami, X. Gao, H.Q. Liu, J. Qian, Y.X. Jie, R. Raman and M. Ono, 29th Fusion Energy Conference, London, UK, October 16–21, 2023.
- [20] R. Ikezoe, H. Idei, T. Onchi, K. Kuroda, M. Hasegawa, Y. Nagashima, K. Hanada, T. Ido, F. Zennifa, T. Yamaguchi, R. Miyata, Y. Wang, A. Ejiri, S. Murakami, 29th Fusion Energy Conference, London, UK, October 16–21, 2023.
- [21] K. Kuroda, R. Raman, T. Onchi, M. Hasegawa, K. Hanada, M. Ono, B.A. Nelson, J. Rogers, R. Ikezoe, H. Idei, T. Ido, M. Nagata, O. Mitarai, N. Nishino, Y. Otsuka, Y. Zhang, K. Kono, S. Kawasaki, T. Nagata, A. Higashijima, S. Shimabukuro, I. Niiya, I. Sekiya, K. Nakamura, Y. Takase, A. Ejiri, S. Murakami, 29th Fusion Energy Conference, London, UK, October 16–21, 2023.
- [22] Y. Lin and the TST-2 team, Korea-Japan workshop on Physics and Technology of Heating and Current Drive, Feb. 22–23, 2024, Hanyang University.
- [23] F. Adachi and the TST-2 team, Korea-Japan workshop on physics and Technology of Heating and Current Drive, Feb. 22–23, 2024, Hanyang University.
- [24] N. Tsujii and the TST-2 team, US-Japan RF Workshop, General Atomics, USA, Feb. 20–22, 2024.
- 招待講演
- [25] N. Tsujii, A. Ejiri, Y. Ko, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Lin, K. Shinohara, O. Watanabe, S. Jang, T. Hidano, Y. Shirasawa, Y. Tian, F. Adachi and C.P. Moeller, 17th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS DPP 2023), Nov. 16, 2023.
- [26] A. Ejiri, Workshop on the technical strategy of FIRST in Taiwan, Jan 16–17, 2024, National Atomic Research Institute, Taiwan.
- [27] A. Ejiri and the TST-2 team, Workshop on the technical strategy of FIRST in Taiwan, Jan 16–17, 2024, National Atomic Research Institute, Taiwan.
- [28] A. Ejiri and the TST-2 team, 12th QUEST Workshop “RF startup and sustainment in Spherical Tokamak”, Feb. 1–2, 2024.
- (国内会議)
- 一般講演
- [29] 四竈泰一, 小宮山拓海, 花田和明, 井戸毅, 恩地拓己, 河野香, 江尻晶, 長谷川真, 井上怜, 蓮尾昌裕, 出射浩, 岳其霖, 黒田賢剛, 東島亜紀, 日本物理学会 2023 年年会, 東北大学, 2023 年 9 月 16–19 日.
- [30] 江尻晶, 彭翊, ジャンソウォン, 蔣正男, 辻井直人, 篠原孝司, 日本物理学会 2023 年年会, 東北大学, 2023 年 9 月 16–19 日.
- [31] 田一鳴, 江尻晶, 辻井直人, 篠原孝司, ジャンソウォン, 彭翊, 岩崎光太郎, 林彥廷, 蔣正男, 安立史弥, 王圣予, 江陽光, 熊一錦, 吉田勝, 第 40 回プラズマ・核融合学会年会, 盛岡, 2023 年 11 月 27–30 日.
- [32] 安立史弥, 辻井直人, 江尻晶, 篠原孝司, ジャンソウォン, 彭翊, 岩崎光太郎, 林彥廷, 蔣正男, 田一鳴, 王圣予, 江陽光, 熊一錦, 吉田勝, 第 40 回プラズマ・核融合学会年会, 盛岡, 2023 年 11 月 27–30 日.
- [33] 篠原孝司, 谷啓二, 林伸彦, 隅田脩平, 江尻晶, 辻井直人, 西村征也, ビヤワーゲアンドレアアス, 第 40 回プラズマ・核融合学会年会, 盛岡, 2023 年 11 月 27–30 日.
- [34] 林彥廷, 江尻晶, 辻井直人, 篠原孝司, ジャンソウォン, 彭翊, 岩崎光太郎, 蔣正男, 安立史弥, 田一鳴, 王圣予, 江陽光, 熊一錦, 吉田勝, 第 40 回プラズマ・核融合学会年会, 盛岡, 2023 年 11 月 27–30 日.
- [35] 黒田賢剛, Roger RAMAN, 長谷川真, 恩地拓己, 花田和明, 小野雅之, John ROGERS, 池添竜也, 出射浩, 井戸毅, 御手洗修, 永田正義, 西野信博, 川崎昌二, 永田貴大, 東島亜紀, 島袋瞬, 新谷一朗, 関谷泉, 大塚裕也, 河野香, 中村一男, 江尻晶, 村上定義, 第 40 回プラズマ・核融合学会年会, 盛岡, 2023 年 11 月 27–30 日.
- [36] 恩地拓己, 出射浩, 花田和明, 渡邊理, 大塚裕也, 小出悠二, 宮田陸矢, 山口貴大, 河野香, 黒田賢剛, 中村一男, 長谷川真, 池添竜也, 永島芳彦, 井戸毅, 福山淳, 小菅佑輔, 村上定義, 江尻晶, 第 40 回プラズマ・核融合学会年会, 盛岡, 2023 年 11 月 27–30 日.
- [37] 江尻晶, 核融合エネルギーフォーラムプラズマ物理クラスター計測サブクラスター令和 5 年度第 1 回会合, 核融合科学研究所, 2024 年 3 月 6–7 日.
- [38] 江尻晶, 辻井直人, 篠原孝司, ジャンソウォン, 彭翊, 岩崎光太郎, 林彥廷, 蔣正男, 田一鳴, 安立史弥, 江陽光, 王圣予, 吉田勝, 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン, 2023 年 3 月 18–21 日.
- (セミナー)
- [39] 江尻晶: “核融合エネルギーの特徴とその開発研究”, 市川東ロータリークラブ例会卓話, 市川商工会議所, 2023 年 4 月 18 日.
- [40] 辻井直人: “核融合プラズマの高周波加熱・電流駆動”, 第 1 回プラズマ・核融合若手夏の学校, 沖縄県名護市, 2023 年 8 月 29 日–9 月 1 日.

6.2 酒井広文 研究室

本研究室では、(1) 高強度レーザー電場を用いた分子操作、(2) 高次の非線形光学過程(多光子イオン化や高次高調波発生など)に代表される超短パルス高強度レーザー光と原子分子等との相互作用に関する研究、(3) アト秒領域の現象の観測とその解明、(4) 整形された超短パルスレーザー光による原子分子中の量子過程制御を中心に活発な研究活動を展開している。

始めに、分子の配列と配向の意味を定義する。分子の頭と尻尾を区別せずに分子軸や分子面を揃えることを配列 (alignment) と呼び、頭と尻尾を区別して揃えることを配向 (orientation) と呼ぶ。英語では混乱はないが、日本語では歴史的経緯からしばしば逆の訳語が使用されて来たので注意する必要がある。また、実験室座標系で分子の向きを規定する三つのオイラー角のうち、一つを制御することを1次元制御と呼び、三つとも制御することを3次元制御と呼ぶ。

以下に、研究内容の経緯とともに、今年度の研究成果の概要を述べる。特に「6.2.1 レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展：従来の経緯」は、昨年度と重複する部分があるが、研究の進展を概観するために必要な内容であるので、ご理解いただきたい。

6.2.1 レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展：従来の経緯

本研究室では、レーザー光を用いた気体分子の配向制御技術の開発と配列あるいは配向した分子試料を用いた応用実験を進めている。分子の向きが揃った試料を用いることが出来れば、従来、空間平均を取って議論しなければならなかった多くの実験を格段に明瞭な形で行うことが出来る。そればかりでなく、化学反応における配置効果を直接的に調べることができるのを始めとし、物理現象における分子軸や分子面とレーザー光の偏光方向との相関や分子軌道の対称性や非対称性の効果を直接調べることができるなど、全く新しい実験手法を提供できる。実際、配列した分子試料の有効性は、 I_2 分子中の多光子イオン化過程を、時間依存偏光パルスを用いて最適制御することに成功したり (T. Suzuki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 133005 (2004))、配列した分子中からの高次高調波発生実験において、電子のド・ブロイ波の打ち消しあいの干渉効果を観測することに成功したり (T. Kanai *et al.*, Nature (London) **435**, 470 (2005)) するなどの、本研究室の成果でも実証されている。

分子の配向制御については、始めに静電場とレーザー電場の併用により、1次元のおよび3次元の分子の配向が可能であることの原理実証実験に成功した。これらの実験は、分子の回転周期に比べてレーザー光のパルス幅が十分長い、いわゆる断熱領域で行われたものである。この場合、分子の配向度は、レーザー強度に追従して高くなり、レーザー強度が最大のときに配向度も最大となる。一方、光電子の観測

や高精度の分光実験では、高強度レーザー電場が存在しない状況で試料分子の配向を実現することが望まれる。本研究室では、静電場とレーザー電場の併用による手法が断熱領域で有効なことに着目し、分子の回転周期 T_{rot} に比べて立ち上がりのゆっくりしたパルスをピーク強度付近で急峻に遮断することにより、断熱領域での配向度と同等の配向度を高強度レーザー電場が存在しない状況下で実現する全く新しい手法を提案した (Y. Sugawara *et al.*, Phys. Rev. A **77**, 031403(R) (2008))。この手法を実現すべく、ピーク強度付近で急峻に遮断されるパルスをプラズマシャッターと呼ばれる手法を用いて整形する技術を開発し、レーザー電場の存在しない条件下で分子配向を実現することに初めて成功した (A. Goban *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 013001 (2008))。

一方、本研究室では先に、分子の回転周期よりも十分長いパルス幅をもつ高強度非共鳴2波長レーザー電場のみを用いて断熱的に分子配向を実現する手法を提案していた (T. Kanai and H. Sakai, J. Chem. Phys. **115**, 5492 (2001))。この手法では、使用するレーザーの周波数がパルス幅の逆数よりも十分大きな場合には、分子の永久双極子モーメントとレーザー電場との相互作用はパルス幅にわたって平均するとゼロとなる。したがって、分子の配向に寄与するのは分子の超分極率の異方性とレーザー電場の3乗の積に比例する相互作用、すなわち、それによって形成されるポテンシャルの非対称性である点に注意する必要がある。

この手法に基づいて、2波長レーザー電場を用いてOCS分子を配向制御することにも初めて成功した (K. Oda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 213901 (2010))。さらに、 C_6H_5I 分子を用い、本手法の汎用性の実証も行った。一方、Even-Lavie valveを用いても、OCSや C_6H_5I 分子の配向度は、0.01のオーダーであり、劇的な配向度の増大を図ることは困難であることが明らかになった。この困難は、回転量子状態が Boltzmann 分布している thermal ensemble では、いわゆる right way に向く状態と wrong way に向く状態が混在していることに起因している。本研究室では、配向した分子試料を用いた「分子内電子のアト秒立体ダイナミクス (attosecond electronic stereodynamics in molecules)」に関する研究の推進を目指しており、配向度の高い分子試料の生成が不可欠である。そこで、初期回転量子状態を選別した試料に対し、静電場とレーザー電場を併用する手法や非共鳴2波長レーザー電場を用いる手法により高い配向度の実現を目指すこととした。そして、主として対称コマ分子の状態選別に適した六極集束器 (hexapole focuser) と主として非対称コマ分子の状態選別に適した分子偏向器 (molecular deflector) を組み込んだ実験装置を立ち上げた。その後、回転量子状態を選別した試料を用い、静電場とレーザー電場を併用する手法や2波長レーザー電場のみを用いる全光学的な手法により、分子配向度の向上を実現した上で、配向した分子試料を用いた「分子内電子のアト秒立体ダイナミクス」研究のさらなる推進を目指している。

まず、初期回転量子状態を選別した非対称コマ分子 (C_6H_5I) を試料とし、静電場とレーザー電場を併用する手法を用いて世界最高水準の高い配向度を達

成することに成功した。さらに、プラズマシャッター技術を導入し、初期回転量子状態を選別した分子のレーザー電場のない条件下での1次元の配向制御に世界で初めて成功した(J. H. Mun *et al.*, Phys. Rev. A **89**, 051402(R) (2014))。さらに、静電場と楕円偏光したレーザー電場の併用により、レーザー電場の遮断直後にレーザー電場の存在しない条件下での3次元的な配向制御の実現に世界で初めて成功した(D. Takei *et al.*, Phys. Rev. A **94**, 013401 (2016))。この成果は、高い配向度、レーザー電場の存在しない条件下での配向制御、及び、非対称コマ分子の向きの完全な制御である3次元的な配向制御の3条件を満たし、静電場とレーザー電場を併用する手法の「完成形」の実現を意味している。

その後、上述した非共鳴2波長レーザー電場のみを用いる全光学的な配向制御手法にプラズマシャッター技術を適用することにより、静電場も存在しない完全にフィールドフリーな条件下での配向制御技術の開発を進めている。2波長レーザー電場を用いた全光学的な配向制御の実験は、静電場とレーザー電場を併用する手法と比べると、光学系の構成は複雑となる。2波長レーザー電場としては、ナノ秒Nd:YAGレーザーの基本波(波長 $\lambda = 1064$ nm)とその第2高調波($\lambda = 532$ nm)を使用する。注意深く予備実験を進めた結果、ナノ秒Nd:YAGレーザーの基本波とその第2高調波を利用した分子配向制御においては、基本波のパルス幅よりも第2高調波のパルス幅の方が短いため、基本波が先に立ち上がり始めることが配向度の効率的な向上を妨げている原因の一つであることを明らかにした。これは、基本波パルスのみが先に立ち上がると対称な2重井戸ポテンシャルが形成されて分子配列のみが進行し、遅れて第2高調波パルスが立ち上がり非対称ポテンシャルの形成が始まっても断熱的に配向を制御するメリットを活かすことができないためである。

この困難を克服するために、干渉計型の光学遅延路を設置し、基本波パルスに約1.8 nsの遅延を導入することにより2波長間の立ち上がりのタイミングを合わせた。データ取得のための工夫をして解析をした結果、配向度 $|\langle \cos \theta \rangle| \sim 0.34$ を達成することに成功した。この配向度は、プローブ光による試料分子の多価イオン生成過程における配向依存性の効果を避けるため、プローブ光の偏光を検出器面に垂直にして観測した配向度として世界で最も高い値である。上記の配向度 $|\langle \cos \theta \rangle| \sim 0.34$ の妥当性は、 χ^2 検定と最小二乗法により慎重に検証した。この成果は、The Journal of Chemical PhysicsのCommunication (Md. Maruf Hossain, Xiang Zhang, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Stronger orientation of state-selected OCS molecules with relative-delay-adjusted nanosecond two-color laser pulses,” J. Chem. Phys. **156**, 041101 (7 pages) (2022))に発表した。この論文は、2022年中にThe Journal of Chemical Physicsに掲載されたすべての論文の中で、most-read articlesの一つにランクされた(Communicationsの4番目にランクされた)。:
<https://aip-info.org/1XPS-86LK8-B78EBE51BE49626E8FIPSCDA24847A29AE2CA2/cr.aspx>

6.2.2 レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展：今年度の成果

実験

非共鳴2波長レーザー電場のみを用いる全光学的分子配向制御法についても次の3条件を満たす「完成形」の実現を目指している。(1) 高い配向度の達成。(2) 気体分子の向きの完全な制御である3次元の配向制御。(3) フィールドフリーな条件下での配向制御。全光学的配向制御では、静電場も存在しない完全にフィールドフリーな条件下での配向制御が可能となる。

この目標の達成を長年にわたり阻んできたボトルネックは、2波長間の相対位相を乱さないプラズマシャッター技術の開発であった。今年度、このボトルネックが解消され、フィールドフリーな条件下での配向制御に成功する大きな進展があった。従来のプラズマシャッターには、ルビー結晶を貼り合わせて作製したノズルを使用し、エチレングリコールに圧力をかけて生成されるジェットシートを使用していた。この場合、エチレングリコールの面精度はルビー結晶の面精度を反映し、厚みも150 μm 程度であった。今年度からステンレス製ノズル(Metaheuristic JAPAN製)に変更した。このノズルは文献A. Watanabe *et al.*, Opt. Commun. **71**, 301 (1981)に基づくもので、先端の開口部の内側でエチレングリコールの流速ベクトルをランダムにした後、開口部でそれらが衝突することにより、光学的面精度をもつジェットシートが形成される。開口部を鉛直下向きに配置すれば、エチレングリコールの粘性と重力で決まる形状のジェットシートが形成される。また、膜厚は最大でも20 μm 程度(カタログ値)なので、プラズマ生成時に発生するエチレングリコール由来のデブリの量は、レーザー光の集光断面積が同じであれば、ルビー製結晶を使用していたときよりも1桁程度少ないと期待できる。実際、このステンレス製のノズルに変更することにより、前年度まで計画していたノズル部分を真空チェンバーに収納してデブリを強制的に排気する必要がなくなり、2波長間の相対位相の揺らぎの主原因を実験室の温度揺らぎに限定することができた。この場合、揺らぎの時間変化は比較的ゆっくりなので、2波長間の相対位相の観測値をフィードバック制御の指標とし、Nd:YAGレーザー光の光路中に設置したガラス板の角度を調整することにより、10時間以上にわたり標準偏差15度以内の安定化に成功した。このプラズマシャッターで急峻に遮断される2波長パルスを用いることにより、パルスの遮断後と試料分子OCSの回転周期後(約82 ps後)にフィールドフリーな条件下での配向制御に成功した。

したがって、「完成形」の実現に向けた今後の課題は上記の(1) 高い配向度の達成と(2) 気体分子の向きの完全な制御である3次元の配向制御となった。その方策について簡単に説明する。(1) 高い配向度の達成では、配向度 $|\langle \cos \theta \rangle| \geq 0.3$ の達成を目標としている。上記の実験では試料分子OCSは、回転量子状態を選別していないthermal ensembleであったが、

自作の分子偏向器を用いて回転量子状態を選別した試料(分子の過半数が回転基底状態にある)を用いることにより配向度の向上を図ることができる。さらに、配向のダイナミクスが非断熱的な場合に配向度を向上させるための手法として、2波長パルスの強度比の最適化(J. H. Mun and H. Sakai, Phys. Rev. A **98**, 013404 (2018))、及び、直線偏光の基本波と楕円偏光の第2高調波の組み合わせ(Md. M. Hossain and H. Sakai, J. Chem. Phys. **153**, 104102 (2020))で配向度を向上できると期待される。(2)の気体分子の向きの完全な制御である3次元的配向制御は、直線偏光の基本波と楕円偏光の第2高調波の組み合わせを利用すれば、分子面が楕円偏光面に揃うので、自然な形で実現できると期待される。即ち、「完成形」の実現は時間の問題となった。

数値計算

—気体分子の1次元配列と配向のダイナミクスにおける断熱近似の成立条件—

通常ランダムな向きを向いている気体分子の向きを揃え、配列・配向した分子アンサンブルを用意することができれば、化学反応における配置効果や分子と超短パルスレーザー光との相互作用で発現する様々な物理現象の配列・配向依存性を直接的に明らかにすることができる。このため、高強度レーザー電場を用いて配列・配向分子アンサンブルを生成する技術は、上記の研究の基盤技術として最近四半世紀にわたり急速に発展している研究分野である。

特に分子の頭と尻尾を区別して向きを揃える配向制御については、主要な技術として弱い静電場と高強度レーザー電場を併用する手法と非共鳴2波長レーザー電場のみを用いる全光学的な手法が知られている。どちらも配向のダイナミクスが断熱的であるときに最も高い配向度(オーダーパラメータ)が得られる。本研究では、二つの手法を包括的に扱い、最終的にどれだけのパルス幅のレーザー光を使用すれば配向のダイナミクスが断熱的になると期待できるかを数値計算で明らかにした。なお、この研究では、Sセメスターの特別実験Iで配属された前田陵汰さんが中心的な貢献をした。

具体的にはOCS分子を試料とし、今回の研究では1次元的な配列・配向制御に着目して研究を進めた。また、レーザー光の強度などについては典型的な実験条件を仮定して調べた。その結果、一般に配列のダイナミクスよりも配向のダイナミクスの方が断熱性を保証するパルス幅が長いこと、さらに、静電場とレーザー電場を併用する手法よりも非共鳴2波長レーザー電場のみを用いる全光学的な配向制御手法の方が断熱性を保証するパルス幅が長いことを明らかにした。即ち、配列・配向の代表的な2手法について、そのダイナミクスの断熱性を保証するパルス幅の違いについて、包括的な知見が得られた。さらに、系の時間発展を断熱的、非断熱的にそれぞれ計算し、それらの状態ケットの内積の2乗を断熱近似の成立度合いの指標とした。また、一般的に断熱近

似の成立が保証される条件

$$\hbar \left(\frac{\langle m | \dot{H} | n \rangle}{|E_m - E_n|^2} \right) \ll 1$$

の左辺に対応する量 η を計算し、上記の内積の2乗の値との相関を調べた。これにより、配向のダイナミクスが断熱的であることを保証するレーザーのパルス幅について、TDSEとTISEの一致を逐一確認することなしに見積もることを可能とする手法を提示した。本研究では、数値計算に要する時間的な制約から、1次元的な配列・配向制御のダイナミクスに限定してその断熱性を吟味した。今後は、この研究を分子の向きの完全な制御である3次元的な配列・配向制御に拡張して、配列・配向のダイナミクスの断熱性について、その全体像を吟味することが目標となる。

—直線偏光した基本波パルスと楕円偏光した第2高調波パルスの組み合わせによる3次元的配向制御の一般化—

これまでの研究で、パルス幅10 ns程度のNd:YAGレーザーパルスを用いても配向のダイナミクスが非断熱的であることが明らかになった。したがって、単に基本波と第2高調波の強度を上げるだけでは高い配向度を達成することはできない。この様な状況でも配向度を上げることができる手法として、最近、直線偏光した基本波パルスと楕円偏光した第2高調波パルスの組み合わせが、配向度の向上に有効な「一般化された組み合わせ」であることを明らかにした(Md M. Hossain and H. Sakai, J. Chem. Phys. **153**, 104102 (2020))。第2高調波パルスを楕円偏光とすることにより、相互作用ポテンシャルが、極角 θ に加え、方位角 ϕ にも依存する3次元的な形状となり、非対称ポテンシャル間の障壁が方位角 ϕ に沿って低い領域が生成され、配向状態へのトンネル遷移の確率が上昇することがポイントであり、利用可能な第2高調波パルスの強度に応じて、配向度の向上を期待することができる点が大きな特長である。楕円偏光した第2高調波パルスを用いていることから、自然な形で3次元的配向制御に拡張できる。

昨年度、直線偏光した基本波パルスと楕円偏光した第2高調波パルスの組み合わせで3次元的な配向制御のダイナミクスを調べるため、数値計算コードの開発を行った。具体的には、相互作用ハミルトニアンの導出、必要な行列要素の計算を行った上で、高次のCrank-Nicolson法を用いて数値計算コードを開発した。開発した計算コードを利用して、非対称コマ分子 C_6H_5I を試料とし、3次元的な配向制御のダイナミクスを数値的に調べ、以下の知見を得た。(1) 3次元配向のダイナミクスは、立ち上がりが比較的長いパルス、具体的には基本波の半値半幅(HWHM) $\tau_\omega = 12$ ns、第2高調波の半値半幅(HWHM) $\tau_{2\omega} = 9$ nsを用いた場合でも非断熱的であることが確認できた。(2) 本研究室が提案した直線偏光の基本波パルスと楕円偏光の第2高調波パルスを用いる手法は、2波長の直線偏光パルスを交差させる手法よ

りも高いオーダーパラメータを達成することができ、その優位性は配向のダイナミクスが非断熱的であるときにより顕著となる。(3) 配向のダイナミクスとは対照的に、配列のダイナミクスと第2高調波パルスの楕円偏光面への配列のダイナミクスは、基本波の半値半幅 (HWHM) $\tau_{\omega} = 12$ ns、第2高調波の半値半幅 (HWHM) $\tau_{2\omega} = 9$ ns に対して断熱的であることが明らかになった。本研究の成果を以下の論文に発表した: Md. Maruf Hossain, Nanse Esaki, and Hirofumi Sakai, “All-optical three-dimensional orientation of asymmetric top molecules with combined linearly and elliptically polarized two-color laser fields,” *Phys. Rev. A* **108**, 063109 (2023).

上記の研究で対象とした試料分子 C_6H_5I は、点群 C_{2v} に属し、4つの対称操作をもつことから、非零の行列要素をかなり減らすことができ、計算コストを下げる事ができた。しかしながら、今後より一般的な分子を試料とするため、特に鏡像対称性をもつ分子の enantioselective orientation の探究を進め、実験との比較検討を行うためには、特別な対称性をもたない一般的な分子を対象とすべく数値計算についても研究を進展させる必要がある。そこで、今年度は、特別な対称性をもたない一般的な分子を対象とし、非共鳴2波長レーザー電場のみを用いる全光学的な手法で3次元的な分子配向のダイナミクスの研究に必要な時間依存 Schrödinger 方程式を数値的に解く計算コードの開発を行った。2波長パルスとしては、直線偏光の基本波と楕円偏光の第2高調波の組み合わせ、及び、直線偏光の2波長の偏光方向を交差させた場合を扱った。

この研究では、Aセメスターの特別実験IIで配属された猪俣和樹さんが中心的な貢献をした。具体的には、相互作用ハミルトニアンへの導出、計算に必要な行列要素の Wigner の D 行列での展開、さらに、それに基づく数値計算コードの実装まで行うことができた。特に猪俣さんが貢献した点は以下の通りである。

(1) 相互作用ハミルトニアンへの Wigner の D 行列による展開を高速に自動計算する方法を提案し、実行した。これにより、従来は一般に2名の研究者が独立に手計算した結果を突き合わせて double-check を行うことにより計算ミスを回避していた作業を実質的に一人で自動計算された結果と答え合わせをすれば済むことになった。

(2) 数値計算に CPU を用いる場合と GPU を用いる場合を比較し、一般的な分子を試料とする場合でも扱う行列が疎行列の場合には、GPU のメリットを活かしき、CPU の方が、計算速度が速いことを明らかにした。

(3) 最終的に数値計算コードの実装まで実現した。試料分子のパラメータ、2波長レーザー光の強度とパルス幅を設定することにより、汎用的に使用することができる極めて有用なものと言える。

今後は、本研究の成果を踏まえ、上述した鏡像対称性をもつ分子の enantioselective orientation の数値計算コードの開発を進める予定である。

6.2.3 その他

ここで報告した研究成果は、酒井広文研究室のメンバーと客員共同研究員として受け入れた Md. Maruf Hossain 氏 (日本アイ・ビー・エム株式会社)、Sセメスターの特別実験Iで配属された本庄亮雅君と前田陵汰君、及び、Aセメスターの特別実験IIで配属された猪俣和樹君と政岡凜太郎君の活躍によるものである。なお、項目6.2.2の実験で報告したナノ秒2波長レーザーパルス用のプラズマシャッター技術の開発については、科学研究費補助金、挑戦的研究(萌芽)、研究課題「マクロな回転対称性をもつ分子アンサンブルの生成技術の開拓」(課題番号: 22K19005、研究代表者: 酒井広文)の支援を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

<受賞>

- [1] 酒井広文、令和5年度科学技術分野の文部科学大臣表彰、科学技術賞(研究部門)、「高強度レーザー電場を用いた気体分子の配向制御技術の研究」、2023年4月19日。
- [2] 酒井広文、一般社団法人レーザー学会より、フェローの称号を授与された。2023年5月31日。
- [3] 原直樹、国際会議第38回化学反応討論会でベストポスター賞を受賞。2023年6月9日。
- [4] 峰本紳一郎、英国 IOP の Trusted Reviewer に認定された。

<原著論文>

- [5] Md. Maruf Hossain, Nanse Esaki, and Hirofumi Sakai, “All-optical three-dimensional orientation of asymmetric-top molecules with combined linearly and elliptically polarized two-color laser fields,” *Phys. Rev. A* **108**, 063109 (10 pages) (2023).
- [6] Naoki Hara and Masaya Nakagawa, “Metastable ferromagnetic clusters in dissipative many-body systems of polar molecules,” *Phys. Rev. A* **108**, 013306 (12 pages) (2023).

<学位論文>

- [7] Naoki Hara, “Creation of a molecular ensemble with $C_{\infty v}$ -symmetric rotational states in a field-free condition,” Master’s thesis, March 2024.

<国際会議>

(一般講演)

- [8] Naoki Hara, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Development of a plasma shutter technique applicable to intense nanosecond two-color laser pulses,” presented at the 38th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Nishijin Plaza, Kyushu University, Fukuoka, June 8th, 2023.
- [9] Shinichirou Minemoto, Naoki Hara, and Hirofumi Sakai, “All-optical field-free molecular orientation,” to be presented at the 39th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Shizuoka City Culture Hall, Shizuoka, June 2024.

<学会発表>

(一般講演)

- [10] 前田陵汰、ホサイン マルフ、酒井広文、「気体分子の1次元配列と配向のダイナミクスにおける断熱近似の成立条件」、レーザー学会創立50周年記念学術講演会第44回年次大会、日本科学未来館、2024年1月17日(水)。
- [11] 峰本紳一郎、原直樹、本庄亮雅、酒井広文、「全光学的な手法を用いた電場フリーな条件下での分子配向制御の実現に向けて」、レーザー学会創立50周年記念学術講演会第44回年次大会、日本科学未来館、2024年1月17日(水)。
- [12] 原直樹、峰本紳一郎、酒井広文、「ナノ秒2色レーザーパルスにより配向制御された分子を外場の無い空間に用意する技術の開発」、第71回応用物理学会春季学術講演会、東京都市大学世田谷キャンパス、2024年3月22日(金)。

(その他)

- [13] 酒井広文、「レーザー研究の泰斗 霜田光一名誉教授のご逝去を悼む」、理学部ニュース、2023年7月号、p. 13 (2023)。

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。2016年2月には米国のLIGOによって、重力波信号の初観測が報告され、「重力波天文学」が幕をあけた。国内でも大型低温重力波検出器KAGRAの観測が開始された。それに加え、将来計画である宇宙空間重力波アンテナの実現へ向けた検討や基礎開発も行われている。実験室内の基礎研究としては、独自の方式のねじれ型重力波検出器TOBAの開発、さらには重力波研究で用いられる精密計測技術を用いた基礎物理研究として、ダークマター探査実験、オプトメカニクスを用いた巨視的な量子現象の測定実験などを進めている。

6.3.1 大型重力波望遠鏡 KAGRA

2015年のAdvanced LIGOによる重力波の初観測以降、重力波望遠鏡の感度は着実に向上し、観測ネットワークも拡大している。LIGO, Virgo, KAGRAの各望遠鏡はさらなる高感度化を目指した調整やアップグレードを行い、2024年5月にはO4と呼ばれる最新の長期共同観測運転を開始した。KAGRAはO4初期の一ヶ月間、連星中性子星の観測可能レンジ1.3 Mpcの感度で観測運転を行い、その後さらなる高感度化に向けた調整に入っている。2024年末のO4終盤には10 Mpc程度の感度で再び観測運転に参加する予定である。アメリカ、イタリア、日本の三極

での共同観測が実現されれば、到来方向決定精度が各段に上がる。また、一般相対性理論が予言するテンソルモードとは異なる偏極モードが初めて明確に分離できるようになり、一般相対性理論に代わる重力理論の検証が可能となると期待されている。さらに、KAGRAは地下建設と鏡の低温化という次世代重力波望遠鏡に必須と考えられている技術を取り入れたレーザー干渉計であり、次世代へ向けても重要な役割を担っている。

KAGRA の現状

KAGRA計画は2010年にスタートした、岐阜県神岡の地下に大型低温重力波望遠鏡を建設する計画である。2024年5月には1.3 Mpcの連星中性子星観測可能レンジを実現し、LIGOとの共同観測運転を実施した。観測運転の休止以降、O4終盤での観測網への再参加に向けて鏡の懸架系や干渉計の調整が行われている。当研究室ではKAGRAの根幹部分となる主干渉計の光学系や制御系の設計開発、原理雑音の1つである熱雑音の研究、KAGRAの将来計画の検討などを行っている。本年度は特に、常温および低温下において、KAGRAのサファイア製の試験質量および懸架ファイバーの熱雑音の評価、およびO4初期の観測運転のKAGRAの感度を制限していた雑音評価を行った。これらに基づき、KAGRAの熱雑音低減、およびO4終盤で10 Mpcの感度を実現するための今後の戦略構築が構築された。特に雑音評価については、感度を制限していた雑音を全て特定し、全雑音に対し具体的な解決策を提示した。2024年1月1日の能登半島地震の影響でKAGRAはその懸架系に大きなダメージを受けたため、KAGRAでは現在復旧作業が行われている。今後は一刻も早く復旧作業を完了させ、O4終盤で10 Mpcの感度での観測網参加を目指す。

長基線信号増幅共振器

近年のLIGO-Virgo-KAGRAコラボレーションによる重力波観測を経て、連星ブラックホール・中性子星に関する数多くの知見が得られた。一方で観測された重力波の周波数は10 Hzから1 kHz程度と限定的であるため、今後はより広い周波数帯での重力波観測が求められる。特に、数kHz帯の重力波は連星中性子星合体時に放出されるため、その観測は中性子星の状態方程式決定に重要である。数kHzに特化した重力波望遠鏡が計画されており、そこで用いられるのが長基線信号増幅共振器と呼ばれる技術である。当研究室ではこの技術の原理実証実験を行っている。本年度の研究により、テーブルトップスケールでの長基線信号増幅共振器の原理実証実験は完了した。具体的には、重力波模擬信号を干渉計に導入し、信号検出ポートにて、理論予測と一致する2 MHzでの重力波信号増幅の実証に成功した。今後はより大型の干渉計への本技術の導入や、KAGRAへの導入に向けた検討を進める計画である。

KAGRA Birefringence

Crystalline materials are considered the most promising materials for fabricating cryogenic test masses and their coatings for gravitational wave detectors because of their excellent thermal and optical properties at low temperatures. However, birefringence owing to local impurities and inhomogeneities in the crystal can degrade the performance of the detector. We use Finesse to simulate the birefringence effects of sapphire test masses of KAGRA. With a two-world approach, we can fully model its influence by using realistic birefringence maps. Contrast defects have been observed and frequency noise coupling from the laser are much larger than expected, depending on the beam position on two input test masses. This model can help us to distinguish the birefringence contribution to KAGRA's current sensitivity, as well as understanding the issue in future cryogenic detectors.

6.3.2 宇宙空間重力波望遠鏡

宇宙空間でレーザー干渉計を実現することで、長い基線長による高感度化、地面振動の影響の回避が可能になり、低い周波数帯での重力波観測が可能になる。宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO は基線長 1000 km のファブリペロー型レーザー干渉計を宇宙空間に建設するという野心的な計画である。DECIGO は巨大ブラックホールの合体や、初期宇宙からの重力波などの観測を目指している。この DECIGO の前段階の重力は望遠鏡 B-DECIGO や、技術実証ミッション SILVIA の設計検討を進めている。

DECIGO

DECIGO の感度を制限する周波数雑音や量子雑音の低減手法の検討に関する共同研究を行なっている。本年度は大きく分けて 2 つの研究を行った。量子ロッキングと呼ばれる量子雑音低減手法を光ばね・ホモダイン測定を考慮した広いパラメータ空間での最適化、およびバックリンク型干渉計と呼ばれる新しい周波数雑音低減手法の原理実証実験である。

宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO

B-DECIGO は、DECIGO の前哨ミッションと位置付けられる一方、連星合体現象に対して宇宙全体を見渡すことができるだけの性能を持つ本格的な重力波望遠鏡である。ET や CE といった次世代地上重力波望遠鏡や、ESA が主導する LISA とは異なる周波数帯と独自の科学的成果が期待されている。

重力波源のパラメータ推定精度の評価

DECIGO プロジェクトの目標達成に向けて、パラメータ推定の研究が不可欠な役割を果たしている。本研究室では、重力波源からの信号に含まれる豊富な情報を抽出し、解析するためのツールである「GWFish」を導入した。GWFish は、特に重力波源の物理的パラメーター、例えば星の質量や距離などの推定に特化したソフトウェアである。現在は、ツールによる解析を行う環境構築や準備を行っている。今後、本研究室は GWFish を駆使して重力波データから得られる情報を最大限に活用し、DECIGO の感度向上を目指す。

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。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、地上と同じように光共振器が制御可能となる程度まで衛星間の相対速度を減速するプロセスの確立である。当研究室では Delayline マイケルソン干渉計およびステージに搭載された懸架鏡を用いて、100 m 離れた衛星を模擬した実験系を構築し、相対速度計測および制御に向けた実験を行っている。本年度は、主に実験系の構築と相対速度計測手法の提案、およびその評価を行った。レーザー周波数をノコギリ波で変調し、懸架鏡の載ったステージを一定速度で動かして、その速度を $1\text{ }\mu\text{m}$ 程度の精度で符号込みで測定することに成功している。

超精密フォーメーションフライト実証計画 SILVIA

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。本年度は、さらなるミッション構成の具体化とコスト評価等の検討を進めた。また、国立天文台と共同で SILVIA 光学系の詳細設計を行い、複数の光学メーカーとトレードオフ検討を行った。

6.3.3 ねじれ型重力波検出器 TOBA

Torsion-Bar Antenna (TOBA) とは、ねじれ振りの水平回転を利用した新しい重力波検出器である。地上でも低周波数帯 (0.1 Hz 前後) の重力波に感度を持ち、中間質量ブラックホール連星合体の観測が可能になり、銀河中心の超巨大ブラックホールの形成

過程に知見を与えることなどが期待できる。重力波観測以外にも、地球活動による重力場変動を計測することで将来の地上重力波遠鏡の低周波感度向上に貢献したり、地震の早期アラートに応用するなどの研究も進められている。現在は長さ 35 cm の棒状の試験マスをを用いた小型プロトタイプ (Phase-III TOBA) の開発が進められており、将来的な大型化 (10 m) に備えた雑音低減実証や地球重力場変動の観測、地震速報の実現などを目指している。Phase-III TOBA の目標感度は、0.1 Hz においてひずみ換算で $10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}}$ となっている。Phase-III TOBA の特徴の 1 つは、雑音の低減のために試験マスを 4 K にまで冷却することである。これまでに試験マスの冷却には既に成功しており、現在はさらなる高感度化に向けて次に述べる低温下での要素開発や光学系の改良などを行っている。

低温モノリシック光学系の開発

目標感度を妨げる雑音の 1 つに、読み取り光学系の変動に起因する雑音がある。この雑音の低減のため、Phase-III TOBA ではモノリシック光学系と呼ばれる、基材に光学素子を直接接着した光学系を用いて試験マスの変位を測定する。Phase-III TOBA の試験マス及び読み取り光学系は低温下にあるため、モノリシック光学系についても低温化で動作するものを開発する必要がある。

低温下での動作に必要な要素開発は昨年度までに行われており、本年度はモノリシック光学系の構築 [36, 56] と、低温下での特性評価を行った。その結果、図 6.3.9 に示すように 0.1 Hz において $3.6 \times 10^{-14} \text{ m} / \sqrt{\text{Hz}}$ という感度を達成した。これまでに全ての光学系を接着したモノリシック光学系を低温下で動作させた例はなく、本成果は世界初のものである。

また感度を制限している雑音についても調査が行われ、広い周波数帯に渡り地面振動が制限しており、レーザーの強度揺らぎが将来問題となることがわかった。今後は防振系の改良やレーザーの強度安定化を行い、感度を向上する予定である。

改良型角度センサ

TOBA の回転を高精度に読み取る角度センサとして、wavefront sensor の後ろに鏡をもう 1 枚置いて補助共振器を構成する改良型角度センサを考案した。補助共振器による位相補償によって角度信号を増幅できることに加えて、ビームジッター雑音が小さいという利点がある。本年度は、共振器制御の安定化に向けて、制御系の改良を行った。

懸架系

低温ねじれ振り子の開発に向けて、まずは常温下でねじれ振り子を開発し、設計の問題点の洗い出し

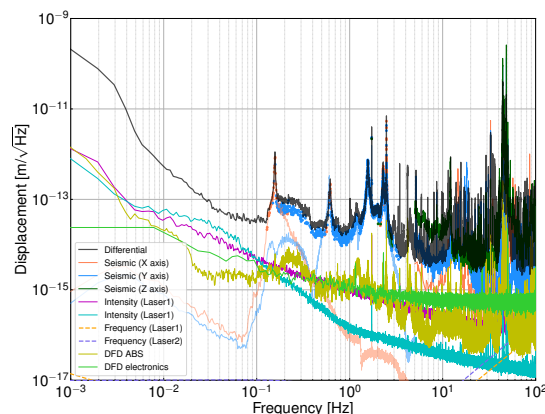


図 6.3.9: モノリシック光学系の低温下での到達感度（黒線）と特定された主な雑音源。0.1 Hz において $3.6 \times 10^{-14} \text{ m} / \sqrt{\text{Hz}}$ を達成した。

と共振器制御の実証を行う。ねじれ振り子の両端に取り付けた 2 本の光共振器の長さ変動の差からねじれ振り子の回転を測定する。光共振器の構成方法、中段マスと試験マスの形状、懸架ワイヤの本数など、様々な設計を検討し、並進地面振動からのカップリング雑音が小さくなるように設計を行った。縦防振を取り入れた懸架台、中段マス、試験マス、光学ベンチの部品の設計を行い、製作を進めた。

Fiber Q measurement

Research was focused on measuring and lowering the suspension noise for torsion pendulums, focusing on two main key technologies: cryogenic temperatures, and crystalline fibres. This is in order to ensure that the noise floor of TOBA is low enough for its intended sensitivity. The key measurement metric is the Q factor, which is measured via the ringdown method with a torsion pendulum setup, where a higher Q indicates lower noise.

Measurements of the Q factor at cryogenic temperatures were measured for sapphire fibres at various diameters (1, 1.5, 2 and 3 mm), in order to characterise and isolate the various factors affecting the suspension thermal noise. The highest value of $Q = 4 \times 10^5$ at cryogenic temperatures was measured with a 1.5 mm fibre. Further work is underway to model the various noise sources, such as clamp losses, coupling between the torsion and pendulum modes, in order to understand and reduce the suspension thermal noise for future setups.

6.3.4 アクシオンダークマター探索実験 DANCE

数々の宇宙観測によって宇宙に存在する物質の 8 割以上がダークマターという未知の物質で占められていることが明らかになっている。ダークマターは宇宙の構造形成の重要な役割を果たしたことがわかっており、その存在は確実視されているが、正体は全く不明である。これまでは素粒子物理学からの強い示唆から、WIMP と呼ばれる重い粒子のダークマター候補に探索が集中していたが、検出の兆候は得られていない。こうした背景から、WIMP 以外の候補への関心が高まっており、質量で 90 桁に及ぶ様々な候補を新しい発想によって探索することの重要性が認識されてきた。

我々はその中でも超軽量ダークマターに分類されるアクシオンに着目している。アクシオンは光子との相互作用により質量に対応した周波数で光の偏光面を回転振動させる性質がある。そこで我々は、光リング共振器を用いることでアクシオンによる偏光回転を増幅する手法を提案し、 10^{-10} eV 程度以下の軽量アクシオンを広帯域にわたって探査する実験: DANCE (Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment) を 2018 年度より開始した。2021 年にはプロトタイプによる 12 日間の試験運転を行い、光リング共振器を用いた初のアクシオン-光子結合定数の上限値を設けたが、共振器ミラーの反射位相差により s/p 偏光が同時に共振できず感度が大幅に低下するという問題も明らかになった。

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

s/p 偏光の非同時共振問題を解決する手法として、波長可変レーザーを用いて s/p 偏光間の反射位相差をキャンセルすることにより同時共振を実現する手法が提案されている。本年度は折り返し光共振器の製作を行い、ミラー 1 枚あたりの s/p 偏光間の反射位相差測定による s/p 偏光の同時共振の原理実証を行った。その結果、s/p 偏光間の反射位相差の要求値を満たす波長が得られた。また、s/p 偏光間の反射位相差の時系列データを取得したが、要求値を満たしていない。今後は、s/p 偏光間の反射位相差の時間変動の原因を調査し、要求値を満たすような制御を実現する予定である。

波長可変レーザーの共振制御系の開発

DANCE で高感度な観測運転を行うためには、s/p 偏光の同時共振だけではなく共振状態を維持する制御系も必要となる。本年度は波長可変レーザーを光リング共振器に共振させる制御系の開発を行い、単一の偏光について制御帯域 100 kHz の共振制御に成功した。今後は、制御系の遅れを改善することでより安定した共振維持を実現した後、波長をチューニングし s/p 偏光の同時共振制御を目指す。

6.3.5 基礎物理・量子光学実験

オプトメカニクス研究

重力波望遠鏡における最も原理的な雑音として、レーザー光の量子雑音が挙げられる。また巨視的な機械振動子を用いて量子雑音に制限された変位感度を観測することで、巨視的重ね合わせ状態を実現することが可能となる。当研究室では、その最初のステップとして、質量 10 mg 程度のねじれ振子を用いて量子輻射圧雑音を観測することを目指している。本年度は、量子雑音観測の障壁となる古典的なレーザー光の強度雑音の安定化に取り組んだ。結果としてこれまでの安定度を大きく上回り、100 Hz 以上ではほぼ完全に量子雑音が観測できる水準を実現した。今後は、より高い SN 比で輻射圧雑音が観測できるような光学系を設計・構築する予定である。

6.3.6 量子スクイーミングによるハイゼンベルグ限界への到達実験

重力波望遠鏡の感度を制限する雑音の 1 つに量子雑音がある。この量子雑音は不確定性原理に由来するものであり、非線形光学結晶を用いた量子スクイーミングによって低減できる。スクイーミングによる位相測定エラーの低減レベルは、スクイーミングを生成するポンプ光の光子数 N に依存し、標準量子限界においては $N^{1/2}$ で測定精度が良くなることが分かっている。一方で原理的には、この位相測定のエラーは不確定性原理のみによって支配される (ハイゼンベルグ限界) はずであり、この場合、 N で測定精度が良くなる。先行研究では、同じスクイーズド状態を 2 つ用意することで、ハイゼンベルグ限界に到達できることが示されている。LIGO-MIT では、これを実証する実験を行っており、本年度はスクイーズド状態を生成する 2 台のスクイーズの作製 (Second Harmonic Generator 及び Optical Parametric Oscillator) を行った。現在もこの作業を継続しており、性能評価およびノイズ低減を行っている。

<受賞>

- [1] 高野哲: 第 78 回年次大会 日本物理学会学生優秀発表賞, 日本物理学会 (2023 年 10 月)。
- [2] 藤本拓希: 2023 年春季大会 日本物理学会学生優秀発表賞, 日本物理学会 (2023 年 4 月)。

<報文>

(原著論文)

- [3] Y. Michimura, H. Wang, *et al.*: Effects of mirror birefringence and its fluctuations to laser interferometric gravitational wave detectors, *Phys. Rev. D* 109, 022009 (2024)。
- [4] Y. Oshima, *et al.*: First results of axion dark matter search with DANCE, *Phys. Rev. D* 108, 072005 (2023)。

- [5] K. Tsuji, et al.: Optimization of Quantum Noise in Space Gravitational-Wave Antenna DECIGO with Optical-Spring Quantum Locking Considering Mixture of Vacuum Fluctuations in Homodyne Detection, *Galaxies* 2023, 11, 111 (2023).
- [6] R. Sugimoto, et al.: Experimental demonstration of back-linked Fabry-Perot interferometer for a space gravitational wave antenna, *Phys. Rev. D* 109, 022003 (2023).
- [7] D. Ganapathy et al.: Broadband Quantum Enhancement of the LIGO Detectors with Frequency-Dependent Squeezing, *Phys. Rev. X* 13, 041021 (2023).
- [8] T. Akutsu et al.: Overview of KAGRA: Data transfer and management, *PTEP* 2023, 10A102 (2023).
- [9] R. Abbott et al.: Open Data from the Third Observing Run of LIGO, Virgo, KAGRA, and GEO, *ApJS* 267, 29 (2023).
- [10] R. Abbott et al.: Constraints on the Cosmic Expansion History from GWTC-3, *ApJ* 949, 76 (2023).
- [11] R. Abbott et al.: Search for Gravitational Waves Associated with Fast Radio Bursts Detected by CHIME/FRB during the LIGO-Virgo Observing Run O3a, *ApJ* 955, 155 (2023).
- [12] R. Abbott et al.: GWTC-3: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo during the Second Part of the Third Observing Run, *Phys. Rev. X* 13, 041039 (2023).
- [13] R. Abbott et al.: GWTC-2.1: Deep extended catalog of compact binary coalescences observed by LIGO and Virgo during the first half of the third observing run, *Phys. Rev. D* 109, 022001 (2024).
- [14] C. Fletcher et al.: A Joint Fermi-GBM and Swift-BAT Analysis of Gravitational-wave Candidates from the Third Gravitational-wave Observing Run, *ApJ* 964, 149 (2024).

(学位論文)

- [15] 瀧寺陽太: アクシオン暗黒物質探索のための s/p 偏光間の反射位相差測定, 修士論文 (2024 年 3 月).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [16] Masaki Ando: Status of KAGRA, LVK Meeting (March 13th, 2024, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana, USA).
- [17] Masaki Ando: Space Gravitational-Wave Antenna B-DECIGO and DECIGO, LGWA2023 (October 10th, 2023, Catania, Italy / Online).
- [18] Masaki Ando: Space Gravitational-Wave Antenna B-DECIGO and DECIGO, ICGAC15 (July 6th, 2023, Gyeongju, South Korea).

一般講演

- [19] Hinata Takidera, et al.: Laser wavelength tuning for sensitivity improvement of DANCE for axion dark matter search, FY2023 "What is dark matter?" (March 2024, YITP).
- [20] Masaki Ando: Prospects on IGWN from KAGRA Point of View, The KAGRA Online Meeting (February 29th, 2024).
- [21] Haoyu Wang, et al.: Updates of simulation for birefringence, The 32nd KAGRA F2F meeting (December 2023, University of Tokyo).
- [22] Masaki Ando: IGWN Formation, 同上.
- [23] Masaki Ando: Report from KSC Board, 同上.
- [24] Masaki Ando: Future Strategy Committee, 同上.
- [25] Masaki Ando: TorPeDO and TOBA for Newtonian Noise Research, KAGRA FWG 3rd Open Meeting (Dec 7th, 2023, NAOJ).
- [26] Kentaro Komori, Sotatsu Otabe, Kentaro Somiya: Demonstration of GW signal enhancement by long SRC and the future, 同上.
- [27] Masaki Ando: KAGRA Scientific Congress: Old/New KSC board, The 31st KAGRA F2F meeting (September 15th, 2023, Toyama).
- [28] Masaki Ando: Future Strategy Committee, 同上.
- [29] Satoru Takano, et al.: Newtonian Noise Measurement with Torsion-Bar Antenna, 同上.
- [30] Yuka Oshima, et al.: Development of Torsion-Bar Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observation, 38th International Cosmic Ray Conference (July 2023, Nagoya University).
- [31] Haoyu Wang, et al.: Birefringence issues in KAGRA, Path to kHz Gravitational-wave Astronomy (July 2023, Tsinghua University).
- [32] Hinata Takidera, et al.: Current status of Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment (DANCE), Student Fest by SGU-PG (June 2023, Koshiba Hall).

ポスター発表

- [33] Yuka Oshima, et al.: Development of Torsion Pendulums and Readout Optics for Gravity Gradient Observation, International Symposium on Quantum Electronics (February 2024, University of Tokyo).
- [34] Masaya Ono, et al.: Quantum Squeezing Experiment in Gravitational Wave Physics, QuARC 2024 (Jan 2024, New Hampshire, USA).
- [35] Hinata Takidera, et al.: Measurement of reflection phase difference between s-polarization and p-polarization for DANCE, Quantum Innovation 2023 (November 2023, Tokyo Convention Hall).
- [36] Satoru Takano, et al.: Cryogenic Monolithic Interferometer for Torsion-Bar Antenna, LVK meeting September 2023 (September 2023, Toyama).

- [37] Hinata Takidera, *et al.*: Improving the sensitivity of Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment (DANCE) with wavelength tunable laser, Amaldi15 (July 2023, online).
- [38] Yuka Oshima, *et al.*: Torsion-Bar Antenna and its Angular Sensor, GWADW 2023 (May 2023, Isola d'Elba, Italy).
- [39] H. Fujimoto, *et al.*: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment DANCE: Latest optical system and sensitivity, 同上.
- (国内会議)
- 一般講演
- [40] 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 (2024 年 3 月 28 日, 東大柏キャンパス メディアホール).
- [41] 小森健太郎, 他: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の現状, 日本物理学会 2024 年春季大会 (2024 年 3 月, オンライン).
- [42] 安東正樹, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (177): B-DECIGO の概要, 同上.
- [43] 山口由貴, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (181): 超精密編隊飛行のためのレーザー干渉計を用いた衛星間相対速度計測, 同上.
- [44] 王方成, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (182): 超精密編隊飛行のためのレーザー干渉計を用いた衛星間相対角度制御, 同上.
- [45] 藤本拓希, 他: 光リング共振器を用いたアクシオン暗黒物質の探索実験 DANCE (12): 位相シフトミラーを用いた s/p 偏光の同時共振制御の開発, 同上.
- [46] 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 (13): ミラー 1 枚あたりの s/p 偏光の反射位相差の時間ドリフト, 同上.
- [47] 大島由佳, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (45): ねじれ振り子と読み取り光学系の開発, 同上.
- [48] 安東正樹: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の現状, 日本天文学会 2024 年春季年会 (2024 年 3 月 15 日, オンライン).
- [49] 安東正樹: 高感度重力勾配センサによる地震早期アラート手法の確立, 光・量子飛躍フラッグシッププログラム 第 10 回領域会議 (2023 年 12 月 22 日, 東京工業大).
- [50] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会 (2023 年 10 月 19 日, 富山国際会議場, 富山).
- [51] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 2023 年第 22 回 DECIGO ワークショップ (2023 年 10 月 15 日, 名古屋大学, 愛知).
- [52] 亀田峻, 中野祥大: SILVIA における衛星間相対速度の測定手法の提案および実証, 同上.
- [53] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 日本天文学会 2023 年秋季年会 (2023 年 9 月 22 日, 名古屋大学).
- [54] 安東正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (168): B-DECIGO の概要, 日本物理学会 第 78 回年次大会 (2023 年 9 月, 東北大学).
- [55] 大島由佳, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (41): ねじれ振り子と読み取り光学系の開発, 同上.
- [56] 高野哲, 他: ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA(Phase-III) の開発 (42): 低温モノリシック光学系の観測, 同上.
- [57] Mengdi Cao, *et al.*: Development of Phase-III TOBA for Gravitational Wave Observation (43): Development of Tiltmeter, 同上.
- [58] Ching Pin; Ooi, *et al.*: Development of Phase-III TOBA for Gravitational Wave Observation (44): Suspension thermal noise measurements of torsion pendulums suspended by sapphire fibre at cryogenic temperatures, 同上.
- [59] 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 (11): 波長可変レーザーを用いた同時共振手法, 同上.
- [60] 小森健太郎, 小田部荘達, 宗宮健太郎: 長基線信号増幅共振器の制御と信号増幅の実証, 同上.
- [61] 大島由佳, 他: ねじれ振り子型重力勾配計の開発, 公開シンポジウム「光がもたらす未来社会~ICO の新たな発展に向けて~」(2023 年 7 月, 日本学術会議講堂).
- [62] 安東正樹: 高感度重力勾配センサによる地震早期アラート手法の確立, 光・量子飛躍フラッグシッププログラム 第 9 回領域会議 (2023 年 6 月 6 日, 東京工業大).
- ポスター発表
- [63] 安東正樹: 高感度重力勾配センサによる地震早期アラート手法の確立, Q-LEAP 第 6 回シンポジウム (2024 年 2 月 8 日, 伊藤謝恩ホール, 東京大学).
- [64] 小森健太郎, 安東正樹: Development of a quantum limited optomechanical torsion pendulum, 同上.
- (セミナー・アウトリーチ講演)
- [65] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡と精密光技術, 光響 Web セミナー (2023 年 12 月 8 日, オンライン).
- [66] 安東正樹: 重力と宇宙のお話, 東京大学 理学部 ホームカミングデイ 2023 (2023 年 10 月 21 日, 東京大学, 東京).
- [67] 小森健太郎: 重力の波を聴きとる, 理学部オープンキャンパス 2023 (2023 年 8 月, 小柴ホールおよびオンライン).
- [68] 安東正樹: 宇宙物理学・宇宙素粒子実験, 物理学専攻入試ガイダンス (2023 年 5 月 27 日, オンライン).
- [69] 大島由佳: 重力波望遠鏡でダークマターを探す, 第 96 回 東京大学五月祭 10 分で伝えます! 東大研究最前線 (2023 年 5 月).

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 2030 年代の活躍を目指す GRAMS 計画など、将来の高エネルギー天文衛星実現に向けて開発を続けている。本年は特に超新星残骸、活動銀河核などの観測的研究と、XRISM 衛星・GRAMS 計画・cipher 計画・JEDI 計画の開発研究を行った。

6.4.1 宇宙物理現象観測に関する研究

超新星残骸

星の中にはその最後を大爆発で終えるものがあり(超新星爆発)、星間空間に強い衝撃波と数百万度の巨大プラズマ球を形成する。これを超新星残骸と呼ぶ。超新星残骸は星が核融合で作出した重元素を宇宙空間に供給し、また衝撃波で宇宙線を加速し供給する、いわば宇宙の多様性の源である。

超新星残骸での宇宙線加速は、どのような環境で加速が起こりやすいかを見極めることが宇宙線に対する超新星残骸の寄与を理解するために重要である。我々は環境密度と加速効率の相関を調べるため、分子雲とまだらに相互作用している超新星残骸 RCW86 を詳細解析した。その結果、密度が高い星間物質と相互作用している領域よりも密度が低い星間物質と相互作用している領域で加速電子からのシンクロトロン放射が強く、また高エネルギーまで電子が加速されていることを示した [7]。これは、密度が薄い領域では衝撃波速度が大きいことが原因ではないかと考察でき、衝撃波速度が宇宙線加速効率の最も大きなパラメータの一つであることを示している。実際 wind bubble の中にいる超新星残骸は加速効率が良いことが定性的に議論されており (ex. [5]、今後は宇宙線加速に対する衝撃波速度の定量的な影響を測定する段階に来ている。

また、この他にも複数の超新星残骸で、特に衝撃波と星間物質との相互作用に関連した研究 [8, 15, 16] や、GeV ガンマ線・TeV ガンマ線放射を用いた宇宙線加速に関する研究 [2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 13] などを行っている。

白色矮星

白色矮星は太陽のような軽い星の最期の姿であり、我々の銀河の星の 1/3 は白色矮星だとされている。その中で Chandrasekar 質量に近いものの中には非常に早く自転した磁場の強い種族がいることが分

かってきた。これらは白色矮星同士の合体で生まれた重い白色矮星である可能性が示唆されている。これらは重力波天体の残骸としても重要だ。

我々は早い自転と強い磁場を持つ白色矮星が、中性子星パルサーと同様の白色矮星パルサーとして重要な宇宙線電子加速源である可能性に着目した。このような白色矮星の個数密度によっては、白色矮星も宇宙線電子成分に十分な寄与がある可能性があるため、白色矮星パルサーの発見は極めて重要である。我々は自転周期が 416 秒、磁場が 600-900 MG で、白色矮星-白色矮星合体の結果の天体であることが示唆されている ZTF j1901+14 を Chandra 衛星で観測した。その結果、本天体から 3.5σ で X 線を検出した [51]。ZTF J1901+14 の推定磁場双極子放射からの X 線への効率は 1% のオーダーで、典型的な中性子パルサーのものと同程度である。これは、白色矮星が宇宙線電子成分に大きな寄与を果たしうることを示した重要な成果であるとともに、X 線が白色矮星-白色矮星合体残骸の探査に有用である可能性を示唆している。

6.4.2 将来宇宙計画に関する開発

XRISM

XRISM 衛星は 50 mK という超低温に冷却した検出器 Resolve による X 線高分光観測と満月ほどの大視野を持つ X 線 CCD である Xtend を搭載した日米共同ミッションである。馬場研は特に Xtend 検出器やソフトウェア、サイエンス創出で貢献している。2016 年以降開発を続けており、2023 年 9 月 7 日に無事 H2A ロケット 47 号機での打ち上げに成功した (図 6.4.10)。2023 年 12 月にファーストライト、2024 年 2 月には定常運用に移行し、今後順調に天体観測をしていくと期待している。

GRAMS

MeV ガンマ線帯域は、天体で合成された超重元素からの核ガンマ線、ジェットや宇宙線加速天体など宇宙高エネルギー天体現象からの放射など、高エネルギー宇宙の理解に重要なサイエンスを達成しうる波長帯域である。しかし、MeV ガンマ線は物質との反応断面積が小さく主な反応がコンプトン散乱であることから観測が難しく、「宇宙物理最後の窓」と呼ばれている。

我々はこの最後の窓を開くべく、液体アルゴンをターゲットとして宇宙 MeV ガンマ線観測を行う GRAMS 計画を日米共同で進めている。しかし現在まで、液体アルゴンを気球・衛星高度・環境でガンマ線ターゲットとして正常に使用した実績はなく、工学実証が必要であった。我々は早稲田大学・大阪大学などと共同で 2023 年 7 月に北海道大樹町で工学実証気球実験を行い (図 6.4.11)、気球高度で液体アルゴン検出器を安定して正常に稼働させることに成功した。さらに、宇宙線が大気と相互作用することで発生す

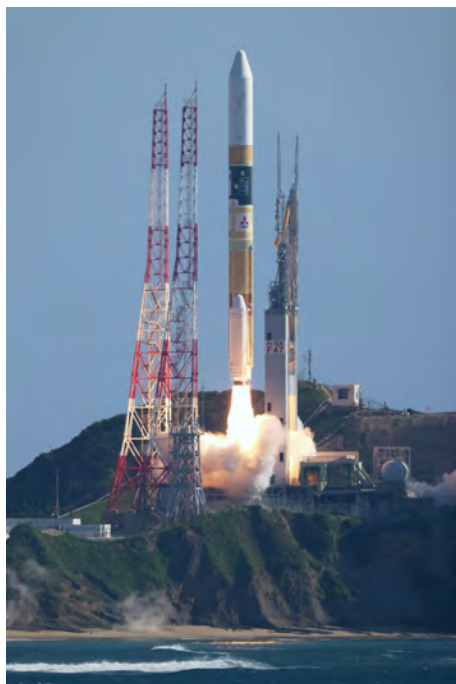


図 6.4.10: XRISM の打ち上げ。種子島から H2A ロケットによって打ち上げられた。提供：三菱重工

る「大気ガンマ線」と呼ばれるガンマ線と無矛盾な信号を得ることに成功した。これは GRAMS が実現可能な計画であることを示す重要な成果である [32]。



図 6.4.11: 放球直前の様子。この後無事に工学実証実験が成功した。

cipher

X 線偏光観測は天体の幾何構造や磁場構造を明らかにする上で有効な手段として期待されている。我々は硬 X 線帯域での偏光観測の実現を目指し、微小ピクセル CMOS イメージセンサを用いた偏光撮像システムの開発を進めている。これまでに、ピクセルサイズ $2.5 \mu\text{m}$ のセンサを用いた原理実証実験に成功

しており、偏光測定性能の改善が課題となっていた。なお、このシステムを超小型衛星に搭載して中性子星パルサー星雲である「かに星雲」やブラックホール連星「Cyg X-1」を観測しようという計画が cipher である。

今年度は、ピクセルサイズのより小さなセンサを用いることによる偏光測定性能の改善に成功した。ピクセルサイズが小さいほど、検出器内での光電子の追跡精度が上がり、偏光測定性能が高くなることが予想されるからだ。2023 年 6 月に SPring-8、2023 年 11 月に KEK-PF にてビーム実験を行い、ピクセルサイズ $1.5 \mu\text{m}$ のセンサの偏光測定性能の評価を行った。その結果、 $1.5 \mu\text{m}$ センサの偏光測定性能は $2.5 \mu\text{m}$ センサよりも 1.2 倍程度向上することが確認できた [41, 42, 60, 61]。

JEDI

JEDI 衛星 (仮称) は、XRISM の次の世代の X 線観測衛星として検討中の衛星計画で、次期 JAXA 中型計画に名乗りを上げようとしている。2030 年代に実現する電波・可視光・重力波・ニュートリノの大型観測装置と連携することで、突発天体の X 線即応観測及び長期 X 線モニタ観測といった時間領域にフォーカスした観測を行い、超新星爆発やブラックホールといった極限環境の物理を探ることを目指す。同時に紫外線・硬 X 線帯域での広域探査を行い、超巨大 BH の進化の解明や宇宙線源加速源の解明なども目指す。

我々は、JEDI 衛星の主検出器として、 $10 \mu\text{s}$ 以下という極めて時間分解能の良い X 線撮像分光センサ“XRPIX”の開発を進めている。特に、アナログ・デジタル変換回路をセンサ上に内蔵した新たなセンサを開発することで、衛星搭載に向けて必須な小型モジュール化への第一歩を実現することに成功した [44, 45, 62, 63]。この他にも、センサのアナログ性能や放射線耐性の向上のための研究開発も進めている [18, 20, 37, 52, 73]。

<受賞>

- [1] 新井 翔大、理学系研究科研究奨励賞、東京大学理学系研究科、2024 年 3 月 21 日

<報文>

(原著論文)

- [2] P.K.H. Yeung, A. Bamba, H. Sano, “Multiwavelength studies of G298.6-0.0: An old GeV supernova remnant interacting with molecular clouds”, PASJ, 75, 384 (2023)
- [3] The CTA collaboration, A. Bamba, et al., “Multiwavelength study of the galactic PeVatron candidate LHAASO J2108+5157”, A&A, 673, A75 (2023)
- [4] The CTA collaboration, A. Bamba, et al., “Sensitivity of the Cherenkov Telescope Array to TeV photon emission from the Large Magellanic Cloud”, MNRAS, 523, 5353 (2023)

- [5] N. Dang-thanh-nhan, G. Puehlhofer, M. Sasaki, A. Bamba, V. Doroshenko, A. Santangelo, “XMM-Newton observations of the TeV-discovered SNR HESS J1534-571”, *A&A*, 679, A48 (2023)
- [6] The CTA collaboration, A. Bamba, et al., “Observations of the Crab Nebula and Pulsar with the Large-Sized Telescope prototype of the Cherenkov Telescope Array”, *ApJ*, 956, 80 (2023)
- [7] A. Bamba, H. Sano, R. Yamazaki, J. Vink, “On the influence of shock-cloud interactions on the non-thermal X-ray emission from the supernova remnant RCW 86”, *PASJ*, 75, 1344 (2023)
- [8] H. Sano, Y. Yamane, J. Th. van Loon, K. Furuya, Y. Fukui, R. Z. E. Alsaberi, A. Bamba, R. Enokiya, M. D. Filipovic, R. Indebetouw, T. Inoue, A. Kawamura, M. Lakicevic, C. J. Law, K. S. Long, N. Mizuno, T. Murase, T. Onishi, S. Park, P. P. Plucinsky, J. Rho, A. M. S. Richards, G. Rowell, M. Sasaki, J. Seok, P. Sharda, L. Staveley-Smith, H. Suzuki, T. Temim, K. Tokuda, K. Tsuge, K. Tachihara, “ALMA Observations of Supernova Remnant N49 in the Large Magellanic Cloud. II. Non-LTE Analysis for Shock-Heated Molecular Clouds”, *ApJ*, 958, 53 (2023)
- [9] The CTA collaboration, A. Bamba, et al., “Star tracking for pointing determination of Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes. Application to the Large-Sized Telescope of the Cherenkov Telescope Array”, *A&A*, 679, A90 (2023)
- [10] E. Kosmaczewski, L. Stawarz, C. C. Cheung, A. Bamba, W. R. M. Rocha, A. Karska, “Multi-wavelength Survey of Dark Globule DC 314.8–5.1: Point Source Identification and Diffuse Emission Characterization”, *ApJ*, 959, 37 (2023)
- [11] The CTA collaboration, A. Bamba, et al., “Performance of the joint LST-1 and MAGIC observations evaluated with Crab Nebula data”, *A&A*, 680, A66 (2023)
- [12] C. Kim, J. Park, J. Woo, H. An, A. Bamba, K. Mori, S.P. Reynolds, S. Safi-Harb, “X-ray characterization of the pulsar PSR J1849 – 0001 and its wind nebula G32.64+0.53 associated with TeV sources detected by H.E.S.S., HAWC, Tibet AS γ , and LHAASO”, *ApJ*, 960.78 (2024)
- [13] S. Reynolds, H. An, M. Abdelmaguid, J. Alford, C.L. Fryer, K. Mori, M. Nynka, J. Park, Y. Terada, J. Woo, A. Bamba, P. Bangale, R. Diesing, J. Eagle, K. Fang, S. Gabici, J. Gelfand, B. Grefenstette, J. Garcia, C. Kim, S. Kumar, L. Lu, B. Mac Intyre, K. Madsen, K. Malone, S. Manconi, Y. Motogami, H. Ohsumi, B. Olmi, T. Sato, R.-Y. Shang, D. Stern, N. Tsuji, G. Younes, A. Zoglauer, “The High Energy X-ray Probe (HEX-P): Supernova remnants, pulsar wind nebulae, and nuclear astrophysics”, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 10, 1321278 (2023)
- [14] K. Mori, S. Reynolds, H. An, A. Bamba, N. Tsuji, M. Abdelmaguid, J. Alford, P. Bangale, R. Diesing, J. Eagle, K. Fang, C.L. Fryer, S. Gabici, J. Gelfand, B. Grefenstette, J. Garcia, C. Kim, L. Lu, B. Mac Intyre, S. Kumar, K. Madsen, K. Malone, S. Manconi, Y. Motogami, H. Ohsumi, B. Olmi, J. Park, T. Sato, R.-Y. Shang, D. Stern, Y. Terada, J. Woo, G. Younes, A. Zoglauer. “The High Energy X-ray Probe (HEX-P): Galactic PeVatrons, star clusters, superbubbles, microquasar jets, and gamma-ray binaries”, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 10, 1303197 (2023)
- [15] V. Sapienza, M. Miceli, A. Bamba, S. Orlando, S.-H. Lee, S. Nagataki, M. Ono, S. Katsuda, K. Mori, M. Sawada, Y. Terada, R. Giuffrida, F. Bocchino, “Probing Shocked Ejecta in SN 1987A: A novel diagnostic approach using XRISM – Resolve”, *ApJL*, 961, L9 (2024)
- [16] H. Uchida, T. Kasuga, K. Maeda, S.-H. Lee, T. Tanaka, A. Bamba, “Three-Dimensional Velocity Diagnostics to Constrain the Type Ia Origin of Tycho’s Supernova Remnant”, *ApJ*, in press (arxiv: 2401.11763)
- [17] P.K.H. Yeung, S.-H. Lee, T. Mizuno, A. Bamba, “Hadronic gamma-rays from the radiative shell & molecular clouds of the old GeV supernova remnant G298.6-0.0”, *PASJ*, in press (arxiv: 2403.13723)
- [18] K. Hagino, M. Kitajima, T. Kohmura, I. Kurachi, T.G. Tsuru, M. Yukumoto, A. Takeda, K. Mori, Y. Nishioka, and T. Tanaka, “Radiation-Induced Degradation Mechanism of X-ray SOI Pixel Sensors with Pinned Depleted Diode Structure”, *IEEE TNS*, 70(7), 1444–1450 (2023)
- [19] M. Morii, Y. Maeda, H. Awaki, K. Hagino, M. Ishida, and K. Mori, “Hitomi-HXT deconvolution imaging of the Crab Nebula dazzled by the Crab pulsar”, *PASJ*, 2024, in press
- [20] M. Yukumoto, K. Mori, A. Takeda, Y. Nishioka, S. Yonemura, D. Izumi, U. Iwakiri, T. G. Tsuru, I. Kurachi, K. Hagino, Y. Arai, T. Kohmura, T. Tanaka, M. Kimura, Y. Fuchita, T. Yoshida, T. Ikeda, “Design study and spectroscopic performance of SOI pixel detector with a pinned depleted diode structure for X-ray astronomy”, *NIMA*, 1060, 169033 (2024)
- [21] H. Nakajima, S. Nakamura, K. Hagino, A. Kikuchi, T. Matsumoto, T. Yamagami, T. Yoneyama, J. Hiraga, Y. Ezoe, M. Numazawa, K. Ishikawa, H. Kitamura, “Development of the focal-plane CMOS detector for the GEO-X mission”, *JATIS*, 10(1), 016001 (2023)
- [22] Y. Ezoe, R. Funase, H. Nagata, Y. Miyoshi, H. Nakajima, I. Mitsuishi, K. Ishikawa, M. Numazawa, Y. Kawabata, S. Nakajima, R. Fuse, R.C. Boden, L. Kamps, T. Yoneyama, K. Hagino, Y.

- Matsumoto, K. Hosokawa, S. Kasahara, J.S. Hiraga, K. Mitsuda, M. Fujimoto, M. Ueno, A. Yamazaki, H. Hasegawa, T. Mitani, Y. Kawakatsu, T. Iwata, H. Koizumi, H. Sahara, Y. Kanamori, K. Morishita, D. Ishi, A. Fukushima, A. Inagaki, Y. Ueda, H. Morishita, Y. Tsuji, R. Sekiguchi, T. Murakawa, K. Yamaguchi, R. Ishikawa, D. Morimoto, Y. Yamada, S. Hirai, Y. Nobuhara, Y. A. Leung, Y. Itoigawa, R. Onodera, S. Kotaki, S. Nakamura, A. Kikuchi, T. Matsumoto, M. Hirota, K. Kashiwakura, "GEO-X (GEOspace X-ray imager)", JATIS, 9(3), 034006 (2023)
- [23] T. Minami, M. Katsuragawa, S. Nagasawa, S. Takeda, S. Watanabe, S. Tsuzuki, T. Takahashi, "2-mm-Thick Large-Area CdTe Double-sided Strip Detectors for High-Resolution Spectroscopic Imaging of X-ray and Gamma-ray with Depth-Of-Interaction Sensing", NIMA, 1059, 169024 (2024)
- [24] F. Demachi, Y. Fukui, R. I. Yamada, K. Tachihara, T. Hayakawa, K. Tokuda, S. Fujita, M. I. N. Kobayashi, K. Muraoka, A. Konishi, K. Tsuge, T. Onishi, A. Kawamura, "GMCs and their Type classification in M74: Toward understanding star formation and cloud evolution", PASJ (arXiv:2305.19192)
- [25] T. Ohno, K. Tokuda, A. Konishi, T. Matsumoto, M. Sewilo, H. Kondo, H. Sano, K. Tsuge, S. Zahorecz, N. Goto, N. Neelamkodan, T. Wong, H. Fukushima, T. Takekoshi, K. Muraoka, A. Kawamura, K. Tachihara, Y. Fukui, T. Onishi, "An Unbiased CO Survey Toward the Northern Region of the Small Magellanic Cloud with the Atacama Compact Array. II. CO Cloud Catalog", ApJ, 949, 14 (2023)
- [26] K. Muraoka, A. Konishi, K. Tokuda, H. Kondo, R. E. Miura, T. Tosaki, S. Onodera, N. Kuno, M. I. N. Kobayashi, K. Tsuge, H. Sano, N. Kitano, S. Fujita, A. Nishimura, T. Onishi, K. Saigo, R. I. Yamada, F. Demachi, K. Tachihara, Y. Fukui, A. Kawamura, "ACA CO(J = 2-1) Mapping of the Nearest Spiral Galaxy M33. I. Initial Results and Identification of Molecular Clouds", ApJ, 953, 16 (2023)
- [27] K. O. Cubuk, M. G. Burton, C. Braiding, G. F. Wong, G. Rowell, N. I. Maxted, D. Eden, R. Z. E. Alsaberi, R. Blackwell, R. Enokiya, K. Feijen, M. D. Filipović, M. S. R. Freeman, S. Fujita, M. Ghavam, B. Gunay, B. Indermuehle, K. Hayashi, M. Kohno, T. Nagaya, A. Nishimura, K. Okawa, D. Rebolledo, D. Romano, H. Sano, C. Snoswell, N. F. H. Tothill, K. Tsuge, F. Voisin, Y. Yamane, S. Yoshiike, "The Mopra Southern Galactic Plane CO Survey - data release 4- complete survey", PASA, 40, e047, 13 (2023)
- [28] H. Sano, Y. Yamane, J. Th. van Loon, K. Furuya, Y. Fukui, R. Z. E. Alsaberi, A. Bamba, R. Enokiya, M. D. Filipović, R. Indebetouw, T. Inoue, A. Kawamura, M. Lakićević, C. J. Law, N. Mizuno, T. Murase, T. Onishi, S. Park, P. P. Plucinsky, J. Rho, A. M. S. Richards, G. Rowell, M. Sasaki, J. Seok, P. Sharda, L. Staveley-Smith, H. Suzuki, T. Temim, K. Tokuda, K. Tsuge, K. Tachihara, "ALMA Observations of Supernova Remnant N49 in the Large Magellanic Cloud. II. Non-LTE Analysis of Shock-heated Molecular Clouds", ApJ, 958:53, 9 (2023)
- [29] A. Merloni, G. Lamer, T. Liu1, M. E. Ramos-Ceja, H. Brunner, E. Bulbul, K. Dennerl, V. Doroshenko, M. J. Freyberg, S. Friedrich, E. Gatzert, A. Georgakakis, F. Haberl, Z. Igo1, I. Kreykenbohm, A. Liu1, C. Maitra, A. Malyali, M. G. F. Mayer, K. Nandra, P. Predehl, J. Robrade, M. Salvato, J. S. Sanders, I. Stewart, D. Tubín-Arenas, P. Weber, J. Wilms, R. Arcodia, E. Artis, J. Aschersleben, A. Avakyan, C. Aydar, Y. E. Bahar, F. Balzer, W. Becker, K. Berger, T. Boller, W. Bornemann, M. Brüggen, M. Brusa, J. Buchner, V. Burwitz, F. Camilloni, N. Clerc, J. Comparat, D. Coutinho, S. Czesla, S. M. Dannhauer, L. Dauner, T. Dauser, J. Dietl, K. Dolag, T. Dwelly, K. Egg, E. Ehl, S. Freund, P. Friedrich, R. Gaida1, C. Garrel, V. Ghirardini, A. Gokus, G. Grünwald, S. Grandis, I. Grotova, D. Gruen, A. Gueguen, S. Hämmerich, N. Hamaus, G. Hasinger, K. Haubner, D. Homan, J. Ider Chitham, W. M. Joseph, A. Joyce, O. König, D. M. Kaltenbrunner, A. Khokhriakova, W. Kink, C. Kirsch, M. Kluge, J. Knies, S. Krippendorf, M. Krumpke, J. Kurpas, P. Li, Z. Liu, N. Locatelli, M. Lorenz, S. Müller, E. Magaudda, C. Mannes, H. McCall, N. Meidinger, M. Michailidis, K. Migkas, D. Muñoz-Giraldo, B. Musiimenta, N. T. Nguyen-Dang, Q. Ni, A. Olechowska, N. Ota, F. Pacaud, T. Pasini, E. Perinati, A. M. Pires, C. Pommranz, G. Ponti, K. Poppenhaefer, G. Pühlhofer, A. Rau, M. Reh, T. H. Reiprich, W. Roster, S. Saeedi, A. Santangelo, M. Sasaki, J. Schmitt, P. C. Schneider, T. Schrabback, N. Schuster, A. Schwöpe, R. Seppi, M. M. Serim, S. Shreeram, E. Sokolova-Lapa, H. Starck, B. Stelzer, J. Stierhof, V. Suleimanov, C. Tenzer, I. Traulsen, J. Trümper, K. Tsuge, T. Urrutia, A. Veronica, S. G. H. Waddell, R. Willer, J. Wolf, M. C. H. Yeung, A. Zainab, F. Zangrandi, X. Zhang, Y. Zhang, X. Zheng, "The SRG/eROSITA all-sky survey First X-ray catalogues and data release of the western Galactic hemisphere", A&A, 682, A34 (2024)
- [30] M. Sasaki, J. Robrade, M. G. H. Krause, J. R. Knies, K. Tsuge, G. Pühlhofer, A. Strong, "eROSITA studies of the Carina nebula", A&A, 682, A172 (2024)
- (会議抄録)
- [31] V. Sapienza, M. Miceli, Marco, O. Petruk, A. Bamba, S. Orlando, F. Bocchino, G. Peres, "Unraveling the Effects of Dense Medium on a Near to Bohm-Limit Acceleration in Kepler's SNR", Proceedings of ICRC 2023, in press (arxiv: 2308.13435)

(国内雑誌)

(学位論文)

- [32] 新井 翔大, 「GRAMS 実験に向けた気球搭載液体アルゴン放射線検出器による大気ガンマ線検出の実証」, 修士論文、東京大学、2024 年

(著書)

- [33] Bamba, A. % Williams, B.J. 2022, “Supernova Remnants: Types and Evolution”, Handbook of X-ray and Gamma-ray Astrophysics. Edited by Cosimo Bambi and Andrea Santangelo, 77. doi:10.1007/978-981-16-4544-0-88-1
- [34] Vink, J. & Bamba, A. 2022, “Nonthermal Processes and Particle Acceleration in Supernova Remnants”, Handbook of X-ray and Gamma-ray Astrophysics. Edited by Cosimo Bambi and Andrea Santangelo, 52. doi:10.1007/978-981-16-4544-0-90-1
- [35] A. Bamba, K. Maeda, M. Sasaki, the section editor of “Supernovae, Supernova Remnants, and Diffuse Emission” in Handbook of X-ray and Gamma-ray Astrophysics, Springer, 2022 (doi: <https://doi.org/10.1007/978-981-16-4544-0>)
- [36] H. Tajima, K. Hagino, “Silicon Strip Detectors”, Handbook of X-ray and Gamma-ray Astrophysics, Springer, 2023

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [37] K. Hagino, M. Kitajima, T. Kohmura, I. Kurachi, T. G. Tsuru, M. Yukumoto, A. Takeda, K. Mori, Y. Nishioka, T. Tanaka, “Radiation Damage Effects in X-ray SOI Pixel Sensors with Pinned Depleted Diode Structure”, “2023 IEEE NSS MIC RTSD”, Vancouver, 2023, November 4-11 (oral)
- [38] S. Arai, H. Odaka, K. Hagino, A. Bamba, “Understanding nucleosynthesis by Gamma-Ray and AntiMatter Survey (GRAMS)”, The 1st IReNA-Ukakuren Joint Workshop “Advancing Professional Development in Nuclear Astrophysics and Beyond”, NAOJ, 2023, August 28-September 1 (poster)
- [39] M. Ichihashi, T. Kasuga, H. Odaka, A. Bamba, Y. Kato, S. Katsuda, H. Suzuki, K. Nakazawa, “The evaluation of injection energy to cosmic rays from the gradient of electron temperature near the shock”, the 38th International Cosmic Ray Conference 2023, Nagoya, 2023, July 26-Aug 3 (poster)
- [40] M. Ichihashi, M. Sawada, A. Bamba, K. Hagino, “Post-shock temperature equilibration to be revealed by spatially resolved spectroscopy of SN 1006 with XRISM/Resolve”, The 2nd XRISM Community Workshop, Maryland, 2024, January 17 - 19 (oral)
- [41] T. Iwata, K. Hagino, A. Bamba, S. Takashima, T. Minami, M. Ichihashi, S. Arai, T. Kato, H. Matsushashi, H. Odaka, K. Ishiwata, H. Kuramoto, T. Tamba, “Development of the X-ray imaging polarimeter using micro-pixel CMOS imager”, QBI2023 第5回「量子線イメージング研究会」, Osaka, 2023, September 28-29 (oral)
- [42] T. Iwata, H. Odaka, K. Ishiwata, H. Kuramoto, T. Tamba, K. Hagino, A. Bamba, S. Takashima, T. Minami, M. Ichihashi, S. Arai, T. Kato, H. Matsushashi, “Development of the X-ray polarimeter using CMOS imager: polarization sensitivity of a 1.5 μm pixel CMOS sensor”, The 13th International “Hiroshima” Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD13), Vancouver, 2023, December 4-8 (poster)
- [43] T. Iwata, A. Tanimoto, H. Odaka, A. Bamba, Y. Inoue, “Revealing the circumnuclear environment of Centaurus A through high-resolution X-ray spectroscopy of the iron emission line”, The 2nd XRISM Community Workshop, Maryland, 2024, January 17-19 (oral)
- [44] H. Matsushashi, K. Hagino, Aya.Bamba, A. Takeda, M. Yukumoto, K. Mori, Y. Nishioka, T.G. Tsuru, M. Uenomachi, T. Ikeda, M. Matsuda, T. Narita, H. Suzuki, T. Tanaka, I. Kurachi, T. Kohmura, Y. Uchida, Y. Arai, S. Kawahito, “Evaluation of the X-ray SOI pixel detector with the on-chip ADC”, 13th International “Hiroshima” Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD13), 2023, Vancouver, Canada Dec 02 - 08 (oral)
- [45] H. Matsushashi, K. Hagino, Aya.Bamba, A. Takeda, M. Yukumoto, K. Mori, Y. Nishioka, T.G. Tsuru, M. Uenomachi, T. Ikeda, M. Matsuda, T. Narita, H. Suzuki, T. Tanaka, I. Kurachi, T. Kohmura, Y. Uchida, Y. Arai, S. Kawahito, “Evaluation of the X-ray SOI pixel detector with the on-chip ADC”, QBI2023, Osaka, Japan, September 28-29 (oral)
- [46] S. Takashima, K. Ishiwata, H. Odaka, K. Shirahama, M. Tanaka, T. Hakamada, M. Yoshimoto, S. Arai, M. Ichihashi, T. Kato, A. Bamba, K. Aoyama, T. Shimizu, H. Taniguchi, R. Nakajima, K. Yorita, T. Tamba, S. Watanabe, K. Okuma, T. Nakazawa, H. Yoneda. GRAMS collaboration, “Development of a prototype liquid argon Compton camera”, QBI2023 第5回「量子線イメージング研究会」, Osaka, 2023, September 28-29 (oral)
- [47] Takahiro Minami, Miho Katsuragawa, Shunsaku Nagasawa, Shin' ichiro Takeda, Shin Watanabe, Yutaka Tsuzuki, Tadayuki Takahashi, “2 mm Thick CdTe Double-sided Strip Detectors with Large Area and Modeling the Response for Depth-Of-Interaction Sensing”, 2023 Symposium on Radiation Measurements and Applications (SORMA XIX), Michigan, 2023, May 22-25 (oral)

- [48] K. Tsuge, Y. Fukui, K. Higashino, K. Tokuda, T. Onishi, H. Sano, A. Konishi, K. Tachihara, R. Yamada, K. Muraoka, T. Wong, M. Sewilo, R. Chen, S. Madden, R. Indebetouw, T. Inoue, M. Sasaki, A. Kawamura, V. Lebouteiller, M. Meixner, T. Minamidani, N. Mizuno, O. Nayak, A. Nishimura, K. Saigo, S. Zahorecz, "Massive star formation scenario in the LMC probed by the ALMA ACA Molecular Cloud Survey", "Protostars and Planets VII", Kyoto, 2023, April 10–15 (poster)
- [49] K. Tsuge, Y. Fukui, K. Higashino, K. Tokuda, T. Onishi, H. Sano, A. Konishi, K. Tachihara, R. Yamada, K. Muraoka, T. Wong, M. Sewilo, R. Chen, S. Madden, R. Indebetouw, T. Inoue, M. Sasaki, A. Kawamura, V. Lebouteiller, M. Meixner, T. Minamidani, N. Mizuno, O. Nayak, A. Nishimura, K. Saigo, S. Zahorecz, "ALMA at 10 years: Past Present and Future", Chile, 2023, December 4–8 (poster)
- 招待講演
- [50] A. Bamba, "Spectral break of energetic pulsar wind nebulae detected with wideband X-ray observations", "PWN/PeVatron workshop", Columbia U./online, 2023, July 18–20 (invited)
- (国内会議)
- 一般講演
- [51] 馬場 彩、樫山和己、木坂将大、寺田幸功、高橋忠幸、南喬博、「大質量高速自転白色矮星 ZTFJ190132.9+145808.7 は X 線パルサーか」。日本天文学会春季年会、東京大学/オンライン、2024 年 3 月 11–15 日 (口頭)
- [52] 萩野浩一、北島正準、幸村孝由、倉知郁生、鶴剛、行元雅貴、武田彩希、森浩二、西岡祐介、田中孝明、「SOI 技術を用いた新型 X 線撮像分光器の開発 58: PDD 構造を持つ X 線 SOI ピクセル検出器の放射線損傷による性能劣化機構の研究」、日本天文学会秋季年会、名古屋大学、2023 年 9 月 20–22 日 (口頭)
- [53] 新井 翔大、加藤 辰明、馬場 彩、小高 裕和、高嶋 聡、田中 雅士、袴田 知宏、善本 真梨那、寄田 浩平、青山 一天、内海 和伸、中島 理幾、石川 皓貴、丹波 翼、中澤 知洋、大熊 佳吾、辻 直美、深沢 泰司、高橋 弘充、須田 祐介、荒牧 嗣雄、Karagiorgi Georgia (Columbia University)、GRAMS コラボレーション、「GRAMS 計画 10: 液体アルゴン TPC 気球搭載実験」、日本天文学会秋季大会、名古屋大学、2023 年 9 月 20–22 日 (口頭)
- [54] 新井 翔大、加藤 辰明、高嶋 聡、馬場 彩、小高 裕和、袴田 知宏、善本 真梨那、青山 一天、内海 和伸、田中 雅士、中島 理幾、寄田 浩平、丹波 翼、辻 直美、荒牧 嗣夫、高橋 弘充、大熊 佳吾、中澤 知洋、「GRAMS 実験 17: JAXA 大樹町気球工学試験 B23-06 結果報告①」、日本物理学会春季大会、オンライン、2024 年 3 月 18–21 日 (口頭)
- [55] 加藤辰明、Vincenzo Sapienza、萩野浩一、馬場彩、山崎了、佐野栄俊、鈴木寛大、「NuSTAR を用いた RCW86 北東部の広帯域観測」、日本天文学会秋季大会、名古屋大学、2023 年 9 月 20–22 日 (口頭)
- [56] 高嶋 聡、石渡幸太、小高裕和、白濱健太郎、田中雅士、袴田知宏、善本真梨那、新井翔大、市橋正裕、加藤辰明、馬場彩、青山一天、清水虎牙、谷口 日奈子、中島理幾、寄田浩平、丹波翼、渡辺伸、大熊佳吾、中澤知洋、米田浩基、GRAMS コラボレーション、「GRAMS 実験 15: 液体アルゴンコンプトンカメラ実証機の開発状況」。日本物理学会秋季大会、東北大学、2024 年 9 月 16 日 (口頭)
- [57] 市橋正裕、春日知明、小高裕和、馬場彩、加藤佑一、勝田哲、鈴木寛大、中澤知洋、「超新星残骸 SN 1006 北西部衝撃波の電子熱緩和過程の調査」、日本天文学会秋季大会、名古屋大学、2023 年 9 月 21 日 (口頭)
- [58] 馬場彩、加藤佑一、春日知明、勝田哲、鈴木寛大、小高裕和、中澤知洋、「SN1006 衝撃波近傍領域の電子温度変化と宇宙線へのエネルギー流出の関連」、高エネルギー宇宙物理学研究会 2023、東京大学、2023 年 11 月 27 日–29 日 (ポスター)
- [59] 市橋正裕、馬場彩、勝田哲、鈴木寛大、「衝撃波近傍の熱緩和過程: Cygnus Loop」、SNR Workshop 2024、長良川国際会議場、2024 年 2 月 29 日–3 月 1 日 (口頭)
- [60] 岩田季也、萩野浩一、新井翔大、高嶋聡、南喬博、市橋正裕、馬場彩、加藤辰明、松橋裕洋、高橋忠幸、長澤俊作、小高裕和、丹波翼、渡辺伸、成影典之、「CMOS イメージセンサを用いた硬 X 線撮像偏光計の開発 VI、日本天文学会秋季年会、名古屋大学、2023 年 9 月 20–22 日 (口頭)
- [61] 岩田季也、萩野浩一、市橋正裕、新井翔大、加藤辰明、松橋裕洋、馬場彩、高嶋聡、南喬博、小高裕和、石渡幸太、倉本春希、丹波翼、「CMOS イメージャを用いた X 線偏光撮像システムの開発 XIII: 1.5 μm センサの偏光測定性能評価」、日本物理学会春季大会、オンライン、2024 年 3 月 18–21 日 (口頭)
- [62] H. Matsushashi, K. Hagino, Aya.Bamba, A. Takeda, M. Yukumoto, K. Mori, Y. Nishioka, T.G. Tsuru, M. Uenomachi, T. Ikeda, M. Matsuda, T. Narita, H. Suzuki, T. Tanaka, I. Kurachi, T. Kohmura, Y. Uchida, Y. Arai, S. Kawahito, "XR-PIX9 搭載 on-chip ADC の評価", 日本天文学会秋季年会、名古屋大学、2023 年 9 月 20–22 日 (口頭)
- [63] H. Matsushashi, K. Hagino, Aya.Bamba, A. Takeda, M. Yukumoto, K. Mori, Y. Nishioka, T.G. Tsuru, M. Uenomachi, T. Ikeda, M. Matsuda, T. Narita, H. Suzuki, T. Tanaka, I. Kurachi, T. Kohmura, Y. Uchida, Y. Arai, S. Kawahito, "XR-PIX9 搭載 on-chip ADC の評価", SOI 量子イメージングセンサ研究会、東京理科大学、2023 年 12 月 21–22 日 (口頭)
- [64] H. Matsushashi, K. Hagino, A. Bamba, "強磁場中性子星の広帯域 X 線スペクトル解析", 天体若手夏の学校、2023 年 8 月 1 日–4 日 (口頭)
- [65] Takahiro Minami, "FOXSI-4 硬 X 線カメラのレビューと観測方針", X 線集光撮像分光観測で挑む太陽

- フレア高エネルギー現象の理解, Kavli IPMU, Univ. of Tokyo (2024 年 2 月 29 日)
- [66] K. Tsuge, M. Sasaki, J. Knies, F. Harbel, C. Maitra, M. Fillipovic, Lister Staveley-Smith, B. Koribalski, Jürgen Kerp, D. Iono, J. Ueda, K. Tokuda, H. Sano, Y. Fukui, K. Tachihara, K. Bekki, T. Inoue, M. Finn, T. Onishi, K. Muraoka, K. Higashino, A. Konishi, T. Wong, N. M. McClure-Griffiths, C. Rosie, N. Naslim, A. Bamba, "Exploring ISM evolution through X-ray and radio emissions", "ngVLA SWG 1+2 合同会議", 国立天文台/オンライン, 2023 年 6 月 5 日 (口頭)
- [67] 柘植 紀節, 馬場 彩, 佐々木 愛美, Knies Jonathan, 福井 康雄, 立原 研悟, 佐野 栄俊, 大西 利和, 「X 線と電波で探る「星の誕生から終焉」までの星間ガスの進化」, 日本天文学会秋季年会, 名古屋大学, 2023 年 9 月 20-22 日 (口頭)
- [68] 柘植 紀節「ASKAP/MeerKAT ISM 論文レビュー 1」, 「SKA precursor による星間物質研究ワークショップ 2023」, 名古屋大学, 2023 年 11 月 16-17 日 (口頭)
- [69] 柘植 紀節, 馬場 彩, 佐々木 愛美, Knies Jonathan, 福井 康雄, 立原 研悟, 佐野 栄俊, 大西 利和, 「大マゼラン雲における銀河間潮汐相互作用による星間ガスの進化と星形成」, 「初代星・初代銀河研究会 2023」, 北海道大学, 2023 年 11 月 20-22 日 (口頭)
- 招待講演
- [70] 馬場 彩, 「X 線で見える天の川銀河 - 銀河面サーベイと多波長協調」, 「プラネタリウムで俯瞰する多波長全天/広域サーベイ」, 名古屋市科学館/ハイブリッド, 2023 年 7 月 19-20 日
- [71] 馬場 彩, 「XRISM 時代のマルチメッセンジャー天文学」, 「マルチメッセンジャー天文学の展開」, ICRR/ハイブリッド, 2023 年 11 月 1-2 日
- [72] 馬場 彩, 「XRISM のサイエンス - 観測的宇宙論とからめて -」, 「第 12 回観測的宇宙論ワークショップ」, 佐賀大学/ハイブリッド, 2023 年 12 月 11-13 日
- [73] 萩野 浩一, 「PDD 構造を持つ X 線 SOI ピクセル検出器の放射線耐性の実験的検証とその物理メカニズム」, 「SOI 量子イメージセンサ研究会」, 東京理科大学, 2023 年 12 月 21-22 日
- [74] 柘植 紀節, 「eROSITA による高感度 X 線掃天観測」, 「プラネタリウムで俯瞰する多波長全天/広域サーベイ」, 名古屋市科学館/ハイブリッド, 2023 年 7 月 19-20 日
- [75] 柘植 紀節, 「eROSITA による高感度 X 線掃天観測 - 多波長観測との相乗効果 -」, 「マルチメッセンジャー天文学の展開」, ICRR/ハイブリッド, 2023 年 11 月 1-2 日
- [76] 柘植 紀節, "Evolution of the Interstellar Medium Explored by X-ray and radio Observations", 宇宙電波, 宇宙電波懇談会シンポジウム, 国立天文台, 2024 年 3 月 5 日 (セミナー)
- [77] 馬場 彩, 「X-ray observations of supernova remnants - Latest status and future -」, 国立天文台コロキウム, 2023 年 11 月 15 日
- [78] 馬場 彩, 「目には見えない激しく熱い宇宙を探る - X 線天文学 -」, 新宿高校分野別模擬講義, オンライン (2023 年 10 月 11 日)
- [79] Vincenzo Sapienza, "X-ray study on the synchrotron emission in Kepler's SNR", RIKEN (2023 年 5 月 19 日)
- [80] Vincenzo Sapienza, "Probing X-ray Emission mechanisms in SNRs: thermal and non-thermal perspectives", Kyoto University (2023 年 6 月 6 日)
- [81] Vincenzo Sapienza, "Probing X-ray Emission mechanisms in SNRs: thermal and non-thermal perspectives", ISAS/JAXA (2023 年 6 月 29 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、この高温高密度の原始宇宙がどうやって作り出されたのかを調べ、宇宙の進化が何によって支配されているのか、宇宙物理の、そして素粒子物理の根本にも関わりうる謎を解き明かすことを目指している。

インフレーション仮説によれば、宇宙創成 10^{-32} 秒の間に時空の加速度的膨張が起き、高温高密度の原始宇宙が作られた。この仮説の決定的証拠となるのが重力場の量子ゆらぎに起因する「原始重力波」である。この重力波が、「B モード」と呼ばれる負のパリティを持つパターンを、CMB のおよそ 2 度の角度スケールに刻印する。我々が探索するこのパターンが検出されれば、インフレーション宇宙論を証明するだけでなく、重力の量子化の確認という、現代物理学における一大ブレイクスルーとなる。

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・アタカマ高地で観測を継続してきた POLARBEAR 実験、その後継である Simons Array 実験を通して研究を進めてきた。これに加えて、Simons Array と Atacama Cosmology Telescope (ACT) のグループを統合して発足した Simons Observatory 実

験においても、装置開発や観測データの解析を進めている。

CMB を通した物理探索に加えて、自前の実験系を用いた暗黒物質探索も目指している。アクシオンや暗黒光子といった比較的エネルギーの低い暗黒物質の探索では、標準量子限界によって感度が制限され得る。本研究では、標準量子限界に制限されことなく暗黒物質の探索を行うためにマグノンと量子ビットを用いた測定系の構築を進めている。

6.5.1 Polarbear 実験

POLARBEAR 実験は、原始重力波 B モードと重力レンズ効果の両方を同時に測定する事を目指してデザインされている。POLARBEAR 実験は 2012 年から 2016 年末まで観測を行い、これまでに 10 報以上の科学論文を出版してきた。2023 年度には、望遠鏡の較正に用いられる TauA のデータを用いて Axion-like particle に制限を与えるべくデータ解析が進められた。

6.5.2 Simons Array 実験

Simons Array 実験は POLARBEAR 実験の後継であり、POLARBEAR の 6 倍に当たる一台あたりおよそ 7,000 チャンネルの検出器を擁する望遠鏡を、最終的に合計 3 台同時運用することで POLARBEAR 実験の約 20 倍の感度を実現することを目指している。

すでに運用を開始した 1 台目望遠鏡の較正観測や科学観測を継続する中で、日下研究室はデータ解析を中心となって率いてきた。データ較正手法を確立・改善した他、Planck 衛星による観測結果との cross-correlation や null-test といった CMB 解析の肝となる枠組みも開発した。2023 年度からの新しいプロジェクトとして、較正データを用いた axion-like particle の探索も進めている。POLARBEAR 実験と Simons Array 実験の結果を合わせることによって高感度な探索を進める計画である。

さらに、2023 年度は 2 台目望遠鏡も物理観測を開始した。日下研究室からも学生がチリのサイトに赴き、観測開始に向けた現地作業に大いに貢献した。現在も物理データの取得を継続しつつ、データ解析を進めている。ここでも、1 台目望遠鏡のデータ解析の経験をもとに日下研究室のメンバーたちが中心的な役割を担っている。

6.5.3 Simons Observatory 実験

Simons Observatory は、2016 年に発足した史上最大規模の地上 CMB 実験・国際共同研究グループであり、当研究室もその推進に中心的な役割を果たす。Simons Observatory 実験では、インフレーション測定における感度向上に特化した口径 42 cm 程度の小口径望遠鏡群と、重力レンズ効果や SZ 効果の



図 6.5.12: チリ観測所での Simons Array2 台目望遠鏡建設作業の様子。検出機較正装置などの導入を完了させ物理観測を開始させた。

測定を主眼に置いた口径 6 m の大口径望遠鏡との両方を建設し、これまでの測定を遙かに上回る精度で CMB を測定し、宇宙の始まりから進化までの姿を解き明かす。本研究室では、特に小口径望遠鏡群に注力して開発を行ってきた。Kavli IPMU の共同研究グループとともに、光学設計および光学筒の設計を進め、直径 460 mm の単結晶シリコンレンズを有する屈折光学系を採用し、光学筒自身からの熱放射を抑えるため 1 K まで冷却するという基本設計を固めた。焦点面は希釈冷凍機により 100 mK 以下まで冷却される。本研究室は、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。京都大学の修士学生と共同開発を行い、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、岡山大学との共同研究により開発した世界最大の内径 55 cm の超伝導ベアリングは、Simons Observatory に採用され、3 台の望遠鏡システムへの統合・評価が行われた。現在 Simons Observatory 実験はチリの観測所での望遠鏡建設を進めている最中である。日下研究室からも複数のメンバーが現地作業に参加し、建設作業に貢献した (図 6.5.13, 図 6.5.14)。

2023 年度には新たに初期データの解析と新望遠鏡に向けた装置開発も始動した。初期データの解析では、現在テスト観測が進められている 2 台の望遠鏡について、特性を理解するための較正データの解析



図 6.5.13: Simons Observatory 望遠鏡の現地作業の様子。光学筒や希釈冷凍機を望遠鏡の中に導入した。



図 6.5.14: Simons Observatory 望遠鏡の現地作業の様子。現在、2 台目望遠鏡までが現地に建設された。写真は 2 台目望遠鏡の準備作業の様子。

やデータ中に含まれるノイズを削減するためのフィルター開発を進めている。また、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」の開発を、共通する要素を多く含む Simons Array のパイプライン開発と連携させながら進め、CMB 信号をいち早く検出することを目指している。新望遠鏡に向けた装置開発は、Simons Observatory の中でも日本チームが主導する 4 台目望遠鏡に向けた研究である。4 台目望遠鏡では、これまで 3 台の望遠鏡とは異なる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。昨年度までの研究結果の知見を活かしつつ、望遠鏡の土台から光学筒、半波長板などのキーテクノロジーまで新たな研究開発を進めている。

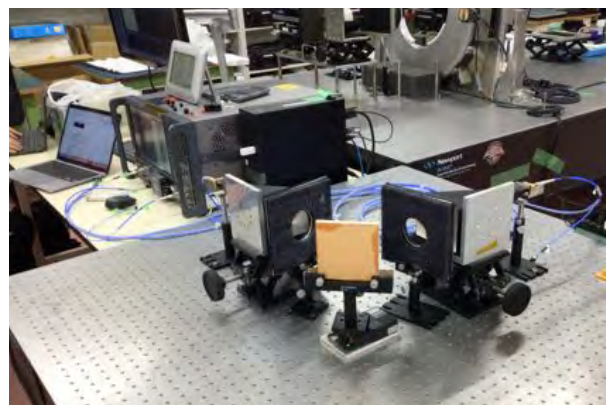


図 6.5.15: 防反射加工を施したフィルターの光学特性を評価している様子。Kavli IPMU と協力し測定を行った。

6.5.4 次世代 CMB 実験用 装置開発

超伝導体を用いた検出器として、超伝導力学的インダクタンス検出器および超伝導転移端センサが挙げられるが、いずれも従来の半導体検出器などでは達成不可能だった高感度・多チャンネル化が達成できる。CMB 観測実験、暗黒物質探索実験を始め、素粒子・宇宙分野の実験でも採用例が増加している。これまでに、希釈冷凍機を利用した検出器の試験環境を構築し超伝導検出器の測定・評価を行ってきた。超伝導検出器はその低い検出閾値からミリ波の検出が可能であるが、そのためにはミリ波回路を検出器に統合する必要がある。2023 年度はこのミリ波回路の開発を行っており、設計・試作を行った。超伝導検出器との統合試験に向けて理解を進めている。また、多チャンネル・高密度の検出器アレイでは、光子のボース・アインシュタイン統計性による光子相関の効果が無視できず、検出器アレイの感度が影響を受けることについても研究を進めた。この効果と、それが望遠鏡感度に与える影響と感度最適化の指針を、原著論文としてまとめた。

光学素子の分野においては、半波長板用サファイアや赤外光フィルタ用アルミナなど、高屈折率素材のための広帯域防反射加工の開発を、高エネルギー加速器研究機構および Kavli IPMU との共同研究により進めている。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った。

6.5.5 マグノンをを用いたアクション探索

強い CP 問題を解決するために導入されたアクションは、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。アクショ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。

2023 年度は R&D として小サイズでの開発を進めた。有限要素シミュレーションで強磁性結晶を導入するキャビティを設計、作成した。キャビティを 2 mm サイズの強磁性結晶とともに希釈冷凍機内ヘインストールすることでマグノン励起による共鳴ピークを観察することができた。さらに、より一様性の高い磁場を目指したキャビティの改良や 400 倍の大きさの強磁性結晶を用いた測定に向けて準備を進めている。

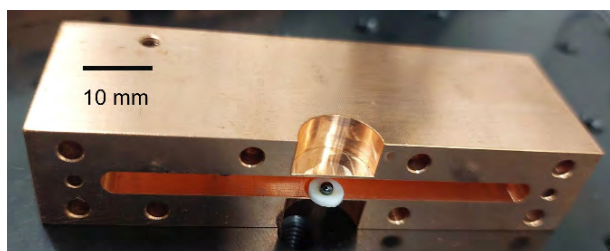


図 6.5.16: キャビティ内に直径 2mm の強磁性結晶 (YIG) の球を導入したキャビティ-マグノンハイブリッド系

<報文>

(原著論文)

- [1] Masaaki Murata *et al.*, “The Simons Observatory: A fully remote controlled calibration system with a sparse wire grid for cosmic microwave background telescopes,” *Rev. Sci. Instrum.*, **94** 124502 (2023)
- [2] POLARBEAR Collaboration, Shunsuke Adachi *et al.*, “Constraints on axionlike polarization oscillations in the cosmic microwave background with POLARBEAR,” *Phys. Rev. D*, **108**, 043017 (2023)
- [3] Kana Sakaguri *et al.*, “Anti-reflection coating with mullite and Duroid for large-diameter cryogenic sapphire and alumina optics,” *Applied Optics*, **63**(6) 1618-1627 (2024)
- [4] Junna Sugiyama, Tomoki Terasaki *et al.*, “The Simons Observatory: Development and Optical Evaluation of Achromatic Half-Wave Plates,” *Journal of Low Temperature Physics*, **214** 173-181 (2024)
- [5] Junna Sugiyama, Haruki Nishino, Akito Kusaka, “Precipitable water vapour measurement using GNSS data in the Atacama Desert for millimetre and submillimetre astronomical observations,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **528** 4582-4590 (2024)
- [6] Kyohei Yamada *et al.*, “The Simons Observatory: Cryogenic Half Wave Plate Rotation Mechanism for the Small Aperture Telescopes,” *Rev. Sci. Instrum.*, **95** 24504 (2024)
- [7] POLARBEAR Collaboration, Shunsuke Adachi *et al.*, “Exploration of the polarization angle variability of the Crab Nebula with POLARBEAR and its application to the search for axion-like particles,” *arXiv:2403.02096* (2024), submitted to *Phys. Rev. D*
- [8] Charles A Hill and Akito Kusaka, “Photon noise correlations in millimeter-wave telescopes,” *Applied Optics*, **63** 7, pp. 1654-1675 (2024)

(学位論文)

博士論文

- [9] 山田恭平, “Advancement of Millimeter-wave Polarization Modulator and Millimeter-wave Polarization Oscillation Search for Ultralight Dark Matter”
- [10] 西ノ宮ゆめ, “Measurement and Modeling of Atmospheric Fluctuations and Their Correlations for Future Cosmic Microwave Background Experiments”

修士論文

- [11] 佐藤滯, “CMB 偏光観測に用いる超伝導力学的インダクタンス検出器とピアのない交差回路の開発”
- [12] Yaman Singh Shrestha, “Research and development towards an axion search experiment using quantum sensing of magnons”

(国際会議)

一般講演

- [13] Junna Sugiyama, Tomoki Terasaki *et al.* for Simons Observatory Collaboration, “Development and Optical Evaluation of Achromatic Half-wave Plate for Simons Observatory,” *Low Temperature Physics* 2023, Daejeon, Korea (2023/7)
- [14] Yaman Singh Shrestha, Akito Kusaka, Kenji Kuchi, Yasunobu Nakamura, Keisuke Kato, “Research and development towards an axion search experiment using quantum sensing of magnons,” *International Workshop on Multi-probe approach to wavy dark matters (JSPS Core to Core CMB workshop 2023)*, Korea University, Seoul, South Korea (2023/12)
- [15] Kana Sakaguri for POLARBEAR Collaboration, “The Status of the Simons Array Experiment and the Science Cases with Circular Polarization Measurements,” *International Symposium on Trans-Scale Quantum Electronics (TSQS) 2024*, The University of Tokyo (2024/2)
- [16] Junna Sugiyama, Haruki Nishino, Akito Kusaka, “Precipitable Water Vapor Measurement using GNSS Data in the Atacama Desert for Millimeter and Submillimeter Astronomical Observations,” *International Symposium on Trans-Scale Quantum Electronics (TSQS) 2024*, The University of Tokyo (2024/2)

- [17] Yaman Singh Shrestha, Akito Kusaka, Kenji Kuchi, Yasunobu Nakamura, Keisuke Kato, “Research and development towards an axion search experiment using quantum sensing of magnons,” 15th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2024), Okayama University (2024/3)

(国内会議)

一般講演

- [18] 佐々木大地, 杉山純菜, 山田恭平, Bryce Bixler, 桜井雄基, 日下暁人, Simons Observatory Collaboration, “Simons Observatory 実験における偏光変調器の超伝導磁気ベアリングの最適化と設計,” 日本物理学会 第 78 回年次大会, 東北大学 (2023/9)
- [19] 樋口 昌樹, 木内 健司, 日下 暁人, 鈴木 惇也, 田島 治, 長谷川 雅也, “Simons Observatory 実験における低周波数帯小口径望遠鏡の熱伝導機構の最適化,” 日本物理学会 2023 年秋季年会, 東北大学 (2023/9)
- [20] 佐藤 澤, 木内健司, “両偏波観測を有する超伝導検出器に向けたミリ波回路の開発,” 日本物理学会 第 78 回年次大会, 東北大学 (2023/9)
- [21] 杉山純菜, 西野玄記, 日下暁人, “衛星測位システムを用いた可降水量測定のミリ波・サブミリ波観測への応用,” 日本天文学会 2023 年秋季年会, 名古屋大学 (2023/9)
- [22] シン シュレスタ ヤマン, 日下暁人, 木内健司, 中村泰信, 加藤 啓輔, “量子非破壊検出を用いたアクシオンダークマター探索: YIG 結晶の大型化に向けた開発,” 日本物理学会 2023 年秋季年会, 東北大学 (2023/9)
- [23] 杉山純菜, 他 Simons Observatory コラボレーション, “Simons Observatory 実験の現地作業報告: 低温偏光変調器のインストール,” 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン (2024/3)
- [24] 樋口昌樹, 木内健司, 日下暁人, 鈴木惇也, 田島治, 長谷川雅也, “Simons Observatory 実験における小口径望遠鏡の熱伝導機構の最適化及びその周辺構造の設計,” 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン (2024/3)
- [25] 竹内敦人, 他 Simons Observatory コラボレーション, “Simons Observatory 実験における偏光角較正装置の光学評価,” 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン (2024/3)

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、トポロジー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

液晶トポロジカル欠陥の 3 次元ダイナミクス観測

液晶の特徴は配向秩序にあり、その局所的な乱れであるトポロジカル欠陥は、理学的にも工学的にも興味を持たれてきた。我々は、蛍光色素の吸着を用いて線状トポロジカル欠陥の 3 次元動力学を観察し、再結合等の線欠陥固有の現象を捉えることに成功した [13, 18, 24, 43, 45, 58]。立体交差型の再結合について、距離と角度の時間発展に着目し、理論研究者との共同研究を通して理解を深めている [9, 26, 53, 63, 77]。

スポンジ状の粉体

大変形する粒子の集合体は、地滑りなどの地質学的現象から細胞組織などの生体材料まで散見される。我々は、そうした系における粒子の形状変化と集合体の動力学や力学応答との関係を明らかにすべく、リング状の弾性粒子を多数敷き詰め周期的剪断を印可するモデル実験系を構築した (図 6.6.17)。本系において我々は特徴的な液固転移を見出し、その動力学や力学的特徴を明らかにしたほか、摩擦と幾何学的相互作用によって生じる粒子間の実効的引力に基づいて転移現象を説明することに成功した [16, 14, 20, 23, 29, 31, 62, 71, 76, 36, 42]。

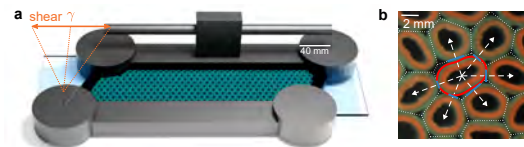


図 6.6.17: スポンジ状粉体のモデル実験。

確率的な粒子輸送のモデル実験

確率的な粒子輸送は、非平衡現象の重要な一分類である。本研究では、中でも理論的数値的研究で重要なモデルである非対称単純排他過程 (ASEP) に注目し、それと類似した粉体のモデル実験系を構築した。一粒子のホッピングや粒子間相互作用は、モデルと整合的な挙動を示している。他粒子系の統計的性質の計測を目指し、204 サイトを持つ大規模格子を設計、構築して、実験を進めている。

6.6.2 生物系の非平衡実験

遊泳バクテリア集団運動の乱流化シナリオ

アクティブマターの集団運動において、時空間的に乱れた集団運動“アクティブ乱流”が幅広く観測される [8, 7, 101, 100]。アクティブ乱流を小さな円形

閉鎖領域に閉じ込めて自由度を制約すると、安定した定常な渦に自己組織化する。我々は、閉じ込め半径を大きくしていくに従って、この渦秩序が乱れて時空カオスに至る乱流化シナリオを調査した。まず、微小流体デバイスを用いた実験により、渦の回転方向が反転し始めることを見出した。さらに、極性を持つアクティブ流体模型の数値計算により、渦の周期的反転現象を発見した。アクティブ流体模型の弱非線形解析により、低次元力学系の導出と周期振動解の解析的導出に成功した。実験・数値計算・解析計算の組み合わせにより、アクティブ乱流の前駆現象として渦の反転・振動が現れることを明らかにした [3, 30, 15, 46, 40, 97, 47, 84, 50, 60, 69, 88, 82, 89, 91, 81, 75, 61, 59]。

生物の集団運動と幾何学・トポロジー

近年、アクティブマター系においても、トポロジカル現象を探索する理論的試みが行われている。例えば、ジャンケン的な相互作用に従い個体数変動する格子系 (図 6.6.18a) を鎖状や籠目格子状につなげ、エッジモードやトポロジカル不変量が議論されている。そこで本研究では、バクテリア集団運動において、理論模型に類似の幾何構造や相互作用を微細加工技術で実現して、トポロジカル現象の実験探究を目指す。円形ウェルで見られる渦 (図 6.6.18b) とチャンネルを組み合わせて非対称構造を作ること、非対称流れを実現しうるデザインを見出している [2, 56, 73, 79]。

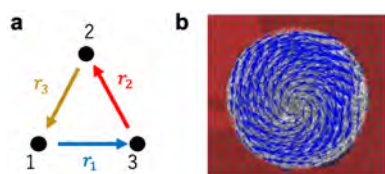


図 6.6.18: アクティブマターのトポロジカル現象探索。(a) 模型の基本構造。(b) 円形ウェル中の菌集団の渦。

バクテリア集団のガラス転移

高密度バクテリア集団が示す物理的特性の理解は、アクティブマター物理学としても、バイオフィームに関連する生命科学としても重要な課題である。我々は、独自の微小流体デバイスによって、運動性の大腸菌集団を様な成長条件下で培養しながら混雑化過程の観察を行い、細胞が活発に運動するアクティブ流体相から、混雑によって運動できなくなるアクティブガラス相への転移現象を発見した。詳細な統計解析によってガラス転移の特徴を分析し、回転自由度と並進自由度が別々に転移する二段階転移を見出したほか、熱的な系との共通点・相違点を明らかにした [12, 19, 22, 28, 35, 37, 38, 41, 48, 94, 95, 96]。

バクテリア集団内の不均一性を生む物理機構

バクテリアの集合体であるバイオフィームは、細胞と細胞外基質で構成される。その集団構造の理解のため、細胞集団における基質生産の時空間的パターンと機構を調べている。微小流体デバイス内の二次元空間で大腸菌を生育させると、一部の細胞がコラン酸という細胞外基質の生産を始めるが、それが細胞集団の配向秩序、特にトポロジカル欠陥と関連することを見出した (図 6.6.19)。この不均一な遺伝子発現誘導は、トポロジカル欠陥における力学的ストレスによるものと考えられる。現在は、微細加工技術を用いて一細菌細胞を加圧する実験系を構築し、遺伝子誘導に必要な圧力の定量や誘導のタイムスケールを調べている。この研究を通じて、細胞集団における各細胞の配向という微小環境の不均一性が集団の形態形成に与える機構を明らかにする [27, 80, 83]。

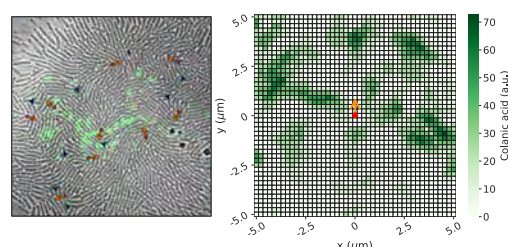


図 6.6.19: 大腸菌集団の細胞外基質遺伝子発現とトポロジカル欠陥 (緑: 遺伝子発現、記号: 欠陥)。

磁気走性バクテリアの集団状態

本研究では、アクティブマターの外場応答の理解を目指し、磁場の方向に向きを揃える磁性細菌の集団運動を計測する実験系の構築に取り組んでいる。本年度は特に、無磁場における磁性細菌の集団運動を調査した。微細加工で設けた円形ウェルに磁性細菌の細胞懸濁液を封入し、無磁場かつ酸素濃度が一樣かつ低濃度の条件化で観察を行うことで、磁性細菌 AMB-1 が高密度状態において局所的に配向することを見出した [11, 57, 65, 74]。

捕食回避における生物の集団運動

一部の生物は群れることで、より良い捕食回避を実現する。本研究では、実際に捕食圧に晒されている生物種であるミナミコメツキガニ (*Mictyris quinotae*) に着目し、集団運動が効果的な捕食回避を与えるメカニズムを、野外実験における実測から解明することを目指している。具体的には、ミナミコメツキガニに対して視覚的な刺激を与えることで集団逃避運動が誘発されること、個体間の相互作用によって逃避状態が伝播することなどを見出している [1, 55, 64, 70, 72, 78]。

6.6.3 非線形動力学によるアプローチ

非平衡界面の大偏差計測のためのアルゴリズム開発

非平衡界面成長を記述する Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 普遍クラスは、ゆらぎの厳密解が実験で検証されるなど、理論と実験の両面から発展が続いている。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、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についても大偏差の性質を決定した。

<受賞>

- [1] 上杉佑人, 新学術領域研究「生命の情報物理学」第7回領域会議ポスター発表賞, 2023年9月22日.
- [2] 内田善人, 新学術領域研究「生命の情報物理学」第7回領域会議ポスター発表賞, 2023年9月22日.

<報文>

(原著論文)

- [3] S. Shiratani, K. A. Takeuchi, D. Nishiguchi, Route to turbulence via oscillatory states in polar active fluid under confinement. arXiv:2304.03306.
- [4] S. Poincloux, P. M. Reis, T. W. J. de Geus, Stick-slip in a stack: How slip dissonance reveals aging. Phys. Rev. Res. **6**, 013080 (2024).
- [5] F. Yokoyama, A. Kling, P. S. Dittrich, Capturing of Extracellular Vesicles Derived from Single Cells of *Escherichia coli*. Lab Chip **24**, 2049 (2024).

(会議抄録・総説)

- [6] 加藤愛理 他, 粒子を含む界面の圧縮: 粒子の異方性や表面粗さの影響. 日本結晶成長学会誌 **50**, 2-02 (2023).
- [7] 西口大貴, 微生物遊泳と壁の協奏現象: 個と集団の制御. 日本機械学会誌 **126**, 14 (2023)
- [8] D. Nishiguchi, Deciphering long-range order in active matter: Insights from swimming bacteria in quasi-2D and electrokinetic Janus particles. J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 121007 (2023).

(国内雑誌)

(学位論文)

- [9] Y. Zushi, Three-dimensional dynamics of reconnecting topological defect lines in liquid crystals. PhD thesis, 2024.
- [10] 柳橋勇太, Kardar-Parisi-Zhang 大偏差の実験計測に向けた重点サンプリング数値計算. 修士論文, 2024.
- [11] T. Goto, Investigation of nematic order in collective motion of magnetotactic bacteria in quasi-2D system, Master thesis, 2024.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [12] H. Lama *et al.*, Glass transition in 2D bacterial suspension. Frontiers in nonequilibrium physics, poster, Kyoto (Japan), July 31, 2023.
- [13] Y. Zushi, Scaling and symmetry of reconnecting topological defect lines in liquid crystal. *ibid.*, oral, July 31, 2023.
- [14] S. Poincloux, K. A. Takeuchi, Flow and deformation of a sponge-like granular media. *ibid.*, poster, July 31, 2023.
- [15] D. Nishiguchi, Emergent chirality in bacterial turbulence at liquid-air interfaces. *ibid.*, poster, Aug. 1, 2023.
- [16] S. Poincloux, K. A. Takeuchi, Flow and deformation of a sponge-like granular media. Perspectives on Non-equilibrium Statistical Mechanics, poster, Kyoto (Japan), Aug. 8, 2023.
- [17] D. Nishiguchi, Y. Takaha, How dimension matters for bacterial swimming: Enhanced attractions in quasi-two dimensions. STATPHYS28, Tokyo (Japan), Aug. 10, 2023.
- [18] Y. Zushi, K. A. Takeuchi, Scaling and symmetry of reconnecting topological defect lines in liquid crystal. *ibid.*, oral, Aug. 11, 2023.
- [19] H. Lama *et al.*, Glassy dynamics in dense bacterial population. *ibid.*, oral, Aug. 14, 2023.
- [20] S. Poincloux, K. A. Takeuchi, Flow and deformation of a sponge-like granular media. *ibid.*, oral, Aug. 14, 2023.
- [21] F. Yokoyama, A. Kling, P. S. Dittrich, Developing of Solitary-Cell Culture Method for Bacteria and Capturing of Extracellular Vesicles Derived from Single *Escherichia coli* Mother Cells. International Conference for Biophysics 2023, oral, Seoul (South Korea), Aug. 15, 2023.
- [22] H. Lama *et al.*, Glassy dynamics in active matter. The 7th International Soft Matter Conference, oral, Osaka (Japan), Sep. 4, 2023.
- [23] S. Poincloux, K. A. Takeuchi, Flow and deformation of a sponge-like granular media. *ibid.*, poster, Sep. 4, 2023.
- [24] Y. Zushi, K. A. Takeuchi, Scaling and symmetry of reconnecting nematic disclinations. *ibid.*, oral, Sep. 5, 2023.
- [25] A. N. Kato *et al.*, Interfacial behaviors of rough colloids. *ibid.*, oral, Sep. 7, 2023.
- [26] Y. Zushi, C. D. Schimming, K. A. Takeuchi, Three-dimensional dynamics of intersecting reconnection of topological defect lines in liquid crystal. Kick-off meeting for “Advanced core-to-core network for the physics of self-organizing active matter”, poster, Kyoto (Japan), Sep. 12, 2023.

- [27] F. Yokoyama, K. A. Takeuchi, Phenotypic Heterogeneity Driven by Spontaneous Microenvironment in *Escherichia coli* Population. *ibid.*, poster, Sep. 12, 2023.
- [28] H. Lama *et al.*, Glass transition in dense bacterial population, *ibid.*, poster, Sep. 12, 2023.
- [29] S. Poincloux, K. A. Takeuchi, Flow and deformation of a sponge-like granular media. *ibid.*, poster, Sep. 12, 2023.
- [30] D. Nishiguchi, Opposite emergent chirality in bacterial turbulence. *ibid.*, poster, Sep. 12, 2024.
- [31] S. Poincloux, K. A. Takeuchi, Flow and deformation of a sponge-like granular media. CISM Advanced Courses on Landslides Mechanics, poster, Udine (Italy), Sep. 12, 2023.
- [32] T. P. Shimizu, D. Nishiguchi, *K. A. Takeuchi, Machine tells you how many variables are at least needed to describe space-time chaos you see. APS March Meeting 2024, oral, Minneapolis (USA), Mar. 6, 2024.
- [33] D. Nishiguchi, How spatial dimensions and confinement influence single & collective bacterial swimming. Active Matter $\times$ Complex Flow, oral, Tokyo (Japan), Mar. 22, 2024.
- [41] K. A. Takeuchi, Structure and dynamics of dense bacterial populations. Kickoff meeting for “Advanced core-to-core network for the physics of self-organizing active matter”, invited talk, Kyoto (Japan), Sep. 11, 2023.
- [42] S. Poincloux, Interactions at entanglements. Topology and Geometry in Entangled Structures Workshop, invited talk, Univ. Pennsylvania (USA), Sep. 29, 2023.
- [43] K. A. Takeuchi, 3D effects of topological defects in passive and active liquid crystal. East Asia Joint Seminars On Statistical Physics 2023, invited talk, Yokohama (Japan), Oct. 12, 2023.
- [44] K. A. Takeuchi, Topological defects as “fingerprints” of cell populations and their 3D effect. IEEE-NanoMed 2023, invited talk, OIST (Japan), Dec. 7, 2023.
- [45] K. A. Takeuchi, 3D effect of topological defects in liquid crystal and living cells. Statphys Kolkata XII, invited talk, Kolkata (India), Dec. 19, 2023.
- [46] D. Nishiguchi, Vortex reversal as a precursor of active turbulence, Advanced core-to-core network for the physics of self-organizing active matter, invited talk, Wenzhou (China), Jan. 29, 2024.

招待講演

- [34] F. Yokoyama, Development of a microfluidic device for detection of single-cell-derived extracellular vesicles by solitary-cell culture of *Escherichia coli*. MiCS International Seminar, invited talk, Tsukuba Univ. (Japan), May 15, 2023.
- [35] K. A. Takeuchi, Structure and dynamics of dense bacterial populations. Building a bridge between non-equilibrium statistical physics and biology, invited talk, Cambridge (UK), July 6, 2023.
- [36] S. Poincloux, Interactions in soft assemblies. Sigma Lab seminar, invited talk, Keio Univ. (Japan), Jul. 28, 2023.
- [37] K. A. Takeuchi, Structure and dynamics of dense bacterial populations. Frontiers in nonequilibrium physics, invited talk, Kyoto (Japan), Aug. 1, 2023.
- [38] K. A. Takeuchi, Bacterial Glass. 9th International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems, invited talk, Chiba (Japan), Aug. 13, 2023.
- [39] A. N. Kato, K. A. Takeuchi, Active-passive interface with bacterial turbulence. Japan-China Workshop on Bio-Soft Matter 2023, invited talk, Chiba (Japan), Sep. 1, 2023.
- [40] D. Nishiguchi, Topology and chirality in bacterial active turbulence, Japan-China Workshop on Bio-Soft Matter 2023, invited talk, Chiba (Japan), Sep. 1, 2023.

(国内会議)

一般講演

- [47] 西口大貴, アクティブ乱流の3次元構造と制御方法の開拓. JST さきがけ「複雑流動」第4回領域会議, ポスター・講演, 2023年4月13日.
- [48] H. Lama *et al.*, Glassy dynamics in microbial life. 第19回 21世紀大腸菌研究会, 講演, 鶴岡, 2023年6月29日.
- [49] 横山文秋, Andl  Kling, Petra S. Dittrich, 大腸菌一細胞レベルの細胞外膜小胞検出を目指したマイクロ流体デバイスの開発, 会議同上, ポスター, 2023年6月29日.
- [50] 西口大貴, 複雑環境による群体のトポロジカル制御と力学計測. 第1回「群体理工学」研究会, 講演, 京都, 2023年7月11日.
- [51] 後藤崇志, 西口大貴, 竹内一将, 生物集団運動の配向秩序の外場応答: 磁性細菌による測定実験系の構築. 第63回 生物物理若手の会夏の学校, ポスター, 滋賀, 2023年9月4-7日.
- [52] 竹内一将, バクテリア集団の3次元成長とトポロジカル欠陥. 日本物理学会第78回年次大会, 講演, 東北大学, 2023年9月16日.
- [53] 図司陽平, Cody D. Schimming, 竹内一将, 液晶トポロジカル欠陥の交差型再結合の3次元ダイナミクス. 会議同上, 講演, 2023年9月18日.
- [54] 竹内一将, 他, 等方的スピン鎖 KPZ: 普遍クラスの部分的出現. 会議同上, 講演, 2023年9月19日.
- [55] 上杉佑人, 他, ミナミコメツキガニ集団の行動と機能. 新学術領域研究「生命の情報物理学」第7回領域会議, ポスター, 新潟, 2023年9月21日.

- [56] 内田善人, 西口大貴, 竹内一将, 幾何学的形状がもたらす非自明なバクテリア集団運動. 会議同上, ポスター, 2023 年 9 月 21 日.
- [57] 後藤崇志, 西口大貴, 竹内一将, バクテリア集団運動の磁場応答と立体相互作用, 走気性. 会議同上, ポスター, 2023 年 9 月 21 日.
- [58] 竹内一将, 液晶&細胞集団におけるトポロジカル欠陥の 3 次元効果. 会議同上, ポスター, 2023 年 9 月 21 日.
- [59] 西口大貴, アクティブ乱流は如何にして乱れるか? 集団運動秩序の構造予測と制御とキラリティー. 日本流体力学会年会 2023 さきがけ「複雑流動」特別セッション, フラッシュトーク・ポスター, 東京農工大学, 東京, 2023 年 9 月 21 日.
- [60] 西口大貴, 気液界面におけるバクテリア乱流のキラリティー発現. 日本流体力学会年会 2023, 東京農工大学 講演, 東京, 2023 年 9 月 22 日.
- [61] 西口大貴, アクティブ乱流の 3 次元構造と制御方法の開拓: 集団運動秩序の構造予測と制御とキラリティー. 第 17 回さきがけ研究者交流会, ポスター, JST 東京別館, 東京, 2023 年 10 月 20 日.
- [62] S. Poincloux, K. A. Takeuchi, Jamming of compressible granular media. 第 22 回関東ソフトマター研究会, 講演, 東京都立大学, 2023 年 10 月 21 日.
- [63] 図司陽平, 液晶トポロジカル欠陥の交差型再結合の 3 次元ダイナミクス. 会議同上, ポスター, 2023 年 10 月 21 日.
- [64] 上杉佑人, 他, ミナミコメツキガニ集団の群れ行動と群れ機能. 会議同上, ポスター, 2023 年 10 月 21 日.
- [65] 後藤崇志, 西口大貴, 竹内一将, 磁性細菌の集団運動と磁気応答. 会議同上, ポスター, 2023 年 10 月 21 日.
- [66] 嶋屋拓朗, 大腸菌集団における束状凝集現象の深層学習による全自動定量化の試み. ipi-ダイキン シンポジウム, ポスター, 東京大学, 2023 年 10 月 24 日.
- [67] 柳橋勇太, TASEP における KPZ 大偏差の population dynamics シミュレーション. 会議同上, ポスター, 2023 年 10 月 24 日.
- [68] 竹内一将, 散逸系の時空カオス現象は何個の変数で記述できるか? 会議同上, 講演, 2023 年 10 月 25 日.
- [69] 西口大貴, アクティブ乱流の 3 次元構造と制御方法の開拓. JST さきがけ「複雑流動」第 5 回領域会議, ポスター・講演, 北海道, 2023 年 10 月 27 日.
- [70] Y. Uesugi *et al.*, Swarm behaviors and functions of soldier crabs. 2023 年生物リズム若手研究者の集い, ポスター, 静岡, 2023 年 11 月 26 日.
- [71] S. Poincloux, K. A. Takeuchi, Jamming of compressible granular media. 第 11 回ソフトマター研究会, 講演, 東京大学, 2023 年 12 月 20 日.
- [72] Y. Uesugi *et al.*, Collective escape of soldier crabs. 生物普遍性ワークショップ, ポスター, 湯河原, 2024 年 2 月 20 日.
- [73] Y. Uchida, D. Nishiguchi, K. A. Takeuchi, Geometry vs. Collective Motion. 会議同上, ポスター, 2024 年 2 月 20 日.
- [74] T. Goto, D. Nishiguchi, K. A. Takeuchi, Investigations of collective motion of magnetotactic bacteria in quasi-2D system. 会議同上, ポスター, 2024 年 2 月 20 日.
- [75] 西口大貴, Vortex in Active Matter...and beyond. 会議同上, ポスター, 2024 年 2 月 20 日.
- [76] S. Poincloux, K. A. Takeuchi, Jamming of sponge-like granular media. 会議同上, ポスター, 2024 年 2 月 20 日.
- [77] 図司陽平, Three-dimensional dynamics of intersecting reconnections of topological defect lines in nematic liquid crystal. 新学術領域研究「生命の情報物理学」終了報告会・第 8 回領域会議, ポスター, 東京大学, 2024 年 3 月 4-5 日.
- [78] Y. Uesugi *et al.*, Collective escape of soldier crabs. 会議同上, ポスター, 2024 年 3 月 4-5 日.
- [79] 内田善人, 西口大貴, 竹内一将, Geometry vs. Bacterial Collective Motion: 幾何学的構造による集団運動の制御. 会議同上, ポスター, 2024 年 3 月 4-5 日.
- [80] 横山文秋, 竹内一将, Cell orientation and Gene Expression Heterogeneity of *Escherichia coli*. 会議同上, ポスター, 2024 年 3 月 4-5 日.
- [81] 西口大貴, バクテリアの渦の乱流化シナリオと集団でのキラリティー反転. 会議同上, ポスター, 2024 年 3 月 4-5 日.
- [82] 西口大貴, 「高密度細菌集団の秩序創発・状態制御を司る熱統計力学原理の探究」関連成果. 会議同上, 講演, 2024 年 3 月 5 日.
- [83] 横山文秋, 竹内一将, 大腸菌細胞の配向秩序による細胞外マトリクス生産の不均一性. 農芸化学会 2023 年大会, 口頭, 東京農業大学, 2024 年 3 月 26 日.

招待講演

- [84] 西口大貴, バクテリア遊泳と空間次元とトポロジー. 最先端クロストーク, 東京大学, 2023 年 6 月 29 日.
- [85] K. A. Takeuchi, Topological defects as “fingerprints” of cell populations. 第 75 回日本細胞生物学会大会, 奈良, 2023 年 6 月 30 日.
- [86] F. Yokoyama, No border in science を目指して ~ 海外で研究者として働いてみることを強くお勧めする話 ~. 第 55 回若手ペプチド夏の勉強会, 京都大学, 2023 年 8 月 9 日.
- [87] 竹内一将, 非平衡液晶としてのバクテリア集団とそのトポロジカル欠陥. CREST トポロジー領域 合同セミナー, 東京大学, 2023 年 11 月 9 日.
- [88] 西口大貴, バクテリア集団運動の空間構造への応答: 渦秩序の制御とキラリティー. 第 61 回日本生物物理学会年会, 愛知, 2023 年 11 月 16 日.
- [89] 西口大貴, バクテリア集団運動の空間構造への応答: 渦秩序の制御とキラリティー. 2023 年度べん毛研究交流会, 宮城, 2024 年 3 月 15 日.
- [90] F. Yokoyama, 細胞社会の理解に向けた細菌細胞の個性と集団性の定量. 第 1 回生物の基礎探究会, 東京大学, 2023 年 3 月 18 日.

- [91] 西口大貴, バクテリア乱流の渦秩序と不安定化, 第 48 回エアロ・アクアバイオメカニズム学会定例講演会, 東京工業大学, 2024 年 3 月 27 日.
- [92] F. Yokoyama, マイクロ流体デバイスとライブセルイメージングを用いた大腸菌の個性と集団性の理解, 遺伝研ミーティング, 遺伝学研究所, 2024 年 3 月 28 日. (セミナー・集中講義)
- [93] K. A. Takeuchi, Physics of Active Matter. 集中講義, 東北大学, 2023 年 6 月 5-6 日.
- [94] K. A. Takeuchi, Glassy state of active matter and its realization in bacterial populations. コロキウム, 東北大学, 2023 年 6 月 6 日.
- [95] 竹内一将, アクティブマターの物質相探求と関連技術. 第 4 回 創発研究交流会, 東京大学, 2023 年 6 月 9 日.
- [96] K. A. Takeuchi, A micro-perfusion system for characterizing dense bacterial populations. Seminar, OIST, Dec. 5, 2023.
- [97] D. Nishiguchi, Emergent chiral vortex and oscillations in bacterial turbulence. Seminar, 上海交通大学, 2024 年 1 月 26 日.
- [98] K. A. Takeuchi, Machine learning approach to determine the minimum number of variables to describe observed space-time chaos. Edinburgh Statistical Physics and Complexity Webinar Series, online, Mar. 26, 2024. (アウトリーチ)
- [99] 後藤崇志, 向きが「決められない」点のお話 - トポロジカル欠陥 -. 10 分で伝えます! 東大研究最前線, 第 74 回東京大学駒場祭, 2023 年 5 月 13-14 日.
- [100] 西口大貴, 美しい群れにひそむ普遍法則を探す. リガクル, 東京大学理学部, 2023 年 7 月 3 日.
- [101] 西口大貴, アクティブマター物理学: 群れの秩序と普遍法則. 大阪星光学院高等学校・東大ツアーにおける講演, 2023 年 7 月 26 日.
- [102] 上杉佑人, 動物の群れの気持ちを考える - 生態学と物理学から -. 10 分で伝えます! 東大研究最前線, 第 74 回東京大学駒場祭, 2023 年 11 月 24-25 日.
- [103] P. Samuel, From eating pizza to the shape of salad: geometry and mechanics of plates. JSPS Science dialogue, 日比谷高等学校, 2023 年 11 月 6 日.

6.7 三尾研究室

三尾研究室では、レーザーとその応用に関する研究を行うことを目的としている。レーザーの発明は 1960 年で、それ以来、基礎から応用まで大変、幅広く利用されている。また、現代社会を支える基盤技術としても極めて重要で、通信、情報処理、加工などではなくてはならないものとなっている。さらに、2015 年に初めて観測された重力波でも、最先端の光技術が駆使されており、学術と社会を結ぶ架け橋である。

当研究室は、理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構 (IPST)¹に所属しており、上述のように、

¹<http://www.ipst.s.u-tokyo.ac.jp/>

光を使って学術の深化と産業への展開を目指している。IPST には当研究室以外に多くのメンバーが所属しており、全員が密接に連携して、研究と教育を進めている。

6.7.1 レーザー加工の物理

レーザーを使って、切断、溶接、切削などの加工を行うことをレーザー加工と呼ぶ。この分野はレーザー光源の進歩により、高出力の紫外光が利用できるようになり、また、パルス幅や波長などがかなり自由に制御できるようになってきて、新しい加工が可能になってきた。しかし、実際に起きている現象は、非平衡、開放系で、レーザー光と物質の相互作用も摂動的な考え方では説明できない領域にある。この現象の理解を進めて、応用への展開を進めていくことがこの研究の目的である。この研究は IPST の小西研究室と共同で進めている。

レーザーによる微細加工技術の応用

フェムト秒レーザー加工技術を、誘電体の 3 次元マイクロ加工へと応用する研究を進めている。例えば高出力レーザー加工を利用して、「モスアイ構造」という、光の波長よりも小さなピラミッド型の微細構造を作製し、反射率を 1% 以下に下げることができる。モスアイの名前の通り、蛾の眼を模した構造で、等価的な屈折率が連続的に変化するので界面での反射が起きない、つまり、無反射な状態をつくることができる。

これまで、電波望遠鏡用の大型のモスアイの作製などに成功して来たが、現在は、このモスアイ構造の格子構造の最適化の検討を進めている [10, 13, 15, 18, 20]。モスアイの透過帯域の高周波数側は、モスアイの構造を回折格子として捉えた場合の基本格子の間隔で決まる。通常はモスアイでは正方格子を作る作ることが多いが、これを正三角形や正六角形に変更すると、構造体の頂点の間隔を同じにしても格子間隔が異なり、理論的には六角格子は正方格子に対して 1.15 倍の帯域が実現できることが言われている。それをシミュレーションと実験により調べた。実験では、シリコン基板上に、三角格子、正方格子、六角格子のモスアイを作製した (図 6.7.20)。その結果、確かに正六角形にすることで帯域が広がることが確認できた (図 6.7.21)。また、加工にかかる時間などに関しても、加工法を工夫すること正方格子と同等な時間で加工ができることを示した。

本研究では正六角形格子を反射防止広帯域化のために扱ったが、実際の応用では必要な帯域が決まっていることが多い。そのような場合、正六角形格子を採用することで、構造体の間隔を広くとることが可能になり、加工難易度の低下や加工時間の短縮が可能となる。このように、格子構造の最適化は実用上、重要であることを示すことができた。

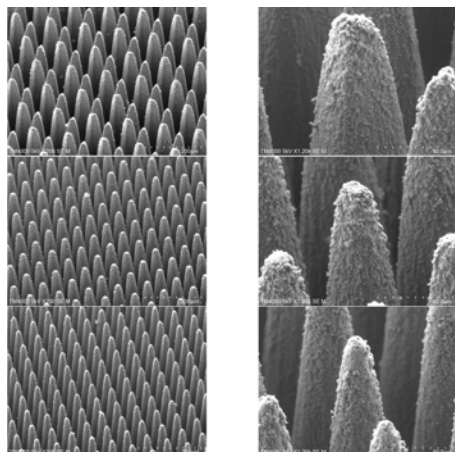


図 6.7.20: 作製したモスアイ構造の電子顕微鏡画像。上段が正三角形、中段が正方形、下段が正六角形の格子構造の持つもの。

加工時のダイナミックスの計測手法の開発

超短パルスレーザーを用いた加工では、レーザー光を時間的・空間的に集中させて物質に照射し、加工を行う。その際のダイナミックスは極めて複雑で、非平衡・非定常・開放系の現象を理解するためには高い時間分解能が必要であり、また、空間的な発展を見るためには高い空間分解能が必要となる。本研究では、加工時に発生するプラズマの複素屈折率を高い時空間分解能で計測できる干渉計を構築し、プラズマの超高速ダイナミックスの計測を行った [12, 19, 21]。

本研究で開発した計測システムの概略を図 6.7.22 に示す。光源にはチタンサファイアレーザーを用いて、基本波をポンプ光（プラズマの発生に用いる）、その倍波をプローブ光（干渉計測に用いる）としたポンプ・プローブ方式の計測システムである。干渉計はノルムスキー干渉計を採用し、高い空間分解能を実現するため高分離角のプリズムを採用した結果、 $0.87\ \mu\text{m}$ の分解能を実現し、実際に発生したプラズマの形状が、図 6.7.23 のように測定できた。高強度領域（下の図）においては、左から集光されたパルスがプラズマを生成する場合に、光軸に対して上下に分裂し、その後合流する様子が観測された。

本研究で構築した干渉計は、フェムト秒レーザー誘起プラズマの計測において、高い空間分解能を持つ計測を可能にした。この干渉計を用いることで、フェムト秒レーザーパルスによるレーザー加工におけるアブレーションの際に発生するブルーミングについて、内部構造の観測およびその電子密度や温度の計測が可能となると考えている。これらの計測は、ブルーミングの内部構造を理解する上で重要な情報となるだけでなく、レーザー加工の品質を向上させるための情報としても有用であると考えている。

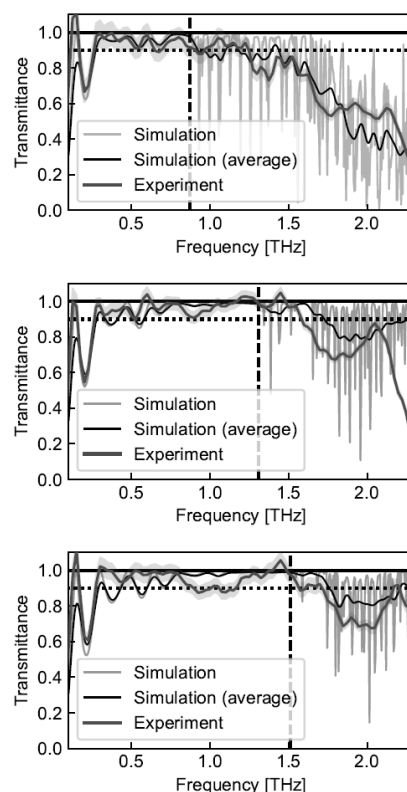


図 6.7.21: 各モスアイ構造のエネルギー透過率測定結果)。上から正三角形、正方形、正六角形による構造の測定結果である。灰色実線は計算機によるシミュレーション結果、黒実線はシミュレーション結果に対して $\sigma = 13\ \text{GHz}$ の幅を持つガウシアンフィルタを使って畳み込み処理を行ったものである。縦破線はそれぞれの構造の有する格子の最低次回折周波数、横点線は透過率 90 % の位置に引かれている。

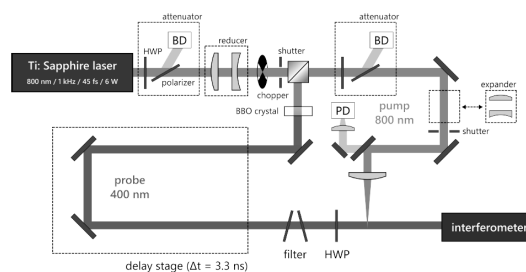


図 6.7.22: 本研究で開発した計測システム。

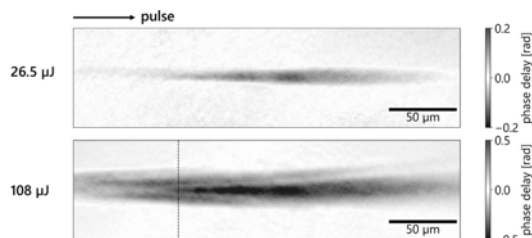


図 6.7.23: 26.5 μJ および 108 μJ のパルスエネルギーを入射した場合の位相画像。与えた時間遅延は 1 ps である。

6.7.2 KAGRA project

重力波が実際に検出されてから、すでに、8 年以上の時間が過ぎ、現在までに検出されたイベントは 90 となった。その多くは、ブラックホール連星の合体時のものであるが、観測されている質量の範囲は、重力波検出以前に比べて、もっと広い範囲となっている。また、中性子星連星の合体や中性子星とブラックホールの合体なども観測されている。このような天体は重力波観測以前にはまったく存在が知られていなかった。重力波の観測によって、新しい宇宙像が構築されつつある。

日本では、岐阜県神岡鉱山の中に、KAGRA が建設されている。KAGRA は地下の静粛な環境を利用し、また、低温技術を取り入れるなど先進的な技術を導入して、感度の向上を測っている。現在、米国の LIGO、欧州の VIRGO との協力体制を構築している。KAGRA がこれまで、建設、調整を進めており、O4 と呼ばれる国際共同観測（2023 年 5 月に開始）に参加した。今後も、KAGRA プロジェクトの推進に関わっていく予定である。

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Akutsu, *et al.*: “Overview of KAGRA : Data transfer and management,” *PROGRESS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL PHYSICS*, **2023** (10) 10A102 (2023) (10.1093/ptep/ptad112).
- [2] R. Abbott, *et al.*: “Search for Gravitational Waves Associated with Fast Radio Bursts Detected by CHIME/FRB during the LIGO-Virgo Observing Run O3a,” *ASTROPHYSICAL JOURNAL*, **955** (2) 155 (2023) (10.3847/1538-4357/acd770).
- [3] R. Abbott, *et al.*: “Open Data from the Third Observing Run of LIGO, Virgo, KAGRA, and GEO,” *ASTROPHYSICAL JOURNAL SUPPLEMENT SERIES* **267** (2) (2023)(10.3847/1538-4365/acdc9f).
- [4] R. Abbott, *et al.*: “Constraints on the Cosmic Expansion History from GWTC-3,” *ASTROPHYSICAL JOURNAL* **949** (2) 76 (2023) (10.3847/1538-4357/ac74bb).
- [5] T. Akutsu, *et al.*: “Input optics systems of the KAGRA detector during O3GK (vol 2023, 023F01, 2023),” *PROGRESS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL PHYSICS* **2023** (5) 59301 (2023) (10.1093/ptep/ptad063).
- [6] H. Abe, *et al.*: “Noise subtraction from KAGRA O3GK data using Independent Component Analysis,” *CLASSICAL AND QUANTUM GRAVITY* **40** (8) 85015 (2023) (10.1088/1361-6382/acc0cb).
- [7] R. Abbott, *et al.*: “Population of Merging Compact Binaries Inferred Using Gravitational Waves through GWTC-3,” *PHYSICAL REVIEW X* **13** (1) 11048 (2023) (10.1103/PhysRevX.13.011048).
- [8] T. Akutsu, *et al.*: “Input optics systems of the KAGRA detector during O3GK,” *PROGRESS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL PHYSICS* **2023** (2) 023F01 (2023) (10.1093/ptep/ptac166).
- [9] H. Abe, *et al.*: “Performance of the KAGRA detector during the first joint observation with GEO 600 (O3GK),” *PROGRESS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL PHYSICS* **2023** (10) (2023) (10.1093/ptep/ptac093).

(会議抄録)

- [10] R. Koike, S. Kawano, H. Sakurai, K. Konishi, N. Mio: “Lattice Type Dependence of Transmittance Spectrum in Moth-eye Antireflective Structures,” *2023 48TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFRARED, MILLIMETER, AND TERAHERTZ WAVES, IRMMW-THZ*, (10.1109/IRMMW-THZ57677.2023.10298964).

(国内雑誌)

- [11] 三尾 典克: 「LIGO 検出器および重力波の観測への決定的な貢献 (2017 年ノーベル物理学賞)」、レーザー研究、第 51 巻、第 11 号 (2023 年)。

(学位論文)

- [12] 木村 航琉: 「フェムト秒レーザー誘起空気プラズマの時間分解複素振幅イメージング」修士 (理学) 2024 年 3 月。
- [13] 小池 陸生: 「レーザー加工によるモスアイ反射防止構造の広帯域化」修士 (理学) 2024 年 3 月。

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [14] K. Soeda, K. Naganuma, Y. Yamaguchi, K. Konishi, H. Tamaru, N. Mio, H. Ito, J. Yumoto: “Fabrication of functional hollow waveguide devices for electromagnetic waves in 200-400GHz band using UV-curable resin type 3D printer, RECILS,” *SPIE Photonics West* (January 31, 2024).

- [15] R. Koike, S. Kawano, H. Sakurai, K. Konishi, N. Mio: "Lattice Type Dependence Of Transmittance Spectrum In Moth-eye Antireflective Structures," 48th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2023) (September 19, 2023).
- [16] K. Soeda, K. Naganuma, Y. Yamaguchi, K. Konishi, H. Tamaru, N. Mio, H. Ito, J. Yumoto: "SLA 3D printer, RECILS enables low-loss waveguide bandpass filters for electromagnetic waves in 200-400GHz band at low cost," Conference on Lasers in Manufacturing (LiM) 2023 (June 26 2023).
- [17] R. Yamada, W. Komatsubara, H. Sakurai, K. Konishi, N. Mio, J. Yumoto, M. K. Gonokami: "Comparison of ionization models in nonlinear propagation simulation in air for femtosecond laser ablation," The 24th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM2023) (June 16 2023).

(国内会議)

一般講演

- [18] 小池 陸生 川野 将太郎、的場 みづほ、櫻井 治之、小西 邦昭、三尾 典克:「レーザー加工による広帯域モスアイ反射防止構造の作製」[22a-13M-9] 第 71 回応用物理学会春季学術講演会 2024 年 3 月 22 日、東京都市大学世田谷キャンパス.
- [19] 木村 航琉、川野将太郎、山田涼平、櫻井治之、小西邦昭、三尾典克:「フェムト秒レーザー誘起空気プラズマの高空間分解能時間分解 位相イメージング」第 8 回フォトニクスワークショップ 2023 年 11 月 2 日.
- [20] 小池 陸生、川野将太郎、櫻井治之、小西邦昭、三尾典克:「レーザー加工によるモスアイ反射防止構造の透過スペクトルの格子構造依存性」第 8 回フォトニクスワークショップ 2023 年 11 月 2 日.
- [21] 木村 航琉、川野 将太郎、山田 涼平、櫻井 治之、小西 邦昭、三尾 典克:「高空間分解能干渉計によるフェムト秒レーザー誘起空気プラズマの時間分解位相イメージング」[22p-B204-13] 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会、熊本城ホール、2023 年 9 月 22 日.
- [22] 山田 涼平、小松原 航、櫻井 治之、小西 邦昭、三尾典克、湯本 潤司、五神 真:「空気中でのフェムト秒光パルスの非線形伝搬効果を利用した加工穴形状制御」[20p-B205-2] 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会、熊本城ホール、2023 年 9 月 20 日.
- [23] 添田 建太郎、長沼 和則、山口 義紀、小西 邦昭、田丸 博晴、三尾 典克、伊藤 弘、湯本 潤司:「UV 硬化樹脂型 3D プリンタ RECILS によるサブ THz 帯機能導波管の作製」[19a-B203-2] 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会、熊本城ホール、2023 年 9 月 19 日.
- [24] 的場 みづほ、小西 邦昭、三尾 典克、湯本 潤司、五神 真:「広帯域テラヘルツラディアル偏光パルスによる単一金ロッドのダークプラズモンの励起と検出」[19a-B203-7] 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会、熊本城ホール、2023 年 9 月 19 日.
- [25] 湯本 潤司、添田 建太郎、長沼 和則、山口 義紀、小西 邦昭、田丸 博晴、三尾 典克、伊藤 弘:「UV 硬化樹脂型 3D プリンタ RECILS によるサブ THz 帯機能導波管の作製」2023 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、2023 年 9 月 14 日日.

7 生物物理

7.1 能瀬研究室

脳・神経系は多数の神経細胞がシナプスという構造を介して連絡した複雑な回路である。この中を神経インパルスが伝わるのが、脳機能の基本であると考えられているが、その実体はほとんど謎のままである。一体、どのような回路の中を、どのようにインパルスが伝わるにより高度な情報処理が可能になるのか？ また、複雑な神経回路が正確に形成されるための設計図は私達の遺伝子にどのように記述されているのか？ 当研究室では、ショウジョウバエ幼虫の神経系をモデルとし、これらの問題に迫っている。特に、カルシウムイメージングや光遺伝学（オプトジェネティクス）とよばれる光による神経活動操作法を用いて、特定の神経細胞の活動を可視化・操作することにより神経回路の作動原理を探っている。また、2013 年以降、米国 Janelia 研究所、英国ケンブリッジ大との共同研究において、コネクトミクス解析（網羅的な神経回路構造の再構築）を用い、ショウジョウバエ幼虫の運動回路の構造を系統的に決定するプロジェクトを推進している。一方、実験で得られた神経活動や回路構造に関する知見を統計解析したり数理モデル化したりすることにより、神経回路の動作原理を探る研究も推進している。さらに、2022 年 4 月に赴任した松永光幸助教が中心となり神経回路の進化に関する研究も開始した。配線パターンの分かっているモデル神経回路において、神経回路の情報処理の基本原則を明らかにし、さらにその発生と進化の仕組みを明らかにすることが私達の目標である。

7.1.1 神経活動ダイナミクスおよび行動出力の数理統計解析

動物の行動はニューロンの集団活動により創出されると考えられている。しかし、脳神経系がどのようにして協調的かつ機能的な集団活動を生成するのかは、神経科学における大きな謎の一つである。私たちは、ショウジョウバエ幼虫の脳神経系を構成する多数（数千個）の神経細胞の活動を経時的に測定し、得られた高次元時系列データを数理統計学的に解析することにより、神経回路全体の巨視的ダイナミクスを捉えることに挑戦している。また、神経回路の最終的な出力は、筋収縮による動物の体の局所的変形である。多数の筋収縮が協調的に生じることにより、動物の行動が生成される。筋細胞は体全体に配置しているため、そのダイナミクスを細胞レベ

ルで解析するのは容易ではなかった。そこで、本研究室ではこれを可能とする新しい運動解析の方法や行動介入技術を開発している。

運動制御回路のシナプス集団活動および伝達物質分布におけるドメイン構造の解明（福益一司（新領域）、能瀬聡直、高坂洋史（新領域））

動物の運動における時空間的な筋収縮パターンは、運動神経細胞の上流にあたる神経回路、中枢パターン生成器（CPG）において調整される。そこでは多数の介在神経細胞が互いに活性化・抑制しあい、その中で生み出される様々なタイミング・波形の信号が個々の運動神経細胞によって統合され、洗練された運動パターンが筋肉へと伝えられる。しかしながら、このような細胞間相互作用の時間発展は非常に複雑であるため、詳細なプロセスは未だ明らかになっていない。

そこで本研究は、CPG の空間的な構造に着目し、シナプスの興奮性・抑制性ごとの空間分布、およびそれらの運動パターン生成時の活動を調べた。一般に運動神経細胞は、それらが制御する筋肉の配位を反映して、回路内に樹状突起を配置することが知られる。従って、運動神経細胞を含む神経回路を構成する、興奮性・抑制性シナプスの空間分布とその活動の時間構造が、運動パターンの生成メカニズムを解明する手がかりとなることが期待される。この考えに基づき、幼虫の運動生成を担う腹部神経節（VNC）において、シナプス集団の伝達物質作動性および運動生成時の活動波形を解析した。まず、興奮性・抑制性シナプスの空間分布を調べるため、シナプスの伝達物質作動性を示すマーカー分子を免疫染色によって可視化し、共焦点顕微鏡によって 3 次元的にスキャンした。また、全神経細胞のシナプスを標的とするカルシウムイメージングを行い、単離神経系が自発的に生成する波状の活動伝搬（幼虫のぜん動運動に対応）を記録した。その後、このデータから個々のシナプス活動を自動検出し、これらシナプスの正確な空間位置を調べるため、同一の神経系に対して上記の免疫染色・スキャンを適用した。以上のデータを、免疫染色で得られた共通のランドマークに基づき、非線形写像によって単一のテンプレート座標系に統合することで、異なる試料から得られた構造データを互いに比較できるようにした。

その結果、同じ伝達物質作動性のシナプスが空間的にまとまって存在するドメイン構造が、神経系内に複数存在することが分かった。これらドメイン構造の多くは、筋肉配位を反映した各クラスの運動神経細胞の樹状突起と重なっており、特定のタイミングで活動する運動神経細胞が特異的に入力を受けるドメインが存在することが明らかとなった。また、これまでに運動制御への関与が示されている多くの神経細胞の軸索・樹状突起が、これらのドメイン構造を標的として入出力を行うことが示された。さらに、幼虫は前方向・後方向の二つのぜん動運動を示し、筋肉はそれらに応じて特定の順序で収縮することが知られるが、運動生成時のドメイン間の活動順序もま

た、それぞれの運動パターンごとに特異的であることが分かった。本研究によって示されたドメイン構造の、伝達物質作動性や活動タイミングの特性、および各運動パターン生成に寄与することが知られる神経細胞や運動神経細胞との位置関係から、幼虫の運動パターン特異的な筋収縮の順序が説明可能であることが示唆された。

神経活動動態のデータ駆動的解析によるショウジョウバエ幼虫の運動制御に関わる神経細胞の探索（飯島悠斗（新領域）、能瀬聡直）

運動選択的な神経細胞の同定はしばしば、カルシウムイメージングにより様々な神経細胞の神経活動を観察することにより達成されてきた。幼虫から単離した中枢神経系のカルシウムイメージングを行うと、前進/後退運動に対応する、実際の運動を伴わない仮想運動を観測することができる。この仮想運動と研究対象とする細胞の蛍光強度変化の関係を可視化して、仮想運動の時間枠やそのパターンを読み取ることで、その細胞が運動選択的な細胞かどうか判断できる。従来この解析の作業は全くの手作業により行われてきたが、当研究室の先行研究において、仮想運動パターンの分類を半自動で行う、畳み込みニューラルネットワークと教師なしクラスタリングを用いた手法が開発された。この手法を用いると、データの各仮想運動に対応する時間枠を決定することができ、その時間枠とデータの相関をとることで、各仮想運動に選択的に活動するボクセルを同定できる。これにより、そのボクセルに対応する神経細胞が運動選択的な細胞だと同定できる。そこで本年度は、この解析手法を用いて、36 個の GAL4 系統のカルシウムイメージングデータを解析することで、前進/後退運動に選択的に活動する新たな神経細胞を探索した。その結果、前進運動で選択的に活動する神経細胞を標的とする R15F02-GAL4 を見つけることができた。その後の解析により、この標的神経細胞は、既知の前進運動選択的な細胞 A18b3(CLI1) であることがわかったが、少なくとも、このような細胞を見つけることができたことは、本探索のアプローチの有効性を示すもので、今後さらに系統探索を進めることで新規細胞を同定できると期待された。

一方、仮想運動パターンの分類を半自動で行う解析手法の改良も試みた。先行研究において、動物の行動分類を目的としたアルゴリズムがあったため、それをベースに本研究の仮想運動パターン分類への適応可能性を検証した。A27h を標的とする R36G02-GAL4 を用いたテストを行ったところ、仮想運動の分類と、A27h の同定を達成することができた。この新たな解析手法の作成によって、より効率的な探索が可能となった。

遠隔触覚刺激によるショウジョウバエ幼虫への行動介入技術の開発（張旭（新領域）、能瀬聡直、高坂洋史（新領域））

動物は不均一で多様な環境においても、それに適応して行動する。この動物の適応性の高さを調べるには、多彩な環境を自在に生み出せる実験系の開発が不可欠であり、これにより神経回路、及び動物行動が高い環境適応性を備える機構を明らかにすることが期待できる。本研究では、ショウジョウバエ幼虫の運動に対して、高い自由度での物理的な介入を実現するために、超音波フェーズドアレイにより生成される音響放射圧を用いた行動介入実験系の開発を行なっている。これまで、点状に形成される音響放射圧を特定の形状（例えば円形）で経時的に生成することで、ショウジョウバエ幼虫を閉じ込める手法の確立を進めてきた。しかし、音響放射圧の絶対値が不足しているため、効率的な閉じ込めができなかった。そこで、超音波フェーズドアレイの個数をこれまでの1つから4つに増やし、更に幼虫の位置を追跡して、幼虫があらかじめ設定した境界線を越えたときに集中的に音響放射圧を生成するクローズドループ制御系を実装した。その結果、従来は数分で視野から外れてしまう幼虫を最長で1時間に渡って視野内に閉じ込めることに成功した。このシステムを用いて、円形、四角形、T字型、同心円型などの多様な形状の行動介入を行ない、いずれの形状においても幼虫の行動範囲を設定した形状内に閉じ込められることが明らかになった。今後は、この手法を用いて、幼虫の行動制御、行動選択の定量計測と神経回路解析を進めていく予定である。本研究は、新領域創成科学研究科の牧野泰才博士、南山大学の藤原正浩博士らのグループとの共同研究である。

7.1.2 行動制御回路を構成する神経細胞の同定と機能解析

中枢神経回路内の個々の介在神経細胞が互いに神経活動を介して相互作用することで回路全体として統合された時空間的活動パターンが生成される。回路内で生起する神経活動の集団現象を構成的に理解するためには、個々の構成要素の機能や特性を理解する必要がある。そこで我々は光遺伝学的手法、及びコネクトミクスを効果的に用いることで、運動パターン生成や行動選択に関与する介在神経細胞群の同定と機能解析を進めている。

筋弛緩状態の維持と運動出力のゲート制御を担う神経細胞群の機能解析（伊達隆久、能瀬聡直、高坂洋史（新領域））

動物は、筋肉を適切なタイミングで収縮させることで、洗練された運動を行うことができる。同時に、収縮時以外の時間帯では筋肉は弛緩状態を保っている。

る必要があり、筋弛緩の制御もまた正確な運動のために重要である。しかし、筋弛緩状態を維持するための神経回路機構については、単一細胞レベルの解像度では未だに詳しく調べられていない。我々は、ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動において、筋弛緩状態の維持に関わっていると考えられる神経細胞群を発見した。この細胞群は、腹部神経節（脊髄に相当）の各体節制御領域に左右一対ずつ存在する興奮性神経細胞である。単離状態および運動中の幼虫中枢神経系でこの細胞群の神経活動イメージングを行うと、この細胞群は持続的な神経活動を示し、運動時にのみ活動が抑制された。活動パターンと細胞の形態から、この細胞群を tonically active lateral (TAL) neuron と名付けた。さらに、TAL neuron の下流の回路構造を、電子顕微鏡画像をもとにしたコネクトミクス解析で調べた。その結果、TAL neuron は抑制性の細胞を介して、運動神経細胞を抑制する神経回路をもつことがわかった。活動パターンと回路構造から、TAL neuron が持続的に活動することで筋弛緩状態が維持され、運動時に TAL neuron が一過的に抑制されることで運動出力のゲート制御を行っていることが示唆された。TAL neuron 特異的に遺伝子発現を誘導できるハエシステムを作成して光遺伝学による神経活動の活性化を行ったところ、光照射時にのみ幼虫が停止する、もしくは運動の回数が低下することがわかった。これは、TAL neuron の活動によって筋弛緩状態が維持されるという仮説と一致している。TAL neuron によるゲート制御によって不要な運動出力が抑えられることで、運動の正確性が保証されていると考えられる。

今後、TAL neuron の持続的活動の背後にある膜電位変動とその分子基盤を明らかにすることで、筋弛緩維持・運動のゲート制御の仕組みを分子・細胞・回路の階層を貫いて理解することを目指す。本研究は、米国ニューヨーク大学の Marc Gershow 研究室、英国セントアンドリュース大学の Maarten Zwart 博士との共同研究である。

前進運動を駆動する新規介在ニューロン A18f の機能解析（関崇貴、高坂洋史（新領域）、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する。A18f の活動を光遺伝学的に阻害すると、幼虫の運動が強く阻害されることから、A18f が幼虫の前進運動に必要であることが示された。コネクトミクス解析の結果、A18f は前運動ニューロン A27h や GDL ニューロンなど、前進運動に関与する

ことが知られているニューロンに強い入力を行うことが明らかになった。このコネクトームと一致して、A18f を光遺伝学的に活性化すると、前方体節の筋収縮が誘導された。これらの結果から、A18f は高次の介在ニューロンであり、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、前方への筋収縮伝播を制御していることが示唆される。分節構造に沿った運動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。

行動選択を担う神経回路の構造機能解析（渡辺逸希、石津大我（新領域）、能瀬聡直）

動物は周囲の環境の状態を感覚情報として読み取り、それに応じて適切な運動パターンを選び取ることで、適応的な行動をとるしくみを持つ。中でも触覚刺激は動物にとって潜在的な脅威であり、多くの動物が触覚刺激に対する多様な逃避行動を示す。本研究ではモデル生物のショウジョウバエ幼虫を用いて、どのような神経回路によって逃避行動が起こるのかを探っている。ショウジョウバエ幼虫は身体の方へへの接触刺激に対しては後退運動を示す一方、身体の後方への接触刺激に対しては前進運動を示す。当研究室の先行研究において、このような部位特異的な逃避行動を制御するニューロンとして Wave ニューロンが同定されている。Wave は A2 A7 の神経節で左右 1 組ずつ存在し、前方 (A2、A3 節) の Wave (以降、a-Wave) は前方からの接触刺激に起因する後退運動を、後方 (A4～A7 節) の Wave (以降、p-Wave) は後方からの接触刺激に起因する前進運動を制御していることが確かめられている。しかし、Wave そのものと後退/前進運動実行回路がどのように結合しているかは不明であった。

そこで、本研究では、過去のコネクトミクス解析によって Wave と実行回路の間にあることが分かっていた、介在ニューロン bilateral thoracic (以降、BLT; a-Wave の下流ニューロン) と A19d (p-Wave の下流ニューロン) に着目し、これら 2 つのニューロンに対して機能解析を行った。はじめに、BLT と A19d の両方を標的とする Gal4 系統に Gal80 系統を組み合わせ BLT を限定的に活動亢進させたところ、前進運動の抑制が観察された。また、BLT と A19d のコネクトミクス解析を進めた結果、A19d の下流に前進運動時に活動している可能性の高いニューロンをいくつか発見した。現在は split-Gal4 系統を作成することで機能解析を進めるとともに、a-Wave - BLT および p-Wave - A19d 間の機能的なつながりや BLT/A19d の下流ニューロンについて調査していく予定である。

前進・後退運動特異的に活動する投射ニューロンの光変換型カルシウムセンサーによる探索（佐藤政凱（新領域）、伊達隆久、高坂洋史（新領域）、能瀬聡直）

動物は多様な運動パターンを駆使することで、複雑な環境下で活動している。個々の運動の背後にある神経活動パターンを明らかにすることは、神経科学において重要な問題である。そのための第一段階として、特定の運動時に選択的に活動する神経細胞を同定することが必要になる。本研究では、ショウジョウバエ幼虫において前進あるいは後退運動時に特異的に活動する脳から腹部神経節への投射ニューロンの同定とその機能解析を目指す。そのために、幼虫が特定の運動を示す際の、特定の神経細胞における活動を、光変換型カルシウムセンサー CaMPARI で記録する実験系の確立を進めた。CaMPARI は、神経活動に伴うカルシウムイオン濃度上昇時に紫外線が照射されると、蛍光波長が緑から赤へと不可逆的に変化する。幼虫腹部神経節の前進特異的に活動する既知の神経細胞に CaMPARI を発現させ、前進あるいは後退運動時に紫外線を照射する実験を行った。すると、既に明らかになっている活動パターンと整合して、前進特異的な細胞では前進時により強く色変換が起きたことから、この実験系を用いることで運動パターン特異的な神経細胞の同定が可能であることが明らかになった。今後、少数の投射ニューロンで CaMPARI を発現する多様なショウジョウバエ幼虫を用いて、前進あるいは後退運動と関連した活動を示す神経細胞の探索を進める予定である。

7.1.3 機能的神経回路の発生と進化

自律的に自身を形作り機能を獲得することができるという自己組織能は脳の大きな特徴のひとつである。脳神経系を構成する多数のニューロンはどのようにしてお互いに配線し、機能的な回路を作り上げるのか。この問いに答えるために、これまで私たちは個々のニューロンの配線が形成される過程を生体内で可視化し、さらにこの過程を制御する機能分子を同定してきた。現在、これまでの単一ニューロンレベルの研究を回路レベルに発展させ、複数の神経配線からなる機能的な神経回路がどのようにして構築されるのかを調べている。さらに、進化の過程で、どのように神経回路の構造と機能が変化することで、種特異的な行動が生み出されるのかを探っている。

行動選択を担う神経回路の構築原理（石津大我（新領域）、橋本裕作（新領域）、能瀬聡直）

外界からの刺激に対して適切な行動を取れるよう行動戦略を適応させることは動物の生存にとって極めて重要である。しかし、適応行動を実装する神経回路がどのようにして機能するのか、また個体発生や進化の過程でどのように形作られるのかに関する理解は限られている。本研究では、ショウジョウバエ

幼虫において前進・後退運動の選択を制御する Wave コマンドニューロンに着目し、この問題に取り組んでいる。Wave ニューロンは腹部神経節 (VNC) の各節に 1 対ずつ存在し、節ごとにその軸索の形状が異なる。また、尾部に近いもの (p-Wave) を刺激すると前進を、頭部に近いもの (a-Wave) を刺激すると後退を惹起するというように、体節特異的な機能を持つ。当研究室の先行研究において、Wave ニューロンの軸索誘導に関わる分子の探索が行われ、Drosophila Wnt4 (DWnt4) と、その受容体 Drosophila Frizzled 2 (DFz2) が同定された。DFz2 を機能損失すると従来体の前方へと軸索を伸ばす a-Wave が、体の後方へと軸索を伸ばすようになり、それに伴って誘導する行動のパターンにも変化が見られた。DWnt4 は体の後方において高い濃度勾配をもつので、この結果は DWnt4 が Fz2 を介して、a-Wave の軸索に対して反発的に働きかけることにより、後方ではなく前方へと伸長するように制御していることを示唆している。一方、DFz2 の機能亢進による軸索の表現型では、DWnt4 に対する反発作用があまり見られなかった。本年度の研究では以前の研究とは異なる DFz2 を強制発現させる UAS 系統を用いた。その結果、軸索の後方伸長が短縮する結果が得られたとともに、一部の Wave では後方伸長の欠損も見られた。この結果は、DWnt4 が Fz2 を介して、a-Wave の軸索に対して反発的に働きかけるという上記の仮説をさらに裏付けるものである。

運動回路の発達初期における活動様式成熟の細胞基盤（関崇貴、曾祥孫澤（新領域）、能瀬聡直）

多くの動物は、子宮や卵の中で動き始める。この発生初期の運動は、局所的で協調性のないものであるが、動物が成長するにつれて成熟した運動パターンを示すようになる。我々は最近、運動経験からの感覚フィードバックが運動回路の発達に必要であることを明らかにし、感覚フィードバックの標的として M/A27h 神経回路 (M ニューロンと A27h ニューロンから構成される) を同定した。M ニューロンは発生の最初期には散発的な運動を行うが、次第にセグメント間での同期発火を起こすようになり、最終的には尾側から頭側へ伝わる波状の活動を示すようになる。この M ニューロンの活動は他のニューロンからの入力に依るものではなく、IP3 シグナルに依存した自発的なものであることも明らかにし、「M/A27h 回路は自発活動により引き起こした未熟な出力のフィードバックを介して自身および他の構成細胞を再編成する」という運動回路の自己構築モデルを提唱した。

この過程で M ニューロンの活動様式が散発的から同期発火へと成熟する仕組みは、隣接するセグメントの M ニューロン間に電気シナプスが形成されることであることが既に明らかになっている。しかし、同期発火から波状活動へと成熟する機構は不明であった。そこで、今年度は、波状活動の出現には M ニューロンへのどのような入力が必要なのかを調査した。具体的には、RNA 干渉法を用いて、M ニューロンにおいて種々の受容体をノックダウンし、孵化直後の幼

虫の蠕動運動を評価した。その結果、ニコチン性アセチルコリン受容体をノックダウンすると幼虫の蠕動運動に異常が生じることが分かり、Mニューロンへのアセチルコリン受容体を介した興奮性の化学シナプスがM/A27h回路の活動様式の成熟に必要である可能性が示唆された。さらに、コネクトミクス解析により、Mニューロンの最も強い上流が上述のアセチルコリン作動性ニューロンA18fであることも明らかになった。これらの結果から、M/A27h回路はA18fを含んだより大きなフィードバックループに取り込まれ、波状の活動を示すようになるのではないかという仮説が立てられた。現在、この仮説を検証するためのさらなる実験を行っている。本研究により、発生期における運動回路の自己組織化機能についての普遍的な原理を報告できると期待している。

植食性ショウジョウバエにおける嗅覚受容体の機能進化 (松永光幸 (新領域))

地球上に存在する種の1/4は植食性昆虫であり、植食性昆虫の種の多様性は著しく高い。この多様化は、昆虫と宿主植物の相互作用の進化によって促進されてきた。しかし特定の昆虫が新しい宿主植物に適応する際に、どのような遺伝的変異が宿主探索を促進するかは未解明であった。本研究では、アブラナ科を宿主とするキロヒメショウジョウバエ(ヒメ)の嗅覚に焦点を当て、嗅覚受容体に一塩基置換法を適用し、その機能進化を電気生理学的手法によって解析した。昨年までに、嗅覚受容体 Odorant Receptors 42a (Or42a) のコピー数が、微生物食のキロショウジョウバエ(キロ)と比較してヒメにおいてゲノム上で増加していることを明らかにしている。この受容体の遺伝子をキロの嗅覚受容体ニューロンに発現し機能解析を行った結果、コピー数が1つの場合は近縁種のショウジョウバエ同様に微生物の匂いに反応する一方で、コピーが2つの場合はアブラナ科の匂いに特異的に応答することを明らかにしていた。本年度は、In silico 解析と In vivo 機能解析を組み合わせることで特異的な匂い応答性をもたらす分子進化メカニズム解明に迫った。まず、これらのアミノ酸配列をAlphaFold2に入力し、タンパク質の三次元構造を予測し、その後PyMolを用いてこれら嗅覚受容体タンパク質の三次元アラインメントを行った。その結果、細胞外領域の一部で構造に不一致が生じることが明らかになった。続いて、合計で約30個存在するアミノ酸変異の内、アラインメント上の不一致を与える二つのアミノ酸置換を同定した。2つのアミノ酸置換のみを持つキメラ嗅覚受容体をキロの嗅覚受容ニューロンに発現させ、電気生理学的手法によって機能解析を行った結果、実際に機能が変化していることを明らかとした。本研究により、わずかな数のアミノ酸の変異が嗅覚受容体のチューニングを変更しうることを解明した。より広い視点では、AlphaFold2によるアミノ酸スクリーニングが、様々な生き物における進化研究で強力なツールとなりうることを、機能解析により示した。本研究はショウジョウバエ生態学に精通した米国 University of California, Berkley の Noah Whiteman 博士 と電気生理学的手法の専門

家である University of California, Davis の Santiago Ramirez 博士と共同で進められている。

マメショウジョウバエ幼虫をモデルとした種固有の行動を支える分子基盤の解析 (高橋正弥 (新領域)、松永光幸 (新領域))

生物は進化の過程で環境中の淘汰圧によって様々な機能を獲得・喪失してきた。これまでに、例えば生き物の模様のような身体構造の進化については、分子レベルでの研究が進められてきたが、行動や運動の進化に関する研究例は限られている。本研究では、*Drosophila* (ショウジョウバエ属) の近縁種である *Scaptodrosophila* (マメショウジョウバエ属) 幼虫をモデルとして進化の中で獲得された行動を支える分子メカニズム解明に迫る。*Scaptodrosophila* 幼虫は posterior extension という尾部を局所的に伸縮させる運動を示す。Posterior extension は *Drosophila* や、より祖先形質を保持する *Chymomyza* (ハシリショウジョウバエ属) では見られないため、*Scaptodrosophila* 系統群で独立に獲得されたものと考えられる。

今年度は、この行動が発生のどの段階から生じるか、また胚の免疫染色によって種間で遺伝子発現に何らかの違いが見られるかを調べた。その結果、まず1令幼虫ですでに posterior extension を行うことが明らかとなった。次に、尾部構造の発生を制御する *Drosophila* Abd-B に対する抗体を用いて免疫染色を行い、種間での Abd-B の発現パターンの違いを観察した。その結果、Abd-B は *Drosophila* では染色されたが、*Scaptodrosophila*、*Chymomyza* では染色されなかった。しかし、この結果だけでは種間で Abd-B の発現が変わったのか、あるいは抗原特異性が変わっただけなのかを区別することができなかった。そこで今後の研究ではまず、*Scaptodrosophila* 由来の Abd-B 配列を認識する RNA-FISH probe を作製し、染色を行う。さらに、近年に開発された Whole mount による免疫染色法を導入することで、尾部の構造を破壊せずに尾部の筋肉などを可視化し種間での違いを調べる。以上のような研究を推進することにより、*Scaptodrosophila* の posterior extension を可能とする尾部構造の分子基盤解明を目指す。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] X. Sun, A. Nose, H. Kohsaka. A vacuum-actuated soft robot inspired by *Drosophila* larvae to study kinetics of crawling behaviour. PLoS One **18**(4) (2023)
- [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)
- [3] J.N. Pelaez, ..., T. Matsunaga, ..., N.K. Whiteman. Evolution of chemosensory and detoxification gene families across herbivorous Drosophilidae. G3 **13**(8) (2023)

- [4] 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. bioRxiv (2023)
- [5] B. Kim, ..., T. Matsunaga, ..., D.A. Petrov. Single-fly assemblies fill major phylogenomic gaps across the Drosophilidae Tree of Life. bioRxiv (2023)

(総説)

- [6] H. Kohsaka. Linking neural circuits to the mechanics of animal behavior in *Drosophila* larval locomotion. *Frontiers in Neural Circuits* **17**:1175899 (2023)

(学位論文)

- [7] 関崇貴：Identification of a novel interneuron that drives peristaltic movement in *Drosophila* larvae (修士論文)
- [8] 飯島悠斗：神経活動動態のデータ駆動的解析によるショウジョウバエ幼虫の運動制御に関わる神経細胞の探索 (修士論文、新領域創成科学研究科)
- [9] 石津大我：ショウジョウバエ幼虫の逃避行動に関わるWaveニューロンの形態・機能分化に関する解析 (修士論文、新領域創成科学研究科)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] T. Date, Y. Liu, A. Nose, H. Kohsaka. A tonically active neuron implicated in the maintenance of muscle relaxation in *Drosophila* larvae. *Neurobiology of Drosophila* 2023, 2023.10.3-7, New York, USA
- [11] T. Date, Y. Liu, A. Yamaguchi, R. Wu, P. McNulty, M. Gershow, M. Zwart, A. Nose, H. Kohsaka. Transient suppression of tonically active neurons gates motor output in *Drosophila* larval crawling. Asia Pacific *Drosophila* Neurobiology Conference 3, 2024.2.27-3.1, Saitama, Japan
- [12] T. Seki, H. Kohsaka, A. Nose. Identification of a novel interneuron that regulates forward wave propagation in *Drosophila* larvae. Asia Pacific *Drosophila* Neurobiology Conference 3, 2024.2.27-3.1, Saitama, Japan

招待講演

- [13] X. Zeng, Y. Komanome, T. Seki, H. Kazama, A. Nose. Emergence of oscillatory motor activities in developing *Drosophila* embryos. The 56th Annual Meeting of the Japanese Society of Developmental Biologists, 2023.7.25, Sendai, Japan

(国内会議)

一般講演

- [14] X. Zhang, A. Nose, H. Kohsaka, M. Fujiwara, Y. Makino. Comprehensive analysis the behavioral response of *Drosophila* larvae to airborne tactile stimulation using ultrasound phase array device. 階層的生物ナビ学領域会議 2023, 2023.6.12-6.13, 仙台
- [15] K. Fukumasu, A. Nose, H. Kohsaka. Two perpendicular stripe-wise structures in the neuropil involved in generation of *Drosophila* larval crawling behaviors. 第 46 回日本神経科学大会, 2023.8.1-4, 仙台
- [16] T. Date, A. Nose, H. Kohsaka. Revealing behavior-specific neuronal populations in *Drosophila* larvae with a photoconvertible calcium sensor. 第 46 回日本神経科学大会, 2023.8.1-4, 仙台
- [17] T. Seki, Y. Komanome, X. Zeng, H. Kohsaka, A. Nose. Mechanisms of neural circuit reorganization that enable coordinated movement. 第 46 回日本神経科学大会, 2023.8.1-4, 仙台
- [18] T. Matsunaga, C.E. Reisenman, D. Tadres, H.C. Suzuki, M. Louis, S.R. Ramirez, N.K. Whiteman. Olfactory avoidance of toxic volatile electrophiles is mediated by a broadly tuned olfactory receptor in *Drosophila*, 日本進化学会第 25 回大会, 2023.8.31-9.3, 沖縄

招待講演

- [19] K. Fukumasu, A. Nose, H. Kohsaka. Spatiotemporal structure of synapse population activity in the motor circuits for crawling. 第 75 回日本細胞生物学会大会, 2023.6.28-30, 奈良
- [20] H. Kohsaka. Neural circuits and mechanics for crawling in fruit fly larvae. 日本動物学会 第 94 回山形大会, 2023.9.7-9, 山形

(セミナー)

- [21] A. Nose : Design principles of neural circuits generating adaptive animal behaviors. Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, 2023.9.15
- [22] A. Nose : Design principles of neural circuits generating adaptive animal behaviors. University of Cambridge, 2023.9.28

7.2 樋口研究室

7.2.1 はじめに

生物は、分子細胞、動物個体といった構造や機能の階層性を持っている。個体や細胞の機能は、もとをたせば分子の機能であるわけであるが、生体分子の種類の多さや複雑さゆえに、分子機能から個体や細胞機能を直接導くことは困難であるのが現状である。我々研究室では、この溝を埋めるために、まず分子の機能を詳しく理解するために、1 分子の力や変位の計測を行い、得られた結果から分子機能を

できるだけ仮説を少なくして理解する研究を行った。また、細胞と分子との関係を結ぶために、分子の機能があらわになるような細胞の輸送機能や運動機能を研究した。個体機能は、分子と結ぶことが困難であるが、これを可能にすべく、マウス個体内の細胞や分子の観測を行った。

7.2.2 ストレス環境下における細胞内小胞の動態に関する研究

ストレスを受けた細胞の生死の運命は、ストレスのレベルによって決まる。ストレスを受けた細胞の運命を理解するためには、細胞の損傷と死に相關する細胞内の量を調べるのが極めて重要である。これらの量は、何が細胞の生死を支配しているのかという疑問に対する根本的な答えを導く手がかりとなる。ストレス細胞は細胞死との関連で広く研究されているが、ラベルフリー技術を用いた定量的指標はほとんど確立されていない。ラベルフリー技術として、細胞内運動性を定量化する強度ゆらぎ法や動的光散乱法が開発されているが、これらの方法で測定された細胞内特異的な対象が何であるかは明らかではない。本研究では、活性酸素種 (ROS) と ATP 枯渇という 2 種類のストレス下において、小胞の細胞内運動性が細胞死と関連するかどうかを、小胞拡散を定量化することで検討した。また、ATP 枯渇時に小胞拡散が減少するメカニズムも明らかにした。赤色レーザーで励起した蛍光分子 IR700 から発生した活性酸素と、2 つの ATP 合成経路の阻害剤を用いた ATP 枯渇によって、ヒトがん細胞にストレスを与えた。個々の細胞内小胞の位置を位相差画像で追跡した。軌跡から平均二乗変位 (MSD) を計算し、MSD とラグタイムの関係から拡散係数 (D) と MSD 指数 (a) を計算した。赤色蛍光タンパク質 (RFP) の拡散係数は、フォトブリーチ後の蛍光回復 (FRAP) により測定した。ストレスを受けた細胞の死は、細胞膜の破裂によって検出された。細胞に活性酸素ストレスを与えた 5 分後に細胞内の小胞の拡散を測定し、その 2 時間後に細胞死を測定した。D は IR700 の励起時間とともに減少し、細胞死の確率は増加した。D の対数は細胞死の確率にほぼ比例した。このことは、細胞死が小胞の拡散係数によって予測される可能性を示唆している。RFP の D は励起時間によってほとんど変化しなかったことから、小胞拡散の減少は細胞内粘度の増加によるものではなく、以前の研究で示されたようにトランスポーターの不活性化によるものであることが示された。ATP 枯渇のストレス下にある細胞で測定された小胞の D と a、枯渇時間と共に徐々に減少した。ATP 枯渇時には細胞死が観察されなかったため、細胞を ATP 合成阻害剤を含まない培養液に戻してから 15 時間後に死滅する確率を測定した。小胞の D と a の値は、死の確率にほぼ比例していた。個々の細胞の運命が小胞の拡散係数によって予測されるかどうかを理解するために、2 時間の枯渇を受けた個々の細胞から小胞の D と a。将来の生細胞の D と a は、将来の死細胞のそれよりも有意に高かった。このことは、個々の細胞の運命が、

その小胞の拡散係数によって予測されることを示唆している。ATP 枯渇時に小胞の拡散係数が低下する理由を調べるため、細胞内粘度と微小管の存在が小胞拡散に及ぼす影響を調べた。細胞内の RFP の拡散係数は枯渇しても一定であったことから、細胞間の粘性は変化していないことが示唆された。ノコダゾールによって微小管が解重合された細胞における小胞の D および、ノコダゾール処理をしない場合に比べて、枯渇時間への依存性が低かった。微小管が枯渇時に小胞の移動をどのように抑制するかを理解するため、微小管と蛍光分子で標識した小胞を同時に観察した。ほとんどの小胞は微小管上もしくは微小管に接触しており、一部の小胞は ATP 枯渇時に微小管ネットワーク内に拡散した。このことは、小胞の微小管への付着が、小胞拡散の減少の主な原因であることを示唆している。結論として、位相差顕微鏡で撮像したラベルフリー小胞の拡散は、2 種類のストレス下で、ストレスのレベルや細胞死と関連していることを示唆し、細胞の恒常性と生存能力に関する知見の発展に寄与するものである。

7.2.3 負荷を伴う並発反応における first-passage time の導出と生体への応用

本研究では、Fokker-Planck 方程式と first-passage time の方法に基づいて、並発反応の負荷依存性を計算した。並発反応の first-passage time の負荷依存性が、単一のエネルギー障壁を持つ化学反応の first-passage time に重みづけして和をとった形で表せることを見出した。これに基づいて、並発反応の例として V 字型及びノコギリ型ポテンシャルに対して、並発反応において重要な first-passage time 及び各反応が生じる割合である event ratio の負荷依存性を厳密に導出した。その後、近似解を計算し、心筋ミオシンアンサンブル及びキネシン I の実験データに適用した。我々が示したように、並発反応において成り立つこの関係式はポテンシャルの形状に関わらず成り立つものである。したがって、他のポテンシャルについても並発反応の負荷依存性を導出することが可能である。我々の得た表式を、モータータンパク質に限らない様々な化学反応に応用することによって、生化学反応におけるパラメータの物理的意味が明確になるであろう。さらに、我々のモデルは、非単調な負荷依存性を示す既存の一次反応モデルに加えて極めてシンプルである。したがって、我々のモデルは一見複雑な化学反応を簡潔に解釈することにも有用であろう。

7.2.4 情報理論を用いた骨格筋ミオシンの協同性の定量的評価

骨格筋ミオシンは、アクチンと相互作用しパワーストロークと呼ばれる構造変化を起こすことで、筋

肉の収縮をする役割を担っている。近年、骨格筋ミオシン多分子集合体であるミオシンフィラメントにおける力計測から、分子間における協同的な力発生が提唱され、この協同性が効率的な筋収縮の本質である可能性が示された。そこで本研究では、このような協同現象がどの程度の分子数が集合することで現れるか？ 検証するため、近年の生命機能研究で注目を集めている物理量、情報量に着目し、2つの実験系、*in vitro* landing assay と光ピンセットを用いた力計測実験において、ミオシン分子間の情報量を評価する手法を考案し、ミオシン相互作用分子数の変化に対する情報効率の変化を評価し、またミオシン分子間の協同性の指標として情報量が有用であるか検討した。*in vitro* landing assay においては、ATP 濃度の変化に対するアクチン滑り速度の変化の関係から情報量を評価し、平均9分子のミオシンが相互作用するミオシン・ロッドフィラメントの条件では、情報効率は66%、平均20分子のミオシンが相互作用するミオシン・ロッドフィラメントの条件では、情報効率は70%であることが判明した。従って、相互作用分子数が9分子から20分子に増えることで情報効率は4-5%程度上昇した。一方、力計測では、負荷の変化に対するアクチン滑り速度の変化の関係から情報量を計算し、相互作用分子数が5-30分子の範囲で、情報効率が22%から27%まで緩やかな上昇傾向を示した。20 μ M ATP 濃度において、ミオシン低分子数フィラメントと高分子数フィラメントを比較した場合、情報効率に優位差は見られなかった。一方、ミオシン高分子数フィラメントにおいて、20 μ M ATP と高 ATP 濃度 (100 μ M と 1mM) における情報効率を比較すると、優位に増加している結果が見られた。先行研究では、高 ATP 濃度においてミオシン分子間の協同的な力発生が現れる確率が高くなることが示されており、この結果を踏まえると、情報効率の増加は協同性の変化を表している可能性があると考えられる。以上、本研究では、ミオシン分子間の情報量を計算し、ミオシン相互作用分子数の変化に対する情報伝達効率の変化、また ATP 濃度変化に対する情報効率の変化から、ミオシン分子間の協同性を評価する指標として情報量を活用することの有用性が示唆された。また、今後さらに情報量の有効性を検討するための実験、シミュレーションモデル結果の活用などの検討すべき点が明らかになった。

7.2.5 ダイニン分子の多彩な性質が制御の根底にある鞭毛の振動における

ダイニンは、真核生物の鞭毛において振動運動を生み出すマイナス末端指向性モーターである。細胞膜の最も重要な特徴である周期的な拍動は、ダイニンが微小管に沿って時空間的に制御することによって起こる。ダイニンは微小管に沿って時空間スライディングすることによって起こる。鞭毛振動におけるダイニンの振動の役割を明らかにするために、我々は3つの異なる軸索切断段階におけるダイニンの生化学的性質を調べた。無傷の9+2構造から出発し

て、相互作用するダブルレットの数を減らし、各段階で発生する振動力の3つのパラメータ、すなわち結合割合、反応時間、ステップサイズを決定した。軸索、ダブルレットバンドル、単一ダブルレットの無傷のダイニン分子を用いて、光ピンセットで力を測定した。3つの軸索の条件下で測定されたダイニン1個あたりの平均力は、以前に報告された軸索ダイニンの停止力よりも小さかった。この現象は、結合割合が以前考えられていたよりも低いことを示唆している。この可能性は、精製ダイニンを用いた *in vitro* 運動性アッセイによってさらに確かめられた。測定された力から推定された反応時間とステップサイズは同様であった。これらのパラメータの類似性から、ダイニンの振動の本質的な性質は、分子に固有のものであり、軸索の構造とは無関係であることが示唆される。

7.2.6 キネシン1分子の高速後進と解離を幅広い荷重下で測定

幅広い荷重下での力の発生を理解するために、光学ピンセットを用いて20~42pNの荷重下でのキネシン分子のステップ運動を測定した。キネシン1分子のステップを、20~42pNの荷重で光ピンセットにより高時間分解能で測定した。光トラップは改良され、位置ノイズを半減し200nmのビーズを使用することにより位置ノイズを半減させ時間分解能を高めた。前進と後退のステップサイズはステップサイズは8.2 nmであった。ヒストグラム後方ステップと解離の反応時間のヒストグラムは、速い時定数(0.4 ms)と遅い時定数(>3 ms)を持つ2つの独立した指数関数式に従った。これは従来の遅いステップに加え、速いステップが存在することを示している。高速ステップの滞留時間は高速ステップの滞留時間は負荷とATP濃度にほとんど依存しなかった。遅い後方ステップと剥離の滞留時間はそれらに依存していた。これらの結果から、幅広い負荷範囲における高速ステップと低速ステップを説明する速度論モデルを構築した。

<報文>

(原著論文)

- [1] Yuichi Kondo, Kazuo Sasaki and Hideo Higuchi*. Fast backward steps and detachment of single kinesin molecules measured under a wide range of loads. *Traffic* 24, 463-474 (2023).
- [2] Takashi Fujiwara, Chikako Shingyoji and Hideo Higuchi*. Versatile properties of dynein molecules underlying regulation in flagellar oscillation. *Sci. Rep.* 13, 10514, 1-15 (2023)
- [3] Seohyun Lee*, Hyuno Kim, Hideo Higuchi. Automation of detecting and tracking 3D vesicle transport using dual-focus optics. *Image Acquisition and Processing XXX* 12385, 80-83 (2023).

<学術講演>

(招待講演)

- [4] 茅元司 情報量からみるミオシン分子間の協同性 第101回日本生理学会大会 シンポジウム、筋生理学研究の最先端：分子、細胞から個体へ、小倉 (2024.3)
- [5] 茅元司 情報量からみるミオシン分子間の協同性 第46回日本分子生物学会年会 フォーラム「骨格筋のダイナミクスの階層と適応原理」、神戸 (2023.12)
- [6] H. Higuchi. Oscillatory motion driven by small number of dynein motors in sperm flagella. 16th International Symposium on Nanomedicine. Osaka(2023.11)
- [7] 茅元司、分子レベルでの情報伝達能力の評価から骨格筋ミオシン分子間の協同性を理解する 第61回日本生物物理学会年会、名古屋 (2023.11)
- [8] 樋口秀男 分子モーター 1 分子の運動と多分子の振動運動 分子モーター討論会。特別講演 (2023.9)

一般講演

- [9] 太田英暁、樋口秀男 小胞運動を観察すると細胞の元気さや細胞死がわかる 生体運動合同班会議, 神戸 (2024.1)
- [10] 小林琢也、茅元司、呉林なごみ、村山尚、櫻井隆 骨格筋の粘弾性における微小管の役割 第61回日本生物物理学会年会、名古屋 (2023.11)
- [11] カシムチュエティ亜瑠夢、樋口秀男、茅元司 情報理論を用いた骨格筋ミオシンの協同性の評価 第61回日本生物物理学会年会、名古屋 (2023.11)
- [12] 太田 英暁、樋口 秀男、ATP 枯渇時の細胞内小胞運動の劇的な低下と細胞骨格との関係、第61回日本生物物理学会年会、名古屋 (2023.11)
- [13] 福元孝晋、樋口秀男、佐々木一夫、モータータンパク質の運動の理解を目指した第一通過時間による負荷を伴う化学反応速度の計算、第61回日本生物物理学会年会、名古屋 (2023.11)
- [14] Hideaki Ota, Hideo Higuchi, Drastic decrease in intracellular vesicle motility during ATP depletion and its relationship to the cytoskeleton, EBSA-2023 Congress, Stockholm.(2023.8)
- [15] Motoshi Kaya, Arun Kasimchetty, Hideo Higuchi Cooperativity between skeletal myosin molecules evaluated by information theory. EBSA-Congress 2023s, Stockholm.(2023.8)
- [16] Arun Kasimchetty, Hideo Higuchi, Motoshi Kaya Cooperativity between skeletal myosin molecules evaluated by information theory. 5th Rocky Mountain Muscle Symposium, Canmore (2023.7)
- [17] 篠原健一、大貫佑河、堀諒雅、樋口秀男 ポリマー 1 分子の直視 イオン性ポリマー鎖による力発生 第72回高分子学会年次大会, 高崎市 (2023.5)

社会貢献

- [18] 茅元司「研究者になるとは」 三重県立四日市高校セミナー, 東大 (2024.3)

- [19] 樋口秀男「宇宙の進化、生物の進化、病気の進化 第3回 一生の間の病気の進化」オンデマンド講義 伊達な大学院 (2024.2)
- [20] 樋口秀男「宇宙の進化、生物の進化、病気の進化 第2回 生物進化と人や病気との関係」オンデマンド講義 伊達な大学院 (2024.2)
- [21] 樋口秀男「宇宙の進化、生物の進化、病気の進化 第1回 宇宙の進化と人や病気との関わり」オンデマンド講義 伊達な大学院 (2024.2)
- [22] 樋口秀男 「振動反応が創り出す生物リズムの美」 東京大学公開講座, 東大 (2023.11)
- [23] 茅元司「タンパク質 1 分子～トップアスリートまで、知りたいものはなんでも調べる」 2023 年度目路はるか教室 慶應義塾普通部 1 年生コース, 東大 (2023.11)

7.3 岡田研究室

生命の基本単位は細胞である。細胞は、タンパク質や脂質、核酸など様々な生体分子が密に集まった構造物である。細胞を構成する個々の生体分子については、その構造がオンGSTROOMの解像度で原子模型が作成できる程度に解明され、動態も分子動力学計算などにより物理化学的な理解が進んでいる。しかし、それらが集合することで、細胞という生命現象が如何にして生じるかは全く判っていない。私たちは、細胞の中で生体分子やその集合体がどのような構造をとり、どのような動態を示し、それによってどのような機能が発現されるかを、生きた細胞の中で生体分子を直接見て、測って、操作することを通じて理解したいと考えている。そのために、当研究室では、主に生きた細胞の中を可視光を用いて観察・計測・操作するための技術開発と、これを用いた細胞生物学・生物物理学研究を並行して進めている。

7.3.1 蛍光顕微鏡のためのプローブ開発

蛍光色素や蛍光タンパク質などの蛍光分子は、確率的に三重項状態 (T_1) へと遷移し、溶液中の溶存酸素分子との反応などの不可逆的な化学反応を経て蛍光を発しない分子へと変化する。これを蛍光褪色と呼ぶ。

生きた細胞などを経時的に蛍光顕微鏡で観察する際、多くの場合は、この蛍光褪色が大きな制約となる。観察している間に、蛍光褪色が進行して試料が光らなくなってしまうため、観察できる時間が限られてしまう。特に、蛍光一分子イメージングや、これに応用した超解像蛍光ライブセルイメージングにおいては、通常の蛍光顕微鏡観察よりも強い励起光を用いる必要があるため、褪色防止は特に重要となる。

私たちはこれまで、蛍光色素および蛍光タンパク質の研究者との共同研究を通じて、蛍光一分子イメージングや超解像蛍光ライブセルイメージングに適した蛍光分子の開発と応用に取り組んできた。

高輝度光褪色耐性緑色蛍光タンパク質 StayGold の単量体化

2022 年度には、理化学研究所の宮脇敦史研究室で発見・開発されたタマクラゲというクラゲ由来の緑色蛍光タンパク質 StayGold について、宮脇研究室と共同で、このタンパク質の一分子レベルでの光化学的性質の検討と蛍光一分子イメージングおよび超解像蛍光ライブセルイメージングへの応用を行った ([4])。

StayGold タンパク質は、従来のオランクラゲ由来の緑色蛍光タンパク質 (EGFP) より明るく、通常の蛍光顕微鏡観察では、100 倍以上褪色しにくい。しかし、StayGold タンパク質は二量体化するタンパク質であるため、観察対象のタンパク質との融合タンパク質として発現すると、観察対象タンパク質が強制的に二量体化されるなどの不都合が生じる。また、一分子イメージングやレーザー走査型共焦点顕微鏡観察など、励起光強度が高い条件下では褪色耐性が低下する ([6])。

これらの課題を解決するため、宮脇研究室において StayGold の改良が行われ、蛍光強度と褪色耐性を保ちつつ単量体化された StayGold 変異体が作成された。そのうちのひとつ (mStayGold) は、一分子イメージングや超解像蛍光顕微鏡観察においてもオリジナルの二量体型 StayGold よりも褪色耐性が高く、タンパク質合成後に蛍光色素団が形成されて蛍光を発するようになるまでの時間 (maturation time) も既存の superfolder GFP と同等であることが確認された。また、私たちの研究室の Zhang, Ma らは、mStayGold とさまざまなタンパク質との融合タンパク質を細胞で発現させ、タンパク質の局在や動態などの機能に悪影響を与えず、蛍光ライブセルイメージングが可能であることを確認した (図 7.3.1, [20])。

光褪色耐性近赤外蛍光色素 PREX710 の Halo リガンド化

私たちは、名古屋大学山口研究室の多喜先生らとの共同研究により、ローダミンにフォスフィン (P=O) を導入したホスファ・ローダミン (POR) PREX710 を開発し、高い光褪色耐性を持つ近赤外蛍光色素であることを 2018 年に報告した ([2])。

蛍光色素分子をライブセルイメージングに応用する際には、その色素分子を細胞内の標的に特異的に局在させる必要がある。その際に広く用いられている方法の一つが、Halo-tag 法である。細菌由来のハロアルカン・デハロゲナーゼという酵素由来の Halo-tag タンパク質を目的のタンパク質と融合タンパク質として発現させる。末端にハロアルカンを有する蛍光色素 (Halo-ligand と呼ばれる) は、Halo-tag タンパク質と結合し、共有結合で固定されるため、目的のタンパク質分子を蛍光色素で特異的に標識することができる。本手法を用いて、PREX710 を蛍光ライブセルイメージングに応用すべく、多喜先生らと共同で、ホスファ・ローダミン (POR) の Halo-ligand 化に取り組んだ。合成された異性体の内、*cis* 体は細

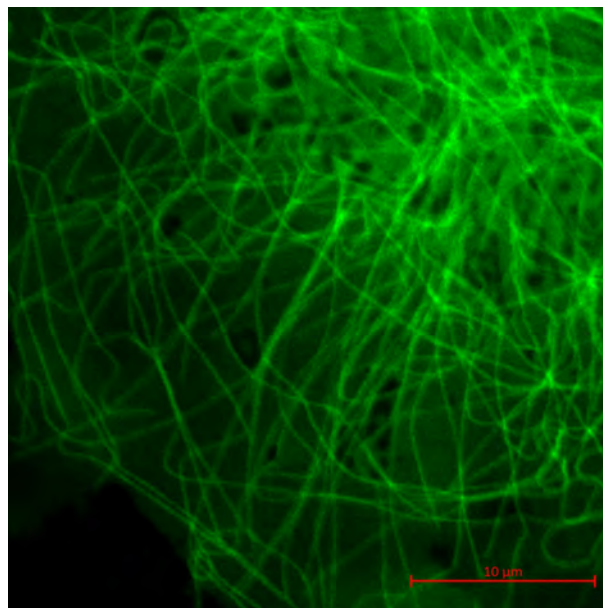


図 7.3.1: mStayGold-tubulin 融合タンパク質が細胞内で正しく微小管を形成している。スケールバーは 10 μm

胞内では ER などの膜系に蓄積し、標的タンパク質の特異的標識は見られなかったが、*trans* 体は細胞内でも標的タンパク質を特異的に標識し、蛍光ライブセルイメージングに応用可能であることが示された。私たちの研究室の榎らは、スピニングディスク超解像顕微鏡を近赤外対応させ、*trans*-POR が超解像ライブセルイメージングに有用であることを実証した (図 7.3.2, [3])。

7.3.2 顕微鏡技術の応用

超解像顕微鏡、一分子イメージングの応用

誘導放出制御法 (STimulated Emission Depletion microscopy, STED) は、適切に試料を作成することで 50 nm 程度の分解能が達成できる優れた超解像顕微鏡法である。本手法を核内ゲノム DNA のクロマチン構造の観察に応用した成果が、遺伝研前島研究室などとの共同研究として論文化された ([7])。活発に転写されているアクティブなゲノム領域のクロマチンでは、クロマチンが流動性を保った状態で凝集していることが示された。そのほか、エピゲノム状態の維持機構の研究 ([8])、転写因子の核内一分子動態計測 ([10])、ミトコンドリアの選択的オートファジー (ミトファジー) の観察 ([9]) など、共同研究を通じてさまざまな応用が進み、その成果が論文発表された。

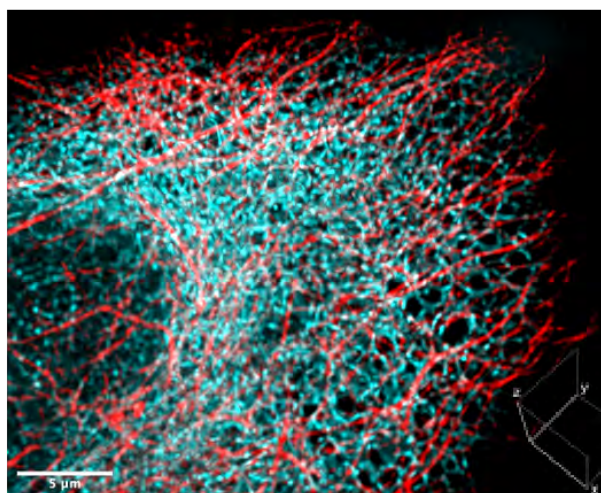


図 7.3.2: ER に Halo-tag を局在させ、*transPOR* で標識した (シアン)。赤色は、シリコンローダミンで染色した微小管。スケールバーは 5 μm

高分解能深部観察法の応用

動物個体内など、生体組織深部での高分解能顕微鏡観察は、生体組織などによる光の散乱の影響を強く受ける。固定標本では、生体組織成分と等しい屈折率の媒質を組織内部に浸潤させることで光学的に均質化 (透明化) するという手法が有効であるが、ライブ観察に応用することは難しい。そこで、私たちは、共焦点顕微鏡光学系が比較的散乱の影響を受けにくいことに注目し、共焦点顕微鏡光学系を用いた深部・広視野のライブイメージングに取り組んできた。

本手法の応用例として、ヘルシンキ大学の新見先生との共同研究を行い、ショウジョウバエ蛹の翅原基 (wing disc) を、蛹を解剖することなく観察することに成功した。その結果、wing disc を構成する上皮細胞シートの間にあみだくじのような微細なチューブ構造が張りめぐらされていることを発見した (図 7.3.3, [12])。

このように、ミリメートル程度の大きさの構造物を数百 nm 分解能で観察する手法の応用は、生物学にとどまらない。本学工学系研究科の酒井研究室との共同研究では、架橋 PEG によるハイドロゲルが、濃度一様な状態から、局所的に濃度が高い領域と低い領域に分離していくゲル-ゲル相分離現象の観察に応用し、一様なハイドロゲルの内部に小さな粗密構造が形成され、それが次第に成長していく様子を経時的に観察することに成功した (図 7.3.4, [11])。

<報文>

(原著論文)

- [1] Hayashi S. and Okada Y. Ultrafast superresolution fluorescence imaging with spinning disk confocal microscope optics. *Mol. Biol. Cell.* **26**, 1743-1751 (2015).

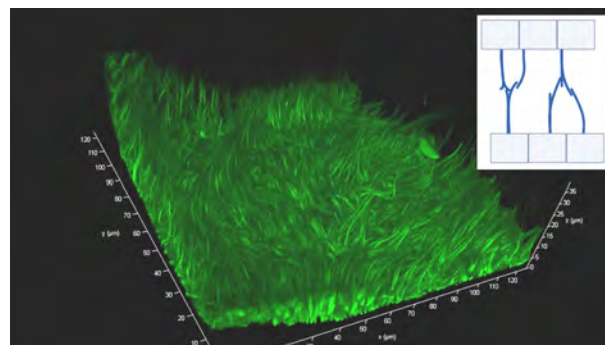


図 7.3.3: ショウジョウバエ翅原基上皮細胞間のアミダくじ様チューブ構造。下側の上皮細胞の微小管を観察している。挿入図はあみだくじ状チューブ構造の模式図

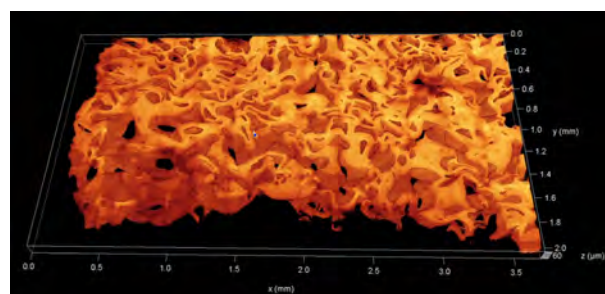


図 7.3.4: PEG ハイドロゲルのゲル-ゲル相分離。高密度領域と低密度領域の 2 相に分離した様子が明瞭に観察された

- [2] Grzybowski M, *et al.*, A Highly Photostable Near-Infrared Labeling Agent Based on a Phosphorhodamine for Long-Term and Deep Imaging. *Angew. Chem. Int.* **57**, 10137-10141 (2018).
- [3] Wu Q, *et al.*, Stereochemistry-Dependent Labeling of Organelles with a Near-Infrared-Emissive Phosphorus-Bridged Rhodamine Dye in Live-Cell Imaging. *Angew. Chem. Int.* **63**, e202400711 (2024).
- [4] Hirano M, *et al.*, A highly photostable and bright green fluorescent protein. *Nat. Biotechnol.* **40**, 1132-1142 (2022).
- [5] Ando R, *et al.*, StayGold variants for molecular fusion and membrane-targeting applications. *Nat. Meth.* (2023).
- [6] Hirano M, *et al.*, StayGold photostability under different illumination modes. *Sci. Rep.* **14**, 5541 (2024).
- [7] Nozaki T, *et al.*, Condensed but liquid-like domain organization of active chromatin regions in living human cells. *Science Adv* **9**, eadf1488 (2023).

- [8] Fukuda K, *et al.*, Epigenetic plasticity safeguards heterochromatin configuration in mammals. *Nucleic Acids Res.* **51**, 6190-6207 (2023).
- [9] Fukuda T, *et al.*, The mitochondrial intermembrane space protein mitofissin drives mitochondrial fission required for mitophagy. *Mol. Cell.* **83**, 2045-2058.e9 (2023).
- [10] Okamoto K, *et al.*, Single-molecule tracking of Nanog and Oct4 in living mouse embryonic stem cells uncovers a feedback mechanism of pluripotency maintenance. *EMBO J.* **42**, e112305 (2023).
- [11] Ishikawa S, *et al.*, Percolation-induced gel-gel phase separation in a dilute polymer network. *Nat. Mater.* **22**, 1564-1570 (2023).
- [12] Tran NV, *et al.*, Programmed disassembly of a microtubule-based membrane protrusion network coordinates 3D epithelial morphogenesis in *Drosophila*. *EMBO J.* **43**, 538-594 (2023).
- [21] 岡田康志, AI 駆動を中心としたデジタルトランスフォーメーションによる生命科学研究の革新 (バイオ DX)、日本内科学会講演会パネルディスカッション、2023 年 4 月 16 日、東京
- [22] 岡田康志, 超解像顕微鏡の活用法～生細胞内でオルガネラ・分子・細胞状態を観察する～、日本腎臓学会学術総会特別講演、2023 年 6 月 9 日、横浜
- [23] 岡田康志, Challenging the limits of live cell optical microscopy imaging、京都大学白眉プロジェクト 2022 年次報告会特別招待講演、2023 年 7 月 20 日、京都大学
- [24] 岡田康志, 生命科学研究の核死因に向けたバイオ DX の挑戦、第 75 回日本生物工学会大会シンポジウム、2023 年 9 月 3 日、名古屋大学
- [25] 岡田康志, 細胞内のありのままを見て理解するための最先端顕微鏡イメージング技術とその応用、CKD New Horizon Conference、2023 年 11 月 30 日、大阪

(国内雑誌)

- [13] 岡田康志, 「超解像顕微鏡の原理—化学の力で物理限界を超える—」化学と教育、**71**, 188-191 (2023).
- [14] 岡田康志, 「超解像蛍光顕微鏡の原理・限界と将来像」、日本結晶学会誌、**65**, 26-32 (2023).
- [15] 岡田康志, 「超解像 3 次元ライブセルイメージングの現状と課題」、Precision Medicine、**6**, 612-616 (2023).
- [16] 岡田康志, 「子情報から画像情報まで統合した AI による内科学の進展 AI 駆動を中心としたデジタルトランスフォーメーションによる生命科学研究の革新」、日本内科学会雑誌、**112**, 1631-1635 (2023).

(学位論文)

- [17] 澤征都, 酵素の enhanced diffusion の直接観察を目指した実験系の構築 (修士論文)
- [18] 廣兼空, 新規標識技術を用いた細胞内構造の高精度トラッキング (修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [19] Yasushi Okada, Tackling the mystery of velocity of fast axonal transport、第 49 回内藤コンファレンス、2023 年 7 月 5 日、札幌

一般講演

- [20] Zhang Y, Ma A, *et al.*, Applications of the Monomeric Photostable Fluorescent Protein mStayGold in Live Cell Imaging, Long-time Time-Lapse Dynamics Analysis, and Super-resolution Imaging. *Cell Bio 2023*, ボストン, 2023 年 12 月 4 日

(国内会議)

招待講演

7.4 古澤研究室

生物システムは、様々な環境変化や内部状態の揺らぎの下で機能し続けられる頑強性 (ロバストネス) を持つ一方で、環境変化などに対して柔軟に内部状態を変化させる可塑性を持つ。このロバストネスと可塑性が両立できるという性質は、生物システムと人工システムの本質的な違いであるが、どのようにして複雑な化学反応のネットワークがその両立を可能とするか、そのメカニズムの理解は進んでいない。一方で、大規模な生物実験データが取得できるようになり、そうしたデータに基づいてシステムの状態遷移やそのロバストネスを議論できるようになりつつある。我々の研究室では、分子から生態系といった様々な階層における生物システムの振る舞いに関して、その状態のロバストネスと可塑性がどのような性質を持つか、理論研究と実験研究の双方からの理解を目指している。

7.4.1 遺伝子制御ネットワークが持つ汎化能力の解析

生物システムは、膨大な数のパラメータを持つ細胞内の化学反応ネットワークから構成され、さまざまな環境変化に対して適切に応答をすることが出来る。しかし、その生物がこれまで経験してきた環境条件の数は有限であり、そうした環境下での進化の過程を経て、(これまでに経験をしたことがない) 未知の環境に対しても適切な応答が可能となり得るかは自明な問題ではない。これは、進化を制御ネットワークの学習過程と考えたときに、どのようにして環境条件の汎化が可能であるかという問題に対応をする。

そこで本研究では、深層学習が大きなパラメータ数の領域で高い汎化能力を示すという知見を背景として、遺伝子制御ネットワークがどのように環境条件

を汎化することが可能か、その汎化能が遺伝子数にどのように依存するかを簡単な細胞モデルのシミュレーションによって解析した。細胞モデルは遺伝子発現制御ネットワークを持ち、環境条件を入力とし、その出力となる発現パターンに応じて適応度が決まるとした。進化シミュレーションの結果として、遺伝子数の増加によって汎化能は上昇し得ること、そのような高い汎化性能と、そこから環境変動を与えたときの進化能には正の相関があることが示された。この結果は、複雑な反応ネットワークを持つ細胞が持つ適応進化能に新たな視点を与えられらる。

7.4.2 化学反応ネットワーク理論に基づいた、触媒反応系の可制御集合計算手法の構築

「死とは何か」という問いは「生命とは何か」を明らかにするために避けては通れないものである。本研究では「細胞死の理論」をつくるための基盤として、触媒反応系における可制御集合を計算する手法を構築した。

細胞内生化学反応、とりわけ代謝反応のほとんどは酵素に触媒されることによって現実的な時間スケールで進行する。そのため、細胞内代謝は「酵素濃度によって代謝物質濃度を制御している化学反応系」と捉えることができる。この細胞内代謝系の制御の限界はどこにあるのだろうか。すなわち、ある与えられた状態から、細胞が十分に速く増殖している際の代謝状態へと、酵素濃度を時間的に変動させることで到達することは常に可能なのだろうか。もしも、ある範囲の代謝状態からは、成長速度がほぼゼロの代謝状態にしか到達できないことが明らかになれば、その状態は再増殖が不可能な「死んだ」あるいは「死に行く」状態だと考えることができるであろう。

このような問題は制御理論において制約付き大域非線形制御問題という、極めて難解な問題クラスに相当し、現行理論を直接応用することはできない。そこで我々は、化学反応ネットワーク理論を援用して、触媒酵素量を制御パラメーターとした制約付き大域非線形制御理論、Stoichiometric Ray を構築した。

触媒は化学反応の活性化エネルギーを小さくすることで反応を加速するが、平衡定数は不変である。Stoichiometric Ray ではこの性質を活用することで、ある与えられた状態 x へと、触媒酵素量の制御によって到達できる代謝物質濃度の集合、可制御集合 $C(x)$ を高効率に数値計算することができる。Stoichiometric Ray を用いて、代謝モデルにおける「これ以降はどのように制御しても成長状態に戻れない点」、point of no return と生死境界の定量化に成功した。

本手法は化学反応系を構成する各化学反応の不可逆性と、反応の量論からもたらされる制約に基づいて状態の可制御性を計算する。そのため、ひとつひとつの反応の不可逆性というミクロな不可逆性を、細胞系の死というマクロな不可逆性に結びつけることが可能であり、「生・死」という生命現象の根源的な概念を理論的に取り扱うためのプラットフォームに

なると考えている。

7.4.3 代謝動力学モデルを用いた低温における代謝ダイナミクスの解析

シマリスやアナグマといった、冬眠能力を持つ動物以外の生物に冬眠能力を付与する研究、人工冬眠研究が近年注目を浴びている。人工冬眠研究は「どれほどの低活性で生命活動を維持することができるか」という基礎科学的な関心だけではなく、急病人などを救急搬送する際の治療開始までの時間稼ぎとしての活用も期待されている。

冬眠状態にある生物の組織は代謝活性が低く、また体温も非常に低い状態にある。化学反応系という、温度によって大きく影響を受けるシステムである細胞が、どのようにして低体温・低代謝状態へと安全に遷移し、そしてまた活動再開ができるのかを詳細に理解することは、人工冬眠研究の発展において重要な課題であるといえる。

本研究においては、そのような課題を理解する第一歩として「低温環境において代謝ダイナミクスはどのような影響を受けるのか」を明らかにするために、最も詳細なモデリングがなされている大腸菌の中心代謝経路動力学モデルを用いて解析を行った。

温度の変化が代謝反応に与える影響は大きく分けて2つ存在する。ひとつは酵素の最大反応速度定数といった速度論的变化であり、他方は反応の可逆性といった熱力学的要素の変化である。最大反応速度定数の変化自体は遺伝子発現レベルの変化によって打ち消すことができるため、本研究では反応可逆性の変化の影響のみに着目して解析を行った。具体的には、さまざまな温度環境下において代謝の微分方程式モデルをさまざまな初期値から数値積分し、そのダイナミクスを観察した。

数値解析の結果、至適温度 (37°C) ではどのような初期値から数値計算を開始しても代謝系は順調に細胞体の合成を行えることが明らかになった。しかし温度が下がるにつれ、徐々に代謝状態のバランスを崩してしまうような解軌道が確認されるようになった。そのような解軌道においては、いくつかの代謝物質の濃度が極端に低くなり、その一方で別の代謝物質の濃度は際限なく蓄積していく様子が観察された。温度低下によるダイナミクスの質的な変化が、代謝反応系におけるどのような反応に起因するのかを理解するために、現在解析を継続している。

7.4.4 環境中の炭素資源が細菌種間の相互作用へ及ぼす影響

自然環境において、細菌は複数種で構成される群集を形成しており、互いの生育を促進あるいは抑制しあっている。こうした種間相互作用は、細菌群集の構成を決定づけ、結果として、地球規模の栄養循環や、ヒトの腸内における食物の消化など、様々な機

能に関わる重要性を担っている。したがって、これらの機能の維持や改変をする上で、細菌の種間相互作用が何によって決定されるかを理解することは必須である。従来の研究の多くは、種ごとに異なる細菌の個性に注目し、種間相互作用が種の組み合わせによって特徴づけられることが示されてきた。例えば、ゲノムが小さく複数の栄養要求性を持つ種間では、生育を促進し合う相互作用が頻繁に観察され、ゲノムが大きく様々な栄養を資化できる種間では、生育を抑制し合う相互作用が頻繁に観察されている。一方で、種間相互作用の統合的な理解のためには、種の個性だけでなく環境要因の考慮が重要であると指摘されはじめています。実際、環境要因に注目した先行研究では、種間相互作用が環境中の炭素源の種類や種数によって、特定の種間相互作用が高頻度に生じることが示されている。しかしながら、実験に使用された細菌種や炭素源種数が極端に限定されており、炭素源が及ぼす種間相互作用への影響を包括的に捉えているとは言い難い。

そこで本研究では、細菌が特定の種間相互作用を頻繁に形成する仕組みの理解を目指して、環境中の炭素資源が細菌種間の相互作用へ及ぼす影響を明らかにする実験を行った。そのために、培地中の炭素源(糖や有機酸など)の種数を1種から16種まで様々に変化させ、先行研究とは異なる8種の細菌を用いた。8種の細菌をそれぞれ二色(赤色と緑色)の蛍光タンパク質で標識し、異なる色で標識された異なる2種(例:赤色標識されたA細菌種と緑色標識されたB細菌種)のペアワイズ($8C_2 = 28$ 通り)について、共培養を行った。それぞれの細菌種の単独培養で得た最終細胞濃度と、共培養で得た最終細胞濃度を比較することで、共培養中の種間相互作用を分類した。具体的には、A細菌種の単独培養から期待される細胞濃度よりも共培養時のA細菌種の細胞濃度が高い場合はBからAへの協力的な相互作用(生育の促進)、低い場合には競争的な相互作用(生育の抑制)と分類した。B細菌種についても同様の解析を行い、培地条件ごと、共培養ペアごとにどのような分類の種間相互作用が生じたかを調べた。

その結果、培地中の炭素源の種数が増加するに従って、協力的な相互作用の頻度が下がり、競争的な相互作用の頻度が増加することがわかった。また、単独培養時にある閾値以上の高い細胞濃度まで増殖できる細菌種同士の共培養条件では、競争的な相互作用の頻度が多く、単独培養時にどちらかの細菌種の最終細胞濃度が閾値よりも低い場合には、共培養時に協力的な相互作用の頻度が高くなることがわかった。これらの結果は、培地中の炭素源の種数増加に伴って、共培養時に競合しあう炭素源の種数が増加することを示唆している。以上の結果は、炭素源の種数の増加によって特定の種間相互作用が高頻度に観察されるメカニズムを示唆しており、種間相互作用における環境要因の重要性を強く示している。

7.4.5 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

細菌のゲノムには、挿入配列(IS)と呼ばれるDNAトランスポゾンが普遍的に存在しており、DNAの構造変異を誘発し、ゲノム構造の進化を駆動する中心的な役割を担うとされている。代表的な例として、細胞内共生細菌が持つ小さなゲノムは、より大きなゲノムをもつ自由生活性の祖先細菌のゲノム中にISが蓄積し、巨大な欠損変異を駆動することで出来上がったと考えられている。また、DNA上で互いに離れた複数の遺伝子間の距離を縮め、ひとつの転写単位としてまとめられたオペロン構造の形成をも駆動すると考えられている。こうしたゲノム構造の進化の痕跡が自然界で頻繁に観察される一方で、その進化過程を実験室で直接観察することはこれまで非常に困難であった。その理由は、野生型のISでは、活性が抑制されており、ISを介したゲノム構造の進化が緩慢であるためである。

そこで本研究では、ISを介したゲノム進化を実験室で直接観察するために、高活性型のISを新たに設計・構築し、モデル生物である大腸菌に導入した。この高活性型のISをゲノムあたり10コピー程度蓄積させた株を複数用意し、それを祖先株として以下のIS蓄積実験を行った。ISが引き起こすゲノムの構造変異は、通常の培養条件では多くの場合、増殖に有害な作用を招くと考えられる。したがって、IS駆動の構造変異を高頻度に観察するためには、活性を高めるだけでなく、増殖にかかる自然選択を弱める条件でゲノムの構造進化を捉える必要がある。集団遺伝学のこれまでの知見から、培養時の集団サイズのボトルネックを小さくすることでこのような条件が達成されることが知られており、本研究でもそれに倣った培養条件で大腸菌を植え継いだ。

10週間の植え継ぎの結果、ゲノムあたり平均11.3コピーものISの増加が観察された。さらに、欠失、重複、逆位など、ISによって駆動された多様な構造変異が観察された。結果として、ゲノムサイズが祖先型の5%前後も増減する進化の直接観察に成功した。また、予想外にもIS内部にも多様な構造変異が観察され、IS自身の進化の過程が示された。これらの結果は、これまで困難であったゲノムの構造進化の過程を実験室で追跡できることを意味している。このように、本研究の成果は、これまで実験検証が困難であったゲノム構造の進化過程について、実験的な検証の機会を高める意義を有している。

7.4.6

<受賞>

[1] 小野大樹, 第71回日本生態学会, ポスター優秀賞, 日本生態学会, 2024年3月.

<報文>

(原著論文)

- [2] Synthetic symbiosis between a cyanobacterium and a ciliate toward novel chloroplast-like endosymbiosis. Azuma Y, Tsuru S, Habuchi M, Takami R, Takano S, Yamamoto K, Hosoda K. *Sci Rep.* 2023, 13;13(1):6104.
- [3] Inference of transcriptome signatures of *Escherichia coli* in long-term stationary phase. Takano S, Takahashi H, Yama Y, Miyazaki R, Furusawa C, Tsuru S. *Sci Rep.* 2023, 13(1):5647.
- [4] Rare-event sampling analysis uncovers the fitness landscape of the genetic code. Omachi Y, Saito N, Furusawa C. *PLoS Comput Biol.* 2023,19(4):e1011034.
- [5] Loss of function of Hog1 improves glycerol assimilation in *Saccharomyces cerevisiae*. Sone M, Navanopparatsakul K, Takahashi S, Furusawa C, Hirasawa T. *World J Microbiol Biotechnol.* 2023, 39(10):255.
- [6] A deep learning approach for morphological feature extraction based on variational auto-encoder: an application to mandible shape. Tsutsumi M, Saito N, Koyabu D, Furusawa C. *NPJ Syst Biol Appl.* 2023, 6;9(1):30.
- [7] Insertion sequences: Simple mobile elements with rich ecological and evolutionary structures. Kanai Y, Tsuru S, Furusawa C. *Curr. Opin. Syst. Biol.* 2023, 36, 100481.
- [8] Prediction of cross-fitness for adaptive evolution to different environmental conditions: Consequence of phenotypic dimensional reduction. Sato TU, Furusawa C, Kaneko K. *Phys. Rev. Res.* 2023, 5(4): 043222.
- [9] Evolution of hierarchy and irreversibility in theoretical cell differentiation model. Nakamura YT, Himeoka Y, Saito N, Furusawa C. *PNAS Nexus.* 2023, 3(1):pgad454.
- [10] Laboratory Evolution of Antimicrobial Resistance in Bacteria to Develop Rational Treatment Strategies. Maeda T, Furusawa C. *Antibiotics (Basel).* 2024, 13(1):94.
- [11] Deciphering the origin of developmental stability: The role of intracellular expression variability in evolutionary conservation. Uchida Y, Tsutsumi M, Ichii S, Irie N, Furusawa C. *Evol Dev.* 2024, 26(2):e12473.
- (国内雑誌)
- [12] 古澤力, 岩澤諄一郎, 前田智也: 大腸菌の多次元表現型計測に基づく適応度地形の推定, *生物物理* 2023, 63(5):263.
- (学位論文)
- [13] 堤真人: Development of a quantitative analysis method for biological morphology using deep learning (深層学習を用いた生物形態の定量解析手法の開発) (博士論文)
- [14] 金井雄樹: Laboratory Evolution of the Bacterial Genome Structure: Accelerated Evolution Using Insertion Sequences (挿入配列を用いた細菌ゲノム構造の実験室進化) (博士論文)
- [15] 西田慧: 計算機シミュレーションによるホスト・パラサイト分子複製系の解析 (修士論文)
- [16] 坂駿之介: 無細胞翻訳系の数理モデルを用いた生化学反応パラメータの推定 (修士論文)
- [17] 小野大樹: 細菌の種間相互作用と炭素源の種数の関係 (修士論文)
- (著書)
- [18] 畠山哲央, 姫岡優介: システム生物学入門, 講談社サイエンティフィック 2023.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [19] Yuta Mizuno, Yosuke Sumiya, Yusuke Himeoka: Simulating fast and slow chemical kinetics with dynamic mode decomposition, 38th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, 2023 年 6 月
- [20] Yuki Kanai, Saburo Tsuru, Chikara Furusawa: Experimental Demonstration of the Evolution of Operon Formation Mediated by Transposable Element Activity, 2023 Synthetic Biology: Engineering, Evolution & Design (SEED), 2023 年 6 月
- [21] Yuki Kanai, Saburo Tsuru, Chikara Furusawa: Consequences of Insertion Sequence-mediated Genome Reduction in Endosymbiotic Organisms – Theory and Experimental Reconstruction, Wolbachia Conference 2023, 2023 年 6 月
- [22] Tomoya Maeda, Kumi Tanabe, Atsushi Shibai, Hazuki Kotani, Chikara Furusawa: Comparative analysis of antibiotic resistance dynamics by high-throughput laboratory evolution of 9 bacterial species, 10th Congress of European Microbiologists (FEMS2023), 2023 年 7 月
- [23] Taisuke Seike, Chikashi Shimoda, Hironori Niki, Chikara Furusawa: Evolutionary importance of sex pheromone variations in *S. pombe*, 11th International Fission Yeast Meeting POMBE2023, 2023 年 8 月
- [24] Masato Tsutsumi, Nen Saito, Daisuke Koyabu, Chikara Furusawa: Development of a quantitative analysis method for biological morphology using deep learning, Statphys28 Satellite meeting: Statistical Physics and Information-Processing in Living Systems, 2023 年 8 月
- [25] Saburo Tsuru: Genetic properties affecting transcriptional plasticity and evolvability in *E. coli*, Statphys28 Satellite meeting: Statistical Physics and Information-Processing in Living Systems, 2023 年 8 月

- [26] Kei Nishida, Yusuke Himeoka, Chikara Furusawa: Emergence of Complex Host-Parasite networks of replicating RNA molecules: A Computational Analysis, Statphys28 Satellite meeting: Statistical Physics and Information-Processing in Living Systems, 2023 年 8 月
- [27] Yuki Kanai, Chikara Furusawa: Endosymbiotic Genome Reduction and the Evolvability of Hosts, Statphys28 Satellite meeting: Statistical Physics and Information-Processing in Living Systems, 2023 年 8 月
- [28] Shunsuke Ichii, Yusuke Himeoka, Chikara Furusawa: Structure of catalytic reaction network for specialized compartments evolution, Statphys28 Satellite meeting: Statistical Physics and Information-Processing in Living Systems, 2023 年 8 月
- [29] Chikara Furusawa, Tomoya Maeda, Junichiro Iwasawa, Atsushi Shibai: Analysis of evolutionary constraints using bacterial experimental evolution, STATPHYS28, 2023 年 8 月
- [30] Yusuke Himeoka, Chikara Furusawa: Disruption of homeostasis and death in kinetic models of Escherichia coli metabolism, STATPHYS28, 2023 年 8 月
- [31] Takuya Sato, Chikara Furusawa, Kunihiro Kaneko: Prediction of Cross-Fitness for Adaptive Evolution of Resistance to Antibiotics, 11th International Conference on Biological Physics (ICBP 2023), 2023 年 8 月
- [32] Yuki Kanai, Chikara Furusawa: Random Genome Reduction Can Accelerate the Evolution of Symbiotic Mutualism, 11th International Conference on Biological Physics (ICBP 2023), 2023 年 8 月
- [33] Ai Muto-Fujita, Suzanne Hingley-Wilson, Chikara Furusawa, John Joe McFadden and Hirotada Mori, Observations of Bacterial Persister Population Dynamics in Antibiotic Environments using a Library of Escherichia coli Gene Deletion Strains, 2023 ASM/ESCMID Joint Conference on Drug Development to Meet the Challenge of Antimicrobial Resistance, 2023 年 9 月
- [34] Rihito Sakurai, Wataru Mizukami, Yuta Mizuno, Yusuke Himeoka, Hiroshi Shinaoka: Solving differential equations for chemical kinetics using quantum tensor train, Trends in the Theory of Quantum Materials 2023, 2023 年 10 月
- [35] Rihito Sakurai, Wataru Mizukami, Yuta Mizuno, Yusuke Himeoka, Hiroshi Shinaoka: Solving differential equations for chemical kinetics using quantum tensor train, Computational Approaches to Quantum Many-Body Systems, 2023 年 10 月
- [36] Rihito Sakurai, Wataru Mizukami, Yuta Mizuno, Yusuke Himeoka, Hiroshi Shinaoka: Solving differential equations for chemical kinetics using quantum tensor train, APS March Meeting 2024, 2024 年 3 月
- 招待講演
- [37] Chikara Furusawa: Exploring the universality of symbiosis: constructive and quantitative approaches to symbiotic evolution, Wolbachia Conference 2023, 2023 年 6 月
- [38] Yusuke Himeoka, Chikara Furusawa: Disruption of metabolic homeostasis: Sensitivity due to the network structure, Statphys28 Satellite meeting: Statistical Physics and Information-Processing in Living Systems, 2023 年 8 月
- [39] Shunnosuke Ban, Yusuke Himeoka, Tomoaki Matsuura, Yoshihiro Shimizu, Chikara Furusawa: Updating parameters of in silico PURE system model (ePURE) based on experimental observations, Korea-Japan Joint Workshop of Bottom-up Synthetic Biology, 2023 年 9 月
- [40] Yusuke Himeoka: Perturbation-response analysis of in silico metabolic dynamics: Hard-coded responsiveness in the cofactor and network sparsity, Asia Synthetic Biology Association meeting 2023, 2023 年 12 月
- [41] Saburo Tsuru, Chikara Furusawa: Genetic properties influencing transcriptional plasticity and evolvability, The 3rd AsiaEvo conference, 2023 年 12 月
- (国内会議)
- 一般講演
- [42] Yui Uchida, Shuji Shigenobu, Hiroyuki Takeda, Chikara Furusawa, Naoki Irie: Exploring Developmental Stability's Role in the Evolutionary Conservation of Body Plan-establishing Period in Vertebrates, 第 56 回 日本発生生物学会年会, 2023 年 7 月
- [43] 清家泰介, 武方宏樹, 阪田奈津枝, 小谷葉月, 古澤力, 松田史生: 国内のショウジョウバエから単離された酵母の多様性解析, 酵母遺伝学フォーラム第 56 回研究報告会, 2023 年 8 月
- [44] 西田慧, 姫岡優介, 古澤力: Exploring Host-Parasite Networks of Replicating RNA through Computational Simulations, 日本進化学会第 25 回大会, 2023 年 9 月
- [45] 姫岡優介, 古澤力: 代謝ネットワークの構造と摂動への応答性の関係, 「細胞を創る」研究会 16.0, 2023 年 9 月
- [46] 上浦六十, 細田一史, 古澤力: 人工モデル生態系を用いた生態系変化の構成的理解, 第 39 回個体群生態学会大会, 2023 年 10 月
- [47] 小野大樹, 津留三良, 古澤力: 細菌の二種共培養実験から探る種間相互作用の傾向, 第 39 回個体群生態学会大会, 2023 年 10 月
- [48] Chikara Furusawa: Computational analysis of generalization capacity in evolution of gene expression network, 日本生物物理学会第 61 回年会, 2023 年 11 月

- [49] 姫岡優介, 古澤力: Disruption of metabolic homeostasis: Responsiveness due to the cofactor dynamics and network sparsity, 日本生物物理学会第 61 回年会, 2023 年 11 月
- [50] Kei Nishida, Yusuke Himeoka, Chikara Furusawa: 機械学習を用いた RNA 分子のホストパラサイトネットワークの複雑性予測, 日本生物物理学会第 61 回年会, 2023 年 11 月
- [51] 姫岡優介, 古澤力: 代謝ホメオスタシスの擾乱とネットワークの構造の関係, 第 46 回日本分子生物学会年会, 2023 年 12 月
- [52] 山上晃太郎, 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, 日本農芸化学会北海道支部 第 2 回学術講演会, 2023 年 12 月
- [53] 池田雄太郎, 姫岡優介, 古澤力: Terraced NK model における遺伝子型の自由度と進化速度の関係, 第 11 回定量生物学の会年会
- [54] 金井雄樹, 芝井厚, 横井直美, 津留三良, 古澤力: 挿入配列に駆動された高速ゲノム構造進化実験系の開発, 第 18 回日本ゲノム微生物学会年会, 2024 年 3 月
- [55] 小野大樹, 津留三良, 古澤力: 細菌の生育環境中に存在する炭素源の種数が種間相互作用に与える影響, 第 71 回日本生態学会大会,
- [56] 後藤琉, 小谷葉月, 吹谷智, 古澤力, 前田智也: ST 合剤を用いた大腸菌の二剤併用薬剤耐性進化実験, 日本農芸化学会 2024 年度大会, 2024 年 3 月
- [57] 永野有佳理, 小谷葉月, 吹谷智, 古澤力, 前田智也: 他の腸内細菌存在下における大腸菌の薬剤耐性進化実験, 日本農芸化学会 2024 年度大会, 2024 年 3 月
- [58] 前田智也, 吹谷智, 古澤力: ヒト腸内細菌叢の大規模継代培養実験による微生物相互作用の解析, 日本農芸化学会 2024 年度大会, 2024 年 3 月
- [59] 櫻井理人, 水上渉, 水野雄太, 姫岡優介, 品岡寛: Quantics テンソルトレインを用いた反応速度論の非線形常微分方程式の解法, 日本物理学会 2024 年春季大会, 2024 年 3 月
- 招待講演
- [60] 内田唯, 重信秀治, 武田洋幸, 古澤力, 入江直樹: 脊椎動物発生システムの“進化しやすさ・しにくさ”を測る, 日本進化学会第 25 回大会, 2023 年 9 月
- [61] 清水 浩, 戸谷 吉博, 古澤 力, 芝井 厚, 堀之内 貴明, 鈴木 宏明, 徳山 健斗, 二井手 哲平: モデル基盤代謝デザインと指向性進化による微生物創製, 化学工学会第 54 回秋季大会, 2023 年 9 月
- [62] 芝井厚, 古澤力: ロボット駆動の大規模自動実験による細菌進化の予測と制御, 化学工学会 第 54 回秋季大会, 2023 年 9 月
- [63] 古澤力: 実験室で進化を観察する～進化の予測と制御へ向けて～, 生命誌研究館 30 周年公開シンポジウム, 2023 年 10 月
- [64] Chikara Furusawa: Exploring the universality of symbiosis: constructive and quantitative approaches to symbiotic evolution, 第 46 回日本分子生物学会年会, 2023 年 11 月
- [65] 武藤愛, Suzanne Hingley-Wilson, 古澤力, Johnjoe McFadden, 森浩禎: 集団ダイナミクス解析により見出された大腸菌高持続性株の薬剤持続性の変動, 第 46 回日本分子生物学会年会, 2023 年 11 月
- [66] 姫岡優介: 大腸菌代謝動力学モデルの恒常性と死, 第 11 回定量生物学の会年会, 2024 年 1 月
- [67] 古澤力: ラボオートメーションを用いた大規模微生物進化実験 ～進化の予測と制御へ向けて～, 発酵と代謝研究会 講演会, 2024 年 3 月
- (セミナー)
- [68] Chikara Furusawa: Towards Prediction and Control of Microbial Evolution: Analysis of Phenotypic Constraints in Laboratory Evolution, OIST Seminar, 2023 年 5 月
- [69] 古澤力: 細胞状態の制御へ向けて: 進化実験によるアプローチ, ミクロとマクロからみる生物のネットワーク, JST・ALCA-Next「グリーンバイオテクノロジー」領域ワークショップ, 2023 年 5 月
- [70] Yuki Kanai: Genome reduction of endosymbiotic bacteria might facilitate the evolution of symbiotic mutualism, Max Planck Institute for Evolutionary Biology Seminar, 2023 年 6 月
- [71] Yusuke Himeoka: Rich dynamics in somewhat “realistic” biochemical models, Niels Bohr Institute CMoL seminar, 2023 年 6 月
- [72] 異種間相互作用による薬剤耐性進化ダイナミクスへの影響: 前田智也, 古澤力, 第一回北海道バイオ “Mix-up”, 2023 年 8 月
- [73] Yoshiyuki Nakamura: Evolution of hierarchy and irreversibility in theoretical cell differentiation model, Niels Bohr Institute CMoL seminar, 2023 年 9 月
- [74] 姫岡優介, 古澤力: 代謝反応ダイナミクスの摂動-応答関係とネットワーク構造, 研究会「理論と実験」, 2023 年 9 月
- [75] 古澤力: Towards Prediction and Control of Microbial Evolution: Analysis of Phenotypic Constraints in Laboratory Evolution, 総研大・統合進化科学セミナー, 2023 年 10 月
- [76] 古澤力: 薬剤耐性進化の予測と制御へ向けて: 大規模進化実験によるアプローチ, 奈良県立医科大学セミナー, 2023 年 11 月
- [77] 姫岡優介: 大腸菌代謝動力学モデルの摂動応答性, 名古屋大学 iBLab ネオ ME セミナー, 2023 年 12 月
- [78] Yoshiyuki Nakamura: Evolution of hierarchy and irreversibility in theoretical cell differentiation model, ICTP-ICTS Winter School on Quantitative Systems Biology, 2023 年 12 月
- [79] 姫岡優介: 細菌の休眠状態と代謝ダイナミクスの安定性, 多細胞休止を研究する会, 2024 年 1 月
- [80] Yusuke Himeoka: Stability and death of in silico Escherichia coli metabolism, Academia Sinica Institute of Physics Seminar, 2024 年 3 月

- [81] 姫岡優介: in silico 大腸菌代謝モデルの安定性と死, 生物の基礎研究会, 2024 年 3 月
- [82] 津留三良: 表現型進化を方向づける分子機構を解き明かす, 生物の基礎研究会, 2024 年 3 月
- [83] 姫岡優介: in silico 細胞死, 研究会「非平衡系の物理」, 2024 年 3 月
- (アウトリーチ/講義)
- [84] 姫岡優介: ミクロとマクロからみる生物のネットワーク, 東京大学大学院工学系研究科技術経営戦略学専攻・計算社会科学 ゲスト講師, 2023 年 7 月
- [85] 姫岡優介: 増殖している細胞のマクロ現象論とその破れ, 第 68 回物性若手夏の学校, 2023 年 8 月
- [86] 姫岡優介: 増殖している細胞のマクロ現象論, 第 3 回数理生物夏の学校, 2023 年 8 月
- [87] 古澤力: 「生きている状態」をどのように理解するか? ~理論と実験からのアプローチ~, 東京都立富士高等学校 理数セミナー, 2023 年 9 月
- [88] 古澤力: Toward Prediction and Control of Microbial Evolution: Analysis of Phenotypic Constraints in Laboratory Evolution, 奈良先端科学技術大学院大学・データサイエンス特別講義, 2023 年 11 月

7.5 川口研究室

川口研究室では、多様な生命現象の仕組みを物理学的な視点から解明することを目指している。特に現在は多細胞現象や細胞分化現象、それを支える細胞内の多分子現象に興味があり、細胞観察実験から機械学習、数値計算や理論構築まで、あらゆる手段を使って研究している。

川口研究室は本年度が初年度であり、東京大学の研究室にはまだメンバーが他におらず、セットアップ中である。本年度に川口は主に生物物理に関わる理論やデータ解析の研究に進めてきたため、以下それらについて記す。

7.5.1 細胞集団運動と非平衡物理

細胞配列パターンからの細胞流予測

マウス由来の神経幹細胞は培養皿上で増殖し、高密度において細胞の細長い形状が細胞間で向きを揃え合う性質から、アクティブマターの実験系としても興味深い対象である。以前の研究により神経幹細胞が液晶などと似たネマチックパターンを作り、そのパターンの中のトポロジカル欠陥に細胞が集積することがわかっていたが、トポロジカル欠陥以外の領域について配列パターンと細胞流の関係は不明であった。われわれは最近、ネマチックパターンと細胞流を結びつける非線形な方程式に基づき、ベイズ推定を用いてパラメータをフィットすることで、予測力の高い理論を得た(論文投稿中)。

7.5.2 形態進化とデータ解析

脊椎動物の堆式のパターン

動物の体軸に沿った特徴的な脊椎のパターンは、体の形態形成を制御する高度に保存された Hox 遺伝子の発現タイミングのシフトによって生じると考えられている。この遺伝的なエンコーディングとマッチしている進化系統樹におけるパターンとしては、哺乳類の後肢より前方の脊椎の数が保存されている点が挙げられてきたが、他に証拠となるパターンは報告されていなかった。われわれは、388 種の四足動物を含む完全な脊椎の数に関するデータを収集し、パターンを系統的に探索する方法を考案している。その結果、予想されたパターンに加えて、体の離れた領域における新しい相関を発見した。その中には、獣脚類から鳥類への進化の過程で現れるものなど、これまでに全く想定されていなかったパターンが含まれており、研究室ではそれらの系統発生学的な意味を今後調べていく(論文投稿中)。

7.5.3 細胞内ヘテロポリマーの理論と実験

細胞内液液相分離とヘテロポリマーの理論

細胞内の液液相分離現象は近年さまざまな生命機能に関わっていることがわかってきている。こうした相分離現象においてはタンパク質の中でも天然変性領域と呼ばれる定まった構造をとっていない配列が重要であるが、タンパク質のように構成モノマーが多様性をもついわゆるヘテロポリマーの多体現象については理論研究が未発達である。われわれはヘテロポリマーの間の相互作用を予測する統一的な理論の枠組みを考案し、さまざまな天然配列に対して相分離現象を再現する分子動力学シミュレーションを行うことでこの理論を検証した。その結果、与えられたタンパク質配列に対して相分離の臨界温度を予測できるだけでなく、異なるヘテロポリマー間の相互作用から多相共存も予測できるようになった(論文リバイズ中)。

7.5.4 生物系にインスパイアされた理論物理

量子アクティブマター

アクティブマター物理では生物の群れのように自走する要素が寄り集まったときに生じるマクロ現象が研究対象である。アクティブマター特有の相転移現象は、スピン系の拡張などの単純化されたモデルでも考えられ、平衡相転移との関係も深く研究されているものの、量子系においてアクティブ性由来の現象があるのかについてはまだ研究が始まったばかりである。われわれは 1 次元の多体量子系において、ハミルトニアンに非エルミートな項を加えることで、

それぞれの粒子が自走するような状況を組み込んだモデルを考えた。その結果、要素間に強磁性相互作用がないモデルにおいても、非エルミート性に起因して強磁性相が「基底状態」(エネルギー実部最小に対応する状態)において実現することを見つけた。[2]

<受賞>

- [1] K. Kawaguchi, Early Career Scientist Prize, IUPAP C3 Committee, 2024-08-09.

<報文>

(原著論文)

- [2] K. Takasan, K. Adachi and K. Kawaguchi, Phys. Rev. Research (accepted, 2024).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [3] K. Kawaguchi, “Inferring the rules of cell fate interactions using nonequilibrium physics and machine learning”, 9th International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems (9IDM-RCS) (2023).
- [4] K. Kawaguchi, “Statistical physics and hidden rules in multicellular dynamics”, 28th International Conference on Statistical Physics (2023).
- [5] K. Kawaguchi, “Inferring the rules of cell interactions in tissues using nonequilibrium physics and graph-based machine learning”, International Symposium on Skin Stem Cell Dynamics (2023).
- [6] K. Kawaguchi, “Probing the asymmetric rules of interactions in multicellular dynamics”, Perspectives on Non-Equilibrium Statistical Mechanics: The 45th Anniversary Symposium of Yamada Science Foundation (2023).

(国内会議)

招待講演

- [7] 川口 喬吾, “生命現象と多体系・非平衡系の物理”, 非平衡系の物理 (2024).
- [8] 川口 喬吾, “生命現象とトポロジー: 分子レベルから組織形成まで”, レーザー学会学術講演会第44回年次大会 (2024).
- [9] 川口 喬吾, “Inferring the rules of cell fate interactions using nonequilibrium physics and graph-based machine learning”, ASHBI Seminar (2023).
- [10] K. Kawaguchi, “Predicting heteropolymer interactions: demixing of disordered protein sequences”, IPR x RIKEN BDR Symposium 2024 (2024).

(セミナー)

- [11] 川口 喬吾, “生命現象と物理モデル: 機械学習による新たな探索”, ipi - ダイキン シンポジウム (2023).
- [12] 川口 喬吾, “アクティブマターとトポロジーと生命現象”, 第68回 物性若手夏の学校 (2023).
- [13] 川口 喬吾, “多細胞ダイナミクスのルール推定と機械学習”, 情報計測オンラインセミナー (2023).

8 技術部門

(南野、下澤、寺山、佐伯)

技術部門では、実験装置試作室、安全衛生、IT 関連、学生実験などの業務を行っている。技術部門の担当教員(酒井教授、藤堂教授、日下准教授、岡本准教授)と月に1度の物理技術室ミーティングを行った。

8.1 実験装置試作室 (下澤)

8.1.1 利用状況

2023 年 1 月から 2023 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：309 枚、総製作個数 559 個
- 加工依頼
依頼元別の加工時間数の割合：物理 57.6%、化学：18.9%、地殻化学：6.5%、フォトンサイエンス：6.5%、素粒子センター：4.5%、地球惑星：2.8%、生物：3.1%、主な依頼者（物理：安東研、島野研、日下研、フォトンサイエンス：井手口研、化学：岩崎研、地殻化学実験施設）

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 (南野、寺山、佐伯)

8.2.1 論文審査会 Web システムの改修 (寺山、南野)

論文審査会の運営で用いる Web システムの改修を物理教務と専攻長から依頼され、井上助教と協力し 8 月頃から対応に当たった。ページや要素の追加によりユーザーインターフェースの利便性を底上げしたほか、審査会の日程調整を行うスケジューラーを新たに開発して組み込むことで、運営上の労力を大幅に削減することに成功した [6]。

8.2.2 安全衛生 (寺山)

理学系環境安全管理室の室員として、産業医巡視の同行と指摘事項対応の取りまとめを行った。また火災リスクアセスメント記入用のアプリのレビュー、専攻内部向けの安全衛生の Web サイトの作成を行った。その他、自衛消防技術者資格を取得するなどの安全衛生関連の研鑽を行っている。

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、理学部化学館西側にある CE タンクの保守管理を行った。昨年度より不調であった管理システムの振る舞いを調べ、大陽日酸の担当者と対応を行った。その結果システムが認識するタンク残量の食い違いは解消したが、システムからのメールの不通やロガーの定期的な異常停止などいくつかの問題は、次年度へ先送りとなったため引き続き対応に当たる。また新規のタンク利用者に向けた利用の手引きを Web 上に公開した。

8.2.4 IT 関連 (南野)

物理学専攻のシステム、サーバについて、以下の開発、管理を行った。

- ウェブサイトの運用管理、メールアカウントの管理、海外出張登録システムの運用保守を行った。
- 共用計算機室の室温監視システムを構築した。
- 共用計算機室の電源増設工事、空調修理の対応を行った。

理学系研究科の情報システムチームの一員として、以下の業務を行った。

- 理学系研究科アカウントのユーザ管理を行った。
- ラーニングサイトを AWS に移行し、システム更新を行った。

8.2.5 学生実験 (佐伯)

学部 3 年生向けの物理学実験 I、II のグループ編成、スケジューリング、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)はオンラインで行った。

- 物理学実験 II (A セメスタ)「生物物理学」の指導

8.2.6 技術交流 (佐伯、寺山、渡辺 (生物学専攻))

理学系研究科技術部の技術交流として、ラズベリーパイ Pico を使った技術研修を行った。12 月 1 日と 8 日の 2 日間、参加者 6 名で実習を実施した [3, 4]。

8.2.7 各種委員会

- 理学系環境安全管理室 室員 (寺山)
- 理学系寒剤管理委員会 (寺山)
- 理学系技術部運営委員会 (下澤)

<報文>

- [1] 技術部報告集 2023 (東京大学大学院理学系研究科・理学部技術部、2024 年 2 月)。

<学術講演>

(国内会議)

- [2] 八幡和志、佐伯喜美子、金長正彦 非物理系の物理学実験教材開発 (III), 日本物理学会第 78 回年次大会 (東北大学、2023 年 9 月)。
- [3] 渡辺 綾子、佐伯喜美子、寺山 智春 ラズベリーパイ Pico を使った技術研修 – 準備編 第 35 回生物学技術研究会 (岡崎コンファレンスセンター、2024 年 2 月)。
- [4] 佐伯喜美子、渡辺 綾子、寺山 智春 ラズベリーパイ Pico を使った技術研修 – 実施編 第 35 回生物学技術研究会 (岡崎コンファレンスセンター、2024 年 2 月)。
- [5] 南野真容子、物理学専攻でのサーバー・システム管理業務、第 32 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、(オンライン、2024 年 3 月)。
- [6] 寺山智春、Python の数値最適化ライブラリを用いた論文審査会のスケジューラーの実装、第 5 回東京大学技術発表会 (東京大学、2024 年 3 月)。
- [7] 八幡和志、佐伯喜美子、金長正彦 非物理系の物理学実験教材開発 (IV), 日本物理学会 2024 年春季大会 (オンライン、2024 年 3 月)。

II

Summary of group activities in 2023

1 Fukushima Group

Research Subjects: QCD phase diagram, Confinement, Lattice simulation, Neutron star, Chiral anomaly

Member: Kenji Fukushima, Arata Yamamoto, and Syo Kamata

In Theoretical Hadron Physics group, many-body quantum problems of quarks and gluons are studied theoretically on the basis of the quantum chromodynamics (QCD). The subjects studied include the quark-gluon plasma in relativistic heavy-ion collisions, lattice gauge simulations with classical and quantum computing, matter under extreme conditions, neutron stars, etc. Highlights in research activities of this year are listed below:

1. Chiral fermions in the lattice gauge theory within the framework of the canonical quantization.
2. Quark confinement in baryons strengthened by external magnetic fields investigated by the Skyrme model.
3. Quantum computing simulations for real-time chirality production.
4. Floquet theory analysis of the chiral anomaly under high frequency electric fields.

2 Liang Group

Research Subjects: Quantum many-body theories in nuclear and cold-atom physics

Member: Haozhao Liang and Hiroyuki Tajima

In our group, we study the properties of atomic nuclei and neutron stars based on various nuclear many-body theories. In particular, one of the main research themes is nuclear density functional theory (DFT), which aims at understanding both ground-state and excited-state properties of thousands of nuclei in a consistent and predictive way. Our research interests also include the microscopic foundation of nuclear DFT, the interdisciplinary applications in nuclear astrophysics, particle physics, condensed matter physics, etc., and the relevant studies in general quantum many-body problems. To this end, a cold atomic gas can be regarded as an ideal testing ground for many-body theories because of its controllability. In this regard, we are also interested in investigating novel many-body phenomena and developing quantum many-body theories through the comparisons with cold atom experiments.

Highlights in research activities of this year include:

1. Quantum impurity problems in neutron-rich matter
2. $^3P_0$ superfluid in dilute spin-polarized neutron matter
3. Isospin symmetry breaking in nuclear structure
4. Nuclear charge density distribution by back-propagation neural networks
5. Density-driven BEC-BCS crossover with the finite-range interactions
6. BCS-BCS crossover in a Bose-Fermi mixture
7. Cooper pairing and tripling in 1D spinless fermions
8. Spin tunneling current and shot noise in an itinerant Fermi gas

3 High Energy Physics Theory Group

Research Subjects: Particle Physics and Cosmology

Member: Takeo Moroi, Koichi Hamaguchi, Yutaka Matsuo

We are working on various topics in particle physics and cosmology, such as physics beyond the Standard Model, dark matter, baryogenesis, inflation, phenomenology of supersymmetric models, astroparticle physics, neutrinos, axion, string theory, supersymmetric field theories, conformal field theories, generalized symmetries, and so on. Specific subjects studied in this academic year are summarized below:

1. Phenomenology
 - 1.1. Vacuum stability in SUSY models [1]
 - 1.2. Cosmic Microwave Background [2]
 - 1.3. Thermal leptogenesis [3]
 - 1.4. Affleck-Dine leptogenesis [4]
 - 1.5. Electric dipole moments [5]
 - 1.6. Dark matter direct search [6, 7, 8]
 - 1.7. Astroparticle physics [9, 10, 11, 12]
 - 1.8. Neutrino physics [13]
 - 1.9. Axion quality problem [14]
 - 1.10. WIMP search at muon collider [15]
2. Superstring theory and formal aspects of quantum field theories
 - 2.1. Infinite-dimensional quantum algebra [16, 17]
 - 2.2. Conformal Field Theories and error-correcting codes [18, 19, 20, 21, 22]
 - 2.3. Identities for special functions [23]
 - 2.4. Branes in heterotic superstring theories [24]
 - 2.5. Generalized symmetries [25, 26]

References

- [1] S. Chigusa, T. Moroi and Y. Shoji, “Stability of electroweak vacuum and supersymmetric contribution to muon $g - 2$,” JHEP **11**, 027 (2023) [arXiv:2306.16596 [hep-ph]].
- [2] R. Jinno, K. Kohri, T. Moroi, T. Takahashi and M. Hazumi, “Testing multi-field inflation with LiteBIRD,” JCAP **03**, 011 (2024) [arXiv:2310.08158 [astro-ph.CO]].
- [3] A. Granelli, K. Hamaguchi, N. Nagata, M. E. Ramirez-Quezada and J. Wada, “Thermal leptogenesis in the minimal gauged $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ model,” JHEP **09** (2023), 079 doi:10.1007/JHEP09(2023)079 [arXiv:2305.18100 [hep-ph]].
- [4] K. Enomoto, K. Hamaguchi, K. Kamada and J. Wada, JCAP **07** (2023), 003 doi:10.1088/1475-7516/2023/07/003 [arXiv:2304.05614 [hep-ph]].
- [5] K. Kaneta, N. Nagata, K. A. Olive, M. Pospelov and L. Velasco-Sevilla, “Quantifying limits on CP violating phases from EDMs in supersymmetry,” JHEP **03**, 250 (2023) [arXiv:2303.02822 [hep-ph]].
- [6] J. Ellis, N. Nagata, K. A. Olive and J. Zheng, “Electroweak loop contributions to the direct detection of wino dark matter,” Eur. Phys. J. C **84**, no.1, 4 (2024) [arXiv:2305.13837 [hep-ph]].
- [7] S. Chigusa, T. Moroi, K. Nakayama, and T. Sighanugrist, “Dark matter detection using nuclear magnetization in magnet with hyperfine interaction,” Phys.Rev.D **108** (2023), no.9, 095007 [arXiv: 2307.08577 [hep-ph]].

- [8] S. Chen, H. Fukuda, T. Inada, T. Moroi, T. Nitta and T. Sichanugrist, “Detecting Hidden Photon Dark Matter Using the Direct Excitation of Transmon Qubits,” *Phys.Rev.Lett.* **131** (2023), no.21, 211001 [arXiv: 2212.03884 [hep-ph]].
- [9] M. Fujiwara, K. Hamaguchi, N. Nagata and M. E. Ramirez-Quezada, “Vortex creep heating in neutron stars,” *JCAP* **03**, 051 (2024) [arXiv:2308.16066 [astro-ph.HE]].
- [10] M. Fujiwara, K. Hamaguchi, N. Nagata and M. E. Ramirez-Quezada, “Vortex Creep Heating vs. Dark Matter Heating in Neutron Stars,” *Phys. Lett.* **848**, 138341 (2024) [arXiv:2309.02633 [hep-ph]].
- [11] S. Balaji, M. E. Ramirez-Quezada, J. Silk and Y. Zhang, “Light scalar explanation for the 18 TeV GRB 221009A,” *Phys. Rev. D* **107** (2023) no.8, 083038 [arXiv:2301.02258 [hep-ph]].
- [12] J. H. Zink and M. E. Ramirez-Quezada, “Exploring the dark sectors via the cooling of white dwarfs,” *Phys. Rev. D* **108** (2023) no.4, 043014 [arXiv:2306.00517 [hep-ph]].
- [13] S. F. Ge and P. Pasquini, “Disentangle neutrino electromagnetic properties with atomic radiative pair emission,” *JHEP* **12** (2023), 083 [arXiv:2306.12953 [hep-ph]].
- [14] D. Y. Cheong, K. Hamaguchi, Y. Kanazawa, S. M. Lee, N. Nagata and S. C. Park, “Axion quality problem and nonminimal gravitational coupling in the Palatini formulation,” *Phys. Rev. D* **108** (2023) no.1, 015007 [arXiv:2210.11330 [hep-th]].
- [15] H. Fukuda, T. Moroi, A. Niki and S. F. Wei, “Search for WIMPs at future $\mu^+\mu^+$ colliders,” *JHEP* **02** (2024), 214 [arXiv:2310.07162 [hep-ph]].
- [16] Y. Matsuo, S. Nawata, G. Noshita and R. D. Zhu, “Quantum toroidal algebras and solvable structures in gauge/string theory,” *Phys. Rept.* **1055** (2024), 1-144 doi:10.1016/j.physrep.2023.12.003 [arXiv:2309.07596 [hep-th]].
- [17] T. Kimura and G. Noshita, “Gauge origami and quiver W-algebras,” [arXiv:2310.08545 [hep-th]]
- [18] K. Kawabata, T. Nishioka and T. Okuda, “Narain CFTs from qudit stabilizer codes,” *SciPost Phys. Core* **6**, 035 (2023) [arXiv:2212.07089 [hep-th]].
- [19] K. Kawabata, T. Nishioka and T. Okuda, “Supersymmetric conformal field theories from quantum stabilizer codes,” *Phys. Rev. D* **108**, no.8, L081901 (2023) [arXiv:2307.14602 [hep-th]].
- [20] K. Kawabata and S. Yahagi, “Fermionic CFTs from classical codes over finite fields,” *JHEP* **05**, 096 (2023) [arXiv:2303.11613 [hep-th]].
- [21] K. Kawabata and S. Yahagi, “Elliptic genera from classical error-correcting codes,” *JHEP* **01**, 130 (2024) [arXiv:2308.12592 [hep-th]].
- [22] Y. F. Alam, K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda and S. Yahagi, “Narain CFTs from nonbinary stabilizer codes,” *JHEP* **12**, 127 (2023) [arXiv:2307.10581 [hep-th]].
- [23] Y. Okuyama, “On some identities for confluent hypergeometric functions and bessel functions,” *Journal of Approximation Theory* **298** (2024) 106014.[arXiv:2301.04629[math.CA]]
- [24] J. Kaidi, K. Ohmori, Y. Tachikawa and K. Yonekura, “Nonsupersymmetric Heterotic Branes,” *Phys. Rev. Lett.* **131**, no.12, 121601 (2023) doi:10.1103/PhysRevLett.131.121601 [arXiv:2303.17623 [hep-th]].
- [25] J. Kaidi, K. Ohmori and Y. Zheng, “Symmetry TFTs for Non-invertible Defects,” *Commun. Math. Phys.* **404**, no.2, 1021-1124 (2023) doi:10.1007/s00220-023-04859-7 [arXiv:2209.11062 [hep-th]].
- [26] K. Ohmori and S. Shimamura, “Foliated-exotic duality in fractonic BF theories,” *SciPost Phys.* **14**, no.6, 164 (2023) doi:10.21468/SciPostPhys.14.6.164 [arXiv:2210.11001 [hep-th]].

4 Nakamura Group

Research Subjects: Spectroscopic study of hypernuclei and related hadron/nuclear physics

Member: Satoshi N. Nakamura and Sho Nagao

The Nuclear Experimental Group (NEX), since the arrival of Professor Nakamura in April 2022, has been conducting research with Professor Nakamura, Assistant Professor Nagao, and two master's students.

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
- 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 ELPH
 - Lifetime measurement of hypernuclei
 - Study of the Λn interaction by the Final State Interaction measurement
- Design of the next generation experiment with the (π, K) reaction at HIHR, J-PARC
- Development of ASIC for the readout circuit of a silicon photomultiplier (SiPM)

5 Yokoyama(M)-Nakajima Group

Research Subjects: Experimental Particle Physics and Particle Astrophysics

Member: Masashi Yokoyama, Yasuhiro Nakajima, and Kota Nakagiri

The main focus of our group is the study of neutrino properties and research using neutrinos as a probe. We are leading experiments using Super-Kamiokande and Hyper-Kamiokande detectors and the J-PARC accelerator.

T2K long-baseline neutrino oscillation experiment

We are currently conducting research on neutrino oscillations in the T2K long-baseline neutrino experiment. This experiment involves the measurement of intense neutrino and anti-neutrino beams produced by the J-PARC accelerator complex and their detection by the Super-Kamiokande detector located 295 km away. Our primary objective is to identify a new source of CP symmetry violation in neutrino oscillations.

We have been leading the project to upgrade the near neutrino detectors to reduce uncertainties related to the understanding of neutrino interactions. This year, the SuperFGD detector was installed in the experimental hall and started collecting data with the neutrino beam.

By combining observations of atmospheric neutrinos by Super-Kamiokande and accelerator neutrino measurements by the T2K experiment, we can improve the measurement of neutrino oscillation parameters. This year, we completed the combined analysis and released the most precise measurements of neutrino oscillation parameters in the world.

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 $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 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 searches for diffuse supernova neutrino background (DSNB) with the enhanced neutron detection capability at Super-Kamiokande, and we aim to achieve the world's first observation of such neutrinos. We are also developing a new method of calibrating the detector utilizing neutron captures on gadolinium. This year, we published the first DSNB search result with the gadolinium-loaded Super-Kamiokande detector, which demonstrated a significant improvement of the sensitivity over the pure-water phase of Super-Kamiokande. Furthermore, we are planning to conduct a nuclear-physics experiment to improve our understanding of neutrino-nucleus interactions and improve the sensitivity for the DSNB searches.

Hyper-Kamiokande

The next-generation water Cherenkov detector, Hyper-Kamiokande, is currently being constructed to greatly expand the range in neutrino physics and the search for proton decay beyond T2K and SK. The Hyper-Kamiokande will have a cylindrical tank with a diameter of 68 meters and a depth of 71 meters, filled with 260,000 tons of ultrapure water. Our group is leading the design and construction of the Hyper-Kamiokande detector system, as well as testing the performance of the photomultiplier tubes and developing calibration methods.

R&D of particle detectors for future experiments

We have been developing new particle detectors for future experiments. One 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.

6 Asai group

Research Subjects: (1) Particle Physics with the energy frontier accelerators (LHC) (2) Physics analysis in the ATLAS experiment at the LHC: (Higgs, SUSY and Extra-dimension) (3) Particles Physics without accelerator using high intensity of Photon (4) Positronium and QED (5) Quantum Technology and Artificial Intelligence (AI)

Member: S.Asai, A.Ishida

- (1) LHC (Large Hadron Collider) has the excellent physics potential. Our group is contributing to the ATLAS group in the Physics analyses: focusing especially on three major topics, the Higgs boson, Supersymmetry, and new diboson resonances(WW and $\gamma\gamma$).

- Higgs: After the discovery of Higgs Boson, We are measuring the Yukawa coupling precisely.
- SUSY: We have excluded the light SUSY particles (gluino and squark) whose masses are lighter than 1.4 and 1.5TeV, respectively.
- (2) Small tabletop experiments have the good physics potential to discover the physics beyond the standard model, if the accuracy of the measurement or the sensitivity of the research is high enough. We perform the following tabletop experiments:
 - Dark matter indirect search with multi-wavelength photons.
 - Search for Photon-Photon scattering with XFEL.
 - Search for WISPs in various wavelengths with high-power light sources.
 - Basic study for Bose-Einstein condensation of positronium.
 - Search for vacuum birefringence.
 - Search for vacuum diffraction with an XFEL and high power laser beams.
 - Precision measurement of the energy spectrum in the orthopositronium decay.
 - Measurement of Positronium Hyper-fine splitting.
 - Search for weakly coupling neutral particles with ortho-positronium.
 - Search for CP violation with ortho-positronium.
 - Search for the invisible decay of ortho-positronium.
 - Lifetime measurement of ortho-positronium.
 - Search for solar axions with Fe-57 resonant absorption.
- (3) Quantum Technology and Artificial Intelligence (AI) for application to fundamental physics.
 - Optimization problems (database search and gradient estimation).
 - Performance evaluation and improvement of quantum machine learning model with repetitive structure.

7 Ogata Group

Research Subjects: Condensed Matter Theory

Member: Masao Ogata, Hiroyasu Matsuura

We are studying condensed matter physics and many body problems, such as strongly correlated electron systems, high- T_c superconductivity, Mott metal-insulator transition, topological materials, Dirac electron systems in solids, thermoelectric materials with large response, organic conductors, and magnetic systems with frustration and/or spin-orbit interactions. The followings are the current topics in our group.

- Thermal transport phenomena [1,2]
- Strongly correlated electron systems [3]
- Spin-orbit interaction [4]
- Theories on superconductivity [5]
- Orbital magnetic effects [6-9]
- Theories on organic conductors [10-12]
- Physics of chirality [13]

- [1] H. Matsuura, M. Ogata, N. Tujii, and T. Mori: in preparation. “Theory of thermoelectric effect based on antiferromagnetic magnon drag in natural chalcopyrite $\text{Cu}_{1+x}\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$ ”
- [2] J. Endo, H. Matsuura, and M. Ogata: in preparation. “Phonon drag effect in Nernst effect and thermal Hall effect: General theory and application to dilute metal”

- [3] K. Takahashi, H. Matsuura, H. Maebashi, and M. Ogata: Phys. Rev. B **107**, 115158 (2023). “Thermoelectric properties in semimetals with inelastic electron-hole scattering”
- [4] M. Kato and M. Ogata: in preparation. “Interatomic spin-orbit coupling in atomic orbital-based tight-binding models”
- [5] J. Endo, H. Matsuura, and M. Ogata: Phys. Rev. B **107**, 094521 (2023). “Theoretical analysis of anisotropic upper critical field of superconductivity in nodal-line semimetals”
- [6] S. Ozaki and M. Ogata: Phys. Rev. B **107**, 085201 (2023). “Topological contribution to magnetism in the Kane-Mele model: An explicit wave-function approach”
- [7] S. Ozaki, I. Tateishi, H. Matsuura, T. Koretsune, and M. Ogata: in preparation. “Diamagnetic anisotropy of the orbital magnetic susceptibility emerging from the nodal line with energy variation”
- [8] M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 013703 (2024). “Theory of Hall Conductivity and Its Exact Relationship to Orbital Magnetic Susceptibility”
- [9] M. Wallerberger, S. Badr, S. Hoshino, S. Huber, F. Kakizawa, T. Koretsune, Y. Nagai, K. Nogaki, T. Nomoto, H. Mori, J. Otsuki, S. Ozaki, T. Plaikner, R. Sakurai, C. Vogel, N. Witt, K. Yoshimi, and H. Shinaoka: Software X **21**, 101266 (2023). “sparse-ir: Optimal compression and sparse sampling of many-body propagators”
- [10] K. Kitayama and M. Ogata: arXiv:2311.07176 (2023). “Nonlinear optical response in multiband Dirac-electron system”
- [11] K. Kitayama and M. Ogata: in preparation. “Charge order induced circular photogalvanic effects in α -type organic conductors”
- [12] Y. Suzumura, T. Tsumuraya, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 054704 (2024). “Seebeck coefficient of two-dimensional Dirac electrons in an organic conductor under pressure”
- [13] K. Ohe, H. Shishido, M. Kato, S. Utsumi, H. Matsuura, and Y. Togawa: Phys. Rev. Lett. **132**, 056302 (2024). “Chirality-induced selectivity of phonon angular momenta in chiral quartz crystals”

8 Tsuneyuki Group

Research Subjects: Theoretical Condensed-Matter Physics

Member: Shinji Tsuneyuki and Takahiro Ishikawa

Computer simulations from first principles enable us to investigate the properties and behavior of materials beyond the limits of experiments or predict them before experiments. Our main subject is to develop and apply such computational physics techniques to investigate fundamental problems in condensed matter physics. We primarily focus on predicting material properties under extreme conditions like ultra-high pressure or at surfaces where experimental data are limited. Our principal tools are molecular dynamics (MD) and first-principles electronic structure calculation based on the density functional theory (DFT). We are also developing new methods that go beyond the limitation of classical MD and DFT to study the electronic, structural, and dynamical properties of materials.

In this academic year, we developed a machine-learning method for molecular dipole moments in liquids and polymers. With this method, we successfully calculated the permittivity of molecular liquids at the THz frequency range, where the electronic dipole moment couples and changes with molecular motion and structural deformation.

We also improved two methods for crystal structure exploration. One is the method based on the evolutionary algorithm, where we introduced neural network potentials for atomic interactions to accelerate the calculation. The other is the data-assimilated molecular dynamics method (DAMD), which utilizes powder X-ray/neutron diffraction data to accelerate structural exploration by the simulated annealing method. We showed that large-scale DAMD applies to so-called multi-phase materials, which contain two or more different crystal grains.

Major research topics in AY 2023 are as follows.

- Dielectric function calculations for molecular condensed systems by machine learning of dipole moments
- Exploration of new superconducting hydrides using evolutionary algorithms
- Data assimilation method for crystal structure exploration
- Superconductivity in hydride perovskites
- Electronic structure calculation with explicitly correlated wavefunctions
- Theoretical calculations of laser ablation considering electronic entropy effects

9 Todo Group

Research Subjects: Development of simulation algorithms for strongly-correlated systems; Novel state and critical phenomena in strongly correlated systems; Quantum computing and quantum algorithms; Machine learning and statistical mechanics; Development of open-source software for next-generation parallel simulations

Member: Syngé Todo, Hidemaro Suwa, Tsuyoshi Okubo, Masahiko Yamada, and Sayan Mukherjee

To know the state of matter, one has to solve the many-body Schrödinger equation and obtain the distribution function of statistical mechanics. However, even with the computational power of modern supercomputers, the many-body Schrödinger equation cannot be solved completely. Therefore, an essential key in computational physics is to re-formulate the original equations in a form that facilitates simulation without losing physically crucial properties such as symmetry and quantum correlations.

We are exploring novel computational physics methods based on sampling methods such as Monte Carlo, representation of quantum fluctuations based on path integrals, information compression using singular value decomposition and tensor networks, statistical machine learning methods, etc. We aim to elucidate the unique states, phase transitions, and dynamics of various quantum many-body systems, from quantum spin systems to real materials and even quantum computers. We are also developing and releasing open-source software for next-generation large-scale simulations. Furthermore, through the activities of the "Quantum Software" endowed chair and the "Center of Innovation for Sustainable Quantum AI," a project supported by JST, we are also conducting research and development of quantum algorithms and quantum machine learning methods based on sampling and tensor networks.

- [1] Shinichiro Akiyama, Matrix product decomposition for two- and three-flavor Wilson fermion: benchmark results in the lattice Gross-Neveu model at finite density, *Phys. Rev. D* **108**, 034514 (2023).
- [2] Tsuyoshi Okubo and Naoki Kawashima, Possibility of a topological phase transition in two-dimensional RP3 model, *J. Phys. Soc. Jpn.* **92**, 114701 (2023).
- [3] Shinichiro Akiyama, Yoshinobu Kuramashi, Critical endpoint of (3+1)-dimensional finite density Z3 gauge-Higgs model with tensor renormalization group, *J. High Energy Phys.* **10**, 77 (2023).
- [4] Hidemaro Suwa, Reducing rejection exponentially improves Markov chain Monte Carlo sampling, *Physica A: Stat. Phys. Appl.* **633**, 129368 (2023).
- [5] Masahiro O. Takahashi, et al, Nonlocal Spin Correlation as a Signature of Ising Anyons Trapped in Vacancies of the Kitaev Spin Liquid, *Phys. Rev. Lett.* **131**, 236701 (2023).
- [6] Junyi Yang, et al, Extraordinary Magnetic Response of an Anisotropic 2D Antiferromagnet via Site Dilution, *Nano Letters* **23** (24), 11409–11415 (2023).
- [7] Sayan Mukherjee, Exact generalized Turán number for K3 versus suspension of P4, *Discrete Mathematics* **347**, 113866 (7pp) (2024).

- [8] Kota Ido, et al, Update of $\mathcal{H}\Phi$: Newly added functions and methods in versions 2 and 3, Comp. Phys. Comm. **298**, 109093 (2024).
- [9] Sayan Mukherjee, Extremal numbers of hypergraph suspensions of even cycles, Eur. J. Comb. **118**, 103935 (2024).
- [10] K. Imamura, et al, Defect-Induced Low-Energy Majorana Excitations in the Kitaev Magnet α - RuCl_3 , Phys. Rev. X **14**, 011045 (2024).
- [11] H. Yamaguchi, et al, Quantum spin state stabilized by coupling with classical spins, Phys. Rev. B **109**, L100404 (2024).

10 Katsura Group

Research Subjects: Condensed Matter Theory and Statistical Physics

Member: Hosho Katsura and Yutaka Akagi

In our group, we study various aspects of condensed matter and statistical physics. In particular, our research focuses on strongly correlated many-body systems in and out of equilibrium, which would give rise to a variety of novel phases. We study theoretically such systems, with the aim of predicting intriguing quantum phenomena that have no counterpart in weakly interacting systems and cannot be understood within standard approaches. Our work involves a combination of analytical and numerical methods. We are currently interested in (i) magnetism in Fermi Hubbard models, (ii) topological magnetism, (iii) open quantum many-body systems, and (iv) non-ergodic dynamics in non-integrable systems. In addition, we are also interested in the mathematical aspects of the above-mentioned fields. Our research projects conducted in FY 2023 are the following:

- Magnetism in $\text{SU}(N)$ Hubbard models
 - Flat-band ferromagnetism in the $\text{SU}(N)$ Hubbard and Kondo lattice models [1]
 - Hole-induced $\text{SU}(N)$ flavor singlets in certain infinite- U $\text{SU}(N)$ Hubbard models [2]
- Topological magnetism
 - Photocontrol of scalar spin chirality in centrosymmetric itinerant magnets [3]
 - Electric field induced thermal Hall effect of triplons in quantum dimer magnets [4]
- Open quantum many-body systems
 - Uniqueness of steady states of Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad equations [5]
 - Jordan decomposition of quadratic open fermionic systems [6]
- Mathematical and statistical physics
 - Quantum many-body scars in spin models with multibody interaction [7]
 - Spontaneous breaking of $\text{U}(1)$ symmetry at zero temperature in one dimension [8]

- [1] K. Tamura and H. Katsura, J. Phys. A **56**, 395202 (2023).
- [2] K-S. Kim and H. Katsura, Phys. Rev. Research **6**, 013307 (2024).
- [3] A. Ono and Y. Akagi, Phys. Rev. B **108**, L100407 (2023).
- [4] N. Esaki, Y. Akagi, and H. Katsura, Preprint, arXiv:2309.12812 [cond-mat.mes-hall] (2023).
- [5] H. Yoshida, Phys. Rev. A **109**, 022218 (2024).
- [6] S. Kitahama, H. Yoshida, R. Toyota, and H. Katsura, J. Stat. Mech. **2024**, 013101 (2024).
- [7] K. Sanada, Y. Miao, and H. Katsura, Phys. Rev. B **108**, 155102 (2023).
- [8] H. Watanabe, H. Katsura, and J. Y. Lee, Preprint, arXiv:2310.16881 [cond-mat.stat-mech] (2023).

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 2023:

1. Sparse estimation using diagonal linear networks
2. Performance analysis of radar detection based on compressed sensing
3. 0/1 matrix factorization using simulated annealing
4. Statistical mechanical analysis of group testing
5. Lattice protein design using Bayesian learning
6. Estimation of anisotropic diffusion parameters using EM algorithm
7. Long-term prediction of real-time evolution of quantum many-body systems using dynamic mode decomposition
8. Performance analysis of iterative self-training of linear classifiers
9. Performance analysis of under-bagging
10. Dynamical mean-field theory for the asymptotic dynamics of alternating minimization for non-Convex optimization

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 2023, we mainly worked on the following projects:

- Dynamics of superconductors
 - Higgs mode in superconductors and nonlinear responses [1]
 - Leggett mode and Lifshitz invariant in multiband superconductors [5]
 - Floquet states in superconductors [2]
 - Collective modes in layered superconductors

- Dynamics of open quantum many-body systems
 - Analysis of energy current based on quantum master equations
 - Feedback control of quantum many-body systems
 - Quantum active matter [7]
 - Spin current in an impurity-doped spin chain [6]
 - Mott insulator ultra-strongly coupled to quantum electromagnetic fields
- Quantum many-body scar states
- Dynamical response of quantum many-body systems
 - Attosecond pulse generation in solids [4]
 - Time-resolved Raman spectroscopy [3]

- [1] Naoto Tsuji, Ippei Danshita, Shunji Tsuchiya, “Higgs and Nambu-Goldstone modes in condensed matter physics”, *Encyclopedia of Condensed Matter Physics* (2nd ed.), Vol. 1, pp. 174 (2024).
- [2] Naoto Tsuji, “Floquet states”, *Encyclopedia of Condensed Matter Physics* (2nd ed.), Vol. 1, pp. 967 (2024).
- [3] Philipp Werner, Martin Eckstein, Naoto Tsuji, “Nonequilibrium DMFT approach to time-resolved Raman spectroscopy”, *Phys. Rev. B* **108**, 245157 (2023).
- [4] Shohei Imai, Atsushi Ono, “Theory for Fourier-limited attosecond pulse generation in solids”, *Phys. Rev. B* **109**, L041303 (2024).
- [5] Raigo Nagashima, Sida Tian, Rafael Haenel, Naoto Tsuji, Dirk Manske, “Classification of Lifshitz invariant in multiband superconductors: An application to Leggett modes in the linear response regime in Kagome lattice models”, *Phys. Rev. Research* **6**, 013120 (2024).
- [6] Chihiro Matsui, Naoto Tsuji, “Exact steady states of the impurity-doped XXZ spin chain coupled to dissipators”, *J. Stat. Mech.* 033105 (2024).
- [7] Kazuaki Takasan, Kyosuke Adachi, Kyogo Kawaguchi, “Activity-induced ferromagnetism in one-dimensional quantum many-body systems”, *Phys. Rev. Research*, in press.

13 Ashida Group

Research Subjects: Condensed matter theory, Theoretical quantum optics

Member: Yuto Ashida and Kazuki Yokomizo

This group focuses on theoretical studies at the intersection of quantum many-body physics and quantum optics. We have been studying physics of open and out-of-equilibrium systems, where quantum systems interact with external world and thus feature nonunitary dynamics. We employ the ideas/methods, including field theory, renormalization group, topology, and variational approach. In addition, we are interested in physical phenomena in the corresponding classical systems and their potential applications. We have also been doing studies related to machine learning and physics. We list research/review papers published in the academic year of 2023 below.

- Non-Hermitian physics, open quantum systems [3, 5, 7, 8, 9]
 - Strongly interacting quantum light-matter systems [1, 2, 4, 6]
- [1] T. Yokota, K. Masuki, and Y. Ashida, Functional-renormalization-group approach to circuit quantum electrodynamics, *Physical Review A* **107**, 043709 (April, 2023).
 - [2] K. Masuki and Y. Ashida, Berry phase and topology in ultrastrongly coupled quantum light-matter systems, *Physical Review B* **107**, 195104 (May 2023).
 - [3] K. Yokomizo and S. Murakami, Non-Bloch bands in two-dimensional non-Hermitian systems, *Physical Review B* **107**, 195112 (May 2023).

- [4] Y. Ashida, A. Imamoglu, and E. Demler, Cavity Quantum Electrodynamics with Hyperbolic van der Waals Materials, *Physical Review Letters* **130**, 216901 (May 2023).
- [5] K. Yokomizo and Y. Ashida, Non-Hermitian physics of levitated nanoparticle array, *Physical Review Research* **5**, 033217 (September 2023).
- [6] K. Masuki, H. Sudo, M. Oshikawa, and Y. Ashida, Masuki et al. Reply, *Physical Review Letters* **131**, 199702 (November 2023).
- [7] T. Sawada, K. Sone, R. Hamazaki, Y. Ashida, and T. Sagawa, Role of Topology in Relaxation of One-Dimensional Stochastic Processes, *Physical Review Letters* **132**, 046602 (January 2024).
- [8] K. Yokomizo, T. Yoda, and Y. Ashida, Non-Bloch band theory of generalized eigenvalue problems, *Physical Review B* **109**, 115115 (March 2024).
- [9] K. Sone, M. Ezawa, Y. Ashida, N. Yoshioka, and T. Sagawa, Nonlinearity-induced topological phase transition characterized by the nonlinear Chern number, *Nature Physics* (in press).

14 Hasegawa Group

Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics

Members: Shuji HASEGAWA and Ryota AKIYAMA

Surfaces/interfaces of materials and atomic-layer materials are platforms of our research where rich physics is expected due to the low-dimensionality, symmetry breaking, a wide variety of structures, and direct access for measurements. (1) Charge/spin/mass transports including superconductivity and spin current, (2) atomic/electronic structures, (3) phase transitions, (4) spin states and spintronics, and (5) epitaxial growths of coherent atomic/molecular layers/wires on surfaces of metals, semiconductors, topological materials, and nano-scale phases such as surface superstructures, ultra-thin films including atomic-layer materials such as graphene and transition metal dichalcogenides. We use various kinds of ultrahigh-vacuum experimental techniques, such as electron diffraction, scanning electron microscopy(SEM), scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy(PES), *in-situ* four-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-four-point probes, and surface magneto-optical effects apparatuses. Main results in this year are as follows.

(1) Surface transport and magnetism:

- Anomalous Hall effect at sandwich structures consisted of magnetic topological insulators and topological crystalline insulator
- 2D superconductivity at α -Sn layers on a topological crystalline insulator
- Non-reciprocal photocurrent at Rashba surfaces induced by irradiation of circularly polarized light
- Ferromagnetism and superconductivity at Yb-intercalated graphene
- Conductivity of highly N-doped surface layer on SiC crystal

(2) New methods:

- Fabrication of a four-point probe UHV system with tunneling spectroscopy and quantum Shot noise measurements
- Development of probes for spin injection and spin detection
- Fabrication of a UHV-MBE system with polarization-controlled mid-infrared irradiation

- [1] Y. Endo, M. Li, R. Akiyama, X. Yan, C. Brandl, J. Z. Liu, R. Hobara, S. Hasegawa, W. Wan, K. S. Novoselov and W.-X. Tang: *Dynamic topological domain walls driven by lithium intercalation in graphene*, *Nature Nanotechnology* **18**, 1154-1161 (Jul, 2023).
- [2] T. Kobayashi, Y. Toichi, K. Yaji, Y. Nakata, Y. Yaoita, M. Iwaoka, M. Koga, Y. Zhang, J. Fujii, S. Ono, Y. Sassa, Y. Yoshida, Y. Hasegawa, F. Komori, S. Shin, S. Ichinokura, R. Akiyama, S. Hasegawa, T. Shishidou, M. Weinert, K. Sakamoo: *Revealing the hidden spin-polarized bands in a superconducting Tl bilayer crystal*, *Nano Letters* **23** (16), 7675-7682 (Aug, 2023).
- [3] I. Taniuchi, R. Akiyama, R. Hobara, and S. Hasegawa: *Surface Circular Photogalvanic Effect in Tl-Pb Monolayer Alloys on Si(111) with Giant Rashba Splitting*, under review (<https://arxiv.org/abs/2308.02485>).

15 Okamoto Group

Research Subjects: Experimental Condensed Matter Physics,

Low temperature electronic properties of two-dimensional systems.

Member: Tohru Okamoto and Ryuichi Masutomi

We study low temperature electronic properties of two-dimensional systems.

The current topics are following:

1. Two dimensional electrons at cleaved semiconductor surfaces:

At the surfaces of InAs and InSb, conduction electrons can be induced by submonolayer deposition of other materials. Recently, we have performed in-plane magnetotransport measurements on in-situ cleaved surfaces of *p*-type substrates and observed the quantum Hall effect which demonstrates the perfect two dimensionality of the inversion layers. Research on the hybrid system of 2D electrons and adsorbed atoms has great future potential because of the variety of the adsorbates and the application of scanning probe microscopy techniques.

To explore exotic physical phenomena related to spin at a semiconductor surface, magnetic-atom induced two dimensional electron systems are investigated by using low-temperature scanning tunneling microscopy and spectroscopy combined with transport measurements.

2. Superconductivity of monolayer films on cleaved GaAs surfaces:

Recently, we studied the effect of the parallel magnetic field $H_{\parallel}$ on superconductivity of monolayer Pb films on GaAs(110). Superconductivity was found to occur even for $H_{\parallel} = 14$ T, which is much higher than the Pauli paramagnetic limiting field H_P . The observed weak $H_{\parallel}$ dependence of the superconducting transition temperature T_c is explained in terms of an inhomogeneous superconducting state predicted for 2D metals with a large Rashba spin splitting.

We have studied nonreciprocal charge transport in superconducting ultrathin films. For ultrathin Pb and Al films grown on the cleaved surface of GaAs (110), the antisymmetrized second harmonic magnetoresistance was observed, which suggests that rectification effect occurs in the superconducting ultrathin films. Moreover, to clarify the origin of the rectification effect, we made the observation of the cleaved GaAs surface using a scanning electron microscope. We found that an asymmetric edge structure causes the rectification effect, which is called vortex ratchet.

16 Shimano Group

Research Subjects: Optical and Terahertz Spectroscopy of Condensed Matter

Member: Ryo Shimano and Naotaka Yoshikawa

We study light-matter interactions and many body quantum correlations in solids, aiming at light-control of many-body quantum phases. In order to investigate the role of electron and/or spin correlations in the excited states as well as in the ground states, we focus on the low energy electromagnetic responses, in particular in the terahertz (THz) (1 THz $\sim$ 4 meV) frequency range where various quasi-particle excitations and various collective excitations exist. The research highlights in FY2023 are as follows.

1. **Nonequilibrium dynamics of superconductors:** We have investigated the photoexcited nonequilibrium dynamics of high- T_c cuprate superconductors. In particular, we have investigated the signature of light-induced superconductivity in $\text{La}_{2.0-x-y}\text{Nd}_y\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ through the observation of light-induced plasma edge above T_c upon the near-infrared optical pulse excitation, with systematically changing the Sr and Nd contents. We have elucidated that the light-induced plasma edge emerges from both the long range stripe order or the short-range CDW order above T_c with the frequency almost identical to that of Josephson plasma frequency in the superconducting phase. Our results demonstrate the intimate interplay between the superconductivity and the CDW order.

2. **Floquet engineering of 3 dimensional Dirac electron systems:** Floquet states in Dirac electron system in Bi were investigated by irradiating the circular polarized mid infrared light pulses. In particular, we discovered that a new type of Weyl nodes, characterized by the topological charge of 2, appear at the one photon resonance position, which dominate the light-induced anomalous Hall effect in three-dimensional Dirac electron system. We have theoretically demonstrated that this "double-Weyl node" split into a pair of Weyl node possessing a topological charge of 1 when an anisotropy in the Fermi velocity is introduced. Further, we have demonstrated that the splitting of the Weyl node can be compensated by controlling the ellipticity of the driving light field.

References

- [1] Morihiko Nishida, Kota Katsumi, Dongjoon Song, Hiroshi Eisaki, Ryo Shimano, Light-induced coherent inter-layer transport in stripe-ordered $\text{La}_{1.6-x}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, *Phys. Rev. B* **107**, 174523 (2023).
- [2] Kota Katsumi, Morihiko Nishida, Stefan Kaiser, Shigeki Miyasaka, Setsuko Tajima, and Ryo Shimano, *Phys. Rev. B* **107**, 214506 (2023).
- [3] Kazuma Ogawa, Naotaka Yoshikawa, Mio Ishibashi, Kay Yakushiji, Arata Tsukamoto, Masamitsu Hayashi, and Ryo Shimano, Ultrafast stroboscopic time-resolved magneto-optical imaging of domain wall motion in Pt/GdFeCo wires induced by a current pulse, *Phys. Rev. Research* **5**, 033151 (2023).
- [4] Sachiko Nakamura, Haruki Matsumoto, Hiroki Ogawa, Tomoki Kobayashi, Fuyuki Nabeshima, Atsutaka Maeda, Ryo Shimano, Picosecond Trajectory of Two-dimensional Vortex Motion in $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ Visualized by Terahertz Second Harmonic Generation, *arXiv:2401.07397*.
- [5] Yoshua Hirai, Shun Okumura, Naotaka Yoshikawa, Takashi Oka, and Ryo Shimano, Floquet Weyl states at one-photon resonance: An origin of nonperturbative optical responses in three-dimensional materials, *Phys. Rev. Research* **6**, L012027 (2024).

17 Takagi-Kitagawa Group

Research Subjects: Physics of Correlated Electron Systems

Member: Hidenori Takagi, Kentaro Kitagawa, Naoka Hiraoka

We are exploring new compounds in which novel, exotic and/or functional electronic phases are realized. Our main targets in FY2023 included, 3d-electron superconducting materials under high pressure, 4f lanthanide honeycomb-lattice compounds with interplay of electron correlations and strong spin orbit coupling, spin liquids, and instrumental development of ultrahigh-pressure magnetometry devices.

Materialization of a quantum spin liquid (QSL), where spins fluctuates even at $T = 0$, has long been a milestone in the research on a quantum magnetism. The recent theoretical discovery of the Kitaev honeycomb model, which gives an exactly solvable QSL state, brought a fresh fuel to the research field and boosted the exploration of new generation of QSL candidate materials. We kicked off such exploration by discovering a two-dimensional (2D) honeycomb iridate, $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$. We did not observe any signature of magnetic ordering down to 50 mK in specific heat, magnetic susceptibility, and nuclear magnetic resonance, evidencing the formation of a QSL. The next step was to show that the QSL state is of the Kitaev-type. Despite our intensive effort, any clear signature of Majorana fermions, the hallmark of the Kitaev-type QSL was not identified in $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$, likely due to the site disorder of H ions. To establish the Kitaev-type QSL state in real materials, we may need a second generation of candidate materials for "true" Kitaev.

The key ingredient to realize the Kitaev-type QSL is bond-dependent anisotropic Ising-like interaction, which can be realized by placing $J_{\text{eff}} = 1/2$ pseudo spins connected by edge shared bonds on 2D honeycomb lattice or on three-dimensional (3D) hyper-honeycomb lattice. In FY2023, we explored Lanthanide honeycomb materials as a new route. 2D/3D α, β -type Na_2PrO_3 were suggested to be a possible platform

of Kitaev physics with an antiferromagnetic Kitaev-type interaction. We found that α, β -Na₂PrO₃ shows a significant short-range ordering (fluctuations) above the antiferromagnetic transition temperature. The 3D β -phase showed similar magnitude of fluctuations as in 2D α -phase. We therefore concluded the bond frustration likely originating from Kitaev interaction, not from two dimensionality, is the main cause of fluctuations. We are extending our arena of exploration to other 4f honeycomb material in combination with Material Informatics and traditional crystal growth techniques. Cu₃SmTe₃ was found to be a new member of Lanthanoid Kitaev candidate material, which is semi-metallic. A possible interplay of Kitaev physics and itinerant charge carriers may open a route to not only the Kitaev-type QSL but also even more exotics state such as a topological superconductor, along which we will continue our project in FY2024.

To extend possible phase space for our materials exploration, we employed ultrahigh pressure environment to modify the relevant key parameters such as magnetic interactions. The difficulty of measuring the magnetization candidate materials above a few giga pascals of pressure, however, gave our project a big challenge. To overcome the issues, we recently developed an opposed-anvil type pressure cell, which allows a highly sensitive magnetometry with a resolution of volume susceptibility as small as 10^{-4} under very high pressures up to 9 GPa. The high-pressure cell has an optimized geometry, which yield a one order of magnitude smaller background signal in the magnetization measurement using a commercial SQUID magnetometer, than those of previously reported high-pressure cells. The use of Moissanite for anvil cell contributed substantially to the improvement of resolutions and the increase of the maximum pressure. This state-of-the-art experimental technique should allow us to pursue novel magnetism and superconductivity under ultra-high pressures in FY2024.

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 current generation
 - Optical detection of spin and orbital Hall currents[1]

The film thickness dependence of the current-induced magneto-optical Kerr effect is studied in Pt and V thin films. We find that the Kerr signal for Pt shows little dependence on the thickness in the range studied (20 – 80 nm) whereas the signal for V increases with increasing thickness and saturates at a thickness near 100 nm to a value significantly larger than that of Pt. The experimental results can be accounted for if we assume that spin and orbital Hall effects are responsible for the Kerr signal. We show that the Kerr signal is proportional to the product of the dc spin (orbital) Hall conductivity and the energy derivative of the ac spin (orbital) Hall conductivity. Contributions from the spin and orbital Hall effects mostly add up for V whereas they cancel out for Pt. Assuming that the orbital Hall conductivity matches that predicted from first-principles calculations, the thickness dependence

of the Kerr signal suggests that the orbital diffusion length of V is considerably smaller compared to its spin diffusion length.

- Non-linear optical properties of solids

- Chiral phonons in PtSe₂ [6]

The Raman scattering is found to be helicity dependent in thin Pt₂ flakes. Helicity-resolved Raman scattering in PtSe₂ flakes is studied against its thicknesses. We find the peak amplitude of the helicity-switched Raman scattering is significantly larger than that of helicity-conserved scattering for the in-plane E_g mode, consistent with the Raman tensor analyses and conservation law of angular momentum. The peak amplitude of the helicity-switched E_g mode is larger for the thinner flakes. In addition, we find Raman peaks near the energy levels of IR-active E_u and A_{2u} modes, only for monolayer and a few-layers-thick flakes. Interestingly, these peaks manifest themselves only for helicity-switched Raman scattering; they are nearly absent for helicity-conserved scattering. The results suggest excitation of chiral phonons in ultrathin PtSe₂ flakes.

- Strong coupling in solids

- Magnetoelastic coupling in thin film heterostructures[4]

A novel approach to determine the magnetoelastic coupling constant of magnetic layers in thin film heterostructures is developed. The film is formed on a piezoelectric substrate between two interdigital transducers (IDTs). IDTs are commonly used to construct a surface acoustic wave device. With the substrate piezoelectricity, strain is induced into the film by applying a dc voltage to the IDTs. The strain causes changes in the magnetization direction of the magnetic layer, which is probed by measuring changes, if any, in the transverse resistance of the heterostructure. The on-chip all-electrical approach described here provides a versatile means to quantitatively assess the magnetoelastic coupling constant of thin film heterostructures.

- [1] Y. Marui, M. Kawaguchi, S. Sumi, H. Awano, K. Nakamura, M. Hayashi, Spin and orbital Hall currents detected via current-induced magneto-optical Kerr effect in V and Pt. *Phys. Rev. B* 108, 144436 (2023).
- [2] T. Taniguchi, S. Isogami, S. Okame, K. Nakada, E. Komura, T. Sasaki, S. Mitani, M. Hayashi, Probability of spin-orbit torque driven magnetization switching assisted by spin-transfer torque. *Phys. Rev. B* 108, 134431 (2023).
- [3] K. Ogawa, N. Yoshikawa, M. Ishibashi, K. Yakushiji, A. Tsukamoto, M. Hayashi, R. Shimano, Ultrafast stroboscopic time-resolved magneto-optical imaging of domain wall motion in Pt/GdFeCo wires induced by a current pulse. *Phys. Rev. Res.* 5, 033151 (2023).
- [4] T. Kawada, I. Yasuda, M. Kawaguchi, M. Hayashi, On-chip all-electrical determination of the magnetoelastic coupling constant of magnetic heterostructures. *Appl. Phys. Lett.* 123, 092403 (2023).
- [5] G. Qu, M. Hayashi, M. Ogata, J. Fujimoto, Anisotropy of the spin Hall effect in a Dirac ferromagnet. *Phys. Rev. B* 108, 064404 (2023).
- [6] I. Yasuda, T. Kawada, H. Matsumoto, M. Kawaguchi, M. Hayashi. Helicity-resolved Raman spectroscopy of mono-and a few-layers-thick PtSe₂. *Appl. Phys. Exp.* 16, 053005 (2023).
- [7] M. Asano, H. Matsumoto, M. Hayashi, D. Hatanaka, Cavity magnomechanical coupling with coupled magnon modes in a synthetic antiferromagnet. *Phys. Rev. B* 108, 064415 (2023).

19 Kobayashi Group

Research Subjects: Quantum sensing and mesoscopic physics

Member: Kensuke Kobayashi and Kento Sasaki

The development of nanotechnology since the 1980s has given rise to mesoscopic physics. This field aims to control various properties of matter using tiny electronic circuits (= mesoscopic systems) made from semiconductors, metals, superconductors, and magnetic materials. Developments in this field have led to the possibilities of various quantum technologies. One of these is quantum sensing, a precision measurement technique based on the principles of quantum mechanics. Our goal is to construct precise condensed matter physics based on quantum sensing.

Using color center quantum sensors, such as nitrogen-vacancy (NV) center in diamond and boron vacancy in hexagonal boron nitride (hBN), we are developing a single quantum spin microscope for diverse quantum sensing applications. This technique can quantitatively image the distribution of magnetic fields and temperature on a sub-micron scale in various environments. Such a technique has never existed in condensed matter physics. Many essential and fascinating topics, such as non-equilibrium transport, spin glass, topological edge states, and persistent currents, lie ahead.

The primary research topics in FY2023 are as follows.

- Demonstration of geometric diabatic control of quantum states in a two-level system [1]
- Mechanism of suppression of pulsed dynamic nuclear polarization by many-body spin dynamics [2]
- Systematic study of optical-power-dependent splitting of magnetic resonance in NV centers [3]
- Wide-field quantitative magnetic imaging of superconducting vortices [4]
- Highly sensitive wideband microwave sensing using ensemble NV centers [5]
- Multi-frequency composite pulse control of hBN quantum sensor [6]
- Magnetic field imaging by hBN quantum sensor nanoarray [7]
- Nitrogen isotope effects on hBN quantum sensors [8]

Published papers:

- [1] K. Sasaki *et al.*, *Physical Review A* **107**, 053113 (2023).
- [2] K. Sasaki and E. Abe, *Physical Review Letters* **132**, 106904 (2024).
- [3] S. Ito *et al.*, *Journal of the Physical Society of Japan* **92**, 084701 (2023) [Editors' Choice].
- [4] S. Nishimura *et al.*, *Applied Physics Letters* **123**, 112603 (2023).
- [5] K. Ogawa *et al.*, *Applied Physics Letters* **123**, 214002 (2023) [Editor's Pick].
- [6] H. Gu *et al.*, *Applied Physics Express* **16**, 055003 (2023).
- [7] K. Sasaki *et al.*, *Applied Physics Letters* **122**, 244003 (2023) [AIP Publishing Showcase].
- [8] K. Sasaki *et al.*, *Applied Physics Express* **16**, 095003 (2023).
- [9] R. Okaniwa *et al.*, *Journal of Applied Physics* **135**, 044401 (2024).
- [10] R. Sakano *et al.*, *Physical Review B* **108**, 205147 (2023) [Editors' Suggestion].

20 Nakatsuji-Sakai Group

Quantum materials research enters a new age featuring a rapid integration of academic research with emerging technologies and interdisciplinary approaches. Our research activities focus on designing and synthesizing new materials with groundbreaking quantum properties and functionalities; we then connect these discoveries to potential applications via the fabrication of thin-film devices. We aim to lead the innovative quest for new quantum materials that bear a far-reaching impact not only on basic science but also on future 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 2023

1. Extremely large magnetoresistance in multipolar Kondo system $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ [1]

The multipolar Kondo systems $\text{Pr}(\text{Ti}, \text{V})_2\text{Al}_{20}$ provide unprecedented opportunities to design new quantum phases and functionalities beyond the spin-only paradigm. They host a nonmagnetic crystal-electric-field ground state in which the magnetic dipole moment is absent while higher-order quadrupolar and octopolar moments are active; the substantial Kondo entanglement between these multipolar moments and the conduction electron sea serves as the root for strange metal behavior, quantum criticality, and exotic superconductivity observed in these systems. Here, we discover extremely large magnetoresistance (XMR) exceeding $\sim 10^3\%$ in the pure ferroquadrupolar ordered state of $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ and identify the key role of Fermi surface topology in generating this XMR. Large magnetoresistance lays the foundation for various technological applications; a well-known example is the magnetic field sensor based on giant magnetoresistance (GMR). Our findings demonstrate that a multipolar ordered state, without involving spin degrees of freedom, can realize large magnetoresistance. These findings provide essential insights that may facilitate revealing unified mechanisms behind large magnetotransport phenomena and thereby widen the material platforms for their applications.

2. Anisotropic anomalous transport in the kagome-based topological antiferromagnetic Mn_3Ga epitaxial thin films [2]

Topological antiferromagnet Mn_3Ga has the largest Néel temperature of 480 K among the family of $D0_{19}$ Mn_3X ($X=\text{Sn}, \text{Ge}, \text{Ga}$), and thus it is the best suited for realizing ultrafast spintronics with thermal stability. However, the magnetic and electrical transport properties of Mn_3Ga thin films remain largely unexplored because of difficulties in their fabrication. In this study, we report the fabrication of high-quality, epitaxial Mn_3Ga thin films on different substrates by using the sputtering method. Measurements on crystal structure, electrical transport properties, and optical properties show that the films exhibit signatures of a Weyl semimetallic state. Moreover, large responses signifying a magnetic order are observable up to the THz frequency range, indicating that the magnetic order can be detected using high-speed measurement techniques.

3. Giant anomalous Nernst effect in polycrystalline thin films of Co_2MnGa [3]

Co₂MnGa is a Heusler compound that exhibits the largest room-temperature anomalous Nernst effect known to date. This effect arises from its topological band structure, namely, the Weyl nodes. Previously, the large anomalous Nernst effects in thin-film Co₂MnGa were obtained via epitaxial growth using a single-crystal substrate or an interface with an easily crystallized material such as AlN. Here, by improving the deposition process, we have succeeded in obtaining the anomalous Nernst effect of $-5.4 \mu\text{V/K}$ in Co₂MnGa thin films deposited directly on SiO₂/Si substrates, which are cheaper and readily available comparable to those using single crystal substrates. The key aspect of this method is that Co₂MnGa grains with the $L2_1$ structure were realized by high-temperature deposition. This film deposition technique can facilitate the commercial advancement of thermoelectric devices using the anomalous Nernst effect and the development of spintronics devices by interfacing with widened material classes.

4. Anomalous Nernst Thermopile for Direct Sensing of Perpendicular Heat Flux [4]

The anomalous Nernst effect (ANE) converts perpendicular heat flux into electrical voltage, in sharp contrast with the Seebeck effect (SE). This characteristic enables mass production, large area, and flexibility of ANE-based devices by using ordinary thin-film fabrication techniques. The heat flux sensor is among the most promising applications of ANE. It is a powerful device for evaluating heat flow and can lead to energy savings through efficient thermal management. In reality, however, SE generated by the in-plane heat flux is always superimposed on the measured signal, making it difficult to evaluate the perpendicular heat flux. Here, we fabricate ANE-type heat flux sensors that selectively detect a perpendicular heat flux by adjusting the net Seebeck coefficient in their thermopile circuit with mass-producible roll-to-roll sputtering methods. The direct sensing of perpendicular heat flux using ANE-based flexible thermopiles, together with the simple fabrication process, paves the way for the practical application of thin-film thermoelectric devices.

- [1] Takachika Isomae, Akito Sakai, Mingxuan Fu, Takanori Taniguchi, Masashi Takigawa, and Satoru Nakatsuji “Extremely large magnetoresistance and anisotropic transport in the multipolar Kondo system PrTi₂Al₂₀” *Phys. Rev. Research* **6**, 013009 (2024).
- [2] M. Raju, Ralph Romero, III, Daisuke Nishio-Hamane, Ryota Uesugi, Mihiro Asakura, Zhenisbek Tagay, Tomoya Higo, N. P. Armitage, Collin Broholm, and Satoru Nakatsuji “Anisotropic anomalous transport in the kagome-based topological antiferromagnetic Mn₃Ga epitaxial thin films” *Phys. Rev. Mater.* **8**, 014204 (2024).
- [3] R. Uesugi, T. Higo, and S. Nakatsuji “Giant anomalous Nernst effect in polycrystalline thin films of the Weyl ferromagnet Co₂MnGa” *Appl. Phys. Lett.* **123**, 252401 (2023).
- [4] H. Tanaka, T. Higo, R. Uesugi, K. Yamagata, Y. Nakanishi, H. Machinaga, and S. Nakatsuji “Roll-to-Roll printing of anomalous Nernst thermopile for direct sensing of perpendicular heat flux” *Advanced Materials* **35**, 2303416 (2023).

21 Theoretical Astrophysics Group

Research Subjects:Observational Cosmology, Extrasolar Planets, Star Formation, high-energy astrophysics, and Artificial Intelligence

Member:Yasushi Suto, Naoki Yoshida, Kana Moriwaki & Hiroto Mitani

The Theoretical Astrophysics Group conducts a wide range of research programs. Observational cosmology is our primary research area, but we also pursue other forefront topics such as extrasolar planets, star formation, high-energy astrophysics, and artificial intelligence.

“Observational Cosmology” attempts to understand the evolution of the universe on the basis of the observational data in various wavebands. The proper interpretation of recent and future data provided by Planck, Hubble Space Telescope, ALMA, and wide-field galaxy surveys such as Subaru Hyper-Suprime-Cam survey are very important both in improving our understanding of the present universe and in determining several basic parameters of the universe, which are crucial in predicting the evolution of the universe. Our current interests include non-linear gravitational evolution of cosmological fluctuations, formation and evolution of proto-galaxies and proto-clusters, X-ray luminosity and temperature functions of clusters of galaxies, hydrodynamical simulations of galaxies and the origin of the Hubble sequence, thermal history of the universe and reionization, prediction of anisotropies in the cosmic microwave background radiation, statistical description of the evolution of mass functions of gravitationally bound objects, statistics of gravitationally lensed quasars, and the chemical formation history of the Milky Way.

Astronomical observations utilizing large ground-based telescopes discovered distant galaxies and quasars that were in place when the Universe was less than one billion years old. We can probe the evolution of the cosmic structure from the present-day to such an early epoch. Shortly after the cosmological recombination epoch when hydrogen atoms were formed, the cosmic background radiation shifted to infrared, and then the universe would have appeared completely dark to human eyes. A long time had to pass until the first generation stars were born, which illuminated the universe once again and terminate the cosmic Dark Ages. We study the formation of the first stars and blackholes in the universe. The first stars are thought to be the first sources of light, and also the first sources of heavy elements that enable the formation of ordinary stellar populations, planets, and ultimately, the emergence of life. We perform simulations of structure formation in the early universe on supercomputers. Direct and indirect observational signatures are explored considering future radio and infrared telescopes. We study the formation and mixing of the first heavy elements in the universe. Comparing the predictions of our simulations to observations allows us to better understand the nature of the underlying physical processes.

Can we discover a second earth somewhere in the universe? This puzzling question used to be very popular only in science fictions, but is now regarded as a decent scientific goal in the modern astronomy. Since the first discovery of a gas giant planet around a Sun-like star in 1995, more than 4000 exoplanets have been reported as of March 2021. Though most of the confirmed planets turned out to be gas giants, the number of rocky planet candidates was steadily increasing, which therefore should give the affirmative answer to the above question. Our approaches towards that exciting new field of exoplanet researches include the spin-orbit misalignment statistics of the Rossiter-MacLaughlin effect, simulations of planet-planet scattering, simulations of tidal evolution of the angular momentum of the planetary system, photometric and spectroscopic mapping of a surface of a second earth and detection of possible biomarker of habitable planets.

To maximise the information gain from astrophysical observations and numerical simulations, we also apply and develop state-of-the-art machine learning techniques. We use supervised machine learning algorithms to classify observations of metal-poor stars, quasars, and satellite galaxies of the Milky Way. We improve existing deep learning methods with a new class of activation functions that allow users to improve the extrapolation properties of their neural networks. Artificial intelligence (AI) is a rapidly evolving field with many promising applications. To better understand the social impact of AI research, we also

collaborate with social scientists to better understand the impact and public attitudes towards AI research.

Let us summarize this report by presenting recent titles of the PhD and Master's theses in our group;

2023

- Binary blackhole mergers induced by dynamical interaction of hierarchical triple systems
- Observational studies of stellar rotation using high precision photometric data
- White Dwarf Populations from a Semi-Analytical Star Formation Model

2022

- Understanding Atmospheric Escape of Hot Jupiters Using Radiation Hydrodynamics Simulations
- Neutron-capture element enrichment of early galaxies
- Formation and evolution of star clusters and galaxies in the early Universe

2021

- Study on the effect of supernova fallback on the neutron star diversity
- Gravitational hierarchical three-body systems with an invisible inner binary: application to binary black-hole search and their dynamical stability
- Analysis of the Large-Scale Structure of the Universe Using Cosmological Simulations and Machine Learning
- Planetary systems predicted from the ALMA disks: planet-disk evolution and long-term orbital stability of multi-planets
- Structure Formation of the Universe with Fuzzy Dark Matter
- Dispersal mechanism of proto-planetary disks

2020

- Observational signatures from tidal disruption events of white dwarfs
- Multiwavelength Signals From Pulsar-Driven Supernovae
- Measuring stellar rotation periods and stellar inclinations of kepler solar-type stars

2019

- Observational characterization of protoplanetary disks, exo-rings, and Earth-twins in exoplanetary systems
- Non-sphericities and alignments of clusters and central galaxies from cosmological hydrodynamical simulation: theoretical predictions and observational comparison
- Probing Cosmic Star-Formation History with Blind Millimetre Searches for Galaxy Emission Lines

- Photoevaporation process of giant planets
- Dilution of heavy elements in galaxies and its implications

2018

- Stellar Inclinations from Asteroseismology and their Implications for Spin-Orbit Angles in Exoplanetary Systems
- Numerical Investigations on Explosion Mechanisms of Core-collapse Supernovae
- Cosmology and Cluster Astrophysics with Weak Gravitational Lensing and the Sunyaev-Zel'dovich Effect
- Photoevaporation of Protoplanetary Disks and Molecular Cloud Cores in Star-Forming Regions
- Numerical Algorithms for Astrophysical Fluid Dynamics
- Radial velocity modulation of an outer star orbiting an unseen inner binary: analytic perturbation formulae in a three-body problem to search for wide-separation black-hole binaries
- The distribution and physical properties of emission line galaxies in the early universe
- Diversities out of the observed proto-planetary disks: migration due to planet-disk interaction and architecture of multi-planetary systems

22 Murao Group

Research Subjects: Quantum Information Theory

Member: Mio Murao and Hayata Yamasaki

Quantum mechanics allows a new type of information represented by quantum states which may be in a superposition of 0 and 1 state. Quantum information processing seeks to perform tasks that are impossible or not effective with the use of conventional classical information, by manipulating quantum states to the limits of quantum theory. Examples are quantum computation, quantum cryptography, and quantum communication.

We consider that a quantum computer is not just a machine to run computational algorithms but also a machine to perform any operations allowed by quantum mechanics. We analyze what kinds of new properties and effects may appear in quantum systems by using quantum computers to improve our understanding of quantum mechanics from an operational point of view. We also investigate applications of quantum properties and effects such as entanglement for information processing, communication, quantum learning, and quantum manipulations by developing quantum algorithms and quantum protocols.

This year, our group consisted of faculty members, Mio Murao (Professor), Hayata Yamasaki (Assistant Professor), a postdoctoral researcher, Philip Taranto (JSPS foreign postdoctoral fellow), graduate students, Yu Tanaka (D2), Timothy Forrer (D2), Satoshi Yoshida (D1), Tatsuki Odake (M2), Natsuto Isogai (M1), Kosuke Matsui (Research student), Ludvig Lindström (USTEP student) and Vanessa Brzic (Internship student). Our projects engaged in this academic year were the following:

- Higher-Order Quantum Computation
 - Universal Adjointation of Isometry Operations (Yoshida, Murao)
 - Exact Inversion of Single-Qubit Unitary Operations (Yoshida, Murao)
 - Universal Algorithm for Transforming Hamiltonian Eigenvalues (Otake, Taranto, Murao)
 - Compositionality and Functional Programming for Quantum Computers (Forrer, Murao)
 - Higher-Order Quantum Computation for known input states (Brzic and Murao)
 - Characterizing the Hierarchy of Multi-time Quantum Processes with Classical Memory (Taranto, Murao)
 - Hidden Quantum Memory: Is Memory There When Somebody Looks? (Taranto)
- Quantum Error Correction
 - Robust Error Accumulation Suppression (Otake, Taranto, Murao)
 - Low-depth Random Clifford Circuits for Quantum Coding against Pauli Noise (Yamasaki)
 - Time-Efficient Constant-Space-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation (Yamasaki)
 - Low Space-Overhead Fault-Tolerant Protocols Based on Concatenated Code (Yoshida, Yamasaki)
- Distributed Quantum Information Processing
 - Fault-Tolerant Distributed Quantum Computation Protocols (Matsui, Yamasaki, Murao)
 - Distributed Decoding of Stabilizer Codes (Yamasaki, Murao)
 - LOCC implementations of higher-order transformations of bipartite unitary (Lindström, Taranto, Murao)
- Quantum Machine Learning
 - Advantage of Quantum Machine Learning from General Computational Advantages (Yamasaki, Isogai, Murao)
 - Quantum State Preparation via Free Binary Decision Diagrams (Tanaka, Yamasaki, Murao)
 - Quantum Ridgelet Transform: Winning Lottery Ticket of Neural Networks with Quantum Computation (Yamasaki)
- Quantum Resource Theories
 - Operational Advantage of Quantum Resource beyond Convexity (Yamasaki)
 - Entanglement Cost for Infinite-Dimensional Physical Systems (Yamasaki)

23 Ueda Group

Research Subjects: Bose-Einstein condensation, fermionic superfluidity, topological phenomena, open quantum systems, information thermodynamics, quantum information, measurement theory, machine learning

Member: Masahito Ueda and Masaya Nakagawa

With recent advances in nanoscience, it has become possible to precisely measure and control atoms, molecules, and photons at the level of a single quantum. We are interested in theoretically studying emergent quantum many-body problems in such highly controllable systems and developing nanoscale thermodynamics and statistical physics that lay the foundations of such problems. Our particular focuses in recent years include many-body physics of ultracold atomic gases and unification of quantum and statistical physics and information theory. Atomic gases which are cooled down to nearly zero temperature by laser cooling techniques offer unique opportunities for studying macroscopic quantum phenomena such as a Bose-Einstein condensation (BEC) in controlled manners. Unprecedented controllability of such gases also enables us to simulate phenomena analogous to condensed matter and astronomical physics, to investigate their universal properties, and to explore unknown quantum many-body physics. In our recent works, we have studied nonunitary dynamics of atomic gases subject to dissipation and/or measurement backaction, classification of phases of matter in nonequilibrium open systems, quantum Hall effect and vortex lattices in synthetic gauge fields, and thermalization of isolated quantum systems. We are also interested in relating fundamental concepts of quantum and statistical physics with information theory and exploring interdisciplinary fields that unify physics and information. In particular, we have recently worked on generalizations of the second law of thermodynamics and fluctuation theorems and the formulations of state reduction dynamics and Hamiltonian estimation in light of information flow under measurements and feedback controls. Furthermore, we have recently tackled an understanding of AI and machine learning from a viewpoint of physics. We list our main research subjects in FY2023 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms, nonequilibrium open systems
 - Eigenstate thermalization hypothesis in translation invariant spin systems [1]
 - Yang-Lee zeros in BCS superconductivity [2]
 - Experimental observation of the Yang-Lee edge singularity [3]
 - Quasiparticles of decoherence processes in open quantum many-body systems [4]
 - Metastable ferromagnetic clusters induced by dissipation in ultracold molecules [5]
- Unification of quantum physics, statistical mechanics, information theory, and machine learning
 - Fundamental theory for training deep neural networks [6, 7, 8]

- [1] Shoki Sugimoto, Joscha Henheik, Volodymyr Riabov, and László Erdős, J. Stat. Phys. **190**, 128 (2023).
- [2] Hongchao Li, Xie-Hang Yu, Masaya Nakagawa, and Masahito Ueda, Phys. Rev. Lett. **131**, 216001 (2023).
- [3] Huixia Gao, Kunkun Wang, Lei Xiao, Masaya Nakagawa, Norifumi Matsumoto, Dengke Qu, Haiqing Lin, Masahito Ueda, and Peng Xue, To be published in Physical Review Letters (arXiv:2312.01706).
- [4] Taiki Haga, Masaya Nakagawa, Ryusuke Hamazaki, and Masahito Ueda, Phys. Rev. Research **5**, 043225 (2023).
- [5] Naoki Hara and Masaya Nakagawa, Phys. Rev. A **108**, 013306 (2023).

- [6] James B. Simon, Maksis Knutins, Liu Ziyin, Daniel Geisz, Abraham J. Fetterman, and Joshua Albrecht, International Conference on Machine Learning 2023 (ICML2023).
- [7] Liu Ziyin and Zihao Wang, International Conference on Machine Learning 2023 (ICML2023).
- [8] Liu Ziyin and Masahito Ueda, Phys. Rev. Research **5**, 043243 (2023).

24 Yokoyama (J) Group

Research Subjects: Theoretical Cosmology and Gravitation

Member: Jun'ichi Yokoyama and Kohei Kamada

This group being a part of Research Center for the Early Universe (RESCEU) participates in research and education of Department of Physics in close association with Theoretical Astrophysics Group of Department of Physics. We are studying various topics on cosmology of the early universe, observational cosmology, and gravitation on the basis of theories of fundamental physics such as quantum field theory, particle physics, and general relativity. We have also been working on gravitational wave data analysis to prepare for completion of KAGRA. Yokoyama served as the Chair of the KAGRA Scientific Congress from September 2021 to September 2023 and as the Director of RESCEU from April 2023, but since November 2023, he has also been the Director of the Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe. He continues his duties at the Graduate School of Science as an adjunct professor. Assistant Professor Kamada moved to Hangzhou Institute of Advanced Studies, Chinese Academy of Sciences, and Project Assistant Professor Jinno moved to Kobe University as Associate Professor at the end of this fiscal year. Below is the list of topics studied during the academic year 2021.

Cosmology: Geometrical structure of the spacetime

- Inflation in Einstein-Cartan formalism
- Imprints of multi-field inflation on B-mode signals
- One-loop correction on the primordial curvature perturbation from single-field inflation
- Machine learning to post-Minkowskian calculation
- Primordial black hole formation during reheating

Cosmology: Creation and evolution of the material contents

- Chiral magnetohydrodynamics
- Affleck-Dine mechanism with light sleptons
- First-order phase transition and gravitational wave formation
- Baryon isocurvature perturbation from primordial magnetic fields
- Stochastic inflation

- Baryogenesis from spharelon decoupling
- Cosmological birefringence

Gravitational wave analysis

- Noise removal by nonlinear independent component analysis
- Ultralight dark matter search

Time-domain astronomy

- Multi-band fast imaging with TriCCS camera

25 Ejiri-Tsujii Group

Research Subjects: high temperature plasma physics experiments, spherical tokamak, wave heating and current drive, nonlinear physics, collective phenomena, fluctuations and transport, advanced plasma diagnostics development

Member: Akira Ejiri, Naoto Tsujii

In our laboratory, we conduct research on magnetically confined torus plasma with the goal of realizing nuclear fusion energy. In addition to conducting experimental research using the TST-2 device at the Kashiwa Campus, we are also conducting joint research with National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST), National Institute for Fusion Science (NIFS), Kyushu University, and the University of Tsukuba. We are also conducting joint research with overseas institutions such as Tokamak Energy. In TST-2, we use powerful wave heating to generate a highly non-linear self-organized plasma through fast electron generation and current drive. Our laboratory is working on various physics of waves and fast electrons.

TST-2 is a spherical tokamak (ST) with the major radius of 0.36 m and the minor radius of 0.23 m. The maximum plasma current is 120 kA for inductive operation and 27 kA for non-inductive operation using radio frequency waves. At TST-2, we mainly use the Lower-Hybrid Wave (LHW) to study non-inductive current drive. In 2023 we have renewed two old capacitor banks and reconfigured one of the power supply system. We have extended diagnostics, as well as continued with the new off-midplane launcher experiment. To study fast electrons in the edge plasma directly, we observed x-ray radiation and infrared radiation from the molybdenum target plate inserted into the plasma. We have observed molybdenum generation from rf sheath sputtering. There was also indication of fast electron losses at the top and bottom limiters as well as the outer limiter. Parametric decay instability may heat ions and deteriorate the current drive efficiency. Ion heating power was estimated from ion temperature measurement and found to be a small fraction of the injected LHW power. Anisotropic electron temperature was observed for inductively generated plasma with the double-pass Thomson scattering diagnostic.

For theoretical work, we have continued with the implementation of hot plasma theory to the finite element simulation. Two-dimensional axisymmetric simulation of LHW was successfully performed. The

impact of losses along the magnetic field lines to the electron temperature anisotropy in the inductively generated plasma was studied.

As a collaboration, we have performed fast electron start-up analysis during the start-up of JT-60SA under the trapped particle configuration and identified magnetic configuration with good fast electron confinement. We have upgraded the Thomson scattering system on QUEST for increased spatial resolution. We are also developing an automatic alignment system.

26 Sakai (Hirofumi) Group

Research Subjects: Experimental studies of atomic, molecular, and optical physics

Members: Hirofumi Sakai and Shinichirou Minemoto

Our research interests are as follows: (1) Manipulation of neutral molecules based on the interaction between a strong nonresonant laser field and induced dipole moments of the molecules. (2) High-intensity laser physics typified by high-order nonlinear processes (ex. multiphoton ionization and high-order harmonic generation). (3) Ultrafast phenomena in atoms and molecules in the attosecond time scale. (4) Controlling quantum processes in atoms and molecules using shaped ultrafast laser fields. A part of our recent research activities is as follows:

(1) All-optical three-dimensional orientation of asymmetric-top molecules with combined linearly and elliptically polarized two-color laser fields [1]

We propose an approach to the realization of all-optical three-dimensional molecular orientation, in which a linearly polarized fundamental pulse and an elliptically polarized second-harmonic pulse with one of the polarization axes parallel to the linear polarization of the fundamental pulse are employed to orient asymmetric-top molecules, leading to higher degrees of orientation. In addition to the one-dimensional orientation realized along the linearly polarized fundamental pulse, planar molecular alignment can be naturally realized along the elliptical polarization plane of the second-harmonic pulse, resulting in the three-dimensional molecular orientation. Compared to another all-optical method to achieve three-dimensional molecular orientation, in which linearly polarized two-color laser fields with their polarizations crossed obliquely are employed, it is numerically demonstrated that our method with an elliptically polarized second-harmonic pulse is especially advantageous when the molecular orientation dynamics is nonadiabatic.

(2) All-optical field-free molecular orientation [2]

By employing a method of all-optical orientation control using only a nonresonant two-wavelength laser field, it becomes possible to achieve orientation control under a completely field-free condition where even the static electric field is absent. The bottleneck that has hindered the achievement of this goal for many years was the development of plasma shutter technique that does not disturb the relative phase between the two wavelengths. This academic year, this bottleneck has been overcome, and significant progress has been made in achieving orientation control under a field-free condition. From this academic year, the nozzle was changed to a stainless steel one (manufactured by Metaheuristic JAPAN). This nozzle is based on the work by A. Watanabe *et al.*, Opt. Commun. **71**, 301 (1981), where a jet sheet with optical surface accuracy is formed by randomly changing the flow velocity vectors of ethylene glycol inside the nozzle and then colliding at the orifice. By arranging the orifice vertically downward, a jet sheet with a shape

determined by the viscosity and gravity of ethylene glycol is formed. Furthermore, since the membrane thickness is at most about 20 μm (catalog value), it is expected that the amount of debris derived from ethylene glycol generated during the plasma formation will be an order of magnitude less than when using the ruby crystal, provided that the laser light focusing cross-sectional area is the same. Indeed, by changing to this stainless steel nozzle, it became unnecessary to store the nozzle part in the vacuum chamber and forcibly exhaust the debris, which was planned until the previous academic year. As a result, the main cause of fluctuations in the relative phase between the two wavelengths could be limited to fluctuations in the laboratory temperature. In this case, since the temporal change of fluctuations is relatively slow, by adjusting the angle of a glass plate installed in the optical path of the Nd:YAG laser pulses as the feedback control index based on the observed values of the relative phase between the two wavelengths, the stabilization within a standard deviation of 15 degrees or less was achieved for over 10 hours. By using the two-wavelength pulses sharply blocked by this plasma shutter, successful orientation control under a field-free condition was achieved after the rapid pulse cutoff and after the rotational period of the sample molecule OCS (about 82 ps later).

- [1] Md. Maruf Hossain, Nanse Esaki, and Hirofumi Sakai, “All-optical three-dimensional orientation of asymmetric-top molecules with linearly and elliptically polarized two-color laser fields,” *Phys. Rev. A* **108**, 063109(10 pages) (2023).
- [2] Shinichirou Minemoto, Naoki Hara, and Hirofumi Sakai, “All-optical field-free molecular orientation,” to be presented at the 39th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Shizuoka City Culture Hall, Shizuoka, June 2024.

27 Ando Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Gravitational Wave, Laser Interferometer

Member: Masaki Ando and Kentaro Komori

Gravitational wave 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
- Development of TOBA (Torsion Bar Antenna)

- Dark Matter Search
- High-precision experiments on relativity and opto-mechanics

Reference

- [1] Y. Michimura, H. Wang, *et al.*: Effects of mirror birefringence and its fluctuations to laser interferometric gravitational wave detectors, *Phys. Rev. D* 109, 022009 (2024).
- [2] Y. Oshima, *et al.*: First results of axion dark matter search with DANCE, *Phys. Rev. D* 108, 072005 (2023).
- [3] K. Tsuji, *et al.*: Optimization of Quantum Noise in Space Gravitational-Wave Antenna DECIGO with Optical-Spring Quantum Locking Considering Mixture of Vacuum Fluctuations in Homodyne Detection, *Galaxies* 2023, 11, 111 (2023).
- [4] R. Sugimoto, *et al.*: Experimental demonstration of back-linked Fabry-Perot interferometer for a space gravitational wave antenna, *Phys. Rev. D* 109, 022003 (2023).
- [5] D. Ganapathy *et al.*: Broadband Quantum Enhancement of the LIGO Detectors with Frequency-Dependent Squeezing, *Phys. Rev. X* 13, 041021 (2023).
- [6] T. Akutsu *et al.*: Overview of KAGRA: Data transfer and management, *PTEP* 2023, 10A102 (2023).
- [7] R. Abbott *et al.*: Open Data from the Third Observing Run of LIGO, Virgo, KAGRA, and GEO, *ApJS* 267, 29 (2023).
- [8] R. Abbott *et al.*: Constraints on the Cosmic Expansion History from GWTC-3, *ApJ* 949, 76 (2023).
- [9] R. Abbott *et al.*: Search for Gravitational Waves Associated with Fast Radio Bursts Detected by CHIME/FRB during the LIGO/Virgo Observing Run O3a, *ApJ* 955, 155 (2023).
- [10] R. Abbott *et al.*: GWTC-3: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo during the Second Part of the Third Observing Run, *Phys. Rev. X* 13, 041039 (2023).
- [11] R. Abbott *et al.*: GWTC-2.1: Deep extended catalog of compact binary coalescences observed by LIGO and Virgo during the first half of the third observing run, *Phys. Rev. D* 109, 022001 (2024).
- [12] C. Fletcher *et al.*: A Joint Fermi-GBM and Swift-BAT Analysis of Gravitational-wave Candidates from the Third Gravitational-wave Observing Run, *ApJ* 964, 149 (2024).

28 Bamba Group

Research Subjects: High-energy astrophysics, mainly utilizing X-ray/Gamma-ray observatories in orbit. Targets are, supernova remnants, black holes, neutron stars, magnetars, white dwarfs, active galactic nuclei, and so on.

Member: Aya Bamba and Kouichi Hagino

Our aim is understanding high energy phenomena in the universe, such as supernova explosions and their remnants, compact stars such as white dwarfs, neutron stars, and black holes, active galactic nuclei, and so on. Such energetic objects emit bright X-rays and/or gamma-rays, thus we observe such high energy photons using rockets, balloons, and satellites. We also develop detectors for future X-ray/Gamma-ray missions, such as GRAMS, cipher, JEDI, and so on.

The group main activities of this year are as follows:

1. Observations of high energy celestial objects
 - Understanding the environments of particle acceleration sites in supernova remnants. We found that shock-cloud interaction does not enhance the particle acceleration unless the density gradient in the cloud is very large.

- Discovery of X-rays for the first time from the white dwarf made by a possible white dwarf — white dwarf merger. This is an important results not only for the pulsar and particle acceleration physics, but also for the new search method of white dwarf — white dwarf merger remnants.

2. Developments of future missions

- Successfully launched XRISM satellite, which enables us the first observations with excellent X-ray spectroscopy. From February 2024, we started normal observation operation, and will get fantastic data of high energy cerestal objects.
- Successful engineering demonstration experiments of the GRAMS experiment, which is the deep MeV gamma-ray observation mission with liquid Ar.
- Development of X-ray CMOS detectors with fine pitch for the future X-ray polarimetry mission
- Development of XRPIX detector for the future hard X-ray mission

Selected Papers

- [1] A. Bamba, H. Sano, R. Yamazaki, J. Vink, “On the influence of shock-cloud interactions on the nonthermal X-ray emission from the supernova remnant RCW 86” , PASJ, 75, 1344 (2023)
- [2] V. Sapienza, M. Miceli, A. Bamba, S. Orlando, S.-H. Lee, S. Nagataki, M. Ono, S. Katsuda, K. Mori, M. Sawada, Y. Terada, R. Giuffrida, F. Bocchino, “Probing Shocked Ejecta in SN 1987A: A novel diagnostic approach using XRISM – Resolve” , ApJL, 961, L9 (2024)
- [3] S. Reynolds, H. An, M. Abdelmaguid, J. Alford, C.L. Fryer, K. Mori, M. Nynka, J. Park, Y. Terada, J. Woo, A. Bamba, P. Bangale, R. Diesing, J. Eagle, K. Fang, S. Gabici, J. Gelfand, B. Grefenstette, J. Garcia, C. Kim, S. Kumar, L. Lu, B. Mac Intyre, K. Madsen, K. Malone, S. Manconi, Y. Motogami, H. Ohsumi, B. Olmi, T. Sato, R.-Y. Shang, D. Stern, N. Tsuji, G. Younes, A. Zoglauer, “The High Energy X-ray Probe (HEX-P): Supernova remnants, pulsar wind nebulae, and nuclear astrophysics” , Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 10, 1321278 (2023)
- [4] K. Hagino, M. Kitajima, T. Kohmura, I. Kurachi, T.G. Tsuru, M. Yukumoto, A. Takeda, K. Mori, Y. Nishioka, and T. Tanaka, ”Radiation-Induced Degradation Mechanism of X-ray SOI Pixel Sensors with Pinned Depleted Diode Structure”, IEEE TNS, 70(7), 1444–1450 (2023)
- [5] T. Minami, M. Katsuragawa, S. Nagasawa, S. Takeda, S. Watanabe, S. Tsuzuki, T. Takahashi, “2-mm-Thick Large-Area CdTe Double-sided Strip Detectors for High-Resolution Spectroscopic Imaging of X-ray and Gamma-ray with Depth-Of-Interaction Sensing” , NIMA, 1059, 169024 (2024)

29 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 POLAR-BEAR 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, K. Kiuchi, and A. Takeuchi

- POLARBEAR experiment and its successor, Simons Array, are optimized to measure both inflationary signature and the gravitational lensing effect in CMB polarization. POLARBEAR experiment has concluded its observation campaign, and Simons Array experiment started the observation. Our focus is on data analysis as well as the development and characterization of the continuously-rotating half-wave plate (HWP) enabling accurate measurement of CMB polarization.
- Simons Observatory experiment is under construction and test observations. We are deploying an array of what we call “small aperture telescopes,” which are dedicated for the inflationary signal, and a six-meter “large aperture telescope,” which enables observation for Neutrinos and the dark content of the universe. Current our focus is on the analysis of commissioning data of first 2 telescopes at Chile site and on fabrication of the 4th telescope.
- Research and Development for the next generation experiments such as Simons Observatory and CMB-S4 are crucial component of our research program. We specifically work on superconducting technologies used in the detectors, cryogenic bearing system for HWP, and anti-reflection coating for high-index optical material. We also develop techniques for high-performance computation (HPC) enabling data analysis for new experiments producing order-of-magnitude larger data volume than the current instruments.
- Dark matter accounts for about 80% of the matters in the Universe. Axion is one of the candidates of the dark matter. In searching for relatively light dark matters such as axion, detectors free from standard quantum limit (SQL), which constrains the sensitivity of conventional methods, play an important role. We are developing Magnon Q-bit hybridized system to overcome SQL aiming at the axion dark matter search.

30 Takeuchi Group

Research Subjects: Experimental statistical physics for non-equilibrium systems

Members: Kazumasa A. Takeuchi and Daiki Nishiguchi

We aim to explore statistical physics of out-of-equilibrium phenomena experimentally. Using soft and living matter, such as liquid crystal, colloids, and granular materials, as well as bacteria, we carry out experiments that we design to capture underlying physical principles, in addition to the understanding of specific phenomena we observe. As a result, we deal with diverse subjects in the group, sometimes enjoying interesting connections in between, through such keywords as active matter, non-equilibrium phase transitions, topology, etc. More specifically, we carried out the following projects among others in the academic year 2023:

(1) Non-equilibrium phenomena in soft matter systems

- (1-1) Observation of 3D dynamics of topological defect lines in nematic liquid crystal
- (1-2) Sponge-like granular media
- (1-3) Model experiment of stochastic particle transport

(2) Non-equilibrium phenomena in living systems

- (2-1) Route to turbulence of bacterial collective motion
- (2-2) Effect of geometry and topology upon bacterial collective motion
- (2-3) Glass transition of bacterial populations
- (2-4) Physics underlying heterogeneity of bacterial community
- (2-5) Collective states of magnetotactic bacteria
- (2-6) Animal collective behavior for predation avoidance

(3) Approaches based on nonlinear science

- (3-1) Algorithm to measure large deviations in non-equilibrium interfaces

More detailed information can be found at the group's website, <https://lab.kaztake.org/>

References

- [1] S. Shiratani, K. A. Takeuchi, D. Nishiguchi, Route to turbulence via oscillatory states in polar active fluid under confinement. arXiv:2304.03306.
- [2] S. Poincloux, P. M. Reis, T. W. J. de Geus, Stick-slip in a stack: How slip dissonance reveals aging. Phys. Rev. Res. **6**, 013080 (2024).
- [3] F. Yokoyama, A. Kling, P. S. Dittrich, Capturing of Extracellular Vesicles Derived from Single Cells of *Escherichia coli*. Lab Chip **24**, 2049 (2024).
- [4] D. Nishiguchi, Deciphering long-range order in active matter: Insights from swimming bacteria in quasi-2D and electrokinetic Janus particles. J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 121007 (2023).

31 Mio Group

Research Subjects: Application of lasers

Member: Norikatsu Mio

Mio Group is conducting research on lasers and their applications. Since the laser was invented in 1960, the laser technology has been widely used in various fields as a fundamental technology that supports modern society, thus is extremely important and indispensable for communication, information technology, material processing and so on. In addition, state-of-the-art photon technology was used in the first observation of a gravitational wave in 2015; photon science and technology work as an important bridge between academia and society.

Our laboratory belongs to Institute for Photon Science and Technology (IPST), where various researches are conducted to deepen science and to promote collaboration with industry. IPST has many members in addition to our laboratory; all of them are working closely together to promote research and education(<http://www.ipst.s.u-tokyo.ac.jp>).

Physics on laser material processing

The processes such as cutting and welding, using lasers are called laser processing. Since advances in laser sources have made it possible to use high-power ultraviolet light and to control pulse widths and wavelengths more freely, the development of new processing has become possible.

However, the actual phenomena are non-equilibrium, open systems, and the interaction between laser light and materials is in a region that cannot be explained by a perturbative approach. The goal of this project is to advance our understanding of this phenomenon and to develop its application.

We are now investigating the non-linear effects on laser beam propagation for laser material processing and the applications of the fine-processing using femto-second laser pulses.

KAGRA project

More than eight years have already passed since gravitational waves were actually detected. The number of events detected to date reaches 90 and observations of gravitational waves become important to build a new picture of the universe.

In Japan, KAGRA is being constructed in the Kamioka Mine in Gifu Prefecture. KAGRA takes advantage of the quiet underground environment and incorporates cryogenic technology. to improve its sensitivity.

Currently, we are cooperating with LIGO in the U.S. and VIRGO in Europe. KAGRA is being improved to join international joint observation called O4 that has been started in May 2023). Our group is involved in developing the laser source of KAGRA. Now, a new solid-state laser that has higher power and stability is being evaluated for replacing the current laser source.

32 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. 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.

2. A vacuum-actuated soft robot inspired by *Drosophila* larvae to study kinetics of crawling behaviour

Peristalsis, a motion generated by the propagation of muscular contraction along the body axis, is one of the most common locomotion patterns in limbless animals. While the kinematics of peristalsis has been examined intensively, its kinetics remains unclear, partially due to the lack of suitable physical models to simulate the locomotion patterns and inner drive in soft-bodied animals. Inspired by a soft-bodied animal, *Drosophila* larvae, we propose a vacuum-actuated soft robot mimicking its crawling behaviour. The soft structure, made of hyperelastic silicone rubber, was designed to imitate the larval segmental hydrostatic structure. Referring to a numerical simulation by the finite element method, the dynamical change in the vacuum pressure in each segment was controlled accordingly, and the soft robots could exhibit peristaltic locomotion. The soft robots successfully reproduced two previous experimental phenomena on fly larvae: 1. Crawling speed in backward crawling is slower than in forward crawling. 2. Elongation of either the segmental contraction duration or intersegmental phase delay makes peristaltic crawling slow. Furthermore, our experimental results provided a novel prediction for the role of the contraction force in controlling the speed of peristaltic locomotion. These observations indicate that soft robots could serve to examine the kinetics of crawling behaviour in soft-bodied animals.

References

- [1] 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)
- [2] X. Sun, A. Nose, H. Kohsaka. A vacuum-actuated soft robot inspired by *Drosophila* larvae to study kinetics of crawling behaviour. *PLoS One* **18**(4) (2023)

33 Higuchi Group

Research Subjects:Protein dynamics in vitro,cells and mice

Member:Hideo Higuchi and Motoshi Kaya

1. Changes in vesicle dynamics at the cell stresses

Human cancer cells were stressed by ROS (reactive oxygen species) generated from the fluorescent molecule IR700 excited by a red laser and by ATP depletion using inhibitors of two ATP synthesis pathways. The positions of individual intracellular vesicles were tracked on phase contrast images. The mean square displacement (MSD) was calculated from the trajectories and the diffusion coefficient (D) and MSD exponent (α) were calculated from the relationship between MSD and lag time. The diffusion coefficient of red fluorescent protein (RFP) was measured by fluorescence recovery after photobleaching (FRAP). Death

of stressed cells was detected by cell membrane rupture. The diffusion of vesicles in cells was measured 5 minutes after ROS stress on cells and cell death was measured 2 hours later. D decreased and the probability of cell death increased with the excitation time of IR700. The logarithm of D was nearly proportional to the probability of death. This suggests the possibility that cell death is predicted by the diffusion coefficient of vesicles. D of RFP hardly changed with excitation time, indicating that the decrease in vesicle diffusion is not due to an increase in intracellular viscosity but to the inactivation of transporters as shown in the previous work. D and α of vesicles measured in cells under the stress of ATP depletion gradually decreased with depletion time. The probability of death was measured 15 hours after the cells were returned to a culture medium without ATP synthesis inhibitors since cell death was not observed during ATP depletion. The values of D and α of the vesicles were nearly proportional to the probability of death. To understand whether the fate of individual cells is predicted by the diffusion coefficient of their vesicles, D and α of vesicles were obtained from individual cells subjected to 2 hours of depletion. D and α in future live cells were significantly higher than those in future dead cells. This suggests that the fate of individual cells was predicted by the diffusion coefficient of their vesicles. To investigate the reason why the diffusion coefficient of vesicles decreased during ATP depletion, intracellular viscosity and the effect of microtubule presence on vesicle diffusion were investigated. The diffusion coefficient of RFP in cells remained constant by depletion, suggesting that the intercellular viscosity was unchanged. D and α of vesicles in cells in which microtubules were depolymerized by nocodazole were less dependent on depletion time than without nocodazole treatment. To understand how microtubules suppress vesicle movement upon depletion, microtubules and vesicles labeled with fluorescent molecules were simultaneously observed. Most vesicles were located on or in contact with microtubules and some vesicles diffused within the microtubule network in ATP depletion. This suggests that vesicle attachment to microtubules is the main reason for the decrease in vesicle diffusion.

2. Very fast backward steps of single kinesin molecules at wide range of load

To understand force generation under a wide range of loads, the stepping of single kinesin molecules was measured at loads from 20 to 42 pN by optical tweezers with high temporal resolution. The optical trap has been improved to halve positional noise and increase bandwidth by using 200-nm beads. The step size of the forward and backward steps was 8.2 nm even over a wide range of loads. Histograms of the dwell times of backward steps and detachment fit well to two independent exponential equations with fast (0.4 ms) and slow (>3 ms) time constants, indicating the existence of a fast step in addition to the conventional slow step. The dwell times of the fast steps were almost independent of the load and ATP concentration, while those of the slow backward steps and detachment depended on those. We constructed the kinetic model to explain the fast and slow steps under a wide range of loads.

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 believe that to answer this question, we must bridge the gap between the world of molecules and living cells. Direct measurement of molecules in living cells is crucial in this endeavor. Therefore, we have been tirelessly developing technologies for the visualization and non-invasive measurement of the molecular processes in living cells. High-speed, super-resolution live-cell imaging and single-molecule measurement in living cells are the two leading technologies we have developed to address this profound question.

This year, we made significant progress in the development of several microscope-related technologies. For instance, our partnership with Miyawaki-lab in RIKEN led to the enhancement of a new, highly photo-stable fluorescent protein, StayGold. We, together, created a monomeric, fast-maturing, and photoresistant variant of StayGold, which we named mStayGold ([1]). Our students, in collaboration with Miyawaki-lab, demonstrated the versatility of mStayGold as a fusion-tag and its compatibility with laser-scanning confocal microscopy and super-resolution imaging. Another notable achievement was the development of a Halo-ligand version of a photoresistant near-infrared fluorescent dye, PREX710, in collaboration with Dr Taki at Nagoya University. This version, a result of our joint efforts, allowed us to label the target protein in the living cell with high specificity and perform multi-color super-resolution live cell imaging ([2]).

Our imaging technologies have made significant contributions to various research areas, sparking new possibilities and insights. They have enabled super-resolution imaging of genome DNA in the cell nucleus ([3]), provided a deeper understanding of the dynamics of transcription factors at a single-molecule level ([5]), unraveled the molecular mechanisms of mitophagy ([4]), shed light on gel-gel phase separation phenomena in PEG hydrogel ([6]), and facilitated the identification of the amida-like microprotrusion network in *Drosophila* wing disc([7]).

- [1] Ando R, *et al.*, StayGold variants for molecular fusion and membrane-targeting applications. *Nat. Meth.* (2023).
- [2] Wu Q, *et al.*, Stereochemistry-Dependent Labeling of Organelles with a Near-Infrared-Emissive Phosphorus-Bridged Rhodamine Dye in Live-Cell Imaging. *Angew. Chem. Int.* **63**, e202400711 (2024).
- [3] Nozaki T, *et al.*, Condensed but liquid-like domain organization of active chromatin regions in living human cells. *Science Adv* **9**, eadf1488 (2023).
- [4] Fukuda T, *et al.*, The mitochondrial intermembrane space protein mitofissin drives mitochondrial fission required for mitophagy. *Mol. Cell.* **83**, 2045-2058.e9 (2023).
- [5] Okamoto K, *et al.*, Single-molecule tracking of Nanog and Oct4 in living mouse embryonic stem cells uncovers a feedback mechanism of pluripotency maintenance. *EMBO J.* **42**, e112305 (2023).
- [6] Ishikawa S, *et al.*, Percolation-induced gel-gel phase separation in a dilute polymer network. *Nat. Mater.* **22**, 1564-1570 (2023).
- [7] Tran NV, *et al.*, Programmed disassembly of a microtubule-based membrane protrusion network coordinates 3D epithelial morphogenesis in *Drosophila*. *EMBO J.* **43**, 538-594 (2023).

35 Furusawa Group

Research Subjects: Theoretical Biophysics, Evolutionary Biology, Complex Systems

Member: Chikara Furusawa and Yusuke Himeoka

Biological systems have both robustness and plasticity, a property that distinguishes them from artificial systems and is essential for their survival. Biological systems exhibit robustness to various perturbations, including noise in gene/protein expressions and unexpected environmental changes. Simultaneously, they

are plastic to the surrounding environment, changing their state through processes such as adaptation, evolution and cell differentiation. Although the coexistence of robustness and plasticity can be understood as a dynamic property of complex and interacting networks consisting of a large number of components, the mechanisms responsible for the coexistence are largely unknown.

Our work extracts the universal features of cellular dynamics responsible for robustness and plasticity in biological systems. We describe the systems using a relatively small number of degrees of freedom with the macroscopic state variables. We expect that such a description will provide novel methods for the prediction and control of complex biological systems.

The current research topics in our group are followings:

1. Laboratory evolution of bacterial cells to analyze dynamics of phenotype-genotype mappings
2. Construction of macroscopic state theory describing adaptation and evolution of biological systems
3. Theoretical analysis of evolutionary process under dynamically changing environments
4. Metabolic simulation for understanding growth, lag-phase, and death.

References

- [1] Synthetic symbiosis between a cyanobacterium and a ciliate toward novel chloroplast-like endosymbiosis. Azuma Y, Tsuru S, Habuchi M, Takami R, Takano S, Yamamoto K, Hosoda K. *Sci Rep.* 2023, 13;13(1):6104.
- [2] Inference of transcriptome signatures of *Escherichia coli* in long-term stationary phase. Takano S, Takahashi H, Yama Y, Miyazaki R, Furusawa C, Tsuru S. *Sci Rep.* 2023, 13(1):5647.
- [3] Rare-event sampling analysis uncovers the fitness landscape of the genetic code. Omachi Y, Saito N, Furusawa C. *PLoS Comput Biol.* 2023,19(4):e1011034.
- [4] Loss of function of Hog1 improves glycerol assimilation in *Saccharomyces cerevisiae*. Sone M, Navanopparatsakul K, Takahashi S, Furusawa C, Hirasawa T. *World J Microbiol Biotechnol.* 2023, 39(10):255.
- [5] A deep learning approach for morphological feature extraction based on variational auto-encoder: an application to mandible shape. Tsutsumi M, Saito N, Koyabu D, Furusawa C. *NPJ Syst Biol Appl.* 2023, 6;9(1):30.
- [6] Insertion sequences: Simple mobile elements with rich ecological and evolutionary structures. Kanai Y, Tsuru S, Furusawa C. *Curr. Opin. Syst. Biol.* 2023, 36, 100481.
- [7] Prediction of cross-fitness for adaptive evolution to different environmental conditions: Consequence of phenotypic dimensional reduction. Sato TU, Furusawa C, Kaneko K. *Phys. Rev. Res.* 2023, 5(4): 043222.
- [8] Evolution of hierarchy and irreversibility in theoretical cell differentiation model. Nakamura YT, Himeoka Y, Saito N, Furusawa C. *PNAS Nexus.* 2023, 3(1):pgad454.
- [9] Laboratory Evolution of Antimicrobial Resistance in Bacteria to Develop Rational Treatment Strategies. Maeda T, Furusawa C. *Antibiotics (Basel).* 2024, 13(1):94.
- [10] Deciphering the origin of developmental stability: The role of intracellular expression variability in evolutionary conservation. Uchida Y, Tsutsumi M, Ichii S, Irie N, Furusawa C. *Evol Dev.* 2024, 26(2):e12473.

36 Kawaguchi Group

Research Subjects: Biophysics

Member: Kyogo Kawaguchi

The Kawaguchi group aims to elucidate the mechanisms of diverse biological phenomena from a physical perspective. Currently, the lab is particularly interested in multicellular phenomena, cell differentiation, and the underlying intracellular multi-molecular events. The lab employs various methods, ranging from live cell imaging experiments to machine learning, large scale numerical simulations, and theoretical physics.

As the lab is in its first year at the University of Tokyo, the setup is still ongoing, and Kawaguchi is the sole member. Over the past year, Kawaguchi has primarily focused on theoretical research and data analysis related to biophysics. The following sections outline these research projects.

- **Predicting cell flow from cell alignment patterns:** Developed a high-predictive theory based on nonlinear equations connecting nematic patterns and cell flow, using Bayesian estimation to fit parameters.
- **Patterns in vertebrate formula:** Collected data on complete vertebral counts for 388 tetrapod species and developed a method to systematically search for patterns, discovering new correlations between distant body regions.
- **Theory and experiments on intracellular heteropolymers:** Developed a unified theoretical framework to predict interactions between heteropolymers and verified the theory through molecular dynamics simulations reproducing phase separation phenomena for various natural sequences.
- **Quantum active matter:** Developed a model incorporating self-propulsion in one-dimensional quantum many-body systems by adding non-Hermitian terms to the Hamiltonian, and discovered the realization of a ferromagnetic phase in the "ground state" due to the non-Hermiticity.

III

2023年度 物理学教室全般に関する報告

1 学部講義概要

1.1 2年生 A セメスター

1.1.1 電磁気学 I : 横山 将志

1. 特殊相対性理論

1.1 光の伝播とエーテル

1.2 Michelson-Morley の実験

1.3 Lorentz 変換

1.4 種々の相対論的效果

1.5 時空の構造

2. 相対論的力学

2.1 4元ベクトル

2.2 相対論的エネルギーと運動量

2.3 相対論的運動学

2.4 相対論的力学

3. 電磁気学と特殊相対論

3.1 相対論効果と磁気

3.2 電磁場の変換

3.3 一定速度で運動する点電荷がつくる電磁場

3.4 電磁場テンソル

3.5 電磁場テンソルと Maxwell 方程式

4. 電磁場中の粒子の運動

4.1 一様な静電場中の運動

4.2 一様な静磁場中の運動

4.3 非一様な静磁場中での運動

4.4 一様な静電磁場中の運動

5. 電磁場のエネルギーと運動量

5.1 電磁場のエネルギーと Poynting の定理

5.2 電磁場の運動量と Maxwell の応力テンソル

5.3 電磁場のエネルギー・運動量テンソル

5.4 電磁場のラグランジアン

1.1.2 解析力学 : 常行 真司

1 ニュートンの法則からラグランジュ形式へ

1.1 ニュートンの法則

1.2 ガリレイ変換

1.3 オイラー-ラグランジュ方程式

1.4 一般化座標と拘束条件

1.5 ダランベールの原理

1.6 ホロノーム系の E-L 方程式の導出

2 最小作用の原理

2.1 最小作用の原理

2.2 変分法

- 2.3 自由粒子のラグランジアン
- 2.4 相互作用する質点系のラグランジアン
- 2.5 ラグランジュ未定乗数法と拘束条件

3 対称性と保存則

- 3.1 保存量
- 3.2 エネルギー保存則
- 3.3 運動量保存則
- 3.4 角運動量保存則
- 3.5 循環座標と保存則
- 3.6 ネーターの定理

4 さまざまなラグランジアン

- 4.1 回転座標系とコリオリ力
- 4.2 速度に比例する摩擦力（抵抗力）
- 4.3 電磁場中の荷電粒子

5 ハミルトニアンと正準方程式

- 5.1 ルジャンドル変換
- 5.2 ハミルトニアン
- 5.3 正準方程式
- 5.4 ポアソン括弧と保存量
- 5.5 ポアソン括弧の諸性質

6 正準変換

- 6.1 正準変換
- 6.2 正準変数と母関数
- 6.3 正準変換の具体例
- 6.4 無限小変換
- 6.5 正準変換とポアソン括弧
- 6.6 リウヴィルの定理
- 6.7 ハミルトン-ヤコビの方程式

7 相対論と解析力学

1.1.3 量子力学 I : 日下 暁人

1. イントロダクション

- 1.1 古典論とその綻び
- 1.2 量子力学的効果の例

2. シュレディンガー方程式

- 2.1 シュレディンガー方程式と波動関数
- 2.2 確率解釈と物理量の期待値
- 2.3 不確定性関係

3. 1次元の束縛状態

- 3.1 1次元の箱に閉じ込められた粒子
- 3.2 井戸型ポテンシャル

4. 1次元の散乱

- 4.1 自由粒子の波動関数：平面波
- 4.2 散乱問題のいくつかの例

5. 量子力学の基本的な性質

- 5.1 波動関数を用いた方法まとめ
- 5.2 エルミート演算子と物理量
- 5.3 測定値と期待値

6. 形式的な体系

- 6.1 ディラックの記法と演算子を用いた定式化
- 6.2 ハイゼンベルグ表示
- 6.3 正準量子化

7. 調和振動子

- 7.1 調和振動子の量子論的扱い：波動関数
- 7.2 調和振動子の量子論的扱い：演算子法
- 7.3 量子ビット

1.1.4 物理実験学：安東 正樹, 中島 康博

1. 序論

1.1 現代物理と科学的手法

2. 物理量と単位

2.1 国際単位系 SI

2.2 各種の常用単位系とその変換

3. 誤差論

3.1 実験誤差

3.2 確率統計

4. 計測法

4.1 電磁波の計測

4.2 温度の計測

4.3 距離の計測

4.4 その他の計測

5. 実験の基礎技術

5.1 真空技術

5.2 エレクトロニクス

5.3 X線回折

6. データ解析と可視化

6.1 グラフ作成

6.2 非線形最小自乗法

6.3 逆問題

7. 実験レポートや論文を書く上での注意事項

1.1.5 物理学演習 II (解析力学、量子力学 I)：常行 真司, 日下 暁人, 田島 裕之、横溝 和樹

1. 解析力学

1.1 運動エネルギー、位置エネルギーと仮想仕事

1.2 一般化座標

1.3 振り子の運動

1.4 汎関数の極値問題

1.5 二重振り子

1.6 拘束問題

1.7 ビリアル定理

1.8 ばねの振動

1.9 ラグランジュ未定乗数法

1.10 保存量

1.11 時間に陽に依存するラグランジアン

1.12 戸田格子

1.13 分子振動

1.14 対称性と保存量

1.15 電磁場中の荷電粒子の運動 (サイクロトロン共鳴等)

1.16 正準変換を用いた方程式積分

1.17 ポアソン括弧

1.18 ハミルトン-ヤコビ方程式

1.19 リウビルの定理

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 ボーア-ゾンマーフェルトの量子化条件

2.5 波動方程式からシュレーディンガー方程式の導出

2.6 シュレーディンガー方程式

2.7 2重スリットを通過する電子線

2.8 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

2.9 井戸型ポテンシャル

2.10 デルタ関数型ポテンシャル

2.11 エネルギー固有状態

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 バイカー-キャンベル-ハウスドルフの公式

1.1.6 物理数学 I : 松尾 泰

1. 複素関数論

1.1 無限和と収束性

1.1.1 数列の収束性

1.1.2 級数

1.1.3 無限積

1.1.4 絶対収束と条件収束

1.1.5 収束性の判定

1.1.6 一様収束

1.1.7 冪級数

1.2 正則関数と複素積分

1.2.1 複素数

1.2.2 正則性

1.2.3 複素積分

1.2.4 Cauchy の積分定理

1.2.5 Cauchy-Goursat の定理

1.2.6 Taylor 展開と Laurent 展開

1.3 正則関数の大局構造

1.3.1 特異点の分類

1.3.2 Liouville の定理

1.3.3 解析接続

1.3.4 多価関数とリーマン面

1.4 留数積分

1.4.1 留数定理

1.4.2 例：三角関数・実軸上の積分・多価関数

1.5 発展的な話題

1.5.1 部分分数展開・無限積展開

1.5.2 ガンマ関数・ベータ関数・ゼータ関数

1.5.3 漸近展開と最急降下法

1.5.4 デルタ関数と主値積分

1.6 等角写像

1.6.1 複素写像と等角性

1.6.2 等角写像の物理への応用

1.6.3 等角写像の例

2. 常微分方程式と Laplace 変換

2.1 常微分方程式

2.1.1 解の存在と一意性

2.1.2 積分により可解な微分方程式

2.1.3 線形微分方程式

2.2 Laplace 変換

2.2.1 定義

2.2.2 例

2.2.3 基本的な性質

2.2.4 逆 Laplace 変換

2.2.5 Laplace 変換を用いた微分方程式の解法

1.1.7 物理数学 II : 辻 直人

1. 偏微分方程式

1.1 導入

1.2 線形と非線形

1.3 重ね合わせの原理

1.4 2階の線形偏微分方程式の分類

1.5 境界条件

1.6 波動方程式

2. フーリエ級数

2.1 実フーリエ級数

2.2 フーリエ級数の収束

2.3 複素フーリエ級数

2.4 ベクトル空間としての見方

3. フーリエ変換

3.1 周期 L の周期関数

3.2 非周期関数のフーリエ変換

3.3 デルタ関数

4. 熱伝導方程式

4.1 初期値問題

4.2 初期境界値問題

4.3 熱の発生がある場合

5. グリーン関数

5.1 ポアソン方程式

5.2 ラプラス方程式

5.3 鏡像法

6. ベッセル関数

6.1 ベッセルの微分方程式

6.2 級数展開

6.3 ベッセル関数の諸性質

6.4 関連する諸関数

7. 直交多項式

7.1 ルジャンドル多項式

7.2 古典直交多項式

7.3 ラゲール多項式

7.4 エルミート多項式

8. 超幾何関数

8.1 ガウスの超幾何関数

8.2 リーマンスキーム

8.3 積分表示

8.4 合流型超幾何関数

9. 球面調和関数と回転群

9.1 球面調和関数

9.2 回転操作

9.3 無限小回転

9.4 球面調和関数との関係

10. スツルム・リウビル理論

10.1 スツルム・リウビル型微分方程式

10.2 自己随伴演算子

10.3 固有値、固有関数の性質

10.4 量子力学との関係

1.1.8 物理学演習 I (電磁気学 I, 物理数学 I, II) : 横山 将志, 松尾 泰, 辻 直人, 石河 孝洋, 森脇 可奈

- 1.1 Galilei 変換
- 1.2 級数の収束・発散
- 1.3 級数の収束・発散: 応用
- 2.
- 2.1 Lorentz 変換の導出
- 2.2 Michelson-Morley の実験
- 2.3 Weierstrass の M 判定法
- 2.4 収束半径
- 3.
- 3.1 速度の合成と超光速運動
- 3.2 Lorentz 収縮に関するパラドックス
- 3.3 Cauchy-Riemann の関係式
- 3.4 正則関数の性質
- 3.5 Laurent 展開
- 4.
- 4.1 光のドップラー効果
- 4.2 Fresnel 積分
- 4.3 留数積分 (実積分への応用 I)
- 4.4 留数積分 (実積分への応用 II)
- 4.5 留数積分 (分岐線がある場合)
- 5.
- 5.1 粒子の崩壊
- 5.2 Kramers-Kronig の関係式
- 5.3 部分分数表示・無限乗積表示
- 5.4 Gamma 関数の応用
- 5.5 Beta 関数の応用
- 6.
- 6.1 相対論的力学
- 6.2 相対論的散乱問題と MUonE 実験
- 6.3 Lorentz 変換の一般論
- 6.4 鞍点法
- 6.5 解析接続
- 7.
- 7.1 斜交座標系における反変・共変ベクトル
- 7.2 相対論的質点の運動と作用汎関数
- 7.3 Fourier 級数展開
- 7.4 Fourier 級数展開の応用
- 8.
- 8.1 電磁場の Lorentz 変換
- 8.2 電磁ポテンシャルと対称性
- 8.3 Fourier 変換の応用
- 8.4 熱伝導方程式 (拡散方程式)
- 9.
- 9.1 電磁場テンソル, 4 元電流
- 9.2 Green 関数
- 9.3 2 次元 Laplace 方程式の境界値問題
- 10.
- 10.1 Larmor の定理
- 10.2 外場中の荷電粒子の古典力学
- 10.3 空洞共振器と Bessel 関数
- 10.4 Hermite 多項式
- 11.
- 11.1 電磁場のエネルギー・運動量
- 11.2 球対称場における Schrödinger 方程式
- 11.3 極座標系における Laplace 方程式
- 11.4 Sturm-Liouville 理論

1.1.9 物理学のための科学英語基礎：小野 義正

1. 科学・技術英語とは、日本人英語の欠点と改善策；
動詞の適切な時制；What Is Physics？
文する；名詞；Questions about the Universe
2. 直接翻訳はするな、和文和訳せよ、物主構文；句読点の使い方；The Spectrum and “Coloured” Light
3. 英語の基本は三拍子、パラグラフ・ライティング；
文頭・数字の書き方；What is Science？
4. パラグラフ・リーディング；関係代名詞と前置詞の使い方；Benjamin Franklin
5. 読みやすい英語（論文）を書く、論文用英文の組み立て；並列構造で書く；Thomas A. Edison
6. 起承転結はやめよう、日本語の構造 vs. 英語の構造、結論を先に、理由を後に；数字・記号の表現法；Inventions Essential for Research
7. わかってもらえる英語は「英語の発想で書く」（Leggett’s Trees）、英語活用メモを作り、英借
8. 否定形を避けて、肯定形で書く、あいまいな表現をさけ、きっぱりと書く；冠詞；The Story of Silent Spring
9. 辞書の使い方、参考文献；短い簡潔な文を書く；Graphene
10. 通じる英語のしゃべり方 1；レポート課題：Self Introduction；受動態を避けて能動態で書く；Dark Matter
11. 通じる英語のしゃべり方 2；連結語を使う；Volcanoes
12. 通じる英語のしゃべり方 3；不必要な単語は省く；The Internet
13. 英語口頭発表での注意点；日本人に多い間違いを直す；Artificial Intelligence (AI)

1.2 3年生 Sセメスター

1.2.1 電磁気学 II : 中辻 知

- | | |
|----------------|--------------|
| 1. Maxwell 方程式 | 6. 物質中の電磁波 |
| 2. 保存則 | 7. 準定常電流と伝送線 |
| 3. 物質中の静電場 | 8. 平面波の反射と透過 |
| 4. 物質中の静磁場 | 9. 導波路 |
| 5. 真空中の電磁波 | |

1.2.2 物理学実験 I: 全実験担当教員

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| 1. 放射線 : 横山 将志、中桐 洸太 | 4. エレクトロニクス I : 三尾 典克、中島 康博、小貫 良行 |
| 2. 真空技術 : 岡本 徹、枡富 龍一 | |
| 3. X線回折 : 高木 英典、北川 健太郎、平岡 奈緒香 | 5. エレクトロニクス II : 馬場彩、萩野 浩一 |

1.2.3 量子力学 II : 村尾 美緒

- | | |
|---------------------------------|---|
| 1. 軌道角運動量 | 3.3 水素原子 |
| 1.1.1 波動関数を用いた量子力学の復習 | 4. 摂動論 |
| 1.1.2 中心場の定常状態の Schrödinger 方程式 | 4.1 時間によらない摂動 縮退の無い場合 |
| 1.2.1 軌道角運動量 | 4.2 時間によらない摂動 縮退のある場合 |
| 1.2.2 球面調和関数 | 4.2.1 時間によらない摂動の例: Van der Waals 力とパリティ |
| 2. 角運動量の一般論 | 4.2.2 時間によらない摂動の例: LS 結合 |
| 2.1 ブラ・ケットを用いた量子力学の復習 | 4.3 時間による摂動 |
| 2.2 角運動量の一般化 | 4.4 WKB 近似 |
| 2.3 角運動量の合成 | 5. スピン角運動量と量子力学の本質 |
| 3. 中心場中の Schrödinger 方程式の解 | 5.1 量子ビットの量子力学 |
| 3.1 動径部分の Schrödinger 方程式の一般論 | 5.2 測定演算子と密度演算子 |
| 3.2 三次元調和振動子 | |

1.2.4 物理学演習 III : 中辻 知, 村尾 美緒, 諏訪 秀麿, 高三 和晃

- 量子力学

- 1.1 量子力学 I の復習, Gauss 波束, 不確定性関係
- 1.2 対称性と保存則
- 1.3 角運動量の合成
- 1.4 極座標系と角運動量, スピン演算子, 球面調和関数
- 1.5 極座標表示での Schrödinger 方程式の解法, 合流型超幾何関数
- 1.6 時間に依存しない摂動
- 1.7 時間に依存しない摂動 (縮退のある場合)
- 1.8 時間に依存する摂動
- 1.9 変分法
- 1.10 ベルの不等式の破れ

- 1.11 量子テレポーテーション

2. 電磁気学

- 2.1 Maxwell 方程式の性質, ベクトル解析
- 2.2 Poisson 方程式, 鏡像法
- 2.3 Laplace 方程式, Green 関数, 多重極展開
- 2.4 静電場, 誘電体中の境界値問題
- 2.5 静磁場, 定常電流, 磁性体
- 2.6 準定常電流, 導体内の電磁波
- 2.7 電磁波の反射・屈折
- 2.8 物質中の電磁波

1.2.5 現代実験物理学 I : 岡田 康志, 酒井 明人

1. 顕微鏡光学系の基礎

幾何光学、結像理論

2. 弱位相物体観察

位相差顕微鏡、微分干渉顕微鏡、ホログラフィー顕微鏡など

3. 蛍光・散乱光観察

暗視野顕微鏡、(超解像) 蛍光顕微鏡、干渉散乱顕微鏡 (iSCAT) など

4. 多光子顕微鏡と量子計測

多光子励起顕微鏡、量子もつれの応用など

5. 顕微鏡のデジタルトランスフォーメーション

コンピュータシミュレーション・マイクロコピー

6. X 線による試料の同定

X 線の発生、構造解析、元素分析 等

7. 極限環境技術

真空、低温、磁場 等

8. 低温測定技術

比熱、磁化、電気抵抗、ホール効果、熱膨張 等

9. 電子構造及び磁気構造の決定手法

光電子分光、量子振動、中性子散乱、核磁気共鳴、ミュオンスピン回転 等

1.2.6 計算機実験 I : 藤堂 眞治, 高橋 昂, 山崎 隼汰

1. 講義・実習の概要

1.1 講義・実習目的

1.2 講義・実習内容

1.3 計算機実験に必要な環境整備

2. 計算機実験の基礎

2.1 数値誤差

2.2 数値微分

2.3 ニュートン法

2.4 二分法

2.5 行列と LAPACK

2.6 疑似乱数

2.7 複素数

2.8 ライブラリの利用

2.9 グラフの描画

3. 常微分方程式

3.1 初期値問題と境界値問題

3.2 Euler 法・Runge-Kutta 法

3.3 陽解法と陰解法

3.4 Numerov 法

3.5 シンプレクティック積分法

4. 連立一次方程式

4.1 物理に現れる連立一次方程式

4.2 ガウスの消去法・LU 分解

4.3 逆行列の求め方

4.4 反復解法

5. 行列の対角化

5.1 物理の問題にあらわれる行列演算

5.2 行列の性質・ベキ乗・指数関数

5.3 密行列の対角化

5.4 疎行列に対する反復法

5.5 特異値分解・一般化逆行列

5.6 最小二乗法による回帰分析

1.2.7 量子コンピューター実習：浅井 祥仁, 寺師 弘二

1. 量子コンピュータに触れる

1.1 量子計算の基礎、量子回路、ゲート

1.2 CHSH 不等式の破れを確認する

1.3 実習：回路を実機で実行する

2. 量子回路の実装

2.1 Qiskit の基本構造を学ぶ

2.2 量子計算のプログラミング

2.3 実習：シミュレータ・実機での実行

3. 超並列計算機としての量子コンピュータ

3.1 量子フーリエ変換による足し算

3.2 量子系のダイナミクスシミュレーション

3.3 実習：ハイゼンベルグモデルの時間発展

4. ショアのアルゴリズム

4.1 量子位相推定とは

4.2 アルゴリズム本体を学ぶ

4.3 実習：シミュレータでの実行

5. グローバーのアルゴリズム

5.1 非構造化データの探索

5.2 アルゴリズム本体を幾何学的に学ぶ

5.3 実習：シミュレータと実機での実行

6. 変分法と変分量子固有値ソルバー

6.1 変分法と変分量子固有値ソルバー法を学ぶ

6.2 パラメータの最適化

6.3 実習：変分量子アルゴリズムの実習

7. 量子・古典ハイブリッドによる機械学習

7.1 機械学習と深層学習について

7.2 変分量子アルゴリズムによる機械学習

7.3 実習：素粒子物理への応用

8. 演習

- 8.1 量子誤り耐性の基礎
- 8.2 量子化学計算への応用
- 8.3 組み合わせ最適化の問題
- 9. 超伝導量子コンピュータの仕組みと操作
 - 9.1 回路量子電磁力学の基礎を学ぶ
 - 9.2 超伝導量子ビットとは
 - 9.3 量子ビットの操作と読み出し
 - 9.4 実習：量子コンピュータの操作を体験する
- 10. 超伝導量子コンピュータの実機環境
 - 10.1 超伝導量子ビットの製作
 - 10.2 希釈冷凍機、マイクロ波制御・読み出し系
 - 10.3 量子コンピュータ以外への応用

1.2.8 統計力学 I : 小林 研介

- 0. 熱力学 再訪
 - 0.1 熱力学
 - 0.2 熱力学第 0 法則
 - 0.3 熱力学第 1 法則
 - 0.4 カルノーサイクル
 - 0.5 熱力学第 2 法則
 - 0.6 エントロピー
 - 0.7 熱力学関数
 - 0.8 平衡条件
- 1. 統計力学とは
 - 1.1 統計力学の考え方
 - 1.2 確率分布
- 2. ミクロカノニカル分布
 - 2.1 状態数
 - 2.2 熱平衡と微視的状态
 - 2.3 ミクロカノニカル分布の導入
 - 2.4 ボルツマンの原理
 - 2.5 理想気体
 - 2.6 二準位系
 - 2.7 ミクロカノニカル分布のまとめ
- 3. カノニカル分布：導入
 - 3.1 カノニカル分布の導出
 - 3.2 カノニカル分布の性質
 - 3.3 ヘルムホルツの自由エネルギー
 - 3.4 二準位系
- 4. カノニカル分布：古典近似
 - 4.1 量子論と古典論
 - 4.2 古典統計力学近似
 - 4.3 振動子系
 - 4.4 理想気体
 - 4.5 エネルギー等分配則
 - 4.6 エルゴード仮説
- 5. カノニカル分布：量子効果
 - 5.1 熱力学第 3 法則
 - 5.2 黒体放射
 - 5.3 格子比熱
- 6. グランドカノニカル分布
 - 6.1 グランドカノニカル分布の導出
 - 6.2 グランドカノニカル分布の性質
 - 6.3 ラングミュアの等温吸着式
- 7. フェルミ統計とボース統計
 - 7.1 フェルミ粒子とボース粒子
 - 7.2 フェルミ分布とボース分布

7.3 理想フェルミ気体

7.4 理想フェルミ気体の比熱

7.5 理想フェルミ気体の帯磁率

7.6 フェルミ気体の例

7.7 理想ボース気体

8. まとめと展望

1.2.9 流体力学：吉田 直紀

1. 流体力学の基礎方程式

1.1 流れを表す物理量

1.2 保存則とエネルギー方程式

2. 二次元の流れ

2.1 流れ関数と複素ポテンシャル

2.2 解析関数による流れの表現

2.3 渦の運動

3. 圧縮性流体

3.1 音波と特性曲線

3.2 準一次元流

3.3 衝撃波

4. 粘性流体の力学

4.1 ナビエ-ストークス方程式

4.2 ポアズイユの法則

4.3 乱流の生成

5. 波

5.1 重力波と表面張力波

5.2 非線型波動とソリトン

6. 流体の不安定性

7. プラズマ・電磁流体力学

8. ボルツマン方程式と運動論

8.1 速度分布関数と局所熱平衡

8.2 運動量輸送とストレステンソル

8.3 モーメント方程式

1.2.10 物理学演習 IV (統計力学 I、II)：小林 研介、竹内 一将、中川 大也、福田 朝

1. 統計力学モデル

1.1 ミクロカノニカルアンサンブル

1.2 カノニカルアンサンブル

1.3 理想気体

1.4 エントロピー

1.5 グランドカノニカルアンサンブル

2. 波の振動

2.1 格子振動

2.2 黒体輻射

2.3 電磁場の量子化

3. 量子理想気体

3.1 理想フェルミ気体

3.2 理想ボース気体

4. スピン系

4.1 Ising 模型

4.2 Heisenberg 模型

4.3 転送行列

5. 相転移

5.1 平均場近似

5.2 Landau 理論

5.3 繰り込み群

1.3 3年生 A セメスター

1.3.1 物理学実験 II: 全実験担当教員

- | | |
|------------------------|--------------------------------|
| 1. パルス技術：浅井 祥仁、石田 明 | 8. 量子演算入門：中辻 知、酒井 明人 |
| 2. メスバウア効果：日下 暁人、木内 健司 | 9. 相転移：竹内 一将、西口 大貴 |
| 3. 原子核散乱：中村 哲、永尾 翔 | 10. レーザー：酒井 広文、峰本 紳一郎 |
| 4. 分光測定：島野 亮、吉川 尚孝 | 11. 生物物理：樋口秀男、川口 喬吾、茅元司、佐伯 喜美子 |
| 5. 低温：小林 研介、佐々木 健人 | 12. 顕微鏡光学系：岡田 康志、池崎 圭吾、榎 佐和子 |
| 6. 自動計測制御：林 将光、河口 真志 | 13. ブラウン運動：安東 正樹、小森 健太郎 |
| 7. 電子回折：長谷川 修司、秋山 了太 | |

1.3.2 光学：井手口 拓郎, 三尾 典克

- | | |
|---------------|---------------------|
| 1. イントロダクション | 7. 幾何光学 |
| 2. 真空中の光の性質 | 8. レーザー |
| 3. 等方媒質中の光の伝搬 | 9. ビーム光学 |
| 4. 結晶光学 | 10. 光共振器 |
| 5. 回折 | 11. 光計測：分光、イメージングなど |
| 6. 干渉 | |

1.3.3 量子力学 III：諸井 健夫

- | | |
|---------------------------|------------------------|
| 1. 同種粒子系の量子力学的扱い | 2.5 Aharonov-Bohm 効果 |
| 1.1 多体系の量子力学 | 2.6 スピンの歳差運動 |
| 1.2 同種粒子の多体系 | 3. 3次元の散乱問題 |
| 1.3 同種粒子系の波動関数 | 3.1 散乱断面積 |
| 1.4 第2量子化 | 3.2 確率の保存と光学定理 |
| 2. 電磁場中での荷電粒子 | 3.3 散乱の簡単な例：剛体球による散乱 |
| 2.1 電磁場中の荷電粒子を記述するハミルトニアン | 3.4 グリーン関数を用いた散乱の記述 |
| 2.2 ゲージ対称性 | 3.5 ボルン近似 |
| 2.3 軌道角運動量と磁場の結合 | 3.6 部分波展開と phase shift |
| 2.4 ランダウ順位 | 3.7 共鳴散乱 |

1.3.4 現代実験物理学 II : 安東 正樹, 中島 康博

- | | |
|---------------------|--------------------|
| 1. イントロダクション | 二重ベータ崩壊探索 |
| 2. 物質と粒子の相互作用と粒子検出器 | ニュートリノ実験 |
| 素粒子実験の例 | |
| 粒子と物質の相互作用 | |
| 粒子測定器の原理 | |
| 素粒子実験で使われている測定器 | |
| 3. 粒子加速器 | 6. 宇宙観測における物理量の求め方 |
| 粒子加速の歴史 | 宇宙の観測 |
| 現代の加速器施設 | 距離、質量、温度の導出方法 |
| 将来計画と課題 | |
| 4. 統計の基礎・実験データの解析 | 7. 望遠鏡とその仕組み |
| 確率分布 | 解像度を決める要因 |
| パラメーター推定 | 光・赤外線望遠鏡 |
| | 電波望遠鏡の仕組み |
| 5. その他の宇宙素粒子実験 | 集光と光検出器 |
| 低バックグラウンド実験 | 干渉計と開口合成 |
| 暗黒物質探索 | 8. 重力波の観測 |
| | 望遠鏡の仕組み |
| | 連星合体の観測 |
| | 宇宙論的観測 |

1.3.5 物理学演習 V : 横山 順一, 諸井 健夫, 竹内 一将, 大森 寛太郎, 山本 新

- | | |
|---------------------------------|--------------------------|
| 1. 量子力学 | 1.14 水素分子 |
| 1.1 調和振動子と摂動論 | 1.15 Aharonov-Bohm 効果 |
| 1.2 平面回転子 | 1.16 平面波の展開公式 |
| 1.3 時間に依存する摂動 | 1.17 合流型超幾何関数 |
| 1.4 スピンの相互作用 | 1.18 放物線座標 |
| 1.5 結晶場分裂 | 1.19 Coulomb 散乱 |
| 1.6 同種類のスピン 1/2 フェルミ粒子 2 個からなる系 | 1.20 散乱断面積 |
| 1.7 フェルミオン系と Kramers 縮退 | 1.21 同種粒子の散乱 |
| 1.8 Lyman- α 遷移 | 1.22 Born 近似 |
| 1.9 球対称調和振動子型ポテンシャルのもとでの N 粒子系 | 1.23 Berry 位相とホール伝導度 |
| 1.10 同種粒子の多体系と第二量子化 | 2. 電磁気学 |
| 1.11 電磁場中での荷電粒子の運動 | 2.1 波動方程式の Green 関数 |
| 1.12 コヒーレント状態 | 2.2 真空中の Maxwell 方程式と対称性 |
| 1.13 磁場中の原子 | 2.3 原子の電気双極子モーメント |
| | 2.4 古典的な原子・分子模型と光ピンセット |

2.5 遅延ポテンシャル

2.6 磁気双極子放射とパルサー

2.7 Lienard-Wiechert ポテンシャル

2.8 振動する電荷からの放射

2.9 Larmor の公式

2.10 同軸ケーブル

2.11 導波管

2.12 ロンドン方程式

2.13 電磁場の Lorentz 共変形

3. 統計力学

3.1 Boltzmann 方程式

3.2 2次元イジング模型

3.3 線形応答理論

3.4 Langevin 方程式

1.3.6 生物物理学：樋口 秀男, 能瀬 聡直, 川口 喬吾

1. 生命とは何か、生命誕生と遺伝情報

2. タンパク質の構造と安定性

3. タンパク質の 1 分子機能

4. 筋肉運動と制御の分子論

5. 細胞機能を支える分子たち

6. 脳・神経系の生物物理 1: 脳神経系における情報の流れ

7. 脳・神経系の生物物理 2: 活動電位と H-H 方程式

8. 脳・神経系の生物物理 3: 神経ネットワークによる情報処理

9. 脳・神経系の生物物理 4: 脳の可塑性と記憶

10. 脳・神経系の生物物理 5: ゲノム科学、神経活動イメージング、光による神経活動操作

11. 多細胞現象と理論モデル 1: パターン形成

12. 多細胞現象と理論モデル 2: 確率過程とスケーリング

13. 多細胞現象と理論モデル 3: アクティブマターとトポロジー

14. 細胞内現象と理論モデル: 液液相分離

1.3.7 物理数学 III：小形 正男

1. 群と対称操作

2. 群論の基本概念

3. 有限群の表現

4. 既約表現の指標

5. 回転群

6. 点群、結晶群

7. 物理への応用

8. リー群

9. リー群からリー代数へ

10. リー代数の表現

1.3.8 固体物理学 I：林 将光

0. 固体物理学とは

1. 固体の電子状態

1.1 1粒子ハミルトニアン

1.2 分子軌道法

1.3 並進対称性とブロッホの定理

1.4 周期的境界条件

1.5 強結合モデル

1.6 逆格子とブリルアンゾーン

1.7 結晶格子

1.8 グラフェン

1.9 自由電子モデル

1.10 フェルミ面と状態密度

2. 輸送特性

2.1 自由電子ガス

2.2 ブロッホ電子の運動方程式

2.3 ボルツマン輸送方程式

2.4 格子振動

2.5 格子振動の量子化

2.6 電子-フォノン相互作用

2.7 2次元電子系

2.8 ランダウ準位

2.9 量子ホール効果

2.10 半古典量子化条件

2.11 ベリー位相

3. 磁性

3.1 交換相互作用

3.2 格子モデル

3.3 ハバード模型

3.4 ストナー条件

4. 超伝導

4.1 クーパー対

4.2 BCS モデル

1.3.9 電磁気学 III : 横山 順一

1. ヘビサイド・ローレンツ単位系によるマックスウェル方程式

2. 電磁ポテンシャルと電磁波

3. グリーン関数

4. 遅延ポテンシャル

5. 先進ポテンシャルと因果律

6. 多重極放射

7. シンクロトロン放射

8. サイクロトロン放射

9. チェレンコフ放射

10. 境界値問題

11. 導波管

12. 電磁波の回折

1.3.10 統計力学 II : 竹内 一将

1. 相互作用がある系の平衡統計力学 - 相転移を中心に -

1.1 相転移とは何か?

1.2 相転移と自由エネルギー、分類

1.3 磁性体モデル: 相転移の代表的舞台

1.4 相転移のメカニズムと空間次元

1.5 平均場近似

1.6 Landau の理論 (平均場)

1.7 Ginzburg-Landau の理論

1.8 平均場の破綻と空間次元

- 1.9 臨界現象
- 1.10 スケーリング仮説
- 1.11 くりこみ群の考え方
- 2. 線形応答理論：非平衡統計力学への序論
 - 2.1 現象
 - 2.2 Boltzmann 方程式
 - 2.3 線形応答理論
- 3. Brown 運動と確率過程
 - 3.1 現象
 - 3.2 Langevin 方程式
 - 3.3 Fokker-Planck 方程式

1.3.11 計算機実験 II：藤堂 眞治, 高橋 昂, 山崎 隼汰

- 1. モンテカルロ法
 - 1.1 乱択アルゴリズム
 - 1.2 物理過程のシミュレーション
 - 1.3 モンテカルロ積分
 - 1.4 多体系の統計力学
 - 1.5 マルコフ連鎖モンテカルロ
- 2. 偏微分方程式と多体系の量子力学
 - 2.1 偏微分方程式の初期値問題
 - 2.2 横磁場イジング模型
 - 2.3 多体量子系の時間発展
 - 2.4 量子コンピュータ
- 3. 少数多体系・分子動力学
 - 3.1 少数多体系・分子動力学
 - 3.2 シンプレクティック積分法
 - 3.3 長距離ポテンシャルの計算
 - 3.4 ビリアル定理
 - 3.5 温度の制御
 - 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 最急降下法・勾配降下法
 - 4.3 共役勾配法
 - 4.4 勾配の計算
 - 4.5 Nelder-Mead の滑降シンプレックス法
 - 4.6 シミュレーテッドアニーリング

1.4 4年生 S セメスター

1.4.1 機械学習概論：樺島 祥介

0. 導入

1. 数理基礎 (1)

2. 数理基礎 (2)

3. 回帰と分類

4. 統計的信頼性 (1)

5. 統計的信頼性 (2)

6. カーネル法 (1)：ガウス過程

7. カーネル法 (2)：サポートベクトルマシン

8. 多層ニューラルネット (1)

9. 多層ニューラルネット (2)

10. 主成分分析と因子分析

11. クラスタ分析

12. 敵対的生成ネットワーク

13. 拡散モデル

1.4.2 場の量子論 I：福嶋 健二

1. Introduction

1.1 Analogy from a classical field theory

1.2 Symmetries and the Noether currents

2. Fields

2.1 Lorentz group

2.2 Poincare group

2.3 Scalar, spinor, vector

3. Quantization

3.1 Many-body problem

3.2 scalar field theory

3.3 Discrete symmetries of the scalar field

4. Interaction

4.1 Interacting scalar theory

4.2 Reaction Rates

4.3 Vacuum in the interaction representation

5. Calculus

5.1 Generating functional

5.2 Feynman propagator

5.3 Perturbation in the ϕ^4 theory

5.4 Self-energy and 1PI graphs

5.5 Ultraviolet divergence

5.6 Renormalized perturbation theory

6. Dirac fields

6.1 Dirac equation and free spinor basis

6.2 Discrete symmetries of fermions

6.3 Anti-commutation relation

6.4 Time-ordered product and the Dirac propagator

6.5 Constrained systems

6.6 Dirac's quantization method

7. Vector fields

7.1 Polarization vectors

7.2 Feynman rules in QED

7.3 Compton scattering

8. Applications

8.1 Nambu-Jona-Lasinio model

8.2 Origin of the mass

8.3 Schwinger model (1+1D QED)

8.4 Chiral anomaly

9. Advanced topics

9.1 Non-Abelian gauge theory

9.2 Asymptotic freedom

9.3 Spinor helicity formalism

1.4.3 サブアトム物理学：中村 哲

1. はじめに

物質の構成、相互作用、歴史、加速器、元素合成、サブアトム物理を俯瞰する

2. 原子核の基本的性質

質量と結合エネルギー

3. ミクロの世界を覗く

電子散乱実験、加速器技術、原子核や核子の大きさと形

4. 核子の内部構造

電子-核子散乱、核子共鳴、クォーク

5. クォーク、グルーオン

ハドロン、構造関数

6. 核力

パイオン交換ポテンシャル、格子 QCD

7. 原子核構造

フェルミガス模型、殻模型、魔法数、ハイパー原子核

1.4.4 計算科学概論：6名によるオムニバス講義・実習

1. 高性能計算機のアーキテクチャ

2. スーパーコンピュータと並列プログラミング

3. 大規模疎行列ソルバー入門

4. 第一原理計算による物質科学研究

5. 高性能プログラミングと性能測定

6. 並列 FEM と CAE (Computer Aided Engineering)

1.4.5 統計力学特論：加藤 岳生

1. Phase Transition

2. Mean-field approximation and solvable models

3. Spatial correlation

4. Scaling theory

5. Real-space renormalization group

6. Momentum-space renormalization group

7. Mermin-Wagner Theorem

8. Kosterlitz-Thouless transition

1.4.6 現代物理学入門：渡利 泰山, 今井 伸明, 三部 勉

1. 超弦理論と一般場の理論の研究のおはなし

1.1 弦理論の源流

1.2 弦理論の定式化：どこまでわかっているか

1.3 一般抽象場の理論の研究、量子重力の課題

1.4 弦理論を数学の道具として使う

1.5 素粒子物理、初期宇宙論を弦理論の言葉でとらえる

2. クォーク、核子多体系の物理

2.1 量子多体系の多様な実験研究

2.2 宇宙での元素合成過程と核物理

2.3 量子多体系での基本対称性の破れの研究

2.4 中性子過剰核、超重元素

2.5 クォークグルーオンプラズマ

3. ミューオンを用いた素粒子物理学研究の最前線

3.1 ミューオンの基本的性質

3.2 ミューオンを作る

3.3 異常磁気能率・電気双極子能率

3.4 荷電レプトンフレーバー対称性の破れ

3.5 ミューオニウムの精密分光

1.4.7 一般相対論：須藤 靖

1. 序論

1.1 ありそでなさそでやっぱりあるもの：物理法則はどこにある

1.2 物理学の幾何学化：一般相対論の示唆と限界

1.3 物理量と座標系

1.4 線素と計量

2. 一般相対性原理とその数学的表現

2.1 特殊相対論の限界：慣性系とは？重力は“力”か？

2.2 一般相対論の概念構成

2.3 物理量の表現：ベクトル

2.4 物理量の表現：双対ベクトル

2.5 物理量の表現：テンソル

2.6 まとめ：物理量とテンソル

3. 測地線の方程式

3.1 重力場のもとでの粒子の運動方程式

3.2 ニュートン理論との対応

4. 重力場の方程式

4.1 マッハの原理と重力場の方程式

4.2 エネルギー運動量テンソル

4.3 アインシュタイン方程式への道

4.4 ニュートン理論との対応

4.5 宇宙定数

4.6 変分原理による定式化

4.7 法則は時空に刻まれている

5. シュワルツシルト時空とブラックホール

5.1 球対称重力場の計量

5.2 シュワルツシルト解導出の概略

5.3 シュワルツシルト半径と事象の地平線

5.4 シュワルツシルトブラックホールのまわりの質点の運動

5.5 一般相対論の古典的検証

5.6 水星の近日点移動の計算

5.7 光線の曲がり角の計算

5.8 ブラックホール天文学

6. 物理法則と基礎物理定数

6.1 質量と長さ

6.2 温度と長さ

6.3 電磁相互作用と微細構造定数

6.4 重力と重力微細構造定数

6.5 プランクスケール

6.6 原子の大きさ**6.7 天体の力学的時間スケール****7. 相対論的宇宙モデル****7.1 宇宙原理と宇宙の一様等方性****7.2 ロバートソン-ウォーカー計量の幾何学的性質****7.3 アインシュタイン方程式からフリードマン方程式へ****7.4 宇宙の状態方程式と宇宙定数****7.5 ハッブルの法則と宇宙論的赤方偏移****7.6 アインシュタイン-ド・ジッター宇宙モデル****7.7 フリードマン宇宙モデル****7.8 宇宙の年表****7.9 宇宙の未来****1.4.8 量子光学：上田 正仁****1. 量子力学の基礎****2. 不確定性関係****3. 測定の理論****4. 電磁場の量子化****5. コヒーレント状態、スクイズド状態、位相演算子****6. 量子干渉効果****7. 量子情報の消去とコヒーレンス****8. 原子と光の相互作用****9. アインシュタイン-ポドルスキー-ローゼン相関****10. 自然放出のワイスコップ-ウィグナー理論****11. 共振器量子電気力学****12. クローン禁止定理、ベルの不等式****13. 量子テレポーテーション****14. 量子アルゴリズム****15. 量子暗号****1.4.9 固体物理学 II：長谷川 修司****1. 1. 物性物理学とノーベル賞****1.1 超伝導・超流動に関するノーベル賞****1.2 半導体に関するノーベル賞****1.3 低次元系・トポロジカル系に関するノーベル賞****2. 格子振動と比熱****2.1 格子振動とフォノン**

- ・ 1次元結晶での格子振動 ・ 3次元結晶での格子振動
- ・ 光学フォノンと音響フォノン ・ 格子振動の量子化とフォノン分光

2.2 比熱

- ・ Dulong-Petit の法則 ・ 格子比熱 Einstein

モデルと Debye モデル

- ・ 電子比熱 ・ 熱膨張

2.3 熱伝導

- ・ 熱伝導率 ・ 熱電効果 ・ Wiedemann-Franz の法則

3. 超伝導**3.1 超伝導の発見と現象論**

- ・ 完全導体とマイスナー効果 ・ London 方程式
- ・ その他の実験事実 ・ Ginzburg-Landau 理論

3.2 ミクロな理論

- ・ 電子格子相互作用 ・ Cooper 対の形成
- ・ BCS 理論 ・ 臨界電流と臨界磁場 ・ BCS 規格状態とマイスナー効果

3.3 超伝導の物性

・磁束の量子化 ・第1種・第2種超伝導体 ・ Josephson 効果

4. スピンと磁性**4.1 スピン**

・実験事実 ・Dirac 方程式とスピン ・電子の磁気モーメント

4.2 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

4.3 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：江尻 晶**1. 様々なプラズマ****1.1 様々なプラズマ****1.2 プラズマを特徴づける量****1.3 サハの熱電離平衡****1.4 衝突時間****1.5 電気抵抗****1.6 プラズマ中のスケール****1.7 デバイ遮蔽****2. 単一粒子の軌道****2.1 サイクロトロン運動、ラーマ運動****2.2 各種のドリフト****2.3 ミラー配位と断熱不変量****2.4 種々の磁場配位と粒子軌道****3. 衝突と拡散****3.1 衝突時間****3.2 電気抵抗****3.3 拡散とランダムウォーク****3.4 拡散係数と閉じ込め時間****4. 電磁流体としてのプラズマ****4.1 電磁流体方程式****4.2 MHD 方程式のまとめ****4.3 抵抗の役割と磁力線の凍結****4.4 MHD 発電, MHD 加速****4.5 磁気再結合****5. 平衡と安定性****5.1 プラズマの圧力と磁場の圧力****5.2 円柱プラズマの平衡****5.3 トーラスプラズマの平衡****6. 不安定性****6.1 不安定性の分類****6.2 不安定性の例****6.3 交換不安定性の成長率の導出****6.4 トマカクにおける良い曲率、悪い曲率****7. プラズマ中の波****7.1 波動の分類と取り扱い方****7.2 電磁場中の粒子の運動****7.3 誘電率と誘電テンソル****7.4 屈折率と分散式****7.5 分散式の解と様々な波****8. 波と粒子の相互作用****8.1 ランダウ減衰****8.2 トランジットタイム減衰****8.3 サイクロトロン減衰****9. プラズマ物理と核融合**

1.4.11 宇宙物理学：馬場 彩

- | | |
|---------------------------|-----------------|
| 1. 万有引力の法則から見る宇宙と天体 | 6. 膨張宇宙の性質 |
| 2. 電磁波の法則から見る宇宙と天体 | 7. 初期の宇宙 |
| 3. 星の基礎物理 | 8. 宇宙の超高エネルギー現象 |
| 4. 星の進化と終末 | 9. 宇宙観測の今 |
| 5. 縮退星（白色矮性と中性子星）とブラックホール | |

1.4.12 生物物理学特論 II：岡田 真人, 野口 博司, 伊藤 創祐

- | | |
|--|--|
| 1 Chemical reaction and rate equation | 2.2 Red blood cells and blood flow |
| 1.1 Chemical reaction in cells and chemical thermodynamics | 2.3 Membrane deformation by curvature-inducing proteins |
| 1.2 Population dynamics | 3 Dynamics of motion perception |
| 1.3 Dynamics and information geometry | 3.1 Dynamics of pattern recognition |
| 2 Structure and function of biomembrane | 3.2 Spectral deconvolution |
| 2.1 Physics of curved surface, surface tension, wetting | 3.3 Face perception and sparse modeling |

1.4.13 化学物理学：高木 英典

- | | |
|-------------------------|-------------------|
| 1. 原子（イオン）の電子状態 | 1.6 群論 |
| 1.1 水素原子の 1 電子波動関数 | 1.7 配位子場とイオンの電子状態 |
| 1.2 多電子原子（イオン）の電子状態と周期表 | 2. 分子の電子状態 |
| 1.3 電子間相互作用と多重項 | 2.1 水素分子 |
| 1.4 孤立イオンの磁性 | 2.2 分子軌道 |
| 1.5 Hartree -Fock 近似 | 2.3 分子振動 |

1.5 4年生 A セメスター

1.5.1 素粒子物理学：田中 純一, 澤田 龍

- | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Introduction | 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：堀 健太郎

- | | |
|--|--|
| 1. 経路積分
オペレーター形式から経路積分の導出
対称性とワード恒等式
経路積分からオペレーター形式の導出
フェルミオン系：反可換変数の代数と解析
相関関数と時間順序積の真空期待値 | 1 粒子規約な図形 |
| 2. ゲージ理論
ゲージ固定条件
ファデエフ・ポポフ行列式とゴースト
BRST 対称性とコホモロジー
正準形式での量子化 | 6. 1 粒子規約有効作用
定義
性質 1：1 粒子規約な図形の生成汎関数
性質 2：プランク定数による展開＝ループ展開
性質 3：背景場の周りの分配関数 |
| 3. 自由場の理論
スカラー場
ベクトル場
ディラック・フェルミオン
ゴースト系
マックスウェル理論の BRST コホモロジー | 7. 正則化と繰り込み
発散：見かけの発散次数
正則化：運動量カットオフ、パウリ・ヴィラーズ、格子、次元正則化
繰り込みのアイデア：打ち消し項
繰り込み可能性
繰り込み条件
具体例
有効ポテンシャルの計算
有効ポテンシャルの物理的な意味 |
| 4. 摂動論
ファインマン図形
連結と非連結 | 8. 繰り込み群
繰り込み群のアイデア
繰り込み群方程式
4次元スカラー理論での繰り込み関数の計算
繰り込み群固定点の性質
繰り込み群による摂動論の改善 |
| 5. 粒子のスペクトルと相互作用
2点関数のスペクトル分解
散乱過程と漸近状態
LSZ 簡約公式
摂動論における S 行列 | 9. QED の繰り込み
ゲージ対称性からくるワード恒等式
発散の冪勘定 |

ゲージ不変な正則化
 1 ループ図形の計算
 スラフノフ・テイラー恒等式

繰り込まれた摂動論
 繰り込み群による結合定数の流れ

1.5.3 原子核物理学 : Haozhao Liang

1. Introduction of atomic nuclei

1.1 Basic properties

1.2 Creations and decays

1.3 Outstanding features

2. Nuclear bulk properties

2.1 Nuclear masses and liquid drop model

2.2 Nuclear saturation and Fermi-gas model

2.3 Magic numbers and shell model

3. Nucleon-nucleon interactions

3.1 Symmetries and basic properties

3.2 Non-perturbative nature and effective interactions

4. Nuclear structure and its understandings

4.1 Global descriptions and Hartree-Fock vs density functional theory

4.2 Pairing correlations and BCS vs Bogoliubov

5. Nuclear radioactivity and its understandings

5.1 Alpha decays

5.2 Beta decays

5.3 Gamma decays

6. Selected advanced topics and discussion

1.5.4 現代物理と機械学習 : 蘆田 祐人

1. Introduction

2. Quantum mechanics review

2.1 Fundamental concepts

2.2 Ensembles

2.3 Distance measures

3. Theory of quantum measurement and open systems

3.1 Positive operator-valued measure

3.2 Kraus operators

3.3 Bayesian inference and quantum measurement

3.4 Continuous quantum measurement

4. Foundations of quantum optics

4.1 Quantization of the electromagnetic field

4.2 Bosonic Gaussian states

4.3 Fermionic Gaussian states

4.4 Superconducting qubits

5. Quantum light-matter interaction

5.1 Quantized electrodynamics Hamiltonian

5.2 Long wavelength approximation

5.3 Introduction to Cavity/Waveguide QED

6. Machine learning and quantum science

6.1 Supervised learning

6.2 Unsupervised learning

6.3 Black-box optimization**7. Reinforcement learning****7.1 Motivating example****7.2 Markov decision process****7.3 Value-based search****7.4 Deep Q-learning****7.5 Policy-based search****7.6 Black-box optimization in deep RL****1.5.5 電子回路論：北川 健太郎****0. 令和時代の信号処理・装置制御****1. 回路図の書き方、シミュレーション****2. 線形システムとフィルタ****3. 離散信号とデジタル信号処理****4. 増幅回路とフィードバック制御****5. 分布定数回路と信号伝送****6. 雑音と信号****7. デジタル回路****8. パワー回路****9. 基板実装****1.5.6 固体物理学 III：酒井 明人****1. トポロジカル物性****1.1 物性物理におけるトポロジー****1.2 幾何学との関係****1.3 ベリー曲率による物性****1.4 ワイル半金属****2. 電子相関を考慮した固体中の電子****2.1 相互作用の無い電子系****2.2 フェルミ液体****2.3 ハバードモデルにおける電子相関****2.4 アンダーソンモデルにおける電子相関****2.5 重い電子系****3. 磁性****3.1 磁性の起源****3.2 量子磁性****1.5.7 非平衡科学：伊藤 創祐****1. Introduction**

Non-equilibrium systems, Stochastic processes, Steady state

2. Stochastic processes

Markov chain, Chapman-Kolmogorov equation, Master equation, Fokker-Planck equation, Onsager-Machlup function, Langevin equation

3. Stochastic thermodynamics

Flow and force, Entropy production rate, The second law of thermodynamics, Linear irreversible thermodynamics, Onsager reciprocal relations

4. Information theory

Shannon entropy and differential entropy, Kullback-Leibler divergence

5. Dynamical systems

Cumulants and moments, Fixed points and

stability

6. Optimal transport theory

Monge-Kantorovich problem, 2-Wasserstein distance, Benamou-Brenier formula, Minimum entropy production

1.5.8 普遍性生物学：古澤 力

1. Introduction

Universal properties of biological systems

2. Universal properties in steady growing systems

growth laws, phenomenological theory of dormant state

3. Adaptation

attractor selection dynamics for environmental adaptation

4. Robustness of development

dynamical system model of cell differentiation, morphogenesis

5. Evolution (I)

fluctuation-response relationship in evolution, genetic variance and fluctuation

6. Evolution (II)

emergence of evolutionary constraint, experimental evolution studies

7. Ecosystem

mechanisms for coexistence, symbiosis

8. Summary and perspectives

toward phenomenological theories for universal biology

1.5.9 重力波物理学：Kipp Cannon, 都丸 隆行

1. Introduction to General Relativity

1.1 Motivation

1.2 Spaces

1.3 Linear Gravity

2. Orbiting Binary System

2.1 Metric Perturbation

2.2 Time Evolution

2.3 Energy Balance

2.4 Time to Coalescence

2.5 Newtonian Chirp

2.6 Extra Comments

3. Detection of Gravitational Waves (Tomaru)

3.1 Philosophical Introduction

3.2 Various Methods of Gravitational Wave Detection 1 – Doppler Tracking & Pulsar Timing

3.3 Various Methods of Gravitational Wave Detection 2 – Resonant Mass Detector & CMB Polarization

3.4 Laser Interferometric Gravitational Wave Detector

3.5 Noises in Gravitational Wave Detector

4. Gravitational-Wave Signal Identification

4.1 Choosing a Detector

4.2 Neyman-Pearson Criterion

4.3 Neyman-Pearson Lemma

4.4 Time Series as a Vector

4.5 The Fourier Transform as a Unitary Linear Operator

4.6 Gaussian Random Variables

4.7 Karhunen-Loève Theorem

4.8 Matched Filter

5. Gravitational-Wave Astronomy

5.1 Parameter Estimation and Bayes' Theorem

5.2 Compact Object Merger Rates

1.5.10 物理学のための科学英語特論：松村 知岳

1. 物理学／研究における英語とは

2. 学術論文とは（自分が読みたい学術論文を解析することで理解する Title, Abstract, Introduction）

3. 学術論文の書き方概要。書く前の準備（書き方、校正方法）

4. 学術論文を意識した文章作成（Title, Abstract, Introduction）

5. 口頭によるプレゼンテーション方法の概要、プレゼン作りの準備

6. 口頭によるプレゼンテーションの実践、Q/A への対処

7. ポスターによるプレゼンテーション方法、ポスターを作るための準備

8. リモート会議を模擬したプレゼン、Q/A、議事録

2 各賞受賞者紹介

2.1 大塚 孝治 名誉教授

— フンボルト賞 —

物理学専攻の名誉教授である大塚孝治先生がフンボルト賞を受賞されました。中間子交換が生み出す核力にはテンソル力と呼ばれる核子スピンの向きに依存した非中心力成分が含まれており、原子核構造におけるテンソル力の役割の解明は積年の課題でした。大塚先生はモンテカルロ殻模型による大規模数値計算手法を発展させるとともに、テンソル力にまつわる革新的な研究を牽引されてきました。特に陽子や中性子が過剰となるエキゾチック原子核で、原子核の殻構造がテンソル力の効果等により変化する殻進化理論を提唱し、新しい原子核の「魔法数」を予言されました。この殻進化理論は今日では世界中の RI ビーム核物理研究者たちの指針となっています。また最近では、原子核の楕円体変形を自己組織化という観点から整理し直し、集団的な運動モードと一粒子状態エネルギーの競合をモノポール力が制御するメカニズムを発案され、従来の回転バンドの解釈を完全に刷新されています。この度のご受賞を心からお祝い申し上げるとともに、今後も益々お元気にご活躍されますことを祈念致します。

2.2 藤森 淳 名誉教授

— 第7回放射光科学賞 —

藤森淳名誉教授が、「放射光分光を用いた強相関電子系の電子構造研究による放射光科学への貢献」により第7回（2024年）放射光科学賞を受賞されました。藤森先生は、我が国における放射光黎明期から、真空紫外および軟 X 線領域の光電子分光・X 線吸収分光を用いた固体物理学研究において先駆的な研究成果を数多く挙げ、磁性体、超伝導体等の強相関電子系物質研究の発展に先導的な役割を果たしました。特筆すべき点は、分光実験と理論解析を併せることで放射光物性研究を発展させ、我が国の研究を世界に発信してきた点です。藤森先生の下からは、放射光分光をはじめとする物性物理学分野、物質科学分野の専門家が数多く巣立っています。

2.3 岡田 康志 教授

— 第16回中谷賞大賞 —

岡田康志教授が、第16回中谷賞大賞を受賞しました。本賞は医工計測技術分野において優れた業績を上げた研究者に贈られる賞であり、岡田教授は「一分子・超解像蛍光顕微鏡法の開発と細胞生物学研究への応用」により大賞を受賞しました。超解像蛍光顕微鏡は、光の回折により制限される限界を超えた分解能で微細な構造を可視化する光学顕微鏡技術で、生物学研究に大きな貢献をしています。岡田教授は、スピニングディス

ク超解像顕微鏡という独自の手法を開発し、従来の超解像顕微鏡よりも10倍以上速く撮影できる技術を実現しました。この技術により、細胞内小器官など生きている細胞内の微細構造が活動する動態観察が世界で初めて実現されました。この手法は顕微鏡メーカーに技術移転され、世界中で広く使用されています。

2.4 大栗 真宗 氏（須藤研、現千葉大学）

— 第114回日本学士院賞 —

大栗真宗氏が宮崎聡氏（国立天文台ハワイ観測所長、国立天文台先端技術センター教授：釜江常好研出身）とともに、「重力レンズ効果を用いた宇宙論研究の開拓推進」に対して、日本学士院賞を共同受賞されました。宮崎氏は、すばる望遠鏡に搭載された超広視野 CCD カメラ Hyper-Suprime Cam を開発し、日本が主導する宇宙の広域大規模サーベイを実現しました。大栗氏は、HSC データに重力レンズモデルを当てはめることで、直接見えないダークマターの空間分布を構築し、宇宙マイクロ波背景輻射とは独立に宇宙論パラメータを決定するなど、著しい成果を挙げました。この HSC サーベイはプリンストン大学と台湾宇宙物理・天文学研究所との国際共同研究ですが、オールジャパン体制で数多くの大学院生・若手研究者が世界的な貢献を果たしつつあります。大栗氏は HSC サーベイ以外にも、重力レンズ現象による超新星爆発の時間遅延多重像の予言と発見、重力レンズを用いた最遠方の単独性の発見など、理論と観測を駆使した重力レンズ現象の解明の世界的第一人者です。大栗氏と宮崎氏の今回のご受賞を心からお喜び申し上げますとともに、今後のますますのご活躍をお祈りいたします。

2.5 川口 由紀 氏（上田研、現名古屋大学）

— 令和5年度文部科学大臣表彰科学技術賞（研究部門） —

川口由紀教授（名古屋大学大学院工学系研究科）が「内部自由度を持った冷却原子気体の理論的研究」で令和5年度科学技術分野の文部科学大臣表彰を受賞されました。受賞対象となった研究は、冷却原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) のうち原子がスピン自由度を持つことによりもたらされる新奇な現象の予言および解明です。特に、このスピノール BEC で磁氣的ダイポール相互作用 (DDI) を考慮するとスピン緩和が起こり、それに伴い原子気体が回転を始めるというアインシュタイン-ド・ハース効果が起こることを予言しました。また、アルカリ原子気体の DDI は非常に弱くこれまで無視されてきましたが、スピン自由度を持つ場合にはスピンの空間構造・形成という巨視的な効果のために無視できないことを指摘しました。更に、絡み数で特徴づけられるノット励起がスピノール BEC で存在することを示し、生成・観測する方法を提案しました。これら一連のご研究は理論・実験のその後の研究に大きな影響を与えました。川口氏の今回の受賞はそれらが評価されたものであり、心からお祝い申し上げます。

2.6 酒井 広文 教授

— 令和5年度文部科学大臣表彰科学技術賞（研究部門） —

酒井広文教授が、研究業績「高強度レーザー電場を用いた気体分子の配向制御技術の研究」により令和5年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞（研究部門）を受賞しました。通常ランダムな向きを向いている気体分子の向きを揃えることができれば、化学反応の立体ダイナミクス研究や分子内電子のアト秒ダイナ

ミクス研究の理想的な試料となります。解決すべき課題は、分子の頭と尻尾を区別して向きを揃える配向制御法の開発でした。酒井教授は、静電場と高強度レーザー電場を併用する手法にいち早く着手し、関係分野で一貫して世界をリードし続け、高い配向度、レーザー電場のない条件下、3次元配向制御の3条件を満たす配向制御の「完成形」を実現したことが高く評価されました。酒井教授の研究業績は、分子のトンネルイオン化における配向依存性、高次高調波強度の配向依存性の観測に基づく分子軌道イメージングなどの実験的研究に大きく貢献しました。

2.7 川口 喬吾 准教授

— The Early Career Scientist Prizes —

川口喬吾准教授がIUPAPのC3委員会（ボルツマン賞の主催組織）よりEarly Career Scientist Prizeを受賞されました。本賞は博士号取得後8年以内の研究者で、統計物理学分野の理論または実験で顕著な成果をあげ、将来的に卓越した業績を期待される者に贈られる国際的な賞です。受賞の対象となったのは、川口氏の隠れた変数に関するゆらぎの性質に関する研究、皮膚などの成体組織恒常性の背後にある統計物理学の解明、細胞集団運動におけるトポロジカル欠陥の役割の発見という、実験・理論統計物理学および生物物理学の複数のテーマにおける業績でした。川口氏の生命科学に関係した理論と実験の研究が統計物理学分野から評価されたことは特筆すべき点であり、今後のますますのご活躍が期待されます。

2.8 横溝 和樹 助教（蘆田研）

— 第40回井上研究奨励賞 —

蘆田研究室助教の横溝和樹氏が第40回（2023年度）井上研究奨励賞を受賞されました。横溝氏は、非エルミート表皮効果の下での非ブロッホバンドの計算方法に関する基礎理論を構築し、様々な物理系を解析することで非エルミート表皮効果に特有の新奇な現象を見出しました。非エルミート表皮効果に伴う現象は従来のブロッホバンド理論で予言することが難しく、構築された理論は非エルミート物理の研究を行う上で強力なツールとなることが期待されます。このような非エルミート物理の研究に対する先駆的な成果が高く評価されました。

2.9 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5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） 天野 智仁 氏、稲村 寛生 氏、上田 篤 氏、平井 誉主在 氏、田中 宏明 氏
- 理学系研究科研究奨励賞（修士課程） 永山 龍那 氏、大嶽 竜樹 氏、金川 隼人 氏、新井 翔大 氏
- 理学部学修奨励賞 松浦 修大 氏、石川 雅隆 氏、愛敬 公太 氏

皆様の今後の更なるご活躍を期待します。

3 人事異動

[物理学教室に來られた方々]

川口 喬吾	准教授	R5/4/1	採用	理化学研究所開拓研究本部
三谷 啓人	特任助教 (須藤研)	R5/4/1	採用	日本學術振興会特別研究員
今井 渉平	特任助教 (辻研)	R5/4/1	採用	日本學術振興会特別研究員
松田 拓也	特任助教 (未来社会)	R5/4/1	採用	日本學術振興会特別研究員
藤田 維明	特任研究員 (JSR 包括連携)	R5/4/1	採用	大阪大学
木村 聡子	特任専門職員 (辻研)	R5/4/1	採用	本学数理科学研究科
寺山 智春	一般技術員 (技術室)	R5/4/1	採用	
伊藤 早希	一般職員 (物理事務)	R5/4/1	採用	
小池 祐樹	技術補佐員 (中辻研)	R5/5/1	採用	
阿部 恵子	事務補佐員 (中辻研)	R5/5/1	採用	
松田 祥江	事務補佐員 (物理事務)	R5/5/1	採用	
西澤 賢治	特任研究員 (岡田研)	R5/5/16	採用	CNRS
中本 愛理	特任研究員 (竹内研)	R5/6/1	採用	中国科学院大学
磯貝 夏斗	技術補佐員 (村尾研)	R5/6/1	採用	
Shulga Kirill	特任研究員 (浅井研)	R5/8/1	採用	沖縄科学技術大学院大学
ZHANG Rui Lan	特任研究員 (吉田研)	R5/8/1	採用	
Aronson Igor	GSGC 客員教授 (竹内研)	R5/9/1	採用	Pennsylvania State University
Pedro Pasquini	特任研究員 (濱口研)	R5/9/1	採用	Shanghai Jiao Tong University
三保 千春	特任研究員 (SQAI)	R5/9/1	採用	東京理科大学
伊東 恵子	特任専門職員 (中辻研)	R5/9/1	採用	本学工学系研究科
山田 恭平	特任研究員 (日下研)	R5/10/1	採用	
前橋 英明	特任研究員 (小形研)	R5/10/1	採用	物質・材料研究機構
Zhong Yici	特任研究員 (吉田研)	R5/10/1	採用	
八島 恵子	特任専門職員 (高木研)	R5/10/1	採用	本学工学系研究科
中村 ちか子	事務補佐員 (就職支援室)	R5/10/1	採用	
岡山 直寛	一般職員 (物理教務)	R5/10/1	採用	
山田 昌彦	特任講師 (SQAI)	R5/11/1	採用	科学技術振興機構
上田 和茂	特任助教 (SQAI)	R5/12/1	採用	神戸大学
菅原 麻衣	特任研究員 (SQAI)	R5/12/16	採用	千葉大学
吉岡 千春	事務補佐員 (JSR 包括連携)	R6/1/1	採用	
中山 和之	特任助教 (浅井研)	R6/2/1	採用	福岡大学
Taranto Guy	特任研究員 (村尾研)	R6/2/16	採用	日本學術振興会外国人特別研究員
Mukherjee Sayan	特任助教 (SQAI)	R6/2/21	採用	blueqat 株式会社
Lee Kyung Jae	特任研究員 (SQAI)	R6/3/1	採用	Korea University
Couzinie Herbert	特任研究員 (SQAI)	R6/3/1	採用	株式会社 Quemix
小杉 太一	特任研究員 (SQAI)	R6/3/1	採用	株式会社 Quemix
西 紘史	特任研究員 (SQAI)	R6/3/1	採用	株式会社 Quemix
西谷 侑将	特任研究員 (SQAI)	R6/3/1	採用	株式会社 Quemix
田中 麻子	事務補佐員 (中辻研)	R6/3/1	採用	

[物理学教室から移られた方々]

佐藤 貴一	上席係長（物理教務）	R5/6/1	配置換え	本学工学系情報理工学系研究科
奥澤 浩未	特任専門職員（藤堂研）	R5/6/30	退職	
田熊 友加里	事務補佐員（中辻研）	R5/6/30	退職	
FENG ZILI	特任研究員（NEDO）	R5/8/31	退職	California Institute of Technology
中本 愛理	特任研究員（竹内研）	R5/9/8	退職	University of Bordeaux
Lama Hisay	特任研究員（竹内研）	R5/9/30	退職	Imperial College London
Ramirez Elizabeth	特任研究員（濱口研）	R5/9/30	退職	Johannes Gutenberg University Mainz
Aronson Igor	GSGC 客員教授（竹内研）	R5/10/31	退職	Pennsylvania State University
山田 恭平	特任研究員（日下研）	R5/10/31	退職	Princeton University
ZHANG Rui Lan	特任研究員（吉田研）	R6/1/31	退職	
三谷 啓人	特任助教（須藤研）	R6/2/29	退職	Duisburg-Essen University
Zhong Yici	特任研究員（吉田研）	R6/2/29	退職	
須藤 靖	教授	R6/3/31	定年退職	高知工科大学
樋口 秀男	教授	R6/3/31	定年退職	東北大学
浅井 祥仁	教授	R6/3/31	退職	高エネルギー加速器研究機構
北川 健太郎	講師	R6/3/31	配置換え	本学物性研究所
松田 拓也	特任助教（未来社会）	R6/3/31	退職	大阪大学
上田 和茂	特任助教（SQAI）	R6/3/31	退職	徳山工業高等専門学校
中山 和之	特任助教（浅井研）	R6/3/31	配置換え	本学素粒子物理国際センター
Forsyth Fox	特任研究員（安東研）	R6/3/31	退職	Siding Springs Observatory
Gladen Wayne	特任研究員（浅井研）	R6/3/31	退職	量子科学技術研究開発機構
Pedro Pasquini	特任研究員（濱口研）	R6/3/31	退職	
石橋 未央	特任研究員（未来社会）	R6/3/31	退職	東北大学
菅原 麻衣	特任研究員（SQAI）	R6/3/31	退職	
Shulga Kirill	特任研究員（浅井研）	R6/3/31	配置換え	本学素粒子物理国際センター
伊東 恵子	特任専門職員（中辻研）	R6/3/31	退職	
上田 恵子	特任専門職員（竹内研）	R6/3/31	退職	本学工学系研究科
八島 恵子	特任専門職員（高木研）	R6/3/31	退職	本学工学系研究科
小池 祐樹	技術補佐員（中辻研）	R6/3/31	退職	
磯貝 夏斗	技術補佐員（村尾研）	R6/3/31	退職	
仁井田 和子	事務補佐員（就職支援室）	R6/3/31	退職	
千野 夏子	事務補佐員（JSR 包括連携）	R6/3/31	退職	
南野 真容子	技術専門職員（技術室）	R6/3/31	退職	
宮本 めぐみ	係長（物理教務）	R6/3/31	配置換え	本学教育・学生支援部
齊藤 暁子	係長（物理事務）	R6/3/31	配置換え	本学理学系研究科地球惑星科学専攻

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	小形 長谷川、横山 (将) 福嶋 小林 高木、古澤 上田 (理)、馬場 (大学院)、浅井、酒井 (明) 日下、岡本、竹内 浅井・安東 (XPS)、村尾 (FoPM)、 古澤 (IGPEES)、長谷川・常行 (MERIT)、 藤堂 (Q-STEP)	佐藤、齊藤、伊藤 物理教務 物理教務 物理教務 物理教務 佐伯 物理教務、物理事務
【外国人学生・留学】		
優先配置 海外学部生インターンシップ受入 GSGC 留学生支援 留学	濱口 高木、島野 横山 (順)、Liang 濱口	物理教務 物理教務 物理教務 物理教務
【駒場生進学】		
進学指導/推薦入試アドバイザー 駒場対策	長谷川、馬場 教務担当者が兼務	物理教務 物理教務
【奨学金・支援】		
奨学金 博士課程学生支援制度 就職 部屋割 安全衛生 放射線 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 理交会 親睦会 ホームページ、IT オープンキャンパス JSR 東大 包括連携 CURIE 緊急対応教職員 物理学専攻災害時安否確認担当者 ハラスメント予防担当者	島野 長谷川 林 酒井 (広) 横山 (将) 酒井 (広) (統括、試作室) 日下 (学生実験) 酒井 (広)、岡本 (安全衛生・低温) 藤堂 (IT 関連) 辻 (理)、岡田、横山 (順) 林、中島、村尾 樺島、蘆田 安東 中村 藤堂、蘆田 辻 中辻、小形、常行 酒井 (広)、松尾 小形 (専攻長)、福嶋 (専攻主任) 小形	物理教務 渡辺、伊藤 仁井田、佐藤 齊藤 物理事務 下澤 佐伯 物理ネットワーク担当 総務課図書チーム 物理事務 仁井田 物理事務、物理教務 齊藤 レクリエーション委員 物理ネットワーク担当 物理事務 佐藤、宮本、齊藤 佐藤、齊藤

5 教室談話会

- 2023 年 6 月 9 日 (金) 17:00-18:00
井上 圭一 氏 (東京大学・物性研究所)
「微生物ロドプシンがもたらす光生物学の新地平」
- 2023 年 8 月 1 日 (火) 13:00-14:30
Martin Alexander Rodriguez-Vega (Editor of Physical Review Letters)
“Physical Review Letters: Welcoming Applied and Materials Science”
- 2023 年 7 月 12 日 (水) 15:00-16:30
Prof. Natalia Drichko (The Johns Hopkins University)
「フラストレーション磁気と電子バンドトポロジの出会い:Nd₂Ir₂O₇ の場合。」
- 2023 年 8 月 10 日 (木) 14:00-15:30
Prof. Dr. Karsten Danzmann (Director at Max Planck Institute for Gravitational Physics)
“LISA: Gravitational-wave detection in space”
- 2023 年 8 月 10 日 (木) 15:40-16:40
川添 史子 氏 (マックスプランク重力物理学研究所/ハノーファー大学, アルバートアインシュタイン研究所)
「マックス・プランク研究所での研究&博士課程生活」
- 2023 年 8 月 28 日 (月) 仁科アジア賞授与式: 13:30- 講演: 14:00-15:30
Prof. Suvrat Raju (International Centre for Theoretical Sciences, Bengaluru, India)
“Holography of information, gravitational constraints and black-hole evaporation”
- 2023 年 9 月 15 日 (金) 15:00-16:30
Brendan Casey (Fermi National Accelerator Laboratory)
“New results from the Muon g-2 Experiment”
- 2023 年 10 月 11 日 (水) 16:50-18:20
田仲 由喜夫 教授 (名古屋大学 大学院工学研究科)
「非従来型超伝導体のエッジ状態の解明からトポロジカル超伝導の理論へ」
- 2024 年 3 月 7 日 (木) 16:00-17:30
樋口 秀男 教授 (最終講義)
「生物の動きを科学する」

- 2024 年 3 月 7 日 (木) 13:00-14:30
須藤 靖 教授 (最終講義)
「宇宙する人生」
- 2024 年 3 月 18 日 (月) 10:00-11:00
Prof. Collin Broholm (Johns Hopkins University)
“Quantum fluctuations on triangular lattices of Ising spins”

6 物理学教室コロキウム

- 第134回コロキウム 2023年4月7日(金) 17:00-18:30
Michael E. Peskin 氏 (SLAC, Stanford University, Professor)
“What Is the Next Milestone for High-Energy Particle Colliders?”
- 第135回コロキウム 2023年5月19日(金) 17:00-18:30
Chia-Ling Chien 氏 (Johns Hopkins University, Professor)
“Half Quantum Flux in Spin Triplet Superconductors”
- 第136回コロキウム 2023年6月16日(金) 17:00-18:30
玉川 徹 氏 (理化学研究所・開拓研究本部 主任研究員/仁科加速器科学研究センター 室長)
「X線偏光観測で探る高エネルギー宇宙」
- 第137回コロキウム 2023年10月20日(金) 17:00-18:30
Igor Aronson 氏 (The Pennsylvania State University, Professor)
“Hierarchical Organization of Communicating Active Smarms”
- 第138回コロキウム 2023年11月10日(金) 17:00-18:30
戸川 欣彦 氏 (大阪公立大学 大学院工学研究科、教授)
「物質科学とカイラリティ」
- 第139回コロキウム 2023年12月11日(月) 18:00-19:30
Smadar Naoz 氏 (UCLA, Professor)
“Gravitational Wave Sources at the Heart of Galaxies”
- 第140回コロキウム 2023年12月15日(金) 17:00-18:30
清水 格 氏 (東北大学 ニュートリノ科学研究センター、准教授)
「マヨラナニュートリノの探索」

7 金曜ランチトーク

- 2023 年 4 月 28 日（金）13:00-13:25

山崎隼汰 助教 (村尾研究室)

“Foundation of fast and widely applicable quantum machine learning”

「高速な量子機械学習の基盤構築」

- 2023 年 6 月 16 日（金）13:00-13:25

三谷啓人 特任助教 (須藤研究室)

“Radiation Hydrodynamics Simulations of Atmospheric Escape of Hot Jupiters”

「ホットジュピターにおける大気散逸の輻射流体シミュレーション」

8 ニュートン・カフェ

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の流行時に開始された“ニュートン・カフェ”は、学生と教員、そして学生同士の交流を図るため、少人数の学部学生（主に2年生と3年生）を対象とした研究セミナーである。COVID-19の終息に伴い、今年度も開催するかどうかは議論になったが、学生達の希望により今年度も物理学科3年生のニュートンカフェ担当委員と以下の研究室の協力を得て実施した。

- 第1回 2023年6月26日(月) 18:00–19:00
開催研究室：濱口研究室、上田研究室
- 第2回 2023年7月3日(月) 18:00–19:00
開催研究室：藤堂研究室
- 第3回 2023年7月5日(水) 18:00–19:00
開催研究室：桂研究室
- 第4回 2023年7月7日(金) 18:00–19:00
開催研究室：小林研究室
- 第5回 2023年10月16日(月) 18:00–19:00
開催研究室：小林研究室、常行研究室※、馬場研究室
(※駒場キャンパスにて、17:00–18:00に実施)
- 第6回 2023年10月24日(火) 18:00–19:00
開催研究室：濱口研究室、岡田研究室
- 第7回 2023年10月30日(月) 18:00–19:00
開催研究室：中村研究室、蘆田研究室
- 第8回 2023年11月1日(月) 18:00–19:00
開催研究室：藤堂研究室、島野研究室
- 第9回 2023年12月11日(月) 18:00–19:00
開催研究室：横山(将)研究室、安東研究室
- 第10回 2023年12月13日(水) 18:00–19:00
開催研究室：中島研究室、辻研究室、竹内研究室

年次研究報告 2023年度

2024年 5 月 30 日

東京大学大学院理学系研究科・理学部
物 理 学 教 室

発 行 松 尾 泰

編 集 蘆 田 祐 人

中 島 康 博

中 村 ち か 子