Department of Physics School of Science The University of Tokyo

Annual Report

2021

令和3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: 希土類パイロクロア化合物 Ce₂Zr₂O₇ は、フラストレーションを持つスピン系の代表例の1つである。 フラストレーションがある場合、スピンは強磁性や反強磁性などの秩序を持たず、あたかも液体のように振 舞うという「スピン液体」状態が期待される。この物質のモデルハミルトニアンを調べると、理論的に実現 可能なスピン液体相は4種類あることが分かった。その内のどれが実現しているかを検証するために、4種の スピン液体相における中性子散乱強度分布を理論的に予測した。図 (a)–(d) は厳密対角化の手法による結果、 (e)–(h) は古典モンテカルロ・シミュレーションの結果である。図 (i) は、比較すべき実験結果である (E. M. Smith *et al.*, arXiv:2108.01217 (2021) /CC-BY 4.0 から転載)。これらの比較から、π-flux 八極子スピン液体 という、新奇のスピン液体状態が実現している可能性が高いことが分かった。(小形研究室の細井將史さんの 論文、M. Hosoi *et al.*, arXiv:2201.00828 (2022) から細井さんの許諾を得て転載)。

Rare-earth pyrochlore compound, Ce₂Zr₂O₇ is one of the typical frustrated spin systems. In the presence of geometrical frustration, the spin system does not have a long-range order of ferromagnetism or antiferromagnetism. Instead, it behaves as a liquid, which is called 'spin liquid state'. It is shown theoretically that the model Hamiltonian of this compound can have four kinds of spin liquid states. To clarify which state is realized, the intensity distribution of neutron scattering experiment is calculated theoretically for each spin liquid state. Figures (a)–(d) are the results by the method of exact diagonalization and (e)– (h) are the results by the classical Monte Carlo simulation. Figure (i) is the experimental result (E. M. Smith *et al.*, arXiv:2108.01217 (2021) /CC-BY 4.0) to be compared with the theoretical predictions. The comparison between the theory and experiment indicates that the novel type of the spin liquid state called π -flux octupole spin liquid will be realized in this compound. (Adopted from the article, M. Hosoi *et al.*, arXiv:2201.00828 (2022) with permission by Dr. M. Hosoi. He is from the Ogata group.).



図 2: ALMA による観測によって、へびつかい座にある進化した原始星 Elias 29 で 2 本の一酸化硫黄分子 (SO)の回転スペクトル線 ($J_N = 6_6 - 5_5$ and $J_N = 6_5 - 5_4$)が捉えられた。それらの強度比を利用して、こ の原始星周りの 1000 天文単位スケールでの温度分布が明らかになった。原始星以外に 2 か所(bow shock、 interaction region)で局所的高温領域が見出された。このことは比較的進化した原始星であってもジェット やアウトフローによって母体となる分子雲コアに大きな影響を与えて続けていることがわかった。(山本研究 室)

ALMA observed the evolved protostar Elias 29 in the Ophiuchus molecular cloud in the two rotational transitions of sulfur monoxide (SO), $J_N = 6_6 - 5_5$ and $J_N = 6_5 - 5_4$. The temperature structure around the protostar on a 1000 au scale is first revealed by using their intensity ratio. Two local hot regions (bow shock and interaction region) are identified in addition to the protostar position, indicating that even the relatively evolved protostar still continues to give a substantial impact on a parent core by jets/outflows. (Yamamoto Group)



図 3: 液晶には分子の向きを揃える配向秩序があるが、配向の不整合な箇所が点状あるいは線状のトポロジカ ル欠陥として現れ、互いに相互作用する。(a)-(e) 生じた線欠陥が次第に消えていく様子を、欠陥への蛍光色 素の吸着を利用して共焦点顕微鏡で3次元的に撮影した。ひも状の線欠陥が繋ぎ替わりながら((a),(b)の白 丸に注目)消えていく様子がわかる。(f) 2次元では2つの点欠陥同士が近づくとき、その運動は非対称であ ることが知られているが、3次元における線欠陥同士は対称に近づくことを我々は明らかにした。欠陥のトポ ロジーとエネルギーを議論することで、3次元での対称性の回復を理解することができる。(竹内研究室)

Liquid crystals have an orientation order that aligns molecules, but locations of local mismatch of the order also exist. They appear as point-like or line-shape topological defects and interact with each other. (a)-(e) Three-dimensional motion of line defects was observed by confocal microscopy, using fluorescent dye localization on the defects. The string-like defects are reconnected (see the white circles in (a) and (b)) and shrink to disappear. (f) When two point defects in two dimensions approach each other, their motion is known to be asymmetric. In contrast, in three dimensions, we found that line defects approach symmetrically. By discussing the topology and energy of defects, we describe why the symmetry is restored in three dimensions. (Takeuchi group) 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3年度(2021年4月–2022年3月)年次研 究報告をお届けします。この小冊子が物理学教室で広く行われている多彩で活発な研究・教育の現状を知っ ていただく手がかりになれば幸いです。

最初に、新しく入ってこられた教員ですが、教授として、江尻晶氏(プラズマ物理学:新領域創成科学研 究科)、三尾典克氏(一般物理実験:フォトンサイエンス研究機構)、准教授として、中島康博氏(素粒子・宇 宙素粒子物理学実験:宇宙線研究所より)、助教として、田島裕之氏(Liang 研)、大森寛太郎氏(松尾研)が 着任されました。また、五神真教授が復帰されました。また、櫻井博儀教授が理化学研究所仁科加速器科学 研究センターに、中山和則助教(諸井研)が東北大学准教授として、新倉潤助教(櫻井研)が理化学研究所 仁科加速器科学研究センター協力研究員として、添田彬仁助教(村尾研)が国立情報学研究所准教授として、 道村唯太助教(安東研)がカリフォルニア工科大学研究員として転出されました。また、金子邦彦教授が本 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。辻直人准教授が令和 3年度東京大学卓越研究員に選ばれました。また、酒井明人講師が令和3年度物性研究所所長賞 ISSP 学術奨 励賞を、佐々木健人助教(小林研)、谷内稜氏(櫻井研、現 ヨーク大学)が第38回(2021年度)井上研究奨 励賞を、苅宿俊風氏(小形研、現物質材料研究機構)が日本物理学会第27回論文賞を、大小田結貴氏(山本 研)が2021年度第16回ロレアル-ユネスコ女性科学者日本奨励賞を、川畑幸平氏(上田研)が第12回日本 学術振興会育志賞を、森脇可奈氏(吉田研)が令和3年度東京大学総長賞総長大賞を受賞されました。さら に、諏訪秀麿助教(藤堂研)、藤本悠輝氏(福嶋研)、有冨尚紀氏(安東研、現 国立天文台)、苅宿俊風氏(小 形研、現 物質材料研究機構)、鈴木剛氏(島野研、現 物性研究所)、白井達彦氏(宮下研/藤堂研、現 早稲田 大学)が第16回(2022年)日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。また、森脇可奈氏、藤本悠輝氏、柴 田直幸氏、内藤智也氏が令和3年度理学系研究科研究奨励賞(博士課程)を、吉田博信氏、吉村耕平氏、野下 剛氏、駒木彩乃氏が同研究奨励賞(修士課程)を、増木貫太氏、永山龍那氏、坪内健人氏が令和3年度理学部 学修奨励賞を受賞しました。

令和3年度も新型コロナウイルスの影響が続き、大学での活動にいろいろな制約がありました。学部や大 学院の通常講義はすべてオンラインで始まりましたが、秋学期には学生からの要望もあって、一部ハイブリッ ドの講義となりました。ただし、少人数の班に分かれて行う学部3年生の物理学実験、物理学ゼミナール、お よび4年生の特別実験・理論演習は、感染予防に極力注意しながら対面で実施しました。学生主体の行事で は、毎年物理学科の学生が五月祭で行っている企画 PhysicsLab は独自にオンライン展示企画を実施しました。 また、学生同士あるいは学生と教員の交流の場として12月に開催されてきたニュートン祭もオンライン開催 となり、合わせて前年度に引き続き少人数の学生を対象として教員が行う研究セミナー『ニュートンカフェ』 を開催しました。物理学教室コロキウムもオンラインとなりましたが、アナウンスを広く行って教室外から も聴講可能となりました。

このように制約が多いなかでも、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 ました。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、理学系研究科 に社会連携講座として、令和3年1月から日東電工株式会社と連携した「磁気界面物性講座」、令和4年1月 からJSR 株式会社と連携した「トポロジカル物質・デバイス創成講座」が設置されました。これによって新 たに特任准教授・特任助教が採用され、学理の深化と機能性の開発を目指した研究が進んでいます。

また令和3年6月には「量子ソフトウェア寄付講座」が設置されました。これは当初協賛企業9社の寄付 によって設置され、その後1社が協力企業として加わりました。量子コンピュータによる新しい量子機械学 習手法の研究や量子アプリケーションの開発、量子ネイティブな専門人材育成をすすめる予定です。

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

この年次研究報告は、樺島祥介教授、辻直人准教授、仁井田和子氏のご尽力によって編集作成されました。この場を借りて感謝いたします。

2022 年 5 月 1 日 物理学専攻 専攻長・物理学科 学科長 小形 正男

目 次

I 研究室別 2021 年度 研究活動報告

1	1.1	原子核・素粒子理論 原子核理論 (福嶋) 研究室	2 2
	1.2	原子核埋論 (Liang) 研究至	5
	1.3	素粒子論研究至	9
		1.3.1 現象論	9
		1.3.2 弦埋論, 場の埋論全般	10
2		原子核・素粒子実験 1	L 4
	2.1	原子核実験グループ(櫻井研究室)	14
		2.1.1 ミューオン原子 X 線による原子核の荷電半径・荷電分布測定	14
		2.1.2 パラジウム同位体のミューオン捕獲反応の研究	14
		2.1.3 核変換用加速器における大電流入射ビームラインの開発	14
		2.1.4 RIBF での高分解能インビームガンマ線核分光 (HiCARI Project)	15
		2.1.5 パイオン生成過程の研究	15
		2.1.6 ミューオン原子 X 線分光のための光子検出器システムの開発	16
		2.1.7 非等方的集団運動から探る高密度物質の状態方程式の研究	16
		2.1.8 Decay spectroscopy of neutron-rich isotopes in BRIKEN at RIBF	17
		2.1.9 Precision nuclear mass measurement by MRTOF-MS at RIBF	17
	2.2	横山(将)・中島研究室....................................	19
		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)	19
		2.2.2 スーパーカミオカンデ実験	20
		2.2.3 ハイパーカミオカンデ計画	20
		2.2.4 新検出器開発	21
	2.3	浅井研究室	22
		2.3.1 LHC・ATLAS 実験での研究	22
		2.3.2 小規模実験で探る標準理論を超えた新しい素粒子現象の探索	23
		2.3.3 基礎科学への応用を目指した量子技術研究	25
3		物性理論 2	29
	3.1	小形研究室	29
		3.1.1 ディラック電子系	29
		3.1.2 熱応答・熱電応答の理論	29
		3.1.3 トポロジカル物質の理論	30
		3.1.4 超伝導の理論	31
		3.1.5 軌道磁場効果	31
		3.1.6 有機伝導体	31
		3.1.7 スピン系およびスピン軌道相互作用	31
	3.2	常行研究室	35
		3.2.1 データ同化を用いた結晶構造探索:水素を含む系の結晶構造予想 :	35
		3.2.2 LiCB ₉ H ₁₀ の超イオン伝導体の Li 伝導機構	35

1

		3.2.3 フォノン動力学行列の Wannier 内挿法による酸水素化物の超伝導の研究		. 36
		3.2.4 電子ガス極限における Eliashberg 理論		. 36
		3.2.5 電子系における密度汎関数の、原子核密度汎関数理論への応用		. 36
		326 汎関数くりこみ群を用いた相関密度汎関数の構成		37
		3.2.7 原子の変形可能性	•	. 37
		3.2.4 相関波動関数理論トランスコリレイティッド注の検討	·	. 01 37
	22	5.2.0 相関扱動関数程調1 / ジバニ / ジョブ / ブ / 石ジ状的 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	•	. JI 30
	ა.ა	膝生明九王 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	·	. ວະ າດ
		$3.3.1$ 畑伯民衆のシミュレーションナ伝 \dots	•	. 38
		3.3.2	•	. 40
		3.3.3 重士多体糸の熱化・非平衡タイナミクス	•	. 41
		3.3.4 統計的機械字習による物質科字	•	. 41
		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	•	. 42
	3.4	桂研究室....................................		. 44
		3.4.1 強相関系		. 44
		3.4.2 トポロジカル系		. 45
		3.4.3 数理物理学・統計力学		. 46
		3.4.4 その他		. 47
	3.5	樺島研究室		. 50
		3.5.1 スパース推定		. 50
		352 生化学反応の情報量解析	-	51
		3.5.2 111 (人) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	·	. 51
		9.5.5 <u>福</u> 约日初 C 取過 同 两层	•	. 01
	26		·	. 01 50
	5.0	レ 別 几 王 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	•	. Je Fo
		3.0.1 旭伝导体のダイナミクス	•	. 03 F/
		3.6.2	•	. 54
		3.6.3 揺らき・非線形心谷・カオス	•	. 55
	3.7		·	. 56
		3.7.1 開放糸の物埋	•	. 56
		3.7.2 統計物理・機械学習	•	. 57
4		物性美缺		58
	4.1	長谷川研究至	·	. 58
		4.1.1 表面/界面での輸送・磁性特性	•	. 58
		4.1.2 表面・原子層ナノ構造の形成	•	. 60
		4.1.3 新しい装置・手法の開発		. 60
	4.2	岡本 研究室		. 64
		4.2.1 劈開表面に形成された2次元電子系		. 64
		4.2.2 金属超薄膜の超伝導		. 64
		4.2.3 ビスマス超薄膜の電気伝導		. 66
	4.3	島野研究室		. 67
		4.3.1 超伝導体		. 67
		432 原子層物質		60
		433 ディラック・ワイル半金属	•	. 00 60
		1.0.0 ノーマンマンマンマンマンマンマンマンマンマンマンマンマンマンマンマンマンマンマン	·	. 00
		1951 シングルショット磁気光学イメージングシフテムの関発	•	. 11 71
	1 1	4.0.0 ママフルマヨフエWX(ルナイクーンマフマヘノムの開光	·	. (1
	4.4	回小 4L/11別九主	·	. (č
		4.4.1 ヘビノ 乳担怕 旦1F 用 ど 州 用 し に 擬 人 ビ ノ 里 丁 怕	·	. 73
		4.4.2	·	. 74
	4.5	M	·	. 77
		4.5.1 スビン流物性		. 77

		4.5.2 非線形光学効果	77
		4.5.3 界面スピン軌道相互作用とカイラル磁性	78
	4.6	小林研究室	 79
		4.6.1 量子センサによる精密物性計測	 80
		4.6.2 固体素子における非平衡輸送	$\frac{30}{82}$
		463 微小蓮瞙素子における輸送測定	2- 83
	47	中计・酒井研究室	85
	1.1	471 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	85
		479 多体系における量子エンタングルメント状能	30 87
			5.
5		一般物理理論	90
	5.1	宇宙理論研究室 (須藤・吉田)	90
		5.1.1 観測的宇宙論	90
		5.1.2 銀河の化学進化	90
		5.1.3 宇宙の構造形成	91
		5.1.4 ブラックホール3体系	91
		5.1.5 高エネルギー天体現象	91
		5.1.6 星・惑星形成	92
		5.1.7 系外惑星	92
	5.2	村尾研究室	97
		5.2.1 高階量子演算	97
		5.2.2 量子系のダイナミクスの制御	99
		5.2.3 分散型量子情報処理	99
		5.2.4 量子資源理論	99
	5.3	上田研究室	01
		5.3.1 冷却原子気体・非平衡開放系	01
		5.3.2 量子論・統計力学と情報理論・人工知能の融合	02
	5.4	横山 (順) 研究室	04
		5.4.1 宇宙論: 時空構造	04
		5.4.2 宇宙論:物質の起源と進化	05
		5.4.3 重力波検出器 KAGRA のデータ解析 10	06
		5.4.4 時間領域天文学	07
6		一一般物理実験 11	1
	6.1	江尻研究室	11
		6.1.1 TST-2 実験の概要 1	11
		6.1.2 非誘導高周波駆動プラズマ 1	11
		6.1.3 中心ソレノイド駆動プラズマ 1	12
		6.1.4 計測器開発	12
		6.1.5 共同研究	13
	6.2	山本研究室	16
		6.2.1 はじめに	16
		6.2.2 星·惑星系形成	16
		6.2.3 観測成果	17
	6.3	酒井広文 研究室	20
		6.3.1 レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展	20
		6.3.2 マクロな 3 回対称性をもつ分子アンサンブルの生成	22
		6.3.3 非共鳴 2 波長レーザーパルスを用いた pendular qubit states の制御 1:	23
		6.3.4 その他	23
	6.4	五神 研究室	24
		6.4.1 物質系の巨視的量子現象の探索	24

		6.4.2 フェムト秒レーザー加工による大面積モスアイ無反射構造作製と宇宙望遠鏡への実装 1	26
		6.4.3 新規コヒーレント光源開発と新しい分光手法開拓1	26
		6.4.4 フォトンサイエンス研究機構 1	27
	6.5	安東研究室	29
		6.5.1 大型重力波望遠鏡 KAGRA 1	29
		6.5.2 宇宙空間重力波望遠鏡	30
		6.5.3 ねじれ型重力波検出器 TOBA	30
		6.5.4 ダークマター探査	31
		6.5.5 相対論・量子光学実験 1	$\frac{32}{32}$
	66	馬場研究室 1	35
	0.0	661 宇宙物理現象観測に関する研究 1	35
		662 将来宇宙計画に関する開発 1	36
	67	日下研究室	40
	0.1	б71 Рогарвала шева 1	40 //1
		$679 \text{Simons Array } \pm \mathbb{B}$	41 //1
		$6.7.2$ Simong Observation: \pm	41
		0.7.3 Simons Observatory 天歌	41
	60	0.7.4 小巴N UMD 天歌用 表直開光 I 協由研究室	42
	0.8	1 円 例 所 九 至 1 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	44
		0.8.1 ノノトマダーボの 非十関夫缺	44
		0.8.2 (1) 0.8.2 (1) 0.8.2 (1) 0.8.2 (1) 0.8.2 (1) 0.8.2 (1) 0.8.2 (1) 0.8.2 (1) 0.8.2 (1) 0.8.2 (1) 0.8.2 (1) 0.8.2 (1) 0.8.2 (1) 0.8.2 (1) 0.8.2 (1) 0.9 (1) 0.9 (1) 0.9 (1) 0.9 (1) 0.9 (1) 1.9 (1) 1.9 (1) 1.9 (1) 1.9 (1) 1.9 (1) 1.9 (1) 1.9 (1)	45
	<u> </u>	0.8.3 ・ ・ ・	40
	6.9	二尾饼先至	48
		0.9.1 レーサー加工の初理 1 coo MACDA 1	48
		6.9.2 KAGRA project	49
7		生物物理 1!	52
•	71	上前1024 1 能瀕研究室 1	52
	1.1	711 袖経回路の活動ダイナミクスと構造の数理統計解析 1	52
		712 運動出力ダイナミクスの定量的解析 1	53
		713 運動神経回路を構成する神経細胞の同定と機能解析 1	54
		714 機能的神経回路の発達機構 1	55
	7.2		57
	1.2	791 計述めに 1	57
		7.2.1 ねじめに	57
		7.2.2 ノー相 1 報 1 / 1 / 2 / ス 1 / 2 / ス 1 / 2 / 2 / 2 / 2 / 2 / 2 / 2 / 2 / 2 /	58
		7.2.5 心的、オンシン奴力」による力と良同の因素 \dots	00
		1.2.4 羽体化した細胞を控めりた既示するための表色の自動化と初体化した細胞におりる力で 胞拡散の低下 1	58
		725 Wasserstein 距離を用いたエントロピー生成 1	59
		726 タンパク質により駆動される牛体能動運動の化学反応モデル 1	59
	73	岡田研究室 1	60
	1.0	731 - 顕微鏡園発 1	60
		739 蛍光プローブの開発と応田 1	61
		733 情報物理学理論の応田 1	62
	74	1 法選研空安 1	62
	1.4	741 選択圧を動的に変化させることにとり准化過程を制御する毛注の開発 1	63
		749 複数の微生物種を田いた生能気准化実路 1	63
		1.4.4 成気シス上初生で用いた上添小進山大駅	65
		744 人工的た代謝え、トロークの経和性性とう、トローク構造 1	61
		7.5 空間分割された細胞モデルにおける触旗反応えットワークの分業の准化 1	64
		1.4.0 工国力司CAUCAURCINCAUの国际状区地グットワークの力未の進出	04 64
		1.4.0 $ _{\text{NM}}$ (ハットノーノの) 押担こ ハンアリヘト・シェイノリヘト戦略	04 65
		- 1.4.1 - ベヽロ イ 悟担切形 咫 哩 恎 切 天 証 天 禊	υÐ

		7.4.8	細菌の遺伝子発現量の進化しやすさを定量する.................	165
8		技術部	門	169
	8.1	実験装	置試作室	169
		8.1.1	利用状況	169
		8.1.2	設計・加工の自動化の推進	169
	8.2	技術室		169
		8.2.1	安全衛生	169
		8.2.2	IT 関連	169
		8.2.3	学生実験	169
		824	研究支援	170
		825	各種委員会	170
		0.2.0		110
	~			
ш	\mathbf{S}	umma Eulmal	ry of group activities in 2021	171
	1	T LAND	lillia Gloup	172
	2	Liang	Group	172
	3	High E	Largy Physics Theory Group	173
	4	Sakura	u Group	174
	5	Yokoya	ama(M)-Nakajima Group	175
	6	Asai g	roup	176
	7	Ogata	Group	177
	8	Tsune	yuki Group	178
	9	Todo (Group	179
	10	Katsur	a Group	180
	11	Kabas	hima Group	181
	12	Tsuji (Group	181
	13	Ashida	a Group	182
	14	Hasega	awa Group	183
	15	Okamo	oto Group	183
	16	Shima	no Group	184
	17	Takagi	-Kitagawa Group	185
	18	Havasł	ni Group	186
	19	Kobay	ashi Group	187
	20^{-5}	Nakats	suii-Sakai Group	188
	$\frac{-0}{21}$	Theore	etical Astrophysics Group	189
	22	Murao	Group	191
	22	Ueda (Group	102
	20	Vokovs	anoup	102
	24 25	Fiiri C	$\frac{1}{2}$	104
	20 96	Vomor	noup	194
	20		(Hinofumi) Croup	190
	21	Garal	(mirotumi) Group	190
	28	GONOK	ann Group	197
	29	Ando (Group	198
	30	Bamba	a Group	199
	31	Kusaka	a Group	200
	32	Takeuo	chi Group	200
	33	Mio G	roup	201
	34	Nose C	Group	202
	35	Higuch	ii Group	203
	36	Okada	Group	204

	37	Furusawa Group	205
Π	I 2	2021 年度 物理学教室全般に関する報告 2	07
1		学部講義概要 2	208
	1.1	2 年生 A セメスター	208
		1.1.1 電磁気学 I : 櫻井 博儀	208
		1.1.2 解析力学:横山 順一	208
		1.1.3 量子力学 I:諸井 健夫	209
		1.1.4 物理実験学:山本 智, 北川 健太郎	209
		1.1.5 物理数学 I : 濱口 幸一	210
		1.1.6 物理数学 II : 辻 直人	210
		1.1.7 物理学のための科学英語基礎:小野 義正	211
	1.2	3 年生 S セメスター	211
		1.2.1 電磁気学 II : 島野 亮	211
		1.2.2 量子力学 II:福嶋 健二	212
		1.2.3 現代実験物理学 I: 樋口 秀男, 酒井 明人	212
		1.2.4 計算機実験 I : 藤堂 眞治	212
		1.2.5 量子コンピューター実習:浅井 祥仁, 寺師 弘二	213
		1.2.6 統計力学 I: 竹内 一将	213
		1.2.7 流体力学:吉田 直紀	214
	1.3	3 年生 A セメスター	214
		1.3.1 光学:井手口 拓郎, 三尾 典克	214
		1.3.2 量子力学 III:常行 真司	215
		1.3.3 現代実験物理学 II:日下 暁人、山本 智	215
		1.3.4 生物物理学:岡田康志、能瀬聡直	216
		1.3.5 物理数学 III : 桂 法称	216
		1.3.6 固体物理学Ⅰ: 岡本 徹	216
		1.3.7 雷磁気学 III : 浅井 祥仁	217
		138 統計力学II·小形 正男	217
		130 計算機実験 II · 藤堂 楦治	218
	14	$4 \pm 4 \pm 2 \pm $	210
	1.1	1/1 楼林学習概論·樺島 祥介	210
		1.4.1 《版》目版》:140 中/ ···································	210 218
		1.4.2 湯の重丁…1.42 ※	210 910
		1.4.0 $\frac{1}{4}$ 計質利学概論・十次保 紛 活动 6 名	213
		1.4.5 統計力学特論· / / / / / / / / / / / / / / / / / / /	213 910
		1.4.5 机印力于闪晶、印力工教	219
		$1.4.0$ 现代物理于八门 Haoziao Liang, 伯开 切八 \dots	220 220
		1.4.7 双伯乃酬· , 夙僻 , 月 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	220
		1.4.0 示가恣生: 溟滕 朔, 怕川 阳垤 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	220 001
		1.4.9 里丁几子:伯开 囚义	221 000
		1.4.10 回徑彻埋子 II: 中江 知	222
		1.4.11 ノフスマ彻理子: (1九) 前	222
		1.4.12 于由初理子: 局場 杉	223
		1.4.13	223
		1.4.14 化子初埋子:尚木 央典 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	223
	1.5	4 年生 A セメスター	224
		1.5.1 <u></u>	224
		1.5.2 場の量 チ論 II: Simeon Hellerman	224
		1.5.3 原子核物理学:今井 伸明	225

		1.5.4 現代物理と機械学習:蘆田 祐人	225
		1.5.5 電子回路論:安東 正樹	225
		1.5.6 固体物理学 III: 林 将光	226
		1.5.7 非平衡科学:伊藤 創祐	226
		1.5.8 普遍性生物学:古澤力,金子邦彦	226
		1.5.9 重力波物理学: Kipp Cannon, 都丸 隆行	227
		1.5.10 物理学のための科学英語特論:小野 義正	227
2		各賞受賞者紹介	229
	2.1	过 直人 准教授	229
	2.2		229
	2.3	刘宿 僾風 氏(小形研、現 物質材料研究機構)	229
	2.4	日井 達彦 氏(宮卜妍、滕室妍、堤 早稲田大字)	230
	2.5	刘佰 俊風 氏(小形研、現 物質材料研究機構)	230
	2.6	佐々木 健人 助教 (小杯研)	230
	2.7		230
	2.8	野木 剛 氏(島野研、現 初饪研究所)	230
	2.9	谷内 稷 氏 (櫻井妍、 現 ヨーク大字)	231
	2.10	有品 回紀 氏(女果妍、現 国立天文台)	231
	2.11		231
	2.12	川畑 辛平 氏(上田研)	231
	2.13	藤 ※ 吟 晖 氏 (宙 崎 研) · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	232
	2.14	林励 刊示 仄(百田妍)	232
	2.15	理子术研九科研九哭励具·理子即子修哭励員	232
3		人事異動	233
4		役務分担	234
5		教室談話会	235
6		物理学教室コロキウム	236
7		金曜ランチトーク	237
8		ニュートン・カフェ	238

Ι

研究室別 2021年度 研究活動報告

1 原子核・素粒子理論

1.1 原子核理論 (福嶋)研究室

原子核理論研究室では、福嶋健二教授、山本新助 教、大学院生らによって最先端のフロンティアを開 拓する世界的な研究を精力的に行った。ここではそ れらの活動と成果の概要を述べる。

ハドロン (バリオン、メソンの総称)を形成する クォークとグルーオンは、量子色力学 (QCD)によ り定式化された相互作用に従う。QCD は一見単純な ラグランジアンで記述されるが、その非摂動性、非 線型性のために、量子場の理論として他に類を見な いユニークな性質を持つ。我々の研究室では高温・ 高密度クォーク・グルーオン物質の理論、強電場・ 磁場中のクォーク物質の物性とトポロジー、カイラ ル量子異常、中性子星深部の状態方程式の計算など、 幅広く様々な難問に挑戦している。特に、原子核ハ ドロン 物理の現象論とともに、より俯瞰して「場の 量子論」の現代的な課題に取り組んでいるのが特色 である。

中性子星深部の状態方程式の研究

藤本は高密度物質の状態方程式を、中性子星の観 測データから解析する手法を開発し、日本物理学会 より若手奨励賞を受賞した [1]。また藤本はこの研究 をより理論的に発展させ、状態方程式の摂動計算を 再和法で改善する手法を提唱し、その内容を博士論 文にまとめた研究成果が、理学系研究科研究奨励賞 の対象として選ばれた [2]。

汎関数繰り込み群によるダイクォーク自由度の記述

汎関数繰り込み群は、場の量子論の非摂動的な定 式化として様々な問題に応用されているが、束縛状 態の記述のためには特殊な技法が必要となる。福嶋 はハイデルベルク大学の Pawlowski、Strodthoff と 共同で、2つのクォークの複合状態であるダイクォー クを動的に生成する定式化を提唱し、現象論的な応 用への先鞭をつけた [3]。

量子変分計算による有限密度格子ゲージ理論

高密度ハドロン物質の性質を解明することは、現代のQCD研究における最大の課題の1つである。山

本は、量子コンピュータを用いた変分計算によって、 有限密度ゲージ理論を解析する手法を提案した。現 在の量子コンピュータの規模では少自由度系で試験 的な計算をすることしかできないが、将来、大規模 な量子コンピュータが開発された際には QCD の実 践的な計算に応用できると期待される [7, 14]。

符号問題のない非エルミートハバード模型

通常の量子系を記述するハミルトニアンはエルミー ト演算子であるが、これを非エルミート演算子に拡 張することで非平衡過程などを記述することができ る。相互作用する量子系の解析には量子モンテカル ロ計算が有効であるが、分配関数が正定値ではない 場合には符号問題と呼ばれる困難が存在する。非エ ルミート系ではエネルギースペクトルが複素数であ るため正定値性は一般には保証されない。山本らは、 分配関数が正定値となる非エルミートハバード模型 を発見し、量子モンテカルロ計算を実行した [8]。

開放量子系の実時間シミュレーション

外界と粒子やエネルギーをやり取りする量子系は 「開放量子系」と呼ばれ、リンドブラッド形式という 理論的枠組みで記述される。リンドブラッド形式の 実時間シミュレーションをすることができれば散逸・ 駆動の下での系の時間発展を調べることができるが、 一般に実時間シミュレーションには符号問題が存在 する。山本らは、符号問題が発生しない特殊な量子 系を発見し、リンドブラッド形式の実時間シミュレー ションを実行した [9]。

高密度ハドロン・クォーク物質の状態方程式への多 面的アプローチ

藤本と福嶋らは、中性子星の質量と半径の同時観 測データを深層学習で解析して状態方程式に対して 制限をかけた [1, 36, 43]。さらに、藤本と福嶋は、摂 動 QCD に resummation の効果を取り入れて計算を 行い、高密度クォーク物質の状態方程式の計算を行 うことに成功した [13, 16, 18, 26, 39, 45, 48]。これ らを総合したアプローチ [2] によって構築された状 態方程式は、ハドロンからクォークへ連続的に転移 する可能性を示しており、藤本と福嶋らは、その相 転移の重力波による検出可能性を論じた [25]。

カラー超伝導体でのトポロジカルソリトン

藤本らは、2フレーバークォーク物質の新奇相で 現れる渦糸について議論した。現れる渦糸はゲージ 群の非可換性が重要な役割を果たすアリス・ストリ ングと呼ばれるものであり、ハドロン相との接続や 渦の閉じ込めなどを論じた [5, 6, 49]。

回転するハドロン物質の非閉じ込め転移

高温・高密度物質が実現する重イオン衝突では、磁 場の効果と並んで回転の効果が大きく影響すると考 えられている。藤本、福嶋らは、ハドロン共鳴気体 模型を回転系の表式に拡張し、この模型を使って非 閉じ込め転移への回転の影響を調べた。回転によっ て非閉じ込めがより低温に押し下げられることがわ かり、また、現象論的指標としての慣性モーメント の解析も行った [19, 23, 34]。

汎関数繰り込み群による θ 真空の研究

福嶋、島崎らは θ 真空への汎関数繰り込み群の適 用可能性について研究した。汎関数繰り込み群は微 分方程式に基づく量子論の(原理的には)厳密な定式 化である。近似のない厳密な定式化であるにもかか わらず、トポロジーのような大局的な性質を扱うた めには、元の理論の定義されている多様体を変形す る必要があることを議論した。そして θ 真空のエネ ルギースペクトルの完全な再現、特に $\theta = \pi$ におけ る基底状態の縮退を正しく導くためには、非局所性 を含む解空間で微分方程式を解かねばならないこと を明らかにした。また θ 項の存在に代表されるよう な「符号問題」をもつ系に対しては、有効作用が一 意に定義できるとは限らないことも指摘した [11]。

高周波極限におけるカイラルアノマリー

福嶋、島崎らは Floquet 理論の高周波展開に基づ き、1+1 次元系のカイラルアノマリーを研究した。 特に興味深い点は、Floquet 理論の応用で頻繁に議論 される有効ハミルトニアンではなく、基底の変換か らアノマリーが生じることをあからさまな計算で示 したことである。また高周波極限ではカイラリティ 生成によってアノマリー関係式が満たされ、有限質 量効果が抑制されることを議論した。

磁場中のスキルミオン・バリオンの変形とトポロジ カル相転移

Chen、福嶋、Qiu は強磁場中のバリオン・核物質 の性質を調べるために、π中間子のソリトンによって バリオンを表現したスキルミオンについて研究した。 通常は球対称性を保つヘッジホッグ型の配位を仮定 して問題を簡単化するのだが、強磁場中での変形の 効果を取り込めるように数値計算スキームを拡張し た。またスキルミオンが周期的に配列されたスキル ミオン結晶によって核物質を近似し、強磁場中では ホモトピー群が変化することによってπ中間子のド メイン・ウォールへと転化することを議論した [12]。

磁気伝導度へのカイラルアノマリーの効果の研究

カイラルアノマリーは外部磁場の存在が電気伝導 度を増大させることを予言する。そのため磁場とと もに電気伝導度が増加することがカイラルアノマリー の実験的検証だと考えられているが、アノマリー起 源でない電気伝導度の磁場依存性を定量的に評価し なければ、本当はそのような結論を下すことはでき ない。そこで、福嶋、奥津は AdS/CFT 対応に基づく ホログラフィック QCD 模型を用いて磁場中の QCD 物質の電気伝導度を計算した。その結果、アノマリー 起源ではない電気伝導度は、磁場を強くすると増大 ではなく減少することが分かった。この結果は従来 のカイラルアノマリーに関する実験結果の解釈をサ ポートするものである [10]。

<受賞>

- [1] 藤本悠輝, 2022年日本物理学会理論核物理領域若手奨 励賞(第23回核理論新人論文賞), 2022年3月16日.
- [2] 藤本悠輝, 2021 年度 東京大学大学院理学系研究科研究奨励賞, 2022 年 3 月 24 日.

<報文>

(原著論文)

- [3] K. Fukushima, J.M. Pawlowski, N. Strodthoff, "Emergent Hadrons and Diquarks", e-Print: 2103.01129 [hep-ph].
- [4] A. Yamamoto, "Overview of external electromagnetism and rotation in lattice QCD", Eur. Phys. J. A 57, 211 (2021).
- [5] Y. Fujimoto and M. Nitta, "Vortices penetrating two-flavor quark-hadron continuity", Phys. Rev. D 103, 114003 (2021).
- [6] Y. Fujimoto and M. Nitta, "Topological confinement of vortices in two-flavor dense QCD", JHEP 09, 192 (2021).
- [7] A. Yamamoto, "Quantum variational approach to lattice gauge theory at nonzero density", Phys. Rev. D 104, 014506 (2021).
- [8] T. Hayata, A. Yamamoto, "Non-Hermitian Hubbard model without the sign problem", Phys. Rev. B 104, 125102 (2021).
- [9] T. Hayata, Y. Hidaka, A. Yamamoto, "Lattice Lindblad simulation", PTEP **2022**, in press.
- [10] K. Fukushima, A. Okutsu, "Electric conductivity with the magnetic field and the chiral anomaly in a holographic QCD model", Phys. Rev. D 105, 054016 (2022).
- [11] K. Fukushima, T. Shimazaki, Y. Tanizaki, "Exploring the θ -vacuum structure in the functional renormalization group approach", JHEP 04 (2022) 040.
- [12] S. Chen, K. Fukushima, Z. Qiu, "Skyrmions in a magnetic field and π^0 domain wall formation in dense nuclear matter", Phys. Rev. D **105**, L011502 (2022).

[13] Y. Fujimoto and K. Fukushima, "Equation of state of cold and dense QCD matter in resummed perturbation theory", Phys. Rev. D 105, 014025 (2022).

(会議抄録)

[14] A. Yamamoto, "Toward dense QCD in quantum computers", PoS LATTICE2021, in press.

(学位論文)

- [15] 今木翔太, "Anatomy of Chiral Torsional Effect", 博 士論文.
- [16] 藤本悠輝, "Towards QCD-based equation of state of dense matter", 博士論文.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [17] A. Yamamoto, "Toward dense QCD in quantum computers", The 38th International Symposium on Lattice Field Theory, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA, July 26-30, 2021
- [18] Y. Fujimoto, "Equation of state of cold and dense QCD matter in resumed perturbation theory", QCD Master Class 2021, Saint-Jacut-de-la-Mer, France, Aug. 29-Sep. 11, 2021.
- [19] Y. Fujimoto, "Deconfining Phase Boundary of Rapidly Rotating Hot and Dense Matter and Analysis of Moment of Inertia", The 8th Asian Triangle Heavy-Ion Conference (ATHIC 2021), Inha University, Incheon, South Korea, Nov. 5-9, 2021.

招待講演

- [20] K. Fukushima, "QCD/Quark equation of state for neutron stars", The 19th International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM), online, May 20, 2021.
- [21] K. Fukushima, "QCD Phase Diagram", XIX Mexican School of Particle and Fields, online, August 11, 2021.
- [22] K. Fukushima, "Spin and Chirality in Hydrodynamics", The 6th Chirality, Vorticity and Magnetic Field in HIC, Stonybrook, USA (online), Nov. 4, 2021.
- [23] Y. Fujimoto, "Deconfining Phase Boundary of Rapidly Rotating Hot and Dense Matter and Analysis of Moment of Inertia", XXXIII International (Online) Workshop on High Energy Physics "Hard Problems of Hadron Physics: Non-Perturbative QCD & Related Quests"", Logunov Institute for High Energy Physics of National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow, Russia, Nov. 8-12, 2021.

[24] K. Fukushima, "Hadron Spectroscopy Toward Dense Matter", 2nd J-PARC HEF-ex Workshop (online), Feb. 18, 2022.

(国内会議)

一般講演

- [25] 藤本悠輝, 福嶋健二, 仏坂健太, 久徳浩太郎, "Gravitational waves probing hadron-to-quark crossover", 日本物理学会, 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月 15-19 日.
- [26] 藤本悠輝, "Toward QCD-based construction of the equation of state", 中性子星の観測と理論 研究活性 化ワークショップ 2021, 理化学研究所, 2021 年 8 月 10-12 日.
- [27] 藤本悠輝,福嶋健二,日高義将,平口敦基,飯田圭, "Construction of the Equation of State from Interacting Hadrons and the Onset of Hyper Nuclei",日 本物理学会, 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月 14-17 日.
- [28] 島崎拓哉,福嶋健二,日高義将,田屋英俊, "Chiral Anomaly in a Floquet-Magnus Expansion",日本物 理学会, 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月 14-17 日.
- [29] 福嶋健二,藤本悠輝,日高義将,"Deconfining Phase Boundary of Rapidly Rotating Hot and Dense Matter and Analysis of Momentum of Inertia",日 本物理学会, 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月 14 日.
- [30] S. Chen, "Skyrmions in a magnetic field and π^0 domain wall formation in dense nuclear matter", The APS Autumn Meeting, Sep. 14, 2021
- [31] Z. Qiu, "Chiral torsional effect with finite temperature, density, and curvature", 日本物理学会, 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月 14 日.

招待講演

- [32] 福嶋健二, "高密度バリオン物質におけるダイクォー ク",物質階層を横断する会 (online), 2021 年 7 月 12 日.
- [33] 福嶋健二, "カイラルスピン原子核物質の理論 ~ 原子 核における様々なカイラル現象", 2021 年度 原子核 三者若手 夏の学校 三者共通講義, 2021 年 8 月 6 日.
- [34] 藤本悠輝, "Deconfining Phase Boundary of Rapidly Rotating Hot and Dense Matter and Analysis of Moment of Inertia", KEK 理論センター研究会「熱 場の量子論とその応用 2021」, 2021 年 8 月 30 日-9 月 1 日.
- [35] 山本新, "Quantum simulation for lattice gauge theory", 場の理論の量子計算 2022, 京都大学基礎物理学 研究所, 2022 年 2 月 24 日.
- [36] 藤本悠輝,"深層学習を用いた中性子星物質の状態方 程式の決定",日本物理学会,第77回年次大会,2022 年3月15-19日.
- [37] 福嶋健二, "QCD 相図とその広がり", 日本物理学会, 2022 年年次大会, 2022 年 3 月 18 日.

(セミナー)

- [38] K. Fukushima, "Some attempts to the chiral magnetic effect with inhomogeneous electromagnetic fields", State University, Sao Paulo, Brazil (online), April 8, 2021.
- [39] 藤本悠輝, "再和された摂動論による高密度 QCD 物 質の状態方程式",京都大学基礎物理学研究所,2021 年4月23日.
- [40] 山本新, "Real-time simulation of Z2 lattice gauge theory on qubits", 東京大学総合文化研究科, 2021年 4月28日.
- [41] K. Fukushima, "Toward understanding the highbaryon state of matter", Brookhaven National Laboratory, USA (online), June 4, 2021.
- [42] Z. Qiu, "Magnetic effects in dense nuclear matter through Skyrme model", QCD Theory Seminar, June 14, 2021.
- [43] 藤本悠輝, "Deep learning approach to the neutron star equation of state", 早稲田大学, 2021 年 6 月 18 日.
- [44] 福嶋健二, "Various Topics in Nuclear Physics", 島 根大学理工学部, 2021 年 6 月 22 日.
- [45] 藤本悠輝, "Toward QCD-based description of dense baryonic matter", 理化学研究所, 2021 年 6 月 29 日.
- [46] K. Fukushima, "Deformation of Skyrmions under a magnetic field and the domain wall formation", Solitons at Work (online), Oct. 6, 2021.
- [47] 福嶋健二, "Various Realizations of Vortices and Its Implication to Dense QCD Matter", 京都大学基礎 物理学研究所, 2021 年 10 月 13 日.
- [48] 藤本悠輝, "Towards QCD-based description of dense baryonic matter", Asia Pacific Center for Theoretical Physics (APCTP), South Korea, 2021 年 10 月 14 日.
- [49] 藤本悠輝, "Non-Abelian Alice strings in two-flavor dense QCD", QCD theory Seminars KEK, 2021 年 10 月 19 日.
- [50] 福嶋健二,"高密度 QCD の進展と課題",広島大学, 2021 年 11 月 10 日.
- [51] K. Fukushima, "Constraining the EoS for neutron star from theory and data", S @ INT Seminar (online), Dec. 9, 2021.

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 groundstate 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. In particular, a cold atomic gas can be regarded as an ideal testing ground for many-body theories because of its controllability. In this regard, we are also interested in investigating novel many-body phenomena and developing quantum many-body theories through the comparisons with cold-atom experiments.

Charge symmetry breaking force in nuclear DFT

Theoretical determination of the nuclear energy density functional (EDF) is one of the important topics in nuclear DFT. These days, the charge symmetry breaking (CSB) force, a part of the isospin symmetry breaking terms in nuclear force, has been highlighted in nuclear DFT. Recently, Naito, Liang, and collaborators proposed a new method to pin down the strength of the CSB part of the nuclear EDF combining with *ab initio* theoretical calculations [22, 29]. It is shown that once *ab initio* calculations are available including accurate description of isospin symmetry breaking terms in medium and heavy nuclei, the mass difference of mirror nuclei as well as the neutron-skin thickness of doubly-closedshell nuclei can be used to constrain the strength of the CSB interaction with an uncertainty less than 6%, separately from other isospin symmetry breaking forces. This method opens a new vista of ab*initio* nuclear EDF.

Cluster structure of atomic nuclei

It is known that some atomic nuclei, such as excited states of 12 C, can be regarded as clusters of α particles. An *E*1 transition of 12 C, which is important for nuclearsynthesis, is isospin forbidden so that the isospin symmetry breaking is important. Motivated by this issue, Naito and his collaborators improved the cluster model to describe the excitation spectra of 12 C better with considering the 2p-2h configuration. The properties of 11 B, which is proposed to use cancer therapy, are also calculated [21, 44].

Functional renormalization group approach to DFT

The accuracy of DFT is governed by the accuracy of EDF. Thus, the theoretical derivation of an accurate EDF is highly demanded. Naito and his collaborator have derived the Coulomb correlation

EDF for electronic systems by using the functional renormalization group in the local density approximation. In particular, the spin dependence of the Coulomb correlation EDF is derived [18].

Inverse method to derive nuclear EDF

If we know densities of some nuclei, can we improve the nuclear EDF? Motivated by such a question, Naito, Liang, and collaborators applied the method called IKS-DFPT, which was developed in our group several years ago based on the density functional perturbation theory (DFPT) and the inverse Kohn-Sham (IKS) method, to the relativistic nuclear DFT [5].

Quartet correlations in nuclear matter

Study of quantum many-body phenomena is one of the central issues in modern physics, and the Cooper problem is a typical example. Because the nuclear matter generally consists of four kinds of nucleons with spin and isospin degrees of freedom, the four-body (called quartet) correlations will play a significant role. Guo, Tajima, and Liang [23] extended the Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS)-type variational wave function to the systems with the coexistence of pair and quartet correlations at zero temperature. In particular, how physical properties can be modified by the pair and quartet correlations is discussed. In a similar way, Guo, Tajima, and Liang also theoretically studied the groundstate properties and the condensations of biexcitonlike Cooper quartets in an electron-hole system. The present results may contribute to the interdisciplinary understanding of fermionic condensations beyond the BCS paradigm in many-body systems.

Three-body counterpart of BCS-BEC

crossover

The crossover across the two-body cluster formation, known as the BCS to Bose-Einstein-condensate (BEC) crossover has been extensively discussed in various systems such as ultracold atoms, unconventional superconductors, and nuclear matter. Here, a natural question arises; are there any crossover phenomena associated with more than two-body clusters? Tajima and his collaborators investigated the crossover phenomena from Cooper triples, which are the three-body counterpart of Cooper pairs, to bound trimer states by changing the interactions or number densities. The variational formalism of Cooper triples and their experimental observation through the three-body loss in ultracold Fermi gases

6

was discussed [16]. Moreover, the analogy with the hadron-quark crossover with quarkyonic phase in a massive neutron star was discussed [25]. The possible condensation of Cooper triples was also pointed out regardless of its Fermi-Dirac statistics, due to the internal degrees of freedom of three-body states in a Fermi sea [14].

Polaron properties in ultracold atoms and their applications to nuclear systems

The polaron is a quasiparticle picture to understand the role of many-body effects on minority particles (or impurities) in medium. From the viewpoint of a lattice field theory, Fermi polarons realized in population-imbalanced Fermi gases may involve the fermionic sign problem in a quantum Monte Carlo simulation. In this regard, the complex Langevin method, which is one of the promising candidates to overcome the sign problem, was applied to the one-dimensional Fermi polaron problem. The numerical results agreed well with the result of thermodynamic Bethe ansatz without suffering the severe sign problem [11].

For an application to nuclear physics, Tajima and his collaborators considered a few α particles immersed in cold neutron matter within the fewbody framework of polaronic α particles. Such a situation is relevant to an astrophysical environment. Two- and three- α states (i.e., ⁸Be and Hoyle state), being unstable in vacuum, were found to be bound because of polaronic properties such as effective mass and interpolaron interactions [17]. The method to extract the non-local interpolaron interactions from quantum collisional dynamics was proposed [7]. Also, the dissipation and relaxation mechanism of spin-1/2 mobile impurity with the spin-orbit coupling was investigated [15].

Topological unitary *p*-wave Fermi gas and spin transport in one dimension

A unitary Fermi gas is characterized by the divergent scattering length in three dimensions, where there are no length scales for the interaction. Such a system possesses the scale invariance and the socalled universal thermodynamics. Its ground-state thermodynamic quantities are governed by only one dimensionless number, called Bertsch parameter. Tajima and his collaborators figured out that another unitary Fermi gas and the universal behavior can be realized in a one-dimensional spin-1/2 Fermi gas near the interspin *p*-wave Feshbach resonance [12]. The universal thermodynamics was examined within the diagrammatic approach and the transdimensional equivalence of the Bertsch parameter between unitary gas with the different dimensions and interactions was conjectured.

To see many-body properties of spin-1/2 p-wave Fermi gases at T = 0, the optical spin conductivity was examined by using the BCS-Leggett theory and the linear response approach [24]. This onedimensional p-wave Fermi superfluid was found to belong to the chiral orthogonal class BDI. The optical spin conductivity exhibits the spin-gap closing at the topological phase transition. Moreover, the validity of the low-energy model for Majorana zero mode was improved by the scale invariance at the p-wave unitarity.

Resonant pair scattering in two-band superconductors

Multi-band superconductors/superfluids exihibit a variety of non-trivial phenomena which are absent in the single-band counterpart. One of the intriguing effects in multi-band superconductors is the Suhl-Kondo mechanism where the Cooper pairing is enhanced by the interband pair-exchange process. Tajima and his collaborators found that such a pair-exchange process is resonantly enhanced when the nearly-flat band is "incipient" (being close to, but just above, the chemical potential) [19]. It is pointed out that such a resonant pair scattering in two-band superconductors with a nearly-flat incipient band drives the system to the BCS-BEC crossover by changing the carrier density without adjusting any interaction strengths. This feature can be understood as an analogy with the Feshbach resonance in ultracold atomic systems.

Sphericity of atoms

It is known that atomic nuclei can be deformed collectively, whereas it is said that atoms are spherical due to the strong central potential caused by an atomic nucleus. In order to understand this difference, Naito and his collaborators compared these two systems numerically and analytically. It is found that even if the central potential exists, a system with the nuclear interaction can be deformed, and the collective deformation occurs if the interaction is attractive [13].

Lipkin model with quantum computation

There have been several applications of variational quantum eigensolver (VQE) of quantum computation in nuclear physics, however, it is nontrivial at all what kind of ansatz should be used for a given Hamiltonian. In general, ansatz on quantum circuits requires compactness, a small number of parameters, wide expressibility, and fast convergence due to quantum advantage. With these motivations, Chikaoka and Liang [20] benchmarked the unitary coupled cluster (UCC) and structure learning (SL) ansatze using the Lipkin model, which is a famous model in nuclear physics and has the known exact solutions. Calculations with both the UCC and SL ansatze can reproduce the ground-state energy well; however, it is found that the calculation with the SL ansatz performs better than that with the UCC ansatz, and the SL ansatz has even fewer quantum gates than the UCC ansatz.

<受賞>

- 田島裕之,第4回高知大学広報顕彰制度「優秀広報貢 献賞」,高知大学,2021年11月.
- [2] H.Z. Liang, Top Reviewer Award 2021, Chinese Physics C, November 2021.
- [3] 内藤智也, 2021 年度東京大学理学系研究科研究奨励 賞, 東京大学, 2022 年 3 月.

<報文>

(原著論文)

- [4] N. Itagaki and T. Naito, "Consistent description for cluster dynamics and single-particle correlation", Phys. Rev. C 103, 044303 (2021).
- [5] G. Accorto, T. Naito, H.Z. Liang, T. Nikšić, and D. Vretenar, "Nuclear energy density functionals from empirical ground-state densities", Phys. Rev. C 103, 044304 (2021).
- [6] H. Irie, H.Z. Liang, T. Doi, S. Gongyo, and T. Hatsuda, "Hybrid quantum annealing via molecular dynamics", Sci. Rep. 11, 8426 (2021).
- [7] J. Takahashi, H. Tajima, E. Nakano, and K. Iida, "Extracting nonlocal interpolaron interactions from collisional dynamics", Phys. Rev. A 103, 043334 (2021).
- [8] Z.H. Wang, T. Naito, H.Z. Liang, and W.H. Long, "Exploring effects of tensor force and its strength via neutron drops", Chin. Phys. C 45, 064103 (2021).
- [9] Z.H. Wang, T. Naito, and H.Z. Liang, "Tensorforce effects on shell-structure evolution in N = 82isotones and Z = 50 isotopes in the relativistic Hartree-Fock theory", Phys. Rev. C **103**, 064326 (2021).
- [10] T. Naito, G. Colò, H.Z. Liang, and X. Roca-Maza, "Second and fourth moments of the charge density and neutron-skin thickness of atomic nuclei", Phys. Rev. C 104, 024316 (2021).
- [11] T.M. Doi, H. Tajima, and S. Tsutsui, "Complex Langevin study for polarons in an attractively interacting one-dimensional two-component Fermi gas", Phys. Rev. Research 3, 033180 (2021).

- [12] H. Tajima, S. Tsutsui, T.M. Doi, and K. Iida, "Unitary *p*-wave Fermi gas in one dimension", Phys. Rev. A **104**, 023319 (2021).
- [13] T. Naito, S. Endo, K. Hagino, and Y. Tanimura, "On deformability of atoms—comparative study between atoms and atomic nuclei", J. Phys. B 54, 165201 (2021).
- [14] S. Akagami, H. Tajima, and K. Iida, "Condensation of Cooper triples", Phys. Rev. A 104, L041302 (2021).
- [15] T. Hata, E. Nakano, K. Iida, H. Tajima, and J. Takahashi, "Dissipation-relaxation dynamics of a spin-1/2 particle with a Rashba-type spin-orbit coupling in an ohmic heat bath", Phys. Rev. B 104, 144424 (2021).
- [16] H. Tajima, S. Tsutsui, T.M. Doi, and K. Iida, "Three-body crossover from a Cooper triple to bound trimer state in three-component Fermi gases near a triatomic resonance", Phys. Rev. A 104, 053328 (2021).
- [17] H. Moriya, H. Tajima, W. Horiuchi, K. Iida, and E. Nakano, "Binding two and three α particles in cold neutron matter", Phys. Rev. C **104**, 065801 (2021).
- [18] T. Yokota and T. Naito, "Construction of energy density functional for arbitrary spin polarization using functional renormalization group", Phys. Rev. B 105, 035105 (2022).
- [19] K. Ochi, H. Tajima, K. Iida, and H. Aoki, "Resonant pair-exchange scattering and BCS-BEC crossover in a system composed of dispersive and heavy incipient bands: a Feshbach analogy", Phys. Rev. Research 4, 013032 (2022).
- [20] A. Chikaoka and H.Z. Liang, "Quantum computing for Lipkin model with unitary coupled cluster and structure learning ansatz", Chin. Phys. C 46, 024106 (2022).
- [21] N. Itagaki, T. Naito, and Y. Hirata, "Persistence of cluster structure in the ground state of ¹¹B", Phys. Rev. C 105, 024304 (2022).
- [22] T. Naito, G. Colò, H.Z. Liang, X. Roca-Maza, and H. Sagawa, "Toward *ab initio* charge symmetry breaking in nuclear energy density functionals", Phys. Rev. C 105, L021304 (2022).
- [23] Y.X. Guo, H. Tajima, and H.Z. Liang, "Cooper quartet correlations in infinite symmetric nuclear matter", Phys. Rev. C 105, 024317 (2022).
- [24] H. Tajima, Y. Sekino, and S. Uchino, "Optical spin transport theory of spin-1/2 topological Fermi superfluids", Phys. Rev. B, 105, 064508 (2022).
- [25] H. Tajima, S. Tsutsui, T.M. Doi, and K. Iida, "Cooper triples in attractive three-component fermions: Implication for hadron-quark crossover", Phys. Rev. Research, 4, L012021 (2022).

(会議抄録)

- [26] H. Moriya, H. Tajima, W. Horiuchi, K. Iida, and E. Nakano, "Structure of two- and three-alpha systems in cold neutron matter", EPJ Web Conf. 260, 11045 (2022).
- (国内雑誌)
- [27] 田島裕之,「量子シミュレータ」,原子核研究, 66 (1), 44 (2021).
- [28] 内藤智也, 萩野浩一, 小林良彦, 「アイソスピンの符号の慣習をめぐって」, 日本物理学会誌, 77 (2), 99 (2022).

(学位論文)

- [29] 内藤智也, "On isospin symmetry breaking in nuclear density functional theory" (原子核密度汎関数 理論におけるアイソスピン対称性の破れ), 博士論文
- [30] Y.X. Guo, "Non-relativistic expansion of Dirac equation with spherical scalar and vector potentials", 修士論文
- <学術講演>

- [31] T. Hata, E. Nakano, K. Iida, H. Tajima, and J. Takahashi, "Dissipation and relaxation dynamics of mobile magnetic impurity with Rashba type spin-orbit coupling in an ohmic heat bath", Super-Fluctuations 2021, (video recorded seminar), June 15, 2021.
- [32] K. Ochi, H. Tajima, K. Iida, and H. Aoki, "Pairexchange scattering in a BCS-BEC crossover in superconductors having dispersive and incipient heavy bands", SuperFluctuations 2021, (video recorded seminar), June 15, 2021.
- [33] H. Moriya, H. Tajima, W. Horiuchi, K. Iida, and E. Nakano, "Two- and three-alpha clusters in cold neutron matter", The 16th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC-XVI), Chengdu, China (online), September 21–25, (2021).

- [34] H.Z. Liang, "Density functional theory and inverse Kohn-Sham method", Lectures on Covariant Density Functional Theory in Nuclear Physics, Southwest University, Chongqing, China (hybrid), April 1–7, 2021.
- [35] H. Tajima, P. Pieri, and A. Perali, "Hidden pseudogap in the two-band BCS-BEC crossover", SuperFluctuations 2021, (video recorded seminar), June 15, 2021.

(国内会議)

一般講演

⁽国際会議)

一般講演

招待講演

- [36] 田島裕之,筒井翔一朗,土居孝寛,飯田圭:「3 体共鳴 近傍における 3 成分フェルミ原子気体のクーパート リプルから 3 体束縛分子へのクロスオーバー」,KEK 理論センター研究会「熱場の量子論とその応用」(オ ンライン),2021 年 9 月 1 日.
- [37] 田島裕之, P. Pieri, A. Perali: 「2 バンド BCS-BEC クロスオーバーにおける超伝導揺らぎと擬ギャップ」, 日本物理学会秋季大会 (オンライン), 2021 年 9 月 20-23 日.
- [38] 赤神青空, 岡田圭助, 田島裕之: 「船型人力遊具「ライ ジング号」のパラメトリック励振についての考察」, 日本物理学会秋季大会 (オンライン), 2021 年 9 月 20-23 日.
- [39] 赤神青空,田島裕之,飯田圭:「3成分フェルミオン系 におけるクーパートリプルの凝縮」,日本物理学会秋 季大会(オンライン),2021年9月20-23日.
- [40] 田島裕之, 筒井翔一朗, 土居孝寛, 飯田圭: 「1 次元 p 波ユニタリーフェルミガス」, 日本物理学会秋季大会 (オンライン), 2021 年 9 月 20-23 日.
- [41] H.Z. Liang, "Nuclear mass predictions with machine learning towards the accuracy required by r-process studies", Workshop of RIKEN Pioneering Project: Evolution of Matter in the Universe, RIKEN (online), October 18–19, 2021.
- [42] 田島裕之,筒井翔一朗,土居孝寛,赤神青空,飯田圭: 「ハドロン・クォーククロスオーバーの量子シミュレーションの提案」,基研研究会「核力に基づいた原子核の構造と反応」,京都大学基礎物理学研究所,2021年 12月7-10日.
- [43] 田島裕之,筒井翔一朗,土居孝寛,赤神青空,飯田 圭:「Three-body clustering across the hierachical structure: Crossover from Cooper triples to bound trimers」,第7回クラスター階層領域研究会,東北大 学電子光理学研究センター,2021年12月27-28日.
- [44] 板垣直之,内藤智也,平田雄一:「¹¹B のクラスター 構造とその応用」,日本物理学会年次大会(オンライン),2022年03月15日.
- [45] 森谷元,田島裕之,堀内渉,飯田圭,仲野英司:「冷中 性子物質中における少数アルファクラスター系の構 造研究」,日本物理学会年次大会(オンライン),2022 年 03 月 15 日.
- [46] 高橋淳一,田島裕之,仲野英司,飯田圭:「ブラック ホール衝突における Hawking 輻射と重力波発生過程 の量子シミュレーションに向けた理論研究」,日本物 理学会年次大会(オンライン),2022年03月15日.
- [47] 関野裕太,田島裕之,内野瞬:「冷却原子気体における光学スピン輸送 II」,日本物理学会年次大会(オンライン),2022年03月15日.

招待講演

- [48] 内藤智也:「原子核構造で探る中性子星」,研究活性 化ワークショップ「中性子星の観測と理論 2021」,理 化学研究所 (オンライン), 2021 年 08 月 10 日.
- [49] 内藤智也: 「ミュオン波動関数計算コードの開発」, 原子物理と原子核物理をつなぐ勉強会, RCNP 研究

会「ミューオン X 線 γ 線分光―非破壊分析, 化学, 原子核物理への新展開・ミューオン原子核捕獲反応に よる原子核関連研究の可能性」, 大阪大学核物理研究 センター (ハイブリッド), 2022 年 03 月 25 日.

[50] 田島裕之:「Many-body states and quantum clusters in matter: Viewpoint from cold atomic physics」,新学術領域研究「量子クラスターで読み解 く物質の階層構造」スクール, 2022 年 3 月 29 日.

(セミナー)

- [51] H.Z. Liang, "Nuclear spin-isospin physics: From phenomena to fundamentals", Department of Physics, The University of Tokyo (online), May 18, 2021.
- [52] H. Tajima, "Polaron Problems in Ultracold Atoms: Role of a Fermi Sea", Max Planck Institute of Quantum Optics (online), May 25, 2021.
- [53] 内藤智也: 「Ab initio エネルギー密度汎関数に向け て」, 酒見グループセミナー, 東京大学 (オンライン), 2021 年 07 月 16 日.
- [54] H.Z. Liang, "Nuclear spin-isospin physics: From phenomena to fundamentals", The University of Hong Kong, China (online), September 29, 2021.
- [55] H.Z. Liang, "Applications of quantum computing in nuclear structure theory", Anhui University, China (online), December 21, 2021.

1.3 素粒子論研究室

1.3.1 現象論

インフレーション模型

Li、諸井、中山は、共同研究者の殷と共に、Starobinsky インフレーションにおいてインフラトンの崩壊 から hidden sector 暗黒物質が生成される可能性を 指摘し、そのシナリオにおける現象論的制限を議論 した [2]。

ILC ビームダンプにおける新粒子探索

浅井、諸井、仁木は、将来の e⁺e⁻ 線型加速器の ビームを用いたビームダンプ実験において、素粒子 標準模型を超える物理に現れるゲージボソンが発見・ 検証できる可能性があること示し [3]、この論文につ いて諸井は講演を行なった [30]。

アクシオン現象論

濱口、金澤、永田は、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) クオリティ問題を解決する方法を提案した [4]。

ミューオン異常磁気能率

ミューオン異常磁気能率 g-2の実験値と標準模型 からの予言には 4.2σ のずれが報告されている。濱口 は、共同研究者の遠藤、岩本、北原とともに、ミュー オン g-2のずれを説明出来る超対称性模型につい て、LHC 実験など現象論的制限を再解析し、暗黒物 質残存量とミューオン g-2を同時説明出来る模型 ポイントを同定するなどした [5]。

永田は、Heinemeyer、Kpatcha、Lara、López-Fogliani、 Muñoz とともに、 $\mu\nu$ SSM 模型において現在の実験 制限を逃れつつミューオン g-2 のずれを説明する ことのできるパラメーター領域を明らかにし、将来 実験における検証可能性を議論した [6]。

永田は, Ellis, Evans, Nanopoulos, Olive ととも に, Flipped SU(5) 大統一理論においてミューオン g-2のずれを説明する可能性に関して議論し [7], 陽 子崩壊実験を通じた検証可能性を明らかにした [8]。

超対称大統一理論

永田は, Ellis, Evans, Olive とともに, 最小 Missing partner 模型において暗黒物質量およびヒッグス粒子 質量の観測値を説明しうるパラメーター領域を同定 し, 将来の陽子崩壊実験においてそれらの領域を探 索しうることを明らかにした [9]。

超対称標準模型の現象論

永田は, Kpatcha, Lara, López-Fogliani, Muñoz, 音野とともに, μνSSM 模型においてトップクォー クの超対称パートナー粒子が最も軽い超対称粒子と なっているシナリオを考察し,長寿命粒子探索によ り課せられる現在の実験制限および将来実験におけ る探索見込みを議論した [10]。

千草、濱口、諸井、仁木、大野は FCC 実験におけ る PGM 模型のグルイーノの崩壊分岐比について推 定方法を提案した。またこの崩壊分岐比を用いたス クォークの質量比の推定について考察を行った [11]。

MiniBooNE 過剰事象における新物理模型

フェルミ研究所でニュートリノ振動の実験である MiniBooNE 実験は電子的事象の過剰を観測したと報 告し、標準模型の予想値から 4.8 標準偏差くらいずれ ていることがわかった。MiniBooNE の過剰事象を 説明するために、Tseng は、C.H. Chang (台湾師範 大学)、C.R. Chen (台湾師範大学)、S.Y. Ho (KIAS、 韓国) とともに、標準理論のニュートリノセクター の拡張として、新しいニュートリノの存在を仮定し た上、レプトンと相互作用するアクシオン的粒子の シナリオを提案した [12]。この枠組みでは、荷電 K 中間子の崩壊により生成された新しいニュートリノ は、MiniBooNE の検出器内でアクシオン的粒子と ミューニュートリノに崩壊する。さらにアクシオン 的粒子の崩壊から生成される電子・陽電子対は、そ の開き角が十分に小さければ二つの粒子を区別する ことができなくなり、電子的事象として解釈するこ とができます。新しいニュートリノの質量とニュー トリノの混合パラメータなどを適切に選ぶことで、 天体物理学およびコライダー実験からの制限を回避 し、MiniBooNE 過剰事象を説明できることを見いだ した。

ディラックフェルミオン暗黒物質

ミューオン異常磁気能率の実験値と標準模型から の予言には 4.2σ のずれがある。西村はミューオンと 結合したディラックフェルミオン暗黒物質の模型を 研究し、そのずれと暗黒物質残存量を同時に説明で きるパラメータ領域が存在することを示した [27]。

コライダー検出器を用いたアクシオンの直接探索

金澤、諸井、Sichanugrist は共同研究者の浅井 (東 京大学教授)と共に、超新星爆発由来のアクシオン を、LHC 検出器や ILC 検出器などのコライダー検出 器によって検出できる可能性を議論した [13]。

1.3.2 弦理論,場の理論全般

Virasoro 型対称性の変形について

松尾は Virasoro 型対称性の変形とそのゲージ理論 などへの応用について総合講演を行った。[48]

corner 頂点代数の q-変形と三浦変換

松尾、野下、渡辺は卒業生の原田と Gaiotto と Rapcak により提案された corner 頂点代数の量子変形を 定義した。さらに、量子群の交換関係に相当する双 二次形式を計算し、量子トロイダル代数との関係を 明らかにした [14]。

箙量子トロイダル代数と結晶表現

野下、渡辺は最近 Galakhov、 Li と Yamazaki に より提案された、複素 3 次元のトーリックカラビ・ ヤウ多様体に付随する quiver Yangian の量子変形版 である箙量子トロイダル代数を定義した [15]。また、 その代数のあるクラスの表現である結晶表現につい て調べた [16]。野下はこれを元に修士論文を執筆し た [28]。

流体に現れる弦の研究

松尾は菅本(お茶大名誉教授)とともに流体中の弦 を2階反対称テンソル(Kalb-Ramond)場を用いて 記述する方法について考察を行った。[23][37]また、 片桐、松岡(放送大)、菅本らと共に弦を簡単化した ランダムダイポールのポテンシャル下における粒子 のブラウン運動について数値計算、および経路積分 を用いた解析的研究を行い、フラクタル拡散を起こ していることを示した。これは主に乱流などへの応 用を想定している。

ブラックホールとエンタングルメント比熱

近年、ブラックホールの情報喪失問題を解決しう る非摂動効果が発見された。川畑と奥山は、共同研 究者の西岡と渡邊とともにブラックホールの蒸発過 程を記述するトイモデルを解析することで、エンタ ングルメント比熱と呼ばれる量子情報量が、この非摂 動効果を顕著にプローブできることを指摘した [17]。 さらに、物質場と結合した JT 重力模型におけるエ ンタングルメント比熱の公式を導き、その支配的ふ るまいが熱力学的であることを示した [18]。

高次元超対称ゲージ理論

大森は、共同研究者の林、Kim とともに、5次元及び6次元の例外型超対称ゲージ理論を表す新しいタイプの5-ブレーンウェブ図式を考案、報告した[19]。

一般化対称性

近年、場の量子論における対称性の概念を一般化 しする試みが行われている。そのような一般化の つとして、2-群と呼ばれる通常の群を拡張した構造 がありうることが指摘されている。大森は、共同研 究者の李、立川とともに、3+1 次元の SO(2n) 量子 力学において、この2-群構造を調べ、これらが特に N=1 超対称な場合に、理論の Intriligator-Seiberg 双 対性と整合することを確かめた [20]。また、別の-般化として、逆操作が存在しないような操作を許容 する、非可逆的対称性という概念が提唱されている。 大森は、共同研究者の Kaidi, Zheng とともに、3+1 次元 SO(3) ゲージ理論において、この非可逆的対称 性が存在することを発見し、その性質を調べた [21]。 この次元の相互作用する場の理論において非可逆的 対称性が発見されるのは初めてである。また、この 成果に基づいてプレスリリースを行なった [70]。

ローレンツ不変な波束形式

和田は、尾田 (東京女子大学教授) とともに、ロー レンツ不変な波束 (LIWP) が持つ不確定性を分析し、 また、スカラー場演算子が LIWP の生成消滅演算子 によって展開できることを示した [22]。

<受賞>

 野下剛、理学系研究科奨励賞(修士課程)、東京大学 理学系研究科、2022年3月24日。

<報文>

(原著論文)

- [2] Q. Li, T. Moroi, K. Nakayama and W. Yin, "Hidden dark matter from Starobinsky inflation," JHEP 09, 179 (2021).
- [3] K, Asai, T. Moroi, and A. Niki, "Leptophilic Gauge Bosons at ILC Beam Dump Experiment," Phys. Lett. B 818 (2021) 136374.
- [4] K. Hamaguchi, Y. Kanazawa and N. Nagata, "Axion Quality Problem Alleviated by Non-Minimal Coupling to Gravity", Phys. Rev. D 105, 076008 (2022).
- [5] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto and T. Kitahara, "Supersymmetric interpretation of the muon g-2 anomaly," JHEP **07** (2021), 075.
- [6] S. Heinemeyer, E. Kpatcha, I. Lara, D. E. López-Fogliani, C. Muñoz and N. Nagata, "The new (g – 2)_μ result and the μνSSM," Eur. Phys. J. C 81, no.9, 802 (2021).
- [7] J. Ellis, J. L. Evans, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, "Flipped g_μ – 2," Eur. Phys. J. C 81, no.12, 1079 (2021).
- [8] J. Ellis, J. L. Evans, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, "Flipped SU(5) GUT phenomenology: proton decay and g_μ – 2," Eur. Phys. J. C 81, no.12, 1109 (2021).
- [9] J. Ellis, J. L. Evans, N. Nagata and K. A. Olive, "A minimal supersymmetric SU(5) missing-partner model," Eur. Phys. J. C 81, no.6, 543 (2021).
- [10] E. Kpatcha, I. Lara, D. E. López-Fogliani, C. Muñoz, N. Nagata and H. Otono, "Searching for stop LSP at the LHC," Eur. Phys. J. C 82, no.3, 261 (2022).
- [11] S. Chigusa, K. Hamaguchi, T. Moroi, A. Niki, K. Ono, "Studying squark mass spectrum through gluino decay at 100 TeV future circular collider," Phys. Lett. B 817 (2021) 136332.
- [12] C. H. V. Chang, C. R. Chen, S. Y. Ho and S. Y. Tseng, "Explaining the MiniBooNE anomalous excess via a leptophilic ALP-sterile neutrino coupling," Phys. Rev. D 104, no.1, 015030 (2021).
- [13] S. Asai, Y. Kanazawa, T. Moroi and T. Sichanugrist, "Observing Axion Emission from Supernova with Collider Detectors", arXiv:2203.01519.
- [14] K. Harada, Y. Matsuo, G. Noshita and A. Watanabe, "q-Deformation of Corner Vertex Operator Algebras by Miura Transformation," JHEP 4, 202 (2021).

- [15] G. Noshita and A. Watanabe, "A Note on Quiver Quantum Toroidal Algebra," arXiv:2108.07104.
- [16] G. Noshita and A. Watanabe, "Shifted Quiver Quantum Toroidal Algebra and Subcrystal Representations," arXiv:2109.02045.
- [17] K. Kawabata, T. Nishioka, Y. Okuyama and K. Watanabe, "Probing Hawking radiation through capacity of entanglement," JHEP 5, 062 (2021).
- [18] K. Kawabata, T. Nishioka, Y. Okuyama and K. Watanabe, "Replica wormholes and capacity of entanglement," JHEP 10, 227 (2021).
- [19] H. Hayashi, H. C. Kim and K. Ohmori, "6d/5d exceptional gauge theories from web diagrams," JHEP 07 (2021), 128
- [20] Y. Lee, K. Ohmori and Y. Tachikawa, "Matching higher symmetries across Intriligator-Seiberg duality," JHEP 10, 114 (2021)
- [21] J. Kaidi, K. Ohmori and Y. Zheng, "Kramers-Wannier-like Duality Defects in (3+1)D Gauge Theories," Phys. Rev. Lett. **128**, no.11, 111601 (2022)
- [22] Kin-ya Oda and J. Wada, "A complete set of Lorentz-invariant wave packets and modified uncertainty relation", Eur. Phys. J. C 81, no.8, 751,(2021)

(会議抄録)

[23] Yutaka Matsuo and Akio Sugamoto, "Note on a description of a perfect fluid by the Kalb–Ramond field", PTEP 2021 (2021) 12, 12C104.

(国内雑誌)

(学位論文)

- [24] 修士論文: S. Hor, "Grand Unified Theories with R Symmetries."
- [25] 修士論文:川畑洸貴, "誤り訂正符号による超共形場 理論の構成."
- [26] 修士論文: A. Niki, "New Gauge Bosons at the ILC Beam Dump Experiment".
- [27] 修士論文: N. Nishimura, "ディラックフェルミオン 暗黒物質とミューオン g-2."
- [28] 修士論文: G. Noshita, "Brane tilings and crystal representations of quiver quantum toroidal algebras."
- [29] 修士論文:和田淳太郎, "MUonE 実験によるミュー オン g - 2 を説明可能な U(1)_{μ-τ} ゲージボソンの 探索."

(著書)

(国際会議)

一般講演

- [30] T. Moroi, "Studying Exotic Gauge Bosons Using ILC Beam Dump," ILC-X 2021 (26 – 29, October, 2021), virtual conference.
- [31] N. Nagata, "A Minimal Supersymmetric SU(5) Missing-Partner Model", SUSY 2021, online, Aug. 23, 2021.
- [32] M. E. Ramirez-Quezada, "Dark Matter Capture in White Dwarfs," Asia-Pacific Workshop on Particle physics and Cosmology 2021, Aug 6, 2021, virtual conference.

招待講演

- [33] K. Hamaguchi, "Supernova-scope for the Direct Search of Supernova Axions," Darkness on the table, APCTP, August 8, 2021.
- [34] K. Hamaguchi, "Matter-Antimatter asymmetry of the Universe and Leptogenesis," Tsukuba Global Science Week 2021, September 11, 2021.
- [35] K. Hamaguchi, "Supernova-scope for the Direct Search of Supernova Axions," 2022 Chung-Ang University BSM Workshop (online), February 7, 2021.
- [36] K. Hamaguchi, "Neutrino Theory," Japan-Korea Joint Symposium "Prospect of Neutrino Physics", via Zoom, March 18, 2022.
- [37] Yutaka Matsuo, "A description of perfect fluid by Kalb-Ramond field and duality with Gross-Pitaevskii", workshop "Helicity and space-time symmetry", Osaka City University, October 5-8 2021.
- [38] K. Ohmori, "On non-invertible symmetries," Topological properties of gauge theories and their applications to high-energy and condensed-matter physics (Sep., 2021), Florence (hybrid).
- [39] K. Ohmori, "Topological thinking on symmetry," Geometry of (S)QFT (Sep., 2021), virtual conference.
- [40] M. E. Ramirez-Quezada, "White dwarfs as dark matter probes," XIX Mexican school of Particles and Fields, Aug 10, 2021, virtual conference.
- [41] M. E. Ramirez-Quezada, "DM capture in WDs," COCo 2021: Cosmology in Colombia, Sep 10, 2021, virtual conference.

(国内会議)

一般講演

- [42] 金澤慶季, "PQ スカラー場と重力の非最小結合によるU(1) クオリティ問題の解消",日本物理学会第77回年次大会,オンライン開催,2022年3月17日.
- [43] 川畑洸貴, "量子情報量で探るワームホール時空,"日本物理学会 2021 年秋季大会, オンライン開催, 2021 年9月14日.

- [44] 仁木敦也, "ILC ビームダンプを用いたレプトフィリッ クなゲージボソンの探索",日本物理学会第77回年次 大会,オンライン開催,2022年3月17日.
- [45] 和田淳太郎, 'MUonE 実験によるミューオン g-2を 説明可能な U(1)_{μ-τ} ゲージボソンの探索 '," 日本物 理学会第 77 回年次大会, オンライン開催, 2022 年 3 月 17 日.

招待講演

- [46] K. Hamaguchi, "Theoretical research on new particle physics models and the evolution of the early universe unravelling the origin of matter," 新学術 領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」 領域研究会 (2021.5.19, オンライン).
- [47] K. Hamaguchi, "Matter-Antimatter asymmetry of the Universe and Leptogenesis," RCNP での次期計 画検討会, September 27, 2021.
- [48] 松尾泰「Virasoro 型対称性の変形とその超対称ゲージ 理論への新たな応用」招待講演
 日本物理学会 2021
 年9月14-17日(オンライン)
- [49] K. Ohmori, "Symmetries and Strings of Adjoint QCD2," Strings and Fields 2021 (Aug., 2021), virtual conference.
- [50] K. Ohmori, "Kramers-Wannier-like duality defects in (3 + 1)d gauge theories," East Asia Joint Symposium on Fields and Strings 2021 (Oct., 2021), Osaka.

(セミナー)

- [51] K. Hamaguchi, "Supernova-scope for the Direct Search of Supernova Axions," Seminar at Centre for High Energy Physics, Indian Institute of Science, July 7, 2021.
- [52] Y. Kanazawa, "Axion Quality Problem Alleviated by Non-Minimal Coupling to Gravity", 東北大学 (オンライン), Oct. 21, 2021.
- [53] Y. Kanazawa, "PQ スカラー場と重力の非最小結合 による U(1) クオリティ問題の解消", 立教大学 (ハイ ブリッド), Jan. 25, 2022.
- [54] 川畑洸貴, "量子情報量で探るワームホール時空", 信 州大学 (オンライン), 2021 年 10 月 26 日.
- [55] N. Nagata, "Axion Quality Problem Alleviated by Non-Minimal Coupling to Gravity," KIAS, South Korea, Dec 14, 2021.
- [56] N. Nagata, "Toward Direct Detection of Axions," Tohoku University, Japan, Nov 16, 2021.
- [57] 永田夏海, "集中講義:中性子星と標準理論を超える 物理に関して"東北大学, Nov 15–17, 2021.
- [58] N. Nagata, "Toward Direct Detection of Axions," Hokkaido University, Japan, Oct 22, 2021.
- [59] 永田夏海, "暗黒物質探索を通じた新物理模型の探求," 大阪大学, Jul 11, 2021.
- [60] G. Noshita, "Quiver Quantum Toroidal Algebra and Crystal Representations," Kavli IPMU, オン ライン, Feb. 15, 2022

- [61] M. E. Ramirez-Quezada, "Enanas blancas como potenciales candidatos para la detección de materia oscura," Instituto de Ciencias Nucleares UNAM, Sep 2, 2021.
- [62] M. E. Ramirez-Quezada, "Search of dark matter using white dwarfs," National Tsing Hua University, Taiwan, Nov 11, 2021.
- [63] M. E. Ramirez-Quezada, "Circular polarisation: a window to physics BSM," The University of Sydney, Mar 10, 2022.
- [64] S.Y. Tseng, "Minimal gauged $U(1)_{L_{\mu}-L_{\tau}}$ model, leptogenesis and the sign of cosmological baryon asymmetry", 北海道大学, 2021/04/16
- [65] J. Wada, "Probing the L_µ L_τ Gauge Boson at the MUonE Experiment", 名古屋大学 (ハイブリッ ド), Nove. 17, 2021.
- [66] J. Wada, "Probing the $L_{\mu} L_{\tau}$ Gauge Boson at the MUonE Experiment", 広島大学 (オンライン), Mar. 4, 2022.
- [67] A. Watanabe, "Quiver Quantum Toroidal Algebra and Crystal Representations,"東京工業大学, Nov. 10, 2021
- [68] A. Watanabe, "Quiver Quantum Toroidal Algebra and Crystal Representations," 名古屋大学, Dec. 10, 2021
- [69] A. Watanabe, "Quiver Quantum Toroidal Algebra and Crystal Representations," Strings and QFTs for Eurasian time zone (オンライン), Jan. 26, 2021

<アウトリーチ>

(プレスリリース)

[70] 大森 寛太郎, "場の量子論における新しい量子的対称 性の発見", 2021 年 3 月 16 日.

(雑誌寄稿)

[71] 奥山 義隆, 理学部ニュース 2022 年 1 月号 理学のス スメ第 5 回 "世界がスケール不変であったなら?", 2022 年 1 月 20 日.

2 原子核·素粒子実験

2.1 原子核実験グループ (櫻井研究室)

原子核実験グループ(櫻井研究室)は、国内外の 加速器施設を利用して原子核物理の実験研究を行っ ている。櫻井研究室では、原子核のまわりに電子以 外の負電荷の粒子が回っている奇妙な原子(エキゾ チック原子)や、天然に安定存在する原子核よりも 中性子数または陽子数が極端に多い不安定核(エキ ゾチック原子核)の分光研究を行なっている。大阪 大学核物理研究センター(RCNP)では負ミューオン (μ⁻)で作られるエキゾチック原子の分光研究を、理 化学研究所の重イオン加速器研究施設 RI ビームファ クトリー(RIBF)と放射線医学研究所 HIMAC では、 高強度な不安定核ビームを利用した核分光研究を進 めている。また、実験で使用する検出器や加速器の 開発も並行して行っている。

2.1.1 ミューオン原子 X 線による原子核 の荷電半径・荷電分布測定

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

荷電半径の測定には、電子散乱やレーザー分光に よる原子の同位体シフトの測定と並んで、原子核と ミューオンで構成されるミューオン原子のX線を利 用した荷電半径測定が行われている。我々は荷電半 径の決定において従来使われていたミューオン原子 のK_α線に加えて高次のX線を併用することで、従 来手法に比べてモデル依存性の少ない荷電半径の決 定手法を開発した。また、ミューオン原子X線によ る荷電半径測定を荷電密度分布の測定に拡張する手 法を提案した。

2.1.2 パラジウム同位体のミューオン捕獲 反応の研究

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

我々は、ミューオン捕獲反応に伴う放出中性子のエ ネルギー及び複数中性子間の放出角度相関に着目した 実験を行った。中性子のエネルギーは励起状態の微 視的構造を反映するため、これらの物理量の測定によ りミューオン捕獲反応後の原子核の励起準位構造や反 応メカニズムを間接的に観測することができる。実験 は大阪大学核物理研究センター (RCNP)の MuSIC-M1 ビームラインで行った。標的核として同位体濃 縮した5種類のパラジウム (^{104,105,106,108,110}Pd) そ れそれについて測定をした。ミューオン捕獲反応か ら放出される放出中性子のエネルギースペクトルを 導出し、特に低エネルギー中性子のスペクトルは原 子核が熱平衡状態にある複合核からの蒸発過程とし てよく記述できることを示した。

2.1.3 核変換用加速器における大電流入射 ビームラインの開発

近年、原子炉の使用済み核燃料に含まれる長寿命 不安定核種の処理手法として、加速器で生成した数 百 MeV/u の重陽子ビームを核燃料廃棄物に照射し 短寿命化する核変換処理法が提案されている。核変 換用加速器には従来加速器では実現できない1 A 程 度の大電流ビームが求められており、その実現には 大電流ビームの輸送と加速に関する技術開発が必須 である。

我々は大電流ビーム輸送において、特に課題とな る空間電荷効果の影響が大きいイオン源直後の低エ ネルギービーム輸送系において、その空間電荷効果 の影響を考慮した輸送中ビームの空間的広がりと運 動量広がりを評価する手法を構築している。大電流 ビーム輸送では、ビーム自身が励起する電磁場 (空間 電荷効果)による発散力を抑制するために、ビーム を大口径化し、空間電荷密度を希薄化し、 ϕ 600 mm 程度の大口径のソレノイド磁石による収束力を設け たビームラインによって、ビームを後段加速器のア クセプタンスにマッチさせる。この方式ではビーム 口径が従来よりも大きいために、従来のビーム光学 計算手法で採用される近軸近似の精度が悪化する点、 およびビームとソレノイド磁石が励起する多重極電 磁場に起因するビームハロー生成が課題になる。

現在、多重極電磁場と空間電荷効果の影響を考慮 した多粒子解析に基づいてハロー生成のメカニズム の解明に取り組んでいる。従来から用いられている 粒子追跡計算による解析ではビームの初期分布をガ ウシアンとした場合と空間的に一様な KV 分布とし た場合,エミッタンスの増大や生成するハローの差 異が生じることが確認されている。2022 年度にはこ れらの現象を説明可能なビームの位相空間モーメン トのソレノイド磁場中の発展方程式を立式すること に成功し,その数値計算結果からもエミッタンス増 大やハロー生成がシミュレートできた。

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

我々はこれまで、理化学研究所の RI ビームファク トリー (RIBF) にある高効率ガンマ線検出器 DALI2+ を用いて、不安定核のインビームガンマ線核分光実 験を行ってきた。これまでに、偶々核(陽子・中性 子数がともに偶数である原子核)の第一2+励起エネ ルギーやクーロン励起による換算遷移確率 B(E2)を 測定し、魔法数の進化やアイソスピン対称性の破れ の探索を行ってきた。一方で、準位密度の大きい奇 核 (質量数が奇数である原子核)の分光や、励起準位 の寿命を測定することは、より詳細な核構造を理解 するために重要であるが、NaI(Tl) シンチレーター を使用している DALI2+の限られたエネルギー分解 能ではこれらの実験を行うことが困難であった。そ こで、高分解能のガンマ線核分光実験を RIBF で実 現するため、2019年度からゲルマニウム検出器を用 いた新たなガンマ線検出器アレイ建設計画 (HiCARI project: High-Resolution Cluster Array at RIBF) を開始した。

HiCARI プロジェクトでは、国内外から高分解能 ガンマ線検出器を集結し高効率・高分解能の検出器 アレイを建設した。CERN・ISOLDE において使用 されているセグメントゲルマニウム検出器 Miniball、 大阪大学 RCNP と米国ローレンス・バークレー国立 研究所が所有する Gretina 型ガンマ線トラッキング 検出器、韓国 IBS や中国 IMP が所有するクローバー 型検出器の計12台のゲルマニウム検出器から構成さ れるアレイを建設した。RIBF におけるインビーム ガンマ線核分光実験では、測定するガンマ線は光速 のおよそ 50%程度の速度で飛行する原子核から放出 されるためドップラーシフトの影響を受ける。高分 解能のガンマ線測定には、このドップラーシフトを 高精度で補正するために、検出器のエネルギー分解 能に加えてガンマ線の検出位置を高い分解能で測定 する必要がある。Gretina 型の検出器は出力波形を フラッシュ ADC で記録しその波形解析を行うこと で、検出したガンマ線の位置をおよそ 5 mm の精度 で決定することができる。我々のグループは、検出 器アレイ建設チームの中心メンバーとして、検出器 の設置、データ収集システムの開発、データ解析ソ フト開発などを担当した。

HiCARI プロジェクトでは、2020 年度から合計 7 つの実験課題を実施した。この中で我々のグループ は、特に中性子過剰なチタン同位体の核分光実験を 提案した。最近の我々の研究により、中性子過剰な カルシウム同位体では新たな中性子魔法数 34 が発 現し、その新しい魔法数は陽子数を増やすことで急 速に消滅することが知られている。しかし、この核 構造進化の定量的な評価は未だ実験的になされてい ない。そこで、カルシウムよりも陽子が2つだけ多 いチタン同位体において中性子一粒子軌道の配位を 測定することで、この領域の中性子殻構造の進化を 解明する。本実験提案は RIBF の実験採択委員会に おいて A グレードの課題として採択され、2020 年 12 月におよそ4 日間かけてデータを取得した。現在 までの解析で、先行研究にて知られている遷移の他 にも未知の遷移によるものと思われるガンマ線エネ ルギーピークが観測されており、今後この質量領域 における殻構造進化の機構についての解明が期待さ れる。

2.1.5 パイオン生成過程の研究

加速器からのビームを用いた核反応によってパイ オン (π) を生成するためには、一般的に核子衝突反 応を用いる。例えば、陽子-陽子衝突によって中性パ イオン (π⁰) を生成する過程は、

$$p + p \to p + p + \pi^0 \tag{1.5.1}$$

と表され、静止した陽子標的に陽子ビームを照射す る場合は、その生成に必要な最低ビームエネルギー (閾値エネルギー)は280 MeV 程度である。一方で、 複数の核子から構成される原子核 (重イオン) 同士の 核反応では、核子あたりのビームエネルギーが閾値 よりも低い場合でもパイオンが生成される。この準 閾値パイオン生成 (sub-threshold pion production) は、核内での核子のフェルミ運動が作用する過程、複 数の核子が集団的にパイオン生成する過程、原子核 が複合核を形成し脱励起する際にパイオン生成する 過程などによって起こると考えられる。特にこの内、 複数の核子が集団的にパイオン生成する過程は、原 子核内のクラスター構造や核子対相関などを観測で きる可能性がある。そこで、我々は⁴⁸Caのコアに4 つの中性子が付いた構造を持っていると考えられる ⁵²Ca の閾値エネルギー近傍での中性パイオン (π⁰) 生成実験を行った。

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

CATANA によって検出可能なエネルギーの最大 値は 15 MeV に設定されており、π⁰ から放出され る約 70 MeV ガンマ線は飽和した信号となる。同様 に、反応によって生じる 15 MeV より大きなエネル ギーの荷電粒子も飽和した信号となる。π⁰ 生成を同 定するには、得られた飽和した信号がガンマ線由来 であるか荷電粒子由来であるかを識別する必要があ る。そこで、Geant4を用いてガンマ線と荷電粒子の CATANA中での反応をシミュレーションすること で、それぞれの粒子の作る信号の識別方法を模索し た。シミュレーションでは、ガンマ線のエネルギー を 70 MeV と荷電粒子として 200 MeV のエネルギー を 50陽子に対して、CATANAの応答を比較した。 CATANAの検出器群中における信号の広がり方の 違いから、陽子由来の信号の 80%を陽子と識別し、 ガンマ線由来の信号の 90%をガンマ線と識別できる ことがわかった。荷電粒子はガンマ線よりも多く生 成されていることが予想されるため、現在より高い 精度の信号識別方法の確立に着手している。

2.1.6 ミューオン原子 X 線分光のための 光子検出器システムの開発

ミューオン原子 X 線分光は原子核の荷電半径・分 布の直接的な測定手法として広く用いられているほ か、元素分析や核分裂に関する研究などにも利用す ることができる。これまでミューオン原子 X 線分光 にはアナログ回路と Ge 検出器を用いた測定が行われ てきたが、アナログ回路を用いた測定では測定でき る計数率に制限がある。重い原子核におけるミュー オン原子 X 線分光では同時に測定されるガンマ線な どの影響から非常に多重度の高い中での高分解能測 定が求められるため、高計数率測定が可能なデジタイ ザを用いたデータ収集システムを利用した検出器の 開発が求められている。 そのため我々はこのような ミューオン原子 X 線について、幅広い原子核での測 定が可能な光子検出器システムの開発を行っている。 ミューオン原子 X 線のエネルギーは炭素などの軽 元素では数十 keV の低いエネルギーを示す一方、原 子番号の大きな原子核に対しては、約6MeV以上の 高いエネルギーを示すことが知られている。このよ うな幅広いエネルギー帯における光子を高いエネル ギー分解能で測定するために、光子検出器としては Ge 検出器を採用し、低エネルギーに特化した平行平 板型の Ge 検出器と、高エネルギー領域でも比較的 高い検出効率を持つ結晶サイズの大きな Ge 検出器 に対して、それぞれ性能評価を行った。2021年度に は、デジタイザを用いた Ge 検出器の測定における 性能評価の観点から、標準線源を用いて、時間分解 能の評価とエネルギー情報の線形性の評価を行った。 さらに、特に10 MeV までの高いエネルギー領域で の光子検出器の性能を評価するため、Al (p, γ) Si 共 鳴反応を利用した、約10 MeV までのガンマ線測定 実験を理化学研究所ペレトロン加速器を用いて行っ た (図 2.1.1)。これらの結果から、広いダイナミック レンジにおける Ge 検出器とデジタイザを用いた光 子検出器システムの性能評価を完了した。



図 2.1.1: 高エネルギーガンマ線測定実験で得られた スペクトル。約 10 MeV までのガンマ線が測定され た。

2.1.7 非等方的集団運動から探る高密度物 質の状態方程式の研究

複数の核子(陽子と中性子)から構成される原子 核でも状態方程式を考えることができる。原子核は その密度飽和性によりほぼ一定の物質密度 ρ_0 を持 つことが知られており、この ρ_0 を超える高密度物 質の状態方程式は未知である。この高密度な中性子 核物質の状態方程式は、中性子星の内部構造の理解 や超新星爆発の理論的な再現にも重要であるが、理 論的に大きな不定性を持つため実験的な制限が必要 となっている。本研究では、重イオン衝突によって ターゲットラピディティに放出される陽子と中性子 の directed flow (v1)が高密度物質における対称エ ネルギーの硬さに感度を持つと予想されていること に着目し、ターゲットラピディティ領域における陽 子と中性子のv1を測定、比較する手法を検討した。

実験は放射線医学総合研究所(放医研)の重粒子 線がん治療装置 HIMAC にて行った。高密度 2₀₀ を 実現するために、400 AMeV に加速した¹³²Xeビー ムと CsI ターゲットによる重イオン衝突実験を行い、 ターゲットラピディティ領域に放出される中性子と 陽子などの荷電粒子の directed flow (v1) を測定し た。測定では、NiGIRI と呼ばれる検出器によって ターゲットラピディティ領域に放出された粒子を大 立体角で測定し、粒子を同定して運動量を決定した。 また、FC と呼ばれる検出器によって粒子の異方性 から反応平面の方向を推定した。FC と NiGIRI の下 流側にはビームカウンターを導入し核破砕片による エネルギー損失を測定することで、反応における衝 突係数の大きさ (centrality) を推定した。NiGIRI で 検出した粒子の角度 ϕ と FC で推定した反応平面の 方向 ψ との差 ϕ - ψ の分布から、荷電粒子と中性子の それぞれにおいて運動量毎に v1 を取得することで、 ターゲットラピディティにおける荷電粒 子と中性子 の v1 の詳細な比較を初めて行った。取得した運動量 毎の v1 の値は、低運動量領域では中性子より荷電粒 子が強いことが示唆され、今後、低運動量側での陽 子のフローを詳細に測定する必要がある。

2.1.8 Decay spectroscopy of neutronrich isotopes in BRIKEN at RIBF

The origin of heavy elements still remains a mystery in nuclear astrophysics. The r-process is responsible for the synthesis of about half of transiron elements. To understand the r-process, nuclear properties of more than a thousand neutronrich isotopes should be investigated. Experimental data can verify existing theoretical nuclear models and improve the accuracy of r-process calculation.

The BRIKEN project is an international project for decay spectroscopy of neutron-rich nuclei and the collaboration consists of more than ten institutes in Japan, the United States, the United Kingdom, Spain, Hungary, etc. Since 2017, decay properties of more than 100 isotopes were measured. In April and May 2021, two experiments were conducted at RIBF for the regions of lanthanoids and $N \geq 126$. Our group was involved in the analysis of the later experiment.

The neutron-rich ion beam was produced by projectile fragmentation of 345 MeV/u ²³⁸U beam on ⁹Be target. Using the BigRIPS separator and the ΔE silicon telescope consisting of multiple layers of 600 μ m-thick silicon detectors, about 45 isotopes from Os to Po can be separated and identified. Candidates for new isotopes were observed.

The BRIKEN setup included the Wide-range Active Silicon-Strip Stopper Array for Beta and ion detection (WAS3ABi), two HPGe clover detectors, and 140 ³He counters ($\boxtimes 2.1.2$). The WAS3ABi has four layers of 1 mm-thick, 64 × 64 mm-large double-sided silicon strip detectors (DSSDs) with 32 vertical and 32 horizontal strips. It measures the position and timing of ion implantation, and the position, energy, and timing of β -decay events. γ ray and neutron emissions were measured by HPGe detectors and ³He counters respectively.

By time-correlating different types of events, such as ion implantation and β decay, decay properties were obtained. β -decay half-lives of more than 28 isotopes were evaluated. Among them, half-lives of 10 isotopes were measured for the first time. These half-life values may suggest the importance of the first-forbidden transition in the southeast quadrant of ²⁰⁸Pb. Besides, the half-lives at N = 126 shell closure are important to the third *r*-process abundance peak. Further analysis is ongoing.



 \boxtimes 2.1.2: The BRIKEN setup

2.1.9 Precision nuclear mass measurement by MRTOF-MS at RIBF

Multi-reflection time-of-flight mass spectrograph (MRTOF-MS) is an advanced technique to measure nuclear mass precisely and quickly. Mass measurement enables understanding of nuclear structure and calculation of neutron separation energy S_n of neutron-rich isotopes, which governs the photodissociation rate of nuclei in *r*-process. An MRTOF was developed at ZeroDegree spectrometer in RIBF, referred to as ZD-MRTOF ($\boxtimes 2.1.3$). It opened the door to access the masses of many exotic nuclei produced at the BigRIPS separator. The system was proven to be effective as masses of more than 70 isotopes were measured in one month of machine time in 2020.

MRTOF-MS determines the mass-to-charge ratio of a radioactive ion by measuring the time of flight of the ion reflecting between a pair of electrostatic mirrors. The ZD-MRTOF can achieve a mass resolving power of greater than 1000000 with a measurement time of 25 ms, allowing precise measurement of short-lived nuclei. The device was also coupled to a cryogenic helium-filled gas cell. It was responsible for thermalizing the RI beam from the BigRIPS separator. To maximize the stopping efficiency of ions in the gas cell, the thickness of a degrader installed before the gas cell was tuned for each isotope. A program to monitor the beam counters before and after the gas cell during a degrader scan was developed to determine the optimal degrader thickness.

In December 2021, masses of 74 Ni and 75 Ni, with half-lives of 508 ms and 332 ms respectively, were measured for the first time. These two isotopes will have an impact on the first *r*-process abundance peak in the relevant calculation.

<報文>



 \boxtimes 2.1.3: The ZD-MRTOF setup

(原著論文)

- J. Estee et al., "Probing the Symmetry Energy with the Spectral Pion Ratio", Phys. Rev. Lett. 126, 162701 (2021).
- [2] O. Hall et al., "beta-delayed neutron emission of r-process nuclei at the N=82 shell closure", Phys. Lett. B816, 136266 (2021).
- M. M. Juhasz et al., "First spectroscopic study of V-63 at the N=40 island of inversion", Phys. Rev. C 103, 064308 (2021).
- [4] D. Bazin et al., "Spectroscopy of Mg-33 with knockout reactions", Phys. Rev. C 103, 064318 (2021).
- [5] F. Browne et al., "Pairing Forces Govern Population of Doubly Magic Ca-54 from Direct Reactions", Phys. Rev. Lett. 126, 252501 (2021).
- [6] S. Escrig et al., "Persistence of the Z=28 shell gap in A=75 isobars: Identification of a possible (1/2(-)) mu s isomer in Co-75 and beta decay to Ni-75", Phys. Rev. C 103, 064328 (2021).
- [7] K. Wimmer et al., "Isomeric states in neutronrich nuclei near N=40", Phys. Rev. C 104, 014304 (2021).
- [8] S. Y. Jin et al., "Spectroscopy of Cd-98 by twonucleon removal from In-100", Phys. Rev. C 104, 024302 (2021).
- [9] R. Yokoyama et al., "Three-quasiparticle isomers in odd-even (159)'Pm-161: Calling for modified spin-orbit interaction for the neutron-rich region", Phys. Rev. C 104, L032303 (2021).
- [10] S. Koyama et al., "A liquid hydrogen target for radioactive beam experiments using the missing mass method", Nucl. Instrum. Method A1010, 165477 (2021).
- [11] B. D. Linh et al., "Investigation of the groundstate spin inversion in the neutron-rich Cl-47,Cl-49 isotopes", Phys. Rev. C 104, 044331 (2021).

- [12] M. Kaneko et al., "Rapidity distributions of Z=1 isotopes and the nuclear symmetry energy from Sn plus Sn collisions with radioactive beams at 270 MeV/nucleon", Phys. Lett. B822, 136681 (2021).
- [13] H. Watanabe et al., "Impact of shell evolution on Gamow-Teller beta decay from a high-spin longlived isomer in Ag-127", Phys. Lett. B823, 136766 (2021).
- [14] A. Fernandez et al., "Mirror energy differences above the 0f(7/2) shell: First gamma-ray spectroscopy of the T-z =-2 nucleus Zn-56", Phys. Lett. B823, 136784 (2021).
- [15] R. B. Gerst et al., "gamma-ray spectroscopy of low-lying yrast and non-yrast states in neutronrich Kr-94,Kr-95,Kr-96", Phys. Rev. C 105, 024302 (2022).
- [16] T. Koiwai et al., "A first glimpse at the shell structure beyond 54Ca: Spectroscopy of K-55, Ca-55, and Ca-57", Phys. Lett. B827, 136953 (2022).
- (学位論文)
- [17] 小岩井拓真, "In-beam gamma-ray spectroscopy of the neutron-rich nuclei beyond ⁵⁴Ca",博士論文, 2022年3月.
- [18] 齋藤岳志, "Study of muonic X-ray spectroscopy and nuclear muon capture reaction",博士論文, 2022年3 月.
- [19] 水野るり恵、「ミューオン原子 X 線分光のためのコンプトンサプレッサー付き ゲルマニウム検出器の開発」,修士論文,2022 年 3 月.
- [20] 山村周,「非等方的集団運動から探る高密度物質の状態方程式の研究」,修士論文,2022年3月.

一般講演

- [21] 小岩井拓真,「一中性子ノックアウト反応による^{55,57}Ti のインビームガンマ線核分光」,日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月 14-17 日, Online.
- [22] 水野るり恵,「ミューオン原子 X 線分光のためのコン プトンサプレッサー付き Ge 検出器開発」,日本物理 学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月 14-17 日, Online.
- [23] 水野るり恵,「Ge 検出器を用いたミューオン原子 X 線分光のための光子検出システムの性能評価」, Muon 科学と加速器研究, 2022 年 1 月 6-8 日, 大阪大学南部 陽一郎ホール.
- [24] 水野るり恵、「ミューオン原子 X 線分光のための Ge 検出器を用いた広ダイナミックレンジ光子検出システ ムの性能評価」,日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年), 2022 年 3 月 15-19 日, Online.
- [25] 水野るり恵,「Si ミューオン原子由来の生成原子核分 岐比の絶対値測定実験」,ソフトエラー勉強会,2022 年3月27-29日,山口県須防大島.

<学術講演>

⁽国内会議)

[26] 齋藤岳志,「ミューオン原子 X 線分光とその将来について」, ソフトエラー勉強会, 2022 年 3 月 27-29 日,山口県須防大島.

招待講演

- [27] 水野るり恵,「ミューオン触媒核分裂」, RCNP研究 会「ミューオン原子核捕獲反応による原子核関連研究 の可能性」, 2022年3月24-25日, 大阪大学核物理研 究センター.
- [28] 齋藤岳志,「原子核ミューオン捕獲に伴う放出中性子 の測定」, RCNP 研究会「ミューオン原子核捕獲反応 による原子核関連研究の可能性」, 2022 年 3 月 24-25 日, 大阪大学核物理研究センター.
- [29] 新倉潤,「ミューオン原子 X 線測定のための検出器 開発」, RCNP 研究会「ミューオン X 線 γ 線分光」, 2022 年 3 月 24-25 日, 大阪大学核物理研究センター.

2.2 横山(将)・中島研究室

本研究室では、素粒子物理・宇宙素粒子物理に関す る実験・観測を行っている。現在は特に、スーパーカ ミオカンデ実験、およびスーパーカミオカンデと大 強度陽子加速器 J-PARC を使ったニュートリノ振動 実験 (T2K 実験)を推進している。同時に、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、そ の後継として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。

2021年4月に中島が着任し、本年度から横山(将)・中島研としての活動を始めた。

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。荷 電共役 (C)・空間反転 (P) という非常に基本的な対 称性の組み合わせである CP 対称性が成り立ってい るかどうかは、物理学の根本的な問いである。さら に、ニュートリノにおける CP 対称性の破れは、宇 宙から反粒子が消えてしまった謎にも繋がると期待 されている。

19

T2K 前置検出器アップグレード

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

我々の研究室では、T2K 実験の感度をさらに向上 させるために前置検出器を改良型の新装置と入れ替 えるアップグレード計画を提案し、国際共同プロジェ クトを主導してきた。中でも特に、プラスチックシ ンチレータのキューブを約 200 万個並べて 3 方向か ら読み出す新構造の検出器 SuperFGD の建設と、前 置検出機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 の開発 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。64 個の MPPC を1 枚の基板に搭載し、波長変換ファイバーと位置を合 わせた上で接続する。基板に搭載した後に、MPPC が正常に動作しその基本的な性能が要求を満たすも のであることを確認する必要がある。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) の試験を担当す る。このために、大量の MPPC を短期間で評価する システムを開発した。ゲイン、光検出効率、ブレー クダウン電圧、暗雑音レート、クロストーク率、の 5つのパラメータについて、自動的に印加電圧を変 えながら5枚の基板を同時に測定するシステムを構 築し、品質保証に必要な精度で測定が可能なことを 確立した。

また、建設後に宇宙線等を用いて装置の応答の較 正を行う手法の開発を始め、必要な較正項目や要求 される精度の確認と、実機で現実的に達成できる較 正精度の見積りの両面から検討を進めている。

T2K 実験は開始から 10 年以上が経っており、前 置検出器のアップグレードに伴って老朽化した基盤 設備の更新も進めている。このうち、検出器の冷却 水システムの整備も担当している。

前置検出器の事象再構成と電子ニュートリノ事象選択 アップグレード後の前置検出器において、SuperFGD 検出器を中心に他の検出器の情報と組み合わせて統 合的に飛跡再構成を行うソフトウェアの開発も進め た。さらに飛跡再構成によって得られた情報を解析 に利用できるフォーマットに変換するソフトウェア を実装するなど、運用開始後に直ちにデータ解析に 移るための準備を行った。

CP 対称性の破れの測定には、電子ニュートリノの 反応断面積の測定が重要である。しかし、これまで の前置検出器では、最も重要な運動量 500 MeV/c 以 下の領域で γ ($\rightarrow e^+e^-$)による電子・陽電子がバッ クグラウンドとなり測定が難しかった。当研究室で は、細分化された SuperFGD の構造を利用し、電子 と γ の識別を行うアルゴリズムを開発している。ま た、ニューラルネットワークを用いた粒子識別や電 子・ガンマ線識別の新手法の開発も進めている。

ニュートリノ振動の研究

T2K 実験では、解析に様々な改良を加え、ニュー トリノ振動測定の精度を改善している。現在、終状 態に π 中間子を含むミューオンニュートリノの反応 事象を新たに解析に使用するデータに加えたほか、 ニュートリノ-原子核反応モデルの取り扱いや前置検 出器のデータ解析を改善し、CP 対称性を破る複素位 相 δ_{CP} に対する制限を更新する解析を進めている。

また、後述の通りスーパーカミオカンデの純水に ガドリニウムを加えたことで中性子の検出効率が向 上した。この新たな手段を利用することで、ニュー トリノ振動の測定をはじめとする T2K 実験での物理 解析の感度を向上させる研究を進めている。

2.2.2 スーパーカミオカンデ実験

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

SK-Gd

スーパーカミオカンデは、2020 年夏に5万トン の超純水中に13トンの硫酸ガドリニウム八水和物 (Gd₂(SO₄)₃·8H₂O)を添加し、SK-Gdとして新たな 観測を開始した。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 たな研究を推進することが可能となる。

主な研究テーマの例として、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。2022年には、ガドリニウムをさら に追加で導入し、さらなる高感度化を実現する予定 である。

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。 神岡の山中を突き抜けて地下まで到達する高エネル ギーの宇宙線ミューオンによる原子核破砕で生成さ れる中性子を利用することで、検出器全域にわたって 連続的に応答の較正を行うことが可能となる。デー タ中からそのような中性子の信号を抜き出す手法を 開発し、検出器応答の位置依存性を測定し、また応 答が時間的に安定していることを確認した。

ガドリニウム追加導入に向けた準備 2022年には、 2020年の導入量の約2倍に相当する26トンの硫酸 ガドリニウム八水和物をスーパーカミオカンデに溶 解することを目指している。そのための超高純度硫 酸ガドリニウムの製造及び、その放射性不純物のス クリーニングを進めている。また、ガドリニウム追 加導入に備え、Gdの溶解に用いる水純化循環装置の 改造を行なっている。特に、前回の2倍の26トンの 硫酸ガドリニウム八水和物を35日間に渡って途切れ ることなく継続的に溶解させる必要があるため、そ のための溶解手法の改良を進めている。

陽子崩壊の探索

4つの基本的な相互作用のうち、標準模型で統一 された電磁相互作用と弱い相互作用に加え、10¹⁶GeV 程度の超高エネルギーでさらに強い力も統一する大 統一理論では、クォークとレプトンも統一され、陽 子の崩壊が予言される。

我々の研究室では、陽子が反荷電レプトンと η 中間子に崩壊するモードの探索を行なってきた。昨年 度までの η 中間子が2本の γ に崩壊するモードに加 え、本年度は η 中間子が3つの π^0 に崩壊するモード も含めて解析の更新を終えた。残念ながら有意な信 号は見つからなかったが、陽子が陽電子と η 中間子 ($\mu^+ と \eta$ 中間子)に崩壊するモードに対し、90%信 頼度で1.4×10³⁴ (7.3×10³³)年という、このモード の部分寿命に対する世界で最も厳しい下限値を得た。

2.2.3 ハイパーカミオカンデ計画

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

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

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。2021年3月から、毎月約300個の光電子 増倍管が納入されている。最初の約900個は全数の 外観や特性を検査し、結果を製造者である浜松ホト ニクスにフィードバックしていくつかの問題を防止 した。その後は一部の性能を評価してモニターし継 続的に製造者とも状況を共有することで、長期間の 製造で要求性能を満たす製品が安定的に供給される よう品質保証を行なっている。これら大量の光電子 増倍管の情報を集約的に管理するためのデータベー スも整備している。また、高水圧下での光電子増倍 管の連鎖爆縮を防ぐためのカバーの開発にも参加し、 2022年3月には爆縮に対してカバーが機能するか確 かめる試験を行った。

検出器の較正と純水システム

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

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

2.2.4 新検出器開発

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

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

Gdを用いた無機結晶シンチレーター ニュートリノ が、それ自身の反粒子であるという性質(マヨラナ性) を持つと、ある種の原子核においてニュートリノを伴 わない二重ベータ崩壊が起こると予言されている。ガ ドリニウム 160 もニュートリノを伴わない二重ベータ 崩壊 (¹⁶⁰Gd →¹⁶⁰ 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 を含んだ無機結 晶シンチレーターを開発している。2021年に約 100 g の Ce ドープ GAGG 結晶 (Ce : Gd₃Al₁₂Ga₃O₁₂)を 製作し、現在その放射性不純物の含有量の評価を進 めている。

<報文>

(原著論文)

- [1] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Measurements of $\overline{\nu}_{\mu}$ and $\overline{\nu}_{\mu} + \nu_{\mu}$ charged-current cross-sections without detected pions or protons on water and hydrocarbon at a mean anti-neutrino energy of 0.86 GeV," PTEP **2021**, no.4, 043C01 (2021).
- [2] A. Orii *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Search for tens of MeV neutrinos associated with gamma-ray bursts in Super-Kamiokande," PTEP 2021, no.10, 103F01 (2021).
- K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Improved constraints on neutrino mixing from the T2K experiment with 3.13 × 10²¹ protons on target," Phys. Rev. D 103, no.11, 112008 (2021).
- [4] K. Abe *et al.* [Hyper-Kamiokande Collaboration], "Supernova Model Discrimination with Hyper-Kamiokande," Astrophys. J. **916**, no.1, 15 (2021).
- [5] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "First T2K measurement of transverse kinematic imbalance in the muon-neutrino charged-current single- π^+ production channel containing at least one proton," Phys. Rev. D **103**, no.11, 112009 (2021).
- [6] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Search for neutrinos in coincidence with gravitational wave events from the LIGO-Virgo O3a Observing Run with the Super-Kamiokande detector," Astrophys. J. **918**, no.2, 78 (2021).
- [7] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Diffuse supernova neutrino background search at Super-Kamiokande," Phys. Rev. D 104, no.12, 122002 (2021).
- [8] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "First gadolinium loading to Super-Kamiokande," Nucl. Instrum. Meth. A **1027**, 166248 (2022).
- [9] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Search for solar electron anti-neutrinos due to spin-flavor precession in the Sun with Super-Kamiokande-IV," Astropart. Phys. **139**, 102702 (2022).

(国内雑誌)

- [10] 横山将志,「測定器開発プラットフォーム:全体の概要 とプラットフォーム A の紹介」,高エネルギーニュー ス第40巻2号
- [11] 児玉将馬,「CERN Summer Student Programme 2021 参加報告」, 高エネルギーニュース 第 40 巻 3 号

(学位論文)

- [12] Yoshimi Yoshimoto, "Development of a Multiprocessing Performance Test System of Multi-Pixel Photon Counters for Super-Fined Grained Detector," Master's thesis, September 2021.
- [13] Wan Kun, "Time Dependent Charge-Parity Violation in $B^0 \to K^0_S K^0_S K^0_S$ in Belle II early operation," Ph. D thesis, May 2021.

<学術講演>

(国内会議)

一般講演

- [14] 江口碧,「T2K 前置検出器アップグレードに向けた電 子ニュートリノ反応事象選別アルゴリズムの開発」, 日本物理学会 2021 年秋季大会,2021 年 9 月 14–17 日,オンライン
- [15] Yoshimi Yoshimoto, "Development of a multiprocessing performance test system of Multi-Pixel Photon Counters for Super-Fine Grained Detector of T2K," 同上
- [16] 児玉将馬,「T2K 実験における新型前置検出器の宇宙 線等を用いた較正手法の開発」,第 28 回 ICEPP シ ンポジウム,2022 年 2 月 20-23 日,長野県 志賀レー クホテル
- [17] 志摩靜香,「SK-Gd における宇宙線ミューオン由来の 中性子捕獲信号を用いたエネルギー再構成の改善」, 同上
- [18] 児玉将馬,「T2K 実験における新型前置検出器 Super-FGD の宇宙線等を用いた較正手法の開発」,日本物 理学会第 77 回年次大会 2022 年 3 月 15–19 日,オン ライン
- [19] Yoshimi Yoshimoto, "Performance test of Multi-Pixel Photon Counters for Super-Fine Grained Detector of T2K," 同上
- [20] 志摩靜香,「SK-Gd における宇宙線ミューオン由来の 核破砕中性子捕獲信号を用いたエネルギー較正の研 究」,同上

招待講演

- [21] 横山将志,「光センサー・シンチレーター周辺の最新 状況レビュー」, 高エネルギー将来計画委員会:第13
 回勉強会, 2021年8月27日, オンライン
- [22] 中島康博,「SK-Gd における超新星観測の現状と展望」,日本物理学会 2021 年秋季大会,2021 年 9 月 14-17 日,オンライン
- [23] 中島康博,「高精度反ニュートリノ観測のための有機 液体 TPC の開発」,日本物理学会第77回年次大会, 2022年3月15-19日,オンライン
- (セミナー)
- [24] 横山将志,「宇宙は何でできている? スーパーカミオ カンデでの研究最前線」,愛媛県立松山南高等学校 第 4回南高教養アップ講座,2021 年 7 月 29 日,オン ライン

- [25] 中島康博, "Status and prospects of the Super-Kamiokande and the Hyper-Kamiokande experiments," KEK 素核研招聘セミナー, 2021 年 11 月 19 日, オンライン
- [26] 横山将志,「東大からの模擬講義」,愛媛県立宇和島東 高等学校 STREAM 研修,2022 年 1 月 22 日,オン ライン

2.3 浅井研究室

本研究室は、「真空の構造の解明」、「力の統一の実 現」等を目指して、エネルギーフロンティア加速器実 験と非加速器実験の両面から研究を行っている。素 粒子物理国際研究センターと共同でLHC・ATLAS 実験でのヒッグス粒子や超対称性粒子や余剰次元の 探索で主導的な役割を果たしてきた。これと並んで 小規模な非加速器実験を多数展開し、標準理論を超え た新しい素粒子現象の探索を二つの異なる角度から 行っている。特に、光を使った素粒子実験の開拓を 目指している。さらに、2021年度からは素粒子物理 国際研究センター (量子 AI テクノロジー研究分野)・ 量子ネイティブ育成センターと協力して、基礎科学 への応用を目指した量子技術研究を行っている。

2.3.1 LHC・ATLAS 実験での研究

世界最高エネルギー加速器実験LHC(写真 2.3.4) は、2015年から重心系エネルギーが13 TeV に増強 されて運転を再開している。2018年までに、積算ル ミノシティーで約140 fb⁻¹の実験データが得られ、 本研究室は、素粒子物理国際研究センターと共同で ヒッグス粒子の発見につづいて、ヒッグス粒子の研 究や超称性粒子探索を行っている。



図 2.3.4: LHC 加速器。

Vector Boson Scattering 事象に対する感度向上 のためのクォーク・グルーオン識別手法の開発

ゲージ粒子とヒッグス粒子の結合の強さが標準理 論からズレていたり、標準理論を超える物理で予言 されるような拡張ヒッグスセクターが存在したりす ると、Vector Boson Scattering (VBS)の反応断面積 が大きくなると考えられるため、VBS は標準理論の 検証や標準理論を超えた物理現象の探索において有 用である。VBS では 2 つのゲージ粒子 (W ボソン、 Z ボソン)が生成されるが、信号対バックグラウンド 比 (SB 比)と統計量の両立が期待されるセミレプト ニック崩壊に着目した研究を行った。

この過程では量子色力学 (Quantum chromodynamics, QCD) 相互作用によって生じるグルーオンが 主要なバックグラウンドになるため、クォーク・グルー オン識別が重要になる。識別能力を向上させるため、 ニューラルネットワークによる識別手法として多層 パーセプトロン (Multilayer perceptron, MLP)、畳み 込みニューラルネットワーク (Convolutional neural network, CNN)、Deep Sets, Energy Flow Networks を導入し、従来用いられてきたブーステッド決定木 (Boosted Decision Tree, BDT) とそれぞれの手法の 識別能力をモンテカルロ (Monte Carlo, MC) シミュ レーションサンプルを用いて比較した。

クォーク・グルーオン識別手法の ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲線を図 2.3.5 に示す。 BDT に比べ、Energy Flow Networks や Deep Sets ではクォーク識別感度 80 %におけるグルーオン識別 感度が約 10 %向上した。またこの新規識別手法を適 用した場合、ATLAS 実験における VBS イベントの 統計的有意性 (significance) が約 4 %向上すること を、MC サンプルを用いた解析によって示した。今 後、グラフニューラルネットワーク (Graph neural network, GNN) の活用や、今回の研究では用いな かった粒子の電荷などの情報を利用することにより、 さらなる識別性能向上を目指す。



図 2.3.5: クォーク・グルーオン識別手法の ROC 曲 線 [72]。横軸がクォーク識別感度を、縦軸がグルーオ ン識別感度を示す。Energy Flow Networks と Deep Sets がほぼ同じ識別能力で、もっとも高性能であっ た。

データベースを利用したトリガーシステムの開発・ 試験

LHC 加速器をアップグレードした「高輝度 LHC」 は、2029 年に運転開始予定である。アップグレード 後の瞬間最高ルミノシティーは 7.5×10^{34} cm⁻² s⁻¹ まで増強される。加速器のアップグレードに伴い、ト リガーシステムのエレクトロニクスも刷新される。

ATLAS 検出器の一部である TGC 検出器とエンド キャップミューオントリガーシステムは高い横運動 量を持つミューオンを含む事象を選別するために使 用されており、32万チャンネルから構成される。各 チャンネルのヒット情報は専用エレクトロニクスに よって実現された多段の論理回路によって処理され るが、これらすべての接続情報や、チャンネル間コイ ンシデンスの情報などを一元的に管理するリレーショ ナル・データベース (RDB) を作成した (図 2.3.6)。 この RDB を用いて紐付けたチャンネルの接続情報や チャンネル間コインシデンスの情報から、トリガー回 路の最前段部分にあたる 32 万チャンネル分のファー ムウェアの自動生成や、回路試験の際に利用するヒッ トパターンの自動生成を行った。また、この RDB は チャンネルやチェンバー等の性質に関する履歴情報 についても一元的に管理できるように設計されてお り、これは高輝度 LHC 運転中での利用を想定して いる。



図 2.3.6: 1/24 セクターにおけるケーブリングを管理 するデータベースの設計 [86]。MySQL による RDB であり、コンポーネントの対応ごとに表を作成し、共 通する列を使って表同士を結合している。配線の変 更があれば該当箇所の表のみ書き換えればよいので、 情報の管理がしやすい。

2.3.2 小規模実験で探る標準理論を超えた 新しい素粒子現象の探索

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

電子とその反粒子 (陽電子, e⁺) の束縛系であるポ ジトロニウム (Positronium, Ps) はボース粒子であ るため、冷却するとボース・アインシュタイン凝縮 (Bose-Einstein condensate, BEC) を起こすと考えら れる。Ps-BEC を実現し、反物質にはたらく重力の 研究や物質と反物質の対称性の研究、ガンマ線レー ザー実現などに応用すべく研究している。本研究室 では、Psの熱化 [4] とレーザー冷却を組み合わせた新 しい冷却手法を提案した。早期に Ps レーザー冷却を 実現すべく、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 物 質構造科学研究所 (Institute of Materials Structure Science, IMSS) 低速陽電子実験施設 (Slow Positron Facility, SPF) で実験を行っている。2021 年度は 五神研究室・大学院工学系研究科吉岡研究室と共同 で開発したプロトタイプ Ps 冷却用レーザー [2] を用 いて Ps レーザー冷却原理実証実験に取り組むととも に、陽電子蓄積装置開発および Ps 生成・濃縮・冷却 材開発を行った。

KEK-SPF-B1 ビームラインにおけるレーザー冷却 実験セットアップ写真を図 2.3.7(a) に示す。Ps 冷却 用紫外レーザー(波長 243 nm)を照射したところ、検 出用 Optical parametric oscillator (OPO) レーザー (波長 ~243 nm)の波長に依存せず Ps の $1S \rightarrow 2P$ 遷移率が約2倍に増大する想定外の結果が得られた。 冷却レーザーを使わずに、検出用レーザーを2つに 分けて片方を検出用、他方をモック冷却用レーザー として扱い、紫外光照射による実験系への影響を調 査した結果、照射によってレーザー反射ミラーが負 に帯電し、モック冷却用レーザー照射後約5分間に わたり遷移率が増大するように見えてしまうことが 判明した。そこで帯電の影響を受けない遷移率測定 手法を開発して解決し(図 2.3.7(b))、2022年度に Ps レーザー冷却原理実証実験を行う準備を完了した。

また、産総研、九州大学、KEK、原研と協力して 高密度ポジトロニウム生成ターゲットの開発を行っ ている。2021 年度は産総研ナノプロセシング施設 (Nano-Processing Facility, AIST-NPF) においてナ ノプロセシングを駆使した手法による Ps 生成材開発 に取り組み、Si 基板上4 mm 角の範囲に線幅 30 nm、 ピッチ 100 nm、溝深さ 190 nm の格子パターンを形 成することに成功した (図 2.3.8)。同サンプル表面に 48 nm の SiO₂ 酸化膜形成後、KEK-SPF において Ps 飛行時間 (Time-of-flight, TOF) 測定 [3] を行っ た。データは解析中である。

多波長観測による暗黒物質の間接探索

宇宙にはまだ多くの謎が残されているが、その謎 の一つが暗黒物質の正体である。宇宙の27 %を占め ると考えられている暗黒物質は目で見ることができ ず、何でできているのかもわかっていない。ミュー 粒子の異常磁気能率の測定結果から、質量 500 GeV 程度の超対称性粒子が暗黒物質であることが示唆さ れる。この超対称性粒子暗黒物質を仮定すると、銀



図 2.3.7: (a) KEK-SPF における Ps レーザー冷却実 験セットアップ写真、(b) モック冷却用レーザーを用 いた測定で得られた Ps の 1*S* → 2*P* 遷移曲線 [88]。 ミラー帯電対策の結果、モック冷却用レーザー照射 の有無による遷移率の変化を抑制することに成功し た。

河中心で対消滅した時に高エネルギー電子を放出す ると考えられる。この高エネルギー電子から二次的 に放出されるガンマ線や電波のスペクトル、強度を 計算した。バックグラウンドとの比較により、いく つかの矮小楕円体銀河が有力な観測対象となること がわかった。今後、観測を計画している。

ミリ波を用いた光と弱い結合をもつ粒子の探索

標準模型を超えた新しい物理で予言される extra U(1) ゲージボソンとしてパラフォトンが挙げられ る。これは電磁場と混ざり合うので、もしパラフォ トンが暗黒物質であれば、銀河に暗黒物質として存 在するパラフォトン (Dark photon, Hidden photon) が導体表面に入射した際、表面からほぼ垂直に転換 光 (電磁波)を放出すると予想される。この電磁波 を超伝導 SIS 検出器で検出することで、ミリ波領域 (パラフォトン質量 $m_X = 0.9$ –1.1 meV, 転換光周波 数 220–268 GHz) におけるパラフォトン暗黒物質探 索を行った。

実験セットアップ写真を図 2.3.9 に示す。転換光 (平面波)をより多く受信させ変換金属プレートの 有効面積を最大化するための光学系を設計・製作し、 パラフォトン由来の信号を探索した。測定の結果、 有意な信号は得られなかったが、探索領域の mixing parameter χ に対し 95 %信頼区間で $\chi < 10^{-10}$ の制 限を得、既存の制限を 1 桁程度更新することに成功



図 2.3.8: AIST-NPF において Si 基板上に形成した 格子パターン [85]。(a) 光学顕微鏡による 4 mm 角 全体の写真。(b) 電子顕微鏡による格子パターン拡 大写真。

した (図 2.3.10)。今後はより感度を高めるためにス プリアスの対策や narrow mode での測定を試みる計 画である。



図 2.3.9: パラフォトン探索実験セットアップ写 真 [73]。左は作製したアルミニウム製球面ミラー (転 換光放射体)、右はセットアップ全体。理化学研究所 の坂井・星惑星形成研究所の SUMIRE の一部をミリ 波受信機・スペクトロメータとして使用した。

2.3.3 基礎科学への応用を目指した量子技 術研究

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



Dark photon mass, m_X [eV]

図 2.3.10: パラフォトン暗黒物質に対する制限 [73]。 塗られた領域は宇宙論・実験・天体物理学からの各 種制限を示し、その下側の領域でパラフォトンが暗 黒物質となりうる。"ThisResult"が本実験による新 たな排除領域であり、挿入図は本実験付近の拡大図。

量子アルゴリズムの最適化問題への応用

最適化問題は実験データへのモデルの当てはめ (fitting) から機械学習、さらには AI 開発に至るまで幅 広い分野における重要な課題である。現在の Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) 時代において は量子・古典ハイブリッド型のアルゴリズム研究が 盛んになされているが、最適化過程に古典コンピュー ターを使用していることによる限界が将来的に訪れ ると考えられる。そこで、誤り耐性量子コンピュー ターが実用化する将来を見越し、最適化過程に量子 計算を適用する可能性や量子優位性を、探索問題、勾 配推定、局所最適化の観点から研究している。

勾配推定について、ブラックボックスな整数変数・ 整数係数多項式関数に対し 2πの整数倍の位相の対称 性に着目して不必要な項を切り落とす新しい量子勾 配推定アルゴリズムを考案し、その検証を行った。本 アルゴリズムには関数に対する強い仮定といった制 限が存在するが、利点として、クエリ計算量が多項式 関数の次元および次数に依存せず O(1) であること、 また測定したときに一意な分布が得られることが挙 げられる。観測を除いた本アルゴリズムに対応する 量子回路を図 2.3.11 に示す。考案したアルゴリズム を検証するため、Qiskit によるシミュレーションおよ び ibm_kawasaki (神奈川県川崎市) を用いた実機計 算を行った。1 次関数を用いた場合に 8,192 回の試行 (Shots) で観測されたビット列の分布を図 2.3.12 に 示す。実機においてもノイズを考慮したシミュレー ションと同様の結果が得られており、NISO 時代に おいても 70%以上の確率で正しい結果が得られるこ とを確認した。提案したアルゴリズムそのものには 適用限界があるが、位相の対称性を活用したより高 度なアルゴリズムを考案するなどの研究を今後進め ていく。



図 2.3.11: 勾配推定のための量子回路 [74]。



図 2.3.12: 観測されたビット列の分布 [74]。閾値 100 shots に満たなかった状態はすべて all the rest にまとめた。測定エラー逓減を行った結果も示した。

繰り返し構造をもつ量子機械学習モデルの性能評価 と向上

量子コンピュータは従来のコンピュータに対し、計 算速度やモデル複雑性の点で一部の問題において優 位性を持つ。その応用先としては量子化学計算や組 合せ最適化、機械学習など広く検討されている。し かし現状の量子コンピュータはノイズの影響が大き いことから、量子ビットを多く必要とする計算は困難 となっている。そこで、特に量子機械学習分野にお いて実機での機械学習を実現しようと、ノイズの影響 の小さい学習モデルである data re-uploading に対し ノイズ耐性を持つと予想される QRAC というデータ 符号化手法を用いようと考えた。Data re-uploading は図 2.3.13 のように繰り返し構造を持つことで少な い量子ビットでの学習が可能となっている。QRAC は古典データを予め定まった候補の量子状態に変換 する符号化手法であり、ノイズの影響を受けても分 類性能が低下しにくいと考えた。



図 2.3.13: Data re-uploading の量子回路。

まず基本性能を調べるためにノイズのない状況で

の性能を比較したところ、QRACを加えることで性能 が低下してしまった。今回はその原因解明に取り組 んだ。繰り返し構造を持つ学習モデルの性能をフー リエ級数展開により議論している先行研究を用いて 本研究の性能悪化の原因理解に取り組んだ。結果と しては、QRACを用いた場合に入力データとして多 く存在する、古典の異符号データが学習性能を下げ ていると予想された。そこで異符号データを減らす ようなデータ変換方法に変化させたときの学習性能 の変化を調べた。図 2.3.14の横軸は右に進むほど異 符号データの少ない符号化手法となっており、縦軸は 分類の正解率を表す。異符号データが減るほど正解 率が向上していることがわかる。今後はノイズのあ る状況下での性能評価と向上に取り組んでいきたい。



図 2.3.14: QRAC による学習性能の異符号データ量 依存性。横軸は右ほど異符号データの少ない符号化 手法であり、縦軸は分類の正解率を示す。

<受賞>

 [1] 水原慎一、第45回量子情報技術研究会学生発表賞、 電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ量子 情報技術特別研究専門委員会、2022年2月10日 (2022年5月30日受賞式予定)。

<報文>

(原著論文)

- [2] K. Yamada, Y. Tajima, T. Murayoshi, X. Fan, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, E. Chae, K. Shu, and K. Yoshioka, "Theoretical Analysis and Experimental Demonstration of a Chirped Pulse-Train Generator and its Potential for Efficient Cooling of Positronium", Phys. Rev. Applied 16, 014009 (2021).
- [3] A. Kawasuso, M. Maekawa, A. Miyashita, K. Wada, Y. Nagashima, and A. Ishida, "Positronium emission from GaN(0001) and AlN(0001) surfaces", J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 54, 205202 (2021).
- [4] K. Shu, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, N. Oshima, B. E. O'Rourke, and K. Ito, "Observation of orthopositronium thermalization in silica aerogel at cryogenic temperatures", Phys. Rev. A 104, L050801 (2021).

The ATLAS Collaboration [5] JHEP **11**, 209 (2021). [6] JHEP **12**, 131 (2021). [7] Phys. Rev. D 104, no.11, 112005 (2021). [8] Phys. Rev. D 104, no.11, 112010 (2021). [9] JHEP **11**, 169 (2021). [10] JHEP **11**, 229 (2021). [11] JHEP **11**, 118 (2021). [12] JINST 16, P08025 (2021). [13] Eur. Phys. J. C 81, no.11, 1023 (2021). [14] Eur. Phys. J. C 81, no.12, 1087 (2021). [15] Eur. Phys. J. C 81, no.12, 1118 (2021). [16] Phys. Rev. Lett. 127, no.14, 141801 (2021). [17] JHEP **10**, 013 (2021). [18] JHEP 07, 173 (2021). [19] Eur. Phys. J. C 81, no.8, 737 (2021). [20] JHEP 07, 167 (2021). [21] JHEP 06, 003 (2021). [22] Phys. Lett. B 819, 136412 (2021). [23] Phys. Rev. D 104, no.3, 032014 (2021). [24] JHEP 07, 005 (2021). [25] Phys. Lett. B 822, 136651 (2021). [26] JINST 16, no.07, P07029 (2021). [27] Phys. Rev. D 103, no.11, 112006 (2021). [28] JHEP 06, 145 (2021). [29] JHEP 04, 165 (2021). [30] JHEP **05**, 093 (2021). [31] JHEP 06, 146 (2021). [32] JHEP 06, 179 (2021). [33] Phys. Rev. C 104, no.1, 014903 (2021). [34] JHEP 07, 223 (2021). [35] JINST 16, P07006 (2021). [36] Eur. Phys. J. C 81, no.7, 600 (2021). [37] JHEP 04, 174 (2021). [38] Eur. Phys. J. C 81, no.7, 578 (2021). [39] Phys. Rev. C 104, 024906 (2021). [40] Phys. Rev. D 103, no.11, 112003 (2021). [41] Eur. Phys. J. C 81, no.10, 860 (2021). [42] Phys. Rev. Lett. **127**, no.5, 051802 (2021). [43] Eur. Phys. J. C 81, no.6, 537 (2021). [44] Eur. Phys. J. C 81, no.5, 396 (2021). [45] JHEP **02**, 226 (2021). [46] JHEP **02**, 143 (2021). [47] JHEP 03, 268 (2021).

- [48] Phys. Rev. Lett. **126**, no.12, 121802 (2021).
- [49] Phys. Lett. B 816, 136190 (2021).
- $[50]\,$ Nature Phys. 17, no.7, 819-825 (2021).
- [51] Eur. Phys. J. C 81, no.4, 313 (2021).
- [52] Eur. Phys. J. C 81, no.1, 11 (2021).
- [53] Eur. Phys. J. C 81, no.4, 332 (2021).
- [54] Eur. Phys. J. C 81, no.4, 334 (2021).
- [55] Phys. Rev. Lett. 126, no.7, 072301 (2021).
- [56] Eur. Phys. J. C 81, no.3, 218 (2021).
- [57] JHEP 11, 050 (2021).
- [58] Phys. Lett. B 816, 136204 (2021).
- [59] Nature Phys. 17, no.7, 813-818 (2021).
- [60] JHEP **01**, 188 (2021).
- [61] Phys. Lett. B 812, 135980 (2021).
- [62] Eur. Phys. J. C 81, no.2, 178 (2021).
- [63] Eur. Phys. J. C 81, no.8, 689 (2021).
- [64] Eur. Phys. J. C 81, no.8, 720 (2021).
- [65] Eur. Phys. J. C 81, no.2, 163 (2021).
- [66] JHEP **01**, 033 (2021).
- [67] Eur. Phys. J. C 81, no.4, 342 (2021).
- [68] Phys. Rev. Lett. 126, no.12, 122301 (2021).
- [69] Phys. Rev. D 104, no.1, 012010 (2021).
- [70] Phys. Lett. B 812, 135991 (2021).

(学位論文)

- [71] Cédrine Hügli, "Study of the chargino discovery at FCC-hh and inner tracker proposition", 修士論文 (2021).
- [72] 盧承佑、"LHC-ATLAS 実験におけるクォーク.グ ルーオンの識別の向上",修士論文 (2022).
- [73] 並木飛鳥, "超伝導 SIS 検出器を用いたミリ波領域に おけるパラフォトン暗黒物質探索", 修士論文 (2022).
- [74] 水原慎一,"データベース検索と勾配推定における 量子アルゴリズムの最適化問題への応用",修士論文 (2022).
- (著書)
- [75] 石田明, "ポジトロニウムの超微細構造の新しい方 法による精密測定", 伊藤賢志・岡壽崇・小林慶規・ 藤浪真紀 編『陽電子科学 —基礎から応用まで—』日 本陽電子科学会, pp. 265–272 (2021).
- <学術講演>

(国際会議)

一般講演

[76] C. Kawai, "Indirect detections of DM using Radio and Gamma", Kashiwa dark matter symposium 2021, December 1, 2021, Online.

招待講演

- [77] A. Ishida, "Dense positronium formation for Bose-Einstein condensation", 12.5th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (PPC12.5), August 31, 2021, Internet.
- [78] S. Asai, "ILC-Status", ECFA meeting, November 19, 2021, Online.

ポスター

[79] S. Asai, "Dark matter indirect searches using Radio and MeV gamma rays", Kashiwa dark matter symposium 2021, December 1, 2021, Online.

(国内会議)

一般講演

- [80] 石田明, "ボース・アインシュタイン凝縮実現のためのポジトロニウム冷却",第58回アイソトープ・放射線研究発表会、2021年7月9日、オンライン開催.
- [81] 水原慎一,"整数変数・整数係数多項式関数への勾配 推定量子アルゴリズムについての研究",第45回量子 情報技術研究会(QIT45)、2021年11月30日、オ ンライン開催.
- [82] 盧承佑, "LHC-ATLAS 実験におけるクォーク. グ ルーオン識別の向上", 第 28 回 ICEPP シンポジウ ム、2022 年 2 月 21 日、志賀レークホテル、長野.

日本物理学会:2021 年秋季大会: オンライン開催: 2021 年 9 月

- [83] 盧承佑、"LHC-ATLAS 実験におけるニューラルネットワークを用いたクォーク・グルーオンジェット識別".
- [84] 石田明, "ボース・アインシュタイン凝縮を目指した ポジトロニウム冷却".
- [85] 石田明, "ボース・アインシュタイン凝縮を目指した 高密度ポジトロニウム生成材料の開発".

日本物理学会: 第 77 回年次大会: オンライン開催: 2022 年 3 月

- [86] 山下恵理香, "リレーショナル・データベースの導入 による大規模トリガーシステム情報の一元管理とそ の応用— システム開発・試験・運用".
- [87] 河井力, "電波・ガンマ線を用いた暗黒物質の探索".
- [88] 石田明, "ボース・アインシュタイン凝縮を目指した ポジトロニウム冷却".
- [89] 寺尾萌里乃, "量子ランダムアクセス符号と繰り返し 入力を用いた量子機械学習の性能評価".

3 物性理論

3.1 小形研究室

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

3.1.1 ディラック電子系

ギャップを持つ二次元ディラック電子系でのスピン流

質量のある (エネルギーギャップがある) ディラッ ク電子系について、スピンの関与した特異な輸送現象 を明らかにした。スピン軌道相互作用によってギャッ プが開いた場合、一般にトポロジカルな量であるス ピンに依存したベリー曲率が生じる。この場合には スピンホール効果や磁場中のスピン伝導度など、ス ピン流が関与した物理量にベリー曲率の寄与が典型 的に現れることがわかった。この現象は、擬 2 次元 有機導体である α-(BETS)₂I₃ において期待でき、そ のスピンホール伝導度の大きさは Pt に匹敵する大き なものであると評価された (図 3.1.1)。[3, 4, 37]

二次元ディラック電子系における電磁双対性

分子性固体 α-(BETS)₂I₃ は、グラフェンやトポロ ジカル絶縁体の表面状態のようなフィルム形状の物 質と異なり、磁化率の絶対値測定が可能な純良単結 晶の二次元ディラック電子系である。この物質の磁 化率、電気伝導度、¹³C 核磁気共鳴 (NMR) 法などの 実験データ全てを包括する基礎理論として、電場応 答と磁場応答を本質的に一つのものと見なすことが できるというディラック電子系特有の性質、すなわ ち、電磁双対性の理論を提案した。[6, 53]

3.1.2 熱応答・熱電応答の理論

スピン流を介した横型熱発電

Seebeck 効果は温度勾配に平行に電圧が生じる現 象だが、工学応用上は温度勾配に垂直に電圧を取り 出すことが望ましいため、デバイス設計を工夫する 必要がある。我々は、スピン自由度を介したシンプ ルな構造に基づく新しい横型熱発電機構を提案した [13, 38, 39]。具体的には、スピン Hall 効果が強く起 こる物質を考え、温度勾配を加えることで過渡的に



図 3.1.1: 化学ポテンシャル μ , スピンホール伝導度 σ_{SHE} , および磁気スピン伝導度 $\sigma_{Syy}^{(1)}$ の温度依存性。 実線は電子密度一定、点線は化学ポテンシャル一定 の場合。[4]

スピン流が温度勾配に垂直に生じる現象を用い、さ らに強磁性体を接合することで電圧に変換するとい う方法である。その結果、大きな起電力が得られる ことを示した。

ゼーベック係数に関するパラマグノンドラッグの理論

近年、強磁性転移温度付近で特異な熱電効果を示 す物質が報告されている。この現象はスピン揺らぎ によるものと考えられており、強磁性体中のマグノ ンドラッグに類似していることから、パラマグノン ドラッグと呼ばれる。我々は、ハバード型相互作用 を取り入れた系に線形応答理論を適用することによ り、パラマグノンによるゼーベック係数への寄与の 一般式とその増大条件を導いた。[21, 28]

半金属における熱電効果:電子ホール散乱の寄与

半金属における Wiedemann-Franz 則の破れの観 測を嚆矢として、電子ホール散乱による電気伝導と 熱伝導が実験的・理論的に議論されている。従前、電 気伝導度と熱伝導度においては詳細な議論が展開さ れているが、熱電効果の議論は緩和時間近似に基づ いており、非弾性散乱の特徴がどのように影響を及 ぼすかは明らかではなかった。我々は、Ziman によ り導入された変分法を用い、非弾性散乱の特徴を取 り込んだ計算を行い、緩和時間近似では捉えきれな い電子ホール散乱の寄与があることを示した。[51]

タングステンドープ Fe2VAl でのマグノンドラッグ

タングステンをドープした強磁性ホイスラー合金 Fe₂(V,W)Alでは、大きなパワーファクターに由来し た巨大熱応答効果 (無次元性能指数 ZT~5)を示す。 これに関して、タングステン由来の不純物バンドと マグノンドラッグ機構の協奏による熱応答効果を線 形応答理論を用いた微視的熱応答理論により調べた。 その結果、実験でみられる巨大なパワーファクターは この協奏により理解できることを示した。[5, 35, 36]

強相関電子系の電気・熱伝導とウムクラップ散乱

非常によく似た相図をもつ銅酸化物高温超伝導体 やねじれた2層グラフェンでは電子間クーロン斥力 が支配的な散乱機構であり、温度の二乗や温度に比 例する電気抵抗が観測されている。このような強相 関電子系の電気伝導は「記憶行列」という行列を用い て定式化できることが知られている。この記憶行列 の方法を熱伝導にも拡張し、電気・熱伝導における ノーマル散乱とウムクラップ散乱の役割を明らかに した。特にループカレント秩序と呼ばれる特殊な秩 序の量子臨界点近傍では、ウムクラップ散乱によっ て温度に比例する電気抵抗が生じることを示した。 [45]

エキシトニック絶縁体の熱伝導

半導体や半金属中で、電子と正孔がクーロン力に よって束縛状態 (エキシトン) を形成し、それが BEC 的あるいは BCS 的に凝縮した状態はエキシトニッ ク絶縁体と呼ばれる。エキシトンは電荷をもたない がエネルギーを持つため、電流には寄与しないが熱 流には寄与する。このため従来の理論とは異なる熱 応答を示す可能性がある。我々はこのエキシトニッ ク絶縁体の熱伝導率について理論的に計算した。そ の結果、相互作用を正しく取り入れた熱流演算子を 用いることによって、Sommerfeld-Bethe 関係式を破 る寄与が現れることが分かった。これは、エキシト ニック絶縁体特有の寄与である。[16]

特殊な温度勾配下での巨大ゼーベック効果

近年発見された Cu₂Se や Ag₂S は、特殊な温度勾 配をかけることで狭い温度領域に限ってではあるが、 従来より1桁から2桁大きな無次元性能指数を示す。 低温相と高温相が共存し、電子濃度が自己調整され ることでゼーベック係数が増大することが議論され ているが、その起源は十分に理解されていない。そ こで、このような条件下における伝導率やゼーベッ ク係数を理論的に計算した。実験で見られる複雑な 条件を線形応答理論で扱うことは難しいが、ランダ ウアーの方法や回路理論を用いて計算可能なモデル を構築した。これにより、ZT 増大の機構を解析する ことができるようになると期待できる。

3.1.3 トポロジカル物質の理論

バルクの物理量に現れるノーダルライン物質の特徴

ノーダルライン物質には特徴的な「ドラムヘッド 表面状態」があるが、これは表面の詳細に依存する。 そのため、バルクの物理量を用いてノーダルライン 物質の特徴を捉えることが必要である。我々は新た に、軌道磁化率とホール伝導度に着目して計算を行っ



図 3.1.2: 上) ノーダルラインの概形と磁場に対する 配置。下) 軌道磁化率 (左) とホール伝導度 (右) の化 学ポテンシャル・磁場角度依存性。ノーダルライン が磁場に平行なとき、軌道磁化率にはデルタ関数的、 ホール伝導度には階段関数的な振舞いが見られる。

た。その結果、この2つの物理量にはノーダルライ ン物質特有の特異的な化学ポテンシャル依存性があ り、さらに、この特異的振る舞いは波数空間内での ノーダルラインの配置に対応して強い磁場角度依存 性を示すことがわかった。この結果は、実験による ノーダルラインの有無の判定、およびその波数空間 内での配置の決定を可能にする (図 3.1.2)。[10]

二周期外場を駆動した3次元トポロジカル絶縁体の 理論研究

近年 Floquet 理論を用いた光誘起相転移の理論研 究が数多くなされているが、1 つの周波数で特徴付 けられる周期駆動を対象とした研究が多くを占めて いる。そこで我々は2 つの周波数で特徴付けられる 光を3次元トポロジカル絶縁体に照射したときの振 る舞いを調査した。その結果、エネルギーの異なる 2 つの Weyl 点の存在する Floquet Weyl 半金属相へ の相転移を予言した。[20, 48]

ノーダルライン半金属薄膜の熱電性能

近年、効率的な熱電変換を可能にする材料の探索 が盛んに行われている。熱電性能は、性能指数 ZT で 評価されることが一般的であり、1 以上のものが実用 化に耐えうるものとされている。大きな ZT を獲得 するためには、大きなゼーベック係数を持ちながら熱 伝導度を抑制することが必要となる。我々は、ノー ダルライン半金属薄膜のドラムヘッド型表面状態が 鋭い状態密度を与え、結果として大きなゼーベック 係数を持つこと、並びに表面状態が不純物に頑強で あることによって熱伝導度の一部の寄与を大きく抑 制できることを提案し、10 程度の ZT が実現されう ることを提案した。[12]

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新し い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、不純物が十分少ない 極限 (クリーンリミット)と、多い極限 (ダーティリ ミット)のそれぞれに対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。[49]

モットギャップを超える励起による絶縁体-導体転移

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

3.1.5 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。さらに、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。また、この量子化 を実験的に検出する方法について議論した。[15, 47]

3.1.6 有機伝導体

ノーダルライン半金属 HMTSF-TCNQ における 軌道反磁性と電荷密度波

HMTSF-TCNQ は約 30K で電荷密度波転移する 有機電荷移動錯体として知られている。この物質に 対して第一原理計算を行い、開いたノーダルラインを もつトポロジカル半金属であることがわかった。さ らにタイトバインディング模型を作り、電子状態を 詳細に調べた。電荷密度波転移温度以下では、格子 変位によりノーダルラインが閉じて、変形されるこ とが明らかになった。さらに、スピン格子緩和時間 *T*₁ と軌道帯磁率を評価した。軌道帯磁率に低温で大 きな反磁性のプラトーが現れるという異常が実験か ら明らかになっているが、バンド間効果、不純物散乱 およびノーダルラインの変形を考慮した我々の計算 は、これを絶対値を含めてよく再現した。[14, 31, 41]

Floquet 理論を用いた光誘起相転移の理論研究

近年のレーザーやその周辺の技術の著しい発展に 触発され、我々は α-(BEDT-TTF)₂I₃ における傾い た Dirac cone に対して光を照射したときの振舞い をフロケ理論を用いて解析した。その結果、円偏光 を照射したときは Chern 絶縁体への相転移を予言し た。同様の手法で直線偏光を照射した場合は、2 つ の Dirac 点に対応して生じる創発的反平行磁束量子 ペアが対消滅することを予言した。円偏光と直線偏 光の中間とも言える楕円偏光を照射したときは 2 つ の Dirac 点の衝突・崩壊を伴う Chern 絶縁体から通 常のバンド絶縁体へのトポロジカル相転移を示した [2, 17, 18, 19, 25, 32, 42, 54, 55, 57, 66, 67]。

金属有機構造体における気体吸着に伴う磁気制御

Ru 錯体と TCNQ 誘導体から成る金属有機構造体 [{Ru₂(3,5-F₂PhCO₂)₄}₂{TCNQ(MeO)₂}] に酸素を 吸着させることで磁気制御が可能であるという報告 がある。我々は通常のスピンモデルに酸素吸着の効 果を取り入れた有効模型を構築することで、実験で 観測される特徴的な磁化過程を再現し、酸素雰囲気 下での二度の相転移の温度スケールと、その微視的 な起源を明らかにした。本研究のモデルは、その簡 単さ故、吸着と磁性の融合分野の基礎的なモデルと なることが期待される。[22, 58, 59]

3.1.7 スピン系およびスピン軌道相互作用

Ce 系パイロクロア化合物における多極子スピン液 体相

希土類パイロクロア化合物は、3 次元的なフラス トレーションと多極子自由度の絡み合いにより多彩 な物理現象が発現する。我々は、Ce₂Zr₂O₇ において 「多極子スピン液体状態」なる新奇の量子スピン液体 相が実現する可能性を指摘した。Ceの系では結晶場 基底状態が特殊な Kramers 二重項で記述され、双極 子自由度のほかに八極子自由度が活性化する。した がって、スピンアイス配置を担うモーメントとして 双極子と八極子の二通りが考えられ、双極子スピン 液体 (dQSL) と八極子スピン液体 (oQSL) のどちら も発現する可能性がある。さらに、量子効果を加味 すると格子を仮想的に貫くフラックスの配置によっ てもスピン液体を区別することができるため、4 種類 のスピン液体 (図 3.1.3) が実現しうることがわかっ た。この4種類の内、どれが実現するかを決めるた め、中性子散乱の実験結果と計算結果を比較し、新 奇のスピン液体相である π-oQSL が有力な候補であ ることが明らかになった。[11, 27, 46]



図 3.1.3: 4種のスピン液体に対する中性子散乱強度 分布。(a-d): 厳密対角化、(e-h): 古典モンテカル ロ、(i): 実験 (E. M. Smith *et al.*, arXiv:2108.01217 (2021)/CC-BY 4.0) による結果。

2次元スピンアイスにおける磁荷の乱れの効果

2次元チェッカーボード格子上の反強磁性 Ising 模型はアイスルールを満たすスピンアイスの模型として知られている。我々はこの模型に一定の割合で強磁性相互作用をするプラケットがある場合の乱れの効果について、Monte Carlo シミュレーションにより調べた。強磁性プラケット上には低温で磁荷が誘起されるため、通常の Monte Carlo では緩和が非常に遅く効率的なサンプリングが難しい。そこで我々は新規のタイプのアップデート手法 (Zero-Energy Cluster update)を考案し、その困難を解消した。これにより、乱れの割合 pF を増やすことでスピン構造因子にこれまでに報告されていなかったタイプのピーク構造が出現することを見出した (図 3.1.4)。[23, 29, 43, 50, 56]

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) とは、磁気秩 序を持たないキラル物質が引き起こすスピン偏極現象 であり、スピン偏極の方向が物質のキラリティに依存 するという特徴を持つ。CISS は 2011 年に DNA にお いて発見され、2020 年には無機結晶である CrNb₃S₆ において観測された。有機物の CISS は理論的にも 調べられてきたが、無機結晶の CISS の理論はほと んど調べられていない。本研究では時間反転対称性 を有するキラル強束縛模型を構築し、その模型のス ピン流およびスピン密度を評価した。その結果、本 強束縛模型においてスピン流は現れないが、スピン 密度は有限の値となり得ることがわかった [52, 60]。



図 3.1.4: 磁荷の乱れのあるスピンアイス模型におけ るスピン構造因子。乱れの割合 (a) 0, (b) 0.1, (c) 0.2 についての結果。

<受賞>

- [1] 日本物理学会論文賞 Outstanding Paper Award of the Physical Society of Japan: "Three-Dimensional Dirac Electrons at the Fermi Energy in Cubic Inverse Perovskites: Ca₃PbO and Its Family" by T. Kariyado and M. Ogata.
- [2] Award JPSJ Papers of Editors' Choice: "Floquet Theory of Photoinduced Topological Phase Transitions in the Organic Salt α-(BEDT-TTF)₂I₃ Irradiated with Elliptically Polarized Light" [18]
- [3] Award JPSJ Papers of Editors' Choice: "Anomalous Spin Transport Properties of Gapped Dirac Electrons with Tilting" [4]

<報文>

(原著論文)

- [4] M. Ogata, S. Ozaki, and H. Matsuura: J. Phys. Soc. Jpn. 91, 023708 (2022). "Anomalous Spin Transport Properties of Gapped Dirac Electrons with Tilting" [selected as Editors' choice]
- [5] H. Matsuura, M. Ogata, T. Mori, and E. Bauer: Phys. Rev. B 104, 214421 (2021). "Theory of huge thermoelectric effect based on a magnon drag mechanism: Application to thin-film Heusler alloy"
- [6] S. Fujiyama, H. Maebashi, N. Tajima, T. Tsumuraya, H.-B. Cui, M. Ogata, and R. Kato: Phys. Rev. Lett. **128**, 027201 (2022). "Large diamagnetism and electromagnetic duality in twodimensional Dirac electron system"
- [7] Y. Suzumura and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. 90, 044709 (2021). "Anomalous conductivity of twodimensional Dirac electrons in organic conductor under pressure"
- [8] T. Kariyado, H. Matsuura, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. 90, 124708 (2021). "Disentangling Orbital Magnetic Susceptibility with Wannier Functions"
- T. Mizoguchi, H. Matsuura, and M. Ogata: arXiv: 2106.05435. "Thermoelectric transport of type-I, II, and III massless Dirac fermions in twodimensional lattice model"

- [10] I. Tateishi, V. Könye, H. Matsuura, and M. Ogata, Phys. Rev. B 104, 035113 (2021). "Characteristic singular behaviors of nodal-line materials emerging in orbital magnetic susceptibility and Hall conductivity"
- [11] M. Hosoi, E. Z. Zhang, A. S. Patri, and Y. B. Kim: preprint. "Uncovering footprints of dipolaroctupolar quantum spin ice from neutron scattering signatures"
- [12] M. Hosoi, I. Tateishi, H. Matsuura, and M. Ogata: Phys. Rev. B 105, 085406 (2022). "Thin films of topological nodal line semimetals as a candidate for efficient thermoelectric converters"
- [13] Junji Fujimoto and Masao Ogata, Appl. Phys. Lett. **120**, 122404 (2022). "Thermoelectric power generation via transverse thermo-spin conversions" [selected as Featured and Scilight of APL]
- S. Ozaki, I. Tateishi, H. Matsuura, M. Ogata, and K. Hiraki: Phys. Rev. B 104, 155202 (2021).
 "Nodal-line semimetal HMTSF-TCNQ: Anomalous orbital diamagnetism and charge density wave"
- [15] S. Ozaki and M. Ogata: in preparation. "Topological contribution to magnetism in the Kane-Mele model: An explicit wave function approach"
- [16] S. Takarada, M. Ogata, and H. Matsuura: Phys. Rev. B 104, 165122 (2021). "Theory of thermal conductivity of excitonic insulators"
- [17] K. Kitayama, M. Mochizuki, Y. Tanaka, and M. Ogata: Phys. Rev. B **104**, 075127 (2021). "Predicted photoinduced pair annihilation of emergent magnetic charges in the organic salt α -(BEDT-TTF)₂I₃ irradiated by linearly polarized light"
- [18] K. Kitayama, Y. Tanaka, M. Ogata, and M. Mochizuki: J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 104705 (2021). "Floquet Theory of Photoinduced Topological Phase Transitions in the Organic Salt α -(BEDT-TTF)₂I₃ Irradiated with Elliptically Polarized Light" [selected as Editors' choice]
- [19] K. Kitayama, M. Ogata, M. Mochizuki, and Y. Tanaka: arXiv:2203.04539. "Predicted novel type of photoinduced topological phase transition accompanied by collision and collapse of Dirac-cone pair in organic salt α-(BEDT-TTF)₂I₃"
- [20] K. Kitayama and M. Ogata: in preparation. "Momentum and energy tuning of Weyl points in Floquet Weyl semimetal by using bicircular light"
- [21] J. Endo, H. Matsuura, and M. Ogata: Phys. Rev. B 105, 045101 (2022). "Effect of paramagnon drag on thermoelectric transport properties: Linear response theory"
- [22] M. Kato, K. Tokushuku, H. Matsuura, M. Udagawa, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. 90, 073704 (2021). "Magnetic Switching by Oxygen Adsorption in Metal-Organic Framework Systems"

- [23] M. Kato, H. Matsuura, M. Udagawa, M. Ogata: in preparation. "Flux roughening in spin ice with mixed ±J interactions"
- [24] H. Yokoyama, K. Kobayashi, T. Watanabe, and M. Ogata: submitted to J. Phys. Soc. Jpn.. "Excited States beyond Mott Gap in Half-Filled-Band Hubbard Model"

(国内雑誌)

- [25] 望月維人、北山圭亮、田中康寛、小形正男:固体物理 に掲載予定. "有機導体 α-(BEDT-TTF)₂I₃ の光誘起 トポロジカル相転移の理論研究"
- [26] 山本貴博、小形正男、福山秀敏:日本物理学会誌 76, 202 (2021). "熱電応答理論の最近の発展とその応用"

(学位論文)

- [27] 細井將史: "Spin-orbit entanglement induced phenomena in pyrochlore materials" (パイロクロア物 質におけるスピン軌道もつれ誘起の現象)(東京大学 大学院理学系研究科・博士論文)
- [28] 遠藤純矢: "パラマグノンドラッグによる熱電現象" (Paramagnon Drag in Thermoelectric Effect) (東 京大学大学院理学系研究科・修士論文)
- [29] 加藤将貴:"金属有機構造体の酸素吸着に伴う磁気制 御およびスピンアイス磁性体における磁荷の乱れの 効果"(Magnetic switching by oxygen adsorption in metal-organic framework and effect of charge disorder on spin ice systems)(東京大学大学院理学 系研究科・修士論文)

(著書)

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

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [31] S. Ozaki, I. Tateishi, H. Matsuura, M. Ogata, and K. Hiraki: EP2DS-24/MSS-20 (online, October 31-Novenber 5, 2021). "Nodal-line semimetal HMTSF-TCNQ: Anomalous orbital diamagnetism and charge density wave"
- [32] K. Kitayama and M. Mochizuki: APS March Meeting (online, March 14-18, 2022). "Predicted photoinduced topological phases in organic salt α-(BEDT-TTF)₂I₃"

招待講演

[33] M. Ogata: Global Summit on Condensed Matter Physics (CONMAT2021) (Valencia, Spain+online, October 18–20, 2021). "Large Seebeck Coefficient due to Phonon and Paramagnon Drag Based on Linear Response Theory"

- [34] M. Ogata: 1st Asia-Pacifit Conference on Condensed Matter Physics 2021 (AC²MP2021) (online, December 1–3, 2021). "Dirac Electrons in Solids"
- [35] M. Ogata: 2022 TMS Annual Meeting & Exhibition (Anaheim, California, USA+online, February 27–March 3, 2022). "Theory of Huge Thermoelectric Effect Based on Magnon Drag Mechanism: Application to Thin-Film Heusler Alloy"
- [36] H. Matsuura : The 11th International Conference on Flexible and Printed Electronics (2021 ICFPE) 2021,9.30 "Theory of Thermoelectric and Thermal Responses based on Linear Response Theory"

(国内会議)

一般講演

- [37] 小形正男:日本物理学会(秋季大会 online, 2021, 9.20-23). "有機ディラック電子系における低磁場輸送係数"
- [38] 藤本純治、小形正男:日本物理学会 (秋季大会 online). "熱スピン変換を用いた発電機構"
- [39] 藤本純治、小形正男:日本物理学会 (秋季大会 online). "Dirac 電子系の Seebeck 効果とスピン Nernst 効果"
- [40] 廣澤智紀、F. Schäfer、前橋英明、松浦弘泰、小形正 男:日本物理学会 (秋季大会 online). "熱電測定を用 いたデータ駆動による伝導度スペクトルの再構成"
- [41] 尾崎壮駿、立石幾真、松浦弘泰、小形正男、開康一: 日本物理学会 (秋季大会 online). "ノーダルライン半 金属 HMTSF-TCNQ における電荷密度波と異常な軌 道反磁性"
- [42] 北山圭亮、田中康寛、小形正男、望月維人:日本物理 学会 (秋季大会 online). "楕円偏光を照射した有機導 体における Dirac 点の対消滅とトポロジカル相転移 の理論研究"
- [43] 加藤将貴、宇田川将文、松浦弘泰、小形正男:日本物 理学会 (秋季大会 online). "スピンアイス磁性体にお ける強い磁荷の乱れの効果"
- [44] 小形正男:日本物理学会(年次大会 online, 2022, 3.15–19). シンポジウム『分子性結晶におけるトポロジカル物性の展開』"はじめに"
- [45] 前橋英明、C. M. Varma:日本物理学会 (年次大会 online). "強相関電子系におけるプランキアン散逸と ループカレント秩序"
- [46] 細井將史、E. Z. Zhang、A. S. Patri、Y. B. Kim: 日本物理学会 (年次大会 online). "多極子スピンアイ ス"
- [47] 尾崎壮駿、小形正男:日本物理学会 (年次大会 online). "Kane-Mele 模型におけるスピンと軌道の複合的な磁 気応答とトポロジカル秩序"
- [48] 北山圭亮、小形正男:日本物理学会(年次大会 online). "二周期外場を駆動した3次元トポロジカル絶縁体に おける光誘起相転移の理論研究"
- [49] 遠藤純矢、松浦弘泰、小形正男:日本物理学会 (年次大 会 online). "ノーダルライン超伝導の上部臨界磁場"

- [50] 加藤将貴、宇田川将文、松浦弘泰、小形正男:日本物 理学会 (年次大会 online). "2 次元スピンアイスにお ける磁荷の秩序化傾向"
- [51] 高橋慶伍、松浦弘泰、前橋英明、小形正男:日本物理 学会 (年次大会 online). "半金属における熱電効果の 理論的研究:電子ホール散乱の寄与"
- [52] 開田亮佑、藤本純治、小形正男:日本物理学会 (年次 大会 online). "時間反転対称性を有する系におけるキ ラリティに依存したスピン偏極現象"
- [53] 前橋英明:科研費研究会「分子性導体に着目した電気 伝導・熱応答の研究会」(online, 2021, 8.16, 8.27) " おわりに"
- [54] 北山圭亮、田中康寛、小形正男、望月維人:第66回 物性若手夏の学校 (online, 2021, 8.2–5). "有機導体 α-(BEDT-TTF)₂I₃ における光誘起トポロジカル相 転移の理論研究"
- [55] 北山圭亮、田中康寛、小形正男、望月維人:第66回 物性若手夏の学校 (online). "有機導体における創発 的反平行磁束量子ペアの光誘起対消滅の理論的予言"
- [56] 加藤将貴、宇田川将文、松浦弘泰、小形正男:第 66 回物性若手夏の学校 (分科会 online). "スピンアイス 磁性体における強い磁荷の乱れの効果"
- [57] 北山圭亮、田中康寛、小形正男、望月維人:ISSP 短期研究会「分子性固体研究の拡がり:新物質と新現象」(online, 2022, 12.1-2). "有機導体 α-(BEDT-TTF)₂I₃ における光誘起トポロジカル相転移の理論研究"
- [58] 加藤将貴、徳宿邦夫、松浦弘泰、宇田川将文、小形正 男:ISSP 短期研究会 (online). "金属有機構造体の酸 素吸着による磁気制御"
- [59] 加藤将貴、徳宿邦夫、松浦弘泰、宇田川将文、小形正 男:第5回固体化学フォーラム研究会 (online, 2021, 6.22–23). "金属有機構造体の酸素吸着による磁気制 御"
- [60] 開田亮佑、藤本純治、小形正男: Molecular Chirality 2021 (online, 2021, 11.29–30). "時間反転対称性を有 する系におけるキラリティに依存したスピン偏極現 象"

招待講演

- [61] 小形正男:第 15 回分子性固体オンラインセミナー (August 3, 2021). "固体中のディラック電子系の話"
- [62] 立石幾真:日本表面真空学会関東支部講演大会 (online, 2021, 4.3). "二次元系におけるトポロジカル物質と結 晶群対称性: 単層ホウ素シートの理論的研究"

(大学院集中講義)

- [63] 松浦弘泰:東京都立大学 (2021, 12.17, 2021,12.24, 2022, 1. 7). "熱電理論の基礎とその応用"
- [64] 小形正男:東京理科大学、博士共通特別講義:物理学からみる理学の世界2 (2022, 1.13). "固体中のディラック電子"

(セミナー)

[65] 小形正男:第 1 回 物性セミナー (2021, 12.21). "固 体中のディラック電子系"

- [66] 北山圭亮:研究室横断若手研究会 (online, 2021, 11.24). "Floquet 理論を用いた有機導体における光誘 起トポロジカル相転移の理論研究"
- [67] 北山圭亮:大阪大学越野研究室セミナー (online, 2021,11.29). "Predicted pair annihilation of emergent antiparallel magnetic fluxes in an organic conductor"
- [68] 加藤将貴、宇田川将文、松浦弘泰、小形正男:研究室 横断若手研究会 (online, 2021, 11.24), "スピンアイ ス磁性体における強い磁荷の乱れの効果"

3.2 常行研究室

第一原理分子動力学法など基本原理に基づく計算 機シミュレーションは,観測や実験からは得られな い物性情報を得ることや,実験に先んじた予言を行 うことを可能にする.当研究室ではそのような計算物 理学的手法を開発し,物性物理学および物質科学の 基礎研究を行っている.

3.2.1 データ同化を用いた結晶構造探索: 水素を含む系の結晶構造予想

結晶構造は、他の物性や物理化学現象を解析する にあたって出発点となる重要な情報である.実験的 には, X 線回折 (XRD) の結果を元に結晶構造を決 定することが多いが、水素原子の原子散乱因子は非 常に小さく,XRD を用いて水素位置を含む結晶構 造を決定することは難しい. そこで今年度は、XRD データ同化分子動力学計算により,水素化物系の構 造決定を効率的に行えるかどうか検討した.図 3.2.5 は Fe(OH)₂ に関する XRD データ同化分子動力学計 算の原子間ポテンシャルの分布を表す. 横軸は参照及 び原子座標より計算される XRD の相関係数の関数 であり、 $D_{cc} = 0$ で XRD パターンが完全に一致した 状態, $D_{cc} = 1$ で全く XRD 回折パターンに相関が ない状態を表す. 図の様に XRD に基づくペナルティ 関数がない場合 (黒線),構造は D_{cc} = 0.5 - -1 辺り にとどまっており、Fe(OH)2の正しい構造が得られ ていないことがわかる. 一方で XRD を利用したデー タ同化計算(赤線)では、ペナルティ関数によりこれ らの構造が不安定化された結果, D_{cc} =< 0.0001 と なり Fe(OH)2 の正しい構造を得ることが可能であっ た. このように、XRD と原子間ポテンシャルの組み 合わせにより水素を含む系でも結晶構造が効率的に 得られることが確認できた. ただし,H₂O 分子が計 算中に頻繁に生成することが原因で,現状成功率は 10-20%程度にとどまっており、計算中の分子生成を 避けるような工夫が今後の課題である.



図 3.2.5: ランダムな初期座標から Simulated annealing により Fe(OH)₂ 系の構造最適化をする過程での原子間ポ テンシャル変化 (横軸は参照及び計算される XRD 回折パ ターン間の相関係数の関数).100 回異なる初期構造に対し て行った全ての MD 計算 (NVT 0–10,000 step (10ps),温 度 10000K \rightarrow 0K)の値をプロットしている.(黒線:通常の 原子間力ポテンシャルのみを使用した場合,灰色線; XRD ペナルティ関数を導入してデータ同化を行った場合)

3.2.2 LiCB₉H₁₀の超イオン伝導体の Li 伝導機構

LiCB₉H₁₀は全固体型Liイオン電池の電解質の有 力な候補材料である. 今年度は本系の高いイオン伝導 度の起源を明らかにするため, ニューラルネットポテ ンシャル分子動力学計算 (NNP-MD 計算) を用いて 直接計算される伝導度と実験値を比較し解析を行っ た (図 3.2.6). NNP-MD 計算中の速度よりグリーン 久保公式を用いて計算される伝導度は実験値とよく -致する. 一方で,Nernst-Einstein 式より Li の自己 拡散係数より計算される伝導度は実験値を1桁近く 過小評価した.これはグリーン久保公式に粒子間の速 度相関が暗に含まれており粒子間の相互作用が考慮 されているためである. すなわち, Liの協奏的な運動 により伝導度が1桁程度上昇していることがわかっ た.また,錯体の回転運動を止めて行った NNP-MD 計算の伝導度は室温付近で1桁程度低く, 錯体の回転 運動も Li 輸送に大きく寄与していることが確認され た. この2つの寄与を合わせるとLiCB9H10の相転移 前後の伝導度の差を概ね説明可能であり、LiCB₉H₁₀ 高温相の高い Li イオン伝導度の起源が Li の協奏的 運動と錯体の回転 (disordering) であることが明らか になった.



図 3.2.6: 実験及びニューラルネットポテンシャル分子動 力学計算より得られる LiCB₉H₁₀ 及びその固溶体の伝導 度アレニウスプロット (〇:実験値, \bullet : グリーン久保 公式 (NNP-MD), \blacksquare : Nernst-Einstein 式 (NNP-MD), \blacktriangle : Nernst-Einstein 式 (CB9H10 – の回転運動を止めた NNP-MD))

3.2.3 フォノン動力学行列の Wannier 内 挿法による酸水素化物の超伝導の研 究

近年ペロブスカイト酸化物の酸素を一部水素に置換した酸水素化物系が合成された.この系は水素の電子状態が伝導帯の最上部に現れることから,ホールドープにより水素 1s 軌道の特異な物性を期待されている.明石らは酸水素化物 ATiO₂H (A はアルカリ金属)においてホールドープにより超伝導が実現する可能性を理論的に調べた.ドーピングによるフォノンモード変化の精密解析のため,動力学行列にフェルミ面近傍の電子散乱過程を精確に取り入れる Wannier内挿法を実装し,これを用いて電子間にフォノンを介して働く有効引力を計算した(図 3.2.7).結果として,この系では少量ホールドープ領域において,分極と超伝導が共存する相が安定化することが示された[2].

3.2.4 電子ガス極限における Eliashberg 理論

Eliashberg 理論はフォノン媒介超伝導の第一原理 計算の基礎理論である.従来この理論では電子間クー ロン相互作用は現象論的パラメータとして取り扱わ れてきた.近年この効果を現象論によらず第一原理計 算によって調べる研究が進展しているが,電子自己 エネルギーへの効果は大きな計算コストのため進ん でいない.明石はこの自己エネルギー効果を一様電子 ガス極限で調べた.一様電子ガスでは並進対称性のた め波数がよい量子数となり,自己エネルギーの計算



図 3.2.7: (左) ATiO₂H の結晶構造.(右)A=Cs,単位格子 あたりホールを 0.2 個ドープしたときのフォノン分枝と電 子フォノン結合. 系は自発分極が壊れる近傍におり,これ を反映して極めて狭い波数領域においてフォノンのソフト 化と結合の増大が確認できる.

が効率的に実行できる.結果として,自己エネルギー の波数依存性と振動数依存性が電子の有効質量およ び超伝導ペアリングに影響する機構を解明した.従 来二つの機構は質量繰り込み効果として同一視され ていたが,本研究により自己エネルギーの一部の項 は異なる機序で働くことが示された.これはフォノン 機構超伝導理論の従来の理解を刷新する結果である (図 3.2.8) [14].

3.2.5 電子系における密度汎関数の,原子 核密度汎関数理論への応用

原子核物理学では, 核力の荷電対称性の破れの研 究が広く行われているが,実験的に観測される荷電 対称性の破れには,核力のみならず電磁気力も寄与を しているため,核力由来の効果を取り出すためには 電磁気力の計算精度の向上が必要である.密度汎関 数理論は, 電子系のみならず原子核構造研究にも広 く使われているが, 原子核密度汎関数理論では, 電磁 気力の交換項は局所密度近似 (LDA) で取り扱われ ていた. 本研究では, 更に陽子・中性子が有限電荷分 布を持つことによる効果や, 原子の計算で広く使わ れている真空偏極の効果を取り込んで計算を行った [18]. その結果, 核子の有限電荷分布や真空偏極の効 果は、 求める計算精度よりも大きな寄与を与えるこ とがわかり, 無視できないことがわかった. 更に, こ の研究の知見に基づき,核力の荷電非対称項の強度 の第一原理的な決定手法の提案も行った [12].



図 3.2.8: 一様電子ガスにおける Eliashberg のギャップ 方程式の固有値.ペアリングの強さを表す. 質量補正におい ては打ち消し合う二つの項の項 (*Z*, *χ*) が逆符号で寄与し ているため,両者は共にペアリングを抑制する.

3.2.6 汎関数くりこみ群を用いた相関密度 汎関数の構成

密度汎関数理論の計算精度は、交換相関密度汎関数 の精度に依存することが知られている.最も簡単な レベルの近似である局所密度近似 (LDA)でも多くの 密度汎関数計算の成功が報告されているものの,相関 密度汎関数は,解析的な表式が得られていない.今ま での相関密度汎関数は,量子モンテカルロ計算によっ て計算された一様電子ガスの相関エネルギーを再現 するように、何らかの関数の係数を決定していた.一 方、場の量子論で広く使われる汎関数くりこみ群の 手法を密度汎関数理論に援用する手法 (FRG-DFT) が近年提唱されてきた.本研究 [10]では、FRG-DFT を用いて様々なスピン偏極度の3次元一様電子ガス の相関エネルギーを計算し、相関エネルギーのスピン 依存性についての検討を行った.

3.2.7 原子の変形可能性

量子多体系である原子核では,多くの原子核が集団 的に変形する性質を示すことが知られている.また, クーロン力は核分裂過程において変形の原動力とな ることも知られている.一方で,孤立原子の電子状態 計算では殆どの計算において,球対称が仮定されて おり,原子核の知見に基づくと,この原子の球対称 性の仮定の正当性がいささか疑問が生じる.そこで, 中心力場(等方調和振動子)に中性子をトラップさせ た"中性子ドロップ"と原子に対して,それぞれ球 対称性を課さずに計算を行ったところ,中心力場の下 でも中性子ドロップは変形を示す一方,原子はたかだ か1粒子軌道に由来する変形のみを示し,集団的に は球対称性を好むことが判明した[9].更に,相互作 用の観点から解析を進めると,相互作用が引力の場 合は上向きスピンと下向きスピン成分それぞれの密 度が同一の変形を好む一方で,相互作用が斥力の場合 には,お互いの変形を打ち消すような変形を好む.し たがって,原子が球対称であるのは,中心力場に由来 するものというよりはむしろ,相互作用が斥力であ ることが原因であることがわかった.

3.2.8 相関波動関数理論トランスコリレイ ティッド法の検討

当研究室ではジャストロウ-スレーター型波動関数 を用いたトランスコリレイティッド(TC)法と呼ば れる第一原理電子状態計算手法の開発を継続してい る.この手法は、ジャストロウ関数によりハミルトニ アンに相似変換を施すことで、モンテカルロ法を使 わずに軌道の最適化と全エネルギー評価ができるの が特徴であるが、変換後のTCハミルトニアンは非 エルミート演算子となるため、擬ポテンシャルなど 通常の第一原理計算での手続きに修正が必要となる. そこで今年度は、海外で提唱された、TCハミルトニ アンをエルミート化する方法について検討し、簡単 な系でその有効性を検証した.その結果、エルミート 化により軌道の最適化が阻害され、TC法としての 性能が悪化することが確認された [19].

<報文>

(原著論文)

- R. Akashi, R. Arita, C. Zhang, K. Tanaka, and J. S. Tse, "Chemical physics of superconductivity in layered yttrium carbide halides from first principles" Phys. Rev. B 103, 134517 (2021).
- [2] M. Ghim, N. Sato, R. Akashi, S.-H. Jhi, and S. Tsuneyuki, "Coexistence of spontaneous polarization and superconductivity in hole-doped oxyhydrides ATiO₂H(A=K, Rb, Cs): First-principles study" Phys. Rev. Materials 5, 054802 (2021).
- [3] D. V. Semenok, I. A. Troyan, A. G. Ivanova, A. G. Kvashnin, I. A. Kruglov, M. Hanfland, A. V. Sadakov, O. A. Sobolevskiy, K. S. Pervakov, I. S. Lyubutin, K. V. Glazyrin, N. Giordano, D. N. Karimov, A. L. Vasiliev, R. Akashi, V. M. Pudalov, A. R. Oganov, "Superconductivity at 253 K in lanthanum yttrium ternary hydrides", Materials Today 48, 18 (2021).
- [4] N. Itagaki and T. Naito, Consistent description for cluster dynamics and single-particle correlation, Phys. Rev. C 103, 044303 (2021).
- [5] G. Accorto, T. Naito, H. Liang, T. Nikšić, and D. Vretenar, Nuclear energy density functionals from empirical ground-state densities, Phys. Rev. C 103, 044304 (2021).
- [6] Z. Wang, T. Naito, H. Liang, and W. H. Long, Exploring effects of tensor force and its strength via neutron drops, Chin. Phys. C 45, 064103 (2021).

- [7] Z. Wang, T. Naito, and H. Liang, Tensorforce effects on shell-structure evolution in N = 82 isotones and Z = 50 isotopes in the relativistic Hartree-Fock theory, Phys. Rev. C 103, 064326 (2021).
- [8] T. Naito, G. Colò, H. Liang, and X. Roca-Maza, Second and fourth moments of the charge density and neutron-skin thickness of atomic nuclei, Phys. Rev. C 104, 024316 (2021).
- [9] T. Naito, S. Endo, K. Hagino, and Y. Tanimura, On deformability of atoms—Comparative study between atoms and atomic nuclei, J. Phys. B 54, 165201 (2021).
- [10] T. Yokota and T. Naito, Construction of energy density functional for arbitrary spin polarization using functional renormalization group, Phys. Rev. B 105, 035105 (2022).
- [11] N. Itagaki, T. Naito, and Y. Hirata, Persistence of cluster structure in the ground state of ¹¹B, Phys. Rev. C 105, 024304 (2022).
- [12] T. Naito, G. Colò, H. Liang, X. Roca-Maza, and H. Sagawa, Toward *ab initio* charge symmetry breaking in nuclear energy density functionals, Phys. Rev. C 105, L021304 (2022).
- [13] R. Nagai, R. Akashi, and O. Sugino "Machinelearning-based exchange correlation functional with physical asymptotic constraints" Phys. Rev. Research 4, 013106 (2022).
- [14] R. Akashi "Revisiting homogeneous electron gas in pursuit of properly normed ab initio Eliashberg theory" Phys. Rev. B 105, 104510 (2022).
- [15] Y. Tanaka and S. Tsuneyuki, Development of the temperature-dependent interatomic potential for molecular dynamics simulation of metal irradiated with an ultrashort pulse laser, J. Phys.: Condens. Matter 34 165901 (2022).
- [16] Yuya Komatsu, Ryota Shimizu*, Ryuhei Sato*, Markus Wilde, Kazunori Nishio, Takayoshi Katase, Daiju Matsumura, Hiroyuki Saitoh, Masahiro Miyauchi, Jonah R. Adelman, Ryan M. L. McFadden, Derek Fujimoto, John O. Ticknor, Monika Stachura, Iain McKenzie, Gerald D. Morris, W. Andrew MacFarlane, Jun Sugiyama, Katsuyuki Fukutani, Shinji Tsuneyuki, and Taro Hitosugi Repeatable Photoinduced Insulator-to-Metal Transition in Yttrium Oxyhydride Epitaxial Thin Films Chem. Mater., 2022, DOI: 10.1021/acs.chemmater.1c03450
- (国内雑誌)
- [17] 内藤智也, 萩野浩一, 小林良彦, 「アイソスピンの符号 の慣習をめぐって」, 日本物理学会誌 vol. 77 (2), 99 (2022).

- [18] 内藤智也, On isospin symmetry breaking in nuclear density functional theory (原子核密度汎関数理論に おけるアイソスピン対称性の破れ)(東京大学, 2022 年3月博士(理学))
- [19] 千田拓実, 汎用的なトランスコリレイティッド法のための定式化と数値解法 ((Formulation and numerical solution for a versatile transcorrelated method)) (東京大学, 2022 年 3 月 修士(理学))

(著書)

[20] 常行真司,水素先端計算一見えない水素を「見る」(「"水 素"を使いこなすためのサイエンス ハイドロジェノ ミクス」2.2 節)(共立出版, 2022.1)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [21] R. Sato, T. Sato, T. Honda, T. Otomo, S. Orimo and S. Tsuneyuki: Molecular Dynamic Study of the Relationship between Li-ion Migration and Disordering of Hydride Complexes in LiCB9H10, CCP 2021 XXXII IUPAP Conference on Computational Physics, Online, Aug. 1-5, 2021.
- [22] R. Akashi "High temperature superconductivity in compressed sulfur hydrides from the first principles" XXXII IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2021) 2021/08/01–05; Online.
- [23] R. Sato, T. Sato, T. Honda, T. Otomo, S. Orimo and S. Tsuneyuki: Molecular Dynamic Study of the Relationship between Li-ion Migration and Disordering of CB9H10 – Complexes in LiCB9H10, Materials Research Meetings 2021 (MRM2021), Yokohama Japan, Dec., 13-16, 2021.
- [24] K. Tsutsumi, Y. Hizume, M. Kawamura, R. Akashi, and S. Tsuneyuki "Effect of spin fluctuations on superconductivity in V and Nb: A firstprinciples study" Materials Research Meeting 2021 (MRM2021) 2021/12/13–16; Pacifico Yokohama, Japan.
- [25] R. Sato, T. Sato, T. Honda, T. Otomo, S. Orimo and S. Tsuneyuki: The Study on Superionic Conductivity of LiCB9H10 by Ab Initio and Neural-Net Potential Molecular Dynamic Simulations, Summit of Materials Science 2022 and GIMRT User Meeting 2022 Affliated with KINKEN WAKATE 2022, Sendai Japan, Mar. 2-3, 2022.
- [26] C. M. Le, R. Akashi, and S. Tsuneyuki "Completing the Floquet picture: the missing quantum number" APS March meeting 2022 2022/03/14– 18; McCormick Place, Chicago, USA.

招待講演

⁽学位論文)

- [27] S. Tsuneyuki, Computational materials science from first principles, from data, and in between, International Conference on Discrete Geometric Analysis for Materials Design (online) (plenary), 2021/9/26.
- [28] R. Akashi "Neural network DFT exchangecorrelation potentials" 2021 Korea Supercomputing Conference 2021/10/25–26; Online.
- [29] R. Akashi "Developing the DFT exchangecorrelation potentials using the neural network" The International Symposium on Machine Learning in Quantum Chemistry 2021 (SMLQC2021) 2021/11/12–14; Xiamen University, China (Online).

(国内会議)

一般講演

- [30] 佐藤 龍平, 小松 遊矢, 清水 亮太, 福谷 克之, 一杉 太郎, 常行 真司: イットリウム酸水素化物薄膜のフォトクロミズム反応に関する第一原理計算, 第4回ハイドロジェノミクス研究会, 2021 年8月 19-20 日
- [31] 内藤智也: 「Isospin symmetry breaking in groundstate properties」, 85th DFT Meeting, 北海道大学, 2022 年 01 月 25 日.
- [32] 板垣直之,内藤智也,平田雄一: 「¹¹B のクラスター 構造とその応用」,日本物理学会 第 77 回年次大会, オンライン, 2022 年 03 月 15 日.
- [33] 佐藤 龍平, 佐藤 豊人, 本田 孝志, 大友 季哉, 折茂 慎
 一, 常行 真司: LiCB9H10 の Li 集団運動による伝導
 機構の解析日本物理学会第77回年次大会, オンライン, 2022年3月15-19日

招待講演

- [34] C. M. Le "Time-periodic ground-state" 物性研究所 理論セミナー 2021/06/18, Online.
- [35] 内藤智也:「原子核構造で探る中性子星」、、、中性子星の観測と理論、研究活性化ワークショップ 2021、オンライン (理化学研究所), 2021 年 08 月 10 日.
- [36] 常行真司、「マテリアルズインフォマティクス概観: 「JST さきがけ」の成果を中心に」、第12回材料系 ワークショップ(オンライン)(2021年10月6日, RIST)
- [37] 常行真司、「データ科学的手法を用いた物質科学研究: 「JST さきがけ」の成果を中心に」, JST-CRDS 計 算科学セミナー(オンライン)(2021 年 10 月 15 日, JST).
- [38] 常行真司,「「富岳」が拓くマテリアル研究」,国際ナ ノテクノロジー展(nanotech2022) 特別講演(2022 年1月26日,東京ビッグサイト).
- [39] 常行真司,「元素戦略プロジェクトの大型研究施設へのインパクト:「京」・「富岳」」,第5回元素戦略シンポジウム(オンライン)(2022年2月3日,東京大学).

[40] 内藤智也:「ミュオン波動関数計算コードの開発」, 原子物理と原子核物理をつなぐ勉強会,RCNP研究 会「ミューオン X 線 γ 線分光—非破壊分析,化学, 原子核物理への新展開・ミューオン原子核捕獲反応に よる原子核関連研究の可能性」,大阪大学核物理研究 センター,2022 年 03 月 25 日.

(セミナー)

[41] 内藤智也: 「Ab initio エネルギー密度汎関数に向け て」酒見グループセミナー, オンライン (東京大学 大学 院理学系研究科 附属原子核科学研究センター), 2021 年 07 月 16 日

3.3 藤堂研究室

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

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

3.3.1 強相関系のシミュレーション手法

テンソルネットワークくりこみ群

テンソルネットワークを用いた実空間くりこみ群 法は、多体スピン系に対する数値計算手法として近 年広く用いられてきている。テンソルくりこみ群法 では大規模な古典系/量子系の物理量を効率的に計算 することができる。テンソルネットワークをテンソ ルを頂点上だけでなく頂点を結ぶ線上にも置いた形 に拡張することで、実空間くりこみ法の精度を、既 存の同程度の計算時間を要する数値計算手法に比べ て100倍程度高めることに成功した。この手法は一 般のテンソルネットワークに対して適用可能である。 また、テンソルネットワーク表現とマルコフ連鎖モ ンテカルロ法を組み合わせた、新しいサンプリング手 法の研究も進めている [9, 14, 21, 23, 38, 39, 35, 42]。

幾何学的割り当て法によるワームアルゴリズム

モンテカルロ法において、和をとるべき「状態」に 制約があり、制約を満たしながらサンプリングするこ とが難しい場合がある (例として、充足可能性問題)。 そのような状況においても、状態空間を拡張するこ とで効率的にサンプリングする手法のひとつがワー ムアルゴリズム (worm algorithm) である。ワームと は制約を破るキンク (点) のことで、ワームアルゴリ ズムのアイデアは「制約を常に満たすのは難しいの で、いったん制約を破ってしまって後でつじつまを 合わせよう」というものである。このモンテカルロ 法では制約を破るワーム (キンク)を導入して、ワー ムを確率的に動かすことでサンプリングを行う。従 来のワームアルゴリズムでは、ワームをほぼ完全に ランダムに動かしていたが、我々は効率の良い計算 をするためのワームの動かし方に関する指針—でき るだけまっすぐ前へ進めという指針--を提案し、従 来のワームアルゴリズムと比較して計算効率が25倍 改善することを確認した [20, 22, 24, 41]。

自己学習モンテカルロ法の高速更新アルゴリズム

連続時間補助場アルゴリズム (CT-AUX) による不 純物モデルのシミュレーションに対して、自己学習 モンテカルロ法 (self-learning Monte Carlo, SLMC) が提案されている。SLMC 法では、元のハミルトニ アンよりも効率よく計算可能なハミルトニアンに基 づき配位を生成することで、モンテカルロシミュレー ションの CPU 時間を短縮する。我々は、二分木技術 を用いた SLMC 法を開発した。従来の手法では配位 の頂点数に対して線形に増加していた計算コストを、 対数的なコストに低減することで、非常に効率的に 重み変化を計算することが可能となった。この新し いアルゴリズムは、不純物モデルだけでなく、SLMC が適用できる他のモデルにおいても有用である。

局所ユニタリ変換による負符号問題の低減

量子多体系に対する量子モンテカルロ法は広く使 われている計算手法であるが、一部の量子格子模型に おいて負符号問題が生じ、逆温度に対して指数関数的 に統計誤差が増大してしまう。低温で負符号を消すこ とは量子モンテカルロ法にとって重要な課題である。 最近になり局所ユニタリ変換を Shastry-Sutherland 模型に施すことにより、負符号問題が緩和されるこ とが示された。我々は、この模型の性質と絶対零度 で負符号が消えるためのハミルトニアンが満たすべ き条件から、コスト関数を定めることで最適化問題 としてユニタリ変換を探す枠組みを考案した。

連続空間経路積分モンテカルロ法

連続空間経路積分モンテカルロ法は、相互作用す るボーズ粒子系の超流動密度や凝縮率などの物理量



図 3.3.9: 波の位相をズラすことによって得られる新 しい磁気渦構造。

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

3.3.2 強相関多体系における新奇な状態・ 相転移現象

磁気渦結晶の位相変化

物質中のスピン自由度が渦構造を形成する「磁気渦 構造」が注目を集めている。このような磁気構造は、 トポロジカルな性質による保護、通常とは異なる電磁 応答など、種々の興味深い性質を持っており、新しい デバイスへの応用も期待されている。我々は、この ような磁気渦がスピンの波の重ね合わせで表現され る場合に注目し、重ね合わせの位相を変えることで、 良く知られたスカーミオンとは異なる新しいタイプ の磁気渦結晶が実現することを示した(図3.3.9)。ま た、磁性金属のモデルに対して数値シミュレーショ ンを行うことにより、スピン間相互作用や温度の変 化で位相が変化し、複数の磁気構造が安定化するこ とを明らかにした [8]。

反強磁性型励起子絶縁体

物質中で電子のペアがボーズ・アインシュタイン 凝縮と呼ばれる現象を起こし超伝導体を生み出すの



図 3.3.10: 反強磁性型励起子絶縁体の相図と励起構 造。

と同様に、電子と正孔の結合状態である励起子が凝縮することで励起子絶縁体と呼ばれる状態が生じる。 スピン一重項の励起子が凝縮して生じる励起子絶縁 体についてこれまで精力的に研究されてきたが、ス ピン三重項の励起子が凝縮した物質は見つかってい なかった。我々は、イリジウム酸化物 Sr₃Ir₂O₇ に対 する共鳴非弾性 X 線散乱実験と理論計算から、三重 項励起子が凝縮した反強磁性型の励起子絶縁体であ る証拠を明らかにした (図 3.3.10)。これにより、三 重項励起子の凝縮現象に関する実験的検証と操作が 可能となった [10, 29]。

量子ダイマー模型の有限温度相転移

量子ダイマー模型は1988年にRokhsarとKivelson によりフラストレートした磁性体の低エネルギー有 効模型として提案された。量子ダイマー模型のハミ ルトニアンには負符号問題はないが、ダイマーの配 置に強い幾何学的な制限があるため、モンテカルロ シミュレーションは非常に困難であった。我々は確 率級数展開 (SSE) に基づく効率的なクラスター更新 法を、ダイマーとモノマーの両方、およびそれらの 間の多体相互作用を含む、より一般的なクラスの模 型に拡張した。この手法を用いて、量子ダイマー模 型の詳細な有限温度相図を得た。

3.3.3 量子多体系の熱化・非平衡ダイナミ クス

PXP 模型における量子多体傷跡状態

量子多体系における熱化の問題が大きな注目を集 めている。固有状態熱化仮説 (eigenstate thermalization hypothesis, ETH) は広いクラスの量子多体 系において成立すると信じられているが、例外も存 在する。保存量以外にも ETH を破るメカニズムと して量子多体傷跡状態 (quantum many-body scar, QMBS) が精力的に調べられている。我々は、行列 積状態 (MPS) と時間依存変分原理 (TDVP) に基づ くアプローチにより QMBS を数値的に調べた。これ までボンド次元の大きな MPS において、QMBS を 見つけ出すことは困難であったが、自動微分と多様 体上の連続最適化という2つの手法を組み合わせる ことでこの困難を解決し、一般のボンド次元の MPS において周期軌道を発見することに成功した。さら に、これによって得られた周期軌道の重ね合わせを 議論することで、古典的描像から QMBS 特有の固有 状態の構造を再現することを示し、QMBS における 量子古典対応をより明確に示した [16, 31]。

ランダム系における多体局在現象

多体局在 (many-body localization, MBL) 現象に 対する数値計算手法は、主に厳密対角化に限られてお り、強い有限サイズ効果のために無限系における MBL はよく理解されていない。我々は、Krylov 部分空間 法によって線形方程式系を解く shift-invert Lanczos 法によって、ランダム磁場ハイゼンベルグ模型にお ける MBL を調べた。Krylov 部分空間法を用いたこ とで、先行研究においてボトルネックとなっていた 空間計算量を緩和し、さらに、相互作用とランダムネ スを考慮した前処理を導入した。また、MBL 転移の 実空間における秩序変数として「ひねり演算子」を提 案した。ひねり演算子の固有状態期待値の有限サイ ズ効果について、熱的状態と局在状態のそれぞれに ついて議論し、前述の shift-invert Lanczos 法によっ てその振舞いを確認した。さらに、その数値計算結 果からランダム磁場ハイゼンベルグ模型の MBL 転 移点を推定した [17, 32]。

3.3.4 統計的機械学習による物質科学

ニューラルネットを用いた古典可積分系の構成

可積分系は物理と数学において豊富な知見を提供 してきた。特に古典可積分系は古くから研究されな がらも、今なお多くの新たな発見が報告されている。 これまで、古典可積分系は、偶然あるいはひらめきに よって、あるいはある種の仮設の範囲でのみ発見・構 成されてきた。我々はこれに対し、深層学習を用い ることで、これまでにない新たな構成法を提案した。 具体的には、「作用角変数」と呼ばれる特殊な正準座 標で与えられたハミルトニアンを与え、それに対す る自然なハミルトニアンを深層学習によって発見す る。この手法では特に、(i) ニューラルネットで全単 射な座標変換を表現できる。(ii) 時間発展の自動微 分を随伴法により効率化できる点に着目した。実際 に古典可積分系の代表である戸田格子に対して我々 の手法を適用し、戸田格子のポテンシャルを見つけ 出すことができることを示した [6]。

ランダムゲージイジング模型の秩序変数の抽出

イジング模型に機械学習を適用する研究が精力的 に行われている。しかし、強磁性イジング模型のよ うに自明な秩序変数をもつ場合を考えることが多い。 すなわち見かけ上スピンが揃っているか否かだけを 見ており、系の物理的本質を捉えられていないかもし れないという懸念がある。我々は、ランダムなゲー ジのかかったイジング模型を導入し、全結合/畳み込 みニューラルネットワークによりどのように学習が 進むのかを調べた。その結果、どちらのネットワー クにおいても学習過程において正しいゲージが自動 的に選ばれ、その影響を補正した上で温度推測など が行われていることが分かった。これは、見かけの 乱雑さにとらわれず、機械学習によりイジング模型の 物理的本質が抽出されることを示している [11, 30]。

3.3.5 次世代並列シミュレーションのため のオープンソースソフトウェア

物質科学シミュレーションのポータル MateriApps

日本国内においても、高性能な物質科学シミュレー ションソフトウェアが数多く開発・公開されている が、その知名度は必ずしも高くない。また、ドキュメ ントの作成やユーザサポートにも問題が多く、普及 の妨げとなっている。物質科学アプリケーションの さらなる公開・普及を目指し、物質科学シミュレー ションのポータルサイト MateriApps の整備を行っ た (https://ma.issp.u-tokyo.ac.jp/)。また、気軽にシ ミュレーションを始めることのできる環境構築を目指 し、MateriApps アプリケーションがプレインストー ルされた仮想 Linux システム MateriApps LIVE!、ア プリケーションのインストールスクリプト集 MateriApps Installer の開発・公開を行った [13]。

多変数変分モンテカルロ法 mVMC の高度化

多変数変分モンテカルロ法 mVMC は、国内外の物 性理論コミュニティーにおいて広く使われ、強相関 電子系の基底状態状態における様々な性質 (磁性、超 伝導など)を解き明かしてきた。しかし、mVMCに おける演算のホットスポットは、反対称逆行列 X^{-1} の Rank-1 更新であるため、現代のプロセッサーに おいては、性能を発揮することは難しい。富岳の新 プロセッサ A64FX において mVMC の性能を充分 に発揮するため、我々は、Woodbury 公式を使って 更新式を書き直し、Rank-1 更新を Rank-k 更新に置 き換えた。これにより富岳における mVMC の性能 を大幅に向上することができた [12]。

テンソルネットワークアルゴリズムのためのライブ ラリ: CTL

テンソルネットワーク法は、実空間繰り込みの手 法として古典・量子模型において非常に有効なシミュ レーション手法である。しかし、テンソルネットワー クは開発者によってスタイルが異なり、またテンソ ル縮約の手順が複雑なため、コードの開発・共有が 困難である。我々は、オブジェクト指向のテンソル ネットワークライブラリ CTL を開発した。CTL で は、自動縮約が組み込まれ、多くの典型的なテンソ ルネットワークアルゴリズムがあらかじめ実装され ている。本ライブラリを用いて書かれたコードはよ り使いやすく、アルゴリズム開発・教育の現場での 幅広い活用が期待できる [33]。

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 や並列厳密対角化パッケージ HΦ などの公 開・開発も行っている。

<受賞>

 諏訪秀麿、日本物理学会若手奨励賞、日本物理学会、 2021 年 10 月.

<報文>

(原著論文)

- [2] Yutaka Shikano, Hiroshi C. Watanabe, Ken M. Nakanishi, Yu-ya Ohnishi, Post-Hartree-Fock method in Quantum Chemistry for Quantum Computer, Euro. Phys. J. Spec. Top. (2021).
- [3] Hong Yang, Hayate Nakano, Hosho Katsura, Symmetry-protected Topological Phases in Spinful Bosons with a Flat Band, Phys. Rev. Research.
 3, 023210 (22pp) (2021).
- [4] H. Yamaguchi, Y. Iwasaki, Y. Kono, T. Okubo, S. Miyamoto, Y. Hosokoshi, A. Matsuo, T. Sakakibara, T. Kida, M. Hagiwara, Quantum critical phenomena in a spin-1/2 frustrated square lattice with spatial anisotropy, Phys. Rev. B 103, L220407 (5pp) (2021).
- [5] H. Yamaguchi, N. Uemoto, T. Okubo, Y. Kono, S. Kittaka, T. Sakakibara, T. Yajima, S. Shimono, Y. Iwasaki, Y. Hosokoshi, Gapped ground state in a spin-1/2 frustrated square lattice, Phys. Rev. B 104, L060411 (5pp) (2021).
- [6] Fumihiro Ishikawa, Hidemaro Suwa, Synge Todo, Neural Network Approach to Construction of Classical Integrable Systems, J. Phys. Soc. Jpn. 90, 093001 (5pp) (2021).
- [7] Yasunari Suzuki, Yoshiaki Kawase, Yuya Masumura, Yuria Hiraga, Masahiro Nakadai, Jiabao Chen, Ken M. Nakanishi, Kosuke Mitarai, Ryosuke Imai, Shiro Tamiya, Takahiro Yamamoto, Tennin Yan, Toru Kawakubo, Yuya O. Nakagawa,

Yohei Ibe, Youyuan Zhang, Hirotsugu Yamashita, Hikaru Yoshimura, Akihiro Hayashi, Keisuke Fujii, Qulacs: a fast and versatile quantum circuit simulator for research purpose, Quantum **5**, 559 (34pp) (2021).

- [8] Satoru Hayami, Tsuyoshi Okubo, Yukitoshi Motome, Phase shift in skyrmion crystals, Nat. Commum. 12, 6927 (6pp) (2021).
- [9] Daiki Adachi, Tsuyoshi Okubo, Synge Todo, Bond-weighted tensor renormalization group, Phys. Rev. B 105, L060402 (6pp) (2022).
- [10] D. G. Mazzone, Y. Shen, H. Suwa, G. Fabbris, J. Yang, S.-S. Zhang, H. Miao, J. Sears, Ke Jia, Y. G. Shi, M. H. Upton, D. M. Casa, X. Liu, Jian Liu, C. D. Batista, M. P. M. Dean, Antiferromagnetic excitonic insulator state in Sr₃Ir₂O₇, Nat. Commun. **13**, 913 (8pp) (2022).
- [11] Tomoyuki Morishita, Synge Todo, Randomizedgauge test for machine learning of Ising model order parameter, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 044001 (9pp) (2022).
- [12] RuQing G. Xu, Tsuyoshi Okubo, Synge Todo, Masatoshi Imada, Optimized Implementation for Calculation and Fast-Update of Pfaffians Installed to the Open-Source Fermionic Variational Solver mVMC, to appear in Comp. Phys. Comm.

(国内雑誌)

- [13] 井戸康太, 笠松秀輔, 加藤岳生, 藤堂眞治, 物質科学 シミュレーションのポータルサイト MateriApps -シ ミュレーション初心者のためのソフトウェアの探し 方-, 静電気学会誌 45, 188 (2021).
- [14] 大久保毅, テンソルネットワークの将来, 数理科学 2 月号 65-72 (2022).

(学位論文)

- [15] RuQing G. Xu, Differentiating Tensor Renormalization Group for Physical Quantities and Scaling Analysis (修士論文)
- [16] Hayate Nakano, Study of Semiclassical Periodic Orbits in Kinetically Constrained Quantum Many-Body Systems (博士論文)
- [17] Taito Kutsuzawa, Large-scale sparse-matrix diagonalization study of many-body localization in disordered systems (修士論文)

(著書)

- [18] 藤原毅夫,藤堂眞治,データ科学のための微分積分・ 線形代数 - MATLAB で体験する数学基礎 (東京大学 出版会, 2021).
- [19] M. コーエン, S. ルイ (著) 小田垣孝, 吉留崇, 大久保 毅 (共訳), 現代の物性物理学 (物理学叢書 111) (吉岡 書店, 2021).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [20] Hidemaro Suwa, "Directed worm algorithm," Online workshop on ECMC and related subjects, May 2021, オンライン.
- [21] Synge Todo, "Novel approaches for tensor renormalization group method ATRG and BTRG," CCP2021, August 2021, オンライン.
- [22] Hidemaro Suwa, "Geometric allocation approach to accelerating directed worm algorithm," Nonreversible Markovian Monte Carlo 2021, August 2021, オンライン.
- [23] Tsuyoshi Okubo, "Tensor network approach to the magnetization of frustrated square lattice Heisenberg systems," XXXII IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2021), August 2021, オン ライン.
- [24] Hidemaro Suwa, "Geometric allocation approach to probability optimization," CCP2021, August 2021, オンライン.
- [25] Hidemaro Suwa, Masaki Gen, "Phase transitions in a classical kagome Heisenberg model with spin-lattice coupling," International Conference on Frustration, Topology, and Spin Textures, December 2021, 神戸.

招待講演

[26] Hidemaro Suwa, "Exciton condensation in bilayer spin-orbit insulator," APS March Meeting 2022, March 2022, Chicago, US.

(国内会議)

一般講演

- [27] 諏訪秀麿, Lin Hao, Jian Liu,「イリジウム酸化物薄 膜における不純物誘起巨大磁気応答」,日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月, オンライン.
- [28] 室田 佳亮, 宇田川 将文,「制限ボルツマンマシンによる三角格子上量子ダイマー模型の基底状態と低励起状態の解析」,日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年9月,オンライン.
- [29] 諏訪秀麿, Shang-Shun Zhang, Cristian D. Batista, 「2 層系イリジウム酸化物 Sr3Ir2O7 における 励起子 ボーズ・アインシュタイン凝縮」,日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月, オンライン.
- [30] 森下智之,藤堂眞治,「イジング模型秩序変数の機械 学習に対するランダムゲージテスト」,日本物理学会 2021 年秋季大会,2021 年 9 月,オンライン.
- [31] 中野颯,藤堂眞治,「PXP 模型上の周期軌道のエンタ ングルメントのスケーリング」,日本物理学会 2021 年秋季大会,2021 年 9 月,オンライン.
- [32] 沓澤太斗,藤堂眞治,「疎行列の数値対角化による多 体局在転移点の推定」,日本物理学会 2021 年秋季大 会,2021 年 9 月,オンライン.

- [33] Ruixiao Cao, Synge Todo,「研究向けの新しいテン ソルネットワークライブラリの開発」,日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月, オンライン.
- [34] 大久保毅,「キタエフ量子スピン液体の量子回路表現 とその最適化」,日本物理学会第77回年次大会,2022 年3月,オンライン.
- [35] 藤堂眞治,「モンテカルロサンプリングによるテンソ ルネットワーク縮約」,日本物理学会第77回年次大 会,2022年3月,オンライン.

招待講演

- [36] 大久保毅,「拡張キタエフ模型における熱ホール伝導 度の数値的研究」,キタエフ量子スピン液体研究の新 展開, 2021 年 8 月, オンライン.
- [37] 諏訪秀麿,「電子が互いに相互作用する効果を取り入 れた大規模シミュレーション」, NVIDIA 秋の HPC Weeks: Week 3 - GPU Applications, 2021 年 10 月, オンライン.
- [38] 大久保毅,「量子物理とテンソルネットワーク」,第1 回量子ソフトウェアワークショップ:テンソルネット ワークと量子計算の展望,2021年12月,オンライン.
- [39] 藤堂眞治、「テンソルネットワーク表現に基づく量子 多体系のシミュレーション」、計算科学と実験科学が 導く量子物質研究の最先端、2022年2月、オンライン.
- [40] 藤堂眞治、「演習を主体とし手を動かして学ぶ数学の 実践」、ソフトウェアを活用した新しい数理科学教育 シンポジウム、2022 年 2 月、オンライン.
- [41] 諏訪秀麿,「多体問題に対する効率的なモンテカルロ 法の開発」,日本物理学会第77回年次大会,2022年 3月,オンライン.
- [42] 大久保毅,「テンソルネットワーク法の量子多体問題 への適用と量子計算機への展開」,量子多体計算のフ ロンティア,2022年3月,オンライン.
- (セミナー)
- [43] 藤堂眞治、「データ同化による物質構造推定」、第1
 回オンラインサロン「スパコンコロキウム」、2021年4月、オンライン.
- [44] 藤堂眞治,「モノの科学と逆問題」,第132回 (2021 年春季)東京大学公開講座,2021年6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(電 子系、ボゾン系、スピン系、...)における磁性・強誘 電性・量子ホール効果・超伝導などの物性の解明お よび新奇現象の予言を目指している。またこれらの 系に対して、平均場近似などの従来的な手法や、場 の理論的手法、数値的対角化などを組み合わせて多 角的にアプローチしている。同時に、量子多体系や 可解模型に関する数理物理学的研究も行っている。

3.4.1 強相関系

量子スピン鎖における非線形 Drude 重み

近年、量子多体系における非線形輸送を特徴づけ る「非線形 Drude 重み」という量が新たに導入され、 これに関連した研究が盛んに行われている。谷川・ 桂と高三 (UC Berkeley)は、典型的な相互作用系で あるスピン 1/2 XXZ 鎖の絶対零度における非線形 Drude 重みを、Bethe 仮設法を用いて厳密に解析し、 熱力学的極限で発散するパラメター領域の存在を明 らかにした。このような発散は線形 Drude 重みには 見られない特徴である。さらに、この発散の起源が 基底状態エネルギーに対する非解析的な有限サイズ 補正であることを解明し、それに基づいて発散を伴 うパラメター領域と発散の強さを特定することにも 成功した。これらの結果は、原著論文 [3] にまとめら れたほか、国内会議 [43] で発表された。

谷川と桂はさらに、基底状態エネルギーに対する 有限サイズ補正の一般形を求め、そこから異方性パ ラメター Δ の全領域における非線形 Drude 重みの 詳細な振る舞いを調べた。その結果、応答の次数や パラメターの値に応じて、系のサイズに関して収束・ べき発散・対数発散のいずれかの振る舞いを示すこ とを明らかにした。また、こうした Δ に関する不連 続な振る舞いが数値計算結果と一致することを確認 した。さらに、任意の次数の非線形 Drude 重みが収 束する特別なパラメター値の存在も発見した。この ことは、相互作用が存在するにもかかわらず自由粒 子系と似た非線形応答特性を示す特別な場合がある ことを示唆している。これらの結果は、原著論文[10] にまとめられたほか、国内外の研究会 [31, 43] で発 表された。また、谷川はこれらの結果を修士論文と してまとめた [18]。

Z₃パラフェルミオン模型の相図

パラフェルミオンは、マヨラナフェルミオンの自 然な拡張であり、また量子計算への応用が期待され ることから、近年注目されている。従来よく議論さ れているパラフェルミオンの模型は、**Z**_Nクロック模 型と呼ばれる統計力学系に対応するものであり、パラ フェルミオンの二次の項のみからなる。桂と Utrecht 大(オランダ)の Wouters, Schuricht、Aachen 工科 大(ドイツ)の Hassler は、二次の項だけでなく四 次の項も含む模型を考え、そのような系の分数量子 ホール系・強磁性体・超伝導体からなるヘテロ構造 における実現可能性を議論した。また、特に Z₃ パ ラフェルミオンの場合について、四次の項の効果を、 密度行列繰り込み群法や場の理論的手法、厳密解を 用いて詳しく調べた。その結果、四次の項とフリッ プ項と呼ばれる二次の項との競合により様々な相が 現れることを明らかにした。フリップ項の係数 f が 正の場合には、Z₃トポロジカル相と自明相の間の相 転移が起き、これは中心電荷 c = 4/5 の共形場理論 で記述される。また、その端点にはc=8/5の多重 臨界点が現れる。一方、*f* < 0 の場合には、四次の 項の係数 U が比較的小さい領域に c = 1 の臨界相 が広がっていることを明らかにした。興味深いこと に、この臨界相と \mathbf{Z}_3 トポロジカル相の間の相転移 は、Kosterlitz-Thouless 転移であることも分かった。 これらの結果は、原著論文 [15] にまとめられた。

平坦バンドをもつボゾン系におけるモット絶縁体的 Bose-Einstein 凝縮 (BEC)

カゴメ格子上のタイトバインディング模型のよう な平坦バンド系は、強磁性などの強相関系特有の現象 の舞台として過去に多くの研究が行われている。一 方で、これらは主に電子系に関するものに限られて おり、平坦バンドのあるボゾン系に関する理論的研 究はあまり例がない。

桂と川島・森田(東大・物性研)、田中(有明高専)、 田崎(学習院大)は、平坦バンドをもつ相互作用する ボゾン系を考え、これらの系の基底状態はモット絶 縁体的であるにもかかわらず、(準)非対角長距離秩 序 (ODLRO) を示すことを明らかにした。具体的に は、まず一連の平坦バンドをもつタイトバインディ ング模型を考え、ここにある種の相互作用を導入し た場合には、基底状態が「数サイトに広がった」1粒 子固有状態の積状態として書き下せることを示した。 次に、この基底状態における1粒子密度行列は、古 典ループガス模型における相関関数として表現でき ることを示した。このことを用いて、高次元極限で は、モデルのパラメターを変化させると、ODLROを 示す BEC 相への量子相転移が起きることを明らか にした。さらに、二次元の場合については、モンテ カルロ・シミュレーションにより対応する古典ルー プガス模型における上述の相関関数やヘリシティモ ジュラスと呼ばれる量を詳細に調べた。その結果、あ るクラスの格子上では、パラメターを変化させると Kosterlitz-Thouless 転移が起こり、準 ODLRO を示 す基底状態へと変化することを明らかにした。これ らの結果は、原著論文 [7] にまとめられた。

拡張された SU(N) Hubbard 模型における η クラ スタリング状態

SU(2) Hubbard 模型の厳密な励起状態として、η ペアリング状態が知られている。この状態は、非対 角長距離秩序 (ODLRO) を持つため、超伝導や超流 動との関係で活発に研究が行われている。一方で、N 成分フェルミオン系における3体以上のクラスタリ ング状態は冷却原子の文脈で注目を集めている。

吉田・桂は、ηペアリング状態を1次元格子上の N 成分フェルミオン系に一般化した、ηクラスタリ ング状態を構成した。また、SU(N) Hubbard 模型 を拡張することによって、これらの状態を高エネル ギーの固有状態として持つモデルを構築した。次に、 シングレット相関関数を計算することで、これらの 状態の振る舞いが N が偶数の場合と奇数の場合で定 性的に異なることを明らかにした。N が偶数の場合 は、ηクラスタリング状態は N 粒子の ODLRO を示 す。一方、N が奇数の場合、相関はバルクでは距離 に対して指数関数的に減少するが、両端の相関は熱 力学極限で消えないことを発見した。最後に、ηクラ スタリング状態が唯一の基底状態となるハミルトニ アンを構築した。これらの結果は国際会議 [30]、国 内会議 [41] で発表されたほか、原著論文 [14] にまと められた。また、吉田はこれらの結果を修士論文の 一部としてまとめた [19]。

3.4.2 トポロジカル系

スピン自由度をもつ遍歴ボゾン系における対称性に 守られたトポロジカル相

スピン自由度をもつ遍歴ボゾン系の対称性に守ら れたトポロジカル相 (SPT 相) に関する研究を行っ た。SPT 相に関する研究は、先行研究では電子系や 量子スピン系に関するものが主で、遍歴ボゾン系に 関するものはあまりない。これは、ボゾンのスピン 自由度と「電荷」自由度の両方を同時に取り扱うこ とが理論的には難しいためである。一方で、冷却原 子系においては、むしろそのような状況が標準的で ある。このギャップを埋めるべく、Yang・桂と中野 (東大理物・藤堂研)は、Bose-Hubbard 模型の範囲 内で、種々のボゾンの SPT 相を実現できることを理 論的に提案した。鍵となるのは、一粒子ハミルトニ アンが平坦バンドと呼ばれる縮退した基底状態をも つ点である。この性質を用いて様々な数学的に厳密 な結果を導出した。また1次元系については、可解 な場合から少しずれた状況についても、摂動論や数 値計算により解析し、SPT 相の安定性を議論した。 これらの結果は、国内会議 [38] で発表されたほか、 原著論文 [5] にまとめられた。

マグノンのトポロジカル結晶絶縁体における Dirac 表面状態

量子ホール絶縁体、量子スピンホール絶縁体、Weyl 半金属などのマグノン系における対応物は近年盛ん に調べられており、温度勾配に垂直な方向の熱流や スピン流など、その非自明な物性が議論されている。 一方、電子系の3次元トポロジカル絶縁体やトポロ ジカル結晶絶縁体の有する Dirac 表面状態は多くの 興味深い性質を示し、トポロジカル物性の研究の中 でも中心的な位置にあったが、そのマグノン系での 対応物はほとんど考えられてこなかった。

近藤と赤城は、磁性体における時間反転と空間の 半並進を組み合わせた対称性により、マグノンのよ うなボソン系でもKramers 縮退が生じることに着目 し、この対称性に保護されたDirac 表面状態を有する 3次元磁性体のモデルを構築した。この系はトポロ ジカル結晶絶縁体に対応するマグノン系のモデルで あり、表面状態は電子系の場合のように、スピン運動 量ロッキングなどの性質を示す。また、この系にお

ける電場応答も調べた。磁性体に電場をかけたとき、 Dzyaloshinskii-守谷相互作用が変化することで、マグ ノンの磁気モーメントに依存した Aharonov-Casher 位相が加わることが知られている。今回の系でこの 寄与を考えたとき、マグノンの表面状態の Dirac 分 散が、互いに向かい合った面でそれぞれ上下にシフ トし、その過程でマグノン流が駆動できることを明 らかにした。このような現象は、電子系のトポロジ カル(結晶)絶縁体でも、従来のマグノン系でも見 られないものである。また、van der Waals 磁性体 CrI₃がモノクリニック積層構造を有するとき、密度 汎関数法などで見積もられたパラメータでマグノン バンドを計算することで、上記の表面状態が現れる ことを明らかにした。これらの結果は、原著論文[9] にまとめられた。また、近藤はこれらの結果を博士 論文の一部としてまとめた [21]。

マグノンの非線形スピン Nernst 効果とひずみにより調整可能な純スピン流

物質中の粒子が外場とは垂直に流れるといった非 自明な輸送現象が、Berry 曲率の観点から次々に調 べられている。中でも、磁性体中の輸送キャリアで あるマグノンのスピン Nernst 効果は純スピン流の生 成手段の1つである。しかし、線形応答のみを考慮 した既存の理論的枠組みの中では、Dzyaloshinskii-守谷相互作用などの重い原子に由来した特有の相互 作用を必要としていた。

近藤と赤城は、反強磁性体における温度勾配に関 する2次までの応答理論を構築し、マグノンの非線 形スピン Nernst 効果を初めて定式化した。特に、非 線形スピン Nernst 流が波数空間における Berry 曲 率の双極子モーメントのような量(拡張 Berry 曲率 双極子)で記述されることを明らかにした。マグノ ンの拡張 Berry 曲率双極子は Dzyaloshinskii-守谷相 互作用などの特有の相互作用がなくても、系の対称 性を崩すだけで容易に現れる。そのため、マグノン の非線形スピン Nernst 効果は、広い範囲の単純な Heisenberg 反強磁性体で期待できる純スピン流生成 の機構となっている。また、拡張 Berry 曲率双極子 は外的に制御できることが多く、いくつかの反強磁 性体において純スピン流の向きを格子ひずみで変え られることを明らかにした。さらに、マグノンの非 線形スピン Nernst 効果で生じるスピン流の大きさを 評価し、典型的な磁性体で十分に観測可能であるこ とを示した。これらの結果は、国際会議等 [27, 45] で 発表されたほか、原著論文 [17] にまとめられた。

CP^{N-1} 非線型シグマ模型における分数スキルミオン

スキルミオンのようなトポロジカル励起 (ソリトン) は位相的な保存量であるトポロジカルチャ ージ によって特徴づけられ、通常整数値をとる。しかし、 分数のトポロジカルチャージを持つトポロジカルソ リトンが、冷却原子系や磁性体、中性子星の内部な どに現れることが理論的に示唆されている。例えば、



図 3.4.11: *CP*² 非線型シグマ模型における分数スキ ルミオンのエネルギー密度. 左から合計トポロジカ ルチャージ *Q* = 1, 2.

Heisenberg 模型や SU(2) Yang-Mills 理論の有効模型である O(3) 非線型シグマ模型において、容易面磁気異方性を表すポテンシャル項(と Skyrme 項または Dzyaloshinskii-守谷相互作用などの安定項)を加えると、トポロジカルチャージ 1/2 を持った配位が得られる。このような配位は分数スキルミオン、または メロンと呼ばれ、実際に Co₈Zn₉Mn₃ などのカイラル磁性体でも観測されている。

赤城と、甘利 (JINR) , Gudnason (河南大) , 新田 (慶応大), Shnir (JINR) は、O(3) 非線型シグマ模 型の一般化である CP^{N-1} 非線型シグマ模型にポテ ンシャル項と安定項を加え、分数スキルミオン(分 子)を数値的に構成した。ここで加えたポテンシャ ル項は、模型の SU(N) 対称性を極大トーラス部分群 $U(1)^{N-1}$ まで破り、 またN = 2のとき、 容易面異方 性をもつ相互作用に帰着するものである。図 3.4.11 に、N = 3のときに得られた配位、すなわち CP^2 分数スキルミオン分子のエネルギー密度を示す。エ ネルギーのピークが分数スキルミオンに対応してい る。各々の分数スキルミオンはトポロジカルチャー ジ1/3を持ち、それらが合計のトポロジカルチャージ Qが整数となる分子を形成していることが見て取れ る。これらの結果は、国内外の研究会 [35, 47, 48, 50] で発表されたほか、原著論文 [12] にまとめられた。

3.4.3 数理物理学・統計力学

フラストレーションフリーな模型間の関係

フラストレーションフリー系は、可解模型のひと つのクラスで、全系の基底状態がそれぞれの局所ハ ミルトニアンの基底状態となるという特徴をもつ。 このようなフラストレーションフリー系の典型例と しては、強磁性 Heisenberg 模型や Affleck-Kennedy-Lieb-Tasaki (AKLT) 模型などが挙げられる。

桂は、Utrecht 大(オランダ)の Wouters, Schuricht とともに、このようなフラストレーションフリーな 模型を系統的に構成する方法を提案した。この方法 の要となるのは、conjugation と呼ばれる操作で、こ れは元々は Witten により超対称性のある系に適用 されたものを、超対称性のない模型にも適用したも のになっている。この方法を用いると、例えば、古 典 Ising 模型のような、基底状態が自明に分かる模型 から出発して、フラストレーションフリーな模型を 無数に構成できることを明らかにした。これにより、 従来は個別に議論されていた一群の模型を統一的に 取り扱うことができることが分かった。また、既知 のマヨラナフェルミオン、パラフェルミオン系のフ ラストレーション系のハミルトニアンを、この手法 により構成できることを示した。さらに、この手法 により新しいフラストレーションフリー系を複数構 成し、そのエネルギーギャップの存在などを示した。 これらの結果は、原著論文 [8] にまとめられた。

多重磁化プラトーを実現するフラストレートスピン ラダー系

フラストレーションや量子効果の強い磁性体では、 磁化曲線の途中に平坦な領域が生じる場合があり、 これは磁化プラトーと呼ばれている。磁化プラトー 上では、磁化は特別な有理数に量子化する。理論的 には、二つのスピン鎖が結合したラダー系について 多くの研究がなされている。特にスピン S = 1の Gelfand ラダーと呼ばれる模型では、基底状態が厳密 に求まり、1/4の倍数の磁化をもつプラトーが現れる ことが知られている。桂と、幸城・森田・川島 (東大物 性研)、金子 (近畿大) は、この S = 1 Gelfand ラダ-に、さらに次近接ラング間の反強磁性 Heisenberg 相 互作用を加えた模型を考案した。また、この拡張さ れた模型においても、基底状態が解析的に得られるこ とを明らかにした。加えて、この拡張模型では、1/4 の倍数の磁化をもつプラトーと、1/6の倍数の磁化 をもつプラトーが共存することを明らかにした。こ のように、二つの異なる有理数の整数倍の磁化プラ トーが共存する模型は知られておらず、本研究の結 果は複雑な磁化プラトー形成の新しいメカニズムを 示唆している。これらの結果は、国内会議 [46] で発 表されたほか、原著論文 [11] にまとめられた。

正多面体上の反強磁性 Heisenberg 模型に対するエ ネルギースケール変形

臨界的な1次元量子系の局所的なエネルギースケー ルをサイン二乗関数によって変調した系が、元の系 とほぼ同じ基底状態をもつことは多くの例において 確認されており、また自由フェルミオン系や共形場 理論による理解も確立されている。一方で、2次元 以上でも同様の現象が起きるかは自明ではない。

桂と江口・西野(神戸大)、大賀(東大物性研)、 Gendiar(スロバキア科学アカデミー)は、2次元 系への拡張の第一歩として、正多面体上の反強磁性 Heisenberg 模型に対するエネルギースケール変形を 考えた。具体的には、正多面体の中心から、各辺の中 心へ向かう方向余弦を考え、それに応じた非一様な 摂動項を、元々の一様なハミルトニアンに加えたも のを、変形したハミルトニアンとして定義した。正 4 面体、正 6 面体、正 8 面体に対しては、このよう に定義された模型の基底状態は、変形の度合いが弱 ければ、元の一様系と一致する。正 12 面体と正 20 面体についても、数値対角化により調べた結果、変 形前と後の基底状態のオーバーラップは 98% 以上で あった。これらの結果は、方向余弦に依存した摂動 項の導入が、サイン二乗変形の球面上に埋め込まれ た系への自然な拡張になっていることを示唆してい る。これらの結果は、国内会議 [54] で発表されたほ か、原著論文 [13] にまとめられた。

3.4.4 その他

複数の平坦バンドをもつタイトバインディング模型 の構成

平坦バンド系は、強相関系特有の現象の舞台とし て古くから興味を持たれており、最近ではその冷却原 子系を用いた実現も話題を集めている。平坦バンド をもつタイトバインディング模型の構成法には様々 なものが知られているが、多くは平坦バンドが一粒 子エネルギースペクトルの端ないし中央に現れるタ イプのものである。

桂と溝口・初貝(筑波大)、丸山(福岡工大)は、複 数のエネルギー準位に平坦バンドが現れるタイトバ インディング模型の系統的な構成法を考案した。具 体的には、2次元のハニカム格子、3次元のダイア モンド格子やパイロクロア格子の各辺を等価な「分 子」で置き換えた格子を考えると、その分子のエネ ルギー準位に平坦バンドが現れることを見出した。 このことは波数空間のハミルトニアンと孤立した分 子のハミルトニアンの行列表示の間に、intertwining relation と呼ばれるものが成立することから、簡単に 理解することができる。また、この関係式を用いる ことにより、各平坦バンドの波動関数を、分子のエ ネルギー固有関数から構成できることを示した。こ れらの結果は、原著論文[6]にまとめられた。また、 国内外の会議で発表された[33, 52]。

Ising マシンにおけるバイナリ整数変換の性能比較

組合せ最適化問題は、与えられた候補の中からある目的関数を最大化あるいは最小化する候補の組合せを探し出す問題である。このタイプの問題の多くは、古典 Ising 模型の基底状態を求める問題 (Ising 問題)に変換可能である。近年ではこうした Ising 問題)に変換可能である。近年ではこうした Ising 問題 を効率よく解くハードウェアである Ising マシンの開発が盛んである。Ising 問題は {0,1} から成るバイナリ変数の2次式で記述されるため、Isingマシンを用いる際は組合せ最適化問題をバイナリ変数で表現し直す必要がある。また多くの場合、課される制約条件もバイナリ変数で表す必要がある。中でも不等式型の制約条件の場合、整数をバイナリ変数で表す 変換が用いられる。このバイナリ整数変換は一意ではないため、実用の観点から Ising マシンにおけるバ

本研究ではバイナリ整数変換を比較する系統的な方 法を与え、その方法を2次のナップサック問題(QKP) に適用した。この問題は不等式制約を持ちつつ、その目的関数が一般的なバイナリ変数の2次式で与えられる。我々は QKP を解くことで典型的なバイナリ整数変換である one-hot、binary、unary エンコーディングの性能を比較した。そしてサイズが大きな問題に対しては unary エンコーディングが最も良い性能を示すことを明らかにした。これらの結果は原著論文 [4] にまとめられた。

<受賞>

- [1] 柴田 直幸,理学系研究科研究奨励賞 (博士課程),東京 大学,2022 年 3 月 24 日.
- [2] 吉田 博信, 理学系研究科研究奨励賞 (修士課程), 東京 大学, 2022 年 3 月 24 日.

<報文>

(原著論文)

- [3] Yuhi Tanikawa, Kazuaki Takasan, and Hosho Katsura: Exact results for nonlinear Drude weights in the spin-1/2 XXZ chain, Phys. Rev. B 103, L201120 (2021) [Selected as Editors' Suggestion].
- [4] Kensuke Tamura, Tatsuhiko Shirai, Hosho Katsura, Shu Tanaka, and Nozomu Togawa: Performance comparison of typical binary-integer encodings in an Ising machine, IEEE Access 9, 81032 (2021).
- [5] Hong Yang, Hayate Nakano, and Hosho Katsura: Symmetry-protected topological phases in spinful bosons with a flat band, Phys. Rev. Research 3, 023210 (2021).
- [6] Tomonari Mizoguchi, Hosho Katsura, Isao Maruyama, and Yasuhiro Hatsugai: Flat-band solutions in *D*-dimensional decorated diamond and pyrochlore lattices: Reduction to molecular problem, Phys. Rev. B **104**, 035155 (2021).
- [7] Hosho Katsura, Naoki Kawashima, Satoshi Morita, Akinori Tanaka, and Hal Tasaki: Mott Insulator-like Bose-Einstein Condensation in a Tight-Binding System of Interacting Bosons with a Flat Band, Phys. Rev. Research 3, 033190 (2021).
- [8] Jurriaan Wouters, Hosho Katsura, and Dirk Schuricht: Interrelations among frustration-free models via Witten's conjugation, SciPost Phys. Core 4, 027 (2021).
- [9] Hiroki Kondo and Yutaka Akagi: Dirac surface states in magnonic analogs of topological crystalline insulators, Phys. Rev. Lett. **127**, 177201 (2021).
- [10] Yuhi Tanikawa and Hosho Katsura: Fine structure of the nonlinear Drude weights in the spin-1/2 XXZ chain, Phys. Rev. B 104, 205116 (2021).
- [11] Hidehiko Kohshiro, Ryui Kaneko, Satoshi Morita, Hosho Katsura, and Naoki Kawashima: Multiple magnetization plateaus induced by farther neighbor interaction in an S = 1 two-leg Heisenberg spin ladder, Phys. Rev. B **104**, 214409 (2021).

- [12] Yutaka Akagi, Yuki Amari, Sven Bjarke Gudnason, Muneto Nitta, and Yakov Shnir: Fractional Skyrmion molecules in a CP^{N-1} model, J. High Energ. Phys. **2021**, 194 (2021).
- [13] Takuya Eguchi, Satoshi Oga, Hosho Katsura, Andrej Gendiar, and Tomotoshi Nishino: Energy Scale Deformation on Regular Polyhedra, J. Phys. Soc. Jpn. 91, 034001 (2022).
- [14] Hironobu Yoshida and Hosho Katsura: Exact eigenstates of extended SU(N) Hubbard models: generalizations of η -pairing states with N-particle off-diagonal long-range order, Phys. Rev. B **105**, 024520 (2022).
- [15] Jurriaan Wouters, Fabian Hassler, Hosho Katsura, and Dirk Schuricht: Phase diagram of an extended parafermion chain, SciPost Phys. Core 5, 008 (2022).
- [16] Ning Wu, Hosho Katsura, Sheng-Wen Li, Xiaoming Cai, Xi-Wen Guan: Exact solutions of fewmagnon problems in the spin-S periodic XXZ chain, Phys. Rev. B 105, 064419 (2022).
- [17] Hiroki Kondo and Yutaka Akagi: Nonlinear magnon spin Nernst effect in antiferromagnets and strain-tunable pure spin current, Phys. Rev. Research 4, 013186 (2022).

(学位論文)

- [18] 谷川悠飛: Exact Analysis of Nonlinear Drude Weights in the Spin-1/2 XXZ Chain (修士論文).
- [19] 吉田博信: Rigorous Results for Lattice Fermion Models with SU(N) Symmetry (修士論文).
- [20] 三ノ宮典昭: Spontaneous Supersymmetry Breaking and Nambu-Goldstone Modes in Interacting Majorana Chains (博士論文).
- [21] 近藤寛記: Theory of surface states and transport phenomena in topological magnon systems (博士論 文).
- [22] 柴田直幸: Construction of Exact Quantum Many-Body Scar States (博士論文).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [23] Yutaka Akagi (Hiroki Kondo, Hosho Katsura): Topological Magnons from "Nematicity", International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (online), May 2021.
- [24] Kimberly Remund (Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhányi, Nic Shannon): New Method for Studying Dynamics and Thermodynamics of Spin-1 Magnets: Application to the Ferroquadrupolar Order, International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (online), May 2021.

- [25] Rico Pohle (Yutaka Akagi, Kimberly Remund, Nic Shannon): Dynamics of a quantum liquid crystal from numerical simulation, International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (online), May 2021.
- [26] Rico Pohle (Yutaka Akagi, Kimberly Remund, Nic Shannon): Dynamics of spin-1 magnets from numerical simulations, XXXII IUPAP Conference on Computational Physics (online), Aug. 2021.
- [27] Hiroki Kondo (Yutaka Akagi): Nonlinear magnon spin Nernst effect in antiferromagnets and straintunable pure spin current, APS March Meeting 2022, Chicago, Mar. 2022.
- [28] Kensuke Tamura (Hosho Katsura): Construction of quantum many-body scars in higherdimensional spinless fermion systems, APS March Meeting 2022, Chicago, Mar. 2022.
- [29] Shoichi Tsubota (Hong Yang, Yutaka Akagi, Hosho Katsura): Symmetry-protected quantization of complex Berry phases in non-Hermitian many-body systems, APS March Meeting 2022, Chicago, Mar. 2022.
- [30] Hironobu Yoshida (Hosho Katsura): Generalized η -pairing States in Extended SU(N) Hubbard Models, APS March Meeting 2022, Chicago, Mar. 2022.
- [31] Yuhi Tanikawa (Hosho Katsura): Exact results for nonlinear Drude weights in the spin-1/2 XXZ chain, APS March Meeting 2022, Chicago, Mar. 2022.
- [32] Kimberly Remund (Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhányi, Nic Shannon): Spin-1 magnets
 a u(3) formalism, APS March Meeting 2022, Chicago, Mar. 2022.

招待講演

- [33] Hosho Katsura: Intertwining construction of flat bands, The 21st International Conference on Discrete Geometric Analysis for Materials Design, online, Japan, Sept. 2021.
- [34] Hosho Katsura: Experimental mathematical physics, *Rigorous Statistical Mechanics and Related Topics*, online, Japan, Nov. 2021.
- [35] Yutaka Akagi: Topological Excitations and Their Emergent Phenomena in Quantum Spin Nematics, International Conference on Frustration, Topology and Spin Texutures, online, Japan, Dec. 2021.
- [36] Naoyuki Shibata: Onsager's scars in disordered spin chains, CONMAT2021, online, Spain, Oct. 2021.

(国内会議)

一般講演

[37] 吉田 博信: SU(N) 引力ハバード模型におけるマヨラ ナ鏡映正値性, 理論研究会:量子多体系の相形成とダ イナミクス, 2021 年 4 月, オンライン.

- [38] Hong Yang: Magnetic and Topological Phases of Spinful Bosons in Optical Lattices, 第3回冷却原 子研究会「アトムの会」, 2021年8月, オンライン.
- [39] 田村 健祐: 高次元スピンレスフェルミオン系における量子多体傷跡状態の構成,第3回冷却原子研究会「アトムの会」,2021 年8月,オンライン.
- [40] 田村健祐, 桂法称:高次元スピンレスフェルミオン系 における量子多体傷跡状態の構成,日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月, オンライン.
- [41] 吉田博信, 桂法称: 拡張された SU(N) ハバード模型 における N 粒子の非対角長距離秩序を持つ厳密な固 有状態, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月, オンライン.
- [42] Hong Yang, Linhao Li, Kouichi Okunishi, Hosho Katsura: Criticality, duality, and topology in quantum spin-1 chains, 日本物理学会 2021 年秋季 大会, 2021 年 9 月, オンライン.
- [43] 谷川悠飛, 桂法称: スピン 1/2 XXZ 鎖における非線 形スピン Drude 重みの異方性に関する不連続な振る 舞い, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月, オンライン.
- [44] 坪田祥一,楊 泓,赤城裕,桂法称:反転対称性の下での複素ベリー位相の量子化,日本物理学会2021年秋季大会,2021年9月,オンライン.
- [45] 近藤寛記, 赤城裕: 反強磁性体におけるマグノンの非 線形スピンネルンスト効果とひずみにより調整でき る純スピン流, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年9月, オンライン.
- [46] 幸城秀彦, 金子隆威, 森田悟史, 桂法称, 川島直輝: 多 重磁化プラトーを実現するフラストレートスピンラ ダー系の厳密解, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年9月, オンライン.
- [47] 赤城裕:量子スピン液晶におけるトポロジカル励起, 第5回 QLC 若手コロキウム「古典的液晶と量子液晶 の関係探索」, 2021 年 11 月, オンライン.
- [48] 赤城裕: Spin nematic Skyrmions in quantum magnets, 令和3年度新学術領域研究「量子液晶の物性 科学」領域研究, 2022年2月, オンライン.
- [49] 真田兼行, 桂法称: スカラーカイラリティに関連した 量子多体傷跡状態をもつスピン模型, 日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月, オンライン.
- [50] 赤城裕, 甘利悠貴, Sven Bjarke Gudnason, 新田宗土, Yakov Shnir: 磁性体におけるスピン液晶分数スキル ミオン, 日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月, オンライン.
- [51] 小野淳, 赤城裕: 空間反転対称な遍歴磁性体における スピンスカラーカイラリティの円偏光制御, 日本物理 学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月, オンライン.
- [52] 溝口知成, 桂法称, 丸山勲, 初貝安弘: 修飾されたハ ニカムおよびダイアモンド格子上のフラットバンド の求め方, 日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月, オンライン.
- [53] 中川大也,桂法称,上田正仁:多成分 Hubbard 模型 における η ペアリング状態とエルゴード性の弱い破 れ日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月, オン ライン.

- [54] 江口卓也, 大賀理司, 桂法称, 西野友年: 正多面体上の Heisenberg モデルに対するエネルギースケール変形, 日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月, オンラ イン.
- [55] Leilee Chojnacki, Rico Pohle, Han Yan, Yutaka Akagi, Nic Shannon: Analogues of light and gravity in the collective excitations of quantum magnets, 日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月, オンライン.
- [56] Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhányi, Nic Shannon: Spin-1 magnets – a u(3) formalism 日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月, オンライン.
- [57] 桂法称:非エルミート量子系における複素ベリー位相の実部の量子化,新学術領域「離散幾何学」領域会議, 2022年3月,オンライン.
- (セミナー)
- [58] 桂 法称: The SU(N) Hubbard model: some rigorous results, CREST Research Seminar on "Theoretical studies of topological phases of matter", 2021 年 5 月, オンライン.
- [59] 桂 法称: Experimental mathematical physics, 統計 力学セミナー (東京大学), 2021 年 7 月, オンライン.
- [60] 赤城 裕: Topological Magnons from "Nematicity", OIST internal seminar (joint seminar by Shannon and Motome groups), 2021 年 7 月, オンライン.
- [61] 桂 法称: Sine-square deformation of onedimensional critical systems, CEVIS, 2021 年 10 月, オンライン.
- [62] 吉田 博信: 拡張 SU(N) ハバード模型における一般 化 η-ペアリング状態, 藤本・水島研セミナー (大阪大 学), 2021 年 10 月, オンライン.
- [63] 近藤 寛記: 対称性に保護されたマグノンのディラック表面状態と反強磁性体におけるマグノンの非線形スピンネルンスト効果, Online CMT seminars, 2021年11月, オンライン.
- [64] 桂 法称:量子多体傷跡状態の代数的構成法,素粒子論 セミナー (京都大学), 2022 年 1 月, オンライン.

3.5 樺島研究室

2021 年度の樺島研の構成メンバーは樺島の他、高 橋昂助教、Xiangming Meng 特任研究員、M1:1名、 および樺島が 2019 年度まで勤務していた東工大から の特別研究学生 3 名(D2:1名、M2:2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、2021 年 度に得られた主な研究成果の概要を記す。

3.5.1 スパース推定

ℓ₁-正則化付き線形回帰によるイジング逆問題の性能 分析

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

この問題に対し、 ℓ_1 -ノルム $||J_i||_1 = \sum_{j \neq i} |J_{ij}|$ を 罰金項として偽尤度に加える ℓ_1 -ノルム正則化を導入 することで疎に結合したネットワーク構造をスピン 数 N の対数程度のデータ量で完全に同定できること が先行研究で示されている。ただし、現実的な状況 では推定に対して正しい偽尤度関数を利用できると は限らない。我々は、推定に用いるモデルが実際のモ デルと異なっている場合の素朴な例としてイジング 逆問題に ℓ_1 -正則化付き線形回帰を用いた場合のネッ トワーク再構成の可能性をレプリカ法を用いて吟味 した。その結果、正しい偽尤度関数を用いた場合と ほぼ同じデータ量でネットワーク構造を同定できる ことが判明した [4, 13]。

線形制約下における SCAD 最小化問題の解の分析

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

従来、スパースな解を導く性質を備え、かつ、凸 最適化として定式化されるため求解が容易であると いう理由から、 $\ell_1 ノルム ||\vec{x}||_1 = \sum_{i=1}^N |x_i|$ をコスト 関数として用いる方法が広く利用され、また、その 信号復元性能が盛んに研究されてきた。一方で、近 年の研究から、非凸関数を用いることで $\ell_1 ノルムを$ 利用した場合を超える信号復元性能が得られること が報告されている。ただし、非凸関数の最適化は自 明でなく、効率的な求解法の探索とその性能の分析 が必要である。

我々は、SCADと呼ばれる非凸関数に着目し、小 規模なランダム問題を対象に解の分布を全数探索に よって分析した。その結果、SCADの局所最小解の 個数は問題サイズに対して指数関数的に増大するも のの、適当な初期条件から局所探索によって典型的 に発見される解は最小解付近の少数のものに限られ ることが明らかになった [14]。

ガウス近似された確率伝搬法に基づく行列補完

ノイズ下で不完全な要素の観測から行列全体を復 元する行列補完問題は推薦システムや画像処理をは じめとして、実用上重要な問題である。この問題に 対処するための有力な方法として、対象とする行列 のランク R が行列の縦横サイズと比較して十分小さ いと仮定し、低ランク行列に分解された表現を求め る「低ランク行列分解法」が知られている。低ラン ク行列分解法は、一定の条件の下でその有用性が理 論的に保証されているものの、厳密な求解は計算量 的負荷が高く、低計算量かつ精度の高い近似アルゴ リズムが求められている。

我々は、確率伝搬法に基づいた近似アルゴリズム の開発を試みた。ただし、素朴に得られる確率伝搬 法は多数のノンパラメトリックな関数の更新を必要 とするため実装が困難である。そこで、線形応答関 係をもちいて2次までのモーメントを一致させるガ ウス近似により、計算機上での実装が容易なアルゴ リズムを導いた。このアルゴリズムは既存アルゴリ ズムである ALS-MP と同程度の計算複雑度である一 方で、ノイズに対してロバストであることをモデル 系に対する数値実験により示した。また、実データ に対しても、ALS-MP と互角の性能が得られること を確認した [2, 9]。

3.5.2 生化学反応の情報量解析

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

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

$$\mathcal{T}_{X \to Y}^{(p),(q)} = H(Y_t | Y_{t-1}^{(q)}) - H(Y_t | X_{t-1}^{(p)}, Y_{t-1}^{(q)})$$

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

ところが近年、蛍光蛋白質を用いることで、細胞内 化学反応の同時計測が可能になってきた。こうした 現状を鑑み、我々は実験データから細胞内のシグナル 伝達を TE によって特徴づけることを試みた。ただ し、非線形かつ非定常な生化学反応に対してデータか ら統計的有意性を担保しながら TE を評価することは 容易ではない。そこで我々は、 ガウス近似の下、 計算 統計の方法に基づいて統計的有意性を担保した TE の 評価法を開発した。さらに、開発した手法を細胞内情 報伝達経路として知られている ERBB-RAS-MAPK システムに適用した。具体的には、SOS-RAF 分子間 の情報伝達に着目し、SOS 分子にヌーナン症候群と 呼ばれる遺伝病に関与していることが知られている 変異を加えた系と野生型の系の間で SOS-RAF 間の TE を比較した。その結果、平均時系列や素朴な相関 分析での比較では検知が難しい野生型と変異型の差 異が TE では顕著に見られることがわかった [3, 16]。

3.5.3 組み合わせ最適化問題

重量に関する制約の下で価値を最大化する品物の 組み合わせを求めるナップザック問題は代表的な組 み合わせ最適化問題である。一般にナップザック問 題は解の探索だけでなく検証も難しい NP-hard クラ スに属している。各品物に関する選択が選ぶ/選ば ないの2通りで与えられる 0-1 ナップザック問題に ついては、分枝限定法により比較的高速に求解でき ることが経験的に知られている。残念ながら複数の 重量制約の下、各品物を制限なく複数回選択するこ とのできる個数制限のないナップザック問題につい ては有力な解法が知られていない。本研究では、統 計力学のキャビティ法と貪欲法を組み合わせること で個数制限のないナップザック問題に関する近似解 法を開発した。また、モデル系に対してレプリカ法 を用いた分析を行うことにより、開発した近似解法 が現実的な計算量で最良解とかなり近い価値を達成 できることを明らかにした [10]。

3.5.4 統計的学習理論

標本分散・共分散行列に関する固有値分布の解析

得られた観測データから、それらを発生させた真 の分布に関する情報をどのようにして得るかという ことは、統計的推測の文脈において広く扱われてい る問題である。我々は観測データから得られる情報 としてデータの標本分散・共分散行列の固有値分布 に着目し、特にその漸近固有値分布、およびそのサ ポートの上限のふるまいについて解析した。

分散・共分散行列の漸近固有値分布については、特定の設定の下でよく知られた結果が存在する。たとえば、ランダム行列理論におけるマルチェンコーパスツール則は、単位行列を分散・共分散行列に持つ多次元正規分布から独立に発生するデータの標本分散・共分散行列の漸近固有値分布に関する法則である。この例ではデータの次元 N、サンプル数 M が

 $M/N = \alpha$ をみたしながら $N, M \rightarrow \infty$ となるとき、 その漸近固有値分布が有限のサポートを持ち、その 上下限は $\alpha \rightarrow \infty$ の際に $O(\alpha^{-1/2})$ でデータの各成 分に対する真の分散の値である "1" (= N 重に縮退 した真の分散・共分散行列の固有値) に収束する。

我々は、こうした振る舞いはどこまで一般的なの だろうかという問いを立て、より一般の分散・共分 散行列を有する多次元正規分布に対する標本分散・ 共分散行列の漸近固有値分布の解析を行った。具体 的には、真の分散・共分散行列の固有値がベータ分 布によって特徴付けられる多次元正規分布から発生 したデータに対して、標本分散・共分散行列の漸近 固有値分布がどのように振る舞うかを分析した [11]。 特に、漸近固有値分布のサポートがα→∞となる 際に真の固有値分布のサポート境界に漸近するオー ダーが、ベータ分布の裾に関する冪指数に対してど のように依存するかについてレプリカ法を用いて評 価した [15]。

自己学習アルゴリズムの典型性能評価

近年の機械学習の多くは大量のラベルありデータ を用いた教師あり学習に依存している。一方で、問 題によってはラベルをつける作業自体のコストが高 く、大量のラベルありデータを得るのは難しい。そ こで、ラベルありデータとラベルなしデータを組み 合わせて、ラベルありデータのみを用いて教師あり学 習を行った場合よりも優れた予測性能を持つ分類器 を学習する半教師あり学習の手法が研究されている。

自己学習アルゴリズムは簡便で実際的に扱いやす い、半教師あり学習の基本的手法である。自己学習 アルゴリズムの基本的なアイディアは、手元の学習 済みモデルによってラベルなしデータ点のラベルを 予測し、その予測を真のラベルであるかのように扱っ て改めて学習しなおすというものである。具体的に は、(i) ラベルありデータのみを用いて教師あり学習 を行う、(ii) ラベルなしデータ点のラベルを予測す る、(iii) 予測値を真のラベルであるかのようにみな し、ラベルなしデータ点も交えて教師あり学習を行っ てモデルを更新する、(iv) そして(ii),(iii)のステッ プを適当な回数だけ繰り返すという手続きを踏む。

自己学習アルゴリズムによる性能の改善幅は上述 の内部ルーチン (iii) で用いる具体的な教師あり学習 の詳細や取得データの性質に依存する。しかし、そ の依存性を定量的に解析する理論的枠組は極めて少 ない状況にあった。そこで、我々は自己学習アルゴ リズムを不規則系の統計物理学の問題として定式化 し、その典型性能評価を行うためのレプリカ法の枠 組みを開発した。また具体的に、2成分混合ガウス 分布からデータが生成されている設定で、リッジ正 則化を加えた交差エントロピー損失の最小化によっ て線形モデルを学習する場合に、予測性能の改善幅 が各ガウス分布のサイズ、正則化パラメータの大き さといった詳細にどのように依存するのかを解析し た。その結果、混合ガウス分布の混合比が 1:1 に近い 場合には、詳細に正則化パラメータをチューニング すれば少数のラベルなしデータでも性能が 30%程度

改善すること、および十分に多くのラベルなしデー タがある場合には正則化パラメータの詳細なチュー ニングをしなくても十分に多くのラベルありデータ がある場合の教師あり学習に匹敵する汎化性能が得 られることが明らかになった。この成果は [12, 22] で部分的に報告した。

対角スケーリング問題の典型性能評価

複数の量的変数をまとめて一つの総合指数を作り、 そこからランキングを作ることがしばしば行われて いる。例としては大学ランキングなどが挙げられ、各 評価指標の重み付け和によって最終的なスコアがつ けられている。

このようなスコアの構成法には専門知識に基づいたヒューリスティックな手段もあるが、汎用性に欠ける。そこでデータの統計性のみに基づいた構成法が様々に提案されている。特に、2016年に清らによって提案された客観的総合指数は、対角スケーリング問題という凸最適化問題によって重みを決定可能で、かつ各量的変数と必ず正の相関を持つという顕著な性質を持つことがわかっている。

客観的総合指数は近年提案された手法である。そ の理論的性質の理解は徐々に始まったばかりであり、 多くの研究は量的変数の個数 p に比べて、データ数 nが非常に多い $p/n \rightarrow 0$ における漸近論での議論に 留まっている。*n*,*p* が同程度である場合や*n* < *p* で ある場合において安定的に十分信頼のおける重みが 決まる保証は与えられていない。そこで、本研究で はデータ数 n と量的変数の個数 p の比が O(1) であ るような熱力学極限 $n, p \to \infty, p/n \to 1/\alpha \in (0, \infty)$ における重みが、古典的な漸近領域 $p/n \rightarrow 0$ にお ける極限での重みとどの程度異なるのか、人工的な データの設定でレプリカ法を用いて解析した。その 結果、上のような熱力学極限においても、古典的な 漸近領域で得られる重みとの方向余弦が極端に小さ な値をとることはないことが明らかになった。つま り、データ数が量的変数の個数と同程度であっても 十分有用なランキング指標を構成できる。この結果 は[17]において報告した。

<報文>

(原著論文)

- X. Meng, T. Obuchi, and Y. Kabashima, "Structure learning in inverse Ising problems using ℓ 2-regularized linear estimator ", J. Stat. Mech. (2021), pp. 053403-1 – 053403-43
- [2] K. Okajima and Y. Kabashima, "Matrix completion based on Gaussian parameterized belief propagation", J. Stat. Mech. (2021), pp. 093407-1 – 093407-24
- [3] T. Imaizumi, N. Umeki, R. Yoshizawa, T. Obuchi, Y. Sako, and Y. Kabashima, "Assessing transfer entropy from biochemical data", Phys. Rev. E 105, pp. 034403-1 - 034403-13 (2022)

(会議抄録)

[4] X. Meng, T. Obuchi, and Y. Kabashima, "Ising Model Selection Using l₁-Regularized Linear Regression: A Statistical Mechanics Analysis", in Advances in Neural Information Processing Systems 34 pre-proceedings (NeurIPS 2021)

(国内雑誌)

- [5] 樺島祥介、情報の統計力学 –「ランダム系」の視点 からシャノンの定理を再考する-、数理科学 59(11), pp. 65–71 (2021)
- [6] 樺島祥介、レプリカ対称性の破れとその広がり、化 学 76(12), pp. 25–27 (2021)
- [7] 樺島祥介、レプリカ対称性の破れとは? –祝ジョルジ オ・パリージ博士ノーベル物理学賞受賞–、科学 92(2), pp. 110–113 (2022)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

[8] X. Meng, T. Obuchi, and Y. Kabashima, "Ising Model Selection Using l₁-Regularized Linear Regression: A Statistical Mechanics Analysis ", Thirty-sixth Conference on Neural Information Processing Systems, online, Nov. 28– Dec. 9 (2021)

(国内会議)

一般講演

- [9] 岡島光希、樺島祥介、"ガウス型確率伝搬法による行列補完",日本物理学会 2021 年秋季大会, online, 9月23日 (2021)
- [10] 中村優太、高橋昂、 樺島祥介、"個数制限のないナッ プザック問題の統計力学的解析",日本物理学会 2021 年秋季大会, online, 9 月 23 日 (2021)
- [11] 森田祐亮、高橋昂、樺島祥介、"標本分散共分散行列 の漸近固有値分布に関する統計力学的解析",日本物 理学会 2021 年秋季大会, online, 9 月 23 日 (2021)
- [12] 高橋昂"半教師あり学習の平衡統計力学的解析",日本 物理学会 2021 年秋季大会, online, 9 月 23 日 (2021)
- [13] Xianming Meng、小渕智之、 樺島祥介, "L1 正則化 付き逆イジング問題の理論解析:統計力学的アプロー チ",日本物理学会第 77 回年次大会, online, 3 月 15 日 (2022)
- [14] 石井智、高橋昂、小渕智之、坂田綾香、樺島祥介、"線形 制約下における SCAD 最小化問題の解について",日本物理学会第77回年次大会, online, 3月15日 (2022)
- [15] 森田祐亮、高橋昂、 樺島祥介、"標本分散共分散行列 の最大固有値に関する統計力学的解析",日本物理学 会第77回年次大会, online, 3月15日 (2022)
- [16] 今泉拓也、梅木伸久、吉澤亮、小渕智之、佐甲靖志、樺 島祥介、"生化学反応データからの移動エントロピー の評価",日本物理学会第77回年次大会, online, 3月 15日 (2022)

[17] 高橋昂、"高次元統計領域における対角スケーリング の統計力学的解析",日本物理学会第77回年次大会, online,3月15日 (2022)

招待講演

[18] 樺島祥介, "高次元統計とレプリカ法", 統計サマーセ ミナー 2021, 8月9日 (2021)

(セミナー)

- [19] Y. Kabashima, "Introduction to the replica method", 理研 iThems セミナー, 6月23日 (2021)
- [20] 高橋昂, "ブートストラップ法の計算・理論に対する 統計物理学的アプローチ", 東京大学数理情報学談話 会, 10 月 25 日 (2021)
- [21] 高橋昂, "安定性選択法の近似計算と典型性能評価", 統計物理と統計科学のセミナー,11月16日 (2021)
- [22] 高橋昂, "疑似ラベルに基づく半教師あり学習の統計 力学的解析", 情報数物研究会, 1 月 18 日 (2022)

(アウトリーチ)

[23] 樺島祥介,"人工知能と磁石の物理",東京大学理学部 オープンキャンパス 2021Online,7月10日(2021)

3.6 辻研究室

本年度の辻研究室の構成は、辻の他 M1 が 1 名で あった。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。

2021 年度は主に、超伝導体のヒッグスモードを含 むダイナミクスの物理と高次非線形光学応答、多バ ンド超伝導体におけるレゲットモード、散逸のある 非平衡量子開放系、揺らぎ・非線形応答・カオスの 間の関係などの研究テーマに取り組んだ。また、辻 は研究テーマ「非平衡量子多体系の物性物理学」に より令和3年度東京大学卓越研究員に選ばれた[1]。

3.6.1 超伝導体のダイナミクス

超伝導体のヒッグスモード

超伝導体には、超伝導秩序パラメーターの振幅(す なわち超流動密度)が集団的に振動する集団励起モー ドが存在し、素粒子のヒッグス粒子との類似から近年 ではヒッグスモードと呼ばれている。ヒッグスモー ドは電気的・磁気的に中性のため光と(線形で)結合 せず、近年まで電荷密度波と超伝導が共存する系を除 いて観測するのが困難であった。ところが非線形応 答まで考えるとヒッグスモードと光を直接相互作用 させることができる。この非線形結合を使うと、超 伝導体に照射した光の周波数の2倍が超伝導ギャッ プエネルギーに一致するときにヒッグスモードと光 が共鳴し、それに伴って巨大な三次高調波が発生す る。実際に高強度のテラヘルツ波を用いた実験によ り三次高調波の共鳴が観測され、ヒッグスモード由 来の応答と整合する結果が得られている。辻はこれ ら超伝導体のヒッグスモードの物理を含む非平衡量 子多体系の最近の発展について集中講義[13]、およ び招待講演[9]を行なった。

高次非線形光学応答とヒッグス自己相互作用

三次高調波の共鳴によって超伝導ヒッグス場のポ テンシャルの最小点まわりの振動の様子がわかって きたが、最小点から離れたところでヒッグス場のポ テンシャルがどのような形になっているかは未解明 であった。それを見るためにはより高次の非線形効 果を捉える必要がある。辻は超伝導体の5次の非線 形光応答を理論的に解析した [6]。5 次の非線形効果 は様々な励起プロセスを含むが、その中でも周波数ω の光によって発生する3次高調波の強度が別の周波 数Ωの光によって変調される効果に着目した。BCS 近似に基づいて対応する5次の非線形感受率を評価 し、周波数 2ω が超伝導ギャップ 2Δ に一致すると ころで最も速く発散する寄与を抜き出した。その結 果、ヒッグスモードの自己相互作用や光との高次の 非線形結合を通して3次高調波の強度を共鳴的に変 調させることができることがわかった。特にヒッグ スモードの自己相互作用は5次の非線形効果で初め て現れる現象であり、ヒッグス場のポテンシャル形 状を決定することを可能にする。超伝導体で発生す る3次高調波が別の光によって大きく増強できるこ とは、テラヘルツ光を用いた最近の実験によって観 測されている [7]。

多バンド超伝導体のレゲットモード

多バンド系における超伝導体には、複数成分を持 つ秩序パラメーターが存在する。それに伴って秩序 パラメーターの振幅の振動に対応するヒッグスモー ドだけでなく、異なる秩序パラメーターの間の相対 位相の振動に対応するレゲットモードが存在するこ とが知られている (図 3.6.12)。これまで三次高調波 などの非線形光学応答にレゲットモードが現れるこ とは知られていた。辻は鎌谷氏・北村氏・森本氏(東 大物工)、島野氏 (島野研) とともに、レゲットモー ドが三次高調波だけでなく線形応答の光学伝導度ス ペクトルに現れる可能性があることを明らかにした [2]。この効果は現象論的な Ginzburg-Landau 理論 や、Rice-Mele-Hubbard 模型を用いたミクロな理論 によって確かめることができる。MgB2や鉄系超伝 導体、遷移金属ダイカルコゲナイドを含む様々な超 伝導物質を用いた実験による観測可能性について議 論した。



図 3.6.12: 二つの秩序パラメーター Ψ₁,Ψ₂ を持つ 超伝導体に光を照射したときにヒッグスモードとレ ゲットモードが誘起される概念図 [2]。

η ペアリング超伝導と電磁場の結合

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

nペアリング状態は高エネルギー領域において超 伝導の性質を示す固有状態として興味深いが、ダイ ナミカルな電磁場と結合すると不安定になることが わかっている (図 3.6.13)。これは、η ペアリング状 態に含まれるダブロンが光を放出して壊れる過程が 存在するためであり、放出された光がさらに別のダ ブロンを壊すという反応が連鎖的に起こることで η ペアリング状態が動的に不安定になる。別の言い方 をすれば、η ペアリング状態と電磁場が結合するこ とで η ペアエキシトンと呼べるような電磁場の衣を まとった準粒子に変化し、その準粒子のスペクトル が虚部を持つために有限の寿命をもつ。これらの不 安定性によって、ηペアリング状態の寿命は一般に フェムト秒のオーダー程度に非常に短くなる。この 結果は、高エネルギー領域で超伝導状態を安定的に 実現しようとするときの障害になる。辻は、高エネ ルギー領域での超伝導状態の実現に向けて電磁場と の結合による不安定性とそれを回避するための試み について議論した [8]。

3.6.2 散逸のある非平衡量子開放系

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。特に、散逸を導入するこ



図 3.6.13: ηペアリング状態において、ダブロンが光 を放出して壊れるとその光がさらに別のダブロンを 壊して光を出すことで、連鎖的にηペアリング状態 が不安定化する様子。

とによって孤立系・平衡系では実現できなかった新 奇な量子状態を作り出す可能性が広がってきている。 辻は中川氏・上田氏 (上田研)、川上氏 (京大) ととも に、量子多体系の物理の最近の進展について解説記 事にまとめた [4]。

粒子散逸のある超流動の集団励起と非平衡相転移

冷却原子系は散逸を人工的に制御できる利点があ り、量子多体開放系の格好の舞台である。その中で も、非弾性衝突による粒子散逸が存在する冷却フェ ルミ原子系において、超流動相の集団励起がどのよ うに振る舞うかは未解明であった。辻は山本氏・川 上氏 (京大)、中川氏・上田氏 (上田研) とともに、粒 子散逸があるフェルミ超流動相の集団励起を量子マ スター方程式の枠組みで理論的に解析した [3, 5]。粒 子散逸が存在するときは秩序パラメーターの位相が 回転し、その角速度が時間とともに速くなっていく chirping が起こることがわかった。散逸が一方にだ け入ったジョセフソン接合系を導入すると、散逸が弱 いとき秩序パラメーターの位相の違いに起因した ac + dc 型のジョセフソン電流が流れ、レゲットモード が誘起されることを見出した。一方散逸が強くなる と、ジョセフソン電流の dc 成分が 0 になることで特 徴付けられる非平衡相転移が起こることがわかった。

自然放出が誘起する超流動状態

光の自然放出は原子系において普遍的に存在する 散逸の一つであり、原子系の様々な制御に応用され ている。冷却原子系においては原子の内部状態間で 光の自然放出を起こして緩和するような散逸を人工 的に導入することが可能である。そのような散逸を 制御することで、冷却フェルミ原子系において定常 状態でηペアリング超流動状態を誘起することがで きる。これは、ηペアリング状態においてパウリの排 他律によって自然放出が抑制されることと、干渉効 果によってダブロンの崩壊が抑制されることによる。 特に、無限温度の初期状態から出発してもηペアリ ング相関が発達するという著しい特徴を持つ。辻は、 このように自然放出によって誘起される超流動ペア リングの機構と光格子中の冷却原子系で実験的に実 現する方法について議論した [11, 12]。

3.6.3 揺らぎ・非線形応答・カオス

孤立量子系に対する揺らぎの定理の標準的なアプ ローチは、エネルギーを時間発展の最初と最後に射影 測定してその差から系の外からした仕事を求める二 点測定形式に基づくものである。射影測定を行うた めに、系が時間発展をしてたどり着いた量子状態の一 部の情報、つまり最終時刻におけるハミルトニアンの 固有状態を基底にとって量子状態を密度行列で表現 したときにその対角成分の一要素の情報しか得られ ない。密度行列の非対角成分は量子状態のもってい る量子コヒーレンスを特徴づけるが、それは Hong-Ou-Mandel (HOM)型の干渉実験によって観測する ことができる。

二つの同一な系の間の HOM 干渉実験によって得 られる量子コヒーレンスの分布を全系がした仕事の 関数としてみると、順過程と逆過程の間で揺らぎの 定理型の厳密な関係式が成り立つ。通常の仕事の揺 らぎの定理と異なり、始状態と終状態の間の自由エ ネルギー差だけでなく Rényi エントロピー差とも関 係する。この関係式は任意の N 個の同一な系の間の HOM 干渉実験の問題に拡張することができる。こ のような関係式を平衡状態近傍に適用すると、非線 形応答係数とカオスの性質を結びつける非時間順序 型の揺動散逸定理が導かれる。辻は、このような揺 らぎと非線形応答、カオスの間の関係について議論 し、さらに量子コヒーレンスの揺らぎが量子系の非 可積分性と関係することを示した [10]。

<受賞>

 [1] 辻直人、令和3年度東京大学卓越研究員、東京大学、 2021年11月18日。

(原著論文)

- [2] Takumi Kamatani, Sota Kitamura, Naoto Tsuji, Ryo Shimano, and Takahiro Morimoto, "Optical response of the Leggett mode in multiband superconductors in the linear response regime", Phys. Rev. B 105, 094520 (2022).
- [3] Kazuki Yamamoto, Masaya Nakagawa, Naoto Tsuji, Masahito Ueda, and Norio Kawakami, "Collective Excitations and Nonequilibrium Phase Transition in Dissipative Fermionic Superfluids", Phys. Rev. Lett. **127**, 055301 (2021).

(国内雑誌)

 [4] 中川大也、辻直人、川上則雄、上田正仁、「冷却原子 気体における開放量子多体系の物理」、日本物理学会 誌 Vol. 77, No. 2, 88 (2022).

<報文>

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

[5] Kazuki Yamamoto, Masaya Nakagawa, Naoto Tsuji, Masahito Ueda, Norio Kawakami, "Theory of collective excitations and nonequilibrium phase transition in dissipative fermionic superfluids", International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2020), online, September 2021.

(国内会議)

一般講演

- [6] 辻直人、「超伝導体の5次非線形光応答とヒッグスモードの自己相互作用」、日本物理学会年次大会、オンライン、2022年3月.
- [7] 礒山和基、辻直人、寺井弘高、島野亮、「BCS 超伝導 体 NbN における Higgs モード共鳴 テラヘルツ第3 高調波発生の光誘起増強現象」、日本物理学会年次大 会、オンライン、2022 年3月.
- [8] 辻直人、「高エネルギー超伝導物性物理学の創出」、JST 創発的研究支援事業川村パネル「創発の場」、オンラ イン、2022 年 3 月.

招待講演

- [9] 辻直人、「超伝導体における相転移ダイナミクス 〜最 近の話題〜」、「初期宇宙の相転移ダイナミクスに迫る 物性実験勉強会」、オンライン、2022 年 3 月.
- [10] 辻直人、"Fluctuations, nonlinear response, and chaos",「量子・熱・情報」ミニワークショップ、オ ンライン、2021 年 12 月.
- (セミナー)
- [11] Naoto Tsuji, "Nonequilibrium superconductivity toward a realization at high temperature", 大阪 大学物性理論セミナー、オンライン、2021年7月.
- [12] 辻直人、「非平衡超伝導 ~高温での実現を目指して ~」、東京大学物理学教室談話会、オンライン、2021 年4月.

(集中講義)

[13] Naoto Tsuji, "Recent developments of' nonequilibrium physics in quantum many-body systems", 大 阪大学大学院理学研究科物理学専攻、International Physics Course (IPC), Topical Seminar II, オンラ イン、2021年7月.

3.7 蘆田研究室

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

3.7.1 開放系の物理

非エルミート物理・散逸系

外界環境や観測者の影響下の物理系は「非平衡開 放系」として記述される。これまで我々は開放系の 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求してきた。近年、これら の研究は量子系にとどまらず古典系にも広がりを見 せている。特に我々が以前行った研究により、アク ティブマターや電気回路などの非平衡古典系におい て、非エルミート系に特有な「例外点」と呼ばれる特 異点に守られた特異な端状態 - 例外端状態 - が発現 し得ることが発見された。この非エルミート系特有 の現象は、線形領域においてこれまで議論されてい たが、非線形領域での振る舞いは未知であった。蘆 田は東大物工沙川研とともに、例外端状態が非線形領 域でも安定に存在できることを数値的に示した。特 に、この端状態を同期現象に応用することで、バル クでは振動子の位相がバラバラでカオス的挙動を示 すが、端の振動子は同期し位相が揃うという新規な 同期現象 - トポロジカル同期現象 - が生じることを 発見した。これらの研究は2次元系に限られていた が、3次元系にも同様の概念を拡張することに成功し 例外点で保護された特異な端状態 - 例外表面モード - が発現することも見出した。以上の結果は国際会 議での招待講演をはじめいくつかの学会・セミナー でも発表された [4, 7, 8, 11]。また昨年度より執筆を 行っていた、非平衡開放系の物理の発展に関する概 説論文が [2] で出版された(上田研との共著)。さら に、我々の一連の結果も含めた当該分野の最近の発 展に関して、集中講義を行った [12]。

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。一方で、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きている。 蘆田は共振器物質系の理論的解析を行い、結合が強 い極限で物質と電磁場の量子もつれを漸近的に解く ユニタリ変換が構成できることを示した(ハーバー ド大学・スイス連邦工科大学との共同研究)。これに 基づき、量子光-物質系の非摂動領域を解析するため の一般的な理論的枠組みを提案した。特に、周期ポ テンシャル中を運動する電子に応用することで、従 来の記述が破綻する強結合領域でも有効な強束縛模 型を構築した。さらに、理論を量子電磁場環境が連 続・複数自由度の場合にも拡張した。これにより導 波管量子電磁力学で良く知られた物理系の、非摂動 領域における非平衡ダイナミクスの計算に初めて成 功した。また、同様のユニタリ変換を量子散逸系に も応用した。特に、量子散逸系の代表的な例である 「抵抗に繋がれたジョセフソン接合系」に応用し、数 値的繰り込み群と組み合わせることで、この系の非 摂動的解析に成功した。汎関数繰り込み群を用いた 解析も行い、それぞれの手法で得られた結果を比較 した。その結果、これまで摂動的解析に基づき信じ られてきた基底状態の相図が、非摂動効果により定 性的な変更を受けることを明らかにした。以上の結 果は、論文や国際会議での招待講演などを通して発 表された [1, 5, 9, 13]。

3.7.2 統計物理·機械学習

熱平衡状態にあるマクロな物理系は従来の熱・統 計力学により精緻に記述される。一方で、平衡から 遠く離れた物理系の基礎理論を模索する試みは物理 学における長年の課題であった。近年、揺らぎが重 要となる微視的な物理系の熱力学 - 確率的熱力学 -の理解が飛躍的に進展した。特に熱力学的不確定性 関係と呼ばれる不等式により、微小な熱機関におけ るパワー効率トレードオフ関係の限界が得られるこ とが知られていた。蘆田は東大物工沙川研と協力し 高次キュムラントを含めた形の熱力学的不確定性関 係を導いた。この関係式は、キュムラント展開を二 次で打ち切った特別な場合に従来の関係式を自然に 包含している。得られた結果をナノ熱電系に応用す ることで、得られた高次の関係式がパワー効率トレー ドオフに関して従来の二次の関係式よりも厳しい上 限を与えていることを数値的に示した。相互作用の あるナノ熱電系については、差分進化として知られ る最適化手法を用いることで、パワー効率トレード オフ関係が数値的に見出されている。これらの成果 について論文や国内会議での招待講演を通して発表 した [3, 10]。

<報文>

(原著論文)

 Y. Ashida, A. Imamoglu and E. Demler, Cavity Quantum Electrodynamics at Arbitrary Light-Matter Coupling Strengths, Physical Review Letters 126, 153603 (13 Apr. 2021).

- [2] Y. Ashida, Z. Gong and M. Ueda, Non-Hermitian Physics, Advances in Physics 69, 3 (26 Apr. 2021).
- [3] T. Kamijima, S. Otsubo, Y. Ashida, and T. Sagawa, Higher-order efficiency bound and its application to nonlinear nanothermoelectrics, Physical Review E 104, 044115 (15 Oct. 2021).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [4] Y. Ashida, Nonequilibrium dynamics and thermalization in open quantum many-body systems, META 2021, Online, July 20-23, 2021.
- [5] Y. Ashida, Shedding quantum light on quantum materials, the 3rd International Symposium on Dynamics of Artificial Quantum Systems (DAQS2022), Online, Feb. 21-23, 2022.
- [6] Y. Ashida, Hermitian and non-Hermitian topological phenomena in active matter, "Topological invariants in biology and chemistry" at APS March meeting 2022, Chicago (hybrid), Mar. 15-19, 2022.

(国内会議)

一般講演

- [7] 曽根和樹, 蘆田祐人, 沙川貴大, バンドトポロジー由 来の非線形トポロジカル同期, 日本物理学会 2021 年 秋季大会, オンライン, 2021 年 9 月 20 日-23 日.
- [8] 曽根和樹, 蘆田祐人, 沙川貴大, 例外表面モードに保 護されたトポロジカルレーザー, 日本物理学会 2022 年年次大会, オンライン, 2022 年 3 月 15 日-19 日.
- [9] 増木貫太, 敷藤広之, 押川正毅, 蘆田祐人, ジョセフソン接合における量子相転移の非摂動くりこみ群解析, 日本物理学会 2022 年年次大会, オンライン, 2022 年 3月15日-19日.

招待講演

[10] 蘆田祐人, 差分進化を用いた最適なナノ熱機関の探索, ディープラーニングと物理学オンライン, オンライン, 2021 年 6 月 17 日.

- [11] Y. Ashida, Physics of open systems: from non-Hermitian to light-matter systems, 原子力機構先端 研セミナー, オンライン, 2021 年 6 月 23 日.
- [12] 蘆田祐人,集中講義「非平衡開放系の量子多体物理」, 中央大学 (オンライン), 2021 年 7 月 26 日-28 日.
- [13] Y. Ashida, Nonperturbative cavity/waveguide quantum electrodynamics and dissipative quantum phase transition, 理研 iTHEMS NEW セミナー, オ ンライン, 2022 年 3 月 10 日.

⁽セミナー)

4 物性実験

4.1 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として清水翔太が新しくメ ンバーに加わった。9月には HUANG Hongrui が、 3月には遠山晴子が博士課程を修了して就職した。

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

SiC 結晶表面上の単層グラフェンでの Ca インター カレート誘起超伝導

SiC 結晶基板上に成長した 2 層グラフェンにおい て、その原子層間に Ca 原子をインターカレートす ると超伝導が誘起されることを数年前に当研究室か ら報告している。しかし、グラフェンと SiC 基板と の界面まで含めた積層構造や、超伝導に寄与する電 子状態については実験による検証が不十分であった。 本研究では、SiC 上単層グラフェンにおいても Ca イ ンターカレートを行うと超伝導が発現することを発 見した。これまで注目されてこなかったグラフェン と基板との界面が、原子構造および電子状態の両方 において超伝導発現に重要な役割を担っていること が明らかになった。さらに、常伝導伝導度に対する 超伝導転移温度の振る舞いが、通常の自由電子的な 金属における BCS 超伝導とは異なるという興味深い 特性が発見された。この特異性は非従来型超伝導を 誘起するとされるファンホーブ特異点の関与を示唆 しており、低温 STS 観測などにより非従来型超伝導 を検証することが今後の課題である。(東京大学物性 研究所と東京工業大学との共同研究)

磁性原子が規則配列した強磁性トポロジカル絶縁体 における軟磁性的スキルミオンの観測

強磁性(FM)が付与されたトポロジカル絶縁体(TI) (強磁性トポロジカル絶縁体: FMTI) は、表面にト ポロジカルに非自明なカイラルスピン電子状態を有 するが、この表面状態と磁化が coupling することに よりスキルミオンと呼ばれる渦状磁気構造が実現さ れる。スキルミオン渦は MnSi 結晶などの強磁性金 属に特定の強さの磁場を印加することで形成される が、FMTIでは強磁性金属と違い「トポロジカルに保 護された」カイラル電子状態によってスキルミオン が安定的に保たれると予測されている。本研究では、 磁性原子 Mn が規則的に配列した自己形成型 FMTI、 Mn(Bi,Sb)₂Te₄ (略して MnBST) において、特定強 度の印加磁場でスキルミオン由来のホール抵抗の増 大 (トポロジカルホール効果) が観測された。さら に、TI 結晶内部に Mn 磁性原子を希薄的にドープし た FMTI と比較して、今回観測されたスキルミオン は 1/10 程度の弱い磁場で生成できることがわかっ た。MnBST は希薄磁性ドープ系 FMTI と違い、Mn 原子が自己形成によって原子レベルで規則的かつ密 に配列しており、そのため Mn 原子どうしの強磁性 相互作用が強まったことが原因と考えられる。本研 究は弱い磁場で制御可能な「軟磁性的スキルミオン」 を FMTI 系で明らかにした最初の例である。(東京 工業大学と物質材料研究機構との共同研究)

自己形成型磁性トポロジカル絶縁体 $Mn(Bi_{1-x}Sb_x)_2$ Te₄ の Sb/Bi 組成比に依存した強磁性特性

前項の自己形成型強磁性トポロジカル絶縁体 MnBST は、磁性原子 Mn が規則的に配列した結晶構 造をもつため、量子異常ホール効果といった新奇量 う物性の観測温度の向上が期待される。一方、非磁 性元素 Sb と Bi の組成比を変えることでフェルミ準 位が変わるだけでなく磁気特性も変化するなど、この 強磁性機構は未解明な点が多い。本研究では、単ユ ニット層 MnBST の Sb/Bi 組成比に対する電気伝導 と磁気特性を調べた。その結果、Sb 比率が高くなる に従ってキュリー温度が単調に増加した。一方、Sb 添加によって面内方向の Mn 原子どうしの距離が単 調に小さくなることから、本系の強磁性特性は Sb 置 換による磁性層の格子歪など、結晶構造に起因した ものと考えられる。

Si(111) 表面上の (Tl,Pb) 単原子層における円偏光 誘起非相反電流

スピン分裂した電子系に円偏光を照射すると、波 数空間上での電子分布に偏りが生じ、一方向に流れ る電流が生成される(円偏光フォトガルバニック効果 (CPGE))。従来の報告では *ex situ* 測定が多く、また 光応答が極めて小さいことから、単原子層・表面超構 造物質における CPGE 観測はできないと考えられて いた。本研究では巨大ラシュバ効果が報告されてい る Si 基板上の単原子層物質である (Tl,Pb)/Si(111) を作成し、超高真空中 in situ で円偏光の照射によっ て誘起された光電流を観測した。Tl と Pb の蒸着量 を制御して表面超構造を $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ や 4×4 周期の単 原子層合金を作って測定した結果、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ の場合 に非相反光電流が最大化することが明らかになった。 これは表面バンドが疎な場合に励起電子分布の偏り が大きくなり、その結果 CPGE 電流が増大すると理 解できる。また物質表面1原子層では光はあたかも 真空中と同様に振る舞うという示唆も得られた。

SrTiO₃結晶表面上の FeSe 原子層の構造と超伝導

超伝導体である FeSe は、そのバルク結晶では約8 Kで超伝導転移し、SrTiO₃(001) 基板上に成長させた 単ユニット層の FeSe では最高で 100 K を超える超伝 導が報告されている。この超伝導発現には界面からの 電荷移動と界面フォノンのデバイ振動数が重要である ことが指摘されている。本研究では SrTiO₃(001) を 酸素欠損させた表面超構造 $\sqrt{13} \times \sqrt{13}$ 、2×1、 $\sqrt{5} \times \sqrt{5}$ を作り分けることで電荷移動量を制御し、その上に FeとSeを共蒸着してFeSe結晶を作製し、in situ 4 探針電気伝導測定を行い超伝導の発現を目指す。現 在までに、10 ユニット層厚の FeSe を SrTiO₃(001)-√13 × √13 表面に作製したところ、90 K 付近でバ ルクと同様にネマティック転移による電気抵抗異常 が見られた。また、20~40 K の範囲で電気抵抗が絶 対温度の2乗に比例し、20K以下では絶対温度に対 して比例した結果が得られた。これらの結果はバル クでも観測されておりフェルミ液体から非フェルミ 液体に移り変わったと考えられる。今後は超伝導を 発現させた後、SrTiO3 基板を水素終端して超伝導転 移温度の増強を目指す

トポロジカル結晶絶縁体上での α-Sn 原子層の成長 と超伝導

トポロジカル超伝導に特有なマヨラナゼロモード (MZMs)を探索するため、2次元超伝導体 (2DSC) とトポロジカル結晶絶縁体 (TCI)の接合系を作成し た。その一例として α-Sn 原子層/SnTe(111)系を調 べている。SnTe(111)表面上に成長させた α-Sn 原子 層が BKT 転移を示して超伝導に転移することを観 測し、この系は 2DSC/TCI であることがわかった。 また、面内臨界磁場がパウリ極限を超える非常に大 きな値を示すので、I/II 型イジング超伝導、または スピン3重項をもつ非従来型超伝導である可能性が ある。さらに詳細に研究するために、α-Sn 原子層の 高品質化と SnTe のフェルミ準位チューニングを行 い、MZMs の検出を目指す。

Cu₂Se 原子層の成長構造と電気伝導特性

Cu₂Se は、巨大な熱電性能を示す物質として知ら れているが、約100℃以上の高温ではCuイオンが固 体中を活発に動き回る超イオン伝導体でもあり、そ れ以下の温度では、Cu イオンが安定にとどまる位置 が複数個所存在し、それに応じてバンド構造が半導 体から半金属に変化することも知られている。本研 究では、その原子層の成長を試み、その伝導特性を 調べた。Si(111) 基板結晶表面を Sn で終端して平坦 化した 2√3×2√3 表面超構造上では、約 200 ℃以下 の基板温度で平坦な Cu₂Se 原子層が成長することを 見出した。その伝導特性を測定したところ、35 K 以 下の低温で線形な磁気抵抗効果が、35~80 K では弱 反局在効果が見られ、80 K 以上では古典的な磁気抵 抗効果となった。また、35 K 以下ではホール抵抗が ほとんどゼロとなったことから、この低温相では線 形バンド分散を持つディラック半金属であり、温度 上昇とともに半導体に相転移すると考えられる。こ の相転移は、理論計算で示唆されているように、Cu イオンの位置変化に伴う構造相転移に起因すると考 えられるので、今後、X線回折を用いて構造変化を 明らかにして伝導特性との相関を明らかにしたい。

Mnドープされた半導体 $SnSe_2$ におけるスピングラス的な磁気特性

SnSe₂は 1~2 eV ほどのバンドギャップを持つ半 導体であり、その結晶に Mn 原子をドープして磁性 を付与し、その特性を調べた。4%-Mnドープ試料は CVD 法で作製し、その組成と構造を EDX と X 線回 折で評価すると、析出物は見られず単結晶となって いることが分かった。SnSe2 は層状物質であるため、 層に対して面直・面内に分けて磁気特性を SQUID で評価した。その結果、臨界温度 T_c が 66 K の強磁 性を示し、面内が磁化容易軸であることが分かった。 磁場中冷却と零磁場冷却とで、磁化の温度依存性が 異なる挙動を示した。これはスピングラス的な特性 に由来しており、磁気クラスターが生じていること を示す。低温になるに従いクラスター間(反強磁性 的)、およびクラスター内(強磁性的)の相互作用が それぞれ成長し、その共存によってスピングラス的 な磁気凍結が起きているを考えられる。(中国科学技 術大学との協同研究)

Yb-インターカレート・グラフェンにおける強磁性

d,f 電子軌道を持つ金属原子をグラフェンにイン ターカレートすると、金属原子とグラフェンのπ軌
道との交換相互作用が生じ、強磁性が発現されるこ とが理論的に示唆されている。昨年、本研究室では、 6H-SiC(0001) 基板を大気圧 Ar ガス中で通電加熱し て得られるグラフェン/SiC 上に、4f 電子軌道をもつ 常磁性物質の Yb 原子を蒸着してアニールすること により、金属原子インターカレートグラフェンを作成 し、世界で初めて強磁性(最大 T_c =100 K)を観測し た。本研究では、その強磁性の機構を解明するため、 作製条件を系統的変えた Yb インターカレートグラ フェンを作製し、それらの伝導特性および SQUID に よる磁化測定を行った。その結果、キャリア密度が 低いほど強磁性転移温度が高くなる傾向が観測され た。これはキャリア密度の増加と共に強磁性転移温 度が増加する一般的な希薄磁性半導体におけるキャ リア誘起強磁性とは真逆の振る舞いであり、単純な

キャリア媒介強磁性ではないことが示唆された。

4.1.2 表面・原子層ナノ構造の形成

SrTiO₃(001) 基板上への室温 wetting layer 成長 法による超平坦 SnTe(001) 薄膜の成長

結晶の鏡映対称性に保護された表面状態を持つト ポロジカル結晶絶縁体 (TCI) は、従来のトポロジカ ル絶縁体 (TI) とは違って、数原子層の薄さにすると 2 次元トポロジカル絶縁体への転移が予想されるな ど、エキゾチックな物性が期待されている。その典 型物質 SnTe は層状物質ではないため、薄くて平坦な 膜の結晶成長が極めて難しく、島状・迷路状の成長様 式を示すことが大きな問題であった。本研究では絶 縁性 SrTiO₃(001) 結晶基板上に室温で微量の SnTe 蒸着を行って wetting layer を形成し、続いて基板温 度を昇温させると結晶性が劇的に改善し、平均二乗 粗さ RMS が 0.5 nm 程度の極めて平坦で高品質なエ ピタキシャル薄膜形成が可能であることを発見した。 電気伝導評価からは 2 次元弱反局在効果が観測され、 トポロジカル表面伝導を観測した。

テラヘルツ光を用いたサイクロトロン共鳴による Bi 薄膜結晶の物性研究

Bi はキャリ濃度が低く、急峻なバンド分散のため にディラック電子系をなし、さらにスピン軌道相互 作用が極めて強く、トポロジカル物質の母物質となっ ているという特徴をもつため、今なお興味が尽きな い。Bi 薄膜は量子井戸現象のため、膜厚を薄くする とバンド構造が半金属的から半導体的に転移するこ とが報告されており、それぞれのバンド構造での輸 送特性の違いなど詳細に解明すべき点がある。そこ で、Si(111) 面に成長した Bi(111) 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を 明らかにする。分光実験では当該膜厚では初めて明 瞭な吸収が観測され、磁場依存するエネルギーバンド の重なりを示唆する結果も得られた。Bi は Sb ドー プによりトポロジカル物質への転移やフェルミ面の 調整が可能であるので、今後はSbドープ系での有効 質量やキャリアの変化などを明らかにしていく。(物 質・材料研究機構との共同研究)

4.1.3 新しい装置・手法の開発

超高真空中 4 探針電気伝導・トンネル分光同時測定 装置の開発

物質表面や薄膜の超伝導を調べるとき、電気伝導 とトンネル分光を超高真空中で同タイミング・同一 試料で測定可能とするため、本研究室で所有してい る 超高真空 in situ 4 端子プローブ電気伝導測定装 置を改良し、トンネル分光測定機構を追加した。プ ローブ探針で鉛薄膜試料の超伝導ギャップを観測し、 磁場印加でギャップが消失することを観測し、この トンネル分光測定から、3.2 K において約 0.5 meV の分解能が実現していることが確認できた。また、 4端子プローブのうち、トンネル接合を作らないプ ローブを直接試料に接触させることでリターンパス を確保し、絶縁性の高い基板上の試料も測定可能に なった。今後はプローブ周辺の安定性を高めること によってトンネル分光測定の分解能を向上させ、特 に、トポロジカル超伝導体などの非従来型超伝導の 候補物質の測定を行う。

超高真空中 in situ 偏光制御中赤外線照射装置の開発

円偏光は右/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。本研究室では超 高真空装置内で試料を作成し*in situ* 測定するため に、円偏光生成機構を、ビューポートを介さず真空 装置へと接続するためのチャンバーと光学系を設計 し製作している。この設計では研究室に既存のレー ザー(波長 635 nm、1550 nm)に加えて、2~9 μ mと広い波長範囲での中赤外光の円偏光が生成でき、 様々な励起エネルギーに応じた円偏光誘起電流が測 定できると期待できる。この波長域は、トポロジカ ル絶縁体のバルクギャップやラシュバ効果の典型的 なエネルギー分裂幅である 100~300 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。

SiC 熱分解グラフェンの安定作成手法の構築

グラフェンの作成方法として、気相成長法や剥離法 などがあるが、近年では SiC 結晶の熱分解法が用い られることが多く、本研究室でも通電加熱による SiC の熱分解法でグラフェンの生成を行ってきた。しか し、通電加熱は再現性が悪く、また特に絶縁性 SiC を 用いることが出来ない。解決すべき課題は最高 1800 ℃まで SiC を加熱する炉の形成と、赤外線を放射し ない SiC の温度を正確に測定する手法の確立である。 そこで、グラファイトヒーターを搭載した真空炉を 製作し真空中およびアルゴン雰囲気中で 2100 ℃まで 加熱できることを確認した。また、SiC 裏面に磨り 加工とグラファイト塗布を行うことで温度を正確に 測れることを見出した。これにより、SiC のドープ 量や形状によらずグラフェンを再現性良く作成する ことが可能となった。

面内方向飛行時間 (Lateral-ToF) 型の移動度測定 手法の開発

半導体デバイスの高密度化・高速度化に伴い、表 面・界面を伴う微細構造における移動度の向上は重 要な課題となっている。とくに、フラッシュメモリ 等の高度に集積されるデバイスでチャンネル材料と して用いられる多結晶シリコンは代替が利かない素 材であるにも関わらず移動度が低い。多結晶シリコ ンの移動度向上のために、パルスレーザーを用いた 面内方向飛行時間 (Lateral-ToF) 型の移動度測定手 法の開発と検証を行った。昨年度測定システムが完 成し、各種試料について測定を行ったが、FETによ る電界効果移動度の測定との整合性が得られなかっ た。これはトラップ準位が多く且つ深い場合、移動 度が物性値としての意味をなさなくなるからである と考えられる。多結晶シリコンにおける真なる移動 度の定義、その特性の評価等を再考する必要がある。

スピン検出プローブの開発

スピンを利用する技術、スピントロニクスが期 待されている。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 主流であるが、この手法では微細加工で作成できる試 料しか測定できず、トポロジカル絶縁体など特異なス ピン伝導特性を持つことが期待される試料を測定す ることができない。このため、本研究室では、AFM や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た が、微細加工施設の入室制限等で製作が進まなかっ た。今後は、このプローブを用いて、山梨大学白木 研究室においてグラフェン内でのスピン・電子輸送 特性の研究を行う予定である。

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われた。

・日本学術振興会 科研費 基盤研究 (A)「強いスピン 軌道相互作用物質表面でのエッジを利用した非相反 伝導現象の研究」(代表 長谷川修司)

・日本学術振興会 科研費 基盤研究 (B)「トポロジカ ル絶縁体・強磁性体接合の磁性機構解明と、高温量 子異常ホール効果への展開」(代表 秋山了太)

・日本学術振興会 科研費 挑戦的研究 (萌芽)「水素修 飾で実現する高転移温度を持つ原子層超伝導体」(代 表 秋山了太) ・日本学術振興会 科研費 挑戦的研究 (萌芽)「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] 佐藤瞬亮:"高磁場・サブケルビン・超高真空 4 探針電 気伝導・トンネル分光同時測定装置の開発"、SPring-8 ユーザー協同体・日本表面真空学会合同ミニコンファ レンス NanospecFY2021mini ショートプレゼンテー ション学生賞銅賞, 2022 年 3 月 25 日.

<報文>

(原著論文)

- [2] H. Huang, A. Rahman, J. Wang, Y. Lu, R. Akiyama, S. Hasegawa: Spin-glass-like state induced by Mn-doping into a moderate gap layered semiconductor SnSe₂, Journal of Applied Physics 130, 223903(6pp) (Dec, 2021).
- [3] T. Takashiro, R. Akiyama, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, R. Nakanishi, S. Sato, T. Fukasawa, T. Sasaki, H. Toyama, K. L. Hiwatari, A. V. Zotov, A. A. Saranin, T. Hirahara, S. Hasegawa: Softmagnetic skyrmions induced by surface-state coupling in an intrinsic ferromagnetic topological insulator sandwich structure, Nano Letters 22(3), 881-887 (Jan, 2022).
- [4] T. Machida, Y. Yoshimura, T. Nakamura, Y. Kohsaka, T. Hanaguri, C.-R. Hsing, C.-M. Wei, Y. Hasegawa, S. Hasegawa, and A. Takayama: Superconductivity near the saddle point in the two-dimensional Rashba system Si(111)-√3 × √3-(Tl,Pb), Physical Review B 105, 064507 (9pp) (Feb, 2022).
- [5] H. Toyama, R. Akiyama, M. Hashizume, S. Ichinokura, T. Iimori, T. Matsui, K. Horii, S. Sato, R. Hobara, Y. Endo, T. Hirahara, F. Komori, S. Hasegawa: Two-dimensional superconductivity of the Ca-intercalated graphene on SiC: vital role of the interface between monolayer graphene and the substrate, ACS Nano 16(3), 3582-3592 (Feb, 2022).

 [6] 秋山了太:岩塩型構造を持つ化合物の単結晶薄膜及び その製造方法,特願 2022-030143,出願日 令和 4 年 2 月 28 日.

(著書)

 [7] 長谷川修司 (分担執筆): 多探針走査トンネル顕微鏡 (セクション 24.8), in 『図説 表面分析ハンドブック』 (日本表面真空学会編, 朝倉書店, Jun, 2021).

(その他)

[8] 長谷川修司:国際物理オリンピック 2021 リトアニア大会 オンライン参加, JPhO News Letter **31**, 5-6 (Sep, 2021).

⁽特許)

[9] 長谷川修司: スピン流を測る (理学の謎 第15回), 理 学部ニュース 9月号, p. 14 (Sep, 2021).

(学位論文)

- [10] HUANG Hongrui: Doping effects of a layered posttransition metal dichalcogenide tin diselenide (博士 論文).
- [11] 遠山晴子: アルカリ(土類)金属インターカレートに よるグラフェンの電子構造の変調と超伝導特性 (博士 論文).
- [12] 佐藤瞬亮:高磁場・サブケルビン・超高真空4 探針 電気伝導・トンネル分光同時測定装置の開発とそれに よる超伝導体の評価(修士論文).
- [13] 谷内息吹:スピン軌道相互作用の大きな 2 次元物質 における円偏光ヘリシティ依存光電流(修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

[14] R. Akiyama: Observation of topological Hall effect in sandwich structures with self-assembled intrinsic topological ferromagnet Mn(Bi,Sb)₂Te₄, Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS)-26, 2021 年 12 月 21 日, Online.

一般講演

- [15] T. Takashiro, Ryota Akiyama, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, R. Nakanishi, S. Sato, T. Fukasawa, T. Sasaki, H. Toyama, K. L. Hiwatari, A. V. Zotov, A. A. Saranin, T. Hirahara, S. Hasegawa: Softmagnetic skyrmions induced by surface-state coupling in a sandwich structure with an intrinsic ferromagnetic topological insulator(poster), International Symposium on Novel Materials and Quantum Technologies (ISNTT 2021), 2021 年 12 月 14 日, online.
- [16] T. Takashiro, Ryota Akiyama, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, R. Nakanishi, S. Sato, T. Fukasawa, T. Sasaki, H. Toyama, K. L. Hiwatari, A. V. Zotov, A. A. Saranin, T. Hirahara, S. Hasegawa: Softmagnetic skyrmions induced by surface-state coupling in a sandwich structure with an intrinsic ferromagnetic topological insulator(oral), The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9), 2021年12月1日, online.

(国内会議)

招待講演

[17] 秋山了太: トポは端だが役に立つ~表面界面で起こ る強磁性・超伝導~,日本表面真空学会関東支部セミ ナー 「表面科学と原子層科学のエッジ」,2022年3 月 30 日,オンライン.

- [18] 長谷川修司:研究者、このクリエイティブで人間的な 職業,日本表面真空学会関東支部セミナー 「表面科 学と原子層科学のエッジ」2022年3月29日,ハイブ リッド/小柴ホール.
- [19] 長谷川修司: ナノプローブによる量子物質表面の研究 ,日本学術振興会ナノプローブテクノロジー第 167 委 員会 第 100 回研究会 「表面物理の最前線とそれを 支える SPM 技術」, 2022 年 1 月 14 日, オンライン
- [20] 長谷川修司:物理チャレンジ・物理オリンピックによる中高生へのはたらきかけ ~これまでとこれから~,応用物理学会応用物理教育分科会第31回物理教育に関するシンポジウム「みらいを創る科学技術教育」,2021年12月18日,オンライン.
- [21] 秋山 了太: Induced effects by introducing ferromagnetism into topological insulators, 日本物理学 会 2021 年秋季年会領域 9 シンポジウム 「Interdisciplinary surface science researches toward innovative materials and devices」, 2021 年 9 月 20 日, オ ンライン
- [22] 長谷川 修司:量子物質が加速する表面・原子層科学の新展開,第82回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム「薄膜・表面物理研究のトレンドと今後の展望」(薄膜・表面物理分科会 50周年記念シンポジウム),2021年9月11日,オンライン.
- [23] 長谷川 修司:トポロジカル物質とは何か,第 245 回 JOEM 研究会「トポロジカル絶縁体」(一般社団法人 有機エレクトロニクス材料研究会),2021 年 7 月 15 日 (木),オンライン.
- [24] 遠山晴子: Caインターカレート誘起フリースタンディ ンググラフェンにおける構造と超伝導の相関, 日本表 面真空学会令和3年度 (2021年度) 関東支部講演大 会, 2021年4月3日, オンライン.

一般講演

- 日本表面真空学会関東支部セミナー「表面科学と原子層科学のエッジ」,2022年3月29日,オンライン.
 - [25] 高城拓也、秋山了太、長谷川修司:原子層自己形成型 強磁性トポロジカル絶縁体 Mn(Bi,Sb)₂Te₄ を含むへ テロ構造における Sb/Bi 組成比による強磁性特性の 変調 (ポスター).
 - [26] 遠山晴子,秋山了太,一ノ倉聖,橋爪瑞葵,飯盛拓嗣, 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 基板上グラフェン における Ca インターカレート誘起超伝導 (ポスター).
 - [27] 谷内息吹、秋山了太、保原麗、長谷川修司: 巨大ラシュ バ分裂表面超構造における円偏光ヘリシティ依存光 電流 (ポスター).
 - [28] 谷内息吹,秋山了太,保原麗,長谷川修司: 巨大ラシュ バ分裂表面超構造における円偏光ヘリシティ依存光電 流(口頭), SPring-8 ユーザー協同体・日本表面真空 学会合同ミニコンファレンス NanospecFY2021mini, 2022 年 3 月 22 日.
 - [29] 佐藤瞬亮,保原麗,秋山了太,渡邉和己,長谷川修司: 高磁場・サブケルビン・超高真空4探針電気伝導・トン ネル分光同時測定装置の開発(口頭),SPring-8 ユー

ザー協同体・日本表面真空学会合同ミニコンファレン ス NanospecFY2021mini, 2022 年 3 月 22 日 (ショー トプレゼンテーション学生賞銅賞受賞).

- 日本物理学会第 77 回年次大会, 2022 年 3 月 15 日-19 日, オンライン.
- [30] 今中康貴, Yang Zhuo, 谷内息吹, 秋山了太, 長谷川修司, 小濱芳允, 松田康弘, 竹端寛治: Bi 薄膜における 強磁場テラヘルツサイクロトロン共鳴 (領域 4, 口頭), 3月16日.
- [31] 高城拓也,秋山了太,長谷川修司:原子層自己形成型 強磁性トポロジカル絶縁体 MnSb2Te4 およびそのヘ テロ構造の磁気・電気伝導特性 (領域 4, ポスター),3 月 16 日.
- [32] 秋山了太, 金田真悟 A, 大矢忍 A, 高城拓也, 長谷川修司: SrTiO3(001) 基板上への室温 wetting layer 成長法による超平坦 SnTe(001) 薄膜の成長と電気伝導評価(領域 4, ポスター), 3 月 16 日.
- [33] SP. Liu, T. Takashiro, YX. Guo, R. Hobara, R. Akiyama and S. Hasegawa: Growth and transport property of copper selenide compound thin films, (領域 9, ポスター), 3 月 15 日
- [34] 一ノ倉聖,田啓,福嶋隆司朗,堀井健太郎,遠山晴子, 秋山了太,出田真一郎,田中清尚,清水亮太,一杉太郎, 長谷川修司,平原徹:Caがインターカレートしたグ ラフェンにおける2重ディラックバンドと層間電子 状態(領域 9, 口頭),3月17日
- 第 13 回低温科学研究センター研究交流会, 2022 年 3 月 9 日, オンライン.
 - [35] 佐藤瞬亮,保原麗,秋山了太,渡邉和己,長谷川修司: 高磁場・サブケルビン・超高真空4探針電気伝導・ト ンネル分光同時測定装置の開発(ポスター).
 - [36] 鄭帝洪, 秋山了太, 高城拓也, 遠山晴子, 保原麗, 長谷 川修司: SiC(0001) 上エピタキシャルグラフェンへ の Yb インターカレーションによる強磁性の発現(ポ スター).
 - [37] 谷内息吹, 秋山了太, 保原麗, 長谷川修司: Si 基板上 巨大ラシュバ表面超構造における円偏光ヘリシティ 依存光電流(ポスター).
 - [38] 高城拓也,秋山了太,長谷川修司:原子層自己形成型 強磁性トポロジカル絶縁体 Mn(Bi_{1-x}Sb_x)₂Te₄ を含 むヘテロ構造における Sb/Bi 組成比による強磁性特 性の変調(ポスター).
- 日本物理学会 2021 秋季大会, 2021 年 9 月 20 日-23 日, オンライン.
 - [39] 今中康貴, Yang Zhuo, 谷内息吹, 秋山了太, 長谷川修 司, 小濱芳允, 松田康弘: Bi 薄膜における超強磁場サ イクロトロン共鳴(領域4・口頭), 9月 21 日.
 - [40] 高城拓也, 秋山了太, 長谷川修司:自己形成型磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造 Mn(Bi_{1-x}Sb_x)₂Te₄/(Bi_{1-x}Sb_x)₂Te₃ における 強磁性特性のBi/Sb組成比依存性(領域4・ポス ター),9月22日.
- [41] 谷内息吹,秋山了太,保原麗,長谷川修司:単原子層 ラシュバ表面系 (Tl,Pb)/Si(111) での円偏光フォトガ ルバニック効果 (領域9・口頭),9月21日.

- [42] 遠山晴子,秋山了太,橋爪瑞葵,一ノ倉聖,飯盛拓嗣, 松井朋裕,堀井健太郎,佐藤瞬亮,保原麗,遠藤由大, 福山寛,平原徹,小森文夫,長谷川修司:SiC 基板上の Ca インターカレートグラフェンにおける超伝導(領 域9・口頭),9月 21 日.
- [43] 佐藤瞬亮,秋山了太,保原麗,渡邉和己,長谷川修司: in situ 4 探針電気伝導・トンネル分光法同時測定装置の開発(領域9・ポスター),9月21日.
- [44] 一宮彪彦,長谷川修司,他:物理チャレンジ 2021 報告:第2 チャレンジ (実験問題) (領域 13・口頭),9月 23 日.
- [45] 杉山忠男,長谷川修司,他:第21回アジア物理オリ ンピック 2021 台湾大会 (オンライン)報告 (領域 13・口頭),9月23日.
- [46] 東辻浩夫,長谷川修司,他:第51回国際物理オリン ピック 2021(リトアニア,オンライン)報告 (領域 13・口頭),9月23日.

(セミナー)

- [47] 長谷川 修司:研究と物理オリンピックをもとに考える教育,東京大学同窓会神奈川銀杏会三火会,2022年3月14日,オンライン.
- [48] 遠山 晴子: Ca インターカレートが創発するグラ フェン2次元超伝導, 東京工業大学量子物理学・ナノ サイエンス第 332 回セミナー, 2022 年 2 月 22 日, オ ンライン.
- [49] 遠山 晴子: Ca インターカレーションにより誘発されるグラフェンの超伝導, CREST『2 次元ホウ素未 踏マテリアルの創製と機能開拓』セミナー, 2022 年 2 月 8 日, オンライン.
- [50] 長谷川 修司: トポロジカル物質とは何か ―表面物 理学の観点から―, 東大-JSR 協創拠点 CURIE セミ ナー, 2021 年 4 月 23 日, オンライン.

(講義等)

- [51] 長谷川修司:初年次ゼミナール「歴史を変えた(る) 物理」(学部1年生),2021年度夏学期(駒場/ハイブ リッド).
- [52] 長谷川修司,秋山了太,高城拓也(TA),清水翔太(TA):
 物理学実験 II(学部3年生)電子回折,2021年度冬
 学期(本郷).

(アウトリーチ)

- [53] 長谷川修司: オンラインプレチャレンジ:物理チャレンジ・オリンピックの紹介と実験レポートの書き方,物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ,2022年3月21日,オンライン.
- [54] 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,2022年3月19日,栃木県立大田原高等学校(栃木).
- [55] 長谷川修司, 佐藤誠, 原田勲: 物理チャレンジ講習会: 実験レポートの書き方と重力加速度の測定実験, 物理 オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2022 年 3 月 17 日, 大阪星光学院中高校(大阪).

- [56] 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,2022年3月12日,栃木県立宇都宮女子高等学校(栃木).
- [57] 長谷川修司,谷内息吹:栃木県立宇都宮高等学校 模 擬授業と研究室見学,2021年11月30日,オンライン.

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。最近は、吸着原子に磁性体を用い て、スピンに絡む新奇な物理現象の探索を行ってい る。磁性不純物を吸着させる半導体表面に高電子移動 度をもつ2次元電子系を作成しているため、STM/S を用いた測定からスピンの情報を含んだトンネル電 流を観測することが可能であると考えている。これ まで Fe や Co などを用いた 2 次元電子系の作成に成 功し、STM/Sによる磁性不純物の空間分布の観測に 成功している。今後、局在スピン(磁性不純物)と伝 導電子、局在スピン間の交換相互作用をトンネル分 光法により実空間で精密に測定することにより、新 奇な磁気的物理現象の観測を目指す。



図 4.2.1: (a) InSb 劈開表面に鉄を 0.01 ML つけた場 合の STM 像 (20 × 20 nm²)。黒い輪郭を持った丸 が Fe であり、明るい縞模様が Sb の格子である。(b) 4.2 K における縦抵抗率とホール抵抗の磁場依存性。 明瞭な整数量子ホール効果が観測されている。(c) 走 査トンネル分光の測定例。微分コンダクタンスから 2 次元電子系の状態密度を調べることができる。こ こでは、スピン分裂したランダウ準位が観測されて いる。

4.2.2 金属超薄膜の超伝導

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

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

面内磁場印加可能な極低温走査トンネル顕微鏡の開発

半導体表面に形成された単原子層超伝導体は半導体基板と真空に挟まれているため、2次元面に対して垂直方向にポテンシャル勾配が生じ、空間反転対称性が破れている。さらに、Pbなどの重い原子を用いた場合、強いスピン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超伝導状態の実空間での直接観測を目指している。現在、ヘリウム3冷凍機温度で動作する面内磁場印加可能な走査トンネル顕微鏡の開発を行っている。

GaAs 劈開表面上に形成された超伝導薄膜における 非相反伝導に関する研究

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

我々が近年研究を行ってきた GaAs 劈開表面上に 作成された超伝導薄膜において非相反伝導が観測さ れるか検証を行った。鉛とアルミの超薄膜 (0.3 - 2 nm 程度) に対して磁場中の電気伝導測定を行うと、 第二高調波から得られる電気抵抗が磁場の正負に対 して反対称になることがわかった (図 4.2.2)。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。

さらにこの非相反伝導が生じている要因を調べる ため、原子間力顕微鏡、電子線顕微鏡、レーザー顕微 鏡による GaAs 劈開表面の観測を行った。図4.2.3(a) に電子線顕微鏡によるは劈開面全体の観測結果を示 す。特徴的な構造は観測されず、また、原子間力顕微 鏡を用いた中央部分の測定においても構造は観測さ れなかった。このことから中央部分は非常に平坦な 表面が実現していると考えられる。次に、上部試料 端の観測結果を示す(図4.2.3(b))。この測定におい ても異常は観測されなかった。一方、下部試料端の



図 4.2.2: Pb 超薄膜における第二高調波から得られ る電気抵抗。磁場の正負に対して反対称になってい る。

観測結果においては特徴的な構造が観測された(図 4.2.3(c))。これは試料劈開時、劈開方向によって試 料端の一方に欠けが生じているためだと考えられる。 さらに、このことが電子輸送特性に影響しているこ とを検証するために、劈開方向を逆にした試料にお いて図 4.2.2 と同様の条件で電気伝導測定を行った。 その結果、図 4.2.2 に対して逆の磁場依存性が観測さ れた。現時点においては、試料端より渦糸が侵入す る際、試料端の形状により異なるポテンシャルエネ ルギーを感じるため、侵入方向に依存したボルテッ クスラチェット効果による非相反伝導が生じている と考えている。

Pb 超薄膜の超伝導と表面磁性体の近藤効果

Pb 超薄膜に磁性体を吸着あるいは混入させると超 伝導転移温 T_c は減少する。近藤温度 T_K が T_c より も十分に低い場合には、磁性不純物は自由磁気モーメ ントとして振る舞い、磁気散乱によって超伝導を破壊 する。例えば、磁性不純物として Ce を用いた庭田ら の実験では、磁気散乱が強磁場中で抑制されることに よる磁場誘起超伝導が観測されている(PRL2017)。 一方、 $T_K \gg T_c$ の場合には、近藤一重項が形成され 磁性体の磁気モーメントは消失し、クーパー対を形 成する電子間の実効的な斥力が対破壊の原因となる。 本年度は、森が中心となり、 $T_K \gg T_c$ の領域にある と考えられる 3d 磁性金属を吸着させることによる T_c への影響を系統的に調べた。

図 4.2.4(a) に、Pb 超薄膜に Fe を段階的に蒸着した場合の結果を示す。 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により大きく異なることが明らかになった。 $T_K \gg T_c$ の領域に対する理論式によれば、傾きの大きさはおおむね T_K に反比例する。図 4.2.4(b) に、フィッティングにより得られた T_K を磁性原子のス



図 4.2.3: GaAs 劈開表面の電子顕微鏡による観察結 果。(a) 試料全体。試料幅 (図で縦方向) は 0.35 mm。 (b) 上部試料端。(c) 下部試料端。下部試料端から 10 μm 程度の範囲で平坦性が損なわれている。

ピンの大きさSに対して示す。 $T_{\rm K}$ はSの増大とと もに急激に減少する。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傾向が知られている が、Hund 結合によって近藤一重項の形成が抑制さ れた結果とする解釈が有力である。また、Pb 超薄膜 の表面を 1.5 原子層程度の Au で覆った後に Co また は Fe を蒸着すると、直接蒸着した場合よりも T_c の 減少の傾きが大きくなることが明らかになった。一 見意外な結果であるが、磁性体に隣接する原子が Pb よりも価数が小さな Au に置き換わったことにより $T_{\rm K}$ が低くなった結果として解釈することができる。 Mn 蒸着の場合は、Au による違いはあまり見られな かったが、ちょうど近藤領域($T_{\rm K} \gg T_c$)と自由磁 気モーメント領域($T_{\rm K} \ll T_c$)の中間領域にあるこ とが考えられる。

4.2.3 ビスマス超薄膜の電気伝導

近年、GaAs 劈開表面に形成されたビスマスの超 薄膜に対する研究を行っている。急冷蒸着法で作製 した Bi 超薄膜は、数ケルビンの超伝導転移温度をも つアモルファス状態であるが、極低温から昇温させ ていくと、数 10 ケルビンで電気抵抗が不連続に数倍 に増大し、さらに室温近くまで昇温すると、抵抗は不 可逆的に大きく減少する。金属的なアモルファス状 態から、半金属的な状態に構造相転移した後、熱処 理効果によって移動度が上昇した結果として理解で きる。近年、トポロジカル物性の観点などから、Bi 超薄膜の研究が盛んに行われているが、GaAs(110) 上においても結晶性の高い超薄膜が形成されたと考 えている。



図 4.2.4: (a) Pb 超薄膜 (1.1 nm)の表面に 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 の依存性から導出した近藤温度を 不純物のスピンの大きさに対してプロットした。黒 は Pb に磁性体を直接乗せた場合、赤は Pb 超薄膜を 0.36 nm の Au で覆った後に磁性体を乗せた場合の 結果である。

再冷却後の超薄膜に対して垂直方向に最大 9T 磁 場を印加すると、大きな正の磁気抵抗効果が観測さ れた(図 4.2.5(a))。平行磁場依存性が小さかったこ とと、磁性元素が含まれていないことから、電子の軌 道運動に対する磁場の影響以外の原因は考えにくい。 一方で、電子の軌道運動に対する磁場の影響が大き い場合には、大きな Hall 効果が期待されるが、意外 なことに縦抵抗の 1 %以下であった(図 4.2.5(b))。 ローレンツ力が電子と正孔で逆方向になるため、Hall 抵抗が打ち消しあっていることが考えられるが、バ ルクのビスマスに対する解析でしばしば用いられる 2キャリアモデルで今回の結果を説明するためには、 電子と正孔が、キャリア密度だけでなく、移動度に ついてもほぼ等しいことを仮定する必要がある。実 際、バルクの半金属ビスマスでは、電子と正孔の有



図 4.2.5: (a)(b) 熱処理後の磁気抵抗効果と Hall 抵 抗、および二流体モデルとパドル・モデルによるフィッ ティング。(c) 擬立方晶 (110) bilayer に対する tightbinding 近似を用いたバンド計算の例。

効質量が異なるため、小さくない Hall 抵抗が観測される。

我々の実験結果とよく似た、大きな正の磁気抵抗と 小さな Hall 抵抗は、電子正孔対称性をもつグラフェ ンの系において報告されている。Dirac 点近傍のグ ラフェンの磁場中電気伝導の解析にしばしば用いら れるパドル・モデルを用いた解析を行ったところ、実 験結果を良く再現することができた。我々の Bi 超薄 膜においても、Dirac 状態が形成されていることが 期待される。

我々と同様に GaAs(110) 上で急冷蒸着した後に室 温での熱処理を行った Bi 超薄膜が、擬立方晶 (110) 配 向をもつことが STM を用いた先行研究によって明ら かにされている。我々は、擬立方晶 (110) bilayer に 対して tight-binding 近似を用いたバンド計算を行っ た (図 4.2.5(c)。その結果、適当にパラメーターを 選んだ場合において、フェルミエネルギーの位置で Dirac cone が形成されることが示された。

<報文>

(学位論文)

 [1] 森 雄一:「Pb 超薄膜の超伝導に対する磁性不純物効 果と近藤状態の形成」(修士論文)

4.3 島野研究室

島野研究室では、レーザー光を用いて固体中の電 子の集団に創発する量子現象の探求、新たな素励起 (粒子)の探索、未知の量子相の探求に取り組んでい る。光を用いた固体中のマクロな量子状態の操作、 光によるマクロ量子状態の創発を目標として、可視 光の超短光パルスからテラヘルツ波と呼ばれる波長 0.3 mm 程度の電磁波パルス領域にわたる広いエネ ルギー範囲の先端光源開発、非線形レーザー分光法、 超高速分光法などの観測技術の開発を並行して進め ている。本年度は、以下に挙げる研究を進めた。

4.3.1 超伝導体

銅酸化物高温超伝導体の光誘起超伝導

銅酸化物高温超伝導体では、その母物質である反 強磁性モット絶縁体に正孔をドープすることで超伝 導が発現する。超伝導の舞台となる CuO₂ 面上では 電荷とスピンの自由度の鬩ぎあいの結果として、超伝 導の他にも電荷密度波やスピン密度波といった様々 な秩序相が現れる。中でも、Cu イオンあたりの正孔 濃度 p = 1/8 の近傍では、電荷やスピンが縞状に整 列したストライプ秩序が安定化することが中性子散 乱などから明らかにされてきた。静的なストライプ 秩序は超伝導と競合して超伝導転移温度を抑制する が、一方で p = 1/8 から外れた領域では動的に揺ら ぐストライプ秩序が残存し、超伝導の発現を増強す る可能性が従来より指摘され、ストライプ秩序と超 伝導との相関に興味がもたれてきた。さて近年、超 伝導転移温度以上にある電荷ストライプ相に対して 光励起をすると超伝導を示唆する光学応答が過渡的 に現れることが報告された。しかし、光誘起された 状態が本当に超伝導相なのかについては確証が得ら れておらず、また光励起の役割についても微視的な 観点からの理解は得られていない。我々はこの問題 に、超伝導秩序変数の振動に相当するヒッグスモー

ドなどの集団励起モードの観測を用いて取り組み、光 誘起相の起源解明とその微視的発現機構の解明を進 めている。

今年度は、ストライプ秩序を示す代表物質の1つ である La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO₄ (LNSCO) を対象に、 近赤外光による励起状態をテラヘルツ帯 c 軸反射率 測定から調べた。その結果、超伝導転移温度以上の LNSCO においても、他の La 系銅酸化物超伝導体で 報告されているようなプラズマエッジ状の反射率変 化が見られた。この信号は電荷及びスピンストライ プ秩序形成によって抑制された超伝導転移温度 5Kの 遥か上、電荷ストライプが発達する約 70K 付近まで 観測された。加えて、光学伝導度スペクトルの解析 からは、その実部に局在プラズモンを示唆するスペク トル構造が現れることがわかった。この局在プラズ モン的な構造はこれまで観測されていない LNSCO 特有の現象であり、Nd³⁺ イオンの置換による系の 乱れを反映した現象であると考えられる。今後、よ り系統的なデータ解析を進め、ストライプ秩序の発 達とクーパー対の形成との関連についてより詳しく 調べていく予定である。

鉄系超伝導体の光誘起超伝導増強

鉄系超伝導体 $\operatorname{FeSe}_{1-x}\operatorname{Te}_x$ はフェルミエネルギー が極めて小さく、キャリアドープや圧力印加等の外 的要因によるフェルミ面のトポロジーの変化と相関 して、超伝導転移温度 T_c が大きく変化することが 知られている。我々はこうした性質を持つ鉄系超伝 導体において光による超伝導の制御、光誘起超伝導 の実現の可能性を探究してきた。特に光励起下での 超伝導秩序変数のダイナミクスをピコ秒の時間分解 能で捉える手法として、超伝導秩序変数の振幅モー ドであるヒッグスモードに注目している。これまで の我々の研究により、超伝導体においてはヒッグス モードが媒介して高効率の THz 波第3高調波が発 生すること (THz-THG) が明らかになっており、こ の性質を利用して非平衡超伝導を調べることができ る。まず、光励起を行わない平衡状態の鉄系超伝導 体 FeSe_{0.5} Te_{0.5} に対して、T_c 以下で THz-THG 信号 が発達することを観測し、その強度が超流動密度を反 映していることを明らかにした。次に、FeSe_{0.5}Te_{0.5} に近赤外光パルスを照射すると、THz-THG の強度 が過渡的に増大し、超伝導秩序変数が増強すること を示唆する振る舞いが観測された。それに加えて光 パルス照射後の非平衡状態の複素光学伝導度を THz 時間領域分光法により測定したところ、光学伝導度 虚部に超流動密度の増加を示唆するスペクトル構造 が過渡的に現れることを見出した。この光学伝導度 虚部のダイナミクスは THz-THG 測定の結果と非常 によく一致しており、光励起によって超伝導が増強 したと結論した。光学伝導度スペクトルを詳しく分 析した結果、過渡的な超伝導増強はフェルミ面の一 部で起こっていたと考えられ、超伝導増強現象の起 源として電子バンドと正孔バンド間のバンド間相互 作用が光パルス照射により増強した可能性を提案し た。一方、シングルギャップ超伝導体 NbN におい ても実験を進めたところ、同様に光励起による THG の増強現象が観測された。これらの結果は、ヒッグ ス自己相互作用を含むヒッグスモードと電磁場の高 次の相互作用を反映している可能性があり、現在こ の THG 増強信号の起源について詳細に検討してい るところである。

集団励起モード観測による鉄系超伝導体のペアリン グ対称性の研究

鉄系超伝導体 FeSe_{1-x}Te_x は Te 置換によって、超 伝導ギャップ関数が2回回転対称性を示す強い異方的 ギャップから波数空間全域でギャップの開いた等方 的ギャップ構造へと変化していくことがトンネル分 光法や角度分解光電子分光などの手法によって明ら かにされている。異方的なギャップ関数を示す FeSe がどのようなペアリング対称性に起因しているかを 理解することは鉄系超伝導体におけるクーパー対形 成の機構に直接関わる問題であり、これまで多くの 議論がなされてきた。

さて、超伝導ペアリング相互作用が複数の対称性 成分を持つ場合には、超伝導の秩序変数に付随する 集団励起モードとして、Bardasis-Schrieffer モード (BS モード)と呼ばれる新たな集団励起モードが発 現することが知られている。我々は近年*s* 波超伝導 体や銅酸化物超伝導体を対象として、ヒッグスモー ドと THz 波との二光子結合を介したテラヘルツ第三 高調波発生(THz-THG)の観測を進めてきたが、最 近 BS モードも THz-THG をもたらすことが理論研 究により指摘された。BS モードの存在は超伝導ペア リング相互作用が複数の対称性成分を持つことの証 拠となるため、超伝導体における THz-THG の性質 を調べ、その起源を特定することができると期待さ れる。

そこで我々は超伝導ペアリング対称性について議 論の続いている鉄系超伝導体 FeSe_{1-x}Te_x に注目し、 その THz-THG の性質を調べた。特に、鉄系超伝導 体 FeSe_{1-x}Te_x については、電子ネマティック秩序 の存在によって超伝導ペアリングに異方的な成分が 強く混ざる可能性が考えられているため、電子ネマ ティック秩序の存在する FeSe_{0.9}Te_{0.1} 試料と電子ネ マティック秩序の存在しない FeSe_{0.5}Te_{0.5} 試料のそ れぞれに対して THz-THG の測定を行った。

まず、温度依存性について測定を行ったところ、 いずれの試料についても超伝導転移温度 T_c 以下で THz-THG の効率が大きく増加する振る舞いが観測 され、超伝導に相関する THz-THG が観測された。 次に、この THz-THG について入射 THz 波の偏光方 向に対する依存性を測定したところ、ネマティック秩 序のない FeSe_{0.5}Te_{0.5} 試料については BS モードによ る THz-THG に期待される偏光依存性を持つ成分が 観測されなかったのに対し、ネマティック秩序のある FeSe_{0.9}Te_{0.1} 試料については BS モードによる THz-THG に期待される偏光依存性を持つ成分が観測され た。これらの実験結果より、FeSe_{0.9}Te_{0.1} 試料につい て BS モードが観測された可能性があると考えられ る。これは THz-THG の測定によって FeSe_{0.9}Te_{0.1} におけるペアリング相互作用が複数の対称性成分を 持つことを示唆する結果が得られたことを意味する。 今後は THz-THG の励起周波数依存性を測定するこ とにより、BS モード以外による THz-THG との分 離を行うことを計画している。

空間反転対称性の破れた超伝導体からの第二高調波 発生

クーパーペアの波動関数は2つの電子の交換に対 して反対称(パウリの原理)なので、スピン部分と 軌道部分の積として整理すると、シングレット×偶 パリティ、もしくは、トリプレット × 奇パリティの いずれかである。空間反転対称性がある系において は、波動関数は空間反転(パリティ)変換に対して 固有値 $\lambda = \pm 1$ の固有状態でなくてはならず、上記 2つを足し合わせると、この条件が満たせなくなる ので、超伝導秩序変数のパリティは混成しない。逆 に、空間反転対称性が破れた系では超伝導秩序変数 のパリティ混成が許されるので、単独の実現例が乏 しいトリプレット・奇パリティ超伝導の特性、例え ばトリプレット性に由来する巨大な臨界磁場や、奇 パリティ性に由来する非相反応答が発現しうる。実 際に、空間反転対称性が破れた遷移金属ダイカルコ ゲナイド (TMD) 系超伝導体において、巨大な非相 反電気伝導(電流の向きによって伝導度が変化する 性質)が、超伝導転移温度 (T_c) 直上の温度領域で観 測されており、空間反転対称性が破れた超伝導秩序 変数が実現している可能性を示唆している。

我々は、電気伝導では測定が困難なT_c以下のゼロ 抵抗領域に対して、超伝導秩序変数の空間反転対称 性の破れを調べるために、結晶構造の空間反転対称性 が破れた TMD 系超伝導体 3R-TaSe₂の薄膜(41 nm 厚、層数 65、T_c = 2.6 K) に、超伝導ギャップ付近の 光子エネルギーの狭帯域テラヘルツ波パルスを照射 し、透過波を測定した。すると、T_c以下で発達し、入 射強度の2乗に比例する第2高調波発生(SHG)が 観測された。3R-TaSe₂の結晶構造には C_{3v}の対称 性があるので、結晶構造の空間反転対称性の破れに 由来する SHG には、3 回対称、かつ特定の偏光依存 性が期待される。しかし、観測された SHG の偏光は 常に入射波に平行で、偏光依存性は等方的、結晶の面 内方位に依存しなかった。今回測定した薄膜は、ド メインサイズが数マイクロメートルの多結晶で、2 種類の対称なドメインが等量含まれると考えられて いる。そのため、波長が数百マイクロメートルのテ ラヘルツ波を用いた測定では、平均化され、空間反 転対称性の破れによる SHG が打ち消されてしまっ たと考えられる。

非相反性による SHG は、入射テラヘルツ波の極性 を反転させても極性が変わらないことが期待される が、観測された SHG は、入射波の極性に応じて極性 が変化する「相反的」な振る舞いを示した。連続波 を仮定すると、入射波の極性の反転は、基本波で半 周期、SHG にとっては1周期分の時間シフトと等価 なので、相反的な SHG は発生し得ない。すなわち、 観測された SHG は、入射波がパルス的であることに 由来すると考えられ、その起源について考察を進め ている。

4.3.2 原子層物質

遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の光による集団モー ド励起と電子相制御

遷移金属とカルコゲン元素が二次元的に結合した 原子層物質である遷移金属ダイカルコゲナイドは、低 温で低次元性を反映して電荷密度波 (CDW) 状態を示 すものが多く存在する。この電荷密度波 (CDW) 相に 光照射をすると、平衡状態では出現しない隠れた秩序 相への相転移が生じることが報告されており、光によ る電子相制御の対象として活発な研究が進められてい る。最近我々はこのような光誘起相転移現象に至る 新たな経路として、CDW 相の集団励起モードである 振幅モードの大振幅駆動を提案し、3R-Ta_{1+x}Se₂を対 象に高強度テラヘルツ (THz) 波パルスによる CDW 振幅モードの二光子共鳴励起を行うことで、平衡状態 にない絶縁体的な状態が現れることを見出した。今 年度は、この隠れた秩序相が発現する際に、平衡状態 の CDW 秩序がどのように抑制されていくか、その 動的な融解過程を明らかにするために、高強度テラへ ルツ波を用いた実験を行った。図 4.3.6(a) 上段に示 す電場 2 乗波形を持つ高強度テラヘルツ波を CDW 相の 3R-Ta_{1+x}Se₂ 薄膜に照射した際の近赤外光の透 過率変化のダイナミクスを調べたところ、図 4.3.6(a) 下段のように励起強度が小さい領域では、駆動力が 過ぎ去った後も CDW 振幅モードの共鳴周波数と-致する 2.4 THz の自由振動が観測された。一方、励 起強度を上げていくと、一定の強度以上で急激に自 由振動のソフト化やダンピングの増加が顕著になっ ていき、最終的には振幅モードが消失する振る舞いが 観測された。これは、CDW 秩序と強く結合したフォ ノンを一定の格子変位以上揺らすことで、他フォノ ンとの非線形結合が増大し、急激に平衡状態の CDW 秩序が抑制され、融解に向かっていくことを示してい ると考えられる。また、Ginzburg-Landau(GL) モデ ルに基づき実験結果を秩序変数の時間発展のシミュ レーションで再現することによって、振幅モードの ソフト化は図 4.3.6(b) のようなポテンシャルの動的 な変化を反映していることを突き止めた。THz 波に よる振幅モードの大振幅駆動により、実際に CDW 秩序が動的に抑制され融解に至るメカニズムを明ら かにすることに成功したと考えられる。

4.3.3 ディラック・ワイル半金属

磁性ワイル半金属 $\mathbf{Co}_3\mathbf{Sn}_2\mathbf{S}_2$ の円偏光誘起異常ホール効果

時間周期外場のもとでの量子系の状態を記述する フロッケ理論に基づき、量子状態を人為的に制御す る手法は、近年フロッケエンジニアリングと呼ばれ



図 4.3.6: (a) 上段:励起光として用いたテラヘルツ 波パルスの電場2乗波形。下段: テラヘルツ波パル ス励起後の 3R-Ta_{1+x}Se₂ 薄膜の近外光に対する透過 率変化。テラヘルツ波パルスの二光子励起によって 励起された CDW 振幅モードが自由振動する様子を 示している。励起テラヘルツ電場を増加させると振 動のソフト化が生じる。(b) CDW の秩序変数に対 する自由エネルギーの概念図。振幅モードのソフト 化が見られる領域でポテンシャルが浅くなる様子を 表しており、両矢印は秩序変数の振幅方向の振動で ある CDW 振幅モードを示している。

理論的研究が活発に進められている。フロッケエン ジニアリングの一つの興味深い側面として、光によ る電子系のトポロジーの制御が挙げられる。例えば 3次元のディラック半金属に円偏光を照射すると、光 によって時間反転対称性の破れを誘起してワイル半 金属へ転移する、フロッケワイル半金属状態がフロッ ケ理論から導かれる。このとき、ワイル点間の距離 は光電場の2乗と周波数の-3乗に比例するカイラ ルゲージ場によってもたらされることが知られてい る。現実の実験系で観測可能なカイラルゲージ場を 誘起することは容易ではなかったが、近年のレーザー 光源技術の発展により、これが可能になりつつある。 我々は磁性ワイル半金属 Co₃Sn₂S₂ のディラック電 子相に着目して、フロッケワイル状態の実現を目指 して実験を行った。

Co イオンのカゴメ格子から成る磁性ワイル半金

属 Co₃Sn₂S₂ 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。ワイ ル半金属に特徴的な線形分散バンドの交点 (ワイル ノード) がフェルミエネルギー近傍に存在し、フェル ミエネルギー近傍に他のバンドが存在しないことか ら、その電子系がワイル方程式でよく記述できる物 質として注目を集めている。一方でキュリー温度以 上の常磁性相では 3 次元のディラック半金属状態を 示し、3 次元ディラック電子系の研究にも適した物 質である。

照射する光には中赤外の超短光パルス(波長4 μm、 パルス幅 96 fs) を用いた。これは物質を破壊せずに大 きなカイラルゲージ場を誘起するためである。円偏 光による時間反転の破れとワイル半金属相への転移 は異常 Hall 効果として現れることが期待されるため、 誘起された異常ホール伝導度を低エネルギーの THz 波のファラデー回転を利用して検出することを試み た。試料はスパッタリング法によって成膜した厚み 23 nm の Co₃Sn₂S₂ 薄膜を用いた。室温の Co₃Sn₂S₂ 薄膜に中赤外円偏光パルスを照射すると、励起光パル スが照射されている間のみ有限の THz ファラデー回 転が発現することがわかった。励起光強度・周波数 依存性の測定を行い、ファラデー回転スペクトルから 見積もられる異常ホール伝導度の大きさが弱励起領 域で励起光の電場尖頭値の2乗に比例し、低周波数で の励起ほど大きく誘起されることが明らかになった。 これはフロッケ理論が予測するカイラルゲージ場の 効果として期待される振る舞いである。Co₃Sn₂S₂ に 即した有効模型による理論との定量性を含めた比較 を行った結果、周期駆動下のフロッケバンドにもた らされるベリー曲率分布に由来する異常ホール効果 を観測したと考えられる。今後、フロッケワイル状 態が実現しているかどうかを確かめるために、この カイラルゲージ場の大きさの定量的な評価を進めて いく予定である。

ディラック電子系 Bi における円偏光誘起テラヘル ツ異常ホール効果

BiはL点に電子ポケット、T点にホールポケット を有する半金属である。特にL点の電子は通常の放 物線的な分散関係ではなく、むしろ相対論的量子力 学におけるディラック方程式を模した分散関係に従 うことから「ディラック電子」と呼ばれている。ビ スマスにおける巨大な反磁性、高効率なスピン流・ 電流変換などの性質はこのディラック電子の存在に よって現在は理解されている。このようなディラッ ク電子系に円偏光を照射することで周期的に駆動す ると、有限のベリー曲率を獲得し、強度によっては ディラック点をワイル点の対に変えられることがフ ロッケ理論から導かれる。

このように系が有限のベリー曲率を獲得した場合、 dc やテラヘルツ帯で異常ホール効果が観測されるこ とが期待される。そこで、フロッケ状態の実験的な 観測を目的として、我々は Bi 薄膜試料に対して中赤 外ポンプ・テラヘルツ波ファラデープローブ測定を 行った。具体的には、サファイア基板上に製膜した Bi 薄膜試料に対して中赤外円偏光パルスとテラヘル ツ波を同時に照射し、中赤外パルスによる Bi 薄膜の 変化をテラヘルツ波の偏光回転を観測することを試 みた。ディラック点のみを選択的に励起できるよう、 中赤外パルスには波長 4 µm のものを用いた。

実験の結果、中赤外パルスが照射されている最中 にだけ現れ、右円偏光と左円偏光で逆の符号を持つ という、フロッケ理論から期待される性質と矛盾し ないテラヘルツ異常ホール効果を観測することに成 功した。さらに興味深いことにこの異常ホール効果 は励起強度の1/2 乗に比例(すなわち励起電場強度 に比例)するという性質を持つことがわかった。こ のような振る舞いはディラック点近傍のフロッケ理 論に基づく変調では説明できず、実験結果の解釈に はディラック分散の1光子共鳴が起きる領域の寄与 が重要であることが示唆された。

4.3.4 位相安定超短パルス中赤外光源の開 発

波長 3-50 μm の電磁波は中赤外光とよばれ、可 視光とテラヘルツ光の中間の波長領域に位置する。 中赤外光の光子エネルギーは多くのバンド絶縁体の バンド間遷移エネルギーに比べて1桁程度小さいた め、電子励起を抑えながら系を周期駆動できる。こ のような周期外場下で固体はフロッケ状態とよばれ る非平衡特有の状態となることが知られており、最 近ではその観測例がいくつか報告され注目を集めて いる。さて、光外場による周期駆動現象を観測する 際に、光パルスの包絡線に対する搬送波の位相(キャ リア-エンベロープ位相)が揃っていることは重要で ある。例えば、十分時間分解能の高いプローブを用 いることで中赤外光の振動に追随したコヒーレント な現象を実時間で観測できると期待される。このよ うな新奇な量子現象の観測を目的とし、位相安定な 中赤外パルス光源の開発を進めている。

中赤外光は2台の光パラメトリック増幅器から出 射される光による差周波発生によって発生させる。 このときパラメトリック増幅器に用いるシード光と して同一のビームを用いれば、原理上はキャリア-エ ンベロープ位相が固定される。しかし実際には光学 系のわずかな光路長変化によって位相変化が生じ、積 算測定を行うと位相に敏感な応答は平均化されて消 えてしまう。そこで中赤外光の位相を常にモニタし、 位相の経時変化を補償するようなフィードバックシ ステムを構築した。これにより中赤外光の安定性は 飛躍的に向上し、10時間以上におよぶ積算測定が可 能となった。そのようなキャリア-エンベロープ位相 を安定化した中赤外光パルスの電場波形測定の例を 図4.3.7に示す。今後は広帯域化によるピーク電場の 強化と偏光の制御を行い、いよいよフロッケ状態の 時間分解測定に向けて測定系の整備を進めていく。



図 4.3.7: 電気光学サンプリングにより測定した振動 数 20 THz の中赤外光の電場波形。挿入図はそのパ ワースペクトラム

4.3.5 シングルショット磁気光学イメージ ングシステムの開発

上記フロッケ理論に基づくトポロジカル相制御の 研究に加えて、光によるトポロジカル磁性制御の研 究を行った。様々なトポロジカル磁性材料に対して その光励起磁化ダイナミクスを明らかにするために 磁気光学イメージングシステムの開発を進めた。特 に、従来の時間分解磁気光学分光法で採用されてい る繰り返し測定が適用できない、非可逆現象や、事象 ごとに大きな揺動を伴うような現象のダイナミクス を計測するために、光励起パルス一発に対してその 磁化ダイナミクスを計測するシングルショット磁気 光学分光法の開発を進めた。今後は開発した磁気光 学イメージング手法を用いてトポロジカル磁性材料 の光誘起磁化ダイナミクスを調べていく予定である。

<受賞>

 Kota Katsumi: Low Energy Electrodynamics of Solids LEES-2020 Best Poster Award (Honorable mention)

<報文>

(原著論文)

- [2] Hiroaki Niwa, Naotaka Yoshikawa, Masashi Kawaguchi, Masamitsu Hayashi, and Ryo Shimano: Switchable generation of azimuthally- and radially-polarized terahertz beams from a spintronic terahertz emitter, Optics Express 29, 13331 (2021). Editors' pick
- [3] Naotaka Yoshikawa, Hiroki Suganuma, Hideki Matsuoka, Yuki Tanaka, Pierre Hemme, Maximilien Cazayous, Yann Gallais, Masaki Nakano, Yoshihiro Iwasa and Ryo Shimano: Ultrafast

switching to an insulating-like metastable state by amplitudon excitation of a charge density wave, Nature Physics **17**, 909 (2021).

- [4] Kazuki Isoyama, Naotaka Yoshikawa, Kota Katsumi, Jeremy Wong, Naoki Shikama, Yuki Sakishita, Fuyuki Nabeshima, Atsutaka Maeda, and Ryo Shimano: Light-induced enhancement of superconductivity in iron-based superconductor FeSe_{0.5}Te_{0.5}, Communications Physics 4, 160 (2021).
- [5] Romain Grasset, Kota Katsumi, Pierre Massat, Hai-Hu Wen, Xian-Huin Chen, Yann Gallais, and Ryo Shimano: Terahertz pulse-driven collective mode in the nematic superconducting state of $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$, npj Quantum Materials 7, 4 (2022).

(学位論文)

- [6] 西澤邦雄:空間反転対称性が破れた超伝導体 3R-TaSe2 におけるテラヘルツ高調波発生の研究(修士論文)
- [7] 松本陽行: テラヘルツ帯非線形光学応答を用いた鉄系 超伝導体 FeSe_{1-x}Te_x の秩序状態に関する研究(修 士論文)
- [8] 飯田雄大:電流注入下の s 波超伝導体におけるヒッ グスモードの観測(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

- 一般講演
- [9] Hiroaki Niwa, Naotaka Yoshikawa, Masashi Kawaguchi, Masamitsu Hayashi, Ryo Shimano: Generation of radially- and azimuthally-polarized terahertz cylindrical vector beams from spintronic terahertz emitter, CLEO/Europe-EQEC 2021, Online, Jun. 4, 2021. (oral)
- [10] Kota Katsumi, Morihiko Nishida, Shigeki Miyasaka, Setsuko Tajima and Ryo Shimano: Photoexcited nonequilibrium state of underdoped YBa₂Cu₃O_y studied by the terahertz nonlinear optical response, Low Energy Electrodynamics of Solids (LEES)-2020, Online, July 7, 2021. (poster)
- [11] N. Yoshikawa, U. Narusaka, K. Nishizawa, H. Matsuoka, Y. Tanaka, M. Nakano, Y. Iwasa, R. Shimano: Terahertz pulse-induced melting of charge density wave through the coherent excitation of amplitude mode in 3R- $Ta_{1+x}Se_2$, Frontiers in Optics + Laser Science, Online, Nov. 2, 2021. (oral)

招待講演

[12] Ryo Shimano: Higgs mode as an ultrafast snapshot of order parameter in conventional and unconventional superconductors, PIPT7 Photoinduced Phase Transition and Cooperative Phenomena, Online, Nov. 10, 2021.

- [13] Ryo Shimano: Ultrafast control of symmetry broken states in solids by terahertz pulses, AC²MP2021 Asia-Pacific Conference on Condensed Matter Physics, Online, Dec. 3, 2021. (keynote invited talk)
- [14] Ryo Shimano and Naotaka Yoshikawa: Amplitude mode-driven ultrafast transition into a hidden state in a thin film of transition metal dichalcogenide, SPIE Photonics West, Ultrafast Phenomena and Nanophotonics XXVI, Online(video on demand), Feb. 21-27, 2022.
- [15] Ryo Shimano: Ultrafast control of charge density wave system and superconductors by high field terahertz pulses, SACLA Users' meeting 2022, Recent achievements and future perspectives in materials science at SACLA, Mar. 22, 2022.

(国内会議)

一般講演

• 日本物理学会 2021 年秋季大会(2021 年 9 月 20-23 日、オンライン開催)

- [16] 吉川尚孝, 西澤邦雄, 鳴坂潮, 松岡秀樹, 田中勇貴, 中 野匡規, 岩佐義宏, 島野亮: 3R-Ta_{1+x}Se₂ 電荷密度波 相のテラヘルツ第3高調波発生(口頭発表)
- [17] 平井誉主在,吉川尚孝,廣瀬葉菜,河口真志,林将光, 島野亮:円偏光励起による Bi 薄膜からのテラヘルツ 波放射の温度依存性(口頭発表)
- 第13回低温科学研究センター研究交流会(2022年3月9日、東京大学)
- [18] 礒山和基, 島野亮: *s* 波超伝導体 NbN におけるヒッ グスモードの自己相互作用とテラヘルツ波増幅(口頭 発表)
- [19] 鳴坂潮,吉川尚孝,松岡秀樹,田中勇貴,武藏摩紀,中 野匡規,岩佐義宏,島野亮:2次元物質 3R-Ta_{1+x}Se₂ の高強度テラヘルツ光励起による電荷密度波相融解 ダイナミクス(ポスター発表)
- [20] 西澤邦雄, 中村祥子, 松岡秀樹, 田中勇貴, 武藏摩紀, 中野匡規, 岩佐義宏, 島野亮: 超伝導体 3R-TaSe₂ の テラヘルツ第二高調波発生(ポスター発表)
- [21] 小川和馬,吉川尚孝,平井誉主在,藤原宏平,池田絢哉, 塚崎敦,奥村駿, 岡隆史, 島野亮:強磁性ワイル半金 属 Co₃Sn₂S₂ の常磁性相での円偏光照射によるテラ ヘルツ異常ホール効果の発現(ポスター発表)
- [22] 松本陽行,吉川尚孝,小林友輝,色摩直樹,小川浩生, 鍋島冬樹,前田京剛,島野亮:FeSeo.9Teo.1の超伝導相 におけるテラヘルツ第3高調波発生(ポスター発表)
- [23] 平井誉主在,吉川尚孝,廣瀬葉菜,河口真志,林将光, 奥村駿, 岡隆史, 島野亮:円偏光励起した Dirac 電子 系ビスマスにおけるテラヘルツ異常 Hall 効果(ポス ター発表)
- 日本物理学会 第 77 回年次大会(2022 年 3 月 15-19 日、オンライン開催)

- [24] 西澤邦雄, 中村祥子, 松岡秀樹, 武藏摩紀, 中野匡規, 岩佐義宏, 島野亮: 3R-TaSe2 薄膜超伝導相からのデ ラヘルツ第二高調波発生(口頭発表)
- [25] 西田森彦, 勝見恒太, Dongjoon Song, 永崎 洋, 島野亮:光励起されたストライプ系超伝導体 La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO₄のテラヘルツ帯光学応答(口 頭発表)
- [26] 鳴坂潮,吉川尚孝,松岡秀樹,田中勇貴,武藏摩紀,中 野匡規,岩佐義宏,島野亮:高強度テラヘルツ光励起 による 3R-Ta_{1+x}Se₂ の電荷密度波相融解のダイナミ クス(口頭発表)
- [27] 平井誉主在,吉川尚孝,河口真志,林将光,奥村駿,岡 隆史,島野亮:Dirac 電子系ビスマスにおける円偏光 誘起異常 Hall 効果(口頭発表)
- [28] 小川和馬,吉川尚孝,平井誉主在,藤原宏平,池田絢哉, 塚崎敦,奥村駿,岡隆史,島野亮:強磁性ワイル半金 属 Co₃Sn₂S₂ のディラック電子相における円偏光誘 起テラヘルツ異常ホール効果(口頭発表)
- [29] 礒山和基, 辻直人, 寺井弘高, 島野亮: BCS 超伝導体 NbN における Higgs モード共鳴テラヘルツ第3高調 波発生の光誘起増強現象(口頭発表)
- [30] 松本陽行,吉川尚孝,小林友輝,色摩直樹,小川浩生, 鍋島冬樹,前田京剛,島野亮:FeSe_{0.9}Te_{0.1}のテラヘ ルツ第3高調波発生(口頭発表)

招待講演

- [31] 島野亮:テラヘルツ非線形光学応答の基礎と応用:超 伝導体ヒッグスモードを例に、日本物理学会 2021 年 秋季大会チュートリアル講演、2021 年 9 月 20-23 日、 オンライン開催
- [32] 島野亮:THz 波で見る光励起された銅酸化物高温超 伝導体の電荷ダイナミクス,京都大学基礎物理学研究 所研究会「非自明な電子状態が生み出す超伝導現象の 最前線:新たな挑戦と野望」,2021年12月22日,京 都大学
- (セミナー)
- [33] 吉川尚孝: 電荷密度波の振幅モード励起による絶縁体 的状態, Online CMT seminars, 2021 年 9 月

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3年度は、スピン軌 道相互作用と電子相関、格子の対称性との協奏の結 果生じるエキゾチックなトポロジカル電子相、特に キタエフ量子スピン液体関連物質、ボーズアインシュ タイン凝縮相の創成、磁性共存超伝導相、及び量子 磁性相の探索のためのツール開発に注力した。

4.4.1 スピン軌道相互作用を利用した擬ス ピン量子相

新しい量子スピン液体と新しいキタエフ系物質

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

キタエフ物質を創るには、非従来型の異方的相互 作用を導入する必要があり、スピン-軌道相互作用が 大きいイリジウム酸化物、4f 電子系などに対する実現 性が提唱されてきた。当研究室では、キタエフ模型の 初の実証例を目指してイリジウム酸化物 H₃LiIr₂O₆ 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。これまで、4f¹ の Pr⁴⁺ 化合 物 Na₂PrO₃の磁性状態を明らかにしてきた。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 が確認できた。また、強磁場下でキタエフスピン液体 になっている可能性を示唆する磁化過程が見られた。 今後は、新しく開発した超高圧磁化測定装置により、 高圧下でのキタエフ量子スピン液体の実現を目指す。 現在、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年生の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 Γ₇ 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。今後も、この新しい物質開発手法を用 いてキタエフ量子スピン液体の実現を目指す。



図 4.4.8: ハニカム格子・ハイパーハニカム格子系にお ける量子スピン液体 (左) Kitaev Honeycomb 模型ハ ミルトニアンのスピンとマヨラナフェルミオンの関 係。(右) 異方的相互作用を持つ擬スピン 1/2 での八 面体配位結晶場分裂 Δ とスピンー軌道相互作用 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 $4f^1$ 電子。

傾角反強磁性のハードコアボゾン近似によるボーズ アインシュタイン凝縮

前項では4f電子ランタノイド化合物に着目し新し いキタエフ系物質開発を推進していたが、4f 電子の 磁性には、まだまだバリエーション豊かな物性が眠っ ている。4f 電子研究は長い歴史があるが、スピンと 軌道が結合した基底二重項の擬スピン1/2の特徴を 生かした量子物性の創発は古くて新しい。正孔が一 つの4f¹³のハニカム化合物 YbCl3 では、理想的なハ ニカム格子ハイゼンベルグ模型が実現するが、理想 からのわずかなずれにより非常に低温で長距離反強 磁性秩序を示す。この秩序は外部磁場により磁場誘 起強磁性状態に相転移するが、この近傍の傾角反強 磁性状態はボゾンのボーズアインシュタイン凝縮相 と等価とみなすことができる。独自開発した、混合 槽を磁場中で2軸回転可能な希釈冷凍プローブによ り単結晶核磁気共鳴測定を行い、ボーズアインシュ タイン凝縮相の実証とその詳細を研究している。



図 4.4.9: 2021 年に新たに開発した精密磁化測定用 超高圧セル。セルの断面図及び写真。断面図では灰 色がセラミック素材、茶色がバインダレス非磁性超 硬合金素材を表す。セル本体の内径は5mm、外径は 8.4mm。

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いる。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い。本年、当研 究室は、小型の高圧装置と高感度な市販の SQUID 磁 気計を組み合わせて行う高圧磁化測定手法に多方面 な改良を施すことにより、興味深い量子相を示す物 質を迅速にスクリーニングするための手段を実現し た。高圧装置は測るべき試料に比べて遥かに大きい ため、装置からの大きな磁性をいかにして消すかが キモであった。数値シミュレーションを駆使して装 置構造を最適化し、信号処理に特異値分解を利用す ることで7 GPa まで高精度(体積磁化率で~10⁻⁴) の磁化測定を可能にした。反磁性の検出とはいかな いまでも,弱い常磁性を含む磁性研究全般にとって 非常に有用である本研究成果を用いることで、例え ば、Ir 化合物、希土類化合物等での高圧下の新磁性 相発見に活躍することが期待できる。この装置開発 を発表した論文は 2021 年 6 月に JPSJ 紙で注目論文 に選ばれている。

超高圧下の新しい超伝導相研究

最近、超高圧下(1万気圧以上)の実験技術がま すます進展しており、それに伴い新しい超伝導体が 発見されてきている。以前は磁性が強すぎて超伝導 になるとは思われていなかった Mn,Cr 化合物もそれ らの一つである。そのような変わった超伝導(磁気 量子臨界点近傍の超伝導) では、超伝導相が現れる直 前にどういう磁性状態になっているか、また、超伝 導相と磁性相がどのように競合または共存して現れ るか? という問いが重要になっている。当研究室で は、独自に開発した最先端の超高圧下磁化測定、核 磁気共鳴測定技術を持っており、10万気圧程度の圧 力下でこれらのメカニズムを調べている。前述の精 密磁化測定技術で大まかに磁性状態を把握し、以前 開発した超高圧下核磁気共鳴法を用いて超伝導相と 磁性相がどのように競合または共存して現れるかを 精密に測ることで研究している。

今後も、このようなユニークな超伝導体の研究を ユニークな実験技術開発を続けながら実践していく。

<報文>

(原著論文)

- S. Yoshida, T. Koyama, H. Yamada, Y. Nakai, K. Ueda, T. Mito, K. Kitagawa, Y. Haga: Nonmagnetic-Magnetic Transition and Magnetically Ordered Structure in SmS, Physical Review B 103, 155153 (2021).
- [2] G. Simutis, T. Takayama, Q. Barthélemy, F. Bert, H. Takagi, and P. Mendels: Magnetic correlations in the semimetallic hyperkagome iridate Na₃Ir₃O₈, Physical Review B **103**, L100404 (2021).
- [3] T. Takayama, J. Chaloupka, A. Smerald, G. Khaliullin, and H. Takagi: Spin-orbit-entangled electronic phases in 4d and 5d transition-metal compounds, Journal of the Physical Society of Japan 90, 062001 (2021).
- [4] Q. Wang, K. von Arx, M. Horio, D. J. Mukkattukavil, J. Küspert, Y. Sassa, T. Schmitt, A. Nag, S. Pyon, T. Takayama, H. Takagi, M.

Garcia-Fernandez, K.-J. Zhou, and J. Chang: Charge order lock-in by electron-phonon coupling in $La_{1.675}Eu_{0.2}Sr_{0.125}CuO_4$ Sci. Adv. **7** : eabg7394 (2021).

- [5] Y. Kosugi, M. Goto, Z. Tan, D. Kan, M. Isobe, K. Yoshii, M. Mizumaki, A. Fujita, H. Takagi, and Y. Shimakawa: Giant multiple caloric effects in charge transition ferrimagnet Nature Scientific Reports 11, 12682 (2021).
- [6] M. Oudah, M. Kim, K. S. Rabinovich, K. Foyevtsova, G. McNally, B. Kilic, K. Küster, R. Green, A. V. Boris, G. Sawatzky, A. P. Schnyder, D. A. Bonn, B. Keimer, and H. Takagi: Electronic structure of the bond disproportionated bismuthate Ag₂BiO₃ Physical Review Materials 5, 064202 (2021).
- [7] K. Matsubayashi, H. Okamura, T. Mizokawa, N. Katayama, A. Nakano, H. Sawa, T. Kaneko, T. Toriyama, T. Konishi, Y. Ohta, H. Arima, R. Yamanaka, A. Hisada, T. Okada, Y. Ikemoto, T. Moriwaki, K. Munakata, A. Nakao, M. Nohara, Y. Lu, H. Takagi, and Y. Uwatoko: Hybridization-Gap Formation and Superconductivity in the Pressure-Induced Semimetallic Phase of the Excitonic Insulator Ta₂NiSe₅ Journal of the Physical Society of Japan **90**, 074706 (2021), selected as "Editors' Choice".
- [8] Naoka Hiraoka, Kelton Whiteaker, Marian Blankenhorn, Yoshiyuki Hayashi, Ryosuke Oka, Hidenori Takagi, and Kentaro Kitagawa: Design of Opposed-Anvil-Type High-Pressure Cell for Precision Magnetometry and Its Application to Quantum Magnetism Journal of the Physical Society of Japan, **90**, 074001 (2021), selected as "Editors' Choice".
- [9] M. Kim, S. Klenner, G. M. McNally, J. Nuss, A. Yaresko, U. Wedig, R. K. Kremer, R. Pöttgen, and H. Takagi: Mixed Valence and Superconductivity in Perovskite Antimonates Chemistry of Materials 33, 6787-6793 (2021).
- [10] Y.-S. Zhang, J. A. N. Bruin, Y. Matsumoto, M. Isobe, and H. Takagi: Thermal transport signatures of the excitonic transition and associated phonon softening in the layered chalcogenide Ta₂NiSe₅ Physical Review B **104**, L121201 (2021).
- [11] Q. He, X. Que, L. Zhou, M. Isobe, D. Huang, and H. Takagi: Tunneling-tip-induced collapse of the charge gap in the excitonic insulator Ta₂NiSe₅ Physical Review Research **3**, L032074 (2021).
- [12] P. Yordanov, A. S. Gibbs, P. Kaya, S. Bette, W. Xie, X. Xiao, A. Weidenkaff, H. Takagi, and B. Keimer: High-temperature electrical and thermal transport properties of polycrystalline PdCoO₂ Physical Review Materials 5, 015404 (2021).
- [13] A. Gourgout, A. Ataei, M.-E. Boulanger, S. Badoux, S. Thériault, D. Graf, J.-S. Zhou, S. Pyon, T. Takayama, H. Takagi, N. Doiron-Leyraud, and

L. Taillefer: Effect of pressure on the pseudogap and charge density wave phases of the cuprate Nd-LSCO probed by thermopower measurements Physical Review Research **3**, 023066 (2021).

- [14] C. Girod, D. LeBoeuf, A. Demuer, G. Seyfarth, S. Imajo, K. Kindo, Y. Kohama, M. Lizaire, A. Legros, A. Gourgout, H. Takagi, T. Kurosawa, M. Oda, N. Momono, J. Chang, S. Ono, G.-q. Zheng, C. Marcenat, L. Taillefer, and T. Klein: Normal state specific heat in the cuprate superconductors $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ and $Bi_{2+y}Sr_{2-x-y}La_xCuO_{6+\delta}$ near the critical point of the pseudogap phase Physical Review B **103**, 214506 (2021).
- [15] Dilip Bhoi, Jun Gouchi, Naoka Hiraoka, Yufeng Zhang, Norio Ogita, Takumi Hasegawa, Kentaro Kitagawa, Hidenori Takagi, Kee Hoon Kim, and Yoshiya Uwatoko: Nearly Room-Temperature Ferromagnetism in a Pressure-Induced Correlated Metallic State of the van der Waals Insulator CrGeTe₃ Physical Review Letters **127**, 217203 (2021).
- [16] H. Takahashi, H. Suzuki, J. Bertinshaw, S. Bette, C. Mühle, J. Nuss, R. Dinnebier, A. Yaresko, G. Khaliullin, H. Gretarsson, T. Takayama, H. Takagi, and B. Keimer: Nonmagnetic J = 0 State and Spin-Orbit Excitations in K₂RuCl₆ Physical Review Letters **127**, 227201 (2021).
- [17] J.A.N. Bruin, R.R. Claus, Y. Matsumoto, N. Kurita, H. Tanaka, H. Takagi Robustness of the thermal Hall effect close to half-quantization in α-RuCl₃ Nature Physics 18, 401–405 (2022). https://doi.org/10.1038/s41567-021-01501-y
- [18] M. Kim, G. M. McNally, H.-H. Kim, M. Oudah, A. S. Gibbs, P. Manuel, R. J. Green, R. Sutarto, T. Takayama, A. Yaresko, U. Wedig, M. Isobe, R. K. Kremer, D. A. Bonn, B. Keimer, H. Takagi: Superconductivity in (Ba,K)SbO₃ Nature Materials (2022). https://doi.org/10.1038/s41563-022-01203-7
- (国内雑誌)
- [19] 平岡奈緒香、北川健太郎:量子磁性研究のための高圧 下精密磁化測定技術固体物理 No.3 (通巻 673 号),2021 年.

(学位論文)

修士論文

[20] 今田絵理阿: Bose-Einstein condensation under magnetic fields in quasi-two-dimensional antiferromagnet YbCl₃ (擬二次元ハイゼンベルグ反強磁性体 YbCl₃の磁場下ボーズアインシュタイン凝縮)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [21] H. Takagi: Quantum spin liquid, Oxide Electronics School, online, France, 30/08/2021.
- [22] H. Takagi: Electron correlations and spin-orbit coupling, Oxide Electronics School, online, France, 31/08/2021.
- [23] H. Takagi: Quantum Spin Liquid with Fractionalized Excitations - Make It Real!, 1st International Symposium on Trans-Scale Quantum Science, online, Japan 27/10/2021.
- [24] H. Takagi: Thermal transport studies on RuCl₃ at Stuttgart, Focused workshop on alpha-RuCl3, online, Dresden, Germany 23/11/2021.
- [25] H. Takagi: Towards Kitaev Quantum Spin Liquid, MRSI, online, India, 22/12/2021.
- [26] H. Takagi: Thermal Transport in Candidate Kitaev and Related Magnets, Frontier of Qunatum Matter, ICAM week of science 2022, University of California (online), USA, 12/01/2022

(国内会議)

一般講演

- [27] 有馬寛人, 片山尚幸, 澤博, 野原実, 魯楊帆, 北川健太郎, 高木英典, 上床美也, 松林和幸: ナローギャップ半導体 Ta₂NiS₅ における高圧力下ホール効果測定, 日本物理学会2021年秋季大会, オンライン開催, ポスター, 2021年9月20日.
- [28] 小杉佳久,後藤真人,磯部正彦,吉井賢資 B,水牧仁一 朗,藤田麻哉,高木英典,島川祐一: A サイト秩序型ペ ロブスカイト酸化物 BiCu₃Cr₄O₁₂ の電荷不均化転移 におけるマルチ熱量効果,日本物理学会2021年秋 季大会,オンライン開催,2021年9月21日.
- [29] 今田絵理阿, 松本洋介, Simon Schnierer, Jan Bruin, 北川健太郎, 高木英典: NMR 測定によるハイゼンベ ルク反強磁性体 YbCl₃の BEC-QCP の研究, 日本物 理学会2021年秋季大会, オンライン開催, 2021年 9月22日.
- [30] 平岡奈緒香,今田絵理阿,郷地順,北川健太郎,上床 美也,高木英典:2次元ハイゼンベルグ量子磁性体 YbCl₃への高圧印加による反強磁性相互作用の抑制, 日本物理学会2021年秋季大会,オンライン開催, 2021年9月22日.
- [31] 吉田章吾, 遠藤宏太, 山田陽彦, 小山岳秀, 中井祐介, 上田光一, 水戸毅, 北川健太郎, 芳賀芳範: 高圧下³³S-NMR 測定による SmS 金色相の低温ギャップ状態, 日本物理学会2021年秋季大会, オンライン開催, 2021年9月23日.
- [32] 森川悦司,二本木克旭,木田孝則,本多善太郎,平岡奈 緒香,北川健太郎,鳴海康雄,金道浩一,上床美也,萩 原政幸:高圧力下におけるS=1/2スピンラダー物質 Cu(DEP)Br₂の強磁場磁性,日本物理学会第77回 年次大会,オンライン開催,2022年3月15日
- [33] 岡村英一,松井勇太,三木克哲,溝川貴司,魯楊帆,片山尚幸,野原実,高木英典,森脇太郎,池本夕佳:励起 子絶縁体 Ta₂NiSe₅ の S 置換系における光学伝導度 の圧力応答,日本物理学会第77回年次大会,オンラ イン開催,2022年3月15日

- [34] 北川健太郎, 露木裕太, 矢田季寛, 高木英典: Sm カ ルコゲナイドでのキタエフ候補物質開発, 日本物理学 会第77回年次大会, オンライン開催, 2022年3月 16日
- [35] 吉田章吾,北川健太郎,山田陽彦,小山岳秀,中井祐介,上田光一,水戸毅,芳賀芳範:金色相 SmS の低温,高圧下で現れるギャップ状態と磁気秩序状態の³³S-NMR 測定による研究,日本物理学会第77回年次大会,オンライン開催,2022年3月16日

招待講演

- [36] 北川健太郎:対向アンビル型装置による磁化とNMR 測定、量子磁性から超伝導まで、未来を拓く高圧力科 学技術セミナーシリーズ(46)「高圧力下における物 性測定技術の最前線」、オンライン、2022年3月3日
- [37] 北川健太郎: 10GPa 前後までの精密なマクロとミクロ (NMR)磁気測定, ISSP ワークショップ「高圧セミナー "最近の話題から"」、オンライン、2022 年 3月5日

4.5 林研究室

電子は「電荷」と自転に相当する角運動量「スピ ン」を持っています。今日の半導体エレクトロニク スは電子の「電荷」を制御することで大きく発展し てきました。一方、電子の「スピン」が生み出す物 性、物理は未解明なところが多く、ただその様相は 多彩です。たとえば、物質中の電子スピン間の相互 作用によって、磁性や超伝導などが発現します。一 方、表面の電子状態がバルクと比べて異質な「トポ ロジカル絶縁体」では、表面だけにスピンの向きに 依存した散逸のない電子の流れ「スピン流」が生成 され、その特異な伝導が量子演算などに利用できる として注目されています。このように、固体中では 電子が持つスピンが非常に重要な役割を果たしてい ます。

光子もまた電子と同様、スピン角運動量をもって います。光子のスピン角運動量の大きさは電子のそ れと比較して2倍大きく、ただ光子の質量がゼロで あるために、許される量子状態の数は電子のスピン と同じく2つになります。例えて言うと、電子のス ピンの向きは「上」か「下」の2状態に、光子は「右 回り」と「左回り」の円偏光の2状態に量子化され ています。物質に光を照射した際、光がスピン角運 動量を持つために様々な現象が発現し、今日の研究 の対象となっています。

本研究室では、物質中の電子スピンと光が誘起する さまざまな現象を探求する研究を行っています。特 に、スピン軌道相互作用が大きい物質を含む、原子 層レベルで制御した薄膜ヘテロ構造を舞台に、スピ ンと光が絡む新たな物性の探索と物理の解明に関す る研究を推進しています。

4.5.1 スピン流物性

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

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

Pt-Bi 合金で大きなスピン流生成効率が発現 [3]

原子層厚の Pt と Bi を交互積層して作製した Pt-Bi 合金で大きなスピン流生成効率が得られることを見 出しました。スピン流生成効率は Bi 濃度とともに増 加し、Biが90%程度の合金で効率を表すスピンホー ル角が 0.3 を超えました。この合金に極薄の Co 層 を積層したヘテロ構造において、Co 層の磁化容易軸 が面直方向を向き、かつ電流で磁化方向を制御でき ることがわかりました。大きなスピン流生成効率は ディラック電子を有する Bi の影響が強いと考えられ ます。一方、Co 超薄膜の磁化容易軸は界面磁気異方 性によるところが大きく、Co に隣接する物質に依存 することで知られてます。Co を Bi の上に積層した 場合、磁化容易軸は膜面水平方向を向くため、垂直 磁化膜を利用する磁気メモリなどへの利用が限定さ れてしまいます。Pt-Bi 合金を利用すると、Bi の大 きなスピン流生成効率と Pt/Co 界面による垂直磁気 異方性を合わせ持つ積層構造が得られることが明ら かになりました。

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。

スピントロニクス THz エミッターを使って、テラ ヘルツ縦電場生成 [5]

強磁性金属と重金属からなる2層薄膜にフェムト 秒レーザーを照射し、Si プリズムを使ってモード変 換すると、ラジアル偏光、アジマス偏光したテラヘル ツ波を外部磁場を使って選択的に生成できるを実証 しました。また、ラジアル偏光したテラヘルツ波を 集光することで、テラヘルツ縦電場が得られること がわかりました。スピントロニクス THz エミッター を使ったテラヘルツ波偏光制御に大きく寄与する成 果です。

本研究は東大島野研との共同研究の成果です。

半金属ヘテロ構造における偏光依存光起電流の物理 を解明 [4]

半金属薄膜と金属薄膜からなるヘテロ構造に円偏 光を照射し、円偏光の旋回性に依存する光起電流の 成分「偏光依存光起電流」を調べました。ヘテロ構 造では、偏光依存光起電流が半金属単層膜と比較し て大きく増大することがわかりました。半金属層の 膜厚や光の入射角度に対して偏光依存光起電流を調 査した結果、半金属/金属界面特有の電子状態(スピ ン吸収)が偏光依存光起電流増大に寄与しているこ とがわかりました。ディラック型の電子構造を持つ とされる半金属における非線形光学効果は未解明な 物理が多く、今後の展開が期待されます。

本研究は東北大高梨研、ドイツの Peter Grunberg Institute との共同研究の成果です。

4.5.3 界面スピン軌道相互作用とカイラル 磁性

スピン軌道相互作用が大きい物質を組み合わせた 薄膜ヘテロ構造では、これまでにない新たな現象が 最近次々と見つかっており、注目されています。た とえば、異種金属間や金属・酸化物の界面では、そ の電子状態に起因したスピン軌道相互作用が発現し、 垂直磁気異方性や、カイラルスピン構造を誘起する ジャロシンスキー・守谷型の交換相互作用が発現す ることが最近わかってきました。このような界面で 発現するスピン軌道相互作用に由来する効果は、バ ルクのそれよりも大きい場合があり、その機構解明 が重要な研究課題となっています。

フェリ磁性体の磁化補償点 [2]

希土類元素である Tb と、3d 遷移金属の Fe と Co からなる TbFeCo 合金は、Tb 副格子と Fe、Co 副格 子の磁化の向きが逆になっているフェリ磁性体です。 マクロな磁化がゼロの反強磁性と異なり、フェリ磁 性体は各副格子の磁化の大きさが同じでないため、正 味の磁化が基本的にゼロではない物質です。ただし、 希土類と遷移金属の組成をうまく調整すると正味の 磁化がゼロになり、その組成は磁化補償点と呼ばれ ています。実験から、TbFeCoの磁化補償点はその 膜厚、隣接層の材料に依存することがわかりました。 特に膜厚を 1.5 nm 程度にまで小さくすると正味の 磁化がゼロとなる組成が存在しなくなり、副格子間 の反強磁性的な結合が消失していることが予測され る結果が得られました。膜厚が大きく磁化補償点が 存在するフェリ磁性体においても、磁化補償点が隣 接する物質に依存することから、界面での原子の拡 散や電子構造が副格子間の反強磁性結合に寄与して いることが考えられます。フェリ磁性体の磁性につ いては、副格子間の交換結合だけでなく、磁気異方 性についても未解明な点が多く、今後の研究で明ら かにされることが期待されます。

本研究は東大中辻研、産総研、日大塚本研との共 同研究の成果です。

<受賞>

川田拓弥,物質依存性に基づく音響スピンホール効果の研究,学生優秀発表賞,日本物理学会,2021年10月20日.

<報文>

(原著論文)

- [2] M. Ishibashi, K. Yakushiji, M. Kawaguchi, A. Tsukamoto, S. Nakatsuji, M. Hayashi, Ferrimagnetic compensation and its thickness dependence in TbFeCo alloy thin films. Appl. Phys. Lett. 120, 022405 (2022).
- [3] Z. Chi, Y.-C. Lau, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Charge-spin conversion in Pt_{1-x}Bi_x alloys for spinorbit torque switching. APL Mater. 9, 061111 (2021).
- [4] H. Hirose, M. Kawaguchi, Y.-C. Lau, Z. Chi, F. Freimuth, K. Takanashi, M. Hayashi, Interfaceenhanced helicity dependent photocurrent in metal/semimetal bilayers. Phys. Rev. B 103, 174437 (2021).
- [5] H. Niwa, N. Yoshikawa, M. Kawaguchi, M. Hayashi, R. Shimano, Switchable generation of azimuthally-and radially-polarized terahertz beams from a spintronic terahertz emitter. Optics Express 29, 13331 (2021).

(国内雑誌)

[6] 河口真志,林将光,強磁性ヘテロ構造における界面 ジャロシンスキー・守谷相互作用の制御,日本磁気学 会誌「まぐね」, vol.17, no.1, pp. 19-26 (2022). (学位論文)

[7] 梶山陸, ディラック半金属における偏光依存起電流と 輸送特性, 修士論文 (2022).

<学術講演>

(国内会議)

一般講演

- [8] H. Matsumoto, T. Kawada, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Spin wave resonance detected from acoustoelectric current in a thin metallic film. 第 69 回応用物理学会春季学術講演会, 3/26/2022, ハイブリッド開催 (青山学院大学相模原キャンパス).
- [9] 石橋 未央, 薬師寺 啓, 河口 真志, 塚本 新, 中辻知, 林 将光, フェリ磁性 GdFeCo 薄膜における電流駆 動磁壁移動. 第 69 回応用物理学会春季学術講演会, 3/24/2022, ハイブリッド開催 (青山学院大学相模原 キャンパス).
- [10] 丸井幸博,河口真志,林将光,電流誘起磁気光学カー 効果における軌道ホール効果の影響.日本物理学会第 77回年次大会,3/17/2022,オンライン開催.
- [11] 松本啓岐, 川田拓弥, 河口真志, 林将光, 友田基信, 松田理, 2次元フォノニックグラフェンにおける表面弾 性波フォノンの伝導特性. 日本物理学会第 77 回年次 大会, 3/17/2022, オンライン開催.
- [12] 塚本萌太、河口真志、林将光、佐々木健人、小林研介、ダイヤモンド量子センサによる磁場と磁気光学カー効果の同時測定.日本物理学会第77回年次大会、 3/17/2022、オンライン開催.
- [13] 平井誉主在,吉川尚孝,河口真志,林将光,奥村駿,岡 隆史,島野亮,Dirac 電子系ビスマスにおける円偏光 誘起異常 Hall 効果.日本物理学会第 77 回年次大会, 3/15/2022,オンライン開催.
- [14] 川田拓弥,河口真志,河野浩,林将光,音響スピンホー ル効果の表面弾性波伝搬方向依存性.日本物理学会第 77回年次大会,3/15/2022,オンライン開催.
- [15] T. Kawada, M. Kawaguchi, T. Funato, H. Kohno, M. Hayashi, Acoustic wave induced spin current in strong spin-orbit metals. UTokyo-Tsinghua workshop. 12/3/2021, Online.
- [16] 松本啓岐,川田拓弥,河口真志,林将光,チャープくし 型電極を利用した広帯域表面弾性波における分散関 係.日本物理学会 2021 年秋季大会, 9/23/2021,オン ライン開催.
- [17] 松本峻弥,河口真志,林将光,人工反強磁性体におけるスピン軌道トルクの強磁性層膜厚依存性.日本物理学会 2021 年秋季大会,9/22/2021,オンライン開催.
- [18] 平井誉主在,吉川尚孝,廣瀬葉菜,河口真志,林将光, 島野亮,円偏光励起による Bi 薄膜からのテラヘルツ 波放射の温度依存性.日本物理学会 2021 年秋季大会, 9/21/2021,オンライン開催.
- [19] 松本啓岐,川田拓弥,河口真志,林将光,人工反強磁性 構造を介した表面弾性波の非相反伝導.日本物理学会 2021 年秋季大会,9/21/2021,オンライン開催.

- [20] 梶山陸,河口真志,林将光, Bi 薄膜の光誘起スピンの 磁場・温度依存性. 日本物理学会 2021 年秋季大会, 9/21/2021,オンライン開催.
- [21] 丸井幸博,河口真志,林将光,磁気光学カー効果効果の 四重極成分とプレーナーホール効果の関係.日本物理 学会 2021 年秋季大会,9/21/2021,オンライン開催.
- [22] 川田拓弥,河口真志,林将光,物質依存性に基づく音響スピンホール効果の研究.日本物理学会 2021 年秋季大会,9/21/2021,オンライン開催.
- [23] H. Matsumoto, T. Kawada, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Large nonreciprocity of surface acoustic waves in a synthetic antiferromagnet. 第 82 回応 用物理学会秋季学術講演会, 9/11/2021, オンライン 開催.
- [24] M. Ishibashi, K. Yakushiji, M. Kawaguchi, A. Tsukamoto, S. Nakatsuji, M. Hayashi, Currentinduced domain wall motion in compensated ferrimagnetic TbFeCo films. 第 82 回応用物理学会秋季 学術講演会, 9/11/2021, オンライン開催.

(セミナー)

[25] 林将光, ディラック半金属における光電変換. 物理学 科談話会, 12/16/2021, 名古屋大学.

4.6 小林研究室

半導体や金属を微細加工して作製される微小な電 子回路をメゾスコピック系と呼ぶ。その特長は、量 子力学的効果が本質的であるようなスケールにおい て制御性の高い実験ができる点にある。実際に、微 小な電子波干渉計や量子ドットなどで発現する電子 の電荷・スピン・コヒーレンス・多体効果に基づく 多彩な量子現象とその制御は、1980年代以降、物性 物理学の発展に大きな貢献を果たしてきた。

我々は、メゾスコピック系における様々な現象、特 に量子多体現象・非平衡現象に注目して研究を行っ ている。高精度測定によって定量的に量子輸送を理 解でき、これまで実現が困難であったような実験に 挑むことが可能になる。さらにメゾスコピック系な らではの新現象の発見を目指して測定技術の開発を 行っている。現在、特に量子センサによる超精密物 性計測に注力している。

2021 年度は、小林研介教授、佐々木健人助教、大学 院修士課程2年生の小河健介氏、塚本萌太氏、1年生 の伊藤秀爾氏、西村俊亮氏、および慶應義塾大学理工 学部からの研究指導受託である中村祐貴氏(修士課 程1年生)のメンバーで研究を行った。小河氏[11]、 塚本氏[12]が修士学位を取得した。佐々木助教は学 位論文が評価され井上研究奨励賞を受賞した[1,9]。

4.6.1 量子センサによる精密物性計測

ダイヤモンド NV センタ

ダイヤモンドには100種類以上の発光欠陥が知られ ている。NV センタ (nitrogen-vacancy center) はそ の一つであるが、光励起後の過程に電子スピンに依存 する独特の経路を持つ。この性質を利用すれば、単一 のNVセンタの電子スピン状態を光学的に読み出し可 能であることが 1997 年に示された。この手法を光検 出磁気共鳴 (optically detected magnetic resonance, ODMR)と呼ぶ。さらに、2008年、ODMR を利用 した局所磁場観察の手法が提案された。我々のねら いは、この手法を基盤として単一量子スピン顕微鏡 を開発し、様々な物性計測、とくにメゾスコピック 系の研究に展開していくことである。後述するよう に、この手法は幅広い温度領域・磁場領域で適用可 能であり、サブミクロンスケールで磁場や温度の分 布を定量的にイメージングできる。物性物理学には これまでに存在しなかった手法であり、高い将来性 を持つ。

NVセンタの性質について簡単に説明する。図4.6.10 に、ダイヤモンドのバンドギャップ内に形成される NVセンタのエネルギー準位を示す。ともにS = 1スピン三重項状態である基底状態と励起状態のエネ ルギー差は1.945 eV(637 nm)であり光学遷移が可 能である。波長 520 nm 程度のレーザーによって励起 した場合、励起後の $m_s = 0$ 状態はほぼ基底 $m_s = 0$ 状態へ遷移する。一方、励起 $m_s = \pm 1$ 状態について は、基底 $m_s = \pm 1$ 状態への遷移とは別に、高い確率 で中間状態を経て基底 $m_s = 0$ に至る遅い無輻射の 過程を持つ。

このように特殊な電子スピン依存光学遷移を持つ ため、NVセンタはユニークな特徴を有する。まず、光 励起過程が繰り返されることによって、基底 $m_s = 0$ 状態に状態が偏極していく。また、中間状態を介し た遷移は無輻射であるため、蛍光強度の差から NV センタのスピン状態を検出することができる。さら に、 $m_s = 0 \ge m_s = \pm 1$ 状態間にはゼロ磁場分裂 (~2.87 GHz)が存在しており、ESR 共鳴によって 引き起こされた NV センタの電子スピン状態の変化 を、蛍光強度の変化として測定可能である。ODMR とは、このような蛍光強度の変化によって ESR を観 測することである。ESR や NMR は確立した磁気共 鳴手法であるが、NV センタにおける ODMR を用い ることによって、単一のサイトに対して同じことが 可能になることが大きな魅力である。

実際、 $m_s = 0 \Leftrightarrow m_s = \pm 1$ の準位は温度や磁場に よって影響を受けるため、ODMR スペクトルの分析 によって、単一の NV センタが感じる温度や磁場を 検出することが可能になる。すなわち、NV センタ は原子スケールの量子センサとして動作する。我々 は以上の事実を利用して単一量子スピン顕微鏡を開 発している [10, 21, 36, 38, 40, 41]。



図 4.6.10: NV センタ内のエネルギー準位。

微小領域の磁場イメージング [5, 12, 25]

ダイヤモンド NV センタを用いた量子スピン顕微 鏡によって磁場イメージング手法の開発を行った。 通常、NV センタはダイヤモンドの結晶構造を反映し て4方向にランダムに配向している。しかし我々は NV センタがダイヤモンドの [111] 方向に完全に配向 した「完全配向 NV アンサンブル」を用いた (東京工 業大学波多野研究室との共同研究)。我々は、NV セ ンタが一方向にそろっているにも関わらず、参照磁 場を利用すれば三次元ベクトル計測が可能であるこ とを実証した。本研究により、空間分解能 1 µm 以 下(光学分解能)、磁場分解能 1 μT 程度(地磁気の 数十分の 1)で磁場イメージングができることを示 した。さらに我々は NV 軸に垂直な方向の磁場感度 を評価する式を考案し、期待される感度が通常のラ ンダム配向 NV アンサンブルよりも高くなることを 示した。本成果は「完全配向 NV アンサンブル」が 量子センサとして優れていることを示している。今 後は、空間分解能や磁場精度の向上などを行い、ス ピントロニクスや磁性材料の開発に適用する。

機械学習による精密磁場計測 [12]

局所磁場計測は物質における磁気的現象を理解す るための強力な手段であり、走査型ホール素子や走 査型 SQUID などが使われている。近年ではダイヤ モンド量子センサが注目され、多体スピン系や固体中 の電磁流体の挙動などを明らかにしてきた。中でも NV センタを含むナノサイズのダイヤモンド粒子は、 試料に nm オーダーで近接させることができること から、ダイヤモンド量子センサのもつ原子スケール 空間分解能を大いに活かす手法の1つとされる。し かしながら、ナノダイヤモンド集団(nanodiamond ensemble; NDE)の信号からの定量的な磁場導出は 困難であった。

我々は機械学習を用いて磁場情報を 1.8 μT とい う高確度で読み出すことに成功した。さらには NDE 信号の角度依存性を見出し、NDE を用いた磁場ベク トルイメージングの可能性も示した。この技術はモ デルフリーであるため、固体に限らず流体や生体な どのあらゆる磁気的性質を解明するために有用であ る [Tsukamoto *et al.*, arXiv:2202.00380]。

ロックインサーモグラフィー [11,27]

NV センタを用いた局所温度測定は測定対象の局 所的な温度を高感度に測定でき、しかも測定対象を 選ばないという利点を持つ。しかし、これまでは主 に生体内部の温度センシングに焦点が当てられてき ており、物性測定に用いられた例は少ない。

我々は、NDEを用いたマイクロメートルスケール での温度のロックインイメージング測定手法(ロッ クインサーモグラフィー)を開発した。原理実証の ため、ガラスおよびテフロンを測定対象とし、ロッ クインの振幅と位相の情報から測定対象の熱拡散率 を定量的に決定し、物質による熱拡散率の違いを測 定することが可能であることを示した。位相に関し ては文献値と比較して熱拡散率が大きく見積もられ るが、その要因と解決策に関して考察した。本研究 は NDEを用いて熱輸送ダイナミクス測定が可能で あることを示した実験として価値があり、既存の手 法では測定することの難しい材料やより高い空間分 解能での測定へと発展することが期待される。

スピン波の検出 [11,30]

NV センタは磁性体におけるスピン波の検出に使 えることが知られている。先行研究では、NV センタ に共鳴する周波数のスピン波の位相を含めたコヒー レントな伝搬や干渉、NV センタに非共鳴なスピン波 励起時に散乱によって生じる NV センタに共鳴する スピン波信号の観測が報告されている。しかし、未 だ報告例は少なく、特に非共鳴なスピン波励起で得ら れる磁気信号のメカニズムの理解には至っていない。

我々は、NV センタを用いてイットリウム鉄ガー ネット(YIG)薄膜のスピン波を調べた。先行研究 の再現から開始し、強磁性共鳴でのキッテルモード の励起を検出できた。このキッテルモードは既知の YIG のパラメータと整合した。同様に、NV センタ に非共鳴なスピン波励起時の磁気信号の検出にも成 功した。これらの信号に関して、ネットワークアナ ライザによる透過吸収測定との比較を行った。今後、 ダイヤモンド試料の改善や時間分解測定プロトコル の開発を行うことにより、微小領域のスピンダイナ ミクスを時空間分解して可視化することが可能とな ると考えられる。

高強度領域でのフロケ工学 [15, 22, 33]

フロケ (Floquet) 理論は時間結晶などの周期駆動 系された系におけるエキゾチックなフロケ状態を記 述する。しかし、現実の系では熱化やヒーティング などモデルに含まれていない要因のためにフロケ状 態が実現する領域が制限されるはずである。実際の 二準位系がどれほど強い駆動に対して理論通りに振 る舞えるか、何がそれを律速するのかなど、先行研 究ではほとんど検証されてこなかった。

我々は単一NVセンタを用いて、ダイナミカルデ カップリングシークエンス (DD)を適用すると同時 に、正弦波形状の高強度な磁場を印可し、その応答 を逐次読み出し法で観測した。その結果、NVセン タが、解析的理論モデルから期待される 200 次以上 の高次のサブハーモニクスまで系統的に応答するこ とを発見した。交流磁場と同様に周期的に印加され る DD でのパルス長さ・エラーを考慮した数値解析 は、解析的理論モデルからの僅かな差異を精度良く 再現する。さらに、計算に基づき、我々の実験系が フロケ理論に従う強度の限界がパルス長さで律速さ れていることを示した。

本結果は、幅広い強度領域でのフロケ工学を実証 する上で、NV センタと逐次読み出し法が有用であ ることを支持する。また、本結果はこれまで逐次読 み出し法が適用可能とされてきた交流磁場強度の範 囲を 100 倍以上拡大するものである。これによりワ イドダイナミックレンジかつ高精度な磁場センシン グへの応用が可能となった。

磁気光学カー効果との同時測定手法の開発 [12, 31]

我々は磁区の観測手段として一般的な磁気光学カー 効果(MOKE)とNVセンタによる磁場イメージン グの同時測定を目標として研究を行った。MOKEと NVセンタでは得られる情報が異なる。双方を合わ せることで磁化の分布を初めて定量的に決定できる。 ただし磁化分布を正しく導出するためには、同じ測 定系を用いて、かつ、同じ観測視野で測定することが 必要である。我々は量子スピン顕微鏡に MOKE を 組み込むことにより、局所的な磁化分布の同時計測 を試みた。光強度と偏光の2つの指標を同時に測定 するための技術的要件を明らかにし、像を取得する ことに成功した。本技術は非自明なスピン構造やメ ゾスコピックスケールの磁気的性質の動的変化を定 量的に捉えるための有力な技術となる。

スピン状態の読み出し最適化 [14, 29, 35, 37]

NV センタのスピン状態を高精度に決定する技術 は、センシングの高感度化につながる課題であるた め、盛んに研究されている。多くの研究では、NV セン タの状態が発光強度から決定される。レーザーが照 射されると、NV センタは発光を伴いながら 500 nsec 程度で状態が初期化する。この限られた時間中に得 られる光子数は 0.02 程度と少ない。スピン状態の決 定に十分な光子数を得るためには、何万回も測定を 繰り返すことになる。先行研究では、繰り返し回数 を減少させるために、発光強度の時間分解データに 重み付けを行う方法が提案されている。 NV センタ が完全に初期化した状態の発光データを参照用に取 得し、重み付け係数として利用する。最近は、機械 学習により重み付け係数を調整する手法も提案されている。しかし、これらは参照データの信号ノイズ (SN)比が高くないと機能せず、その積算にも時間 も要する。また、これらの手法を定量的に比較した 文献はない。

我々は参照データをスピン緩和モデルによって滑 らかにフィッティングしたものを重み付け係数とす る手法を開発し、先行研究との比較を行った。先行 研究の手法で精度向上を得るためには1分程度の参 照データの積算が必要であるのに対し、本手法では 3秒という短い積算時間で7%の読み出し精度の向 上が得られることがわかった。この結果は、本手法 がラビ振動のように数分の測定を効率的に行うため に有用であることを意味する。さらに、ナノスケー ル核磁気共鳴などの長時間の測定で利用されている 核スピンメモリの読み出しに対しても、本手法を適 用した。その結果、従来手法に比べて11%高いSN 比を得た。これは単一核スピン NMR 分光など、数 日間の長い測定が要する実験においても、本手法が 有用であることを示す。

ODMR スペクトルの光強度依存性 [23]

NV センタを用いた物性計測を行うためには、感 度だけでなく、確度を向上させていくことが重要と なる。NV センタを利用した温度測定の確度を低下 させる原因として、励起光強度に依存する ODMR スペクトルのシフトが報告されている [M. Fujiwara, *Phys. Rev. Research* 2, 043415 (2020)]。この現象 はメカニズムが不明であるが、低磁場において顕著 に現れるため、微弱な磁場中の測定において課題と なりうる。同時に、CMOS カメラと NDE を利用し た磁場や温度の広視野イメージングでは、視野内の 励起光強度の不均一さが実用上の問題になることも 意味する。我々は単結晶ダイヤモンド上に化学気相 成長で作製された NV アンサンブルの ODMR スペ クトルの励起光強度依存性を調査し、先行研究と同 様の現象が起こることを見出した。

4.6.2 固体素子における非平衡輸送

メゾスコピック系は非平衡輸送現象を研究する格 好の舞台である。我々は量子ドットや磁気トンネル 接合等を用いて電荷やスピンが関わる非平衡現象を 調べてきた。

非平衡量子液体における三体相関 [2, 20, 21]

近藤効果は、固体中の局在スピンがその周りの伝 導電子のスピンと結合することによって、特異な量 子状態(近藤状態)を形成する量子多体現象である。 理論的には、近藤状態は「局所フェルミ液体」として 記述されることが確立している。したがって、近藤 状態の振る舞いを研究することは、強い電子相関に 支配される量子液体を研究することと等価である。 我々は、カーボンナノチューブ量子ドットにおい て近藤効果の研究を行ってきた。この系を用いると、 単一の近藤状態を対象に、電子数・スピン・軌道・近 藤温度・平衡-非平衡など、あらゆるパラメータを制 御しながら精密な測定を行うことができる。

我々は、量子液体を構成する粒子間に存在する「三 体相関」を実験的に検出した。まず、「二体相関」は通 常のスピン感受率に対応し、平衡状態における系の線 形応答を規定する量である。それに対し、三体相関 は系の非線形非平衡応答において重要となる。我々 は、磁場中における量子ドットの非線形微分伝導度 を精密に解析し、近藤効果に特有の三体相関を検出 した。得られた結果は、近年の非平衡領域における フェルミ液体論とよく整合する。また、我々の結果 によって、量子ドットにおいて 20 年来の謎であった 近藤ピークの磁場中分裂の問題が解決された(プレ スリリースなど [8, 43])。

非平衡電流ゆらぎ(ショット雑音) [7]

メゾスコピック系の実験の多くは、電気伝導度測 定によって行われてきた。一方で、1990年代初頭よ り、電流の時間的なゆらぎ「ショット雑音」にも興 味が持たれてきた。電気伝導度と組み合わせること によって、電子の微視的な散乱過程に関する情報が 得られるためである。

代表例として 1997 年に報告されたショット雑音に よる分数電荷の検出実験がある(この実験は 1998 年 の分数量子ホール効果に関するノーベル物理学賞の 契機となった)。2000 年代初頭には、理論家によって メゾスコピック系におけるショット雑音に関する総 説が複数発表された。このようにショット雑音に多 くの関心が寄せられていた一方で、雑音測定の技術 的な難易度が高いため、1990 年代は理論が実験に先 行していた。しかし、2000 年代以降、実験技術の進 歩によって数多くの実験が報告されるようになった。

小林は、2000 年代以降のショット雑音研究を実 験家の視点でまとめた総説「メゾスコピック系にお けるショット雑音:一粒子系から量子液体へ("Shot Noise in Mesoscopic Systems: From Single Particles to Quantum Liquids")] & Journal of the Physical Society of Japan 誌における招待論文として出版し た。本論文では、最初にランダウア描像によるショッ ト雑音の教科書的な導出を行い、さらに雑音測定技 術について解説した。次に量子ポイントコンタクト や量子ホール効果エッジ状態などにおける代表的な ショット雑音実験について紹介した。これらは一粒 子モデルで理解される現象である。しかし、ショッ ト雑音測定の醍醐味は量子多体効果によって形成さ れた量子液体においても定量的な情報を得られる点 にある。論文の後半では、その例として近藤効果・ 分数量子ホール効果・超伝導におけるショット雑音 についての議論を行った。また、ランダウア描像と は異なる雑音の取り扱いとして、ゆらぎの定理と関 連する実験についての紹介も行った。最後に今後の 展望を議論した。

マグノン支援トンネル効果 [4,32]

電子輸送における電流-電圧特性は、ゆらぎや相互 作用といった、系の微視的な情報を持っている。特 に、外場が十分に弱い領域は線形応答理論によって 記述でき、輸送測定による物性評価の基盤を与える。 一方で、電流と電圧の比例関係が破れる領域、すな わち非線形輸送において、その微視的な機構を理解 することはいまなお挑戦的な問題である。非線形輸 送の要因の一つに、電子-素励起相互作用がある。例 えば、量子ドットのようなメゾスコピック系の素子 の非線形輸送には、電子フォノン相互作用の効果が 現れることが知られている。

我々は電子や素励起のスピン依存性が顕著な系に おいて、スピン依存の非線形輸送の微視的な理解を 目指す研究を行った。その対象として、強磁性体/絶 縁体/強磁性体からなる磁気トンネル接合(magnetic tunnel junction; MTJ)に注目した。MTJの電流-電 圧特性は強い非線形性を示すことが知られているが、 その微視的な機構は十分に理解されていなかった。

我々は CoFeB/MgO/CoFeB 構造を持つ MTJ を 作製し、電流-電圧特性の非線形性の面内磁場および MgO 絶縁膜厚の依存性を評価した。測定された電流 $I はバイアス電圧 V に対して I = G_1V + G_3V^3 + \cdots$ と表せた。さらに、線形応答を規定する量である電 気伝導度 (G_1)と非線形伝導の主要項を記述する係 数 (G_3) 間に MgO 膜厚や温度に依存しない非自明 な相関関係が成り立つことを発見した。

我々はこの関係を電子マグノン相互作用を取り入 れた現象論的なモデルによって定性的に説明するこ とに成功した。このモデルは、磁化ゆらぎであるマ グノンとトンネル電子との相互作用によるトンネル 機構、すなわちマグノン支援伝導が、非線形輸送に 本質的な寄与を果たしていることを示す。

MTJ はスピン依存伝導を研究するための最も理想 的な舞台の一つであり、このような研究は、非平衡 非線形輸送の理解の発展に貢献する。

4.6.3 微小薄膜素子における輸送測定

電荷密度波 [3, 26]

電荷密度波(charge density wave; CDW)とは、 結晶において、格子が周期的に歪むとともに、電荷 密度にも周期的な濃淡が現れる現象のことである。 電子格子相互作用によって引き起こされる相転移の 典型例であり、主として1次元や2次元のような低 次元系で起こる。様々な物質が CDW を示すことが 知られているが、NbSe₃ は代表例である。本研究で は、機械的剥離法で作製した厚さが 20–170 nm の極 小の NbSe₃ 素子における CDW 転移を電気抵抗測定 によって調べた。バルク NbSe₃ は 140 K と 60 K に おいて性質の異なる 2 種類の CDW 転移を起こす。 我々は厚さが 20 nm の極薄の素子においても両方の 相転移が生じることを確認した。このことは NbSe₃ における CDW の頑健性を示す。

鉄系超伝導体薄膜の磁束 [6]

2008年の発見以降、鉄系超伝導体は銅酸化物超伝 導体と同様の2次元的な層状構造を持つことから、 新しい高温超伝導体のグループとして大きな注目を 集めてきた。我々は機械的剥離法によって作製され たFeTe_{0.6}Se_{0.4} 薄膜デバイスにおける磁束のピン止 め効果を臨界電流密度を測定することによって研究 した。本試料においてバルクにおけるピン止め効果 についてはよく分かっていたが、薄膜におけるピン 止め効果は不明であった。1 T の磁場中の臨界電流 の膜厚依存性を調べたところ、約70 nmの膜厚を境 目としてピニングのメカニズムがクロスオーバー的 に変化することを見出した。これは van der Beek ら の理論 [*Phys. Rev.* B **66**, 024523 (2002)] で説明で きる。

<受賞>

[1] 佐々木健人、第 38 回(2021 年度)井上研究奨励賞、
 井上科学振興財団、2021 年 12 月 13 日。

<報文>

- (原著論文)
- [2] T. Hata, Y. Teratani, T. Arakawa, S. Lee, M. Ferrier, R. Deblock, R. Sakano, A. Oguri, and K. Kobayashi, "Three-body correlations in nonlinear response of correlated quantum liquid", *Nature Communications* **12**, 3233 (2021).
- [3] K. Fujiwara, S. Iwakiri, M. Watanabe, R. Nakamura, M. Yokoi, K. Kobayashi, and Y. Niimi, "Charge density wave transitions in mechanicallyexfoliated NbSe₃ devices", *Japanese Journal of Applied Physics* **60**, 070904 (2021) (Rapid Communication).
- [4] S. Iwakiri, S. Sugimoto, Y. Niimi, Y. Kozuka, Y. K. Takahashi, S. Kasai, and K. Kobayashi, "Negative correlation between the linear and the non-linear conductance in magnetic tunnel junctions", *Physical Review B* 103, 245427 (2021).
- [5] M. Tsukamoto, K. Ogawa, H. Ozawa, T. Iwasaki, M. Hatano, K. Sasaki, and K. Kobayashi, "Vector magnetometry using perfectly-aligned nitrogenvacancy center ensemble in diamond", *Applied Physics Letters* **118**, 264002 (2021).
- [6] R. Nakamura, M. Tokuda, M. Watanabe, M. Nakajima, K. Kobayashi, and Y. Niimi, "Thicknessinduced crossover from strong to weak collective pinning in exfoliated FeTe_{0.6}Se_{0.4} thin films at 1 T", *Physical Review* B **104**, 165412 (2021).

(総説)

[7] K. Kobayashi and M. Hashisaka, "Shot Noise in Mesoscopic Systems: From Single Particles to Quantum Liquids", *Journal of the Physical Soci*ety of Japan **90**, 102001 (2021) [Invited Review].

(国内雑誌)

- [8] 小林研介:「からみあう電子たち」、東京大学理学系研 究科・理学部ニュース 第 53 巻 3 号 06 (2021)。
- [9] 小林研介:「物理学専攻の佐々木健人助教が第38回 井上研究奨励賞を受賞」、東京大学理学系研究科・理 学部ニュース第53巻6号13 (2022)。
- [10] 佐々木健人:「ダイヤモンド中窒素-空孔中心のセン サー応用と物性計測」、物性研究(電子版)、Vol. 10, No. 1, 101211 (2022 年 3 月)。

(学位論文)

- [11] 小河健介:「ダイヤモンド量子センサを用いた熱輸送 とスピン輸送の研究」、修士論文、2022 年 3 月。
- [12] 塚本萌太:「ダイヤモンド量子センサを用いた精密磁 場イメージング」、修士論文、2022 年 3 月。

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [13] D. Terasawa, S. Norimoto, T. Arakawa, M. Ferrier, A. Fukuda, K. Kobayashi, and Y. Hirayama, "Enhanced Zeeman Splitting in a Double-Layer Quantum Point Contact", International Conferences of The 24th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS-24) (Toyama, Japan, Oct. 31–Nov. 5, 2021)[poster].
- [14] Y. Nakamura, H. Watanabe, K. M. Itoh, K. Sasaki, K. Kobayashi, and J. Ishi-Hayase, "Optimizing optical readout of a nitrogen-vacancy center with spin relaxation model", 11th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (Online & Awajishima, Japan, Feb. 21–23, 2022) [oral].
- [15] S. Nishimura, T. Isogawa, K. M. Itoh, J. Ishi-Hayase, K. Sasaki, and K. Kobayashi, "Demonstration of large-amplitude Floquet engineering in diamond two-level system", 11th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (Online & Awajishima, Japan, Feb. 21–23, 2022) [oral].
- [16] K. Sasaki, "Application of nitrogen-vacancy centers in diamond for sensing", Trans-scale Materials Science Workshop (Online, Dec. 3–3, 2021) [oral].
- [17] K. Sasaki, H. Watanabe, H. Sumiya, K. M. Itoh, and E. Abe, "Detection and control of a single proton spin in a diamond thin film with a single quantum sensor", International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (QLC2021), (Online, May 11–13, 2021) [poster].
- [18] M. Tsukamoto, K. Ogawa, M. Kawaguchi, M. Hayashi, H. Ozawa, T. Iwasaki, M. Hatano, K. Sasaki, and K. Kobayashi, "Magnetic domain structure imaging using diamond quantum sensor", International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (QLC2021), (Online, May 11–13, 2021) [poster].

[19] K. Ogawa, M. Tsukamoto, K. Sasaki, and K. Kobayashi, "Development of temperature imaging technique using diamond quantum sensor", International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (QLC2021), (Online, May 11–13, 2021) [poster].

招待講演

- [20] K. Kobayashi, "Three-body correlations in nonlinear response of correlated quantum liquid", Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics 2021 (FQMT'21) (Online, Prague, Czech Republic, Jul. 18–24, 2021).
- [21] K. Kobayashi, "Mesoscopic physics and quantum sensing", Physics Frontiers with Quantum Science and Technology (The University of Tokyo & Online, Mar. 9–10, 2022).

(国内会議)

一般講演

- 【日本物理学会 2021 年秋季大会】 オンライン、2021 年 9 月 10-13 日
- [22] 西村俊亮、五十川拓哉、伊藤公平、早瀬潤子、佐々木 健人、小林研介:「量子センサーを用いた交流磁場計 測における非線形性と精度向上」(口頭)。
- [23] 伊藤秀爾、塚本萌太、小河健介、寺地徳之、佐々木健 人、小林研介:「高精度な磁場測定に向けたダイヤモ ンド量子センサの低磁場スペクトルの調査」(口頭)。
- [24] 徳田将志、中尾舞、渡邉杜、中村瞭弥、前田将輝、 Sanghyun Lee、Yue Di、青山和司、水島健、Jin Xiao-Feng、小林研介、新見康洋:「Bi/Ni 薄膜における Little-Parks 振動の観測」(口頭)。
- [25] 塚本萌太、小河健介、小澤勇人、岩崎孝之、波多野睦子、佐々木健人、小林研介:「(111) 全配向 NV 中心による三次元磁場イメージング」(口頭)。
- [26] 藤原浩司、岩切秀一、中村瞭弥、横井雅彦、渡邉杜、 小林研介、新見康洋:「NbSe3 薄膜における電荷密度 波転移の膜厚依存性」(口頭)。
- [27] 小河健介、塚本萌太、佐々木健人、小林研介:「ダイヤ モンド量子センサを用いた熱拡散イメージング測定」 (口頭)。
- [28] 阪野塁、秦徳郎、寺谷義道、荒川智紀、堤和彦、小林 研介、小栗章:「線形コンダクタンスの磁場応答を用 いた近藤温度の見積もり」(口頭)。

【日本物理学会第 77 回年次大会】 オンライン、2022 年 3 月 15–19 日

- [29] 中村祐貴、渡邊幸志、伊藤公平、佐々木健人、小林研 介、早瀬潤子:「スピン緩和モデルに基づくダイヤモ ンドスピンの光学的読み出しの最適化」(口頭)。
- [30] 小河健介、佐々木健人、小林研介:「ダイヤモンド量 子センサを用いた YIG スピン波測定」(口頭)。
- [31] 塚本萌太、河口真志、林将光、佐々木健人、小林研介: 「ダイヤモンド量子センサによる磁場と磁気光学カー 効果の同時測定」(口頭)

- [32] 篠崎基矢、五十嵐純太、岩切秀一、北田孝仁、早川佳 祐、陣内佛霖、大塚朋廣、深見俊輔、小林研介、大野 英男:「微細 CoFeB/MgO 磁気トンネル接合におけ る非線形電子輸送特性」(口頭)。
- [33] 西村俊亮、五十川拓哉、伊藤公平、早瀬潤子、佐々木健 人、小林研介:「ダイヤモンド二準位系における高強度 領域での Floquet エンジニアリングの実証」(口頭)。
- [34] 徳田将志、中尾舞、渡邉杜、中村瞭弥、前田将輝、 Sanghyun Lee、Yue Di、青山和司、水島健、Jin Xiao-Feng、小林研介、新見康洋:「Bi/Ni 薄膜の超伝導秩 序変数」(口頭)。

【その他の国内一般講演】

- [35] 中村祐貴、渡邊幸志、伊藤公平、佐々木健人、小林 研介、早瀬潤子:「発光強度の重み付けによるダイヤ モンド量子ビットの読み出し最適化」、第82回応用 物理学会秋季学術講演会(オンライン、2021年9月 10-13日)(口頭)。
- [36] 小林研介:「量子スピン顕微鏡の開発」、新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会(オンライン、 2022年2月17-19日)(口頭)。
- [37] 中村祐貴、渡邊幸志、伊藤公平、佐々木健人、小林研介、早瀬潤子:「スピン緩和モデルを用いた窒素空孔中心スピンの光学的読み出し最適化」、2022年第69回応用物理学会春季学術講演会(青山学院大学相模原キャンパス&オンライン、2022年3月22-26日)。

招待講演

- [38] 佐々木健人:「ダイヤモンド中窒素空孔中心のセンサー 応用と物性計測」、第66回物性若手夏の学校(集中 ゼミ)(オンライン、2021年8月2-5日)(口頭)。
- [39] 佐々木健人:「ダイヤモンド量子センシングとその応用」、2021年度量子情報工学研究会「量子情報工学の 最前線」(オンライン、2021年10月5-5日)(口頭)。
- [40] 小林研介:「量子スピン顕微鏡の開発」、第15回物性 科学領域横断研究会(領域合同研究会)(オンライン、 2021年11月26-27日)(口頭)。
- (セミナー)
- [41] 小林研介:「量子計測で拓く精密物性物理学」、日本 学術振興会 学術システム研究センター(オンライン、 2021 年 6 月 11 日)。
- [42] 小林研介:「量子を見る。量子で見る。-量子物性最前 線-」、第2回物性セミナー(オンライン、2022年2 月7日)。
- (プレスリリース)
- [43] 「からみあう電子たち –量子液体における三体相関の 検出」(東京大学、大阪市立大学)、2021 年 5 月。

(アウトリーチ)

[44] 小林研介:「ナノテクノロジーと量子計測」、令和3年 度「東大の研究室をのぞいてみよう! ~多様な学生 を東大に~」プログラム(オンライン、2022年3月 28日)。

4.7 中辻・酒井研究室

今、物性分野で重要な発見が相次いでいます。こ れまでの磁性や超伝導、スピントロニクスといった 分野が、トポロジーという概念によって、再び見直 され整理・統合され、多くの新しい物理や現象の発 見に繋がっています。また、素粒子論で発達した概 念が物性分野の実験で初めて確認されたり、宇宙論・ 量子情報の技術が量子液体や超伝導の研究でブレー クスルーをもたらしたりと、既存の分野を超えた新 しい視点での研究が物性分野に変革をもたらしてい ます。こうした大きな潮流を先導しているのは、実 は、新しい概念を具現する量子物質の発見です。そ の原動力は、物性の深い理解に基づいた物質探索と その合成であり、世界最高精度の物性測定技術です。 私たちが生み出す量子物質は新しい物理概念を提供 し基礎分野で世界を先導するだけでなく、その驚く べき機能性ゆえに産業界からも注目を集めています。 これらの独自の量子物質を用いて、様々な環境での 精密測定を自ら行うことで、新しい物性とその背後 にある物理法則の解明を目指しています。

主な研究テーマ

- 1. 物質中の相対論的粒子及び新規量子現象
 - ワイル粒子とカイラル異常
 量子スピンアイスの磁気単極子、フォトン
- 2. トポロジカル磁性体の室温量子伝導
 - ワイル反強磁性体のスピントロニクス
- ベリー曲率と熱・光巨大応答
 3. 強相関電子系における量子相転移
 - 多極子揺らぎによる異常金属相・高温超伝導

4.7.1 トポロジカル磁性体における新規量子現象の探索と巨大応答

ベリー曲率は量子ホール系における整数 (チャーン 数)に相当する量であり、垂直方向の量子伝導を誘起 する。その端緒は TKNN 公式 (Thouless-Kohmoto-Nightingale-den Nijs) として知られ、Thouless はこ の功績で2016年にノーベル物理学賞を受賞している。 一方、異常ホール効果はゼロ磁場で発現するホール 効果であり、同様のベリー曲率機構による理解が進 んでいたものの、19世紀の発見以来、強磁性体でし か観測例がなかった。その中、我々は磁性体 Mn₃Sn を用い、世界で初めて反強磁性状態において巨大異常 ホール効果を観測した [Nature (2016)]。この物質は 強磁性体の 1/1000 の磁化しか持たないため、 ベリー 曲率が極端に大きくなる機構の解明が課題であった。 そこで、ベリー曲率は波数空間の仮想磁場であり、ワ イル点を源として現れることに着目し、電子状態の 解明やカイラル異常の研究を行い、物質中に磁気ワイ ルフェルミオンがいることをその世界初の例として 明らかにした [Nat. Mater. (2017)]。これらの現象 はすべて室温で現れることから、巨大な磁気熱電効果 [Nat. Phys. ('17,'18), Nature ('20), Nat. Commun. ('21), Sci. Adv. ('22)] や、反強磁性スピントロニク

ス [Nature ('19, '20)] など省エネ・脱炭素を目指し た熱電応用や次世代の高速通信・メモリデバイスな どへの応用研究にも繋がっている。

カゴメ格子強磁性体 Fe₃Sn における巨大異常ネルン スト効果

異常ネルンスト効果(ANE)は磁性体で発現する 垂直熱電効果であり、既存の熱電技術に代わり得る 革新的技術として、近年注目されている。ANE は薄 膜およびマイクロデバイスなどで利点がある一方、よ り大きな ANE を示す磁性材料の探索が課題となっ ている。本研究では、キュリー温度 760 K のカゴメ 強磁性体 Fe₃Sn において、室温以上で 3µV/K を超え る高い ANE を観測したことを報告した。第一原理 計算による電子状態の解析から、アップスピンとダ ウンスピンが縮退した特殊な電子状態が六方晶系に 対応した対称性で発現し、巨大なベリー曲率と ANE の起源となっていることが明らかとなった [1]。この ような機構による異常ネルンスト効果の増大はこれ まで報告例がなく、今後の物質探索に新たな指針を 与えるものである。



図 4.7.11: 図 カゴメ格子強磁性体 Fe₃Sn における a, 結晶構造。Fe₃Sn は c 軸方向に磁性原子の鉄から なるカゴメ格子を形成する。b. 異常ネルンスト効果 の温度依存性。

トポロジカル反強磁性体 Mn₃Sn において電気的に 読み書き可能な信号の増強に成功

Mn₃Sn はトポロジカルな電子構造に由来する巨大 応答を示す反強磁性体であり、高速磁気デバイス材 料の有力候補として研究されている。近年、Mn₃Sn/ 重金属多層膜を用いて、Mn₃Snの磁化とホール信号 を電流で制御する手法が発見された [Nature ('20)]。 本研究では、多層膜の積層構造や成膜プロセスを改 良し、Mn₃Sn 磁気素子の読み出し信号 (ホール抵抗) を今まで報告された Ru/Mn₃Sn/W 多層膜の 3 倍ま で増強することに成功した [2]。Ru 層を除去し、W 層の成膜後の熱処理プロセスを改良することにより (i) Mn₃Sn 層の結晶粒がよりホール信号を大きくす る方向に配列したこと、(ii)Mn₃Sn と W の界面が 平滑になったことが読み書き信号の増大の要因であ ると考えられる。



図 4.7.12: 図 (a) スピン流での Mn₃Sn 磁気八極子 の反転、(b) 読み出しホール信号の増強

フェリ磁性 TbFeCo 合金薄膜における磁化補償と その膜厚依存性

希土類と遷移金属から成るフェリ磁性体は、反平 行に結合した異なる原子の磁化が補償することで、全 体の磁化がゼロになる組成を有している。磁化をゼ ロにできることは、効率的な磁気応用デバイスをつ くる上で多くの利点がある。また、通常の界面効果 とは起源が異なるバルク垂直磁気異方性 (PMA) を 発現することも、フェリ磁性薄膜が磁気応用デバイス の材料として注目されている理由の一つである。本 研究では、Pt 下地上に製膜された希土類 Tb-遷移金 属 Fe.Co から成るフェリ磁性 TbFeCo 薄膜の磁気特 性を系統的に調査した [3]。その結果、TbFeCo 薄膜 の膜厚を薄くすると、Tbと Fe,Coの副格子の磁化が 補償する Tb 組成が増加することがわかった。これ は、Tb原子がPt下地層と混ざることにより、Tb原 子が磁気的に不活性になるためと考えられる。さら に、本研究では、Tb 原子の磁性消失とバルク PMA の関係も明らかにした。本研究は、磁気メモリデバ イス作製において重要となる、大きな PMA を持つ フェリ磁性超薄膜の設計に有用な指針を与えるもの である。

CoMnSb における横熱電係数の異常な温度スケー リング

横熱電係数 α_{yx} はフェルミ準位付近の特異なバン ド構造に敏感な物理量であり、強磁性体 Co₂MnGa ではワイル半金属状態が量子リフシッツ臨界点近傍 にチューニングされていることで $\alpha_{yx} \sim T \log T$ の 異常な温度スケーリングを示すことが報告されてい る。本研究ではキュリー温度 $T_{\rm C} \sim 470$ K の強磁性 体 CoMnSb においても、この異常な温度スケーリン グが見られることを実験的に明らかにした [4]。更に 第一原理計算によって試料のフェルミ準位のごく近 傍にワイル半金属状態が存在することを予測した。 この異常な温度スケーリングは、巨大異常ネルンス ト効果の起源となる特異なバンド構造のプローブと なることが示唆され、他の物質においてもマクロな 輸送測定を用いたトポロジカル状態の発見に繋がる ことが期待される。

4.7.2 多体系における量子エンタングルメ ント状態

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

量子スピンアイス候補物質 $\mathbf{Pr}_2 X_2 \mathbf{O}_7 \ (X = \mathbf{Zr}, \mathbf{Ir})$ におけるフォノンの研究

Pr₂Zr₂O₇ 及び Pr₂Ir₂O₇ は長距離秩序を示さず、 それぞれ絶縁体及び金属の量子スピンアイス候補物 質であることが知られている。Pr³⁺ は非クラマース 系であり、格子と強く結合する性質を持つため、フォ ノンを理解することが重要である。したがって本研 究では Pr₂Zr₂O₇ と Pr₂Ir₂O₇ の単結晶を用いてラマ ン分光測定を行い、各々のフォノンスペクトルにつ いて調べた。結果、Pr₂Zr₂O₇ はフォノンのソフト 化を示し、Pr-O-Pr 間の角度を変調させることが明 らかになった。その結果磁気的な性質である超交換 相互作用にも影響を与える [5]。また、格子のダイナ ミクスが 55 meV における結晶場 $E_{\rm g}$ フォノンのス ペクトルを変調させ、vibronic 状態を作ることを発 見した [12]。対して、Pr₂Ir₂O₇ は基本スペクトルが Pr₂Zr₂O₇と非常に似ているが、ピークの幅が全体的 に広くなっている。これは phonon-electron 散乱に よる効果だと考えられる。

近藤絶縁体近傍の Yb 化合物における高い反強磁性 転移

通常 Yb 系の磁気転移温度は数 K 以下に現れるこ とが通例だが、重い電子系 α -YbAlB₄ の Al サイトに Fe を置換した α -YbAl_{0.77}Fe_{0.23}B₄ は $T_N \sim 10$ K と いう高い反強磁性転移温度を示すことで知られてい る。Fe のドープは化学圧力効果と電子数の変化の両 方を伴うため、この高い転移温度の起源がどちらに あるのかを区別するのが困難である。そこで本研究 では化学圧力効果のみを持つ Mn のドープを行なう ことで、転移温度がどう変化するかを調べた。実験 の結果、Mn の 27% 置換により重い電子 Yb 系常圧 下にて最高の磁気転移温度となる 20 K での反強磁性 転移が観測された [6]。Yb を除いた α-Lu(Al,Mn)B₄ では磁性を示さないことから、Mn ではなく Yb の 4f 電子が磁気秩序の起源であると考えられる。また、 Mn 置換をさらに増やすと転移温度は減少し、半金 属へと変化することから f 電子が伝導電子と混成す ることでギャップが形成された近藤半導体となった と考えられる。

<受賞>

[1] 酒井明人、令和3年度 ISSP 学術奨励賞

<報文>

(原著論文)

- [2] H. Tsai, T. Higo, K. Kondou, A. Kobayashi, T. Nakano, K. Yakushiji, S. Miwa, Y. Otani, and S. Nakatsuji "Spin – orbit torque switching of the antiferromagnetic state in polycrystalline Mn₃Sn/Cu/heavy metal heterostructures" AIP Advance **11**, 045110 (2021).
- [3] S. Miwa, S. Iihama, T. Nomoto, T. Tomita, T. Higo, M. Ikhlas, S. Sakamoto, Y. Otani, S. Mizukami, R. Arita, S. Nakatsuji "Giant effective damping of octupole oscillation in an antiferromagnetic Weyl semimetal" Small Sci. 2000062 (2021).
- [4] H. Tsai, T. Higo, K. Kondou, S. Sakamoto, A. Kobayashi, T. Matsuo, S. Miwa, Y. Otani, S. Nakatsuji "Large Hall signal due to electrical switching of an antiferromagnetic Weyl semimetal state" Small Sci. 2000025 (2021).
- [5] Y.C. Otani, T. Higo "Domain structure and domain wall dynamics in topological chiral antiferromagnets from the viewpoint of magnetic octupole" Appl. Phys. Lett. **118**, 040501 (2021).
- [6] T. Nakano, T. Higo, A. Kobayashi, S. Miwa, S. Nakatsuji, K. Yakushiji "Fabrication of polycrystalline Weyl antiferromagnetic Mn₃Sn thin films on various seed layers" Phys. Rev. Materials 5, 054402 (2021).
- [7] S. Suzuki, K. Takubo, K. Kuga, W. Higemoto, T. U. Ito, T. Tomita, Y. Shimura, Y. Matsumoto, C. Bareille, H. Wadati, S. Shin and S. Nakat-suji "High-temperature antiferromagnetism in Yb based heavy fermion systems proximate to a Kondo insulator" Phys. Rev. Res. 3, 023140 (2021).
- [8] Y. Wang, T. Reeder, Y. Karaki, J. Kindervater, T. Halloran, N. Maliszewskyj, Yiming Qiu, J. A. Rodriguez, S. Gladchenko, S. M. Koohpayeh, S. Nakatsuji and C. Broholm "Monopolar and dipolar relaxation in spin ice Ho₂Ti₂O₇" Sci. Adv. 7 (25), eabg0908 (2021).

- [9] K. Takubo, H. Man, S. Nakatsuji, K. Yamamoto, Y. Zang, Y. Harata, H. Wadati, A. Yasui, T. Mizokawa, D. I. Khomskii "Spin-orbital liquid in Ba₃CuSb₂O₉ stabilized by oxygen holes" Phys. Rev. Mater. 5, 075002 (2021).
- [10] H. Nakamura, S. Minani, T. Tomita, A.A. Nugroho, S. Nakatsuji "Logarithmic criticality in transverse thermoelectric conductivity of the ferromagnetic topological semimetal CoMnSb" Phys. Rev. B 104, L161114 (2021).
- [11] S. Sakamoto, T. Higo, M. Shiga, K. Amemiya, S. Nakatsuji, and S. Miwa "Observation of spontaneous x-ray magnetic circular dichroism in a chiral antiferromagnet" Phys. Rev. B 104, 134431 (2021).
- [12] Y. Xu, H. Man, N. Tang, S. Baidya, H. Zhang, S. Nakatsuji, D. Vanderbilt, and N. Drichko "Importance of dynamic lattice effects for crystal field excitations in the quantum spin ice candidate Pr₂Zr₂O₇", Phys. Rev. B **104**, 075125 (2021)
- [13] K. Kondou, H. Chen, T. Tomita, M. Ikhlas, T. Higo, A.H. MacDonald, S. Nakatsuji, and Y. Otani "Giant field-like torque by the out-of-plane magnetic spin Hall effect in a topological antiferromagnet" Nat. Commun. 12, 6491 (2021).
- [14] K. Kuga, M. Matsunami, S. Singh, S. Nakatsuji, and T. Takeuchi "Simultaneous enhancements of thermopower and electrical conductivity in quasione-dimensional a-YbAlB₄ single crystal" Appl. Phys. Let. **119**, 223905 (2021).
- [15] M. Ishibashi, K. Yakushiji, M. Kawaguchi, A. Tsukamoto, S. Nakatsuji, and M. Hayashi "Ferrimagnetic compensation and its thickness dependence in TbFeCo alloy thin films" Appl. Phys. Let. **120**, 022405 (2022).
- [16] T. Chen, S. Minami, A. Sakai, Y. Wang, Z. Feng, T. Nomoto, M. Hirayama, R. Ishii, T. Koretsune, R. Arita, S. Nakatsuji "Large anomalous Nernst effect and nodal plane in an iron-based kagome ferromagnet" Sci. Adv., 8(2), eabk1480(2022).
- [17] M. Grbic, E. O'Farrell, Y. Matsumoto, K. Kuga, M. Brando, R. Kuchler, A. Nevidomskyy, M. Yoshida, T. Sakakibara, Y. Kono, Y. Shimura, M. Sutherland, M. Takigawa, and S. Nakatsuji "Anisotropy-driven quantum criticality in an intermediate valence system" Nat. Commun. (in press)
- [18] S. Nakatsuji, and R. Arita "Topological magnets: functions based on Berry phase and multipoles" Annu. Rev. Condns. Matter Phys. 13, 119 (2022).
- [19] Y. Xu, H. Man, N. Tang, T. Ohtsuki, S. Baidya, S. Nakatsuji, D. Vanderbilt, and N. Drichko "Phonon spectrum of Pr₂Zr₂O₇ and Pr₂Ir₂O₇ as evidence of coupling of the lattice with electronic and magnetic degrees of freedom" Phys. Rev. B **105**, 075137 (2022).

(国内雑誌)

- [20] 中辻知"トポロジカル磁性体が拓く新たな応用展開" 応用物理第 90 巻 4 号,
- [21] 中辻知"「トポロジカル材料」創出で目指す省エネ・高速・大容量のデータ処理" JST news 9月号, English version: Science Japan, JST news
- [22] 酒井明人、肥後友也、見波将、中辻知"ノーダルウェ ブ磁性体 Fe₃X (X = Ga, Al)の巨大異常ネルンス ト効果"まぐね Vol.16, No.6 (2021)

(学位論文)

- [23] 赤松 秀平 "無機熱電物質の合成及び物性評価" (東京 大学大学院理学系研究科物理学専攻・修士論文)(2022).
- [24] 松尾 拓海 "カイラル反強磁性体薄膜 Mn3Sn におけるトポロジカル状態の制御"(東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・修士論文)(2022).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [25] Nan Tang, Masaki Gen, Mingxuan Fu, Akihiko Ikeda, Huiyuan Man, Yasuhiro Matsuda, Kazuyuki Matsuhira, Satoru Nakatsuji "High-field magnetostriction of spin ices" APS Meeting 2022/3/17
- [26] Akito Sakai "Interplay between multigap supercondeuctivity and multipolar order in $PrTi_2Al_{20}$ " APS March meeting 2022 2022/3/17
- [27] Takumi Matsuo, Tomoya Higo, Daisuke Nishio-Hamane, Satoru Nakatsuji "Morphology and magneto-transport properties of submicron grains of the topological antiferromagnet Mn₃Sn" APS March Meeting 2022 2022/3/15
- [28] Hiroto Nakamura, Susumu Minami, Takahiro Tomita, Agustinus A Nugroho, Satoru Nakatsuji "Logarithmic criticality in transverse thermoelectric conductivity of the ferromagnetic topological semimetal CoMnSb" APS March Meeting 2022 2022/3/14

招待講演

[29] Akito Sakai "Unconventional superconductivity and strange metal in the quadrupole Kondo system $\Pr Tr_2 Al_{20}$ (Tr = Ti, V)" CIFAR – Quantum Materials Program Meeting 2021/5/11

(国内会議)

一般講演

[30] Takumi Matsuo, Tomoya Higo, Satoru Nakatsuji "Morphology and magneto-transport properteies of Mn₃Sn films deposited on high temperature Si/SiO₂ substrates without post-annealing" 第 82 回日本応用物理学会秋季学術講演会 2021/8/31

- [31] 肥後友也"反強磁性体における全方向へ指向可能な巨 大磁気応答" 応用電子物性分科会 11 月 研究例会, 反強磁性スピントロニクスの最前線 2021/9/13
- [32] 黒沢駿一郎, 冨田崇弘, Muhammad Ikhlas, Mingxuan Fu, 酒井明人, 中辻知 "カイラル反強磁性体 Mn₃Sn における磁気抵抗効果に対する Mn 置換効 果"低温科学研究センター研究交流会 2022/3/4
- [33] 見波将, Taishi Chen, 酒井明人, Yangming Wang, Zili Feng, 野本拓也, 平山元昭, 石井梨恵子, 是常隆, 有田亮太郎, 中辻知"第一原理計算によるカゴメ格子 磁性体 Fe₃Sn における 異常ネルンスト効果の予測と 検証"日本物理学会第 77 回年次大会 2022/3/14
- [34] 赤松秀平, Zili Feng, 見波将, 浜根大輔, 木村薫, 中辻 知"層状遷移金属二硫化物 TiS₂ における異方的輸送 特性" 日本物理学会第 77 回年次大会 2022/3/16
- [35] 黒沢駿一郎, 冨田崇弘, Muhammad Ikhlas, Mingxuan Fu, 酒井明人, 中辻知 "カイラル反強磁性体 Mn₃Sn における磁気抵抗効果に対する Mn 置換効 果" 日本物理学会 2022 年春季大会 2022/3/16
- [36] 肥後友也"トポロジカル反強磁性体 Mn₃Sn における 全方向へ指向可能な巨大応答"日本物理学会 第 77 回年次大会 2022/3/17

招待講演

- [37] 肥後友也"トポロジカル磁性体における異常ネルンスト効果とデバイス応用"第79回スピントロニクス専門研究会 2021/5/13
- [38] 肥後友也 "Large magneto-optical effects in a noncollinear antiferromagnet and its application for antiferromagnetic spintronics" 第 45 回 日本磁気学 会学術講演会, Symposium Recent progress of relationship between magnetism and light 2021/7/27
- [39] 肥後友也"トポロジカル反強磁性体における室温巨大 応答の観測とその制御" スピン連携ネットワーク 若 手交流会 online セミナー 2021/11/12
- [40] 中辻知"トポロジーが創る新しい磁性とその機能"東京大学統合物質・情報国際卓越大学院統合物質科学 リーダー養成プログラム「統合物質科学俯瞰講義 II」 2022/3/17

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

機械学習を用いた輝線マッピング観測データの解析

輝線マッピング観測では、銀河の大規模分布を測 ることができる。我々は、機械学習を用いて将来の 観測で得られるデータから宇宙大規模構造のシグナ ルを取り出す手法について研究を行った。敵対的生 成モデルに基づいた畳み込みニューラルネットワー クを構築し、これに輝線の波長に関する情報を与え ることで遠方銀河からのシグナルのみを適切に抽出 することができることがわかった。[31]

重力レンズで増光された星・銀河の観測

銀河団の焦線 (caustic) 通過により数千倍以上に 増光された z = 6.2 の単独の星エアレンデルを発見 した。JWST による詳細追観測によりその質量や温 度などを測定する予定である。[45]

また、ALMA 望遠鏡を用いた銀河団領域の観測に より、重力レンズ効果で増光された z = 6.07 の銀河 を発見した。同じ赤方偏移の銀河の観測は大質量銀 河に限られていたが、この銀河は質量が小さく当時 のより典型的な銀河だと言える。重力レンズによる 拡大で内部構造も明らかになり、回転により支えら れていることを発見した。[7]

重力レンズ計算および解析

銀河や銀河団の現実的な質量分布としてよく使われる NFW 楕円分布と Hernquist 楕円分布において、 従来の週百倍の速度で様々な重力レンズ観測量を計 算するアルゴリズムを提案し、その精度と有用性を 議論した。[13]

さらに、すばる望遠鏡 HSC サーベイの弱い重力レ ンズ三年度データの解析により、弱い重力レンズ効 果によって選択されたものとしてはこれまでで最大 の数百個の銀河団サンプルを構築した。[9]

5.1.2 銀河の化学進化

広がった構造を持つ超低輝度矮小銀河の形成

超低輝度矮小銀河 (UFD) は通常中心集中したコン パクトな構造を持つ。しかし Tucana II という UFD は半輝度半径の9倍にまで広がった構造を持つことが 観測で明らかになった。我々は二つの数千太陽質量 程度の銀河の合体をシミュレートし、合体後の UFD が Tucana II のような広がった構造を持つことを示 した。金属量勾配も観測結果と同程度のものが得ら れた。[11]

r 過程元素分散のある球状星団の形成

M15 は r 過程元素量分散をもつ特異な球状星団と して知られているが、その分散の起源は理解されて いない。r 過程元素の存在量とナトリウムや酸素と いった軽元素の存在量には相関が見られないことか ら、球状星団を形成する分子雲がはじめから非一様 に r 過程元素を含んでいたことを指摘した。これは 星団形成の数十 Myr 前に 100pc 以内で中性子星連星 合体のような r 過程元素合成イベントが起きれば説 明できる。[22]

5.1.3 宇宙の構造形成

残存ニュートリノの大域的分布

無衝突ボルツマン方程式を直接積分し、宇宙の残存 ニュートリノの6次元相空間内での分布を再現し、物 質分布パワースペクトルにおよぼす影響を定量的に 調べた。富岳コンピュータを用いて計3世代のニュー トリノ粒子の総質量を0-0.4 電子ボルトの範囲で変え たシミュレーションを実行し、物質分布パワースペ クトルの減衰効果を正確に求めた。この計算は2021 年のゴードンベル賞のファイナリストに選出された。 [47]

FDM ハローの粒状構造と小スケール物質パワース ペクトル

Fuzzy Dark Matter (FDM) は、質量が 10⁻²² eV 程度のスカラー粒子で、宇宙論スケールで量子力学的 効果が働くようなダークマターモデルである。FDM ハローは干渉縞に由来した粒状構造で満たされてい ることが分かっており、我々はこれをモデリングし た。さらに小スケール物質パワースペクトルを計算 し、強重力レンズ系の観測と比較することで、FDM の質量に制限を与えた。[35]

FDM ハローのコア・ハロー質量関係

FDM ハローは中心にソリトンコアが形成され、従 来の CDM ハローで問題とされているコア・カスプ 問題を解決できる可能性がある。FDM ハローのコ ア・ハロー質量関係は、一意の解釈がなされておら ず、さらにシミュレーション結果からその分散が大 きいことが示唆されている。我々は、静水圧平衡条 件および緩和時間条件を用いることで、コア・ハロー 質量関係が得られることを示した。今後これらのモ デルをさらに考察する。

5.1.4 ブラックホール3体系

連星ブラックホール-恒星・パルサー三体系の探査提案

連星ブラックホール合体に前駆して、長周期連星 ブラックホールが存在することが予想される。本研 究では、連星ブラックホール-恒星・パルサー三体系 を想定し、視線速度法・パルサータイミング法を用い て探査する方法の提案・検証を行った。数値計算お よび模擬観測の結果、近傍にある連星ブラックホー ル-恒星三体系は、視線速度の短周期・長周期変動で 探査可能であることが示された。また、高精度パル サータイミング観測と、将来の宇宙重力波検出器を 組み合わせることで、効率的な連星ブラックホール-パルサー三体系の探査が可能であることが示唆され た。[57, 67, 106, 110]

球状星団内の恒星質量ブラックホール連星合体に対 する中間質量ブラックホールの影響

球状星団中心付近には、その高密度な環境により 恒星質量ブラックホール連星が多数存在すると考え られている。本研究では、球状星団内に、中心に存 在する天体 (三体目とよぶ)と恒星質量ブラックホー ル連星の階層的三体系が存在すると仮定し、三体目 の質量を連続的に変化させることで連星の合体率の 三体目質量依存性を定量的に評価した。これによっ て、球状星団中心に中間質量ブラックホールが存在 すると、その周囲に存在する恒星質量ブラックホー ル連星の合体率は上昇するということが示唆された。 [112]

5.1.5 高エネルギー天体現象

コンパクト天体による放射の理論モデルの構築

ブラックホールや白色矮星、中性子星など、恒星が その一生を終えた後に形成されるコンパクト天体は、 超新星爆発やガンマ線バーストなどの高エネルギー 天体現象を起こす。これらは極限的環境における物 理過程を探る実験室であり、かつ宇宙進化の様々な 局面で重要な役割を果たす。

ブラックホールや中性子星などのコンパクト天体 が誕生する際に発生する突発天体現象の理論モデル の構築 [10, 17, 29, 41] と多波長電磁波観測による検 証 [8, 25] に取り組んだ。また、天の川銀河に存在す るブラックホールや中性子星からの非熱的電磁波放 射の理論モデルの構築と観測戦略の提言を行なった。 [12, 23, 43]

5.1.6 星·惑星形成

原始惑星系円盤光蒸発のダスト/ガス質量比依存性

原始惑星系円盤は惑星の形成現場であり、ガスとダ ストで構成されている。円盤進化とともに円盤表面 のダストは減少することが観測から示唆されている。 本研究では初めて、ダスト/ガス質量比をパラメータ とした輻射流体計算による光蒸発シミュレーション を遂行した。ダスト/ガス質量比が 10⁻³ より小さい 場合にはダスト光電効果に代わって H₂ pumping や X 線が主な加熱源となることを示した。

原始惑星系円盤に埋もれた惑星から生まれる多重惑 星系

原始惑星系円盤に多くのギャップ構造が存在し、 それは、形成途上の惑星によって生じたと考えられ ている。我々はそこに埋もれた惑星の質量を推定す る従来の方法論を精査し、その質量に応じて2つの 異なる解が存在する場合があることを発見した。[30] 現時点での観測データだけからは、この2つの解 の縮退を解くことは難しい。その結果、それらから 予想される多重惑星系のアーキテクチャーに興味深 い多様性が生まれることを示した。[59]

ホットジュピターの散逸大気に対する恒星風の影響

短周期ガス惑星であるホットジュピターは主星か らの強い紫外線輻射によって加熱された大気が散逸す ることが知られている。多次元輻射流体シミュレー ションを用いて散逸大気の構造及び観測されるトラン ジットシグナルを調べた。惑星が大気散逸によって 失う質量は恒星風強度に依存しない一方で Lyman-α トランジットシグナルは強い恒星風の場合、散逸大 気が押し込まれることで小さくなることが分かった。 また、Hαトランジットは Lyman-αと比べてより散 逸大気の下層を見ているために恒星風の影響が小さ いことも分かった。 [44, 79]

遠紫外線が駆動する惑星大気散逸

短周期ガス惑星の惑星大気散逸は極端紫外線によ る水素原子の光電離加熱によって駆動されるとが、近 年では遠紫外線が強い高温の恒星周りでも短周期ガ ス惑星が発見されている。高温の主星の短周期ガス 惑星について輻射流体シミュレーションを用いた計 算の結果、上層大気にダストが多く存在する場合は 遠紫外線によるダストを介した光電加熱が主要であ り、ダストが存在しない場合は励起した水素原子の 光電離及び励起した水素分子の衝突脱励起が大気散 逸を駆動することが分かった。[113]

宇宙初期におけるダークマター欠乏天体形成

宇宙初期では、ガスとダークマター (以下、DM) の速度が異なることが知られている。本研究ではこ の速度差を考慮した、宇宙論的流体シミュレーショ ンを実行し、ガス進化の様子を調べた。結果として、 ガスが DM に対して超音速で運動し、DM の重力ポ テンシャルの影響を受けずに収縮するといった、通 常とは異なる天体が形成されることを明らかにした。 [39]

5.1.7 系外惑星

逆行星周円盤の形成シナリオ

近年の ALMA 望遠鏡による高解像度の観測によっ て、回転軸が互いに傾いた原始惑星系円盤を持つ若 い連星系が多数発見されている。さらに、大質量原 始星連星 IRAS 16547-4247 の個々の原始星に付随 する原始惑星系円盤が互いに逆回転している可能性 も報告されている。このような回転軸が互いに傾い た円盤や逆回転する円盤の形成過程を明らかにする ため、原始惑星系円盤の形成進化3次元シミュレー ションを行い、乱流分子雲コア中で形成される原始 惑星系円盤の回転軸の時間進化を調べた。その結果、 原始星連星を周回する3つ目の原始星に付随する原 始惑星系円盤が進化の途中で逆回転することを発見 した。これは、内側の原始星連星がその周囲に作る 周連星系円盤からの質量降着によって引き起こされ る現象であり、原始星の捕獲や磁場の効果といった 複雑な物理過程なしに、流体力学的なガスの進化か ら逆回転する円盤が形成する新たなシナリオである。 [19]

中心星の微分回転を考慮したロシター・マクローリン効果の解析的表式

ロシター・マクローリン効果は、トランジット惑星 系の天球面に射影された自転公転角を測定する重要 な観測的手法として確立している。しかし従来は中 心星の表面の微分回転の効果はhとんど考慮されて いなかった。今回は、この微分回転を考慮した場合 の解析的な近似表式を導くことに成功した。このテ ンプレートを用いることで、従来は測定できなかっ た微分回転のパラメータと中心星の自転傾斜角の2 つを同時に推定することが可能となる。[28]

原始惑星系円盤に埋もれた惑星から生まれる多重惑 星系

ALMA 望遠鏡による高解像度観測によって、原 始惑星系円盤に多くのギャップ構造が存在すること が明らかとなっている。それらは形成途上の惑星に よって生まれたとするのがもっとも有力な可能性で ある。我々はそこに埋もれた惑星の質量を推定する 従来の方法論を精査し、その質量に応じて2つの異 なる解が存在する場合があることを発見した。[30] 現時点での観測データだけからは、この2つの解 の縮退を解くことは難しい。その結果、それらから 予想される多重惑星系のアーキテクチャーに興味深 い多様性が生まれることを示した。[59]

黒点による星の光度変化の解析的モデル

ケプラー探査機に代表される高精度光度関数によっ て数多くの星の自転周期が推定されている。そのほ とんどは、表面上の黒点が自転にともなって見かけ上 の光度変動を生み出すためであると考えられている。 しかし今までその光度曲線の解析的モデル化はなさ れていなかった。今回、黒点のサイズが星に比べて 十分小さいという近似のもとで、星の微分回転の効 果をとりこんだ光度曲線の解析的表式を導出した。

ケプラー探査機の精密測光データと星震学を用いた 星の自転周期推定値の信頼性

ケプラー探査機の測光観測データから数万個の星 の自転周期が推定されている。これとは独立に、星 の脈動を用いる星震学から数百個の主系列星に対す る自転周期が推定されている。星の表面活動と黒点 の運動、さらには表面と内部の微分回転の効果を考え れば、前者の測光的周期と後者の星震学的周期とは必 ずしも一致する必要はない。そこで、今回は星震学 的周期が推定されている 92 個の主系列星に対して、 Lomb-Scargle periodogram、自己相関関数、wavelet を用いてそれらの測光的周期を再解析し、星震学的 周期と系統的に比較することで、お互いの推定値の 信頼性を評価するとともに、微分回転に対する制限 を議論した。この結果は、特に惑星をもつ系の自転 公転角、自転傾斜角の決定とその起源の議論におい て重要となることが期待される。

<受賞>

- [1] 森脇可奈、第 34 回理論懇シンポジウム若手発表賞、 理論懇談会、2021 年 12 月 24 日
- [2] 森脇可奈、東京大学総長大賞、東京大学、2022 年 3 月 23 日

<報文>

(原著論文)

- [3] Park H., Shapiro P. R., Ahn K., Yoshida N., Hirano S., 2021, ApJ, 908, 96
- [4] Strait V., et al. (incl. Oguri M.), 2021, ApJ, 910, 135
- [5] Tanaka K., et al. (incl. Oguri M.), 2021, PASJ, 73, 584
- [6] Shirasaki M., Moriwaki K., Oogi T., Yoshida N., Ikeda S., Nishimichi T., 2021, MNRAS, 504, 1825

- [7] Fujimoto S., Oguri M., et al., 2021, ApJ, 911, 99
- [8] Eftekhari T., Margalit B., Omand C. M. B., et al (incl. Kashiyama K.), 2021, ApJ, 912, 64
- [9] Oguri M., et al., 2021, PASJ, 73, 817
- [10] Tsuna D, Kashiyama K., Shigeyama T., 2021, ApJ, 914, 31
- [11] Tarumi Y., Yoshida N., Frebel A., ApJL, 914, 10 (2021).
- [12] Kimura S. S., Sudoh T., Kashiyama K., et al, 2021, ApJ, 915, 31
- [13] Oguri M., 2021, PASP, 133, 074504
- [14] Li X., Yoshida N., Oguri M., Ikeda S., Luo W., 2021, ApJ, 916, 67
- [15] Dalal R., Strauss M. A., Sunayama T., Oguri M., et al., 2021, MNRAS, 507, 4016
- [16] Inoue S., Yoshida N., Hernquist L., 2021, MNRAS, 507, 6140
- [17] Zhong Y., Kashiyama K., Shigeyama T., et al, 2021, ApJ, 917, 71
- [18] Inayoshi K, Kashiyama K., Visbal E., et al., 2021, ApJ, 919, 41
- [19] Takaishi D., Tsukamoto Y., Suto Y., 2021, PASJ, 73, L25-L30
- [20] Ishigaki M., Hartwig T., Tarumi Y., et al. 2021, MNRAS, 506, 5410
- [21] Roberts I. D., et al. (incl. Oguri M.), 2022, MN-RAS, 509, 1342
- [22] Tarumi Y., Yoshida N., Inoue S., ApJL, 921, 11 (2021).
- [23] Kimura S. S., Kashiyama K., Hotokezaka K., 2021, ApJ, 922, 15
- [24] Tang S., et al. (incl. Hartwig T.) 2021, ApJ, 922, 83
- [25] Murase K., Omand C. M. B., Coppejans D. L., et al. (incl. Kashiyama K.), 2021, MNRAS 508, 44
- [26] Ishikawa S., Okumura T., Oguri M., Lin S.-C., 2021, ApJ, 922, 23
- [27] Tang S., et al. (incl. Oguri M.), 2021, ApJ, 922, 83
- [28] Sasaki S., Suto Y., 2021, PASJ, 73, 1656-1668
- [29] Tsuna D., Kashiyama K., Shigeyama T., 2021, ApJL, 922, 34
- [30] Wang S., Kanagawa K., Suto Y., et al. 2021, ApJ, 923, 165
- [31] Moriwaki K., Yoshida N., 2021, ApJL, 923, L7
- [32] Akino D., et al. (incl. Oguri M.), 2022, PASJ, 74, 175
- [33] Ikkatai Y., Hartwig T., et al. 2022, International Journal of Human-Computer Interaction, 1-18
- [34] Hartwig T., et al. 2022, AI & Society, https:// doi.org/10.1007/s00146-021-01323-9

- [35] Kawai H., Oguri M., Amruth A., Broadhurst T., Lim J., 2022, ApJ, 925, 61
- [36] Aihara H., et al. 2022, PASJ, 74, 247-272
- [37] Jian H.-Y., et al. (incl. Oguri M.), 2022, ApJ, 926, 115
- [38] Matsuoka Y., et al. (incl. Oguri M.), 2022, ApJS, 259, 18
- [39] Nakazato Y., Chiaki G., Yoshida N., et al. 2022, ApJ, 927, 12
- [40] Kooistra R., Inoue S., Lee K.-G., Cen R., Yoshida N., 2022, ApJ, 927, 53
- [41] Sawada R., Kashiyama K., Suwa Y., 2022, ApJ, 927, 233
- [42] Chiaki G., Yoshida N., 2022, MNRAS, 510, 5199
- [43] Yamasaki S., Kashiyama K., Murase K., 2022, MNRAS, 511, 3138
- [44] Mitani H., Nakatani R., Yoshida N., et al. 2022, MNRAS, 512, 855
- [45] Welch B., et al. (incl. Oguri M.), 2022, Nature, 603, 815
- (会議抄録)
- [46] Yoshida N., Li X., Proceedings of Big Data Analytics in Astronomy, Science and Engineering
- [47] Yoshikawa K., Tanaka S., Yoshida N., Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, Article No.5, 1-11
- [48] Moriwaki K., 2022, Big-Data-Analytics in Astronomy, Science, and Engineering, Springer International Publishing, 73

(国内雑誌)

- [49] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その五十四: ラマヌジャン マシーン""、東京大学出版会 UP 584(2021)6 月号, pp.26-31.
- [50] 須藤 靖: "この私に自由意志があると信じる(信じたい)理由"、青土社 現代思想 49(2021)8 月号, pp.52-58.
- [51] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その五十五: ゥゥゥウウ ウーーー UFO! "、東京大学出版会 UP **587**(2021)9 月号, pp.30–36.
- [52] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その五十六: 物理学者バー リ・トゥード"、東京大学出版会 UP **590**(2021)12 月 号, pp.25-31.
- [53] 須藤 靖: "宇宙は数式でできている"、朝日新聞出版 一冊の本 (2022)2 月号, pp.6–7.
- [54] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その五十七: 物理法 則 5W1H"、東京大学出版会 UP 593(2022)3 月号, pp.36-42.
- [55] 樫山和己"「Fast Radio Burst の正体に迫る」 物理
 科学、この1年 2022", パリティ編集委員会編

(学位論文)

- [56] Yici Zhong: "Study on the effect of supernova fallback on the neutron star diversity" (修士論文)
- [57] Toshinori Hayashi: "Gravitational hierarchical three-body systems with an invisible inner binary: application to binary black-hole search and their dynamical stability" (博士論文)
- [58] Kana Moriwaki: "Analysis of the Large-Scale Structure of the Universe Using Cosmological Simulations and Machine Learning" (博士論文)
- [59] Shijie Wang: "Planetary systems predicted from the ALMA disks: planet-disk evolution and longterm orbital stability of multi-planets"(博士論文)
- [60] 駒木綾乃: "原始惑星系円盤の消失過程"(修士論文)
- [61] 河合宏紀: "軽いダークマターと宇宙の構造形成"(修 士論文)

(著書)

- [62] 須藤 靖・伊勢田哲治: "科学を語るとはどういうこと か 科学者、哲学者にモノ申す 増補版"、河出書房 新社 (2021 年 5 月刊行)
- [63] 須藤 靖:"宇宙は数式でできている なぜ世界は物理 法則に支配されているのか"、朝日新書 (2022 年 1 月 刊行)
- [64] 文系のためのめっちゃやさしい宇宙 (吉田直紀監修 ニュートンプレス 2022 年 1 月刊行)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [65] Hartwig T., "Multiplicity of the first stars confirmed by supervised classification of extremely metal-poor stars"; GALAH Science Meeting, Online (June 22-24, 2021)
- [66] Moriwaki K., "Component extraction from line intensity maps with conditional GAN"; UChicago/KICP Line Intensity Mapping Workshop 2021 (July 7-9, 2021)
- [67] Hayashi T., "A strategy to search for an inner binary black hole from the motion of the tertiary"; COSMO'21, University of Illinois, Online (August 2-6, 2021)
- [68] Hartwig T., "A new, unsupervised, nonparametric likelihood test for multidimensional data"; RESCEU summer school 2021, Online (August 18-20, 2021)
- [69] Nakazato Y., "The formation of Supersonically Induced Gas Objects (SIGOs)"; RESCEU summer school 2021, Online (August 18-20, 2021)
- [70] Zhong Y., "A necessary condition for supernova fallback invading newborn neutron-star magnetosphere"; RESCEU summer school 2021, Online (August 18-20, 2021)

- [71] Komaki A., "Photoevaporation of Protoplanetary Disk : Dust-to-gas Mass Ratio Dependence"; RESCEU Summer School, Online (August 18-20, 2021)
- [72] Kawai H., "An analytic model for the sub-galactic matter power spectrum in fuzzy dark matter halos"; RESCEU Summer School, Online (Aug 18-20, 2021)
- [73] Zhong Y., "Study on the effect of the outflow from young neutron stars and supernova fallback on the neutron star diversity"; YITP workshop Extreme Outflows in Astrophysical Transients, Kyoto University(August 23-27, 2021)
- [74] Hartwig T., "Machine learning finds hint for multiplicity of the first stars in stellar archaeology data"; NIC-XVI, Online (September 21-25, 2021)
- [75] Kawai H., "An analytic model for the sub-galactic matter power spectrum in fuzzy dark matter halos"; Workshop on Very Light Dark Matter 2021, Online (September 27-29, 2021)
- [76] Moriwaki K., "Signal extraction from line intensity data cubes with 3D conditional GAN": SUBLIME Workshop, Online(October 14, 2021)
- [77] Komaki A., "Photoevaporation of Protoplanetary Disks"; IAU Symposium 362 The predictive power of computational astrophysics as a discovery tool, Online (November 8-12, 2021)
- [78] Nakazato Y., "The formation of Supersonically Induced Gas Objects (SIGOs) with H2 cooling"; IAU Symposium 362 The predictive power of computational astrophysics as a discovery tool, Online(November 8-12, 2021)
- [79] Mitani H., "Stellar wind effects on the atmospheric escape and transit signals of hot Jupiters"; IAU Symposium 362 The predictive power of computational astrophysics as a discovery tool(Online, November 8-12, 2021)
- [80] Kawai H., (Poster) "An analytic model for the subgalactic matter power spectrum in fuzzy dark matter halos"; Kashiwa Dark Matter Symposium 2021, Online (November 29 - December 2, 2021)
- [81] Oguri M., "Status report of WISHES"; Subaru Users Meeting FY2021 (NAOJ, January 11-13, 2022)
- [82] Moriwaki K., "Deep Learning for Line De-Confusion from Large-Scale Line Intensity Maps"; SAZERAC learning the high-redshift Universe, Online (February 3-5, 2022)

招待講演

[83] Yoshida N., "Cosmic Relic Neutrinos and Large-Scale Structure: Nonlinear Clustering and the Neutrino Mass"; IAP Colloquium, Online (May 7, 2021)

- [84] Oguri M., "WISHES: Wide Imaging with Subaru HSC of the Euclid Sky"; Euclid Consortium Meeting 2021, Online (May 25-28, 2021)
- [85] Kashiyama K., "Outflows from Dwarfs"; YITP workshop Extreme Outflows in Astrophysical Transients, Kyoto University (August 23-27, 2021)
- [86] Kashiyama K., "Magnetic fields of compact objects"; NAOJ Future Planning Symposium 2021 -Thinking about Future Plans Across Wavelengths, Online (Novermber 9-10, 2021)
- [87] Yoshikawa K., Tanaka S., Yoshida N., "A 400trillion grid Vlasov Simulation on Fugaku Supercomputer"; The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC21), Online (November 17, 2021)
- [88] Yoshida N., "Cosmology and Fundamental Physics with Big Astronomical Data"; COMDATA21, Online (November 22, 2021)
- [89] Yoshida N, "Cosmic density field reconstruction with a sparsity prior using images of distant galaxies"; BASE21, Online (December 7-9, 2021)
- [90] Moriwaki K., "Deep Learning Application for Reconstruction of Large-Scale Structure of the Universe"; Big Data Analytics in Science and Engineering (BASE), 9th International Conference Data Models and New Query Languages in Big Data Analytics, Online (December 7-9, 2021)

(国内会議)

一般講演

- [91] Wang S., "Multi-planetary systems deduced from the observed ALMA disks: initial conditions and evolutionary outcomes"; JpGU Meeting, Online, (June 6, 2021)
- [92] Zhong Y., "Study on the effect of the outflow from young neutron stars and supernova fallback on the neutron star diversity"; YITP workshop: Extreme Outflow in Astrophysical Transients 2021 (August 23-27, 2021)
- [93] Wang S., "Improved mass predictions of the potential planets in gaps of ALMA disks"; Autumn Annual Meeting, ASJ fall annual meeting 2022, Online (September 13-15, 2021)
- [94] 大栗真宗, 古澤久徳、宮崎聡、ほか WISHES チーム, "広視野サーベイ観測 WISHES: サーベイの概要";日本天文学会 2021 年秋季年会オンライン(2021 年 9 月 13 日-15 日)
- [95] 林利憲, Alessandro Trani, 須藤靖, "階層的三体系の 不安定時間スケールの軌道要素依存"; 日本天文学会 2021 年秋季年会, 京都産業大学(オンライン開催) (2021 年 9 月 13 日-15 日)
- [96] 稲熊穂乃里, Alessandro Alberto Trani, 吉田直 紀,Smadar Naoz, "Eccentric-Kozai-Lidov 機構によ る BH 連星の合体: Post-Newtonian 効果"; 日本天 文学会 2021 年秋季年会, オンライン (2021 年 9 月 13 日-15 日)
- [97] 駒木彩乃,仲谷崚平,吉田直紀 "原始惑星系円盤光蒸発の輻射流体計算:ダスト-ガス質量比依存性";日本 天文学会 2021 年秋季年会,オンライン (2021 年 9 月 13 日-15 日)
- [98] 森脇可奈,"広領域遠方輝線銀河観測による宇宙再電 離現象の探究";日本天文学会 2021 年秋季年会(2021 年 9 月 13 日-15 日)
- [99] 仲里佑利奈,千秋元,吉田直紀 "ダークマターとバ リオン間の相対速度による超音速駆動ガス天体形成"; 日本天文学会 2021 年秋季年会,オンライン (2021 年 9月13日-15日)
- [100] 河合宏紀, "Fuzzy Dark Matter (FDM) ハローモ デルの構築と FDM の質量制限";日本物理学会 2021 年秋季大会,オンライン(2021 年 9 月 14 日-17 日)
- [101] Hartwig T., "Machine learning finds hint for multiplicity of the first stars in stellar archaeology data"; ASJ fall annual meeting 2022, Online (September 13-15, 2021)
- [102] Hartwig T., "Machine learning finds hint for multiplicity of the first stars in stellar archaeology data"; Metal-Poor Universe, Online (September 27-30, 2021)
- [103] 仲里佑利奈, 千秋元, 吉田直紀, "The formation of Supersonically Induced Gas Objects (SIGOs) with H2 chemistry"; 金属欠乏宇宙 2021, オンライン (2021 年 9 月 27-30 日)
- [104] 河合宏紀、"Fuzzy Dark Matter ハローの小スケー ル物質パワースペクトル";第10回観測的宇宙論ワー クショップ,オンライン(2021年11月17日-19日)
- [105] 森脇可奈, "Component extraction from line intensity mapping data"; 第 34 回理論懇シンポジウム, オ ンライン (2021 年 12 月 22-24 日)
- [106] 林利憲, Shijie Wang, 須藤靖, "長周期連星ブラッ クホールを含む三体系の探査方法の提案とその検証"; 連星系・変光星研究会 2022, 鹿児島大学(オンライン 併用)(2022 年1月 29-30 日)
- [107] 仲里佑利奈,千秋元,吉田直紀, Smadar Naoz, William Lake, Chiou Yeou, "The formation of Supersonically Induced Gas Objects by Stream Velocity";初代星・初代銀河研究会 2021,徳島大学 (2022年2月16-18日)
- [108] 駒木彩乃,仲谷崚平,吉田直紀, "原始惑星系円盤光 蒸発の輻射流体計算:ダスト/ガス質量比依存性";初 代星・初代銀河研究会 2022,ハイブリッド形式 (2022 年 2 月 16 日-18 日)
- [109] Hartwig, T., "Public Release of A-SLOTH"; First Stars First Galaxies 2021, Tokushima University (February 16-18, 2022)
- [110] 林利憲, "パルサータイミング法を用いた連星ブラックホール-パルサー三体系探査の提案"; 研究会「素粒子と重力波」, 大阪市立大学(オンライン併用)(2022年2月22日)
- [111] 仲里佑利奈,千秋元,吉田直紀,"Stream Velocity に よる超音速駆動ガス天体の統計的性質";日本天文学 会 2022 年春季年会,オンライン (2022 年 3 月 2-5 日)

- [112] 稲熊穂乃里,吉田直紀, Alessandro Alberto Trani, "Eccentric Kozai-Lidov 機構による Octupole 振 動";日本天文学会 2022 年春季年会,オンライン (2022 年 3 月 2 日-5 日)
- [113] 三谷啓人,仲谷崚平,吉田直紀, "ホットジュピター の大気散逸における FUV 加熱の役割";日本天文学 会 2022 年春季年会,オンライン (2022 年 3 月 2-5 日)
- [114] 森脇可奈,"深層学習を用いた輝線強度マッピング観 測データからの三次元銀河分布の再構築";日本天文 学会 2022 年春季年会(2022 年 3 月 2-5 日)
- [115] 河合宏紀、(ポスター講演) "Fuzzy Dark Matter ハ ローの大域的密度プロファイルに関する理論モデル"; 日本天文学会 2022 年春季年会、オンライン (2021 年 3月2日-5日)
- [116] 森脇可奈,"機械学習による輝線マッピング観測デー タからの大規模構造の再構築";データサイエンス的 手法により探求する天文学(2022年3月24-25日)

招待講演

- [117] 大栗真宗, "Euclid 衛星計画""; 2021 年度光赤天連 シンポジウム, オンライン (2021 年 9 月 6 日-9 日)
- [118] 森脇可奈,"機械学習を用いた近年の宇宙物理研究"; 第 10 回観測的宇宙論ワークショップ(2021 年 11 月 17-19 日)
- [119] 森脇可奈,"遠方 21cm 線と遠方銀河を用いた宇宙再 電離研究";初代星・初代銀河研究会 2021 (2022 年 2 月 16-18 日)
- [120] 森脇可奈, "21cm 線と遠方銀河観測を組み合わせた 再電離史の理解"; 宇宙電波懇談会シンポジウム 2021 (2022 年 3 月 7-8 日)

(セミナー)

- [121] Oguri M., "New directions in cluster cosmology"; Seminar, Beijing Normal University (2021年5月6 日)
- [122] Kashiyama K., "Synchrotron Boilers in Embryonic Pulsar Wind Nebulae"; TAPIR seminar at California Institute of Technology (May 21, 2021)
- [123] 須藤靖,"地球外に生命は存在するのか"; 追手前ゼミ ナール,高知県立追手前高校 オンライン(2021年6 月 26 日)
- [124] Kashiyama K., "A White Dwarf Merger Remnant in the Galaxy"; 京都大学理学系研究科宇宙物理学教 室談話会 (2021 年 7 月 7 日)
- [125] 吉田 直紀, "富岳コンピュータで挑む宇宙と素粒子の謎"; 物理チャレンジ 2021, 日本物理学会 (2021 年 8月19日)
- [126] Kashiyama K., "A White Dwarf Merger Remnant in the Galaxy"; 青山学院大学・物理・数理学科コロ キウム (2021 年 9 月 3 日)
- [127] Yaushi Suto, "Different cultures, Same Science"; Orientation for new fellows of the Japan Society for Promotion of Science, Online (September 9, 2021)

- [128] 吉田 直紀, "宇宙の時間, 地球の時間"; 東京大学エグ ゼクティブマネージメントリフレッシュプログラム, 東京大学 (2021 年 9 月 21 日)
- [129] Oguri M., "New directions in cluster cosmology"; Colloquium, Department of Astronomy, Shanghai Jiao Tong University (2021年9月22日)
- [130] 須藤靖,新しい科学の世界 I 地球と宇宙を科学する 第2回"宇宙のダークサイド";かわさき市民アカデ ミー(2021年10月12日)
- [131] 須藤靖, 理学のワンダーランド "宇宙人はいるのだろうか?", 東京大学小柴ホール (2021 年 10 月 16 日)
- [132] 吉田 直紀, "宇宙のダークマターの謎"; 科学の甲子 園, 埼玉県教育委員会 (2020 年 11 月 20 日)
- [133] 吉田 直紀, "宇宙 138 億年の進化と天体の形成", 日本物理学会公開講座 (2021 年 11 月 27 日)
- [134] Oguri M., "Potential synergies between Rubin/LSST and HSC"; Seminar and discussion, KIPAC LSST early release science group, Stanford University (2021年12月2日)
- [135] 須藤靖, 理工学のフロンティア 第 10 回 "マルチバー ス的世界観", 高知工科大学 オンライン (2021 年 12 月 7 日)
- [136] 須藤靖, 宇宙普遍生物学セミナー 第2回 "天文学者の「宇宙生物学」と生物学者の「普遍生物学」との乖離と接点"、東京大学 生物普遍性研究機構+ビッグバン宇宙国際研究センター オンライン (2021年12月14日)

5.2 村尾研究室

量子情報とは、0と1のみならず0と1の任意の重 ね合わせ状態を取ることができるような量子力学的 な状態で表される情報である。量子力学の許す範囲 で状態を自由に操作して変換することによって、古 典力学に基づいた状態の変換として表される古典情 報処理より優位な情報処理を実行しようとすること が量子情報処理であり、古典情報処理の限界を超え るブレークスルーの候補として近年注目を集めてい る。量子情報処理の例としては、量子計算、量子暗 号、量子テレポーテーション等が提案されている。

本研究室では、計算アルゴリズムや情報処理を効 率よく実行するための装置としてだけではなく、量 子力学的に許されるすべての操作を自由に行うこと ができる装置として量子計算機をとらえ、量子計算 機を用いることで現れる量子力学的効果に関する理 論的研究を行っている。我々の研究は、情報と情報 処理という操作論的な観点から量子力学への基盤的 理解を深める、という基礎科学的なアプローチと、エ ンタングルメントなどの量子力学特有の性質を情報 処理、情報通信、量子学習、量子精密操作などに役 立てる、という応用科学的なアプローチの相乗効果 によって発展させている。

今年度は、村尾美緒教授、添田彬仁助教、日本学 術振興会外国人研究員の Bartosz Regula 博士、博士 課程大学院生の横島亘氏、修士課程大学院生の岡本 惇志氏、橋本豊氏、松井浩介氏、吉田智治氏、およ びの大学院研究生の田中雄氏、Timothy Forrer 氏の メンバーで、高階量子演算、量子系のダイナミクス の制御、分散型量子情報処理、および量子資源理論 に関する研究を行い、多角的な視点から量子情報の 理論的研究を進めた。

5.2.1 高階量子演算

情報処理タスクを導入した操作論的枠組を利用し 量子力学の基盤的理解を深めるという、物理学およ び情報学それぞれの分野の基礎論の観点ならびに、量 子情報処理の実用化という応用からも、「なぜ、どの ように量子情報処理は古典情報処理より優位性を持 ちうるのか」を解明することが重要である。そこで 新しい側面から量子情報処理の特性を解明するため に、ブラックボックスとして与えられた量子操作を 入力として、量子操作を出力とする関数である超写 像を実装する高階量子演算(higher-order quantum operations)に注目し、その実装可能性や近似的実装 に必要なリソース、および、高階量子演算における 並列性・因果性・匿名性に関する解析、量子学習へ の応用を進めた。

未知のアイソメトリ操作を反転する確率的な高階量 子演算

高階量子演算は量子操作から量子操作への変換と して定義され、群変換の推定、ユニタリ操作の学習、 ユニタリ操作の複製、プロセストモグラフィなどの量 子情報処理への応用や量子重力理論における因果順 序の理解といった観点からよく研究されている。特 に、先行研究ではユニタリ操作の高階量子演算につ いて研究されてきた。ユニタリ操作の高階量子演算 が研究されてきた背景には、ユニタリ操作が量子計 算などの応用に重要であることが挙げられる。これ に対し、情報のエンコーディングを表すアイソメト リ操作 (isometry, 等長変換) 操作も量子情報処理に おいて重要な役割を持っているが、アイソメトリ操 作の高階量子演算については今まで研究されてこな かった。

そこで本研究では、アイソメトリ操作の高階量子 演算の一つであるアイソメトリ反転について研究し た。このタスクは未知のアイソメトリ操作がブラッ クボックスとして与えられた時、その逆変換を実装す る高階量子演算である。本研究の結果として、アイ ソメトリ反転を確率的だが誤差ゼロで逆変換を実装 することができる効率的な実装方法を提案した。ま ず、Schur-Weyl duality という表現論でよく知られ た関係式を拡張し、アイソメトリ操作のテンソル積 を直和分解する方法を考案した。この直和分解を用 いて、任意のアイソメトリ操作のテンソル積を、ラ ンダムなユニタリのテンソル積に変換する量子チャ ンネルを開発した。この量子チャンネルとユニタリ 反転についての先行研究を組み合わせることで、ア イソメトリ反転の効率的なプロトコルの実装を行った。[担当:吉田、添田、村尾]

高階量子演算の量子メモリーへの保存と読み出し

あらゆるユニタリ演算を量子メモリーに保存し読み 出すようなタスクを考える。No-programming theorem により、このタスクを決定論的に達成するのは 不可能であることが知られているが、確率的にであ れば達成でき、最適な成功確率とそれを実現するプ ロトコルが先行研究により明らかとなっている。次 の課題として、保存読み出し対象の演算の集合を変 更することでどう成功確率が変わるか、という問題 が残っていた。本研究では、高階量子演算を保存読 み出し対象にしたときについて解析した。入力高階 量子演算が1回または2回使用する場合、保存時に はSWAPという2つの量子状態を入れ替える量子変 換を高階量子演算に差し込めば良いということを証 明した。[担当:横島、添田、村尾]

未知ユニタリチャネルの比較

未知の量子オブジェクトから特定の値や性質を学 習することを、量子学習という。本研究では、未知 の2つのユニタリチャネルが同じか違うかどうかと いう情報を抽出する量子学習について、一般的にコ ストの高いトモグラフィーやその後の古典情報処理 を行わず、量子回路を利用して理論上最も効率的な 情報抽出を行う手法の開発を行った。未知ユニタリ チャネルの次元が2の場合に、2つのユニタリチャネ ルを任意回数利用する場合の最適戦略を明らかにし、 更に一般の次元の場合でも片方の使用回数がある程 度多い場合の最適戦略を導出した。[担当:橋本、添 田、村尾]

群論構造がないユニタリチャネル判別: 直列的およ び不定順序的戦略の優位性

未知のオブジェクトが候補のいずれかであるか当 てる判別タスクは、情報理論の分野のみならず生物 情報学や機械学習など、科学の多くの分野で重要な タスクである。ユニタリチャネルの候補が挙げられ ており、与えられた未知のユニタリチャネルがそのど れかかを誤り確率を最小化して判別するタスクは、誤 り最小化チャネル判別 (minimum-error channel discrimination) と呼ばれ、高階量子演算の観点から活 発に研究がされてきた。その結果、2つのユニタリ チャネルの誤り最小化チャネル判別タスクにおいて は、最も単純なユニタリチャネルを並列に使う戦略 で最適な誤り最小化チャネル判別が実行できること が知られていた。

これに対して、本研究では、より一般のユニタリ チャネルを対象とした誤り最小化チャネル判別タス クにおいては、直列にユニタリチャネルを使用する戦 略が並列にユニタリチャネルを使用する戦略より優 位となり、直列戦略よりもさらに一般的な不定順序戦 略を用いると、より成功確率を上げることができるこ とを示した。一方、群を成すユニタリチャネルの集 合に対して一様分布しているユニタリチャネルを候 補として判別する場合には、並列戦略で最適成功確率 を出せることを証明した。また、量子スイッチをも とにした不定順序戦略では、ユニタリチャネル判別に おいて直列戦略での最大成功確率を超えることがで きないことも示した。これは、不定順序戦略の中で も成功確率を上げるのに有用なクラスとそうでない クラスが存在することを意味し、新たな発見である。 さらに、ユニタリチャネル判別タスクについて、何 回同じユニタリチャネルを使うことができる場合で あっても、どのような候補のユニタリチャンネルの集 合であっても、最大成功確率の上界を導出することに 成功した。この場合は k-design を構成するユニタリ チャネルの集合に飽和するため、得られた bound が タイトとなることが示される。本研究は、オースト リアの量子光学量子情報研究所 (IQOQI) の Jessica Bavaresco 氏と Marco Túlio Coelho Quintino 博士 との共同研究である。[担当:村尾]

高階量子演算の量子機械学習への応用

近年、量子計算の応用として量子機械学習が注目 されている。代表的なモデルとして量子深層学習や 量子カーネル法が提案されており、基本的な理解が 進んでいる。例えば、両者の定義には共通点として、 入力である古典情報を量子状態にエンコードするこ とが含まれるが、古典情報の入力を複数回行うこと で任意関数の近似埋め込みができる等の結果が知ら れている。このような研究の背景には、古典情報の エンコードを通して、量子チャンネルにいかに非線 形性を埋め込むかが課題であることが挙げられる。

量子深層学習や量子カーネル法での古典情報のエ ンコードは、量子回路モデルのパラメータ入力とし て行われる。この仕方は深層学習やカーネル法のア ナロジーに基づいており、非線形性を容易に導入で きるが、その定義の妥当性についてはあまり研究さ れてこなかった。そこで本研究では、より妥当な量 子機械学習モデルの探索、及び高階量子演算の適用可 否について検討を行った。その結果、量子カーネル 法について、量子状態へのエンコードは量子プロセス へのエンコードの特殊例であることが分かった。こ のことから量子カーネル法のカーネル関数として、量 子チャンネル間のダイヤモンド距離を提案した。一 方、量子深層学習については量子状態へのエンコー ドは、量子コムへのエンコードの特殊例とみなせる ことが分かった。その結果、量子ニューラルネット ワークが量子テスターに一般化できることを予想し た。[担当:田中、添田、村尾]

5.2.2 量子系のダイナミクスの制御

未知パラメータを持つスピン系のロバスト量子動力 学制御

一般的に量子ゲートは、ハミルトニアンダイナミク スに従って実装される。ハミルトニアンに未知パラ メータが含まれる場合であっても、その未知パラメー タに対してロバストな量子動力学制御が原理的に可 能であり、これをロバスト量子動力学制御という。 ロバスト量子動力学制御はパルス列を用いて実装す ることが可能で、GRAPE(GRadient Ascent Pulse Engineering) アルゴリズムという機械学習アルゴリ ズムによって探索することが可能である。本研究で は、将来の実験系や量子計算機でのロバスト量子動力 学制御の実現に向けて、不完全な状況下での GRAPE アルゴリズムを用いたロバスト量子動力学の有用性 について、数値計算で調べた。その結果、未知パラ メータが時間的に揺らぐ場合や、制御パルス列の時 間幅や強さが入力時に揺らぐ場合においても、ロバ スト量子動力学制御の有用性を確認することができ た。[担当:岡本、添田、村尾]

5.2.3 分散型量子情報処理

空間的に離れた地点にいる2者がそれぞれ量子コ ンピュータを持ち各量子コンピュータ内では任意の 量子計算が実行できるが、2者間ではエンタングルメ ント共有と局所的操作と古典通信 (local operations and classical communication, LOCC) しか実行でき ないという2者間での分散型量子情報処理の設定に おいて、効率よく2つの量子コンピュータにまたが る量子計算を実行する方法を考察した。このような タイプの分散型量子情報処理において量子計算を実 行する際に2者間で共有する必要のあるエンタング ルメントの量はエンタングルメントコストと呼ばれ る。エンタングルメントコストは、比較的簡単な古 典通信のコストを度外視する場合には、量子計算を 分散実装する際に二つの量子コンピュータ間で必要 な量子通信量を与える。そこで、ユニタリ変換で記 述される量子計算を分散実装する際にエンタングル メントコストをなるべく減らすための研究を行った。

二つの量子コンピュータにまたがる量子計算のエンタ ングルメントコストに関する効率的実装プロトコル

量子回路で記述される2量子コンピュータにまた がる量子計算 (ユニタリ変換) をできるだけ少ないエ ンタングルメントコストで分散実装する方法を考察 した。まず、二つの量子コンピュータにまたがる単 一の制御ユニタリ演算をエンタングルメントコスト に関して効率よく実装する Eisert らのプロトコルを 土台とし、必ずしも連続でない複数の制御ユニタリ 演算をまとめて分散実装することで、エンタングル メントコストを減らすことができる場合があること を発見した。そして、より一般的に量子回路の形で 与えられた量子計算について、エンタングルメントコ ストの少ない実装方法を見つけるするアルゴリズム を考案した。与えられた回路をグラフに帰着して考 えることで、前述の新しいプロトコルを量子回路内の 各制御ユニタリ演算に対してどのように適用すれば 良いかを効率的に計算することができる。本研究は イギリスの Cambridge Quantum Computing Ltd. および台湾 Tamkang University の Jun-yi Wu 教授 との共同研究である。[担当:松井、添田、村尾]

Clifford 演算の2者間分散実装におけるエンタング ルメントコスト

2者がそれぞれ量子コンピュータを持ち量子コン ピュータ内では任意の量子計算が実行できるが、2者 間ではエンタングルメント共有と局所的操作と古典 通信 (local operations and classical communication, LOCC) しか実行できないという2者間の分散型量子 情報処理の設定を考察した。そして、この設定の下で これらの2台の量子コンピュータ上で全量子ビット にわたる Clifford 演算を実行する際のエンタングル メントコストの解析を行なった。Clifford 演算は、演 算 Schmidt ランク (operator Schmidt rank) によっ てエンタングルメントコストが決まるということが 知られている。我々は、*n* 個の gudit (量子 *d* 準位系) の Clifford 演算の演算 Schmidt 係数が離散的な値し かとらず、また、演算 Schmidt 係数は全て同じで演 算 Schmidt ランク r の場合は 1/√r となることを示 した。この証明には、スタビライザー形式が用いら れ、与えられた Clifford 演算に対して、演算 Schmidt 係数と演算 Schmidt ランクを効率的に求める方法を 示した。[担当: Forrer、添田、村尾]

5.2.4 量子資源理論

量子資源の確率的変換

量子資源 (quantum resource) の決定論的操作は困 難であることが多いため、確率的に成功するプロト コルを用いる必要が生ずる場合が多いが、量子資源 の確率的変換可能性と限界の特性については未解明 な点が多かった。この問題に対して、どのような量 子資源理論の状態間においても決定論的および確率 的な変換を除外する、非常に強い単調性を満たすタイ プの新たな資源モノトーン (monotone) を導入する ことで一般的アプローチを構築した。このアプロー チにより、量子状態の変換における原理的な限界が 判明し、決定論的プロトコルに対する確率的なプロ トコルの優位性に制限を与えることができ、従来知 られていた事項を強化したり、近年発見された不可能 性定理 (No-go theorems) を拡張することができる。

この結果をエンタングルメント蒸留やマジック状 態蒸留などの凸最適化での計算が可能なタスクに応 用することで、確率的蒸留プロトコルにおけるエラー や追加コストの bound を格段に向上させることがで きた。さらに、広いクラスの資源においてモノトー ンが確率的変換可能性を完全に決定すること、すな わち、その単調性が状態間の変換可能性について必 要十分条件を与えるというより強い結果を示すこと ができた。この結果は、どのような確率的操作プロ トコルにおいても、資源蒸留タスクで達成可能な最 大フィデリティを正確に定量化できることを意味し、 本研究で提案されたモノトーンに直接的な操作論的 解釈を授けるものである。[担当: Regula]

一般量子資源理論における 1-shot yield-cost 関係

さまざまな量子資源の操作において直面する最も 基本的な問題は、蒸留(純粋化、すなわちノイズによ り劣化した量子資源をより純粋な資源やユニタリー 性を持つ資源に変換にすること)と、蒸留の逆のタ スクである希釈(純粋な資源やユニタリー性を持つ 資源からより一般的な状態や変換の資源を合成する こと)である。量子状態や量子チャネルの漸近論的 な蒸留によって得られる資源量は、その量子状態や 量子チャネルを合成する際の資源コストを超えない ということは非常に良く知られているが、非漸近的 な領域ではどのような関係が成り立つのかというこ とはこれまで良く知られていなかった。

そこで、1-shot での蒸留資源の生産量と希釈コス トの間の変換エラーに関する定量的な関係式を証明 した。得られた bound は、量子状態に関する資源 (エンタングルメント、量子熱力学など)や量子演 算に関する資源(量子通信など)など高階量子演算 を用いた量子チャネルの変換をも含む、非常に一般 的な量子資源の広汎な設定に対応する。さらに、資 源理論でよく扱われる twirling 写像の一般化となる 新たなクラスのチャネルを導入し、それらのクラス を資源の定量化と関連づけることによっていくつか のスムース化された資源測度を解析的に計算し、対 応する 1-shot の yield-cost 関係の bound を改良し た。そして、これらの研究で得られた操作論的な洞 察により、マジック状態に対する資源理論で用いられ るさまざまな資源状態の重要な測度を正確に評価し た。本研究は、シンガポール Nanyang Technological University の Ryuji Takagi 博士と米国の Louisiana State University の Mark M. Wilde 教授との共同研 究である。[担当: Regula]

<報文>

(原著論文)

- W. Yokojima, M.T. Quintino, A. Soeda and M. Murao, Consequences of preserving reversibility in quantum superchannels, Quantum 5, 441 (2021)
- [2] Q. Dong, M.T. Quintino, A. Soeda and M. Murao, Success-or-draw: A strategy allowing repeat-untilsuccess in quantum computation, Phys. Rev. Lett. 126, 150504 (2021)
- [3] A. Soeda, A. Shimbo and M. Murao, Optimal quantum discrimination of single-qubit unitary gates between two candidates, Phys. Rev. A 104, 022422 (2021)

- [4] J. Bavaresco, M. Murao and M.T. Quintino, Strict hierarchy between parallel, sequential, and indefinite-causal-order strategies for channel discrimination, Phys. Rev. Lett. **127**, 200504 (2021)
- [5] B. Regula, Probabilistic transformations of quantum resources, Phys. Rev. Lett. 128, 110505 (2022)
- [6] R. Takagi, B. Regula, and M. M. Wilde, One-shot yield-cost relations in general quantum resource theories, Phys. Rev. X Quantum 3, 010348 (2022)

(学位論文)

- [7] 橋本豊、Quantum learning: comparison of unknown unitary channels (量子学習:未知ユニタリチャンネ ルの比較)、修士論文
- [8] 松井浩介、Analysis of entanglement in distributed implementations of quantum algorithms (量子アル ゴリズムの分散実装におけるエンタングルメントの 解析)、修士論文

(著書)

[9] R. Sakai, A. Soeda and M. Murao, Transferring Quantum Information in Hybrid Quantum Systems Consisting of a Quantum System with Limited Control and a Quantum Computer, in Hybrid Quantum Systems, Springer Nature Singapore Pte Ltd., p.315-p.347 (2021)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] S. Yoshida, A. Soeda, and M. Murao, "Universal construction of decoders from unknown encoders", 21th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS 2021), online, Sep. 2021 (poster)
- [11] B. Regula, "Probabilistic transformations of quantum resources", Quantum Information Processing 2022, Pasadena, USA, Mar, 2022 (talk)
- [12] S. Yoshida, A. Soeda, and M. Murao, "Probabilistic exact implementation of an inverse map of black box isometry operations", 25th Annual Quantum Information Processing conference (QIP2022), Pasadena (USA), Mar. 2022 (poster)
- [13] T. Forrer, A. Soeda, and M. Murao, 'Entanglement Assisted LOCC Implementation of Bipartite Non-Local Unitary Operations", 25th Annual Quantum Information Processing conference (QIP2022), Pasadena (USA), Mar. 2022 (poster)
- [14] K. Matsui, W. Jun-Yi, A. Soeda, and M. Murao, "An algorithm for reducing entanglement cost required for distributed implementations of quantum circuits", 25th Annual Quantum Information Processing conference (QIP2022), Online, Mar. 2022 (poster)

- [15] Y. Hashimoto, A. Soeda, and M. Murao, 'Comparison of unknown unitary channels", 25th Annual Quantum Information Processing conference (QIP2022), Pasadena (USA), Mar. 2022 (poster)
- [16] S. Yoshida, A. Soeda, and M. Murao, "Universal construction of decoders from encoding black boxes", *YITP international workshop Quantum Information Entropy in Physics*, Kyoto (Japan) hybrid, Mar. 2022 (talk)

招待講演

[17] M. Murao, "Controlled quantum operations and combs, and their applications to universal controllization of divisible unitary operations", Second Kyoto Workshop on Quantum Information, Computation, and Foundation, online (Kyoto), Sep. 2021

(国内会議)

一般講演

- [18] 吉田智治, 添田彬仁, 村尾美緒, "高階量子演算におけ る因果順序の古典制御", 第 66 回物性若手夏の学校, online, Aug. 2021 (poster)
- [19] 吉田智治, 添田彬仁, 村尾美緒, "未知の量子操作を 反転する高階量子演算について", 2021 年度量子情報 関東・関西合同 Student Chapter, online, Sep. 2021 (poster)
- [20] 橋本豊, 添田彬仁, 村尾美緒, "未知ユニタリチャンネ ルの comparison", 2021 年度量子情報関東 Student Chapter, online, Sep. 2021 (poster)
- [21] 橋本豊, 添田彬仁, 村尾美緒, "未知ユニタリチャン ネルの comparison", 第 45 回量子情報技術研究会 (QIT45), online, Nov. 2021 (talk)
- [22] 吉田智治, 添田彬仁, 村尾美緒, "未知のエンコーダー を逆変換化するユニバーサルなプロトコル", 第 45 回量子情報技術研究会 (QIT45), online, Nov. 2021 (talk)

5.3 上田研究室

近年のナノサイエンスの発展により、原子や分子、 光子を量子1個のレベルで精密に測定し、制御する ことが可能になってきた。当研究室では、このよう な高い制御性を有する系での量子多体問題の解明と、 その基礎となるナノスケールの熱力学・統計力学の構 築を目指して理論研究を行っている。特に近年の中 心的テーマとなっているのは、冷却原子気体・非平衡 開放系の研究、および、量子論・統計力学と情報論・ 人工知能の融合である。レーザー冷却により絶対零 度近くまで冷却された原子系においては、高い制御 性のもとで、ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) などの巨視的量子現象や、固体物理、宇宙物理とも類 似した現象を創り出し、その普遍的性質と新しい量 子多体物理の可能性を探究することができる。私た ちは、環境への散逸や量子測定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起 え直し、物理と情報を融合させた新分野の構築を目 指す研究にも取り組んでいる。特に測定やフィード バック制御を行うもとでの情報の流れに着目し、熱 力学の第二法則や揺らぎの定理の一般化、波束収縮 のダイナミクス、測定結果からのハミルトニアン推 定などの研究を行っている。さらに、私たちは機械 学習や深層学習における情報処理のプロセスに注目 し、物理学の視点から AI や機械学習の理解に取り組 んでいる。

5.3.1 冷却原子気体·非平衡開放系

非エルミート系のトポロジカル場の理論

近年、非平衡開放系や強相関電子系において、非エ ルミートな有効ハミルトニアンによって記述される トポロジカル現象に大きな関心が集まっている。と くに、非エルミート系に固有のトポロジカル相と、そ れにともなって多数の局在状態が系の表面に現れる 表皮効果が、理論・実験の両面からさかんに研究さ れている。われわれは、非エルミート系のトポロジ カル相を普遍的なかたちで記述する有効場の理論を 構築した [3]。従来の場の理論の枠組みは、平衡系を 仮定しているので、散逸の存在が本質的となるよう な非平衡開放系においては、どのようにして場の理 論を定式化すればいいかが未解明であり、われわれ の場の理論のあたらしい定式化はそれに答えを与え るものである。また、得られた場の理論にもとづい て、散逸に誘起されたカイラル磁気効果など、あた らしい非平衡トポロジカル現象を具体的に予言した。 さらに、場の理論の観点では、表皮効果は非平衡開 放系に特有の量子異常(アノマリー)の帰結である ことも示した。

表皮効果の起こる開放量子系における緩和時間とス ペクトルギャップの間の新たな関係式

Markov な開放量子系の時間発展はリウビリアンと 呼ばれる超演算子で生成され、そのスペクトルギャッ プは固有モードの最も遅い指数減衰を特徴づけるこ とから定常状態に至る緩和時間の逆数に対応するこ とが多くの場合仮定される。しかし、我々はリウビ リアンが非エルミート演算子であることに注目し、定 常状態が系の一方の端に局在する「リウビリアン表 皮効果」が起こる系において、系の緩和時間をスペ クトルギャップ・局在長・システムサイズと結びつ ける新たな関係式を見出した [7]。この結果の導出に おいては、リウビリアンの局在した右固有モードと 左固有モードの重なりが指数関数的に小さくなるこ とから、初期状態を固有モードで展開したときの係 数が系のサイズに関して指数関数的に大きくなるこ とを利用する。特に、この新たな関係式は開放量子 系の緩和時間の発散が必ずしもスペクトルギャップ の消失を伴わないことを示し、開放量子系の緩和に は固有値スペクトルのみならず固有モードによる初 期状態の展開係数も重要であることを示している。

BCS 理論の開放量子多体系への拡張

冷却原子気体においては、非弾性衝突による原子 のロスがしばしば存在する。我々は、非弾性衝突に よる散逸を取り入れることにより BCS 理論を開放量 子多体系へと拡張し、散逸下のフェルミ超流動体の ダイナミクスを記述する平均場理論を構築した [6]。 通常、相互作用をクエンチした場合には超流動秩序 変数の振幅の集団モードが誘起されるが、今回構築 した平均場理論は、散逸のクエンチが相互作用クエ ンチとは「直交」した方向に作用し、秩序変数の位 相の集団モードを誘起することを予言する。このよ うな散逸誘起の集団位相モードは2つの超流動体を Josephson 結合させることにより Josephson 流から 観測可能である。さらに、印可する散逸の強さを大 きくしていくと、Josephson 流のダイナミクスは2つ の超流動体の位相が同期した領域から非同期した領 域へと転移する。これは、開放量子多体系における 非平衡相転移の新たな例を与える。

5.3.2 量子論・統計力学と情報理論・人工 知能の融合

収束性のある効率的な深層 Q ネットワークアルゴリ ズム

AI の深層強化学習は近年経験的には成功している が、AI 技術の不安定性とランダムネスの問題はこの 技術を現実の問題に適用するのを困難にするととも に、得られた結果の信頼性や整合性をしばしば揺る がす。この問題を解決するために、我々は収束性の ある深層 Q 学習アルゴリズムを開発し、物理におけ る制御問題の解法に安定的にかつ信頼のおける形で 適用できるようにした [10]。これはスケーラブルで かつ深層ニューラルネットワークで効率的に使用す ることができる初めての収束性のある強化学習アル ゴリズムである。我々の方法は、従来の深層 Q ネッ トワークアルゴリズムでは不安定性の問題のため困 難であった Atari 2600 ベンチマークの課題を解決す ることができた。また、我々はこの方法が量子4次 振動子の測定とフィードバック制御による冷却問題 に対してより安定的な結果を生成することも確かめ た。図 5.3.1 に示したように、従来の方法では数値実 験を繰り返すと不安定でゆらぐ結果が得られるのに 対し、我々の方法を用いると数値実験を何度繰り返 しても安定的に同様の結果が得られる。



図 5.3.1: 我々の収束性深層 Q ネットワーク(上図) と従来の方法(下図)による学習曲線。縦軸は 4 次 振動子のエネルギー、横軸は学習時間を表す。従来 の方法では学習曲線は非常にランダムな挙動を示す のに対し、我々の方法では異なる試行について学習 曲線が互いにコンシステントな結果を与える。

深層ネットワークを学習させる基礎理論

深層学習の基礎研究は二つに大別される。第一の 部分は RNN, CNN, GNN, GAN, BERT のような深 層ネットワークを開発して、その模型の性質を究明す ることである。第二の部分は深層ネットワークを学 習させる、即ち、訓練することである。この訓練部分 の核心となるアルゴリズムは確率的勾配降下法であ る。我々の研究によって示されたように、深層学習に 於ける確率的勾配降下法は簡単な数学モデルに簡約す ることで厳密に理解することができる [4, 11, 5, 12]。 この厳密な結果と、数値計算を併用することで、深 層ニューラルネットワークがどのように鞍点と局所 的な最小値から脱出できるかを明らかにした。また、 我々はこの研究に基づき、確率的勾配降下法のダイ ナミックスの中の揺らぎとノイズの厳密解を導出し、 深層学習における訓練の安定性についての理解を進 めた。確率的勾配降下法の揺らぎとニューラルネッ トワークの過剰パラメータとの関係も理解できるよ うになった。この過剰パラメータの部分は神経科学 にも類似な関係があり、現在活発に議論されている。 <受賞>

[1] 川畑幸平: 第12回育志賞、日本学術振興会、2022.1.20.

<報文>

(原著論文)

- [2] Yuto Ashida, Zongping Gong, and Masahito Ueda: Non-Hermitian physics, Adv. Phys. 69, 249 (2020).
- [3] Kohei Kawabata, Ken Shiozaki, and Shinsei Ryu: Topological Field Theory of Non-Hermitian Systems, Phys. Rev. Lett. **126**, 216405 (2021) [selected for Editors' Suggestion].
- [4] Kangqiao Liu*, Liu Ziyin*, and Masahito Ueda (*equal contribution): Noise and Fluctuation of Finite Learning Rate Stochastic Gradient Descent, Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning (ICML 2021), PMLR 139, 7045 (2021).
- [5] Zhang Zhiyi and Liu Ziyin: On the Distributional Properties of Adaptive Gradients, 37th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI 2021).
- [6] Kazuki Yamamoto, Masaya Nakagawa, Naoto Tsuji, Masahito Ueda, and Norio Kawakami: Collective Excitations and Nonequilibrium Phase Transition in Dissipative Fermionic Superfluids, Phys. Rev. Lett. **127**, 055301 (2021).
- [7] Taiki Haga, Masaya Nakagawa, Ryusuke Hamazaki, and Masahito Ueda: Liouvillian Skin Effect: Slowing Down of Relaxation Processes without Gap Closing, Phys. Rev. Lett. 127, 070402 (2021).
- [8] Yûto Murashita, Naoto Kura, and Masahito Ueda: Entropy production of a closed Hamiltonian system via the detailed fluctuation relation, Phys. Rev. Research 3, 033224 (2021).
- [9] Hongchao Li and Peng Ye: Renormalization group analysis on emergence of higher rank symmetry and higher moment conservation, Phys. Rev. Research 3, 043176 (2021).
- [10] Zhikang T. Wang and Masahito Ueda: A Convergent and Efficient Deep Q Network Algorithm, The International Conference on Learning Representations 2022 (ICLR 2022).
- [11] Liu Ziyin*, Kangqiao Liu*, Takashi Mori, and Masahito Ueda (*equal contribution): Strength of Minibatch Noise in SGD, The International Conference on Learning Representations 2022 (ICLR 2022) [Spotlight].
- [12] Liu Ziyin, Botao Li, James B. Simon, and Masahito Ueda: SGD May Never Escape Saddle Points, The International Conference on Learning Representations 2022 (ICLR 2022) [Spotlight].

(国内雑誌)

[13] 中川大也、辻直人、川上則雄、上田正仁:冷却原子気 体における開放量子多体系の物理、日本物理学会誌 第 77 巻 第 2 号 p.88-92 (2022).

(学位論文)

- [14] Kohei Kawabata: Universality of open systems: non-Hermiticity, topology, and localization (doctoral dissertation).
- [15] Yuki Sakamoto: Theoretical Study of an Evolutionary Game Model on a Network (master thesis).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [16] Masaya Nakagawa: Dissipative Hubbard model: magnetism, superfluid pairing, and exact solution, New Trends in Quantum Condensed Matter Theory, online conference organized by Institute for Solid State Physics, 2021.7.29.
- [17] Masahito Ueda: Nonequilibrium control of quantum many-body systems beyond the hermitian framework of quantum physics, KITP workshop on Transport and Efficient Energy Conversion in Quantum Systems, KAVLI Institute for Theoretical Physics, University of California, Santa Barbara, 2021.8.30.
- [18] Masahito Ueda: Out-of-time-order fluctuationdissipation theorem and universal bound on chaos, International workshop on Probing Complex Quantum Dynamics through Out-of-timeordered Correlators, Max Planck Gesellschaft, 2021.10.13.
- [19] Masahito Ueda: Beyond-Hermitian Quantum Physics, Physics department colloquium at St. Andrews, University of St. Andrews, 2021.10.15.
- [20] Masahito Ueda: Beyond-Hermitian Quantum Physics, 1st International Symposium on Trans Scale Quantum Science, online conference organized by The University of Tokyo, 2021.10.27.
- [21] Kohei Kawabata: Symmetry and Topology in Non-Hermitian Physics, Virtual seminar series on Pseudo-Hermitian Hamiltonians in Quantum Physics (PHHQP), 2021.12.9.
- [22] Masahito Ueda: Beyond Hermitian Quantum Physics, Quantum simulation of novel phenomena with ultracold atoms and molecules, online conference organized by HKUST IAS, 2021.12.13.

一般講演

[23] Kangqiao Liu: Thermodynamic Uncertainty Relations for Arbitrary Initial States, The Second Annual Workshop on Stochastic Thermodynamics (WOST II), Santa Fe Institute, online, 2021.5.17-21. (国内会議)

一般講演

- [24] 中川大也: Fermi-Hubbard 模型の厳密な超流動秩序 状態について、第3回冷却原子研究会「アトムの会」、 オンライン、2021.8.10.
- [25] 中川大也、桂法称、上田正仁: 多成分 Hubbard 模型における η ペアリング状態とエルゴード性の弱い破れ、日本物理学会第 77 回年次大会、オンライン、2022.3.15.
- [26] 杉本昇大、濱崎立資、上田正仁:長距離相互作用系に おける固有状態熱化仮説の妥当性、日本物理学会第 77 回年次大会、オンライン、2022.3.17.
- (セミナー)
- [27] 中川大也: 散逸 Hubbard 模型における磁性と超流 動ペアリング、online CMT seminar、オンライン、 2021.4.6.
- [28] Shoki Sugimoto: Thermalization of Isolated Quantum Systems and Its Typicality, Yagami Statistical Physics Seminar、オンライン、2022.1.11.

5.4 横山 (順)研究室

当研究室はビッグバン宇宙国際研究センターを本 拠として、一般相対性理論、場の量子論、素粒子物 理学等の基礎物理学理論に基づいて宇宙論と重力理 論の理論的研究を幅広く行うとともに、理学部物理 学教室の教育と研究に参画しています。また、大型 低温重力波検出器 KAGRA の本格稼働を迎え、ビッ グバン宇宙国際研究センターの Cannon 研究室とと もに重力波データ解析の研究と人材育成にも携わっ ています。横山はアジア太平洋物理学会連合の会長 を務めると共に、2021 年 9 月からは KAGRA 科学 会議議長を務めています。

5.4.1 宇宙論:時空構造

超弦理論と α -attractors

α-attractor は現在までの宇宙背景放射観測と矛盾 のないインフレーション模型である。比較的簡単な コンパクト化を仮定した超弦理論には、 α -attractor が必要とするモジュライ空間の幾何構造を持つスカ ラー場が7つ含まれている。我々は単一場によるイ ンフレーションを実現するために、余剰次元空間中 のフラックスによるポテンシャルを用いて余分な6 つのスカラー場を固定することを考えた [4,5,84]。 超弦理論の無矛盾条件と整合するフラックスの選び 方で6つの余分な場に質量を与えられることを示し た。また4次元有効理論において、固定されたスカ ラー場は実際に十分重くなることを示し、実行的に 単一場インフレーションを実現されうることを明ら かにした。超弦理論において α -attractorを完全に実 現するには至ってはいないが、この結果はその実現 可能性を支持するものになっている。

ローレンツ対称性と超対称性の破れ

超対称模型における加速膨張宇宙の実現には自発 的超対称性の破れが不可欠となるが、これまでは超対 称性を破る機構としてF-項または D-項が真空期待値 を獲得すること模型が考えられていた。我々は新し い超対称性の破れの機構としてベクトル場に真空期 待値を持たせることで超対称性とローレンツ対称性 を同時に破ることを提案した [6, 83]。この機構では ローレンツ対称性の破れと超対称性の破れのスケー ルの相関により、宇宙論的観測から超対称性の破れ のスケールが制限されることが分かり、現在までの 観測的制限から超対称粒子の典型的な質量は100TeV 程度を上限にもつことを示すことができた。この新 しい機構は今後の加速器実験のみならず、ローレン ツ対称性の破れに対する観測的制限から検証できる 興味深いものになっている。

単一場インフレーションが生成する曲率揺らぎの1 ループ補正

我々は、インフレーションが生成する曲率揺らぎの パワースペクトルの三点相互作用からの1ループの量 子補正を計算した。この補正はスケール不変なスペ クトルのもとでは発散量を与えるが、現実の宇宙のゆ らぎのスペクトル指数は1より小さく、大波数のゆら ぎが抑制されているため、物理的に意味のある大きな 有限値を与えることを見いだした。宇宙論的摂動論 が適用可能であるためには、ループ補正は最低次量よ りも十分小さくなければならないので、このことは非 ガウス性の大きさに対して現在の観測的制限より厳 しい上限を与えることを示した。 [7, 36, 43, 48, 65]。

パルサータイミングアレイ観測の宇宙論的意義

パルサータイミングアレイ観測の一つ NANOGrav チームは先頃、背景重力波に起因するかもしれない 有意な信号の存在を報告した。まだ重力波特有の角 度相関関数は観測されていないので、決着がつくに は暫く時間を要す見込みだが、この観測が示唆する 宇宙論的な意義についてさまざまな観点から検討を 加えた [8]。

真空相転移のローレンツ経路積分による考察

真空相転移はユークリッド化された時空での経路 積分により定式化されてきたが、終状態の曖昧さや 重力存在下での負モードの唯一性の破れといった問 題がある。そこで本研究では、実時間において真空 相転移の確率をローレンツ経路積分で直接定式化し、 鞍点法により評価することを試みた。その結果、重 力を背景時空として扱った場合、ローレンツ経路積 分による解析は、従来のユークリッド経路積分で予言 される相転移確率を再現した。さらに、ユークリッ ド経路積分では評価できなかった、典型的な大きさ とは異なる半径を持つ真空泡の生成についても、その生成確率を評価し、その解釈を与えた [28, 45, 44]。

5.4.2 宇宙論:物質の起源と進化

ヒッグス-R² 混合模型における再加熱機構

ヒッグス-*R*² 混合模型は観測から支持されるイン フレーション模型の一つである。さらにこの模型は、 ヒッグスインフレーションにおいて量子補正から*R*² 項が現れ、紫外カットオフスケールがプランクスケー ルに押し上げられることから、その自然な拡張と考え られている。我々のこれまでの研究により、特別な パラメータにおいてはタキオン不安定性により宇宙 の再加熱が瞬時に起こることが示されていたが、微調 整されない限り多くのパラメータにおいてはその不 安定性は不十分であるか全く現れないことがわかっ ていた。我々は、後者の場合インフラトン場の摂動 論的な崩壊によって再加熱過程が進行し、すべての エネルギーが標準模型粒子に移行されることを示し た。主要な崩壊率を評価し、再加熱期の長さと再加 熱温度のパラメータ依存性を調べた [9, 25, 31, 41]。

ストークス現象に着目した重力的粒子生成の解析

重力的粒子生成をストークス現象と呼ばれる数学 的現象として解析することにより、生成する粒子量 を解析的かつ実用的に計算する手法を提唱した。重 力的粒子生成は初期時刻と終時刻の真空状態が異な ることにより、初期状態では真空状態であっても終 状態においては粒子が存在するようになる現象のこ とである。これは数学的には2階微分方程式の2つ の基本解が混合することを意味し、ストークス現象 と呼ばれる現象に相当する。このストークス現象に ついて知られている定理を用いることにより、生成 する粒子量を解析的に評価する式を得た [10]。

プレヒーティングの再考

インフレーション後にインフラトン場と結合する 粒子が(非)摂動的な過程により真空から生成される 現象(プレヒーティング)において、二つの特定のパ ラメータ領域に異なる性質の共鳴現象が知られてい た。一つはインフラトン粒子の摂動的な散乱により 理解されるが、もう一つの共鳴はインフラトン粒子 との散乱という描像では理解できない非摂動的現象 であった。一方で真空からの粒子生成現象は数学的 にストークス現象として統一的に理解できる。我々 はストークス現象の観点からプレヒーティングを再 考し、さまざまなパラメータ領域の粒子生成現象が 共鳴現象も含めてストークス現象として統一的に記 述できることを示した[11, 73, 82]。 初期 *B*+*L* 対称性の存在下での右巻きニュートリノ の脱結合に伴うレプトン数生成

ある種のバリオン数生成機構においては、バリオ ン数とレプトン数の差 (*B* – *L*) はゼロで、和 (*B*+*L*) がゼロでない非対称が生成されるが、この非対称は 電弱スファレロンによって消されてしまい、妥当な 機構と考えられていなかった。我々は、いくつかの 粒子数の保存則が良い近似である高温な時期におい ては電弱スファレロンによる非対称の消滅が完成せ ず、完全な消滅は比較的遅い時期に起こることに注 目し、右巻きニュートリノの脱結合が *B*+*L* の消滅 より前に起これば、*B*+*L* 対称性を CP の破れの起 源として系に *B* – *L* 非対称が生じることを発見し た [12, 32, 49, 66]。この機構により、SU(5) 大統一 理論に基づく模型やアクシオンインフレーションに 基づく模型が現在の宇宙を説明しうるバリオン数生 成機構として復活することになる。

初期磁場によるバリオン等曲率揺らぎ生成

電弱対称性が破れる以前の初期宇宙における磁場 の存在を仮定すると、標準模型のカイラル量子異常 を通じて初期磁場の磁気へリシティが局所的な物質 反物質非対称を生じるため、一般にバリオン等曲率 揺らぎが生成する。これに対して、ビッグバン元素 合成の理論と観測された軽元素の存在量との整合性 から制限が得られる。結論として、電弱対称性が破 れる以前の磁場生成によって観測的に示唆されてい るボイド空間の銀河間磁場強度を説明することはで きないことを示した [13, 30, 34, 68, 70]。

動的なカイラルプラズマ中でのカイラル重力効果

U(1) ゲージ理論におけるカイラル量子異常に由来 したカイラル磁気効果は、宇宙論を含む物理学の様々 な分野において注目されている。この効果はカイラ ルなプラズマ中の異常電流を予言し、それが長波長の 磁場に不安定性を引き起こすため、例えば宇宙の初期 磁場の形成において重要な役割を担った可能性があ る。一方で、素粒子標準模型に存在する重力的カイラ ル量子異常に関連した言わば "カイラル重力効果" も 存在し、近年その研究が進められている。先行研究で はプラズマのカイラル非対称性が静的である場合の みが扱われていたが、本研究では宇宙論への応用を見 据え、カイラル非対称が動的に変化している状況を有 効場理論を用いて計算した。その結果、カイラル非対 称性の時間変化によって誘起されたエネルギー・運動 量テンソルによって、重力波の複屈折が起こることが 分かった。本研究成果は、原始プラズマ中における素 粒子の非自明なダイナミクスの痕跡が、重力波の偏光 非対称に保存されている可能性を初めて指摘したもの である [14, 27, 35, 47, 60, 61, 74, 75, 76, 77, 80, 81]。

初期磁場の時間発展

初期宇宙における磁場のダイナミクスは、磁気流体 の一様等方乱流として記述されるものと考えられる。 ところが、伝統的な"permanence of large eddies" すなわちエネルギースペクトルの長波長成分は時間 発展しないという仮定は、数値計算により誤りであ ることが示されている。このような不満足な点を修 正し、初期磁場の時間発展をより正しく記述する解 析的枠組みの完成を目指している [39]。

原始ブラックホール存在量の定式化に起因する不定性

原始ブラックホールの存在量を評価する場合に、 どういった定式化を用いるべきかという不定性の問 題があることが知られている。我々は、代表的なも のとして良く用いられる三種類の評価方法を対象と して、採用する定式化が異なることで最終的な原始 ブラックホールの存在量が何桁も変化を受けること を再確認し、また原始ブラックホール形成に要求さ れる初期揺らぎの大きさについても、特定の質量帯 においては *O*(1) 程度の差異が生じてしまうことを 明らかにした [38]。また、原始ブラックホールに関 する総説を発表した [15]。

条件付き確率を用いた原始ブラックホール存在量の 評価

原始ブラックホールの形成に要求される条件には いくつかの不定性があり、密度揺らぎのピーク条件 あるいは適切な半径を持った球内部の圧縮関数を用 いた条件が良く採用されている。本研究では、原始 ブラックホール存在量をより精密に評価することを 目的として、これらの条件を両方とも取り入れる条件 付き確率を用いた定式化を提唱した。この結果、最 終的な存在量は従来の見積もりと比べて、少なくとも 10 倍以上小さく評価されることが分かった [46, 64]。

アクシオン星の重力マイクロレンズ

アクシオンと呼ばれる非常に軽い擬スカラー粒子 は初期宇宙で大量に供給され、暗黒物質の一つの有 力な候補となっている。現在の宇宙において、アク シオンは重力の効果によって凝縮し、アクシオン星 と呼ばれる非常に重い星を形成する可能性が示唆さ れている。我々はさまざまな重力マイクロレンズの 観測結果を用いて、アクシオン星に対する重力マイ クロレンズの制限を、アクシオン星と光源の星の有 限サイズ効果を含めた上で導出した [16, 57, 67, 79]。

5.4.3 重力波検出器 KAGRA のデータ解 析

環境モニターを用いたオフライン解析による雑音除 去手法の開発

2020 年 4 月に初の本格稼働を実施した KAGRA であるが、現在は 2022 年 6 月以降開始予定の LIGO-Virgo との O4 共同観測に向けた改修作業中である。 重力波初検出を達成するためにはさらなる感度向上 を実現しなければならず、様々な雑音源に直接対策 を講じるとともに、オフラインデータ解析によりデー タから雑音を統計的に除去する手法の開発が重要で ある。本研究では、非ガウス分布に従う信号が混合 した際に分離・復元する処理手法である独立成分解 析 (ICA) に着目し、補助モニターを用いた雑音除去 手法の開発に取り組んだ。最新の KAGRA データと 環境モニターに対して、拡張した線形 ICA モデルを 適用することで、重力波の観測周波数帯域において 特に影響が顕著であった音響雑音 [17] の除去に成功 した [35, 47, 50, 51, 62]。今年度はさらに、非線形雑 音を除去する手法の実装に成功した [63]。

超軽量ダークマター探索

ゲージボゾンダークマターは、レーザー干渉計型 重力波望遠鏡を構成する懸架鏡に周期的な力を加え る。これによって生じる干渉縞の変化を、LIGO や Virgo、KAGRA といった地上の重力波望遠鏡を用い て調べることで、10⁻¹³ eV 程度の質量を持つ超軽量 ゲージボゾンダークマターの高感度な探索が可能と なる。特に、サファイア鏡を使っている大型低温重 力波望遠鏡 KAGRA では、干渉計の補助チャンネル を利用したユニークな探索が可能であり、10⁻¹³ eV 程度以下の質量を持つ *B* – *L*ゲージボゾンを、これ までの上限値を1桁以上上回る感度での探索が可能 である。ダークマター探索に向けた解析パイプライ ンを開発し、2020 年に行われた KAGRA の最初の 観測運転からのデータを用いた解析を現在行なって いる [22, 29, 42, 62]。

KAGRA 全著者論文, LVK 論文

KAGRA プロジェクトの認定著者として横山、粂、 上野は全著者論文の著者に名を連ねている [18, 19, 20, 21]。また、LIGO, Virgo と KAGRA は協定を結 んでいるため、第三観測期の論文は LVK 論文として KAGRA の認定著者は著者になっている。後者につ いては掲載を省略する。

5.4.4 時間領域天文学

TriCCS カメラによる多バンド高速撮像

近年、可視領域において非常に高い時間分解能で の観測が可能な装置が登場している。このような装 置による観測には、マルチメッセンジャー天文学の一 翼を担うこととともに、短い時間スケールで変動する 天体現象に対する理解の進展への寄与が期待される。 京都大学せいめい望遠鏡にとりつけられた TriCCS もその一つであり、3バンドでの同時撮像が秒以下 の時間分解能で可能である。2021 年度に本格運用を 開始した TriCCS の試験観測に参加し、系外惑星の トランジットをターゲットに毎秒約 10 フレームの観 測をg、r、zの3バンドで2時間同時撮像し、装置 の性能評価等を行なった [59]。

<受賞>

- [1] 粂 潤哉, 2021 年年次大会 日本物理学会学生優秀発表 賞 宇宙線・宇宙物理領域, 2021/3/31.
- [2] 粂 潤哉, 2021 年秋季大会 日本物理学会学生優秀発表 賞 宇宙線・宇宙物理領域, 2021/10/9.
- [3] Jun'ya Kume, JGRG WORKSHOP 2021 OUT-STANDING PRESENTATION AWARD GOLD PRIZE, 2021/12/10.

<報文>

(原著論文)

- [4] R. Kallosh, A. Linde, T. Wrase and Y. Yamada, "Sequestered Inflation," Fortschritte der Physik 69, no.11-12, 2100128 (2021).
- [5] R. Kallosh, A. Linde, T. Wrase and Y. Yamada, "IIB String Theory and Sequestered Inflation," Fortschritte der Physik 69, no.11-12, 2100127 (2021).
- [6] Y. Yamada, "Aether SUSY breaking: can aether be alternative to F-term SUSY breaking?," Journal of High Energy Physics 08, 048 (2021).
- [7] J. Kristiano and J. Yokoyama, "Why Must Primordial Non-Gaussianity Be Very Small?", Physical Review Letters 128, 061301 (2022).
- [8] J. Yokoyama, "Implication of pulsar timing array experiments on cosmological gravitational wave detection," AAPPS Bulletin **31**, no.1, 17 (2021).
- [9] M. He, "Perturbative Reheating in the Mixed Higgs- R^2 Model," Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **05**, 021 (2021).
- [10] S. Hashiba and Y. Yamada, "Stokes phenomenon and gravitational particle production – How to evaluate it in practice," Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 05, 022 (2021).
- [11] Y. Yamada, "Superadiabatic basis in cosmological particle production: application to preheating," Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 09, 009 (2021).

- [12] V. Domcke, K. Kamada, K. Mukaida, K. Schmitz, and M. Yamada, "Wash-In Leptogenesis", Physical Review Letters **126**, 201802 (2021).
- [13] K. Kamada, F. Uchida, and J. Yokoyama, "Baryon isocurvature constraints on the primordial hypermagnetic fields", Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 04, 034 (2021).
- [14] K. Kamada, J. Kume and Y. Yamada, "Chiral gravitational effect in time-dependent backgrounds", Journal of High Energy Physics 05, 292 (2021).
- [15] B.J. Carr, K. Kohri, Y. Sendouda, and J. Yokoyama, "Constraints on primordial black holes," Rept. Prog. Phys. 84, no.11, 116902 (2021).
- [16] K. Fujikura, M. P. Hertzberg, E. D. Schiappacasse and M. Yamaguchi, "Microlensing constraints on axion stars including finite lens and source size effects", Physical Review D 104, 123012 (2021).
- [17] T. Washimi, T. Yokozawa, T. Tanaka, Y. Itoh, J. Kume and J. Yokoyama: "Method for environmental noise estimation via injection tests for ground-based gravitational wave detectors", Class. Quant. Grav. 38, no.12, 125005 (2021).
- [18] KAGRA collaboration, "Vibration isolation systems for the beam splitter and signal recycling mirrors of the KAGRA gravitational wave detector" Classical and Quantum Gravity, 38 065011 (2021).
- [19] KAGRA collaboration, "Overview of KAGRA: Detector design and construction history" Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2021 05A101 (2021).
- [20] KAGRA collaboration, "Overview of KAGRA: Calibration, detector characterization, physical environmental monitors, and the geophysics interferometer" Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2021 05A102 (2021).
- [21] KAGRA collaboration, "Overview of KAGRA: KAGRA science" Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2021 05A103 (2021).

(会議抄録)

[22] Y. Michimura, T. Fujita, J. Kume, S. Morisaki, K. Nagano, H. Nakatsuka, A. Nishizawa and I. Obata, "Ultralight dark matter searches with KAGRA gravitational wave telescope," J. Phys. Conf. Ser. **2156** (2021) no.1, 012071.

(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 第 60-84 回 上毛新聞社。

(学位論文)

[24] Jason Kristiano, "Theoretical bound on primordial non-Gaussianity in single-field inflation" (修士論 文).

- [25] Minxi He, "Origin of Big Bang in Mixed Higgs-R² Inflation Model" (博士論文).
- [26] 羽柴聡一朗、"Quantum Effects in the Expanding Universe and Their Cosmological Consequences"(博士論文).

(著書)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [27] J. Kume, "Chiral gravitational effect in primordial thermal plasma", 26th International Symposium on Particles, Strings & Cosmology (PASCOS 2021), Online, 2021/6/14.
- [28] T. Hayashi, "Vacuum decay in de-Sitter spacetime with the Lorentzian path integral", 26th International Symposium on Particles, Strings & Cosmology (PASCOS 2021), Online, 2021/06/14.
- [29] J. Kume, "Ultralight vector dark matter search using KAGRA", 16th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs, Online, 2021/6/14.
- [30] F. Uchida, "Constraints on primordial magnetic fields from baryon isocurvature perturbations", 26th International Symposium on Particles, Strings & Cosmology (PASCOS 2021), Online, 2021/06/17.
- [31] M. He, "Reheating in the mixed Higgs-R² inflation model", 26th International Symposium on Particles, Strings & Cosmology (PASCOS 2021), Online, 2021/06/18.
- [32] K. Kamada, "Wash-in Leptogenesis as a New Framework for Baryogenesis", 26th International Symposium on Particles, Strings & Cosmology (PASCOS 2021), Online, 2021/06/18.
- [33] K. Fujikura, "Electroweak-like Baryogenesis with New Chiral Matter", 26th International Symposium on Particles, Strings & Cosmology (PASCOS 2021), Online, 2021/6/18.
- [34] F. Uchida, "Baryon isocurvature constraints on the primordial magnetic fields", COSMO21, Online, 2021/8/5.
- [35] J. Kume, "Chiral gravitational effect in the primordial plasma" (poster), COSMO'21, Online, 2021/8/2-6
- [36] J, Kristiano, "Theoretical bound on primordial non-Gaussianity in single-field inflation" (poster), COSMO'21, Online, 2021/8/2-6.
- [37] K. Fujikura, "Electroweak-like Baryogenesis with New Chiral Matter" (poster), COSMO'21, Online, 2021/8/2-6.
- [38] K. Tokeshi, "Systematic biases on primordial black hole mass function", RESCEU summer school, Online, 2021/08/18.

- [39] F. Uchida, "Dynamics of the magnetized plasma in the early universe", RESCEU Summer School, Online, 2021/8/18.
- [40] K. Fujikura, "Generation of FIMP dark matter and baryon asymmetry in quintessential inflation with right-handed neutrinos", RESCEU Summer School, Online, 2021/8/19.
- [41] M. He, "Perturbative Reheating after Mixed Higgs- R^2 Inflation", RESCEU summer school, Online, 2021/08/20.
- [42] J. Kume, "Ultralight Vector Dark Matter search with KAGRA", Workshop on Very Light Dark Matter 2021, Online, 2021/9/28.
- [43] J. Kristiano, "Theoretical bound on primordial non-Gaussianity in single-field inflation", Recent Progress of Quantum Cosmology (YITP Workshop), Kyoto University, Japan, Online, 2021/11/8.
- [44] T. Hayashi, "Vacuum decay with the Lorentzian path integral", KIAS-YITP Joint Workshop 2021 String Theory and Quantum Gravity, Online, 2021/11/30.
- [45] T. Hayashi, "Vacuum decay with the Lorentzian path integral" (poster), The 30th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG30), Online, 2021/12/6-10.
- [46] K. Tokeshi, "Primordial black hole abundance from joint formation criteria" (poster), The 30th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG30), Online, 2021/12/6-10.
- [47] J. Kume, "Gravitational birefringence in the primordial chiral plasma", The 30th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG30), Online, 2021/12/6.
- [48] J. Kristiano, "Theoretical bound on primordial non-Gaussianity in single-field inflation", The 30th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG30), Online, 2021/12/9.
- [49] K. Kamada, "Wash-in Leptogenesis and its application", The 30th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG30), Online, 2021/12/10.
- [50] J. Kume, "Towards offline noise subtraction from the O3GK data", The 28th KAGRA Face-to-Face meeting, Online, 2021/12/21.
- [51] J. Kume, "Noise reduction strategies in mid frequencies", The 28th KAGRA Face-to-Face meeting, Online, 2021/12/21.

招待講演

[52] J. Yokoyama, "Modified gravity in cosmology and gravitational wave physics," Cosmology and Quantum Space Time (CQUeST 2021), Sogan University, Korea, Online 2021/8/6

- [53] J. Yokoyama, "Quantum aspects of inflationary cosmology," 1st international symposium on transscale quantum science, Trans-scale quantum science institute, The University of Tokyo, online 2021/10/29
- [54] J. Yokoyama, "Quantum correction to the inflationary power spectrum," 4th LeCosPA symposium, National Taiwan University, online 2021/12/3
- [55] J. Yokoyama, "Inflationary cosmology: its quantum nature," International Conference on Frontier of Physics (ICFP)-2022 Nepal Physical Society, online 2022/1/23
- [56] J. Yokoyama, "Quest for the smallness of the primordial non-Gaussianity," Theoretical Physics at CQUeST: Past, Present, and Future, Sogan University, Korea, online 2022/2/10
- [57] K. Fujikura, "Microlensing constraints on axion stars including finite lens and source size effects", Kagoshima Workshop on Quantum Aspects of Gravitation, face to face, Kagoshima, Japan, 2022/1/5.

(国内会議)

一般講演

- [58] 横山順一 "Generation of neutrino dark matter, baryon asymmetry, and radiation after quintessential inflation"新学術地下宇宙領域研究会 オンライ ン 2021/5/20
- [59] 直川史寛, "TriCCS カメラによる系外惑星多バンド 高速撮像", 2021 年度せいめいユーザーズミーティン グ, Online, 2021/8/11-2021/8/12.
- [60] 粂潤哉,"宇宙論におけるカイラル重力効果",素粒子 物理学の進展 2021, オンライン開催, 2021/9/9.
- [61] 粂潤哉, "初期宇宙におけるカイラル重力効果", 日本物 理学会 2020 年秋季大会, オンライン開催, 2021/9/14.
- [62] 粂潤哉, "重力波検出器 KAGRA を用いた超軽量ダー クマター探索", 第 6 回宇宙素粒子若手の会 秋の研 究会, 東京大学宇宙線研究所 (オンラインとのハイブ リッド開催), 2021/11/5.
- [63] 粂潤哉 on behalf of the KAGRA collaboration, " 独立成分解析による KAGRA データの非線形雑音除 去",日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年),オン ライン開催, 2022/3/16.
- [64] 渡慶次孝気, "揺らぎの二点相関を取り入れた原始ブ ラックホール存在量の評価", 日本物理学会第 77 回年 次大会 (2022 年), オンライン開催, 2022/3/17.
- [65] Jason Kristiano, "Theoretical bound on primordial non-Gaussianity in single-field inflation",日本物理学会第77回年次大会 (2022年),オンライン開催, 2022/3/17.
- [66] Kohei Kamada, "Wash-in Leptogenesis and its realization", 日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年), オンライン開催, 2022/3/17.

[67] 藤倉浩平, "Microlensing constraints on axion stars including finite lens and source size effects", 日本 物理学会第 77 回年次大会 (2022 年), オンライン開 催, 2021/3/17.

招待講演

- [68] 鎌田耕平," Primordial magnetic fields and baryogenesis at the electroweak crossover", 新ヒッグス 勉強会第 30 回定例会, オンライン開催, 2021/7/17.
- [69] 藤倉浩平, "EW-like Baryogenesis with New Chiral Matter",新ヒッグス勉強会第 31 回定例会 2022 年 春季大会 (対面),大阪大学, 2021/11/27.
- [70] 鎌田耕平,"初期磁場と素粒子的宇宙論",第 34 回理 論懇シンポジウム、オンライン開催, 2021/12/24.
- [71] 横山順一 「原始ブラックホール」 素粒子と重力波 研究会 南部陽一郎物理学研究所 大阪市立大学 オンライン 2022/2/22
- [72] 横山順一 「宇宙論と重力波」 日本物理学会第 77 回年次大会 (2022 年) 宇宙論的重力波シンポジウム オンライン 2022/3/18

(セミナー)

- [73] Y. Yamada, "Gravitational particle production as Stokes phenomena", Waseda University (Online), 2021/04/27.
- [74] J. Kume, "The role of chiral gravitational anomaly in cosmology", KEK theory seminar, Online, 2021/5/25.
- [75] J. Kume, "Chiral gravitational effect in the early universe", High energy physics group seminar, Keio University (Online), 2021/5/28.
- [76] J. Kume, "Chiral gravitational effect in cosmology", Hadron Theory Group Seminar, University of Tokyo (Online), 2021/7/2.
- [77] 粂潤哉, "宇宙論におけるカイラル重力効果", 波場研究 室セミナー (島根大学), オンライン開催, 2021/9/21.
- [78] K. Kamada, "Primordial magnetic field and its impact on the baryon asymmetry of the Universe", 富山大学理論物理学研究室セミナー, オンライン開催, 2021/9/30.
- [79] 藤倉浩平, "Microlensing constraints on axion stars including finite lens and source size effects", 神戸 大学 (対面), 2021/11/18.
- [80] J. Kume, "Chiral Gravitational Effect: gravitational birefringence in chiral plasma", Cosmology Group seminar, Waseda University (Online), 2021/11/19.
- [81] J. Kume, "Phenomenology of chiral gravitational anomaly; Gravitational Leptogenesis and Chiral Gravitational Effect", Theoretical Particle & Cosmological Physics Group seminar, Hokkaido University (Online), 2021/12/3.
- [82] Y. Yamada, "Cosmological particle production as Stokes phenomena", RIKEN iTHEMS NEW (Online), 2021/12/15.

- [83] Y. Yamada, "'Aether supersymmetry breaking", KEK theory group (Online), 2021/12/21.
- [84] Y. Yamada, " α -attractors and string theory", Waseda University (Online), 2022/01/07.

(アウトリーチ)

- [85] 鎌田耕平, "消えた反物質の謎/またはなぜ宇宙に物質 は残ったのか?",東京大学理学部オープンキャンパス 2021, ライブ講演会, 2021/7/10.
- [86] Jason Kristiano, "宇宙はじめの凸凹(でこぼこ)は なぜ対称に作られたか?", プレスリリース, 東京大 学大学院理学系研究科, 2022/2/10.

6 一般物理実験

6.1 江尻研究室

江尻研究室では、核融合発電の実現を目標に磁場 閉じこめ型トーラスプラズマの研究を行っている。 柏キャンパスに設置された TST-2 装置を用いた球状 トカマクプラズマの基礎研究を行うと共に、量子科 学技術研究開発機構の JT-60SA 装置、核融合科学研 究所の LHD 装置、京都大学の LATE 装置、九州大 学の QUEST 装置を対象とした共同研究を進めてお り、海外との共同研究も実施している。

6.1.1 TST-2 実験の概要

TST-2 は球状トカマク (ST) 型の装置であり、プ ラズマの主半径、小半径はおよそ 0.36、0.23 m、電磁 誘導、高周波波動を用いた最大プラズマ電流はそれぞ れ 120、27 kA である。ST は高い規格化圧力を安定 に維持できる方式として魅力的である一方、プラズマ 電流の立ち上げ維持は解決すべき課題である。TST-2 では、主として低域混成波 (Lower-Hybrid Wave, LHW)を用いて高速電子を生成し、それによる電流 駆動の研究を行っている。2021年度は、高周波輸送 モデルを改良し、その結果、LHW は、電流を駆動 するだけでなく、粒子バランスに大きな影響を与え ることがわかった。また、外側スクレイプオフ領域 に金属ターゲットを挿入し、高速電子が存在するこ とが確認され、逆方向に走る高速電子の存在が示唆 された。新たな 2.45 GHz での LHW 励起源として、 フィンラインアンテナを用いたアンテナを製作し実 験を行っているが、今年度はフィーダー部を改善し た上側入射アンテナを製作した。LHW は3波結合 であるパラメトリック崩壊不安定性を引き起こすが、 従来観測されていた不安定性とは別のタイプの3波 結合が観測され、現在、その同定を行うための実験を 準備している。LHW 維持プラズマではイオン加熱 が観測されるが、パワー変調実験から、古典的な電 子衝突による加熱では説明できないことが定量的に 示され、不安定性によるイオン加熱を仮説とした実 験を開始した。また、EC 補助オーミック立ち上げの 実験とそれを説明するためのモデルの構築、非等方 電子温度計測のためのダブルパストムソン散乱シス テムの開発、内部磁場測定用偏光計の開発を行った。



図 6.1.1: 規格化小半径に対する電流密度分布。点線:外側赤道面入射、3 点鎖線:オフミッドプレーン 入射、実線:同時入射。

6.1.2 非誘導高周波駆動プラズマ

静電結合型進行波アンテナを用いて、200 MHz の LHW 入射によるプラズマ電流駆動実験を行った。プ ラズマの外側と上側に設置された 2 台のアンテナを 用いることで、外側、上側及び下側模擬の 3 種類の 入射方法による電流駆動実験を行い、これまでに従 来法の誘導放電に比べて 1/4 程度(27 kA)のプラ ズマ電流を達成している。

新オフミッドプレーン入射アンテナ開発

光線追跡によると LHW を外側赤道面から入射し た場合、プラズマ中心部では波の位相速度が大きす ぎて熱電子と相互作用せず、電流を駆動できない。 上側から入射した場合は、そもそも屈折により波が プラズマ中心部に到達しない。そのため、外側入射、 上側入射共にごく周辺部での電流駆動になっており、 電流駆動効率が制限される要因になっていると考え られている。そこで、よりプラズマ中心部で電流を 駆動できる入射シナリオを検討した。その結果、赤 道面上側 (オフミッドプレーン) から屈折率 n_l ~ 13 の波を励起することで外側赤道面入射の波数スペク トルと熱電子分布とのギャップを埋めることができ ることがわかった。この外側赤道面とオフミッドプ レーンの同時入射による相乗効果で電流駆動効率が 改善することが期待される(図 6.1.1)。この予測を 実験的に検証するため、オフミッドプレーンアンテ ナの設計を行なった。回路シミュレータ LTspice と 有限要素解析ソフト COMSOL を用いて、 $n_{\parallel} \sim 13$ の 波を励起できるアンテナの設計と最適化を行なった。 設計したアンテナの透過率は90%、反射率は10%と なった。

固体ターゲットを用いた硬 X 線計測

TST-2 で近年提案された RF 駆動輸送モデルによ ると、低域混成波(LHW)により生成される豊富な 高速電子がスクレイプオフ層に存在すると予想され る。これらの高速電子は装置壁やリミターに衝突し、 硬 X 線を発生させるので、コアプラズマからの硬 X 線測定を汚染する可能性がある。そこで、スクレイ プオフ層の高速電子の存在量や特性を調べるために、 固体ターゲットを用いた硬 X 線測定を行った。

固体ターゲットとして、ステンレス製の板を TST-2の外側の装置壁に設置した。主半径方向の位置およびポロイダル面内で走査できる導入機構を用いた。 測定には、LYSO シンチレータ、光電子増倍管、増幅回路からなるシステムを使用し、硬 X 線ピークの 波高解析によりそれぞれの X 線のエネルギーを求め スペクトルを測定した。

LHW によって維持されたプラズマの実験におい て、固体ターゲットに当たった高速電子からの硬 X 線がプラズマパラメータにほとんど影響を与えるこ となく確認された。固体ターゲットの主半径位置を 変化させた測定により、硬 X 線フラックスが挿入長 に比例すると考えると、高速電子はスクレイプオフ 層におよそ一様に存在していることが分かった(図 6.1.2)。これは壁に向かって密度が減少するバルク 電子とは異なる振る舞いであり、RF 駆動輸送モデル による予想と整合性の取れたものである。高速電子 のエネルギーフラックスは1 MW/m² 程度と評価さ れたが、これはプラズマ電流の値から単純に予測さ れる値より十分小さく、高速電子の多くは上側リミ ターで失われると考えられる。



図 6.1.2: 硬 X 線フラックスの固体ターゲット挿入長 依存性。

また、固体ターゲットを回転させた実験により、プ ラズマ電流を担う向きとは逆向きの高速電子の存在 が示唆された。これは、LHW による直接の駆動、あ るいは高速電子がリミターに衝突する際の後方散乱 によって生成される可能性が考えられる。

これらの実験と解析により、線積分ではない点で の測定を可能とする、固体ターゲットを用いた硬 X この他、コアプラズマからの硬 X 線のみを測定す るために、視線内に壁やリミターを含まない垂直視 線の硬 X 線計測システムが設計された。しかし、測 定された硬 X 線は壁から由来するものが支配的と考 えられ、更なる調査と開発が必要である。

ドップラー分光によるイオン温度計測

イオン温度は可視分光器を用いて測定しているが、 10 eV ほどで径方向にブロードな分布をしているこ とがわかっている。LHW のパワー変調実験を行い、 それに伴うイオン温度の応答を調べた。LHW のパ ワーを切ると光量、温度ともに減少することが確認 され、周辺部のほうが早く温度が下がった。中心部 は 4 ms ほど高い温度を維持していた。周辺部の緩 和時間は 1 ms ほどであったが、これより推定される 閉じ込め時間を用いると、定常状態では電子との衝 突加熱よりも数十倍大きな加熱パワーが必要である ことが分かった。パワーが 0 の状態からパワーを入 れた直後の時間変化を見ると、周辺部では温度上昇 が計測されたが中心部では計測されなかった。この ことから、加熱はプラズマの周辺で起こっているこ とが示唆された。

6.1.3 中心ソレノイド駆動プラズマ

軌道平均運動論コードによるブレークダウン成否の 推定

電子サイクロトロン加熱 (ECH: Electron Cyclotron Heating) 補助オーミック立ち上げにおけるブレーク ダウンの成否を推定するため、軌道平均運動論コード を作成した。TST-2の捕捉粒子配位 (TPC: Trapped Particle Configuration) において、リミタからの電 子損失と中性粒子のイオン化による電子利得を含め た大域的な電子輸送を計算した。全電子数の増減に よってブレークダウンの成否を推定したところ、垂 直磁場、中性ガス圧、周回電圧、ECH 電力を変化さ せた時の依存性は実験結果と一致した (図 6.1.3)。特 に ECH 電力を増加させるとブレークダウンが起こ りにくくなるのは、ECH による準線形拡散項が増加 し、リミタからの損失が大きくなることが原因と分 かった。

6.1.4 計測器開発

ダブルパストムソン散乱計測

TST-2 でのトムソン散乱測定用にダブルパス構成 を開発した。概略図を図 6.1.4 に示す。前方(赤)と 後方(橙)の両方のビームの焦点をプラズマ内部に 調整した。低 YAG レーザー出力(~1 W)でのダブ ルパス・ラマン散乱計測を行なった結果、前方ビー



図 6.1.3: 垂直磁場 0.7 mT、周回電圧なしの条件に おけるブレークダウン成否の入射 ECH 電力、中性 ガス圧依存性。(a) シミュレーション結果、(b) 実験 結果。青丸はブレークダウン成功、赤アスタリスク は失敗を表す。

ムと同等の後方ビーム散乱強度を確認できた。また、 後方ビームがレーザーに戻らないことを確認できた。 ダブルパス構成を用いて、TST-2のLHW プラズマ の電子温度異方性を計測する予定である。

電流計測用磁気プローブ

プラズマ中の電流分布を測定するために、挿入型 の磁気プローブを新たに設計している。磁場のトロ イダル成分と垂直成分を赤道面の5地点で測定する 予定である。一般にオーミックプラズマの電流分布 は中心ピークであるが、TST-2において、低域混成 波で非誘導的に立ち上げられたプラズマの電流分布 は周辺部でピークしていると考えられている。本計 測ではこれをプラズマの内部電流分布を実際に計測 することで確かめることを目指す。



図 6.1.4: ダブルパストムソン散乱計測の概略図。

内部磁場計測のための偏光計

低域混成波による効率的な電流駆動シナリオを設 計するには数値計算が必須であるが、その妥当性検証 にはプラズマ内部磁場分布計測が有効である。そこ で、プラズマの内部磁場を直接計測可能なマイクロ波 偏光計を開発している。プローブ光としては27 GHz の回転直線偏光を用い、直線偏光電力を計測するこ とで、ファラデー回転を変調信号の位相として検出 する。本年度はポロイダル方向視線の測定系で測定 を行なった。対象となるプラズマにおいて予測され る位相の計測値は~5°程度であるが、測定では~15° 程度のノイズが存在したため、電流分布の推定はで きなかった。その原因を追求するため、より偏光計 測の容易な接線視線光学系を設計・製作している。

6.1.5 共同研究

QUEST におけるトムソン散乱計測

九州大学との共同研究として、QUEST プラズマ の電子密度電子温度分布計測を目的としたトムソン 散乱計測システムを運用するとともに、高性能化を 行っている。また、2020年度より、トムソン散乱測定 の稼働日、稼働率の向上を図るために、体制の強化、 データ取得の自動化、解析プログラムの簡素化、VPN を用いた遠隔実験参加の試験、遠隔アライメントの 準備を行った。これにより、2021 年度の稼働日が大 幅に増加し、31日となった。さらに、高密度、大体積 CHI (同軸ヘリシティ入射) プラズマが QUEST にお いて生成できるようになり、その分布測定に成功し た。この時の密度は6×10¹⁹ m⁻³となった。QUEST で観測された放電洗浄プラズマの測定を初めて行っ た。また、測定位置間隔を短くするために、ファイ バー及び、ファイバーホルダーを新しいものに交換 し、測定領域を現在のプラズマに適したものに変更 した。

ENN との共同研究

ENN との共同研究で、電流駆動用 2.45 GHz 低域 混成波を EXL-50 球状トカマク装置で励起するため、 新たに金属コルゲート表面を用いる「フィンラインア ンテナ」を開発している。コルゲート表面には、真空 中では電場と伝搬方向の同じ縦波が伝送される。ア ンテナ前面にプラズマが存在する場合、低域混成波 に結合する。2021年度はフィーダー部を改善した上 側入射用フィンラインアンテナを製作した。磁気プ ローブを用いたベンチテストにより、設計通りの電 場分布が励起されていることが確認できた。

<報文>

(原著論文)

- T. Tokuzawa, K. Tanaka, T. Tsujimura, S. Kubo, M. Emoto, S. Inagaki, K. Ida, M. Yoshinuma, K.Y. Watanabe, H. Tsuchiya, A. Ejiri, T. Saito, K. Yamamoto, and LHD Experiment Group: "A W-band millimeter-wave back-scattering system for high wavenumber turbulence measurements in LHD," Rev. Sci. Instrum. **92**, 043536 (2021).
- [2] Y. Ko, N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, O. Watanabe, H. Yamazaki, K. Iwasaki, Y. Peng, J.H.P. Rice, Y. Osawa, T. Wakatsuki, M. Yoshida and H. Urano: "Optimization of Poloidal Field Configuration for Electron Cyclotron Wave Assisted Low Voltage Ohmic Start-Up in TST-2," Plasma and Fusion Res. 16, 1402056 (2021).
- [3] S. Kojima, K. Hanada, H. Idei, T. Onchi, R. Ikezoe, Y. Nagashima, M. Hasegawa, K. Kuroda, K. Nakamura, A. Higashijima, T. Nagata, S. Kawasaki, S. Shimabukuro, H. Elserafy, M. Fukuyama, A. Ejiri, T. Shikama, N. Yoneda, R. Yoneda, T. Kariya, Y. Takase, S. Murakami, N. Bertelli and M. Ono: "Observation of second harmonic electron cyclotron resonance heating and current-drive transition during non-inductive plasma start-up experiment in QUEST," Plasma Physics and Controlled Fusion **63**, 105002 (2021).
- [4] A. Ejiri, M. Hirata, M. Ichiura, M. Yoshikawa, R. Ikezoe and S. Kamio: "Development of a Fast Visible Light Measurement System for the Study of Ion Cyclotron Range of Frequency Waves in GAMMA 10/PDX Plasmas," Plasma and Fusion Research 16, 1402096 (2021).
- [5] N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, O. Watanabe, H. Yamazaki, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Aoi, Y. Ko, K. Matsuzaki, J.H.P. Rice, Y. Osawa, C.P. Moeller, Y. Yoshimura: "Modification of the magneto-hydrodynamic equilibrium by the lower-hybrid wave driven fast electrons on the TST-2 spherical tokamak," Nuclear Fusion **61**, 116047 (2021).
- [6] Y. Takase, A. Ejiri, T. Fujita, K. Hanada, H. Idei, M. Nagata, T. Onchi, Y. Ono, H. Tanaka, N. Tsujii, M. Uchida, K. Yasuda, H. Kasahara, S. Murakami, Y. Takeiri, YTodo, S. Tsuji-Iio and Y. Kamada: "Overview of coordinated spherical tokamak research in Japan," Nuclear Fusion 62, 042011 (2022).

- [7] Y. Kamada and E. Di Pietro and M. Hanada and P. Barabaschi and S. Ide and S. Davis and M. Yoshida and G. Giruzzi and C. Sozzi and the JT-60SA Integrated Project Team: "Completion of JT-60SA construction and contribution to ITER," Nuclear Fusion 62, 042002 (2022).
- [8] M. Yoshida et al.: "Plasma physics and control studies planned in JT-60SA for ITER and DEMO operations and risk mitigation," Plasma Physics and Controlled Fusion 64, 054004 (2022).
- [9] O. Watanabe, Y. Ko, N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, K. Shinohara, Y. Peng, K. Iwasaki, I. Yamada, G. Yatomi, C.P. Moeller and Y.-K.M. Peng: "Design of a finline antenna for current drive in TST-2," Fusion Engineering and Design **178**, 113094 (2022).

(学位論文)

- [10] 山田巌:「TST-2 球状トカマクプラズマの立ち上げ実 験における誘導電場と電子サイクロトロン波加熱の 相乗効果の数値解析」
- [11] 弥富豪: "Hard X-ray measurement in the scrape off layer using a solid target in the TST-2 spherical tokamak"

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [12] Y. Takase, A. Ejiri, T. Fujita, K. Hanada, H. Idei, M. Nagata, T. Onchi, Y. Ono, H. Tanaka, N. Tsujii, M. Uchida, K. Yasuda, Y. Kamada, H. Kasahara, S. Murakami, Y. Takeiri, Y. Todo, S. Tsujilio: "Overview of Coordinated Spherical Tokamak Research in Japan", 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020), Online, May 10–15, 2021.
- [13] A. Ejiri, H. Yamazaki, Y. Takase, N. Tsujii, O. Watanabe, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Aoi, Y. Ko, K. Matsuzaki, J.H.P. Rice, Y. Osawa, C.P. Moeller, Y. Yoshimura, H. Kasahara, K. Saito, T. Seki and S. Kamio: "Energy, momentum and particle balances of electrons in lower hybrid wave sustained plasmas on the TST-2 spherical tokamak", 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020), Online, May 10–15, 2021.
- [14] N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, O. Watanabe, H. Yamazaki, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Aoi, Y. Ko, K. Matsuzaki, J.H.P. Rice, Y. Osawa, C.P. Moeller and Y. Yoshimura: "Modification of the Magneto-Hydro-Dynamic Equilibrium by the Lower-Hybrid Wave Driven Fast Electrons on the TST-2 Spherical Tokamak," 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020), Online, May 10–15, 2021.
- [15] H. Takahashi, K. Mukai, T. Kobayashi, S. Murakami, H. Nakano, K. Nagaoka, S. Ohdachi, M. Yoshinuma, K. Ida, R. Yanai, Y. Yoshimura, T.-I.

Tsujimura, K. Tanaka, M. Nakata, H. Yamaguchi, R. Seki, M. Yokoyama, T. Oishi, Y. Kawamoto, M. Goto, T. Seki, K. Saito, H. Kasahara, S. Kamio, Y. Suzuki, R. Sakamoto, G. Motojima, M. Kobayashi, I. Yamada, R. Yasuhara, H. Funaba, K. Ogawa, M. Isobe, T. Tokuzawa, A. Ejiri, M. Osakabe, T. Morisaki, Y. Takeiri and the LHD experiment group: "Performance Integration of High Temperature Plasmas in the LHD deuterium operation," 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020), Online, May 10–15, 2021.

- [16] T. onchi, H. Idei, M. Fukuyama, D. Ogata, T. Kariya, A. Ejiri, K. Matsuzaki, Y. Osawa, Y. Peng, R. Ashid, S. Kojima, K. Kuroda, M. Hasegawa, R. Ikezoe, T. Ido, K. Hanada, A. Higashijima, T. Nagata, S. Shimabukuro, I. Niiya, K. Nakamura, N. Bertelli, M. Ono, Y. Takase, A. Fukuyama, S. Murakami: "Plasma current ramp-up with 28 GHz second harmonic electron cyclotron wave in the QUEST spherical tokamak," 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020), Online, May 10–15, 2021.
- [17] G. Yatomi, A. Ejiri , N. Tsujii , K. Shinohara, O. Watanabe, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Ko, Y. Lin, I. Yamada, T. Hidano , Y. Shirasawa , R. Tsubata , Y. Takase, H. Yamazaki: "HXR measurement of the scrape off layer using a target plate in TST-2," 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Online, Nov. 16–19, 2021.
- [18] O. Watanabe, Y. Ko, N. Tsujii , Y. Peng, G. Yatomi, I. Yamada, K. Iwasaki, Y. Shirasawa , T. Hidano , R. Tsubata , K. Shinohara, A. Ejiri , Y. Takase, C. P. Moeller, Y-K M Peng and ENN team: The first experiment of a finline antenna for lower hybrid wave current drive, 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Online, Nov. 16–19, 2021.
- [19] I. Yamada, N. Tsujii, A. Ejiri, K. Shinohara, O. Watanabe, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Ko and G. Yatomi: "Finite element modeling of electron transport for electron cyclotron wave assisted tokamak start-up," 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Online, Nov. 16– 19, 2021.
- [20] H. Takahashi, M. Motojima, R. Seki, M. Kobayashi, T. Kobayashi, K. Mukai, K. Ida, M. Yoshinuma, H. Nakano, Y. Yoshimura, M. Goto, T. Oishi, Y. Kawamoto, T. Kawate, I. Yamada, H. Funaba, K. Ogawa, S. Murakami, A. Ejiri, M. Osakabe, T. Morisaki, Y. Takeiri: "Performance Integration and Optimization of High Temperature Plasmas in the LHD," 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, Online, Nov. 16–19, 2021.
- [21] A. Ejiri and TST-2 team: "Plasma current startup by using the lower hybrid wave and its modeling on TST-2," 10th Workshop on RF start-up and sustainment in ST, online, Feb 2–4, 2022.

- [22] Y. Ko, N, Tsujii, A. Ejiri, O. Watanabe, K. Shinohara, K. IwasakiY. Peng, Y. Lin, I. Yamada, G. Yatomi, Y. Shirasawa, T. Hidano, Y. Tian: "Development of a capacitively coupled combline antenna for off-midplane launch of lower-hybrid waves in TST-2," 10th Workshop on RF start-up and sustainment in ST, online, Feb 2–4, 2022.
- [23] N. Tsujii, Y. Ko, O. Watanabe, A. Ejiri, K. Shinohara, Y. Peng, K. Iwasaki, Y. Ko, Y. Lin, G. Yatomi and I. Yamada: "Lower-hybrid start-up experiments on TST-2," Korea-Japan Workshop on Physics and Technology of Heating and Current Drive, Online, Feb 21–22, 2022.

招待講演

[24] A. Ejiri: "R & D for nuclear fusion reactors/High temperature plasma as a complex system," A3F-CNS Summer School 2021, Online, August 16–20, 2021.

(国内会議)

一般講演

- [25] 江尻晶, 辻井直人, 篠原孝司, 渡邉理, 彭翊, 岩崎光太郎, 高竜太, 林彧廷, 弥富豪, 山田巌, 白澤唯汰, 飛田野太一, 津幡倫平, 吉村泰夫, 高瀬雄一: 「TST-2 における低域混成波電流立ち上げ実験とモデリング」, 日本物理学会 2021 年秋季大会, オンライン, 2021 年9月 20–23 日.
- [26] 高竜太, 辻井直人, 江尻晶, 渡邉理, 篠原孝司, 岩崎光 太郎, Peng Yi, 山田巌, 弥富豪, 白澤唯汰, 飛田野太 一: 「2 系統低域混成波の相乗効果による電流駆動最 適化」, 日本物理学会 2021 年秋季大会, オンライン, 2021 年 9 月 20-23 日.
- [27] 江尻晶,平田真史,市村真,吉川正志,池添竜也,神尾 修治:「GAMMA 10/PDX プラズマ中の ICRF 波動 研究のための高速可視発光計測システムの開発」,日 本物理学会 2021 年秋季大会,オンライン, 2021 年 9 月 20-23 日.
- [28] 辻井直人:「LH 電流駆動シミュレーション」,第 38 回プラズマ・核融合学会年会,オンライン,2021年 11月 22-25日.
- [29] 江尻晶, 辻井直人, 弥富豪, 渡邉理, 篠原孝司, 彭翊, 岩崎光太郎, 高竜太, 林彧廷, 山田巌, 白澤唯汰, 津 幡倫平, 飛田野太一, 高瀬雄一, 吉村泰夫:「TST-2 における低域混成波実験」, 第 38 回プラズマ・核融 合学会年会, オンライン, 2021 年 11 月 22–25 日.
- [30] 白澤唯汰,辻井直人,江尻晶,篠原孝司,渡邉理,彭 翊,岩崎光太郎,高竜太,林彧廷,弥富豪,山田巌, 津幡倫平,飛田野太一:「TST-2 における偏光法を 用いた内部磁場分布の計測」,第 38 回プラズマ・核 融合学会年会,オンライン,2021 年 11 月 22–25 日.
- [31] 江尻晶, 辻井直人, 篠原孝司, 渡邉理, 彭翊, 岩崎光 太郎, 高竜太, 林彧廷, 弥富豪, 山田巌, 白澤唯汰, 飛田野太一, 津幡倫平, 田一鳴, 吉村泰夫, 高瀬雄一: 「TST-2 における低域混成波電流立ち上げ実験とモデ リング」, 日本物理学会第 77 回年次大会, オンライ ン, 2022 年 3 月 15–19 日.

6.2 山本研究室

6.2.1 はじめに

【星・惑星系形成】

恒星および惑星系の形成は、宇宙における最も基本 的な構造形成過程の1つであるとともに、我々の太 陽系の起源、生命の起源に直結するテーマでもある。 そのため、観測・理論両面から活発な研究が行われ ている。本研究室では、特に太陽系近傍における星・ 惑星系形成とそこでの物質進化を、電波観測によっ て研究している。

新しい星は、星間ガスが自己重力で収縮して形成 される。星間ガスの集まり(星間雲)の中で最も密 度が高いものが星間分子雲で、新しい恒星と惑星系 が形成される現場である。星間分子雲の主成分は水 素分子であるが、様々な原子・分子も僅かに存在し ている。これまでの研究で、それらの組成は星間分 子雲の物理進化の歴史を克明に記憶していることが わかってきた。即ち、微量分子の組成から、現在の 物理状態だけでなく、「過去」を辿ることができる。 本研究室では、このような物質的視点を軸に、星・惑 星系形成過程を多面的に研究している。

【なぜ電波か】

星間分子雲の温度はおよそ 10 K 程度である。この 「宇宙の中でも最も低温の天体」は、最もエネルギー の低い電磁波である「電波」を主に放射する。しか も、電波は光などに比べて星間物質による吸収散乱 を受けにくく、透過力が高い。そのため、星間分子 雲の奥深くで起こる星形成の核心部分を見通すこと ができる。また、電波領域には原子・分子のスペク トル線が多数存在し、それらの観測で星間分子雲の 運動や分子組成がわかる。

【ALMA(アルマ)による観測】

ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) は、日本、北米、欧州の共同で、チリの標高 5000 m のアタカマ高原に建設された、12 m アンテ ナ 54 台と 7 m アンテナ 12 台からなる巨大電波干渉 計である。我々のグループはこれを積極的に活用し 研究を進めている。ALMA は他の同様の観測装置よ りも 2 桁高い感度と解像度を実現し、星・惑星系形 成の理解を大いに進展させつつある。

6.2.2 星·惑星系形成

原始星円盤から原始惑星系円盤への物質進化の理 解は、近年急速に進みつつある。その重要な結果の 一つは、低質量星近傍の分子組成が天体ごとに顕著 に違うことがわかった点である。その一つの典型は、 HCOOCH₃ などの大型飽和有機分子が原始星近傍の 100 AU 程度の領域に豊富に見られる天体で、ホット コリノ天体と呼ばれる(へびつかい座の IRAS16293– 2422 など)。もう一つの典型は、炭素鎖分子などの不 飽和有機分子が異常に豊富な天体(おうし座の L1527、 おおかみ座の IRAS15398–3359) で、WCCC (Warm Carbon-Chain Chemistry) 天体と呼ばれる。また、 WCCC 天体でありながら内部にホットコリノを含む ハイブリッド天体も見出されている。このような分 子組成の違いの原因は、母体となる分子雲の収縮時 間の違いによると考えられ、星形成研究においても 注目され始めている。

さらに重要なことは、このような分子組成の違い がどのように惑星系へ伝播されるかである。この点 についても、ALMA を用いた本研究室の研究により 理解が大きく進みつつある。角運動量を保ちつつ回 転落下するガスは、遠心力バリア(近日点)より内 側には入り込めないため、その近傍で後から落下す るガスと衝突して弱い降着衝撃波が発生する。その 様子が実際に ALMA で捉えられつつある。さらに 遠心力バリア近傍を境として、ガスの分子組成が劇 的に変化することが明らかになってきている。この ことを利用すると、分子組成を特定の物理状態をハ イライトする「マーカー」として利用できる。これ らの成果は、原始惑星系円盤への物質進化を理解す る上で非常に重要な一歩であり、これらの点を中心 に、星・惑星系形成に関する幅広い研究を展開して いる。

星間分子雲から惑星系への物質進化



 \boxtimes 6.2.5: A schematic illustration of our goal

特に、2018年に、本研究グループが中心(山本が PI)となり、仏、伊、独、米などの研究者と共同し て提案していた、FAUST(Fifty AU STudy of the chemistry in the disk/envelope system of Solar-like protostars)という ALMA 大型観測プログラムが採 択され、観測が進行中である。FAUST は 13 個の太 陽型原始星に対して、同一の感度、同一の実空間分 解能(50 au)、および同一の分子輝線で観測するこ とにより、それらの物理構造と化学組成の特徴の全 貌を明らかにしようとするものである。系統的に観 測を遂行することにより、星・惑星系形成における 物理・化学進化の全容を明らかにできると期待され る。

ALMA による観測では、膨大な分子スペクトル線 データが得られるが、これまではその中から適切な ものを選んで解析を行ってきている。しかし、これ では ALMA による観測能力を十分活かしきってい ないばかりか、スペクトル線の選択や結果の議論に 恣意性が入り込む余地がある。そこで、スペクトル 線分布の空間(2次元)および速度(1次元)情報を 先入観なく比較・分類するために、機械学習の方法 を本格的に取り入れている。

6.2.3 観測成果

【IRAS 16293–2422 Source A の円盤内部構造に おける有機分子分布】

へびつかい座にある IRAS 16293-2422 は、Class 0 の低質量原始星連星である。連星系を成す Source A 自体も非常に近接した連星系または多重星系である (図 6.2.6)。この天体は、複雑な飽和有機分子に富む 化学的特徴を持ち、代表的な hot corino 天体として 知られる。我々は、このような連星系 (多重星系)形 成における分子分布の特徴を明らかにするために、 ALMA を用いた高解像分子輝線観測を実施した。

波長3 mm 帯で 30 au を切る高解像度観測を行なった結果、メタノール (CH₃OH, CH₂DOH)、エタノール (C₂H₅OH)、エチレングリコール ((CH₂OH)₂) について、それぞれ複数の分子輝線を検出した。これら4種の分子種のいずれもが北東-南西にかけた速度勾配を示し、従来知られていたガスの回転運動を捉えることがわかった。これらの有機分子輝線の強度は、原始星 A1 の位置よりも A2 の位置で弱い傾向が見られた。このことは、分子の柱密度、励起状態、光学的厚みの影響が 2 つの原始星に付随するガスの間で異なっていることを示唆する。

この天体は、原始星 A1 に付随する星周円盤 (半径 < 50 au) と、その外側で Source A 全体を取り巻く circummultiple 構造の、少なくとも 2 つの回転ガス 構造をもつ (Oya et al. 2020)。これらの物理構造と 対応して、有機分子の分布に違いが見られた。メタ ノール分子の比較的低励起の輝線は星周円盤よりも 広がって検出され、高励起輝線および同位体種の輝 線は星周円盤で検出された。エチレングリコール分 子の輝線は原始星 A2 から半径 40 au 以内のコンパ クトな領域に集中する傾向が見られた。反対に、エ タノール分子の一部の輝線は、星周円盤の外縁で検 出され、この位置での物理構造の遷移との関連が示 唆される。

【低質量原始星天体 Elias 29 での温度構造の解析】 低質量原始星天体 Elias 29 は、へびつかい座にあ る比較的進化の進んだ Class I 天体である。我々は ALMA を用いた大型プロジェクト FAUST の一部と して、Elias 29 に対する分子輝線観測を実施した。波 長 1.3 mm で、SO 分子の輝線を 2 本検出した。これ らの分子輝線の強度は、分子の回転温度を反映してい る。このことを利用して、輝線強度の比の分布を解析 することで、ガスの温度分布を調べた。図 6.2.7 は、2 本の輝線から得られた SO 分子の回転温度の分布を表 す。原始星の近傍で回転温度が高く、ガスの温度が高 くなっていると解釈できる。これは、原始星からの輻 射によってガスが温められているためと考えられる。 加えて、原始星から離れた二つの位置でも、回転温度



⊠ 6.2.6: Integrated intensity maps of complex organic molecules in IRAS 16293–2422 Source A. (a)Color image of dust continuum emission at the wavelength of 3 mm. (b-d) Contours represent the integrated intensity map of CH₃OH. (b) CH₃OH and CH₂DOH are detected in the circumstellar disk around A1. (c) C₂H₅OH is detected in the outer rim of the disk. (d) (CH₂OH)₂ is concentrated in the inner disk.

が高くなっている様子が見られた。原始星の東側に ある回転温度が高い位置 (図 6.2.7 中の Bow shock) では、SO 分子輝線の強度が大きく、また、ガスの速度 分散が大きいことがわかった。原始星の南側にはガス が局在して分布する ridge 成分があり、その一部でガ スの温度が高くなっていることがわかった (図 6.2.7 中の Interaction region)。この位置では、HCO⁺ 分 子の重水素化物の比の値 (DCO⁺/H¹³CO⁺) が低く なっている様子が見られる。これらの結果はいずれ も、この位置でガスの温度が局所的に上がっている ことを示唆する。この位置は、ridge 成分とアウトフ ロー構造が天球面上で交差する位置にあたる。これ らの結果から、上記の二つの位置では、原始星から 噴き出したガス (ジェット/アウトフロー) が衝突し、 ガスの温度が高くなっていると考えられる。

【温度分布が示す Accretion shock の兆候:低質量 原始星天体 B335】

B335 は、Class 0 低質量原始星 IRAS 19347+0727 を 付随する孤立した天体である。原始星周り数 100-数 1000 au のスケールで不飽和炭素鎖分子 (WCCC)、数 10 au で飽和有機分子 (COMs) が豊富であるハイブ リッドな化学組成の特徴を持つ。この天体において、 3 au 程度の高分解能観測を行い、原始星周り数 10 au スケールに 32 本の分子輝線を検出した。それらの分 子分布を主成分分析 (PCA) で調べた結果、NH₂CHO と t-HCOOH は、CH₃OH と CH₂DOH の分布に比 ベ原始星に集中した分布を持つことがわかった。こ の分布の違いを活かして、温度分布を調べたところ、



 \boxtimes 6.2.7: Distribution of the Rotation temperature of SO in the low-mass protostellar source Elias 29

半径 6 au で降着衝撃波の兆候を見出した。上記 4 つ の分子輝線から見積もった温度は、原始星から離れ るにつれて一度下がり、再び上昇する様子を示した (図 6.2.8)。原始星からの放射のみではこの描像を説 明することができない。外側の温度上昇を引き起こ す最も有力なメカニズムとして、降着するガスと原 始星周りのガスとの衝突によって引き起される衝撃 波による加熱を提案した。一方、エンベロープの外 側において、温度が氷マントルの蒸発する 100 K 以 上であるにもかかわらず t-HCOOH と NH₂CHO が 検出されなかった。この結果は、これらの分子が単 にダストの氷マントルからの蒸発だけでは説明でき ないことを示す。



 \boxtimes 6.2.8: Schematic illustration of the disk/envelope system. The temperature of the region in red is higher than that in blue. Accretion shock by an infalling gas raises the temperature of the outer part.

【円盤/エンベロープ構造の3次元力学モデル】 原始星に付随する円盤/エンベロープ構造を成すガ スの速度構造は、ケプラー回転円盤と回転しながら 落下するエンベロープガスの二つに大別される (図 これらの速度構造をもつガス円盤の3次元モ $6.2.9)_{\circ}$ デルを構築した¹。このモデルを用いて作成した3次 元の擬似観測データと、ALMA による実際の分子輝 線観測データを比較2することで、原始星質量や天体 の傾き角などのパラメータが制限される。また、擬似 観測データを教師データとして、機械学習/深層学習 による解析を適用することで、観測された速度構造の 判別を行う手法を開発している。深層学習の一種で ある 3DCNN (3-Dimensional Convolutional Neural Network; 3次元畳み込みニューラルネットワーク) を用いて、速度構造 (図 6.2.9b, c) を判別する学習器 を作成した。2種類の速度構造について、パラメー タの異なる擬似観測データを 209 個ずつ作成し、そ の内138個ずつを学習・検証用データ、71個ずつを汎 化性能のテスト用データとして、学習を行った。そ の結果、計142個のテスト用擬似観測データはすべ て正しく判別された。この学習器を、低質量原始星 天体 IRAS 16293–2422 Source A での ALMA 観測 データに適用したところ、18 本の分子輝線の速度構造 はいずれもケプラー回転として判別された。この結 果は、機械学習の一種である SVM (Support Vector Machine) による判別結果と必ずしも一致しない。こ のことは、観測された分子輝線データが単一の速度 構造で説明されないことを示唆する。また、学習器 によって着目される特徴量が異なることが、判別結 果に影響していると考えられる。このため、学習器 の改良と適用方法を考慮することで、観測データが 持つ情報を従来とは異なる視点から捉えられること が期待される。

【速度構造も含めた 3 次元データに対する Principal Component Analysis (PCA): 低質量原始星天体 L483】

L483 は、Class 0 低質量原始星であり、原始星周り 数 100-数 1000 au のスケールで不飽和炭素鎖分子 (WCCC)、数10 au で飽和有機分子 (COMs) が豊富で あるハイブリッドな化学組成の特徴を持つ。ALMA で観測したところ、円盤・エンベロープ構造におい て 23 種類の分子輝線を検出した。これらの化学組 成分布の特徴を一つずつ目で見て判断するのは困難 である。そこで我々は、無バイアスの解析手法とし て、主成分分析 (PCA) を導入し、その有効性を示し た。分子輝線データは2次元分布に加え、速度構造 も重要である。3次元のデータに対する PCA によっ て、観測データを余すことなく活用し、化学組成分 布の特徴を先入観なく分類した。その結果、酸素を 含む分子と窒素を含む分子の分布の違いを系統的に 示した (図 6.2.10)。いくつかの窒素を含む分子は酸 素を含む分子に比べ、PC2 が大きい傾向にあり、原 始星周りに集中した分布を示す。特に、窒素を含む 分子である NH₂CHO と HNCO はよく似た分布を示 し、高速度成分を持つことがわかった。これらの分 子は、惑星系でも検出され、分子の化学過程を調べ る上でも重要視される。3次元 PCA は、今後膨大な 観測データの新たな手法として期待され、上で述べ た B335 の解析においても活用した。

¹https://github.com/YokoOya/FERIA

²https://github.com/YokoOya/cubechi2





<報文>

(原著論文)

- Shibayama, Y., Watanabe,Y., Oya, Y., Sakai, N., Lopez-Sepulcre, A., Liu, S.-Y., Su, Y.-N., Zhang, Y., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., "Exploring the 100 au Scale Structure of the Protobinary System NGC 2264 CMM3 with ALMA", ApJ, 918, 32 (2021).
- [2] Oya, Y., Watanabe, Y., López-Sepulcre, A., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Favre, C., and Yamamoto, S., "Rotating Motion of the Outflow of IRAS 16293-2422 A1 at Its Origin Point Near the Protostar", ApJ, 921, 12 (2021).
- [3] Okoda, Y., Oya, Y., Abe, S., Komaki, A., and Yamamoto, S., "Molecular Distributions of the Disk/Envelope System of L483: Principal Component Analysis for the Image Cube Data", ApJ, 923, 168 (2021).
- [4] Ohashi, S., Codella, C., Sakai, N., Chandler, C.J., et al., "Misaligned Rotations of the Envelope, Outflow, and Disks in the Multiple Protostellar System of VLA 1623-2417: FAUST. III", ApJ, 927, 54 (2022).

(総説)

[5] 大屋瑶子、大小田結貴、「若い低質量原始星天体の円 盤構造における有機分子化学の観測研究」, 天文月報 「アストロケミストリー」特集, 4 月号, 2022 年



 \boxtimes 6.2.10: Biplot of the contributions for the principal components in PCA-3D for each molecular line distribution on the PC1-PC2 plane. Different distributions between O-bearing complex organic molecules (COMs) and N-bering ones can be seen in this plot.

(学位論文)

- [6] 大小田結貴、「Physics and Chemistry in the Beginning of Low-Mass Star Formation (最初期形成過程 における低質量原始星天体の物理・化学構造)」(博士 論文)
- [7] 雑賀恵理、「Class I 原始星 Elias 29 のアウトフロー およびその周辺環境との相互作用 (The Outflow of the Class I Protostar Elias 29 and Its Interaction with the Environment)」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [8] Yoko Oya, "Chemical Differentiation and its Relation with the Physical Structures in Disk-Forming Regions of Young Low-Mass Protostellar Sources", Workshop on Interstellar Matter 2021, November 2021, Online
- [9] Yuki Okoda, Yoko Oya, Muneaki Imai, Nami Sakai, Yoshimasa Watanabe, Ana López-Sepulcre, and Satoshi Yamamoto, "Compact Distributions of N-bearing species and HCOOH in the Protostellar Source B335", Workshop on Interstellar Matter 2021, November 2021, Online

[10] Yoko Oya, "Rotation Motion in Circummultiple Structure, Circumstellar Disk, and Outflow: the IRAS 16293-2422 Source A Case", East Asia ALMA Science Workshop 2022, January 2022, Online

招待講演

- [11] Yoko Oya, "Chemical Differentiation and its Relation with the Physical Structures in Disk-Forming Regions of Young Low-Mass Protostellar Sources", Astrochemical Frontiers 2021 Quarantine Edition 2, September 2021, Online (keynote talk)
- [12] Satoshi Yamamoto, "FAUST", East Asia ALMA Science Workshop 2022, January, Online
- [13] Yoko Oya, "Unbiased Analyses of 3-Dimensional Molecular Line Data with Unsupervised/Supervised Machine Learnings", East Asia ALMA Development Workshop 2022, March 2022, Online

(国内会議)

一般講演

- 【天文学会 2021 年秋季年会、オンライン開催、2021 年9月】
- [14] Eri Saiga, Yoko Oya, Anna Miotello, Cecilia Ceccarelli, Claudio Codella, Claire Chandler, Nami Sakai, Satoshi Yamamoto, and FAUST Team Members, "ALMA View of Molecular Outflow in Elias 29", P131a
- [15] Yoko Oya, Muneaki Imai, Brian Svoboda, Hauyu Baobab Liu, Cecilia Ceccarelli, Claire Chandler, Claudio Codella, Nami Sakai, Satoshi Yamamoto, and FAUST team members, "Chemical and Physical Characterization of the Isolated Source CB68", P134a
- [16] 大小田結貴, 大屋瑶子, 今井宗明 (東京大学), 坂井南美 (理化学研究所), 渡邉祥正 (芝浦工業大学), AnaL ′ opez-Sepulcre (IPAG), 山本智 (東京大学), 「B335 における原始星近傍 10 au スケールの化学組成分布 と速度構造」、P135a
- [17] Yuki Okoda, Yoko Oya, Logan Francis, Doug Johnstone, Shu-ichiro Inutsuka, Satoshi Yamamoto, and FAUST team members, "Hot Corino Activity in IRAS 15398 - 3359 at a 50 au Scale", P150a

【天文学会 2022 年春季年会、オンライン開催、2022 年3月】

- [18] 大屋瑶子、矢口公貴、李維遠、山本智、「IRAS 16293
 2422 Source A の星周円盤における複雑な飽和有 機分子の分布」、P151a
- [19] Eri Saiga, Yoko Oya, Anna Miotello, Cecilia Ceccarelli, Claudio Codella, Claire Chandler, Nami Sakai, Satoshi Yamamoto, and FAUST Team Members, "Temperature structure of the Class I protostar Elias 29 and its environment", P154a

【その他の国内講演】

[20] 大屋瑶子、「円盤形成初期にある連星系 IRAS 16293-2422 A を取り巻くエンベロープガス、原始星円盤、お よびアウトフローの関係」、日本地球惑星科学連合 2021 年大会、2021 年 6 月、オンライン開催、PCG19-04

招待講演

- [21] Yoko Oya, "Chemical Views of Outflows in Low-Mass Protostellar Sources", Cold outflows near and far: crossroad of our current understandings, 2021年11月、オンライン開催
- [22] 大屋瑶子、「低質量原始星天体に伴う円盤とその内部 構造における物理・化学」、宇宙電波懇談会シンポジ ウム 2021、2022 年 3 月、オンライン開催

6.3 酒井広文 研究室

本研究室では、(1) 高強度レーザー電場を用いた分 子操作、(2) 高次の非線形光学過程 (多光子イオン化 や高次高調波発生など) に代表される超短パルス高 強度レーザー光と原子分子等との相互作用に関する 研究、(3) アト秒領域の現象の観測とその解明、(4) 整形された超短パルスレーザー光による原子分子中 の量子過程制御を中心に活発な研究活動を展開して いる。

始めに、分子の配列と配向の意味を定義する。分 子の頭と尻尾を区別せずに分子軸や分子面を揃える ことを配列 (alignment) と呼び、頭と尻尾を区別し て揃えることを配向 (orientation) と呼ぶ。英語では 混乱はないが、日本語では歴史的経緯からしばしば 逆の訳語が使用されて来たので注意する必要がある。 また、実験室座標系で分子の向きを規定する三つの オイラー角のうち、一つを制御することを1次元的 制御と呼び、三つとも制御することを3次元的制御 と呼ぶ。

以下に、研究内容の経緯とともに、今年度の研究 成果の概要を述べる。特に「6.3.1 レーザー光を用い た分子配向制御技術の進展 – 従来の経緯」は、昨年 度と重複する部分があるが、研究の進展を概観する ために必要な内容であるので、ご理解いただきたい。

6.3.1 レーザー光を用いた分子配向制御技 術の進展

従来の経緯

本研究室では、レーザー光を用いた気体分子の配 向制御技術の開発と配列あるいは配向した分子試料 を用いた応用実験を進めている。分子の向きが揃っ た試料を用いることが出来れば、従来、空間平均を 取って議論しなければならなかった多くの実験を格 段に明瞭な形で行うことが出来る。そればかりでな く、化学反応における配置効果を直接的に調べるこ とができるのを始めとし、物理現象における分子軸 や分子面とレーザー光の偏光方向との相関や分子軌 道の対称性や非対称性の効果を直接調べることがで きるなど、全く新しい実験手法を提供できる。実際、 配列した分子試料の有効性は、I₂ 分子中の多光子イ オン化過程を、時間依存偏光パルスを用いて最適制御 することに成功したり (T. Suzuki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 133005 (2004))、配列した分子中からの高 次高調波発生実験において、電子のド・ブロイ波の打 ち消しあいの干渉効果を観測することに成功したり (T. Kanai *et al.*, Nature (London) **435**, 470 (2005)) するなどの、本研究室の成果でも実証されている。

分子の配向制御については、始めに静電場とレー ザー電場の併用により、1次元的および3次元的な分 子の配向が可能であることの原理実証実験に成功し た。これらの実験は、分子の回転周期に比べてレー ザー光のパルス幅が十分長い、いわゆる断熱領域で行 われたものである。この場合、分子の配向度は、レー ザー強度に追随して高くなり、レーザー強度が最大 のときに配向度も最大となる。一方、光電子の観測 や高精度の分光実験では、高強度レーザー電場が存 在しない状況で試料分子の配向を実現することが望 まれる。本研究室では、静電場とレーザー電場の併 用による手法が断熱領域で有効なことに着目し、分 子の回転周期 Trot に比べて立ち上がりのゆっくりし たパルスをピーク強度付近で急峻に遮断することに より、断熱領域での配向度と同等の配向度を高強度 レーザー電場が存在しない状況下で実現する全く新 しい手法を提案した (Y. Sugawara *et al.*, Phys. Rev. A 77,031403(R) (2008))。この手法を実現すべく、 ピーク強度付近で急峻に遮断されるパルスをプラズ マシャッターと呼ばれる手法を用いて整形する技術 を開発し、レーザー電場の存在しない条件下で分子 配向を実現することに初めて成功した (A. Goban et al., Phys. Rev. Lett. 101, 013001 (2008)).

一方、本研究室では先に、分子の回転周期よりも十 分長いパルス幅をもつ高強度非共鳴2波長レーザー 電場を用いて断熱的に分子配向を実現する手法を提 案していた (T. Kanai and H. Sakai, J. Chem. Phys. **115**, 5492 (2001))。この手法では、使用するレーザー の周波数がパルス幅の逆数よりも十分大きな場合に は、分子の永久双極子モーメントとレーザー電場と の相互作用はパルス幅にわたって平均するとゼロと なる。したがって、分子の配向に寄与するのは分子 の超分極率の異方性とレーザー電場の3乗の積に比 例する相互作用、すなわち、それによって形成され るポテンシャルの非対称性である点に注意する必要 がある。

この手法に基づいて、2 波長レーザー電場を用い て OCS 分子を配向制御することにも初めて成功し た (K. Oda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 213901 (2010))。さらに、 $C_{6}H_{5}I$ 分子を用い、本手法の汎用 性の実証も行った。一方、Even-Lavie valve を用い ても、OCS や $C_{6}H_{5}I$ 分子の配向度は、0.01 のオー ダーであり、劇的な配向度の増大を図ることは困難で あることが明らかになった。この困難は、回転量子 状態が Boltzmann 分布している thermal ensemble では、いわゆる right way に向く状態と wrong way に向く状態が混在していることに起因している。本 研究室では、配向した分子試料を用いた「分子内電 子の立体ダイナミクス (electronic stereodynamics in molecules)」に関する研究の推進を目指しており、配 向度の高い分子試料の生成が不可欠である。そこで、 初期回転量子状態を選別した試料に対し、静電場と レーザー電場を併用する手法や非共鳴2波長レーザー 電場を用いる手法により高い配向度の実現を目指す こととした。そして、主として対称コマ分子の状態 選別に適した六極集束器 (hexapole focuser) と主と して非対称コマ分子の状態選別に適した分子偏向器 (molecular deflector) を組み込んだ実験装置を立ち 上げた。その後、回転量子状態を選別した試料を用 い、静電場とレーザー電場を併用する手法や2波長 レーザー電場のみを用いる全光学的な手法により、分 子配向度の向上を実現した上で、配向した分子試料 を用いた「分子内電子の立体ダイナミクス」研究の さらなる推進を目指している。

先ず、初期回転量子状態を選別した非対称コマ分 子 (C₆H₅I) を試料とし、静電場とレーザー電場を併 用する手法を用いて世界最高水準の高い配向度を達 成することに成功した。さらに、プラズマシャッター 技術を導入し、初期回転量子状態を選別した分子の レーザー電場のない条件下での1次元的配向制御に 世界で初めて成功した (J. H. Mun *et al.*, Phys. Rev. A 89,051402(R)(2014))。次いで、静電場と楕円偏 光したレーザー電場の併用により、レーザー電場の 遮断直後にレーザー電場の存在しない条件下での3 次元的な配向制御の実現に世界で初めて成功した (D. Takei *et al.*, Phys. Rev. A **94**, 013401 (2016))_o の成果は、高い配向度、レーザー電場の存在しない条 件下での配向制御、及び、非対称コマ分子の向きの 完全な制御である3次元的な配向制御の3条件を満 たし、静電場とレーザー電場を併用する手法の「完 成形」の実現を意味している。

その後、上述した非共鳴2波長レーザー電場を用 いる全光学的な配向制御手法にプラズマシャッター 技術を適用することにより、静電場も存在しない完 全にフィールドフリーな条件下での配向制御技術の 開発を進めている。2波長レーザー電場を用いた全 光学的な配向制御の実験は、静電場とレーザー電場 を併用する手法と比べると、光学系の構成は複雑と なる。2波長レーザー電場としては、ナノ秒 Nd:YAG レーザーの基本波 (波長 $\lambda = 1064 \text{ nm}$) とその第2高 調波 (λ = 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。

最近の進展

(実験)

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 |(cos θ)| ~ 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。今 年度、上記の配向度 $|\langle\cos\theta\rangle|\sim 0.34$ の妥当性を 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 \mathcal{O} Communication (Md. Maruf Hossain, Xiang Zhang, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Stronger orientation of state-selected OCS molecules with relativedelay-adjusted nanosecond two-color laser pulses," J. Chem. Phys. **156**, 041101 (7 pages) (2022)) 12 発表した。

(数値計算)

ー直線偏光した基本波パルスと楕円偏光した第2高調 波パルスの組み合わせによる配向制御–

これまでの研究で、パルス幅10ns程度のNd:YAG レーザーパルスを用いても配向のダイナミクスが非 断熱的であることが明らかになった。したがって、単 に基本波と第2高調波の強度を上げるだけでは高い 配向度を達成することはできない。この様な状況で も配向度を上げることができる手法として、最近、直 線偏光した基本波パルスと楕円偏光した第2高調波 パルスの組み合わせが、配向度の向上に有効な「一 般化された組み合わせ」であることを明らかにした (Md Maruf Hossain and Hirofumi Sakai, J. Chem. Phys. 153, 104102 (2020))。第2高調波パルスを楕 円偏光とすることにより、相互作用ポテンシャルが、 極角 θ に加え、方位角 ϕ にも依存する3次元的な形 状となり、非対称ポテンシャル間の障壁が方位角 φ に沿って低い領域が生成され、配向状態へのトンネ ル遷移の確率が上昇することがポイントであり、利 用可能な第2高調波パルスの強度に応じて、配向度 の向上を期待することができる点が大きな特長であ る。楕円偏光した第2高調波パルスを用いているこ とから、自然な形で3次元的配向制御に拡張できる。 そこで、今年度は直線偏光した基本波パルスと楕円 偏光した第2高調波パルスの組み合わせで3次元的 な配向制御の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。今後、開発した計算コードを利用し て、代表的な試料分子の3次元的配向制御のダイナミ クスを調べ、実験のための基礎データとして活用す る。数値計算コードの開発にあたり、学部4年生の 特別実験IIで配属された江崎蘭世君が特に貢献した。

6.3.2 マクロな3回対称性をもつ分子アン サンブルの生成

最近、気体分子に対する既存の配列・配向制御技 術と概念的に異なる全く新しい分子アンサンブルの 生成法を考案した。互いに逆回りに円偏光した基本 波パルスと第2高調波パルスを重ね合わせると、3 回対称な電場トラジェクトリーが形成される。この 様な特異な電場トラジェクトリーと BX₃ (X=F, Cl, Br, I)の様な点群 D_{3h} に属する分子の超分極率相 互作用によって、試料分子の三つの腕を3回対称な 電場の向きに揃え、マクロな3回対称性をもつ分子 アンサンブルを生成できる。実験的に実現可能な回 転温度とレーザー強度を仮定して、有意なオーダー パラメータを達成できることを数値計算で確認した (H. Nakabayashi, W. Komatsubara, and H. Sakai, Phys. Rev. A **99**, 043420 (2019))。

上述したマクロな3回対称性をもつ分子アンサン ブルの生成を、実験でも初めて実現することを目指し ている。円偏光面内に3回対称性をもつ分子アンサ ンブルが生成されている様子をクーロン爆裂イメー ジングで観測するためには、円偏光面と垂直な検出 器面をもつ既存の速度マップ型イオン画像化装置を 用いることはできず、専用の装置開発が必要である。 高強度フェムト秒プローブパルスによるクーロン爆 裂で生成されたフラグメントイオンをまずイオン光 学の原理で引き出してから、2次元イオン検出器面 に射影すればよい。最近、この様な実験装置を開発 し、所期の性能が得られることを確認した。

昨年度までに、OCS 分子を試料とした予備的な実 験を行うことにより、実験条件の最適化を進めた。 OCS 分子の様な直線分子でも、3回対称な分子アン サンブルを生成できることは、数値計算で確認済み である。予備的な実験では、フラグメントイオンの 引き出し電極への印加電圧の最適化、互いに逆回り 円偏光したナノ秒 Nd:YAG レーザーの基本波パルス と第2高調波パルスの偏光状態の最適化、プローブ 用フェムト秒 Ti:sapphire レーザーパルスの偏光状態 の最適化(できるだけ完全な円偏光が望ましい)など を進めた。併せて、フラグメントイオンの観測と同 時にナノ秒 Nd:YAG レーザーの2波長間の相対位相 の安定性をモニターできるシステムも構築した。今 年度、試料分子として3ヨウ化ホウ素 BI3 を用い、マ クロな3回対称性をもつ分子アンサンブルの生成を 示唆するデータの取得に成功した。より長時間デー タを蓄積することにより、異論の余地のないより統 計のよいデータを取得するためには、2 波長間の相 対位相を長時間にわたり安定化する必要があること が明らかになった。そこで、元の第2高調波と基本 波から KD*P 結晶で発生させた第2高調波との干渉 信号を PID フィードバック制御することにより、2 波長間の相対位相として±6度以内の安定度、3回対 称性をもつ電場トラジェクトリーの各ローブの角度 の安定度として±2度以内を達成することに成功し た。一方、試料分子として当初使用していた3ヨウ 化ホウ素 BI₃ は、水分との反応性が高く、予め試料 の reservoir に少し多めに装填すると分子線バルブが 直ぐ詰まる、それを避けるために少量装填すると直

ぐに試料自体がなくなるなど、ハンドリングが極め て難しい。そのため、最近ハンドリングの容易な空 気中で安定な試料に変更して実験を進めている。次 年度に異論の余地のないより統計のよいデータを取 得することにより、世界初の3回対称性をもつ分子 アンサンブル生成の原理実証を目指す。

6.3.3 非共鳴 2 波長レーザーパルスを用い た pendular qubit states の制御

項目 6.3.1 で述べた通り、パルス幅 10 ns 程度の非 共鳴2波長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。こ のことは高い配向度を達成する観点からは望ましい ことではないが、この非断熱的な配向のダイナミク スを利用して、pendular qubit states を制御する手 法を提案した。非共鳴な2波長レーザー電場によっ て pendular qubit states を制御できるので、共鳴遷 移を利用する他の手法と比べ、気体分子の配向状態 が量子計算のより汎用性の高いプラットフォームの 選択肢の一つとなることを意味する。ここでは、試 料として OCS 分子を考える。始めに分子偏向器を用 いて、回転基底状態 |0,0) を用意し、ナノ秒の2波長 レーザーパルスを照射する。2波長パルスの前半部で は、上述した通り実質的に基本波のみが OCS 分子と 相互作用を開始し、pendular 回転基底状態 $| ilde{0}, ilde{0}
angle$ と なる。しばらくして、第2高調波パルスの強度が高 くなると、|Õ,Õ) 状態と |Ĩ,Õ) 状態に分裂し、それら 2状態の重ね合わせ状態が形成される。2状態の分布 は、レーザーパルスのピーク強度付近では、一定の強 度以上では 50% ずつとなる。最終的にレーザーパル スが通過すると、分子配向のダイナミクスが非断熱 的であるため、元の回転基底状態には戻らず、2 状態 間の重ね合わせ状態が維持される。このレーザーパ ルスが通過後の2状態の分布は、例えば第2高調波の 強度を一定にし、基本波の強度を変化させるとその 強度に応じて原理的には0%から100%まで自在に制 御できることを数値計算で示した。この性質は、非 共鳴ナノ秒2波長レーザーパルスのみを用いる全光 学的な手法により、pendular qubit states を制御で きることを意味する。上述した通り、共鳴遷移を利 用する手法と比べ、圧倒的に汎用性が高い手法とな る。今回提案した手法の実現可能性 (feasibility) は、 配列度と配向度の測定により確認した。第2高調波 の強度を 2.0 × 10¹¹ W/cm² に固定し、基本波の強度 を $1.7 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ から $5.0 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ に上 げたとき、配列度は上昇する一方、配向度は減少する ことを確認した。この観測結果は配列のダイナミク スは概ね断熱的であるのに対し、配向のダイナミク スは非断熱的であることを意味し、実際に pendular qubit states の制御が可能であることを支持する。本 研究は、本研究室の OB で、現在韓国浦項工科大学 のグループリーダーを務める Je Hoi Mun 氏らとの 共同研究である。

6.3.4 その他

本年度は、修士1名 (Ke Tong 君) を輩出した。こ こで報告した研究成果は、酒井広文研究室のメンバー と客員共同研究員として受け入れた Md. Maruf Hossain 氏 (日本アイ・ビー・エム株式会社)、水流翔太氏 (ルール大学ボーフム)、及び、学部4年生の特別実 験で本研究室に配属された原直樹君 (S セメスター)、 江崎蘭世君、野下隼君 (A セメスター) の活躍による ものである。

<報文>

(原著論文)

- Md. Maruf Hossain, Xiang Zhang, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Stronger orientation of state-selected OCS molecules with relativedelay-adjusted nanosecond two-color laser pulses," J. Chem. Phys. **156**, 041101 (7 pages) (2022).
- [2] Je Hoi Mun, Shinichirou Minemoto, Dong Eon Kim, and Hirofumi Sakai, "All-optical control of pendular qubit states with nonresonant two-color laser pulses," to appear in Commun. Phys. (8 pages) (2022).
- [3] S. Minemoto, T. Teramoto, T. Majima, T. Mizuno, J. H. Mun, S. H. Park, S. Kwon, A. Yagishita, and D. Toffoli, "Photoelectron angular distribution studies for two spin-orbit-split components of Xe 3d subshell: a critical comparison between theory and experiment," J. Phys. B 54, 105003 (11 pages) (2021).
- (学位論文)
- [4] Ke Tong, "Toward the formation of a molecular ensemble with macroscopic threefold symmetry," Master's thesis, September 2021.
- <学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [5] Shinichirou Minemoto, Takahiro Teramoto, Takuya Majima, Tomoya Mizuno, Je Hoi Mun, Sang Han Park, Soonnam Kwon, Akira Yagishita, and Daniel Toffoli, "Photoelectron angular distribution of two spin-orbit-split components of Xe 3d subshells" 36th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, presented on June 2nd, 2021 (online).
- [6] Takahiro Teramoto, Shinichirou Minemoto, Takuya Majima, Tomoya Mizuno, Je Hoi Mun, Sang Han Park, Soonnam Kwon, Akira Yagishita, Piero Decleva, Mauro Sterner, Shota Tsuru, "Probing local structure of iodobenzene molecules with photoelectron diffraction using a soft X-ray free-electron laser," 36th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, presented on June 4th, 2021 (online).

- [7] Ke Tong, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Attempt to form a molecular ensemble with macroscopic threefold symmetry," 36th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, presented on June 3rd, 2021 (online).
- [8] Shinichirou Minemoto, Naoki Hara, and Hirofumi Sakai, "Challenge to form a molecular ensemble with macroscopic threefold symmetry," to be presented in 37th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics.

(国内会議)

一般講演

- [9] Je Hoi Mun, Hirofumi Sakai, and Dong Eon Kim, "Time-dependent unitary transformation method to numerically solve the strong-field-ionization dynamics in the Kramers-Henneberger frame," 2021 年第 82 回応用物理学会秋季学術講演会、オンライン、 2021 年 9 月 13 日(月).
- [10] 峰本 紳一郎、寺本 高啓,間嶋 拓也、水野 智也、Je Hoi Mun、Sang Han Park、Soonnam Kwon、柳下 明、Decleva Piero、Sterner Mauro、水流 翔太、「軟 X 線自由電子レーザーを用いた X 線光電子回折によ るヨードベンゼンの局所構造解析」第 15 回分子科学 討論会、オンライン、2021 年 9 月 19 日 (日).
- [11] 峰本紳一郎、野下隼、原直樹、酒井広文、「逆回りに 円偏光した2波長レーザーパルスの相対位相の安定 化」、2022年第69回応用物理学会春季学術講演会、 青山学院大学相模原キャンパス、2022年3月25日 (金).
- [12] Je Hoi Mun, Shinichirou Minemoto, Dong Eon Kim, and Hirofumi Sakai, "Controlling pendular qubit states with nonresonant two-color laser pulses," 2022 年第 69 回応用物理学会春季学術講演 会、オンライン、2022 年 3 月 25 日(金).

6.4 五神 研究室

本研究室では、光と物質の物理学の新たな側面を 探ることを狙いとした研究を進めている。具体的に は、冷却原子系、半導体といった幅広い物質系を対 象として、光と物質の相互作用を通じて物質系を精 緻に制御し、そこに生じる多体量子現象の探求と特 異な光学現象を追求している。特に、半導体の電子 正孔系の基底状態の探索として、長年の懸案である 複合ボース粒子である励起子のボースアインシュタ イン凝縮 (BEC) 相について、低温高密度かつ準熱平 衡条件下での定量的な実験を進めている。最近サブ ケルビン領域で3次元ポテンシャル中にトラップし た励起子ガスの BEC 転移の特徴を捉えることに成 功した。さらに、より安定な凝縮体の形成のため励 起子ガスのさらなる低温化実験を進め、これまで到 達できなかった低温域まで励起子ガスの温度を下げ ることに成功した。さらにこの領域で、BEC の直接 的観測法を開発した。我々は、アインシュタインが

初めに提唱した粒子間の相互作用を伴わない相転移、 という量子統計性が顕著に現れた現象を励起子系及 び極低温⁷Liボース・⁶Liフェルミ混合原子気体系で 実現しその特徴の研究を進めている。

一方、従来の光物性研究の手法では捉えることが 困難な、光励起された固体の電子励起状態を直接か つ精緻に観測するため、狭線幅レーザーを光源とす るポンププローブ角度分解レーザー光電子分光法の 開発を進めている。これらと並行して、微細加工技 術を駆使して物質系を制御し、新たな光をコントロー ルする手法の開拓を進めている。具体的には人工構 造を用いた光・テラヘルツ電磁波制御や縦電場生成、 レーザー微細加工技術を用いて作製した THz メタマ テリアルなどに着目した研究を進めている。

本研究室では、物理学教室における活動と共に、理 学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構及び工 学系研究科附属光量子科学研究センターの活動を密 接に連携して活動を進め、高強度パルス光によるコ ヒーレント軟 X 線を用いた新たな分光計測手法の開 拓と実証などを進めている。さらに、物性研究所極限 コヒーレント光科学研究センターも加えて発足した 光量子科学連携研究機構を基盤とし、文部科学省革新 的イノベーション創出プログラム(COI STREAM) 「コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠 点」、NEDO プロジェクト「高輝度・高効率次世代 レーザー技術開発」、内閣府 SIP「光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術」などの産学連携による研究 開発活動も推進するとともに、文科省/JST Q-LEAP 「次世代レーザー技術領域」においてレーザー加工の 学理を追及している。そして、これらの活動を通し て、近年産業技術として非常に注目されているレー ザー加工のメカニズム解明と新規応用技術の開発に 取り組んでいる。本年度に進めた研究を以下に紹介 する。

6.4.1 物質系の巨視的量子現象の探索

希釈冷凍機を用いた励起子 Bose-Einstein 凝縮転 移の系統的観測

半導体において光励起して形成される伝導電子と その抜け穴である正孔は、クーロン引力によって水 素原子様の束縛状態が安定に存在することが知られ ており、これを励起子と呼ぶ。励起子はフェルミ粒 子の対であることから、ボース統計に従う準粒子と して低温高密度領域において BEC 相を形成しうるこ とが予想されてきた。励起子が格子と熱平衡になり 十分に低温状態となるためには、寿命が非常に長い ことが要求されるため、我々はスピン禁制励起子で ある亜酸化銅 (Cu₂O) における 1s パラ励起子に着目 してきた。しかし寿命が長いことの代償として、従 来の検出手段である発光スペクトル観測による励起 子の温度や密度の評価が難しい。そこで我々は、水 素原子様の Lyman 遷移を励起子について観測する ことで、パラ励起子の密度や温度を正確に評価する 手法を独自に開拓してきた。

世界各地での長年の研究にもかかわらず、BEC の

確証は得られなかった。その原因は、光励起強度を 増して高い励起子密度を生成する時に、十分な励起 子寿命を維持できるか不明であったことによる。そ で上記の分光法(励起子 Lyman 分光法)を用いた 結果、励起子間の2体衝突による励起子消失の頻度 が極めて高く、超流動ヘリウム温度 (2 K) において BEC 転移が期待される励起子密度 (10¹⁷ cm⁻³) に到 達するのは困難であることが判明した。従って BEC を実現するためには励起子間の散乱頻度を下げるべ く、より低密度な領域で BEC の条件を実現する必 要がある。そこで我々はヘリウム3冷凍機を使用し、 励起子をサブケルビンの温度領域まで冷却すること で、10¹⁶ cm⁻³ 程度の転移密度を実現し、BEC 転移 の観測を試みた。歪誘起トラップしたパラ励起子は 0.8 K という低温に到達していることを空間分解発 光スペクトルから確認し、この温度で BEC 転移に必 要である 10⁹ 個程度のパラ励起子を蓄積した。その 結果、BEC 転移条件を満たすときに励起子ガスの高 温成分が閾値的に増大することを見出した。数値計 算との比較の結果、上記のような非弾性散乱が強く 起こる系においては、BEC 転移が生じたと仮定する と、基底状態を多数の粒子が占有して局所的に密度 が急上昇し、励起子を爆発的にトラップ中央からは じき出す(緩和爆発)ことが分かっている。

この実験においては、全励起子に対する凝縮体の 割合は最大で1%程度と推測される。より凝縮体を 顕在化させるためには、励起子間散乱を軽減するため さらに転移密度を下げる必要がある。そこで、無冷 媒希釈冷凍機を用いて励起子をさらに冷却するセッ トアップを構築した。光学窓を通じた熱輻射の流入 を極力遮断し、冷凍機のベース温度として 38 mK を 達成した。このような 100 mK 以下の極低温環境下 でレーザーによる励起子生成と捕獲、微弱な発光の 空間分解イメージングといった実験手法を開発して きた。その結果 100 mK を下回る世界最低温度の励 起子系を実現したこと、および歪誘起トラップを生 成する応力が大きいほど低密度極限における励起子 温度が低下すること発見した。ボルツマン方程式に 基づく数値計算との比較により、応力印加による励起 子 TA フォノン相互作用の活性化が冷却機構に重要 な役割を果たしていることを明らかにしている。ま たこの極低温の領域においてのみ、励起子発光強度 の特徴的な励起パワー依存性が発見され、発光の過 程における運動量保存則により凝縮体からの発光は 禁制となることとの関係を慎重に調べている。

さらに、発光禁制となる凝縮体そのものを直接観 測するために、1s-2p 遷移に伴う誘導吸収測定法を用 いてトラップした励起子を測定する実験系を構築し た。現在励起子温度を 100 mK 台に保ちつつ誘導吸 収測定を行うことに成功している。本手法を用いる ことで、各励起パワーにおける励起子の密度を正確 に評価できる。上に述べた励起子発光強度の特徴的 な励起パワー依存性と、励起子密度の励起パワー依 存性の比較を進めることで、励起子密度と励起子発 光強度の関係を調べている。

また励起子の空間分布が励起子の温度、ポテンシャ ル形状、粒子数から決定される熱分布と一致するか 否かを調べることは凝縮体を検出する上で大変重要 な課題である。そこで時間分解発光測定によって極



図 6.4.11: Lyman イメージングの結果 (希釈冷凍機 内の mixing chamber 温度: 500 mK)

低温でパラ励起子がトラップ中で蓄積される様子を 詳細に観測した。その結果、励起子の空間分布が熱 分布で定義される分布に到達するためにはフォノン との相互作用の少ない極低温の環境を実現すること が極めて重要であることを明らかにした。また亜酸 化銅中の励起子は不純物などの散乱を受けずに巨視 的な空間スケールを自由に動ける、自由粒子として 取り扱えるという特徴を抽出することができた。こ のことを踏まえ上記の誘導吸収測定から励起子密度 の空間分布をイメージング (図 6.4.11) することで、 BEC 転移特有の局所的な高密度分布が励起パワーと 温度に依存して閾値的に現れる様子を捉える実験を 進めている。

近年、リュードベリ原子が量子情報技術としての 応用を念頭に研究されている。一般に主量子数 n が 大きな束縛状態であり、電場や磁場に対して高い感 度を持つことが特徴である。また励起子においても 同様に、リュードベリ状態の研究が進められてきて いる。我々はそのような研究背景を踏まえ、4 K から 100 K までの広範な温度領域における主量子数 n = 5 までの励起子の結合エネルギー、スペクトル線幅、振 動子強度を測定し、主量子数に対するスケーリング 則を詳細に調べた [1]。

極低温ボース・フェルミ混合原子気体による量子物 性の探索

極低温原子気体で実現される量子多体系は普遍的 な物理法則に従う。例えば相転移時の臨界現象やフェ ルミ原子系で実現される BCS-BEC クロスオーバー の物理等である。極低温原子気体で電子系や核子・ クォーク系と同じ物性を示す粒子系を再現し、それ らの物性を探索することにより、相互に物理の理解 を深めることはもちろん、新規の物理現象の発見も 期待できる。特に我々は極低温ボース・フェルミ混 合原子気体を有しているため、これまで研究できな かった新規の臨界現象に挑むことが可能である。具 体的には、フェッシュバッハ共鳴を用いた散乱長の コントロールによって極力ボース粒子間相互作用を 抑制した⁷Liボース粒子系において、⁶Liのフェルミ 粒子系を冷媒とするsymapathetic cooling を通じて BEC 転移を引き起こすことに成功している。ボース 粒子間で弾性散乱がなく、熱浴との相互作用で冷え るボース粒子が如何にボース凝縮に至るかは、実験 的にも理論的にも研究されていない。一般的に二次 の相転移は Kibble-Zurek 理論で説明できるが、ボー ス粒子間で弾性散乱のない場合は適応外である。本 年度は、この転移におけるボース粒子系の熱力学量 を測定することにより臨界指数を抽出し、アインシュ タインが提唱した本来の意味での、相互作用を伴わ ない BEC 相転移について議論を深めている。

6.4.2 フェムト秒レーザー加工による大面 積モスアイ無反射構造作製と宇宙望 遠鏡への実装

近年のテラヘルツ (THz) 技術の進歩に伴って、 THz 非線形光学や宇宙からの微弱な THz 信号観測 など、THz 波の高強度化や検出の高感度化が重要と なる研究が多く進められている。これらを実現する ためには THz 波のエネルギー損失の低減が重要であ り、その損失要因の一つである材料界面でのフレネ ル反射の抑制が必要とされる。ここで、波長以下の 大きさの微細突起構造が周期的に配列したモスアイ 構造は、反射の原因となる屈折率の物質界面の不連 続変化を解消し、広帯域な反射防止膜として機能す ることが知られている。このようなモスアイ構造は 可視光およびマイクロ波領域では広く使われている 一方で、その中間の、特徴的なサイズが数 10~数 100 μm のオーダーとなる THz 領域においては、旧来の 加工法では作製が困難であった。

本研究では、フェムト秒レーザー微細加工技術を用い て、シリコンやアルミナのような代表的な THz 光学 材料に THz 反射防止モスアイ構造を作製し、透過特 性の評価を進めている。今年度は、最大平均パワー 40 W の高出力フェムト秒レーザー光源を活用して、 直径 300 mm のアルミナ全面に、高さ 1.3 mm、周 期0.8 mmのモスアイ加工を施すことに成功した(図 6.4.12)[2]。この構造の透過率特性を測定したところ、 シミュレーション結果と良く一致し、0.1 THz 近傍 での無反射構造として機能していることが確認でき た。このモスアイ構造は、宇宙論観測望遠鏡の赤外 吸収ローパスフィルターとして機能し、本年度に、米 国バージニア州の Green bank 望遠鏡に使われてい る MUSTANG レシーバーの内部に搭載され、稼働 が始まっている。これは、これまでの多層膜無反射 構造に代わって、レーザー加工によって作製したモ スアイ構造が宇宙観測望遠鏡に搭載された初めての 例である [6]。本研究は東京大学カブリ数物連携宇宙 研究機構の松村准教授らとの共同研究であり、将来 的には、LiteBIRD 計画における宇宙背景放射偏光観 測小型科学衛星への搭載を目標として研究を進めて いる。



図 6.4.12: レーザー加工で作製した大面積アルミナ モスアイ無反射構造 (a) 全体写真 (b) モスアイ 構造の拡大写真 (c) レーザー顕微鏡での観察結果 カラーバーは高さを表す

6.4.3 新規コヒーレント光源開発と新しい 分光手法開拓

高次高調波を用いた真空紫外領域の精密分光計測

近年、極端紫外 (EUV) リソグラフィーをはじめと した EUV 領域における光技術の重要性が増してい る。その応用を進めるためには多層膜ミラーや光マ スクなどの光学素子の高度化が必要である。これら の光学素子は高精度な光位相の制御を必要とするた め、様々な材料の光学定数の情報が必要である。だ が EUV 領域の光学定数は十分には知られておらず、 高度化のためにはそのデーターベース化が不可欠で ある。

これまで EUV 領域の屈折率測定では放射光施設 を利用した測定が行われてきた。一方、EUV 光を発 生させる手法として高次高調波発生を用いた研究が 昨今進められている。屈折率測定を直接測定する手 法としてヤングのダブルスリット干渉を用いた手法 が提案されているが、レーザーベースの高次高調波 は卓上装置に組み込むことができ、高いコヒーレン スを持つことからダブルスリット干渉を用いた屈折 率測定に最適な光源である。そこで我々は、高精度 なダブルスリット干渉屈折率測定を目指した。繰り 返し周波数 5 kHz、パルス幅 30 fs のフェムト秒チタ ンサファイア再生増幅器の出力を光パラメトリック 変換し、増幅した波長可変のパルス光源を高次高調 波発生の基本波とした。この基本波を希ガス (ネオ ンガス) に絞り込むことで発生した高次高調波を用 いることで EUV 領域の任意の波長で測定できる干 渉計とした。

我々はテストサンプルとしてアルミニウムの屈折 率測定を行った。ダブルスリット法の分光干渉像に ついては、干渉像の位相と明暗度からフィッティン グを行い、複素屈折率を定量的に評価できる。この 測定結果から位相を抽出する過程において、高調波 の波面情報とグレーティングの収差を取り込んだ改 良されたモデル計算を行うなど、解析の精密化を進 めた。その結果光位相の決定精度を約 10 mrad まで 向上させ、従来の EUV 領域の屈折率測定と比較しても高い精度を実現した。

更に、EUV 領域における応用上最も重要な波長であ る 13.5 nm に最適化した高調波の発生とそれを用い た干渉測定も進めている。本年度は、希ガスにアル ゴンを採用して基本波 1300 nm の光を絞り込むこと で高調波発生を行った。この光源を用いて、実際の光 学素子の 13.5 nm 近傍における屈折率測定を進めた。

レーザー励起角度分解光電子分光の開発

本研究室では、レーザー光源をベースとする高分 解能角度分解光電子分光法を光物性物理学の観点で 発展させることを試みている。従来の光物性物理学 では発光測定や吸収分光などを用いて光励起に伴う 電子や正孔の状態変化を捉えてきた。これらの手法 では結合状態密度を反映した結果が得られる。一方、 光電子分光においては純粋な電子の状態密度を取得 できるという点で電子系の状態を捉える手法として 強力である。また電子系の波数に関する情報も取得 できるという点で、光励起を受けた電子系がバンド 内でどのように変化するかという教科書的な問いに ついてエネルギースペクトルに着目した光学測定に はない、新たな視点で知見を与える可能性がある。

我々は特に低温において光励起された固体電子系 に焦点を当て、電子系の状態を直接かつ詳細に調べ ることで、光物性物理学において解決できなかった 問題に挑むことを計画している。そのため我々は従 来の半球型ではなく TOF 形式の角度分解光電子分光 装置を採用した。Time of Flight (TOF)型の光電子 分光装置は半球型と比較して放出された電子の取り 込みの立体角が2桁程度大きく、収率が高い。この 点は非占有バンドのバンド構造や、基底状態ではな く光励起された電子系の振る舞いを調べる上でとて も有利な点であり、本研究の大きな特色になってい る。我々はこの TOF 型の角度分解光電子分光を用 いた測定において、エネルギー分解能 1.8 meV、 角 度分解能 0.33° という高分解能を達成した。これは 類似の TOF 型装置と比べても世界最良レベルの分 解能である。次に、モード同期 Ti:S レーザーの第二 高調波を比較的高い強度で試料に照射し、その励起 パルスの直後に光電子放出用の第四高調波を照射す ることで、光励起されたトポロジカル絶縁体の表面 近傍の非平衡電子系の時間分解光電子分光を行える よう実験系を拡張した。

本年度はより高強度に光励起された固体電子系の 光電子分光測定を行う実験を進めた。具体的にはチ タンサファイア再生増幅器から出射された高パルス エネルギー光を基本波とする光源を用いた測定を実 現している。この結果、これまで我々が用いてきた モード同期レーザーを基本波とする実験系に比べて 数十倍高いパルスエネルギーによる励起を可能とし ている。この光源を用いて、トポロジカル絶縁体の 表面近傍の非平衡電子系の時間分解光電子分光を行 なった。さらに層状物質の半導体を対象に光電子分 光測定を進めている。光物性物理学において基礎と なる電子正孔系を光電子分光測定で観測した場合の 結果を、他研究室と共に理論的な計算と照らし合わ せながら議論を進めた。その上で高強度に励起した 場合に生じる励起子モット転移と光電子信号との対 応も議論を深めた [25]。

6.4.4 フォトンサイエンス研究機構

最先端光科学を通して既存の学術分野を横断する 融合科学を創ることを目的とし、2013 年 10 月に理 学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構が発足 した。本組織では、学内の最先端研究を連携させな がら国内外の諸機関とも連携し、フォトンサイエン スの世界拠点を東京大学に形成することを目指すと 同時に、産業界との連携も進め、基礎研究の成果を 活用した技術を社会に波及浸透させることを目指している。これによって、真理を探究する基礎科学の 活動が、人類社会の課題を解決し、さらに社会の変 革をもたらすイノベーション創出につながるもので あることを示し、基礎科学の新たな役割を社会に発 信している。この活動は、東京大学が、未来社会協 創推進本部を設置し推進している SDGs 達成に向け た活動に沿うものである。

これら活動を進めるため、文部科学省の「革新的 イノベーション創出プログラム」拠点のひとつとし て、「コヒーレントフォトン技術によるイノベーショ ン拠点」が、平成25年度に採択された。この事業は 令和3年度までの9年プロジェクトで、「個を活かす 持続可能な社会」実現のため、最新のレーザー技術 を駆使して、光を使ったものづくり、半導体プロセ ス技術、健康医療技術の革新を目指すと共に、その 技術を支えるための新しい光と物質の科学の創出を 進めている。その一環として、本研究室においては、 誘電体レーザー破壊の物理的メカニズムの解明とそ のレーザー加工への応用を目指した研究に取り組ん でおり、すでに多くの成果を上げている。

このような社会との連携活動を進める上で、学内 他部局の光科学研究組織間での連携を強化する不可 欠であり、本機構が中心となって、工学系研究科附 属光量子科学研究センター、物性研附属極限コヒー レント光科学研究センターと共に、平成28年12月 1日に光量子科学連携研究機構 (UTripl) を発足させ た。また、「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」 (平成 28 年度から令和 2 年度)が NEDO プロジェク トとして採択され、平成 29 年 10 月には、NEDO プ ロジェクト参画者を中心とした「高効率レーザーブ ロセッシング推進コンソーシアム」(TACMI)が発足 した。それに加え、平成 30 年度には、Q-LÉAP「先 端レーザーイノベーション拠点」、SIP「光・量子を 活用した Society5.0 実現化技術」の活動が開始され、 他の先行プロジェクトとの連携を強化し、SDGs で 目指している持続可能な社会構築に向けて貢献して いる。

<報文>

(原著論文)

 Dongyeon Daniel Kang, Aaron Gross, HeeBong Yang, Yusuke Morita, Kyung Soo Choi, Kosuke Yoshioka, Na Young Kim: Temperature study of Rydberg exciton optical properties in Cu_2O , Physical Review B **103**, 205203 (2021)

- [2] Ryota Takaku, Qi Wen, Scott Cray, Mark Devlin, Simon Dicker, Shaul Hanany, Takashi Hasebe, Teruhito Iida, Nobuhiko Katayama, Kuniaki Konishi, Makoto Kuwata-Gonokami, Tomtoake Matsumura, Norikatsu Mio, Haruyuki Sakurai, Yuki Sakurai, Ryohei Yamada, Junji Yumoto: A Large Diameter Millimeter-Wave Low-Pass Filter Made of Alumina with Laser Ablated Anti-Reflection Coating, Optics Express 29, 41745 (2021)
- [3] Yuyuan Huang, Kuniaki Konishi, Momoko Deura, Yusuke Shimoyama, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami, Yukihiro Shimogaki, Takeshi Momose: Development of a model for evaluating propagation loss of metal-coated dielectric terahertz waveguides, Journal of Applied Physics 130, 055104 (2021)
- [4] Yuyuan Huang, Kuniaki Konishi, Momoko Deura, Yusuke Shimoyama, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami, Yukihiro Shimogaki, Takeshi Momose: Suitability of metallic materials for constructing metal-coated dielectric terahertz waveguides, Journal of Applied Physics 131, 105106 (2022)

(解説記事)

[5] 小西邦昭, 五神真: 誘電体ナノメンブレンを用いた真 空紫外コヒーレント光発生と円偏光制御, 光アライア ンス 32(11) 44-48 2021 年 11 月

(プレスリリース)

[6] 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構(Kavli IPMU),東京大学大学院理学系研究科,東京大学物性研究所:"超短パルスレーザー加工技術で作製した蛾の目構造を世界で初めて電波望遠鏡に実装-宇宙マイクロ波観測装置の感度向上に貢献へ-"(2022/01/27)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [7] Bruno Gonzalez-Izquierdo, Haruyuki Sakurai, Ryohei Yamada, Kuniaki Konishi, Makoto Kuwata-Gonokami, Junji Yumoto: Plasma dynamics induced by single-pulse femtosecond laser ablation of dielectrics and metals, Lasers in Manufacturing 2021 (2021/6/22)
- [8] Kentaro Soeda, Hirosuke Suzuki, Shuichi Yokobori, Kuniaki Konishi, Hiroharu Tamaru, Norikatsu Mio, Makoto Kuwata-Gonokami, Junji Yumoto: RECILS: high resolution and high-speed SLA 3D printer using a plane building platform and a cylindrical glass window, Lasers in Manufacturing 2021 (2021/6/22)

- [9] W. Komatsubara, K. Konishi, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami: Observation of Rotational Doppler Shift for Harmonic Generation in Solids, CLEO/EUROPE-EQEC 2021 (2021/6/24)
- [10] R. Yamada, W. Komatsubara, H. Sakurai, K. Konishi, N. Mio, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami: Changes in the Intensity Distribution of the Laser Pulse due to Non-linear Optical Interaction with Air and Its Effects on Laser Ablation, CLEO/EUROPE-EQEC 2021 (2021/6/24)
- [11] H. Sakurai, K. Konishi, H. Tamaru, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami: Direct Correlation of Local Fluence to Ablation Morphology Created by a Single Femtosecond Laser Pulse, CLEO/EUROPE-EQEC 2021 (2021/6/25)
- [12] S. Kawano, M. Tamamitsu, H. Sakurai, K. Konishi, T. Ideguchi, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami: Time-Resolved Digital Holography System with High Phase Precision for Detail Observation in Laser Ablation Dynamics, CLEO/EUROPE-EQEC 2021 (2021/6/25)
- [13] Kuniaki Konishi, Daisuke Akai, Yoshio Mita, Makoto Ishida, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami: CIRCULARLY POLARIZED VAC-UUM ULTRAVIOLET COHERENT LIGHT GENERATION USING A SQUARE LATTICE PHOTONIC CRYSTAL NANOMEMBRANE, The 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANS-DUCERS 2021) (2021/6/25)

(国内会議)

一般講演

- [14] Yuyuan Huang, Kuniaki Konishi, Momoko Deura, Yusuke Shimoyama, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami, Yukihiro Shimogaki, Takeshi Momose: Propagation loss mechanism in metalcoated dielectric terahertz wave parallel-plate waveguide, 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会 (2021/9/11)
- [15] 川野将太郎,玉光未侑,櫻井治之,小西邦昭,井手口拓郎,湯本潤司,五神真:単一パルスでのレーザーアブレーションの詳細観測を目的とした時間分解デジタルホログラフィ光学系の開発,第82回応用物理学会 秋季学術講演会 (2021/9/11)
- [16] 山田涼平, 櫻井治之, 小西邦昭, 三尾典克, 湯本潤司, 五神真:空気中での非線形伝搬の効果を用いたレー ザー加工形状制御, 第82回応用物理学会秋季学術講 演会 (2021/9/11)
- [17] 的場 みづほ、小西 邦昭、三尾 典克、湯本 潤司、五神 真: テラヘルツ縦電場パルスによるダークプラズモン 励起の数値計算解析、第 82 回応用物理学会秋季学術 講演会 (2021/9/12)
- [18] 高久諒太,松村知岳,櫻井治之,小西邦昭, Shaul Hanany, Qi Wen,桜井雄基,片山伸彦, Tommaso Ghigna,長谷部孝,小松国幹,石野宏和,山崎典子,

星野百合香, 湯本潤司, 五神真: LiteBIRD に向けた 200mm 径モスアイ多層半波長板の光学評価と TES の非線形効果への影響, 日本物理学会 2021 年秋季大 会 (2021/9/15)

- [19] 村田樹, 辻直希, 大谷航 A, 吉岡孝高 B, 森田悠介, 五 神真: UV レーザーを用いた SiPM の飽和現象の研 究, 日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021/9/16)
- [20] 石田明,橋立佳央理,難波俊雄,浅井祥仁,五神真,田 島陽平,小林拓豊,魚住亮介,周健治,蔡恩美,吉岡孝 高,大島永康,オロークブライアン,満汐孝治,伊藤賢 志,熊谷和博,鈴木良一,藤野茂,兵頭俊夫,望月出海, 和田健,甲斐健師:ボース・アインシュタイン凝縮を 目指したポジトロニウム冷却,日本物理学会 2021 年 秋季大会 (2021/9/17)
- [21] 石田明,橋立佳央理,難波俊雄,浅井祥仁,五神真,田島陽平,小林拓豊,魚住亮介,周健治,蔡恩美,吉岡孝高,大島永康,オロークブライアン,満汐孝治,伊藤賢志,熊谷和博,鈴木良一,藤野茂,兵頭俊夫,望月出海,和田健,甲斐健師:ボース・アインシュタイン凝縮を目指した高密度ポジトロニウム生成材料の開発,日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021/9/21)
- [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:フェムト秒レーザー加工における 空気中での非線形伝搬モデルの構築,日本物理学会第 77回年次大会 (2022/3/15)
- [23] 村田樹, 辻直希, 大谷航, 吉岡孝高, 森田悠介, 五神真: UV 光を用いた SiPM の飽和現象の研究, 日本物理学 会第 77 回年次大会 (2022/3/15)
- [24] 小松原航,小西邦昭,湯本潤司,五神真:空気から生じる3倍波発生におけるクリティカルパワー,日本物理学会第77回年次大会(2022/3/16)
- [25] 黒田聖也,鈴浦秀勝,津森貴大,森田悠介,五神真:2 次元半導体光強励起状態に対する光電子分光の理論, 日本物理学会第77回年次大会(2022/3/16)
- [26] 高久諒太, Qi Wen, Scott Cray, Mark Devlin, Simon Dicker, Shaul Hanany, 長谷部孝, 飯田輝人, 片山伸 彦, 小西邦昭, 五神真, 松村知岳, 三尾典克, 櫻井治之, 桜井雄基, 山田涼平, 湯本潤司: 超短パルスレーザー によるモスアイ反射防止構造加工を施した大型アル ミナ IR フィルターの開発, 日本物理学会第 77 回年 次大会 (2022/3/16)
- [27] 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 田島陽平, 小林拓豊, 魚住亮介, 周健治, 蔡恩美, 吉岡孝高, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野茂, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健, 甲斐健師: ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却, 日本物理学会第 77 回年次大会(2022/3/16)
- [28] 田島陽平,山田恭平,小林拓豊,石田明,難波俊雄,浅井 祥仁,五神真,蔡恩美,周健治,吉岡孝高:ポジトロニ ウムのレーザー冷却に向けた深紫外チャープパルス光 源の開発,日本物理学会第77回年次大会 (2022/3/17)
- [29] 小林拓豊,田島陽平,魚住亮介,蔡恩美,石田明,難波 俊雄,浅井祥仁,五神真,大島永康,オロークブライアン,満汐孝治,伊藤賢志,鈴木良一,兵頭俊夫,望月出海,和田健,周健治,吉岡孝高:ポジトロニウムのレー

ザー冷却実証に向けたドップラー分光法の開拓,日本 物理学会第 77 回年次大会 (2022/3/17)

6.5 安東研究室

本研究室では重力と相対論・量子論に関する実験 的研究を進めている.その中でも,重力波望遠鏡の開 発と,それによる宇宙の観測は一貫して研究室の中心 テーマとなっている.2016年2月には米国のLIGO によって,重力波信号の初観測が報告され,「重力波 天文学」が幕をあけた.国内でも大型低温重力波検 出器 KAGRA の観測が開始された.それに加え,将 来計画である宇宙空間重力波アンテナの実現へ向け た検討や基礎開発も行われている.実験室内の基礎 研究としては,独自の方式のねじれ型重力波検出器 TOBA の開発,さらには重力波研究で用いられる精 密計測技術を用いた基礎物理研究として,ダークマ ター探査実験,オプトメカニクスを用いた巨視的な 量子現象の測定実験などを進めている.

6.5.1 大型重力波望遠鏡 KAGRA

2015 年の Advanced LIGO による重力波の初観測 以降,重力波望遠鏡の感度は着実に向上し,観測ネッ トワークも拡大している. 2020 年 3 月に終了した O3と呼ばれる最新の長期共同観測運転以降, LIGO, Virgo, KAGRA の各検出器はさらなる高感度化を目 指した調整やアップグレードを行っている. 2022 年 12月中旬にO4観測運転を共に開始する予定であり、 これまで以上に密接な連携を取っている. KAGRA は O4 の初めには連星中性子星の観測可能レンジと して1 Mpc 以上の感度で運転を行い、O4の終わりま でに感度を向上させるための作業を行う予定である. アメリカ, イタリア, 日本の三極での共同観測が実 現されれば、到来方向決定精度が各段に上がる.ま た、一般相対性理論が予言するテンソルモードとは 異なる偏極モードが初めて明確に分離できるように なり、一般相対性理論に代わる重力理論の検証が可 能となると期待されている.技術的には,KAGRA は地下建設と鏡の低温化という次世代重力波望遠鏡 に必須と考えられている技術を取り入れたレーザー 干渉計であり,次世代へ向けても重要な役割を担っ ている.

KAGRAの現状

KAGRA 計画は 2010 年にスタートした, 岐阜県神 岡の地下に大型低温重力波望遠鏡を建設する計画で ある. 2020 年 4 月には 1 Mpc の感度を実現し, ドイ ツの GEO との共同観測運転を実施した. 観測運転 の休止以降, O4 観測に向けて鏡の懸架系や干渉計の 調整を行っている. 当研究室では KAGRA の根幹部 分となる主干渉計の光学系や制御系の設計開発, 観 測ロードマップの作成などを行っている. 本年度は 特に,サファイア鏡の複屈折が干渉計に与える影響 についてのシミュレーションを進めた.また,O3運 転時の感度評価をもとに,O4での到達可能感度の見 積もりや感度向上計画の立案を行った.他に,複屈 折に対応するため,干渉計出射光を検出する光学定盤 の再設計や,より高品質な鏡への交換などを行った.

Birefringence calibration of KAGRA sapphire mirrors

Among various techniques to reduce noises, lowering the temperature of mirror-suspension system is a way to reduce thermal noise. KAGRA is the first long-baseline detector that uses cryogenic techniques. The sapphire was chosen as the material of KAGRA' s high-quality test masses mainly for its high thermal conductivity and good optical properties. However, as sapphire is birefringent, the effect of birefringence is currently an important factor that determines whether the high-precision detector can achieve its design sensitivity or not. Hence, study of the birefringence of sapphire mirrors and proper mitigation strategies are highly demanded.

This year we studied the method of calibrating birefringence properties of sapphire mirrors using transmission wavefront error (TWE) measurements. The birefringence map was constructed using TWE maps measured with lineally polarized beam of different angles. According to the birefringence map, we successfully estimated the energy coupling from s-polarization to p-polarization and compared it with KAGRA measurements. We also developed a model that can describe light couplings between two orthogonal polarizations when they pass through a birefringence medium. The simulated beam shape matched well with experimental measurements.

6.5.2 宇宙空間重力波望遠鏡

宇宙空間でレーザー干渉計を実現することで,長い 基線長による高感度化,地面振動の影響の回避が可能 になり,低い周波数帯での重力波観測が可能になる. 宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO は基線長 1000 km のファブリペロー型レーザー干渉計を宇宙空間に建 設するという野心的な計画である. DECIGO は巨大 ブラックホールの合体や,初期宇宙からの重力波な どの観測を目指している. この DECIGO の前段階 の重力は望遠鏡 B-DECIGO や,技術実証ミッショ ン SILVIA の設計検討を進めている.

宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO

B-DECIGO は, DECIGO の前哨ミッションと位 置付けられる一方, 連星合体現象に対して宇宙全体 を見渡すことができるだけの性能を持つ本格的な重 力波望遠鏡である. ET や CE といった次世代地上 重力波望遠鏡や, ESA が主導する LISA とは異なる 周波数帯と独自の科学的成果が期待されている.本 年度は, B-DECIGO で必要となる技術を明確化する とともに,網羅的な技術サーベイを進めた.また衛 星メーカーの協力のもと,ミッション成立性検討を 進めた.

超精密フォーメーションフライト実証計画 SILVIA

DECIGO や B-DECIGO の実現には超精密なフ ォーメーションフライトが必要であり,着実な技術実 証が必要となる.当研究室はJAXA フォーメーショ ンフライトワーキンググループに参画し,公募型小 型クラスで実行可能な超精密フォーメーションフラ イト実証計画 SILVIA (Space Interferometer Laboratory Voyaging towards Innovative Applications) を進めている.2019 年度公募型小型計画・宇宙科学 ミッションコンセプト公募に応募し,2020 年 8 月に は次フェーズに進むことが承認された.SILVIA は 複数の宇宙機で構成され,その間の長さを精測定・制 御することで精密なフォーメーションフライトを実 現することを目指す計画である.本年度は特に,ダ ウンセレクション審査に向け,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.

DECIGO/SILVIA のための地上実証実験

当研究室では、DECIGO/SILVIA で用いられる双 方向ファブリ・ペロー共振器の制御手法を確立する ために、地上での検証実験を行っている.本年度は 特に角度方向の制御に着目し、wavefront sensor 法、 beam pointing control 法によるセンサーとアクチュ エータの組合せの違いによる、メリット、デメリット を検討した.また現在は、地上のテーブルトップス ケールで、角度ずれに対するエラー信号の取得、及 び共振器を共振点に制御することを目的とした、原 理実証実験のセットアップを構築中である.

6.5.3 ねじれ型重力波検出器 TOBA

Torsion-Bar Antenna (TOBA) とはねじれ振り子 の水平回転を利用した新しい重力波検出器である.地 上でも低周波数帯 (0.1 Hz 前後)の重力波に感度を持 ち,中間質量ブラックホール連星合体の観測が可能 になり,銀河中心の超巨大ブラックホールの形成過 程に知見を与えることなどが期待できる.重力波観 測以外にも地球活動による重力場変動を計測するこ とで将来の地上重力波望遠鏡の低周波感度向上に貢 献したり,地震の早期アラートに応用するなどの研 究も進められている.

現在は長さ 35 cm の棒状の試験マスを用いた小型 プロトタイプ (Phase-III TOBA) の開発が進められ ており,将来的な大型化 (10 m) に備えた雑音低減実 証や地球重力場変動の観測,地震速報の実現などを 目指している.設計感度は 0.1 Hz で 10⁻¹⁵/√Hz と なっている. Phase-III TOBA は熱雑音の低減のた めに試験マスを 4 K にまで冷却する.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 に向けた要素開発を行っている.

低温モノリシック光学系の開発

目標感度を妨げる雑音の1つに,読み取り光学系 の変動に起因する雑音がある.この雑音の低減のた め,Phase-III TOBA では基材に光学素子を直接接 着するモノリシック光学系を用いて試験マスの変位 を測定する.Phase-III TOBA の試験マス及び読み 取り光学系は低温下にあるため,モノリシック光学 系についても低温化で動作するものを開発する必要 がある.本年度はモノリシック光学系で構築する予 定の読み取り光学系を光学上盤上で構築して雑音評 価を行い [81],またモノリシック光学系のアセンブ リ装置の開発を行った [70].今後は,開発した装置 を用いて装置モノリシック光学系の構築を行う予定 である.

Fiber Q measurement

Research was focused on characterising and lowering the suspension noise for torsion pendulums, focusing on two main key technologies: cryogenic temperatures, and crystalline fibres. This is in order to ensure that the noise floor of TOBA is low enough for its intended sensitivity. The key measurement metric is the Q factor, which we measure via the ringdown method with a torsion pendulum setup.

We have succeeded in achieving stable operation of our cryogenic systems, in combination with the torsion pendulum setup using sapphire fibres. Consistent measurements throughout the entire cooling and heating cycle, from room temperature down to a chamber temperature of 4K were measured, allowing for the characterization of the Q factor of the setup with respect to temperature. We have also characterised two clamp systems, with one that was created only in 2021, and are currently adjusting them to achieve higher Q [80, 69, 47].

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、改良型角度センサのシミュレーション と原理実証実験を行った.シミュレーションにより、 改良型角度センサの信号強度と線形レンジが主共振 器のフィネスおよび補助共振器の動作点に依存する ことを初めて示した.また、原理実証実験では、主 共振器・補助共振器ともに PDH 法で制御し、改良 型角度センサを動作させて、角度信号増幅とビーム ジッターへの応答を観測することに成功した.

6.5.4 ダークマター探査

数々の宇宙観測によってダークマターの存在は確 実視されて、宇宙の構造形成の重要な役割を果たした ことがわかっているが、その正体は全く不明である. これまでは素粒子物理学からの強い示唆から、WIMP と呼ばれる重い粒子に探索が集中していたが、検出の 兆候は得られていない.こうした背景から、WIMP 以外の候補への関心が高まっており、質量で90桁に 及ぶ様々な候補を新しい発想によって探索すること の重要性が認識されてきた.

我々は特に超軽量ダークマターに着目し、 レーザー 干渉計を用いた探索実験を進めている. 我々は, アク シオンが質量に応じた周期で光の左円偏光と右円偏光 の位相速度を周期的に変化させること性質に着目し, テーブルトップサイズの光リング共振器を用いて軽い アクシオンを探索する手法を提案し, DANCE (Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment) 計画を 2018 年度より開始した.また,重力波望遠 鏡の線形光共振器を用いて直線偏光の偏光面回転を 調べることで,アクシオン探索を行う新手法も提案 し、本年度は KAGRA に必要な偏光光学系を導入し 2022 年 12 月中旬に開始予定の O4 観測では重 力波観測データに加え,アクシオン探索データが取 得できる見込みである.さらに,KAGRA の鏡に周 期的な力を加えるゲージボゾン探索も進めており, KAGRA の 2020 年の観測データを用いた解析を進 めている.本年度はダークマター信号の統計性を考 慮に入れた上限値の算出方法を開発し、上限値の設 定に成功した.

光リング共振器によるアクシオン探索 DANCE

DANCE(Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment) は光リング共振器を用いることで アクシオンによる直線偏光の偏光面回転を増幅し, 10⁻¹⁰ eV 程度以下のアクシオンを広帯域にわたって 探査することを目指した実験である.

本年度は昨年に製作したプロトタイプ機を用いて 12 日間のデータ取得を行い,較正・擬似信号の除去 などのデータ解析を行った.また,補助共振器を開 発することで s 偏光と p 偏光の同時共振を実現し感 度を向上させ,質量帯域 $m_a = 10^{-14} \sim 10^{-10}$ eV,結 合定数 $g_{a\gamma} > 10^{-5}$ GeV⁻¹ のアクシオン暗黒物質に 感度があることを示した.2022 年度は,現在の感度 を制限している共振器長変動雑音を制御系の改善に


図 6.5.13: 古典雑音による量子雑音低減のデモンス トレーション. 共振器の離調δに伴いディップ状に 雑音が打ち消しあい,変位測定感度が向上している.

よって低減し, 観測およびデータ解析によってアク シオン暗黒物質探索を行うことを目指す.

6.5.5 相対論・量子光学実験

オプトメカニクス研究

安東研究室では、重力波検出器の感度向上に向け た雑音低減、および巨視的量子力学の検証を目的と して、レーザー光の量子輻射圧揺らぎを観測するこ とを目指している. 我々は, mg スケールの曲率つき 微小鏡を用いて線形光共振器を組み,共振器の幾何 学的構成から微小鏡をトラップする手法を開発し, 実 現した [9, 28]. このセットアップでは、低雑音な線 形共振器でありながら,量子輻射圧揺らぎを増幅す るため共振器内パワーを増大させても、共振器を安 定的に共振させることが可能となる. 今年度, 実現 した高感度な系を用いて, 量子雑音を低減する手法を 古典雑音を注入してデモンストレーションする実験 を行い,図 6.5.13 が示すように測定の反作用雑音の 回避を実証することに成功した [2, 28]. その後,量 子輻射圧揺らぎの観測のためにさらなる高感度化を 進めるべく,微小なねじれ振り子の両端で線形共振 器組む新たな実験セットアップを計画し, mg スケー ルのねじれ振り子の開発をおこなった、今後は、実 際にねじれ振り子の両端に線形共振器を構築し、 量 子輻射圧揺らぎの観測を目指す.

<受賞>

 [1] 有冨尚紀:第16回(2022年)日本物理学会若手奨励 賞,宇宙線・宇宙物理領域(2021年11月).

<報文>

(原著論文)

[2] Yuta Michimura et al.: Ultralight dark matter searches with KAGRA gravitational wave telescope, J. of Phys.: Conf. Ser. 2156, 012071 (2022).

- [3] Koji Nagano, et al.: Axion dark matter search using arm cavity transmitted beams of gravitational wave detectors, Phys. Rev. D 104, 062008 (2021).
- [4] Yuka Oshima et al.: First observation and analysis of DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, J. of Phys.: Conf. Ser. 2156, 012042 (2021).
- [5] Hiroki Fujimoto, et al.: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment DANCE: Design and development of auxiliary cavity for simultaneous resonance of linear polarizations, J. of Phys.: Conf. Ser. 2156, 012182 (2021).
- [6] Kentaro Komori, et al.: Improving force sensitivity by amplitude measurement of light reflected from a detuned optomechanical cavity, Phys. Rev. A 104, 031501 (2021).
- [7] Takuya Kawasaki, et al.: Angular trapping of a linear-cavity mirror with an optical torsional spring, arXiv:2110.13507 (2021).
- [8] Rika Yamada et al.: Reduction of quantum noise using the quantum locking with an optical spring for gravitational wave detectors, Phys. Lett. A 402, 127365 (2021).
- Kiwamu Izumi et al.: The current status of contribution activities in Japan for LISA, PTEP 2021, 05A106 (2021).
- [10] Seiji Kawamura et al.: Current status of space gravitational wave antenna DECIGO and B-DECIGO, PTEP 2021, 05A105 (2021).
- [11] T. Akutsu et al.: Overview of KAGRA: KAGRA science, PTEP 2021, 05A103 (2021).
- [12] T. Akutsu et al.: Overview of KAGRA: Calibration, detector characterization, physical environmental monitors, and the geophysics interferometer, PTEP 2021, 05A102 (2021).
- [13] T. Akutsu et al.: Overview of KAGRA: Detector design and construction history, PTEP 2021, 05A101 (2021).
- [14] T. Akutsu et al.: Radiative Cooling of the Thermally Isolated System in KAGRA Gravitational Wave Telescope, J. of Phys.: Conf. Ser. 1857, 012002 (2021).
- [15] R. Abbott et al.: Search for continuous gravitational waves from 20 accreting millisecond xray pulsars in O3 LIGO data, Phys. Rev. D 105, 022002 (2022).
- [16] R. Abbott et al.: Constraints on dark photon dark matter using data from LIGO's and Virgo's third observing run, Phys. Rev. D 105, 063030 (2022).
- [17] R. Abbott et al.: Search for intermediate-mass black hole binaries in the third observing run of Advanced LIGO and Advanced Virgo, A & A 659, A84 (2022).

- [18] R. Abbott et al.: All-sky search for long-duration gravitational-wave bursts in the third Advanced LIGO and Advanced Virgo run, Phys. Rev. D 104, 102001 (2021).
- [19] R. Abbott et al.: All-sky search for short gravitational-wave bursts in the third Advanced LIGO and Advanced Virgo run, Phys. Rev. D 104, 122004 (2021).
- [20] R. Abbott et al.: All-sky search for continuous gravitational waves from isolated neutron stars in the early O3 LIGO data, Phys. Rev. D 104, 082004 (2021).
- [21] R. Abbott et al.: Observation of Gravitational Waves from Two Neutron Star-Black Hole Coalescences, The ApJ Lett. 915, L5 (2021).
- [22] R. Abbott et al.: Searches for Continuous Gravitational Waves from Young Supernova Remnants in the Early Third Observing Run of Advanced LIGO and Virgo, ApJ 921, 80 (2021).
- [23] R. Abbott et al.: Constraints from LIGO O3 Data on Gravitational-wave Emission Due to R-modes in the Glitching Pulsar PSR J0537-6910, ApJ 922, 71 (2021).
- [24] R. Abbott et al.: Search for anisotropic gravitational-wave backgrounds using data from Advanced LIGO and Advanced Virgo's first three observing runs, Phys. Rev. D 104, 022005 (2021).
- [25] R. Abbott et al.: Constraints on Cosmic Strings Using Data from the Third Advanced LIGO-Virgo Observing Run, Phys. Rev. Lett. 126, 241102 (2021).
- [26] R. Abbott et al.: Upper limits on the isotropic gravitational-wave background from Advanced LIGO and Advanced Virgo's third observing run, Phys. Rev. D 104, 022004 (2021).
- [27] R. Abbott et al.: Diving below the Spin-down Limit: Constraints on Gravitational Waves from the Energetic Young Pulsar PSR J0537-6910, ApJ 913, L27 (2021).

(学位論文)

- [28] 川崎拓也: Milligram-Scale Optomechanical Systems for Macroscopic Quantum Experiments, 博 士論文 (2022年3月).
- [29] 大島由佳:重力波望遠鏡 TOBA のための結合光共振 器を用いた角度信号増幅の実証,修士論文 (2022 年 3 月).
- [30] 藤本拓希: 光リング共振器を用いた超軽量アクシオン 暗黒物質探索,修士論文 (2022 年 3 月).

(著書)

[31] Masaki Ando, Chapter editor: Handbook of Gravitational Wave Astronomy, Ed. by Cosimo Bambi, and Stavros Katsanevas (Springer, 2021).

(会議集録)

- [32] Satoru Takano: Cryogenic Monolithic Interferometer for Sensing Gravity Gradient, Proc. 4th IFQMS, SE-03-δ 1-01 (2021).
- [33] Ching Pin Ooi: Suspension noise measurements of cryogenic torsion pendulums with crystaline fibrfibres, Proc. 4th IFQMS, SE-03-δ 1-02 (2021).
- [34] Yuka Oshima: Angular Sensor with a Coupled Cavity for Gravity Gradient Sensing, Proc. 4th IFQMS, SE-03- δ 1-03 (2021).
- [35] 安東正樹: 重力波望遠鏡 B-DECIGO, 第 65 回 宇宙 科学技術連合講演会 1K05 (2021 年 11 月 9 日).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [36] Masaki Ando: Gravitational Astrophysics with KAGRA and Beyond, YKIS2022a Symposium (Feb. 16th, 2022, Online).
- [37] Masaki Ando: TOBA: Ground-Based Mid.-Frequency Gravitational-Wave Antenna, 16th Marcel Grossmann Meeting (July 7, 2021, Online).
- [38] Masaki Ando: Space GW Antennae: DECIGO/B-DECIGO, GWADW2021 (May 17th, 2021, Online).
- [39] Masaki Ando: Summary of Low-Frequency Workshop, GWADW2021 (May 21st, 2021, Online).
- [40] Satoru Takano, Ching Pin Ooi, Yuka Oshima, Yuta Michimura, Masaki Ando: The Current Status of TOBA, GWADW2021 (May 21st, 2021, Online).
- 一般講演
- [41] Masaki Ando: Future Strategy Committee, 28th KAGRA Face-to-Face Collaboration Meeting (Dec. 20th, 2021).
- [42] Haoyu Wang et al.: Updates of birefringence characterization of ITMs and simulation progress, Same as above.
- [43] Haoyu Wang et al.: Updates of birefringence characterization of ITMs and simulation progress, Same as above.
- [44] Masaki Ando: Development of Human Resources for Future Projects, Same as above.
- [45] Satoru Takano: Cryogenic Monolithic Interferometer for Sensing Gravity Gradient, 4th IFQMS (Dec. 2021, online)
- [46] Yuka Oshima: Angular Sensor with a Coupled Cavity for Gravity Gradient Sensing, Same as above.
- [47] Ching Pin Ooi: Suspension Noise measurements of Cryogenic Torsion Pendulums with Crystalline Fibres, Same as above.
- [48] Masaki Ando: R&Ds for Future Upgrade and Post-O5 Planning, LVK Meeting (Sept. 9th, 2021).

- [49] Yuta Michimura et al.: Vector and Axion Dark Matter Searches with KAGRA, Same as above.
- [50] Yuta Michimura et al.: Ultralight dark matter searches with KAGRA gravitational wave telescope, 17th TAUP (Sep. 2021, Online)
- [51] Yuka Oshima: First observation and analysis of DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, Same as above.
- [52] Hiroki Fujimoto, Yuka Oshima, Masaki Ando, Tomohiro Fujita, Jun'ya Kume, Yuta Michimura, Soichiro Morisaki, Koji Nagano, Hiromasa Nakatsuka, Atsushi Nishizawa, Ippei Obata: DANCE: Searching for Axion-like particle dark matter with optical bow-tie ring cavity, The Workshop on Very Light Dark Matter 2021 (September 2021, online).
- [53] Masaki Ando: Future Strategy Committee, 27th KAGRA Face-to-Face Collaboration Meeting (Aug. 29th, 2021).
- [54] Haoyu Wang et al.: Study of birefringence effects with realistic mirror maps, Same as above.
- [55] Yuta Michimura et al.: Searching for ultralight vector dark matter with the cryogenic gravitational wave telescope KAGRA, 16th MG Meeting (2021 年7月, Online).
- [56] Yuta Michimura et al.: Searching for Signals from Ultralight Vector Dark Matter with KAGRA, 8th KIW (2021 年7月, Online).
- [57] Yuka Oshima: First test operation of DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, 16th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs (June 2021, online).
- [58] Yuta Michimura: Updates on the Optical Levitation Experiment, The 3rd QFilter Workshop (2021 年 6 月, Online).
- ポスター発表
- [59] Hiroki Fujimoto: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment DANCE: Design and development of auxiliary cavity for simultaneous resonance of linear polarizations, 17th TAUP (Sep. 2021, online).
- [60] Yuka Oshima: Design of Coupled Wave Front Sensor for TOrsion-Bar Antenna, GWADW2021 (May 21st, 2021, Online).

(国内会議)

招待講演

- [61] 道村唯太:重力波検出器によるダークマター探索,第 1回「素粒子と重力波」研究会 (2022 年 2 月,オンラ イン)
- [62] 安東 正樹: 重力波宇宙物理学の今とこれから, 新潟大 学 談話会 (2021 年 11 月 29 日, 新潟大学, リモート).
- [63] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 2021 年 第2回 CRC タウンミーティング (2021 年 9 月 7 日, リモート開催).

- [64] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 2021 年 第1回 CRC タウンミーティング (2021 年 8 月 10 日, リモート開催).
- [65] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 大型中型 計画シンポジウム (2021 年 8 月 5 日, リモート開催).

一般講演

- [66] 安東 正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (139): B-DECIGO の概要, 日本物理学会 第 77 回 年次大会 (2022 年 3 月 17 日, オンライン).
- [67] 小野將矢: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (145): 宇宙重力波望遠鏡のための双方向 Fabry-Perot 共振器の制御, 同上.
- [68] 大島由佳: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA の開発 (31): 高感度 wavefront sensor の原理実証, 同上.
- [69] Ching Pin; Ooi: Development of Phase-III TOBA for Gravitational Wave Observation (32): Q Value Measurements of Crystalline Fibre Suspensions of Cryogenic Torsion Pendulums, 同上.
- [70] 高野 哲: ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA の開発 (33): 低温モノリシック光学系の構築, 同上.
- [71] 藤本拓希: 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 (7), 同上.
- [72] 大島由佳: 高校生向け天文学実習「銀河学校 2021」 オンライン実施報告,日本天文学会 2022 年春季年会 (2022 年 3 月,オンライン).
- [73] 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7回領域会議 (2022 年1月14日, オンライン).
- [74] 道村唯太: B-DECIGO 技術サーベイ, 第 20 回 DE-CIGO ワークショップ (2021 年 12 月, オンライン).
- [75] 小野將矢: 双方向 FP 共振器の制御, 同上.
- [76] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO の実現に 向けて, 同上.
- [77] 安東 正樹: 重力波望遠鏡 B-DECIGO, 第 65 回 宇 宙科学技術連合講演会 (2021 年 11 月 9 日, オンライ ン).
- [78] 道村唯太: 超精密偏光計測が可能にする新しいダーク マター探索, さきがけ「革新光」2021 年度第 2 回領 域会議 (2021 年 10 月, オンライン).
- [79] 大島由佳: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III)の開発 (28): 高感度 wavefront sensorの原理実証,日本物理学会 2021 年秋季 大会 (2021 年9月,オンライン).
- [80] Ching Pin; Ooi: Development of Phase-III TOBA for Gravitational Wave Observation (29): Torsional Q Value Cryogenic Testing of Crystalline Suspension Fibres, 同上.
- [81] 高野 哲, Ooi Ching Pin, 大島 由佳, 道村 唯太, 安 東 正樹: ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA の開発 (30): 差動ファブリペロー干渉計の性能評価, 同上.
- [82] 安東 正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (133): B-DECIGO の概要, 同上.

- [83] 小野將矢: 宇宙重力波望遠鏡のための双方向 Fabry-Perot 共振器の制御, 同上.
- [84] 道村唯太, 他: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA を用 いた超軽量ゲージボゾンダークマター探索, 同上.
- [85] 藤本拓希: 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 (6):s 偏光/p 偏光の同時共 振に向けた補助共振器の開発, 同上.
- [86] 川崎拓也:量子輻射圧ゆらぎ観測に向けたねじれ振り 子型線形光共振器,同上.
- [87] 道村唯太: 超精密偏光計測が可能にする新しいダーク マター探索, さきがけ「革新光」2021 年度第1回領 域会議 (2021 年 6 月, オンライン).
- [88] 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回領域会議 (2021 年6月3日, オンライン).
- ポスター発表
- [89] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 第 22 回 宇宙科学シンポジウム (2022 年 1 月 6-7 日, オンラ イン).
- (セミナー・アウトリーチ講演)
- [90] Yuta Michimura: DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, ASU Cosmology Seminar (2022 年 3 月, オンライン).
- [91] Yuta Michimura: DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, CENPA Seminar (2021 年 11 月, オンライン).
- [92] 道村唯太: 光リング共振器を用いたアクシオンダーク マター探索実験 DANCE, 日本物理学会北陸支部特別 講演会 (2021 年 11 月, オンライン).
- [93] Yuta Michimura: Vector dark matter search with KAGRA, SYRTE-UTokyo DM Seminar (2021年7月, online).
- [94] Yuta Michimura: Introduction to MIF (Main Interferometer) and IOO (Input and Output Optics) Groups etc., KAGRA Subsystem Session in 2021 (2021年5月, online).
- [95] Yuka Oshima: The current sensitivity of DANCE Act-1, Paris-Tokyo Dark Matter Seminar (April 2021, online).
- [96] Hiroki Fujimoto:Control scheme and future prospects of DANCE Act-1, Paris-Tokyo Dark Matter Seminar (April 2021, online).
- [97] 道村唯太:重力波天文学・物理学の現状と未来,学習 院大学 松本研究室セミナー (2021 年 4 月, オンライン).

6.6 馬場研究室

宇宙は一見冷たく静かな世界に見えるが、実際は 高エネルギー現象に満ち満ちた世界であり、これら の理解なくして宇宙の理解には至らない。本研究室 では、宇宙の高エネルギー現象を研究対象としてい る。手法としては、高エネルギー現象が発する X 線 やガンマ線を人工衛星や地上の検出器で観測するこ とで、実験的に解明しようとしている。また、2022 年度打ち上げ予定の XRISM 衛星など、将来の高エ ネルギー天文衛星実現に向けて開発を続けている。

6.6.1 宇宙物理現象観測に関する研究

超新星残骸

超新星残骸は星が生きているうちに核融合で生成 した重元素を宇宙に供給する。その衝撃波では効率 よく宇宙線が加速されている。いわば超新星残骸は 宇宙の多様性を生み出している。また超新星残骸の 衝撃波は密度が約1H cm⁻³と非常に小さいことから 衝突ではない機構で加熱している「無衝突衝撃波」で ある。無衝突衝撃波は宇宙のあらゆるスケールに存 在する普遍的現象だが、その生成機構はよくわかっ ていない。今年度は(1)若い超新星残骸での衝撃波 環境の解明、(2) 無衝突衝撃波の加熱機構の解明の二 つの観点で研究を進めた。

(1) に関しては、西暦 1572 年に爆発したティコの 新星と西暦 1604 年に爆発したケプラーの新星の残骸 を利用した。これらは Type Ia 型と呼ばれる超新星 の残骸で、特に前者は周辺環境がクリアな状況で爆 発したと考えられてきた。我々は超新星残骸を細か く分解し、ドップラー偏移を含めた複数温度の熱的 プラズマモデルでスペクトルを解釈、その膨張を3次 元的に記述した。その結果、衝撃波直下では球対称 膨張では説明できない非常に速度幅が小さい領域が あることが判明した。これは、衝撃波が周辺の比較 的密度の高い星周物質に衝突した結果であると考え ている。ティコの新星は二つの白色矮星が合体して 爆発する double degenerate 型であると考えられて おりその場合は星周物質は存在しないと考えられて きたのが、本研究により否定され、白色矮星に伴星か ら物質が降り積もって爆発する single degenerate 型 である可能性が示唆されたのは大変興味深い。我々 はケプラーの新星の残骸でも非等方に分布する星周 '物質を発見しており [4]、Ia 型超新星残骸であっても 星周物質の存在が重要であることを示した。これら の結果は春日知明の博士論文としてまとめられてい る [18]。

また、(2)として、超新星残骸 SN1006 北西部衝撃 波を Chandra で詳細に解析し、~0.2 pc スケールで の温度変化を調べた (図 6.6.14 参照)。その結果、衝 撃波直下から下流 (内側) に行くに従いプラズマ温度 が上昇する様子を初めてとらえた [47, 48]。温度上昇 の速度はクーロン散乱によるエネルギー輸送と無矛 盾で、無衝突衝撃波のエネルギー輸送機構を解明し たと考えてよい。



図 6.6.14: Chandra 衛星による SN1006 北西部画像。 衝撃波が南東 (左下) から北西 (右上) に秒速 3000 km 程度で走っている。layer は今回解析した領域群。

この他に、超新星残骸の新たな年齢推定方法の開発 [1]、スーパーバブルでの宇宙線加速 [2]、超新星残 骸 RCW86 での shock-cloud interaction に起因した 宇宙線加速効率上昇の発見 [28] などの成果も挙げた。

中性子星

大質量 X 線連星 (High mass X-ray binary, HMXB) における降着流の研究も大きく進展した。我々は、 中性子星と大質量星の連星系である Cen X-3の観測 データを解析し、軌道位相および自転位相に伴うス ペクトル変動を詳細に調査した。軌道位相および自 転位相に伴ってスペクトルが激しく変動することが わかったが、両者の変動は全く異なる要因によるも のであった。前者は周辺物質の非一様性による星間 吸収の度合いによるもので、後者は降着物質による 逆コンプトン散乱の効率の違いによるものであるこ とが示唆された [16]。この結果は、降着物質および 連星系の周辺物質の 3 次元構造の解明につながると 期待される。さらなる詳細な観測を目指して我々は、 同天体の NuSTAR 衛星による長時間の観測を提案 し、そのデータの取得に成功した。

この他にも我々はコンパクト天体に関する複数の 成果を挙げた。ひとつは、パルサー星雲の広帯域ス ペクトルを系統的に調べることで、硬X線帯域での スペクトル折れ曲がりが普遍的に存在すること、折 れ曲がりのエネルギーがパルサーのX線放射効率に 強く依存することを発見した [26]。この理由は明ら かになっていないが、半径 10 km 程度の中性子星が 周辺数 pc にわたるパルサー星雲の放射機構に影響を 与えるという大変興味深い結果である。また、白色 矮星 (White dwarf, WD)の進化に関する新たなアイ デアも育てている。WD-WD merger は重力波源と して重要なだけでなく、重い白色矮星を形成し宇宙 の化学進化にも影響を与える可能性がある。同時に WD-WD merger 後に生成される白色矮星はダイナ

モ機構により磁場が増幅される可能性が示唆されて いる。形成された重く強磁場の白色矮星は白色矮星 パルサーとして硬 X 線で輝く可能性を示唆し [27]、 Chandra 衛星で候補天体の観測を提案した。

活動銀河核

超巨大ブラックホール (SMBH: SuperMassive Black Hole) と銀河の共進化を解明する上で、活動銀河核 (AGN: Active Galactic Nucleus) トーラスの構造の 理解は必要不可欠である。AGN トーラスの構造を解 明するため、我々は、隠された AGN の X 線観測ス ペクトルの系統解析および電波銀河の多期間 X 線観 測結果の解析に取り組んだ。

まず我々は、隠された AGN の X 線観測スペクトル の系統解析に取り組んだ。AGN の X 線スペクトル は、AGN トーラスにより吸収される透過成分、AGN トーラスによるコンプトン散乱成分、AGN トーラス からの輝線成分の3成分から構成される。隠された AGN とは、コンプトン散乱に対する光学的厚みが1 を超えるような、光学的に厚い AGN トーラスに覆わ れた AGN である。この場合、透過成分は AGN ト・ ラスにより強く光電吸収され、コンプトン散乱成分 や輝線成分が卓越するので、AGN トーラスの構造を 調べるのに最適な天体である。そこで我々は、X 線 天文衛星 Swift/BAT の全天硬 X 線掃天観測により 観測された、52 天体の隠された AGN 候補の X 線天 文衛星 NuSTAR による観測データを系統的に解析 した。その結果、我々は、52天体中28天体が真に 隠された AGN であることを同定した。また我々は、 従来の輻射制御 AGN 統一モデルでは説明出来ない、 高いエディントン比にも関わらず、高い AGN トー ラスの立体角を持つ天体を発見した [11]。

また我々は、電波銀河 Centaurus A のトーラスの 大きさとコンプトン散乱に対する光学的厚みを調べ るため、多期間 X 線観測結果の解析を行った。透過 成分とトーラスが起源と思われる鉄輝線の光度曲線 を比較し、トーラスが 2 つのスケールを持つことを 示唆する結果が得られた。さらに、コンプトン散乱 成分や輝線成分の遅れを考慮したスペクトル解析を 行い、トーラスはコンプトン散乱に対して光学的に 薄いことを確認した。

6.6.2 将来宇宙計画に関する開発

XRISM 計画

我々は JAXA-NASA 計画の XRISM mission に参加し、2022 年度打ち上げに向けた開発を進めている。 本年度は、打ち上げ直後の Performance verification 期間の観測天体選定に大きな貢献を果たした。特に超 新星残骸、星間物質など Galactic diffuse 天体の選定に は中心的役割を果たし、ブラックホールや中性子星な ど Galactic compact 天体、活動銀河核 extragalactic compact 天体の選定にも大きく貢献した。

開発においても特にプロセス・ソフトウェア分野で 貢献を続けている。XRISM 計画の観測予定天体は明 るい X 線源が多いが、搭載される X 線 CCD(Xtend) でのパイルアップ現象による観測の不正確化が問題 とされてきた。パイルアップとは、CCD の露光時間 中に複数のX線光子が1ピクセルに入射した時、そ れらの光子を分離できずエネルギーの高い1光子と して計測されてしまう現象で、非線形現象であるた め再現や較正が非常に難しい。我々はモンテカルロ シミュレーションにより明るい天体を観測した際の パイルアップ現象を再現、「すざく」衛星搭載 X 線 CCD SXIの観測データを定量的に正しく再現し、モ ンテカルロシミュレーションベースで X 線 CCD で のパイルアップ再現手法を世界で初めて確立した(業 績 [5])。現在は XRISM 搭載 X 線 CCD の地上較正 データに本手法を適用・調整中であり、打ち上げま でにはパイルアップデータの再現を定量的に完成さ せる予定である。

超小型衛星 cipher 計画

宇宙高エネルギー現象の観測手段として、技術的 フロンティアに位置付けられるのが、X 線より高い エネルギー帯域での偏光測定である。X 線偏光観測 は、X 線天文学の中心的手法である撮像分光観測に 比べて、大きく遅れており今後の発展が期待される 分野である。偏光観測がもたらす情報は極めて強力 であり、等方的な熱的放射には偏光は生じないため、 偏光は天体の放射機構を区別し、物理系のジオメトリ を含む非等方性に関する重要なプローブとなる。シ ンクロトロン・サイクロトロン放射のように磁場が 放射に関わるときは、磁場のコンフィギュレーショ ンを直接的に反映する。また降着天体では特殊およ び一般相対論的な効果により物質の高速運動や時空 構造に制限を得ることができる。

馬場研究室では、特に 10 keV 以上の硬 X 線と呼 ばれる波長域における撮像偏光測定を開拓すること を目指して、その基礎技術開発を行い、超小型衛星 計画「cipher」を推進している。その技術基盤は微小 ピクセル CMOS イメージセンサとレーザー微細加工 による符号化開口マスクであり、超小型衛星という 大きさの制限の中で、30 秒角という高い角度分解能 を実現可能である。ここ数年の開発において、10--30 keV での偏光感度と 30 秒角の符号化開口イメー ジングを実証してきた。

2021 年度は、昨年度までの個々の技術要素を組み 上げ、X線偏光撮像観測の実用化に向けた研究を推進 した。そのために、(1) CMOS センサ読み出し系の高 速化とデータ削減ロジックの開発を行い、(2) X線コ リメータと符号化開口マスクからなる光学系の設計と 製作方法を一新した。これらを用いて、(3) SPring-8 シンクロトロン放射光施設にて、天球面を模擬した 高精度の2次元偏光放射データを取得し、(4) 符号 化開口イメージングを利用した偏光撮像手法の実証 に取り組んだ。

(1) に関して、従来の読み出しシステムでは、25Mピクセル CMOS イメージセンサのデータ量の大き

さに由来する撮影時デッドタイムが問題となってお り、X線イベントの抽出ロジックを FPGA に実装す ることによって、転送データ量の削減を行い、デッ ドタイムを4%程度 (1 フレームの露光時間を1秒に 設定した場合)に抑えることに成功した。(2)につい ては、金属3Dプリンタやフェムト秒レーザー金属 加工の技術を新らたに利用することで高精度な光学 系の製作を実現している。

(3)のSPring-8実験は、中尺ビームラインの大面積 平行光ビームを用いて遠方天体観測を模擬したもの である。複数偏光角に対する複数方向のデータセッ トを取得し、このデータを適切に組み合わせること で、任意の偏光特性を持つ広がった天体の X 線デー タを生成することが可能である。(4) では SPring-8 実験のデータを用いて、2次元偏光撮像解析を実施 した。符号化開口イメージングでは再構成画像に現 れる偽像が問題になりうるが、開口マスクの射影レ スポンスを正確に統計モデルに取り込み、EM アル ゴリズムによる最適化を行うことで、偽像を大きく 低減できる。私たちは、このアルゴリズムを偏光情 報に拡張し、偏光撮像解析の実証に成功した。これ らの成果は、センサ読み出しから偏光撮像解析結果 の出力までの全データフローを確立したことを示し ており、その詳細は渡邊泰平の修士論文としてまと められた [19]。

GRAMS 計画

観測天文学における未開拓の電磁波帯域である中 間エネルギーガンマ線、すなわち 0.1–10 メガ電子 ボルト (MeV)の帯域には、原子核が放出するライン ガンマ線が存在し、超新星爆発や連星中性子星の合 体、ブラックホールなどの高エネルギー天体におけ る核反応の唯一の直接的プローブを提供する。我々 は、MeV ガンマ線天文学開拓のため、液体アルゴン Time Projection Chamber (LArTPC)を気球に搭載 して、同一検出器で反重陽子検出によるダークマター 間接探索とコンプトンカメラによる MeV ガンマ線 観測を同時に行なう GRAMS 実験を日米国際協力の もと推進している。検出器媒体に液体を用いること で、高密度かつ大容量の充填が可能となり、これま でにない大有効面積が実現できる。

現在、気球実験プロジェクトの立ち上げのために、 ハードウェア開発、解析アルゴリズムの開発、サイエ ンス戦略の3本柱で基礎的な研究開発を進めており、 2021 年度の活動内容を以下に述べる。ハードウェア 開発では、早稲田大学のANKOK 暗黒物質直接探索 実験の液体アルゴン検出器設備を利用して、純化シ ステムの作動状況に対するシンチレーション光と電 子読み出しの評価を行い、GRAMS に必要な純化設 備の設計に必要な基礎データを取得した。また、馬 場研実験室に GRAMS プロトタイプ機のための液体 アルゴン試験装置を建設するため、その詳細設計を 進めた。LArTPC によるコンプトンカメラ本体の設 計も進めている。

ソフトウェアの面では、GRAMS コンプトンカメ ラのコンセプトの根幹となる多重コンプトンイベン トの再構成アルゴリズム開発を進め、具体的な光子の 物理過程とその測定過程を考慮した確率モデルとシ ミュレーションに基づく深層学習モデルの2つを完 成させた。サイエンスの戦略の検討に向けて、GeVガ ンマ線天体カタログと硬X線カタログのクロスマッ チによる MeV ガンマ線候補天体の抽出、銀河系内拡 散放射のモデル化を行い、MeV ガンマ線全天モデル の構築を行った。これを用いることで、定量的な性 能予測を行い、具体的な観測計画を立案可能になる。

<報文>

(原著論文)

- H. Suzuki, A. Bamba, and S. Shibata, "Quantitative Age Estimation of Supernova Remnants and Associated Pulsars", ApJ, 914, 103 (2021)
- [2] Y. Yamane, H. Sano, M. D. Filipovic, K. Grieve, K. Tokuda, K. Fujii, Y. Babazaki, I. Mitsuishi, T. Inoue, F. Aharonian, T. Inaba, S. Inutsuka, N. Maxted, N. Mizuno, T. Onishi, G. Rowell, K. Tsuge, F. Voisin, S. Yoshiike, T. Fukuda, A. Kawamura, A. Bamba, K. Tachihara, and Y. Fukui, "Associated molecular and atomic clouds with X-ray shell of superbubble 30 Doradus C in the LMC", ApJ, 918, 36 (2021)
- [3] H. Suzuki, P. Plucinsky, T. Gaetz, and A. Bamba, "Spatial and Temporal Variations of the Chandra ACIS Particle-Induced Background and Development of a Spectral-Model Generation Tool", A&A, 655, A116 (2021)
- [4] T. Kasuga, J. Vink, S. Katsuda, H. Uchida, A. Bamba, T. Sato, and J. P. Hughes, "Spatially Resolved RGS Analysis of Kepler' s Supernova Remnant", ApJ, 915, 42 (2021)
- [5] T. Tamba, H. Odaka, A. Bamba, H. Murakami, K. Mori, K. Hayashida, Y. Terada, T. Mizuno, and M. Nobukawa, "Simulation-based spectral analysis of X-ray CCD data affected by photon pile-up", PASJ (2022)
- [6] K. Makishima, T. Tamba, Y. Aizawa, H. Odaka, H. Yoneda, T. Enoto, and H. Suzuki, "Discovery of 40.5 ks Hard X-ray Pulse-Phase Modulations from SGR 1900+14", PASJ, 923, 63 (2021)
- [7] R. Uematsu, Y. Ueda, A. Tanimoto, T. Kawamuro, K. Setoguchi, S. Ogawa, S. Yamada, and H. Odaka, "X-ray Constraint on Location of AGN Torus in Circinus Galaxy", ApJ, 913, 1 (2021)
- [8] Y. Terada, M. Holland, M. Loewenstein, M. Tashiro, H. Takahashi, M. Nobukawa, T. Mizuno, T. Tamura, S. Uno, S. Watanabe, C. Baluta, L. Burns, K, Ebisawa, S. Eguchi, Y. Fukazawa, K. Hayashi, R. Iizuka, S. Katsuda, T. Kitaguchi, A. Kubota, E. Miller, K. Mukai, S. Nakashima, K. Nakazawa, H. Odaka, M. Ohno, N. Ota, R. Sato, M. Sawada, Y. Sugahara, M. Shidatsu, T. Tamba, A. Tanimoto, Y. Terashima, Y. Tsuboi, Y. Uchida,

H. Uchiyama, S. Yamauchi, and T. Yaqoob, "Detailed Design of the Science Operations for the XRISM mission", JATIS, 7, 037001 (2021)

- [9] S. Yamada, Y. Ueda, A. Tanimoto, M. Imanishi, Y. Toba, C. Ricci, and G. Privon, "Comprehensive Broadband X-ray and Multiwavelength Study of Active Galactic Nuclei in Local 57 Ultra/luminous Infrared Galaxies Observed with NuSTAR and/or Swift/BAT", ApJS, 257, 61 (2021)
- [10] A. Jana, C. Ricci, S. Naik, A. Tanimoto, N. Kumari, H. Chang, P. Nandi, A. Chatterjee, and S. Safi-Harb, "Absorption Variability of the Highly Obscured Active Galactic Nucleus NGC 4507", MNRAS, in press (2022)
- [11] A. Tanimoto, Y. Ueda, H. Odaka, S. Yamada, and C. Ricci, "NuSTAR Observations of 52 Compton-thick Active Galactic Nuclei Selected by the Swift/BAT All-sky Hard X-Ray Survey", ApJS, in press (2022)
- [12] N. Numadate, S. Oishi, H. Odaka, Priti, M. Sakurai, T. Takahashi, Y. Tsuzuki, Y. Uchida, H. Watanabe, S. Watanabe, H. Yoneda, N. Nakamura, N., "Polarization measurement of L -shell radiative recombination x rays from highly charged bismuth ions", Phys. Rev. A, 105, 023109 (2022)
- [13] Y. Tsuzuki, S. Watanabe, S. Oishi, N. Nakamura, N. Numadate, H. Odaka, Y. Uchida, H. Yoneda, T. Takahashi, "An application of a Si/CdTe Compton camera for the polarization measurement of hard x rays from highly charged heavy ions", Review of Scientific Instruments, 92, 063101 (2021)
- [14] N. Tsuji, H. Yoneda, Y. Inoue, T. Aramaki, G. Karagiorgi, R. Mukherjee, H. Odaka, "Crossmatch between the latest Swift-BAT and Fermi-LAT catalogs", ApJ, 916, 28 (2021)
- [15] M. Mizumoto, N. Nomura, C. Done, K. Ohsuga, H. Odaka, "UV line-driven disc wind as the origin of UltraFast Outflows in AGN", MNRAS, 503, 1442 (2021)

(会議抄録)

[16] T. Tamba, H. Odaka, A. Bamba, A. Tanimoto, S. Takashima, H. Suzuki, IAU Symposium 363 proceeding (2022)

(国内雑誌)

[17] 馬場彩、浅井歩、石川遼子、佐藤浩介、信川正順、野村英子、古澤久徳、町田真美、「天文学会男女共同参画20年の歩み -天文学会アンケートから学ぶー」、 天文月報、2021年11月号、688-695、日本天文学会

(学位論文)

[18] 春日知明, "An observational study of ejecta in supernova remnants using spatially resolved X-ray spectroscopy", Ph.D. thesis [19] 渡邊泰平,「CMOS イメージセンサを用いた X 線撮 像偏光計の性能評価およびデータ処理系の開発」,学 位修士論文

(著書)

[20] 馬場彩 (著)、河村万理 (作画)、オフィス sawa(制作)、 「マンガでわかる物理数学 (韓国語版)」、2021 年、ISBN 978-89-315-5782-4, 9788931557824

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [21] T. Tamba, H. Odaka, A. Bamba, A. Tanimoto, S. Takashima, and H. Suzuki, "Probing accretion flow structure of the HMXB Centaurus X-3 through Xray spectral variability", IAU Symposium 363, online, 2021, Nov. 29–Dec. 3
- [22] A. Tanimoto, Y. Ueda, H. Odaka, S. Yamada, and C. Ricci, "NuSTAR Observations of 52 Comptonthick Active Galactic Nucleus Candidates Selected by the Swift/BAT All-sky Hard X-Ray Survey", European Astronomical Society 2021, online, June. 28–July. 2
- [23] A. Tanimoto, Y. Ueda, H. Odaka, S. Yamada, and C. Ricci, "NuSTAR Observations of 52 Comptonthick Active Galactic Nucleus Candidates Selected by the Swift/BAT All-sky Hard X-Ray Survey", East-Asia AGN Workshop 2021, online, October. 11–13

招待講演

- [24] A. Bamba, "Particle acceleration on shocks of supernova remnants", "High-resolution X-ray spectroscopy of cosmic plasmas", online, 2021. Dec. 13–17
- [25] A. Bamba, "Understanding the origin of supernova remnants with plasma diagnostics", "50 years astronomical X-ray spectroscopy in the Netherlands", online, 2022, Jan. 17–19

(国内会議)

一般講演

- [26] 馬場 彩、「パルサー星雲広帯域スペクトルの系統解析」、日本天文学会秋季年会、オンライン、2021年9月13-15日
- [27] 馬場 彩、「単独白色矮星パルサーの探索作戦」、「2021 年冬季「中性子星・超新星残骸及び関連天体」研究 会」、オンライン、2021年12月21日
- [28] 馬場 彩、「超新星残骸 RCW86 東部における分子雲
 と X 線放射の比較」、「SNR workshop 2022」、オン
 ライン、2022 年 3 月 28–29 日
- [29] 小高裕和、「GRAMS MeV ガンマ線観測・ダーク マター探索気球実験」、高宇連ワークショップ、2021 年7月19日、オンライン

- [30] 小高裕和、「GRAMS」、日本学術会議・天文学宇宙物 理学分科会 大型中型計画シンポジウム、2021 年 8 月 10 日、オンライン
- [31] 小高裕和、「GRAMS MeV ガンマ線観測・ダークマ ター探索気球実験」、CRC タウンミーティング、2021 年9月7日、オンライン
- [32] 小高裕和、谷本敦、都丸亮太、水本岬希、「モンテカ ルロ X 線放射輸送コード MONACO の光電離モデ ル」、日本天文学会秋季年会、2021 年 9 月 13 日、オ ンライン
- [33] 小高裕和、高嶋聡、南木宙斗、馬場彩、青山一天、岩澤 広大、木村眞人、櫻井真由、田中雅士、中曽根太地、寄 田浩平、早稲田大、一戸悠人、井上芳幸、辻直美、米田浩 基、Tsuguo Aramaki、Georgia Karagiorgi、Reshmi Mukherjee、GRAMS コラボレーション、「GRAMS 実験 5: 全体報告」、日本物理学会・秋季大会 2021 年 9月16日、オンライン
- [34] 小高裕和、「モンテカルロ放射輸送コード MONACO によるブラックホール X 線放射の研究」、超巨大ブ ラックホール研究会:その実態・影響・起源の全貌解 明に向けて、2021 年 12 月 27 日、オンライン
- [35] 小高裕和、渡邊泰平、丹波翼、岩田季也、市橋正裕、 谷本敦、高嶋聡、春日知明、南木宙斗、馬場彩、神谷 好郎、長澤俊作、南喬博、高橋忠幸、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 V」、日本天文学会春季年会、2022 年 3 月 4 日、オンライン
- [36] 小高裕和、高嶋聡、丹波翼、南木宙斗、馬場彩、八幡和志、青山一天、岩澤広大、櫻井真由、田中雅士、中曽根太地、寄田浩平、一戸悠人、Dmitry Khangulyan、井上芳幸、内田悠介、須田祐介、高橋弘允、深沢泰司、大野雅功、辻直美、米田浩基、広島渚、Tsuguo Aramaki、Georgia Karagiorgi、Reshmi Mukherjee、GRAMS コラボレーション、「GRAMS 実験 8: ステータス報告」、日本物理学会・年次大会、2022 年 3月17日、オンライン
- [37] 丹波翼、小高裕和、谷本敦、鈴木寛大、高嶋聡、馬場 彩、「大質量 X 線連星 Cen X-3 の軌道位相に伴う放 射機構の変化」、日本天文学会 2021 年秋季年会、オ ンライン、2021 年 9 月 13 日–15 日
- [38] 丹波翼、小高裕和、馬場彩、村上弘志、森浩二、林田清、 寺田幸功、信川正順、水野恒史、XRISM MOPT、「モ ンテカルロシミュレーションを用いた X 線 CCD 検 出器のパイルアップ天体データの解析」、日本物理学会 第 77 回年次大会、オンライン、2022 年 3 月 15–19 日
- [39] 高嶋聡、小高裕和、馬場彩、米田浩基、一戸悠人、寄 田浩平、田中雅士、木村眞人、青山一天、岩澤広大、 櫻井真由、中曽根太地、井上芳幸、辻直美、GRAMS コラボレーション、「GRAMS 実験 6: マルチタスク 深層学習によるイベント再構成手法の開発」、日本物 理学会第 76 回年次大会、オンライン、2022 年 3 月 14-17 日
- [40] 春日知明、内田裕之、前田啓一、Shiu-Hang Lee、田 中孝明、Gilles Ferrand、長瀧重博、馬場彩、小高裕和 「特性 X 線のドップラー解析による Tycho の超新星 残骸における噴出物の膨張構造の解明」、日本天文学 会 2022 年春季年会、オンライン、2022 年 3 月 2–5 日

- [41] 春日知明、「超新星残骸のX線観測による爆発噴出物の研究」、第21回高宇連研究会、大阪大学豊中キャンパス、2022年3月9-11日
- [42] 岩田季也、「NuSTAR による Centaurus A の硬 X 線 反射成分の解析」、「2021 年度 第 51 回天文・天体物 理若手夏の学校」、オンライン、2021 年 8 月 23 日-26 日
- [43] 岩田季也、谷本敦、小高裕和、馬場彩、井上芳幸、「NuS-TAR による Centaurus A の硬 X 線時間変動の調査」、 日本天文学会 2021 年秋季年会、オンライン、2021 年 9月13日-15日
- [44] 岩田季也、谷本敦、小高裕和、馬場彩、井上芳幸、「NuS-TAR・Suzaku の多期間観測データによる Centaurus AのX線時間変動解析」、「第5回 FORCE 研究会 埋もれた AGN の宇宙論的進化」、京都大学、2021年 12月2日-4日
- [45] 岩田季也、谷本敦、小高裕和、馬場彩、井上芳幸、「NuS-TAR・Suzaku の多期間観測データによる Centaurus AのX線時間変動解析」、「ブラックホールジェット・ 降着円盤・円盤風研究会 2022」、オンライン、2022年 1月24日-25日
- [46] 岩田季也、小高裕和,、丹波翼、渡邊泰平、春日知明、 高嶋聡、南木宙斗、市橋正裕、谷本敦、馬場彩、神谷 好郎、高橋忠幸、長澤俊作、南喬博、渡辺伸、成影典 之、「CMOS イメージャを用いた X 線偏光撮像シス テムの開発 X:X 線偏光撮像実験」、日本物理学会第 77 回年次大会、オンライン、2022 年 3 月 15–19 日
- [47] 岩田季也、「X 線衛星 Chandra による SN1006 北西 部衝撃波の 空間分解スペクトルの解析」、「2021 年度 第 51 回天文・天体物理若手夏の学校」、オンライン、 2021 年 8 月 23 日-26 日
- [48] 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、「X 線衛星 Chandra に よる SN1006 北西部衝撃波の空間分解スペクトルの 解析」、日本天文学会 2021 年秋季年会、オンライン、 2021 年 9 月 13 日-15 日
- [49] 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、「Chandra の空間分解スペクトル解析による無衝突衝撃波通過後の電子加熱の検証」、高エネルギー宇宙物理学研究会 2021、オンライン、2021 年 11 月 24 日-26 日
- [50] 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、「Chandra による SN1006 北 西部衝撃波の空間分解解析:重元素分布と電子温度」、 日本天文学会 2022 年春季年会、オンライン、2022 年 3 月 2 日-5 日
- [51] 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、「SN1006 北西部衝撃波の 空間構造解析」、SNR workshop 2022、オンライン、 2022 年 3 月 28 日–29 日
- [52] 谷本敦、上田佳宏、小高裕和、山田智士、Claudio Ricci、 「NuSTAR Observations of 52 Compton-thick Active Galactic Nucleus Candidates Selected by the Swift/BAT All-sky Hard X-Ray Survey」、「第 5 回 FORCE 研究会 埋もれた AGN の宇宙論的進化」、京 都大学、2021 年 12 月 02 日一04 日

[53] 谷本敦,小高裕和、「X-Ray Spectral Model from Photoionized Outflow and Its Application to NGC 3783」、「ブラックホールジェット・降着円盤・円盤 風研究会 2022」、オンライン、2022 年 01 月 24 日-25 日

招待講演

[54] 馬場彩、「超小型衛星を用いた X 線天文観測」、「宇宙 理工学連携研究機構シンポジウム「宇宙理工学の現状 と未来を語る」」、オンライン、2021 年 4 月 26 日

(セミナー)

- [55] Hirokazu Odaka, "Introduction to MeV gammaray astronomy", Lunch seminar, Kavli IPMU, November 19, 2021
- [56] Hirokazu Odaka, "Monte Carlo radiative transfer code MONACO for X-ray astronomy: the framework design and its applications to molecular clouds, black holes, and neutron stars", Seminar at Department of Astronomy, University of Tokyo, November 30, 2021
- [57] 春日知明、「世界初の硬 X 線偏光イメージングを超小 型衛星で実現したい」、京都大学大学院理学研究科 物 理学・宇宙物理学専攻 物理学第二教室 宇宙線研究室 コロキウム、京都大学吉田キャンパス、2021 年 11 月 17 日

6.7 日下研究室

宇宙は高温高密度の原始宇宙から始まり、膨張・冷却 を経て現在に至るとされる。日下研究室では、宇宙マ イクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background radiation, CMB)の観測を通じて、この高温高密度の 原始宇宙がどうやって作り出されたのかを調べ、宇 宙の進化が何によって支配されているのか、宇宙物 理の、そして素粒子物理の根本にも関わりうる謎を 解き明かすことを目指している。

インフレーション仮説によれば、宇宙創成10⁻³² 秒 の間に時空の加速度的膨張が起き、高温高密度の原 始宇宙が作られた。この仮説の決定的証拠となるの が重力場の量子ゆらぎに起因する「原始重力波」で ある。この重力波が、「Bモード」と呼ばれる負のパ リティを持つパターンを、CMBのおよそ2度の角度 スケールに刻印する。我々が探索するこのパターン が検出されれば、インフレーション宇宙論を証明す るだけでなく、重力の量子化の確認という、現代物 理学における一大ブレークスルーとなる。

一方、CMBの精密測定を通して未知の粒子の探索 と宇宙進化メカニズムの解明も目指している。地球 に届く過程で、CMBは「暗黒物質」による重力レンズ 効果の影響を受ける。この効果を測定することで、宇 宙進化を探り、それに影響を及ぼす「宇宙背景ニュー トリノ」の質量を測定することが出来る。また、CMB が銀河団を通過する際には、そこに分布する高エネ ルギー電子との相互作用により周波数スペクトルに ゆがみが生じる。これはSunyaev-Zel'dovich (SZ) 効 果と呼ばれ、この効果を CMB 観測を通して測定す ることで、銀河団の分布図を作り、宇宙進化、そして それを司る暗黒エネルギーや宇宙背景ニュートリノ を探ることが出来る。重力レンズ効果や SZ 効果は、 インフレーションとは異なり、より小さな1~3分 角の角度スケールに現れる。

我々は、チリ・アタカマ高地で観測を継続してきた POLARBEAR 実験、その後継である Simons Array 実 験を通して研究を進めてきた。これに加えて、Simons Array と Atacama Cosmology Telescope (ACT)の グループを統合して発足した Simons Observatory 実 験においても、2023 年の観測開始へ向けた設計・開 発を進めている。

6.7.1 Polarbear 実験

POLARBEAR 実験は、インフレーション測定と重 カレンズ効果の両方を同時に測定する事を目指して デザインされている。POLARBEAR 実験は 2012 年か ら 2016 年末まで観測を行い、これまでに 10 報以上 の科学論文を出版してきた。データ解析の進展とし ては、2020 年に報告したインフレーション測定に特 化したワイド観測データの再解析を行った結果、統 計量を約 80%向上させることに成功した [1]。その 他現在までに、CMB 偏光データの AC oscillation を 使った Axion-like particle (ALP) への制限解析、ワ イド観測データによる宇宙論的複屈折解析や宇宙論 的円偏光への制限解析が進められている。

6.7.2 Simons Array 実験

Simons Array 実験は POLARBEAR 実験の後継であ り、POLARBEAR のおよそ6倍に当たる一台あたりお よそ7,000 チャンネルの検出器を擁する望遠鏡を、最 終的に合計3台同時運用することで POLARBEAR 実 験の約20倍の感度を実現することを目指している。

2020年度に引き続き 2021年度も、世界的な新型 コロナウイルスの流行による影響が、観測や現場作 業に支障を来してきた。そんな中でも観測サイトの エンジニアと連携しながら、既に運用が始まってい る1台目の望遠鏡による較正観測・科学観測を可能 な限り進めてきた。これまでのデータ解析により検 出器の感度・ノイズ特性、ゲイン、時定数、偏光角、更 に望遠鏡のビーム・指向性能評価等の初期パラメー タの決定を行った。また一部の CMB 観測データを 元に「ベンチマークデータセット」を定義し、観測 データの理解と B モード解析パイプラインの開発を 進めている。特に観測された時系列データをフィル タリングすることで生じる E モードから B モード への漏れ込みを、「観測行列」を元に導出した「純 B モード固有ベクトル」によって分離・除去する手法 を開発している。

また1台目と並行して、2台目の望遠鏡の準備も 進められたきた。本研究室においても、国内外の共 同研究者らとともに光学系の反射防止膜の測定・検 証を行い、その後チリへの輸送を完了させた。現在 は 2022 年度中の観測開始に向けて、準備が進められ ている。

6.7.3 Simons Observatory 実験

Simons Observatory は、2016年に発足した史上最 大規模の地上 CMB 実験・国際共同研究グループで あり、当研究室もその推進に中心的な役割を果たす。 Simons Observatory 実験においては、インフレー ション測定における感度向上に特化した口径 42 cm 程度の小口径望遠鏡群と、重力レンズ効果や SZ 効 果の測定を主眼に置いた口径 6 m の大口径望遠鏡と の両方を建設し、これまでの測定を遙かに上回る精 度で CMB を測定し、宇宙の始まりから進化までの 姿を解き明かす。

望遠鏡作成においては、本研究室では、特に小口径 望遠鏡群に注力して開発を行ってきた。Kavli IPMU の共同研究グループとともに、光学設計および光学 筒の設計を進め、直径 460 mm の単結晶シリコンレ ンズを有する屈折光学系を採用し、光学筒自身から の熱放射を抑えるため1K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100mK 以下まで冷却される。本研究室では、これまでに開 発してきた光学鏡筒に加えて細い金属線を偏光光源 とした校正装置を開発した (図??)。本研究室と京都 大学の修士学生が主体となって共同開発を行い、遠 隔かつ自動で校正が可能なシステムを構築した。す でに、試作機をシカゴ大学とカリフォルニア大学サ ンディエゴ校に提供して校正データの取得と解析を 進めており、観測に向けて 2022 年度初期に完成させ 望遠鏡との統合試験を予定している。

また、偏光変調のための冷却型連続回転式半波長 板システムの開発において本研究室は世界の先端を 走っており、Kavli IPMU との共同研究により開発 した世界最大の内径 55 cm の超伝導べアリングは、 Simons Observatory に採用され、1 台目の望遠鏡シ ステムへの統合・評価を進めている。2021 年度には 2 台目の半波長板システムを完成させ (図 6.7.17)、本 研究室大学院生がプリンストン大学に二ヶ月間滞在 望遠鏡との統合を行なった。大口径サファイア L. を3枚積層し、防反射加工を施した半波長板光学素 子についても、Kavli IPMU および KEK との共同 で開発を進め、1台目分の光学素子作成を完了した。 現在、3台目の作成を順調に進めると共に、非接触 による位置・温度計測システムや、位相補償により モーターの効率を大きく向上する仕組みの開発など、 観測開始に向けた性能向上を進めている。

データ解析においては、2023 年の観測開始と早期 の結果報告を目標に、パイプラインの開発を進めて きた。特に小口径望遠鏡群にによるインフレーショ ン測定データを解析する「Bモードパイプライン」の 開発を、共通する要素を多く含む Simons Array の パイプライン開発と連携させながら進めている。ま た、パイプライン開発、及びシカゴ大学やカリフォ ルニア大学サンディエゴ校での試験データの解析を 行うために、計算機 (64 コア CPU、1TB メモリ)を 新たに導入した。



図 6.7.15: KEK および KavliIPMU と共同で Simons Observatory 実験用の低温反射防止膜を開発し、光 学特性を KavliIPMU にて測定した。



図 6.7.16: 京都大学と共同で Simons Observatory 実 験用に偏光校正装置を開発した。自動で校正する機 構を有している。



図 6.7.17: Kavli IPMU、岡山大学と共同で作成した 2 台目半波長板システム。

6.7.4 次世代 CMB 実験用 装置開発

超伝導体を用いた検出器として、超伝導力学的イ ンダクタンス検出器および超伝導転移端センサが挙 げられるが、いずれも従来の半導体検出器などでは達 成不可能だった高感度・多チャンネル化が達成でき る。CMB 観測実験、暗黒物質探索実験を始め、素粒 子・宇宙分野の実験でも採用例が増加している。こ れまでに、希釈冷凍機を利用した検出器の試験環境を 構築し超伝導検出器の測定・評価を行ってきた。新 たに、CMB 実験用検出器のミリ波応答を評価するた め、冷凍機内に設置可能な黒体光源を開発し黒体光源 の温度を調節することで実際の空からの放射を模擬 しその光学応答を評価した。また、暗黒物質探索等 をめざす単一光子検出器開発では、作製した素子に約 900 nm 程度の赤外 LED を照射しその応答を取得・ 評価した。光学素子の分野においては、半波長板用 サファイアや赤外光フィルタ用アルミナなど、高屈折 率素材のための広帯域防反射加工の開発を、高エネル ギー加速器研究機構および Kavli IPMU との共同研 究により進めている。ムライト溶射とプラスチック 素材を用いた二層防反射加工を確立し、90~160 GHz 帯に加えて 200~300 GHz 帯についても開発を進め た他、低温での誘電損失の評価も行なった。また、 30~40 GHz 帯のための三層の防反射加工の開発も進 めている。

<報文>

(原著論文)

- The POLARBEAR Collaboration, "Improved upper limit on degree-scale CMB *B*-mode polarization power from the 670 square-degree POLARBEAR survey," arXiv:2203.02495 (Mar 2022)
- [2] Maximilian H. Abitbol, et al., "The Simons Observatory: gain, bandpass and polarization-angle calibration requirements for *B*-mode searches," JCAP05(2021)032 (May 2021)
- [3] Toshiya Namikawa, et al., "Simons Observatory: Constraining inflationary gravitational waves with multitracer B-mode delensing," Physical Review D, 105, 023511 (Jan 2022)
- [4] Kevork Abazajian, et al., "CMB-S4: Forecasting Constraints on Primordial Gravitational Waves," ApJ 926 54 (Feb. 2022)
- [5] Kevin D Crowley, et al., "The Simons Observatory: Design and Measured Performance of a Carbon Fiber Strut for a Cryogenic Truss," arXiv:2201.06094 (Jan. 2022)
- [6] Heather McCarrick, et al., "The Simons Observatory Microwave SQUID Multiplexing Detector Module Design," ApJ 922 38 (Nov. 2021)

(国内雑誌)

[7] 茅根 裕司, 西野 玄記, "宇宙マイクロ波景放射による インフレーション起源重力波観測–POLARBEAR 実験 と次の 10 年の展望,"日本物理学会, 第6号, 2021 年 (学位論文)

- [8] 坂栗佳奈, "CMB 偏光観測に用いる反射防止膜の開発,"修士論文 (2022/01)
- [9] 寺崎友規, "軽い暗黒物質探索と宇宙マイクロ波背景 放射 (CMB) 観測のためのマイクロ波多重読出しを 用いた超伝導検出器の開発,"修士論文 (2022/01)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] K. Yamada, et al., "Development of inductively coupled position and temperature sensors for cryogenic rotating half wave plate," The 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD19), オンライン開催 (2021/7)
- [11] Yume Nishinomiya, et al., "Development of the characterization methods for tes bolometers for cmb measurements," The 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD19), オンライン開催 (2021/7)
- [12] Kana Sakaguri, et al, "Broadband multi-layer Anti-reflection coatings with mullite and duroid used for half wave plate and alumina filter for CMB polarimetry," The 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD19), オンライン 開催 (2021/7)
- [13] Tomoki Terasaki, et al., "Development of Al-Nb hybrid Lumped-Element Kinetic Inductance Detectors for infrared photon detection," The 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD19), オンライン開催 (2021/9)

招待講演

[14] Yuji Chinone, "POLARBEAR/Simons Array," Cosmoglobe Kickoff Meeting, University of Oslo, Online, June 2021

(国内会議)

一般講演

- [15] 茅根 裕司 他, "インフレーション起源 B モード検出 に向けた E/B モード分手法の開発,"日本天文学会 2021 年秋季年会, オンライン開催 (2021/09)
- [16] 木内 健司 他, "Simons Observatory 実験の概要と 開発状況,"日本物理学会第 76 回年次大会, Online (2021/03)
- [17] 山田恭平,他 POLARBEAR コラボレーション、"Simons Array 実験における惑星観測による検出器評 価,"日本天文学会 2021 年秋季年会、オンライン開 催 (2021/9)
- [18] 山田恭平,他 Simons Observatory Collaboration, "Simons Observatory 実験の低温半波長板回転機構 の性能評価,"日本物理学会 2021 年秋季大会,オンラ イン開催 (2021/9)

- [19] 西ノ宮ゆめ, 他, Simons Observatory Collaboration, "CMB 偏光観測に用いる TES ボロメータの時定数 測定,"日本物理学会 2021 年秋季大会, オンライン開 催 (2021/3)
- [20] 西ノ宮ゆめ、他 POLARBEAR コラボレーション、
 "Simons Array 実験における電波天体観測による望遠鏡の視線方向評価,"日本物理学会第 77 回年次大会、オンライン開催 (2022/9)
- [21] 坂栗佳奈、他,"低温で用いるサファイア・アルミナ の広帯域・多層反射防止膜製作,"日本物理学会 2021 秋季大会,オンライン開催 (2021/3)
- [22] 坂栗佳奈、他, "CMB 観測に用いるサファイア・アル ミナ用反射防止膜の低温性能評価,"日本物理学会第 77 回年次大会, オンライン開催 (2022/9)
- [23] 村田雅彬、他, "Simons Observatory 実験に搭載する ワイヤーグリッドを用いた偏光角較正装置の光学試 験状況,"日本物理学会 2021 年秋季大会, オンライン 開催 (2021/3)
- [24] 村田雅彬、他, "Simons Observatory 実験に搭載する ワイヤーグリッドを用いた偏光較正装置の光学試験 結果,"日本物理学会第 77 回年次大会, オンライン開 催 (2022/9)
- [25] 杉山純菜、他, "CMB 偏光観測実験に用いるアクロ マティック半波長板の設計と性能評価,"日本物理学 会 2021 秋季大会, オンライン開催 (2021/3)
- [26] 杉山純菜、他, "Simons Observatory 実験に用いる変 調器の開発," 日本物理学会第 77 回年次大会, オンラ イン開催 (2022/9)
- [27] 寺崎友規、他, "CMB 偏光観測用マイクロ波多重読み 出し回路の測定,"日本物理学会 2021 秋季大会,オン ライン開催 (2021/3)
- [28] 寺崎友規、他,"単一光子検出用集中定数型力学的インダクタンス検出器の開発,"日本物理学会第77回年次大会,オンライン開催 (2022/12)

招待講演

- [29] 茅根 裕司, "Synergies between ALMA/LST and wide-field high-cadence CMB surveys," Synergies between ALMA and wide-field high-cadence multiwavelength surveys, Online (2022/03)
- [30] 茅根 裕司, "次世代地上実験による広天域・高精度・ 高頻度 CMB 偏光観測と将来の素粒子・宇宙論解析," Upcoming CMB Observations & Cosmology, 京都 大学, 京都 (2022/03)
- (セミナー)
- [31] Yuji Chinone, "The search for primordial gravitational waves from cosmic inflation with CMB experiments in the Atacama desert and space," KMI Colloquium, Nagoya University, Nagoya, Japan (2021/12)

6.8 竹内研究室

自然界には、本質的に非平衡な現象が数多く存在 する。日常的な現象をとってみても、気象を司る気 流や海流のダイナミクス、空や大地を彩る様々な自 己組織構造の形成、生物の存在や、それを支える種々 の生命活動など、例の枚挙にいとまがない。これら はすべて、非平衡な状況で相互作用する自由度が数 多く集まった結果、マクロスケールで非自明な性質 が発現している典型例である。このような非平衡現 象を扱う熱力学・統計力学の枠組みは発展途上にあ り、その構築は現代科学に課された大きな未解決問 題と言えるだろう。

近年は、学際的な流れも本格化している。例えば、 非平衡で広く成り立つ「ゆらぎの定理」や「熱力学的 不確定性関係」は、非平衡ゆらぎの基本的性質の理解 を深化させただけでなく、生体分子モーターなどの 具体的問題に切り込む力となっている。自力で動く 粒子集団を扱うアクティブマター物理学は、液晶理 論と統計力学の融合により基礎学理が整備され、生 体分子集団から細胞組織、微生物集団に至る様々な 対象において、普遍的な物理学の存在を描き出した。

こうした背景のもと、竹内研究室では、大自由度 の非平衡現象を支配する物理法則の理解を目指して、 液晶・粉体などのソフトマターや、バクテリアなどの 微生物を用いた様々な実験課題を展開している。個 別の現象の理解はもとより、現象に依らない共通の 物理法則を抽出すること、そのような俯瞰的な視点か ら物事を捉えることを目指し、研究室単位では比較的 多彩な問題を扱っている。2021 年度は、以下のよう な課題に取り組んだ。なお、テーマによっては研究 室ウェブサイト https://labjp.kaztake.org/ で も紹介をしているので、適宜参照されたい。

6.8.1 ソフトマター系の非平衡実験

液晶トポロジカル欠陥の再結合観測と対称性の回復

ネマチック液晶は長細い分子からなり、長軸を互 いにそろえようとする配向秩序がある。そのような 配向秩序が不整合な点がトポロジカル欠陥であり、そ の運動は秩序化過程や様々な非平衡ダイナミクスで 重要な役割をする。我々は、欠陥への蛍光色素の集 積を利用することで、3次元のトポロジカル線欠陥の 3次元ダイナミクスを初めて観測した。2本の線欠陥 がぶつかってつなぎ替わる「再結合」と呼ばれる現 象に注目して解析を行い、欠陥間の距離が満たすス ケーリング則を確かめた。また、2次元点欠陥では 欠陥同士が近づく際の運動が非対称であることが知 られているが、3次元再結合の場合には対称であるこ とを明らかにした。これはトポロジーとエネルギー を考慮した、我々が「自発的対称性の回復」と呼ぶメ カニズムで説明でき(図 6.8.18)、他の物理系にも適 用できる可能性がある [8, 17, 18, 31, 33, 35, 39, 43]。



図 6.8.18: 「自発的対称性の回復」 ±1/2 欠陥は、 2 次元で区別され非対称に運動する。3 次元の場合、 欠陥周りの配向の回転軸 Ω が自由に回転でき、±1/2 欠陥を連続的につなぐような任意の構造を取りうる が、対称な運動をするねじれ欠陥がエネルギー的に 有利なため対称性の回復が起こる。

液晶対流における雑音誘起同期現象

非線形振動子集団の同期現象は、実在する様々な 系で見られるうえ、生命現象や工学設計の観点から も重要である。同期には、振動子間の結合によるも ののほか、結合がなくとも共通のノイズに晒される ことで発生するものがあり、雑音誘起同期現象と呼 ばれる。我々は、未だ実験例の少ない雑音誘起同期 現象の可能性を、液晶電気対流の振動状態において 探求した。本研究で用いた対流振動(図 6.8.19)は、 ほぼ周期的だがカオスであり、得られる位相の時系 列は実験のたびに異なる。この系に対し、我々は印 加電場の周波数をランダムに変調する手法で共通ノ イズを実装し、複数回の実験で位相の時系列を取得 したところ、雑音誘起同期現象の証拠を得ることに 成功した。特に、同相同期状態に加えて、逆相同期 状態も出現するという特徴的結果が見出された。逆 相同期状態の出現は、系の空間反転対称性に基づき 説明できる。同期状態の継続時間は 10⁴ 秒の程度で



図 6.8.19: 雑音誘起同期現象を見出した液晶電気対 流の振動状態

あり、これは対流振動や印加電場、ノイズ等の時間ス ケールと分離した非自明な結果である [13, 25, 30]。

自己駆動コロイド粒子の運動と集団秩序、ゆらぎ

非対称な表面を持つヤヌス粒子は、交流電場をエ ネルギー源として自己駆動する。これらの相互作用 を、水中イオン濃度と印加電圧を調節することで制 御し、粒子集団の配向が大域的にそろった集団運動 状態を実現した(図 6.8.20)。この集団運動状態が、 長距離配向秩序や冪的な配向相関、巨大粒子数揺ら ぎ、回転拡散の増大などの性質を示すことを明らか にした。また、個々の粒子の配向と速度を独立に検 出し相互相関関数を得たことで、アクティブマター 集団運動の2つの基礎的な模型である Vicsek 模型と アクティブブラウン粒子模型を繋ぐ理論的な示唆を 得た [6, 29, 36, 38, 40, 42, 45, 46]。

我々はまた、導電溶液中の電圧印可で誘電体粒子 が回転する現象、Quincke 現象を交流電圧で起こし、 粒子の周期的な自己駆動運動を解析したところ、非 自明な長時間運動やクラスタリングを見出した [9]。

6.8.2 微生物系の非平衡実験

大腸菌集団の3次元成長とトポロジカル欠陥

棒状の細菌である桿菌は、コロニー形成時に液晶的 な配向秩序を発達させ、はじめは2次元的、のちに3 次元的なコロニー成長を見せる。運動性の桿菌では、 巻き数 +1/2のトポロジカル欠陥がコロニー成長の3 次元化を促進することが知られていたが、非運動性の 桿菌における配向秩序の役割は明らかでない。我々 は、非運動性の大腸菌集団を基板上で一様成長させ、 配向秩序と3次元成長の関係を調べたところ、従来 知見に反して巻き数 -1/2の欠陥にも細胞が流入し、 3次元成長が促されることを発見した(図 6.8.21)。



図 6.8.20: 長距離配向秩序を示すヤヌス粒子の集団 運動。大域的秩序の向き $\langle \theta \rangle$ (矢印) からの各粒子の 向き θ のゆらぎ $\theta - \langle \theta \rangle$ を写真に重ねて表示してい る。 我々は、欠陥周辺で菌体が 3 次元的に強く傾いてい ること、それにより極性秩序が出現していることを 見出し、それを踏まえてアクティブ液晶理論を拡張 することで、巻き数 –1/2 欠陥への細胞流入を説明 することに成功した [7, 12, 15, 19, 22, 24, 32, 37]。

大腸菌集団の束状構造形成

細菌がバイオフィルムを構築する際、一部の細胞 は液中で浮遊したまま凝集体を形成する。この凝集 過程は、細胞外タンパク質などの分泌物を通じた細 胞間相互作用が引き起こすとされる。細胞の分泌状 態は外部環境やその変化に強く依存することが期待 されるが、時間依存的に環境を制御し、細胞の浮遊凝 集体を観察する実験は行われていない。そこで我々 は、流体的な摂動を与えず、均一に環境を制御できる 微小流体デバイス 「広域マイクロ灌流系」 [5, 12] を用 いて、急激な飢餓に瀕した非運動性大腸菌の浮遊凝 集体の応答を観察した。成長培地で大腸菌が浮遊凝 集体を形成した後、栄養を含まない緩衝液で環境を 急激に置換したところ、細胞が束状に整列し、スメ クチック秩序に似た構造を作ることを発見した。本 現象は、細胞分泌を阻害する薬剤の影響下では起こ ず、従って細胞分泌物の枯渇引力によるものと考え られる。我々はまた、細胞成長が束状構造を破壊す ることも見出した。細胞分泌や成長停止は、環境変 動や飢餓の際に細菌が示すストレス応答の1つであ り、本研究で見出した束状構造形成は、そのような 状況下で何らかの役割を持つ可能性がある[12,27]。

運動性大腸菌集団のガラス転移

ガラス転移は、過冷却液体をはじめ、様々な系の 冷却や圧縮で見られる、普遍的な現象である。では、 アクティブマターもガラス転移を示すのだろうか? それにより現れるアクティブガラスとは、どんなも のだろうか? このような疑問に実験的に迫るため、 我々は運動性の大腸菌集団を使い、ガラス転移の探 求を行った。2 次元的な広域マイクロ灌流系 [5, 12] を用い、大腸菌集団を均一な成長条件下で培養した ところ、大腸菌は成長・分裂を繰り返し、自発的に 面積分率φを増大させて、ついには菌体がひしめき 合い、運動できなくなる、ガラス状態に転移するこ



図 6.8.21: 左:大腸菌集団とトポロジカル欠陥。右: -1/2 欠陥周りに働く極性起因力の動径成分。

とを発見した(図 6.8.22)。我々は、このガラス転移 が配向自由度のガラス化と並進自由度のガラス化の 2段階転移となっていること、転移点付近で特徴的 なドメイン構造が現れること、大腸菌の遊泳により ドメイン単位の集団運動が起こり、それがガラス転 移の性質に影響を及ぼすことなど、興味深い様々な 結果を得た[34, 44]。



 $\Delta I = |I(\vec{r}, \Delta t) - I(\vec{r}, 0)|$ $\Delta t = 0.057 \text{ sec}$

図 6.8.22: 運動性大腸菌集団のガラス転移。上段: 位相差画像、下段:位相差画像の輝度 $I(\vec{r},t)$ の差分 $\Delta I(\vec{r},t,\Delta t) = I(\vec{r},t+\Delta t) - I(\vec{r},t)$ 。面積分率 ϕ が 上がるとガラス転移が起こり、 $\Delta I \approx 0$ となる。

擬2次元空間でのバクテリアの遊泳

大腸菌や枯草菌などの遊泳バクテリアは、固体表 面に引き寄せられトラップされ、表面に沿って泳ぐ。 我々は、このバクテリアの固体表面へのトラップ現象 の空間次元依存性を実験的に調べた。具体的には、上 下2枚のカバーガラスの間に微細加工により円形の柱 を構築し、その周囲でのバクテリアの振る舞いを観察 した。結果、カバーガラスのギャップを、3次元的な 10 µm から擬 2 次元的な 2 µm へと小さくしていく と、バクテリアが円柱表面にトラップされる時間が急 激に増大することを実験的に見出した。また、これが 流体相互作用に由来することも数値計算により示し た。これらは擬 2 次元における流体力学の特異性を 示唆する結果であり、アクティブ流体デバイスの設計 や擬 2 次元でのアクティブマター集団運動の詳細な理 解につながる [10, 14, 28, 29, 38, 40, 42, 45, 46, 48]。

6.8.3 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、非平衡界面ゆらぎの厳密解 が実験的にも検証され、近年は量子スピン鎖の輸送 現象との関係も指摘されるなど、発展が続いている [4, 20, 21, 23]。これらの多くは典型ゆらぎに関する ものだ。典型値から大きく外れたゆらぎ(大偏差)に ついては、理論的には盛んに研究されているが、実 験は至難である。KPZ クラスの大偏差はゆらぎの正 負によって時間に対するスケーリングが異なる興味 深い性質を持ち、実験検証の意義が大きい。そこで 本研究では、実験でも実装可能な、KPZ 大偏差統計 法則の計測手法の開発を目標とする。KPZ クラスの 可解模型である1次元完全非対称単純排他過程を例 に、実験でも実装可能な重点サンプリング法を用い てシミュレーションを行い、ゆらぎの時間に対する 非対称なスケーリング則を確かめた。

<受賞>

- [1] 嶋屋拓朗, 第一回 領域奨励賞, 新学術領域研究「情報 物理学でひもとく生命の秩序と設計原理」, 2022 年 2 月 14 日.
- [2] 嶋屋拓朗, 日本物理学会第 77 回年次大会学生優秀発 表賞(領域 12), 2021 年 3 月 16 日.

<報文>

(原著論文)

- [3] R. A. L. Almeida and K. A. Takeuchi, Phaseordering kinetics in the Allen-Cahn (Model A) class: universal aspects elucidated by electricallyinduced transition in liquid crystals. Phys. Rev. E 104, 054103 (2021).
- [4] Y. T. Fukai and K. A. Takeuchi, Initial perturbation matters: implications of geometry-dependent universal Kardar-Parisi-Zhang statistics for spatiotemptalk chaos. Chaos **31**, 111103 (2021).
- [5] T. Shimaya, R. Okura, Y. Wakamoto and K. A. Takeuchi, Scale invariance of cell size fluctuations in starving bacteria. Commun. Phys. 4, 238 (2021).
- [6] J. Iwasawa, D. Nishiguchi and M. Sano, Algebraic correlations and anomalous fluctuations in ordered flocks of Janus particles fueled by an AC electric field. Phys. Rev. Res. 3, 043104 (2021).
- [7] T. Shimaya and K. A. Takeuchi, 3D-induced polar order and topological defects in growing bacterial populations. arXiv:2106.10954.
- [8] Y. Zushi and K. A. Takeuchi, Scaling and spontaneous symmetry restoring in reconnecting nematic disclinations. arXiv:2110.00442.
- [9] A. N. Kato, K. A. Takeuchi, and M. Sano, Active colloid with externally induced periodic bipolar motility and its cooperative motion. arXiv:2203.12882.
- [10] Y. Takaha and D. Nishiguchi, Quasi-twodimensional bacterial swimming around pillars: enhanced trapping efficiency and curvature dependence. arXiv:2203.16017.

(会議抄録)

(国内雑誌)

[11] 西口大貴, 群れの秩序と乱れ: 遊泳バクテリアによる アプローチ. 生体の科学 **72**, 255-260 (2021).

(学位論文)

- [12] Takuro Shimaya, Spatial order in growing bacterial populations: from initial biofilm structure to single cell morphology. PhD thesis (Univ. Tokyo), 2022.
- [13] 渡邉緩也,液晶の対流振動における雑音誘起同期現象. 修士論文(東京大学),2022.

(著書)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [14] D. Nishiguchi, A. Sokolov, H. Reinken, S. Heidenreich, M. Bar, S. H. L. Klapp and I. S. Aranson, Novel boundary conditions and topology-induced vortex order of bacterial turbulence. Biofluid Symposium, talk, online, Jun. 22, 2021.
- [15] T. Shimaya, Topological defects and verticalization-induced polar order in nonmotile bacterial colonies. Biofluid Symposium, talk, online, Jun. 24, 2021.
- [16] Y. Zushi and K. A. Takeuchi, Confocal observation of reconnecting disclination lines in nematic liquid crystals. OLC2021, talk, online, Sep. 30, 2021.
- [17] Y. Zushi and K. A. Takeuchi, Confocal observation of reconnecting disclination lines in nematic liquid crystals. OLC2021, talk, online, Sep. 30, 2021.
- [18] Y. Zushi and K. A. Takeuchi, Scaling and spontaneous symmetry restoring in reconnecting nematic disclinations. APS March Meeting 2022, talk, online, Mar. 14, 2022.
- [19] K. A. Takeuchi and T. Shimaya, 3D-induced polar order & topological defects in growing bacterial populations. APS March Meeting 2022, talk, Chicago (USA), Mar. 16, 2022.

招待講演

- [20] K. A. Takeuchi and Y. T. Fukai, Universality and Initial-Shape Dependence of Perturbation Dynamics in Spatiotemptalk Chaos. SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (DS21), invited talk, online, May 23, 2021.
- [21] K. A. Takeuchi, Universal Kardar-Parisi-Zhang statistics explored in liquid crystal turbulence. Autumn Meeting of the Brazilian Physics Society 2021, invited talk, online, June 23, 2021.
- [22] K. A. Takeuchi, 3D-induced polar order and topological defects in growing bacterial populations. 2021 The Korean Physical Society Fall Meeting, invited talk, online, Oct. 22, 2021.

[23] K. A. Takeuchi, Initial condition dependence of KPZ universality: from soft matter experiments to quantum spin chains. APS March Meeting 2022, invited talk, Chicago (USA), Mar. 17, 2022.

(国内会議)

一般講演

- [24] 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, さきがけ「トポロジー」領域 第5 回領域全体会議, 講演, オンライン, 2021 年7月 12日.
- [25] 渡邉緩也, 竹内一将, 共通ノイズ電場に駆動された液 晶の対流振動の同期現象, 日本物理学会 2021 年秋季 大会, 講演, オンライン, 2021 年 9 月 20 日.
- [26] 一井俊介,嶋屋拓朗,竹内一将,大腸菌集団の競合に おける菌形状と壁間の相互作用の効果,日本物理学 会 2021 年秋季大会,講演,オンライン,2021 年 9 月 22 日.
- [27] 嶋屋拓朗, 竹内一将, 飢餓による大腸菌の浮遊凝集集 団のスメクチック化, 日本物理学会 2021 年秋季大会, ポスター, オンライン, 2021 年 9 月 22 日.
- [28] 高羽悠樹,西口大貴,擬2次元での遊泳バクテリアと 柱の相互作用:トラップ能率の増大と曲率依存性,日 本物理学会 2021 年秋季大会,講演,オンライン,2021 年9月23日.
- [29] 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」領域キックオフミー ティング, 講演, オンライン, 2021 年 10 月 8 日.
- [30] 渡邉緩也, 共通ノイズ電場に駆動された液晶の対流振動の同期現象, 第20回 関東ソフトマター研究会, ポ スター, オンライン, 2021年11月2日.
- [31] 竹内一将, 液晶欠陥の3次元ダイナミクス直接観察, さきがけ「トポロジー」領域第6回領域全体会議, 講 演, オンライン, 2022年1月6日.
- [32] 嶋屋拓朗,竹内一将,三次元的に成長する大腸菌集団中のトポロジカル欠陥と極性秩序,日本物理学会第77回年次大会,講演,オンライン,2022年3月16日.

招待講演

- [33] K. A. Takeuchi, Direct 3D observation of topological defect dynamics in liquid crystal. CEMS Topical Meeting Online, Emergent Nonequilibrium Dynamics in Soft Materials, 招待講演, オンライン, 2021 年 4 月 23 日.
- [34] 竹内一将, 高密度バクテリア集団のガラス転移, 日本 物理学会 第 77 回年次大会, 招待講演, オンライン, 2022 年 3 月 19 日.
- [35] 竹内一将, 図司陽平, 液晶トポロジカル欠陥の 3 次元 動力学観察と自発的対称性の回復, 2022 年 第 69 回 応用物理学会 春季学術講演会, 招待講演, 青山学院大 学 相模原キャンパス, 2022 年 3 月 23 日.

(セミナー・集中講義)

[36] D. Nishiguchi, Electrokinetic Janus particles: from self-organized flagella to winged pair correlation. Experimental active matter seminar, Matière et Systèmes Complexes laboratory (MSC), Université Paris Cité, online, Apr. 14, 2021.

- [37] 嶋屋拓朗, 大腸菌コロニーの三次元的成長におけるト ポロジカル欠陥と極性秩序. Young Soft Webinar, オ ンライン, 2021 年 6 月 29 日.
- [38] 西口大貴, アクティブマターの秩序とトポロジー. 駒 場物性セミナー, オンライン, 2021 年 7 月 4 日.
- [39] 竹内一将, 液晶のトポロジカル欠陥ダイナミクス: 観察実験と、量子渦とのアナロジー. ヘリウム・オンラインセミナー 第23回, オンライン, 2021年7月30日.
- [40] 西口大貴, 生命現象と生き物っぽい現象とアクティブ マター. 第 61 回生物物理若手の会夏の学校, オンラ イン, 2021 年 9 月 15 日.
- [41] H. Lama, Cascades and intermittency in inertial active nematic turbulence. UCA Fall program on complex systems 2021 "Mobility, self-organization and swimming strategies", online, Oct. 29, 2021.
- [42] 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」領域 討論会, オンラ イン, 2021 年 12 月 17 日.
- [43] 竹内一将, 液晶トポロジカル欠陥の3次元動力学観察. トポロジー領域 CREST 合同セミナー, オンライン, 2022 年1月 25 日.
- [44] K. A. Takeuchi, Bacterial glass. LPTMC seminar, Sorbonne Université, online, Mar. 7, 2022.
- (アウトリーチ)
- [45] 西口大貴, 生き物の群れと微生物の泳ぎを物理の目線 で見てみたら. 東京大学教養学部「高校生と大学生の ための金曜特別講座」, 2021 年 5 月 28 日.
- [46] 西口大貴, 微生物の泳ぎの物理と生き物の群れに潜む 普遍法則. 国際物理オリンピック 2022 日本代表候補 者 秋合宿研修, オンライン, 2021 年 9 月 18 日.
- [47] 西口大貴,国際科学オリンピックオンラインワーク ショップ物理ワークショップ「光を知って光でさぐ ろう! 青空から砂山まで偏光で巡る物理の旅」実験 オンライン生配信・録画 YouTube 公開,渋谷区こど も科学センター・ハチラボ(オンライン),2021年 10月2日.
- [48] 西口大貴, 微生物の泳ぎと群れの運動を物理学者と一緒に眺めてみよう!.第 59回日本生物物理学会年会高校生・高専生向け生物物理ワークショップ~ 生物? 物理? 二刀流で生命の謎に迫る!~,オンライン, 2021年11月23日.
- [49] H. Lama, Synergy between physics and biology. Invited outreach webinar at Christ College, Irinjalakuda (India), Feb. 12, 2022.

6.9 三尾研究室

三尾研究室では、レーザーとその応用に関する研 究を行うことを目的としている。レーザーの発明は 1960年で、それ以来、基礎から応用まで大変、幅広く 利用されている。また、現代社会を支える基盤技術 としても極めて重要で、通信、情報処理、加工などで なくてはならないものとなっている。さらに、2015 年に初めて観測された重力波でも、最先端の光技術 が駆使されており、学術と社会を結ぶ架け橋である。

当研究室は、理学系研究科附属フォトンサイエン ス研究機構(IPST)³に所属しており、上述のように、 光を使って学術の深化と産業への展開を目指してい る。IPST には当研究室以外に多くのメンバーが所 属しており、全員が密接に連携して、研究と教育を 進めている。

6.9.1 レーザー加工の物理

レーザーを使って、切断、溶接、切削などの加工 を行うことをレーザー加工と呼ぶ。この分野はレー ザー光源の進歩により、高出力の紫外光が利用でき るようになり、また、パルス幅や波長などがかなり 自由に制御できるようになってきて、新しい加工が 可能になってきた。しかし、実際に起きている現象 は、非平衡、開放系で、レーザー光と物質の相互作用 も摂動的な考え方では説明できない領域にある。こ の現象の理解を進めて、応用への展開を進めていく ことがこの研究の目的である。この研究は五神研究 室、および IPST の小西研究室と共同で進めている。

加工時におけるレーザービームの非線形伝搬の効果

当研究室では、近年産業応用が盛んに進められて いる、フェムト秒レーザー加工に注目して研究を進め ている。フェムト秒レーザーは、パルス幅が電子系 から格子系への熱緩和時間 (~ps) よりも短いため、 加工領域周辺への熱影響のない「非熱加工」が可能 となる。一方で、そのようなパルス幅の極めて短い レーザーを空気中で集光すると、非線形効果でビー ムの伝搬が大きく変わってしまう。これは当然、加 工結果にも影響を及ぼす。我々は、このような空気 と光との複雑な非線形現象の物理を明らかにするこ とで、フェムト秒レーザー加工技術のさらなる高性 能化に取り組んでいる [18, 19]。

これまでの研究では、単一のパルスエネルギーのみ でしか数値計算と実験の比較が行われておらず、ビー ムの非線形伝搬を幅広いエネルギー範囲で系統的に 捉えた上で、加工結果のパルスエネルギー依存性を 統一的に説明できるかは明らかではなかった。そこ で本研究では、非線形伝搬が生じる条件での加工穴 直径のパルスエネルギー依存性を定量的に推定する 手法を提案し、レーザー加工実験の結果と比較する ことでその有効性を示した。

まず、3次の非線形効果による自己収束、気体の イオン化、プラズマによるエネルギー吸収、ビーム 発散の効果を組み込んだ非線形伝搬方程式を用いて、 ガウシアンビームの光パルス(波長 800 nm、パルス 幅 40 fs)の空気中での伝搬過程を調べた。数値計算 の結果を図??に示す。パルスエネルギーを増大する と、伝搬中に生じたプラズマの効果によって z = 0

³http://www.ipst.s.u-tokyo.ac.jp/

よりも手前でビームが発散する振る舞いが確認され た。続いて、計算と同じ条件でレーザー加工実験を 行い、線形伝搬領域での加工結果から抽出したレー ザー破壊閾値に基づいて、数値計算の結果から加工 穴直径を求めた。その結果、数値計算の結果が2桁 に及ぶ幅広いパルスエネルギー範囲で実験結果と定 量的によく一致することを見いだした。この結果は、 本手法が、非線形伝搬が生じるような比較的強い励 起条件下でのフェムト秒レーザー加工について、幅 広いパルスエネルギー領域において加工結果を定量 的に予測できることを示すものであり、レーザー加 工の制御性を格段に向上させることに資する知見で あると考えている。



図 6.9.23: 空気の非線形効果によるレーザービーム の変化

レーザーによる微細加工技術の応用

また、フェムト秒レーザー加工技術を、アルミナや サファイアなどの誘電体の3次元マイクロ加工へと 応用する研究も進めている。例えば高出力レーザー 加工を利用して、「モスアイ構造」という、光の波長 よりも小さなピラミッド型の微細構造を300 mm 径 もの範囲に渡って施し、ミリ波の反射率が1%以下 の赤外吸収フィルターの作製に成功した(図??)。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。可視光領域では、光学薄膜を利用した無反射 面が利用されているが、波長の長いテラへルツ波や ミリ波、マイクロ波では性能のいい無反射界面をつ くることが難しかった。

ここでは、天文観測用に開発を行ってきたもので、 実際に加工されたフィルターはアメリカのグリーン バンク望遠鏡で観測を行う MUSTANG2 レシーバー へ搭載され、熱源となる大気や望遠鏡自体からの赤 外線放射を抑えながら、ミリ波帯域の光の信号を高 感度で捉えることが可能となった [4]。これらの研究 は、東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研 究機構 (Kavli IPMU) と共同して進めている。更に は、テラヘルツ波用のシリコンモスアイの作製など にも成功している。



図 6.9.24: レーザー加工で作製したモスアイ構造

6.9.2 KAGRA project

重力波が実際に検出されてから、すでに、6年以上 の時が過ぎ、現在までに検出されたイベントは90と なった。その多くは、ブラックホール連星の合体時 のものであるが、観測されている質量の範囲は、重 力波検出以前に比べて、もっと広い範囲となってい る。また、中性子星連星の合体や中性子星とブラッ クホールの合体なども観測されている。このような 天体は重力波観測以前にはまったく存在が知られて いなかった。重力波の観測によって、新しい宇宙像 が構築されつつある。

日本では、岐阜県神岡鉱山の中に、KAGRA が建 設されている。KAGRA は地下の静粛な環境を利用 し、また、低温技術を取り入れるなど先進的な技術 を導入して、感度の向上を測っている。現在、米国 のLIGO, 欧州の VIRGO との協力体制を構築してい る。KAGRA がこれまで、建設、調整を進めており、 O4 と呼ばれる国際共同観測(2022 年 12 月中旬に開 始予定)に参加する予定である。

KAGRA の光源開発

現在、KAGRA では、ファイバーレーザーを基本 としたシステムを光源として利用しているが、更な る低雑音化と高出力化を目指して、固体レーザーに 交換するための準備を進めている。図?? はその写真 で、現在、富山大学に設定されている。エンドポン プ型の高効率励起システムを備えた固体レーザー増 幅器で 60W の出力が可能になっている。

現在、富山大学、東大宇宙線研究所、台湾中央研 究院物理研究所との共同で、基本性能の評価を進め ている。

<報文>

(原著論文)

 R. Abbott, et al.: Search for intermediate-mass black hole binaries in the third observing run of Advanced LIGO and Advanced Virgo, AS-TRONOMY & ASTROPHYSICS, 659 A84 (2022) (10.1051/0004-6361/202141452).



図 6.9.25: KAGRA 用の新しいレーザー

- [2] R. Abbott, et al.: Search for continuous gravitational waves from 20 accreting millisecond xray pulsars in O3 LIGO data, PHYSICAL RE-VIEW D 105 (2) 022002 (2022)(10.1103/Phys-RevD.105.022002).
- [3] R. Abbott, et al.: All-sky search for short gravitational-wave bursts in the third Advanced LIGO and Advanced Virgo run, PHYSICAL RE-VIEW D 104 (12) 122004 (2021) (10.1103/Phys-RevD.104.12200).
- [4] R. Takaku, et al.: Large diameter millimeter-wave low-pass filter made of alumina with laser ablated anti-reflection coating, OPTICS EXPRESS 29 (25) pp.41745-41765 (2021)(10.1364/OE.444848).
- [5] R. Abbott, et al.: All-sky search for long-duration gravitational-wave bursts in the third Advanced LIGO and Advanced Virgo run, PHYSICAL RE-VIEW D 104 (10) 102001 (2021) (10.1103/Phys-RevD.104.102001).
- [6] R. Abbott, et al.: Constraints from LIGO O3 Data on Gravitational-wave Emission Due to Rmodes in the Glitching Pulsar PSR J0537-6910, ASTROPHYSICAL JOURNAL 922 (1) 71 (2021) (10.3847/1538-4357/ac0d52).
- [7] R. Abbott, et al.: Searches for Continuous Gravitational Waves from Young Supernova Remnants in the Early Third Observing Run of Advanced LIGO and Virgo, ASTROPHYSICAL JOURNAL 921 (1) 80 (2021) (10.3847/1538-4357/ac17ea).
- [8] R. Abbott, et al.: All-sky search for continuous gravitational waves from isolated neutron stars in the early O3 LIGO data, PHYSICAL RE-VIEW D 104 (8) 082004 (2021) (10.1103/Phys-RevD.104.082004).
- [9] R. Abbott, et al.: Search for anisotropic gravitational-wave backgrounds using data from Advanced LIGO and Advanced Virgo's first three observing runs. PHYSICAL REVIEW D 104 (2) 022005 (2021) (10.1103/PhysRevD.104.022005).
- [10] R. Abbott, et al.: Upper limits on the isotropic gravitational-wave background from Advanced LIGO and Advanced Virgo's third observing run, PHYSICAL REVIEW D 104 (2) 022004 (2021) (10.1103/PhysRevD.104.022004).

- [11] R. Abbott, et al.: Observation of Gravitational Waves from Two Neutron Star-Black Hole Coalescences, ASTROPHYSICAL JOUR-NAL LETTERS 915 (1) L5 (2021) (10.3847/2041-8213/ac082e).
- [12] R. Abbott, et al.: Constraints on Cosmic Strings Using Data from the Third Advanced LIGO-Virgo Observing Run, PHYSICAL REVIEW LET-TERS **126** (24) 241102 (2021) (10.1103/Phys-RevLett.126.241102).
- [13] R. Abbott, et al.: Diving below the Spin-down Limit: Constraints on Gravitational Waves from the Energetic Young Pulsar PSR J0537-6910, AS-TROPHYSICAL JOURNAL LETTERS textbf913 (2) L27 (2021) (10.3847/2041-8213/abffcd).
- [14] T. Akutsu, et al.: Overview of KAGRA: KAGRA science, PROGRESS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL PHYSICS 2021 (5) 05A103 (2021) (10.1093/ptep/ptaa120).
- [15] T. Akutsu, et al.: Overview of KAGRA: Detector design and construction history, PROGRESS OF THEORETICAL AND EXPERIMEN-TAL PHYSICS **2021** (5) 05A101 (2021) (10.1093/ptep/ptaa125).
- [16] T. Akutsu, et al.: Vibration isolation systems for the beam splitter and signal recycling mirrors of the KAGRA gravitational wave detector, CLAS-SICAL AND QUANTUM GRAVITY textbf38 (6) 065011 (2021) (10.1088/1361-6382/abd922).
- [17] T. Akutsu, et al.: Overview of KAGRA: Calibration, detector characterization, physical environmental monitors, and the geophysics interferometer, PROGRESS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL PHYSICS 2021 (5) 05A102 (2021) (10.1093/ptep/ptab018)
- (会議抄録)
- [18] R. Yamada, et al.: Changes in the Intensity Distribution of the Laser Pulse due to Non-linear Optical Interaction with Air and Its Effects on Laser Ablation Conference on Lasers and Electro-Optics Europe / European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

[19] R. Yamada, W. Komatsubara, H. Sakurai, K. Konishi, N. Mio, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami: Changes in the Intensity Distribution of the Laser Pulse due to Non-linear Optical Interaction with Air and Its Effects on Laser Ablation CLEO/EUROPE-EQEC 2021 (2021年6月24日). [20] K. Soeda, H. Suzuki, S. Yokobori, K.i Konishi, H. Tamaru, N. Mio, M. Kuwata-Gonokami, J. Yumoto: RECILS: high resolution and high-speed SLA 3D printer using a plane building platform and a cylindrical glass window Lasers in Manufacturing 2021(2021年6月22日).

(国内会議)

一般講演

- [21] 山田涼平,小松原航,櫻井治之^A,小西邦昭,三尾典克, 湯本潤司,五神真: 東大理、東大物性研^Aフェムト 秒レーザー加工における空気中での非線形伝搬モデ ルの構築日本物理学会第77回年次大会2022年3月 15日
- [22] 高久諒太, Qi Wen^A, Scott Cray^A, Mark Devlin^B, Simon Dicker^B, Shaul Hanany^AA, 長谷部孝, 飯田輝 人^C, 片山伸彦, 小西邦昭, 五神真, 松村知岳, 三尾典 克, 櫻井治之, 桜井雄基, 山田涼平, 湯本潤司:東京大, ミネソタ大学^A, ペンシルベニア大学^B, i-space^C、超 短パルスレーザーによるモスアイ反射防止構造加工 を施した大型アルミナ IR フィルターの開発. 日本物 理学会 第 77 回年次大会 2022 年 3 月 16 日
- [23] 的場 みづほ,小西 邦昭,三尾 典克,湯本 潤司,五神 真: 東大理、テラヘルツ縦電場パルスによるダーク プラズモン励起の数値計算解析第82回応用物理学会 秋季学術講演会2021年9月12日.
- [24] 山田 涼平, 櫻井 治之^A, 小西 邦昭, 三尾 典克, 湯本 潤司, 五神 真:東大理、東大物性研^A、空気中での非 線形伝搬の効果を用いたレーザー加工形状制御第82 回応用物理学会秋季学術講演会2021年9月11日.

7 生物物理

7.1 能瀬研究室

脳・神経系は多数の神経細胞がシナプスという構 造を介して連絡した複雑な回路である。このなかを 神経インパルスが伝わることが、脳機能の基本であ ると考えられているが、その実体はほとんど謎のま まである。一体、どのような回路の中を、どのよう にインパルスが伝わることにより高度な情報処理が 可能になるのか? また、複雑な神経回路が正確に形 成されるための設計図は私達の遺伝子にどのように 記述されているのか? 当研究室では、ショウジョ ウバエ幼虫の神経系をモデルとし、これらの問題に 迫っている。

以前の研究において、バイオイメージングや遺伝 子操作を用いて軸索やシナプスを可視化することに より、神経の配線が形成される仕組みを明らかにし た. 現在、研究をさらに回路レベルに発展させ、複数 の神経配線からなる機能的な神経回路が、どのよう にして構築され、機能するのかを調べる研究を進め ている。特に、カルシウムイメージングや光遺伝学 (オプトジェネティクス)とよばれる光による神経活 動操作法を用いて、特定の神経細胞の活動を可視化・ 操作することにより神経回路の作動原理を探ってい る。また、2013 年以降、米国 Janelia 研究所との共 同研究において、コネクトミクス解析(網羅的な神 経回路構造の再構築)を用い、ショウジョウバエ幼 虫の運動回路の構造を系統的に決定するプロジェク トを推進している。一方、実験で得られた神経活動 や回路構造に関する知見を統計解析したり数理モデ ル化することにより、神経回路の動作原理を探る研 究も推進している。配線パターンの分かっているモ デル神経回路において、個々の神経細胞の活動をリ アルタイムに解析することにより、神経回路の情報 処理の仕組みを明らかにすることが私達の目標であ る。2021年7月に、長年当研究室の研究教育を推進 してきた高坂講師が電気通信大学に転出し(今後も 連携研究員として研究室に在籍)、2022年4月に松 永光幸助教が赴任した。

7.1.1 神経回路の活動ダイナミクスと構造 の数理統計解析

動物の行動はニューロンの集団活動により創出さ れると考えられている。しかし、脳神経系がどのよ うにして協調的かつ機能的な集団活動を生成するの かは、神経科学における大きな謎の一つである。私 たちは、ショウジョウバエ幼虫の脳神経系を構成す る多数(数千個)の神経細胞の活動を経時的に測定 し、得られた高次元時系列データを数理統計学的に 解析することにより、神経回路全体の巨視的ダイナ ミクスを捉えることに挑戦している。一方、脳の情 報処理の仕組みを理解するためには、集団活動の基 盤となる神経回路の構造を明らかにすることも重要 である。最近開発された電子顕微鏡画像3次元再構 築や膨潤試料顕微鏡法を用いたコネクトミクス解析 は神経回路構造を網羅的に明らかにすることを可能 とする画期的な手法だが、回路構造の追跡に膨大な 労力がかかるという問題がある。私たちは様々な数 理統計手法を用いてこれらの困難点を克服し、回路 の構造に関する情報を効率よく取得し、最終的には 神経活動と回路構造に関する実験データをひとつの プラットフォームに落とし込むことにより、神経回 路の作動原理をシステムレベルで明らかにしたいと 願っている。一方、深層学習を用いてガン組織病理 学の診断を効率化することも試みている。

サンプル間の構造マッチングによる運動生成回路の 時空間的幾何構造の解明(福益一司、能瀬聡直、高 坂洋史)

動物の運動における筋肉の活動パターンを生成す る中枢神経系領域では、その幾何学的な構造が運動 生成に寄与する可能性が示唆されている。例えば、 視覚野には、網膜上の各位置に対応する神経回路が、 網膜の連続性を保って神経系空間に配置された領域 が存在する。このような幾何構造は、視覚処理のた めの基盤的な役割を果たす。同様に、運動パターン 生成回路においても、神経活動の時空間的なダイナ ミクスに何らかの幾何構造が存在し、運動生成にお ける重要な機能を持つ可能性が高い。しかしながら、 従来の研究は、運動生成回路における神経細胞間の ネットワーク構造に着目するものが主流であり、神 経系の実空間における立体構造や、その機能は明ら かにされていない。本研究では、ショウジョウバエ 幼虫の中枢神経系において、神経活動の観測と空間 構造のスキャンを組合せ、運動生成回路(腹部神経 節、VNC)の時空間的幾何構造の解析を進めた。

VNC の活動情報を得るため、カルシウムイメージ ングを行った。すべての神経細胞にカルシウムセン サーを発現し、運動パターン(前進・後退運動)生成 時の神経活動を、蛍光顕微鏡によって撮影した。そ の後、同サンプルの詳細な空間構造を取得するため、 免疫染色の手法を用いて VNC をスキャンした。一 度の観測で神経系の全地点における活動情報を得る のは難しいため、複数サンプル由来の活動データを 重ね合わせ、単一のデータ空間に集積した。この際、 免疫染色によるスキャン結果を利用した。各サンプ ル固有の形状や変形を補正して重ね合わせるため、サ ンプルごとに非線形変換を適用した。

以上の方法によって再構築されたデータから、VNC の神経活動が、時空間的な幾何構造を示すことが分 かった。前進・後退運動時には、神経活動が VNC 全 体に伝播するが、周囲に先行して活動する領域と、そ れに遅れて活動する領域が、縞状に交互に配列され ていることが明らかになった。また、個々の神経細 胞の形態が、この縞構造に基づいて設計され、縞構 造によって細胞の機能が決定付けられている可能性 が示唆された。特に、運動生成時に基本的な役割を 果たす、ある複数の神経細胞の活動順序が、前進・後 退運動の間で逆転する現象が知られている。このよ うな神経細胞が、縞構造のどちらの領域から入力を 受け、また出力するかという観点において、活動順 序の逆転現象が説明できる可能性がある。

Expansion Microscopy を用いた幼虫中枢神経系 の神経束構造解析(伊達隆久、能瀬聡直、高坂洋史)

脳神経系では膨大な数の神経細胞がシナプス結合 を作っており、そのネットワーク構造を理解するこ とは脳の動作原理理解のために重要である。回路構 造を再構成する手法として、高い分解能をもつ電子 顕微鏡を用いたコネクトミクス解析が広く用いられ てきた。しかし、コネクトミクス解析には特殊な実 験設備が必要であり、解析は少数の個体でしか行わ れてこなかった。また、細胞種特異的な遺伝学的ラ ベリングが使用できないという問題もあった。近年、 Expansion Microscopy(以下、ExM) という新しいナ ノスケールイメージング手法が開発された。この手 法では、サンプル内部に吸水性ポリマー格子を構築 し、組織を物理的に膨張させて蛍光プローブ間の距 離を広げることで、従来の光学顕微鏡では回折限界 により解像することができなかった小さなスケール の構造を、光学顕微鏡で観察することが可能になる。 ExM では、広く普及している光学顕微鏡を用いて、 遺伝的ラベリング・抗体染色を駆使して微細な構造 を可視化できるため、コネクトミクス解析の問題点 を補完できる。我々はこれまでにショウジョウバエ 幼虫の中枢神経系に対して ExM を適用して高解像 度の三次元画像を取得し、神経系内部の構造を解析 してきた。今年度は、幼虫中枢神経系の ExM 画像か ら、神経突起が局所的に配向している「神経束構造」 の解析を行った。先行研究では、細胞接着分子 Fas2 でラベルされる一部の神経束の存在が知られていた が、我々の ExM 画像を基に幼虫の腹部神経節の構造 を網羅的に解析したところ、新しい神経束構造を同 定することに成功した。この構造をより定量的に検 出するために、ExM 画像に対して構造テンソルの固 有値分解を用いて解析したところ、神経束の配向を 自動抽出することに成功した。今後、個体間で保存 されている神経束構造を抽出するとともに、各構造 がどのような情報処理を担っているのかを考察して いく。

The Cancer Genome Atlas (TCGA)の病理イ メージを用いた深層学習方法論の比較(パク ジョ ンヒョク、能瀬聡直)

組織病理学の診断や遺伝子変異予測における深層 学習基盤の方法論は、大きく二つのカテゴリに分類

できる。すなわち End-to-end モデルを使用する高レ ベル方法論と、細胞の数のような人が理解できる特 徴量を利用する低レベル方法論である。この方法論 の弱点や長所はよく知られているが、同じタスクでの 比較分析は行われていなかった。そこで本研究では The Cancer Genomic Atlas (TCGA) において公開 されている病理イメージデータを使用して、マイクロ サテライト不安定性 (MSI) 予測における二つの方法 論の比較を行ない、さらに、MSI に関連する形態学的 特徴を分析した。高レベル方法論は EfficientNet で、 低レベル方法論は LightGBM、EfficientNet(組織)、 Hover-Net(核)、および MaskRCNN(腺) で構成した。 性能比較では予想通り高レベル方法論の性能が良かっ た。MSI に関連する形態学的特徴の分析では、高レベ ル方法論と低レベル方法論両方で崩壊産物 (Debris)、 リンパ球 (Lymphocyte)、壊死細胞 (Necrosis) が MSI の重要な特徴として明らかになった。この結果は臨 床の知見とも一致している。次に、二つの方法論で 予測が違ったケースにおいて定性分析を行ない、低 レベル方法論の弱点を発見し、パフォーマンスを向 上できる補完策を提案した。本研究は韓国 Seegene Medical Foundation の Yul Ri Chung 博士との共同 研究である。

7.1.2 運動出力ダイナミクスの定量的解析

神経回路の最終的な出力は、筋収縮による動物の 体の局所的変形である。多数の筋収縮が協調的に生 じることにより、動物の行動が生成される。筋細胞 は体全体に配置しているため、そのダイナミクスを 細胞レベルで解析するのは容易ではなかった。そこ で、本研究室ではこれを可能とする新しい運動解析 の方法を開発している。また、開発した手法を用い て種分化における運動の多様化の仕組みや行動制御 を担う神経修飾を探っている。

ショウジョウバエ幼虫の行動のハイスループット定 量解析手法の開発(張旭、能瀬聡直、高坂洋史)

動物は筋肉の収縮を調整することで複数のパター ンの動きを生成する。脚で歩行する動物に比べ、柔 らかい身体をもつ動物の運動解析は、運動の自由度 が高いため一般に容易ではない。特に、柔らかい動 物の動画において、各フレームのボディマーカーの 位置を手動で割り当てるのは非常に時間がかかり、運 動の定量解析の主なボトルネックとなっている。こ の困難を克服するためには、コンピュータによる運 動解析手法の開発が近年急速に進んでいる。

本研究では、柔らかい身体をもつキイロショウジョ ウバエ幼虫の多様な運動パターンについて、ハイス ループットで定量解析を行なった。GFP 標識したハ エ幼虫とディープラーニングを用いた画像処理アル ゴリズム DeepLabCut を用いて、幼虫の各行動にお ける体節のキネマティクスを長時間自動追跡した。 全体節の長さのダイナミクスを定量化し、各行動に おける速度、体節角度、収縮・伸展率、体節間位相遅 れ、局所体節収縮の伝播速度といった複数のパラメー タの抽出に成功した。今後、これらのデータに動的 システム理論の枠組みを適用することで、運動軌道 の詳細な構造と行動のエンコーディングを明らかに し、エソロジー解析の新たな定量的解析手法の構築を 目指す。これらの特徴づけにより、運動パターンの 定量的解析や幼虫の運動制御のオペレーションアー キテクチャの解明への道が開かれると期待される。

キイロショウジョウバエ、及び、オナジショウジョ ウバエの幼虫運動の種内多様性の定量解析(李子源、 能瀬聡直、高坂洋史)

生物進化の歴史の中で、現存の動物がこれまでに 生き残ってこられたのは、多様な環境に応じて運動パ ターンを適応的に変化できたことが一つの要因であ ると考えられる。生物多様性を理解する上で、動物の 持つこの適応性を明らかにすることは重要であるが、 動物運動の近縁種間、及び種内での運動の多様性の 定量解析はあまり進んでいない。本研究では、多様 な系統が利用可能なキイロショウジョウバエ、及び その近縁種であるオナジショウジョウバエを用いて、 それらの幼虫の運動多様性の定量解析を行なった。

日本国内の北海道から沖縄までの7か所の異なる 地域において、それぞれ2つずつ同雌系統が確立され ショウジョウバエのストックセンター (Kyorin-Fly) で維持されている。これらの計14のショウジョウバ エ系統について、幼虫運動の定量解析を行なった。そ の結果、キイロショウジョウバエの種内で、幼虫の運 動パターンが地域間で多様化していることが明らか になった。一方、同様に日本国内の6か所から確立 された計13のオナジショウジョウバエの同雌系統に ついて運動パターンを調べたところ、この種では地 域による多様化は見られなかった。このように多様 性が近縁種間で異なるしくみを調べるために、胚発 生期の温度が幼虫運動に与える効果について解析し た。キイロショウジョウバエにおいて、胚発生期に 一時的に低温で飼育すると、幼虫期の運動パターン に変化が見られた。一方、オナジショウジョウバエ において、胚発生期に一時的に低温で飼育しても、運 動パターンに顕著な変化は見られなかった。これら の観察から、キイロショウジョウバエが胚発生期に 持つ運動回路の温度依存的な可塑性が、種内の地域 間での運動多様性の一端を担っていると示唆される。 また、オナジショウジョウバエ幼虫の運動が胚発生 期の温度に非依存的なことが、オナジショウジョウ バエ幼虫の運動パターンが地域間で多様化していな いことに関係していると考えらえる。以上から、運 動多様性は必ずしも各動物種が一様に備えるもので はなく、種ごとに運動多様性、及び運動可塑性が異 なることが明らかになった。この研究は杏林大学の 粟崎健博士との共同研究である。

ショウジョウバエ幼虫の行動制御を担う神経修飾物 質の探索(OSNATO Nicodemo、張旭、能瀬聡直、 高坂洋史)

動物は、歩行・遊泳などの定型的な運動を示す。こ れらは単位となる運動、すなわち歩行であれば一つ のステップ、が繰り返されることで実現する。一方、 動物は、これらの運動単位よりも長い時間スケール においても、運動パターンを制御していることが知 られている。例えば、ショウジョウバエ幼虫では、体 内の栄養状態に応じて、運動速度が変化することが 知られている。これらのメタ時間スケールでの運動 制御に関わると考えられるのが神経修飾物質である。 神経修飾物質は、通常の神経伝達物質に比べて、広 範囲でかつ長い時間スケールで作用することが知ら れている。しかし、神経修飾物質がどのように運動 制御に関わっているかは、まだ不明な点が多い。

本研究では、ショウジョウバエ幼虫の探索行動を モデルとして、神経修飾物質が運動に及ぼす効果の 定量的な解析を進めた。RNA 干渉法を用いて、ショ ウジョウバエゲノムで同定されている神経ペプチド 遺伝子について、個々の遺伝子発現を全神経細胞で 抑制し、幼虫の運動をマシンビジョンを用いて解析 した。その結果、幼虫の運動スピードや方向転換頻 度の制御に関わる候補遺伝子の機能をより詳しく調べ るとともに、飢餓状態で起こる運動パターンの変化 における神経修飾物質の関与を解析する計画である。

7.1.3 運動神経回路を構成する神経細胞の 同定と機能解析

中枢神経回路内の個々の介在神経細胞が互いに神 経活動を介して相互作用することで回路全体として 統合された時空間的活動パターンが生成される。回 路内で生起する神経活動の集団現象を構成的に理解 するためには、個々の構成要素の機能や特性を理解 する必要がある。そこで我々は遺伝学的手法、及び コネクトミクスを効果的に用いることで、運動パター ンの生成に関与する介在神経細胞群の同定と機能解 析を進めている。

ショウジョウバエ幼虫において頭尾の位相差の調節 による運動速度制御を担う神経回路機構の解明(劉 英涛、能瀬聡直、高坂洋史)

ショウジョウバエ幼虫において、一回の蠕動運動 に要する時間は、体軸に沿って体節間を筋収縮が伝 播する時間と頭端が伸びてから尾端が収縮するまで の時間幅によって運動速度がどのように変化するか を明らかにすることと、この時間幅の調節を介して 速度制御を担う中枢神経回路を探求することである。 今年度は、まず、この二つの時間幅と速度の関係を解 明するために、一回の蠕動運動を二つのフェーズに 分けた。まず、頭端の伸び始めと尾端の縮み始めの 間を「テレスコーピング」フェーズと定義した。 方、それと相補的に、尾端の縮み始めから、筋収縮 の体軸に沿った伝播を経て頭端が伸び始めるまでの 時間を「ウェーブ」フェーズと定義した。幼虫の運 動データからこれらの時間幅について解析したとこ ろ、連続的に前進運動をする時、この二つのフェー ズが相関を持たないことが分かった。そして、速度 の低下に伴って、テレスコーピングフェーズの長さ が主に増加することが分かった。次に、速度制御を 担う神経回路を探究するため、これらの運動フェー ズにおける筋長の変化を解析した。体軸の垂直方向 にある transverse muscle の収縮時間が長いほど、テ レスコーピングフェーズ及び一回の前進運動が掛か る時間が長くなる傾向が分かった。これらの結果に 基づいて、この筋収縮に関与する介在ニューロンの 同定とその機能解析をした。その結果、A31c-A26f 神経回路が transverse muscle を制御することによっ て、速度を制御することが分かった。以上から、幼 虫の運動速度が主に頭端の伸長と尾端の収縮との間 の時間差に依存することと、その時間差を生成する 筋細胞群とそれを制御する神経回路が明らかとなっ た。陸上動物において、運動の各フェーズの時間差 を調整することで速度制御を行なうことが一般的に 知られているが、フェーズ依存の神経活動はどのよ うに生成するかは明らかになっていなかった。今回 の研究によりショウジョウバエ幼虫運動における速 度依存が異なる二つのフェーズの発見とそれを制御 する神経回路が明らかになった。この研究は英国セ ントアンドリュース大学の Maarten Zwart 博士との 共同研究である。

7.1.4 機能的神経回路の発達機構

自律的に自身を形作り機能を獲得することができ るという自己組織能は脳の大きな特徴のひとつであ る。脳神経系を構成する多数のニューロンはどのよ うにしてお互いに配線し、機能的な回路を作り上げ るのか。この問いに答えるために、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。

行動選択を担う神経回路の構築原理(高野詩菜、橋 本裕作、曽祥孫澤、能瀬聡直)

外界からの刺激に対して適切な行動を取れるよう 行動戦略を適応させることは動物の生存にとって極 めて重要である。しかし、適応行動を実装する神経 回路がどのようにして機能するのか、また個体発生や 進化の過程でどのように形作られるのかに関する理 解は限られている。本研究では、ショウジョウバエ 幼虫において前進・後退運動の選択を制御する Wave コマンドニューロンに着目し、この問題に取り組ん でいる。Wave ニューロンは 腹部神経節 (VNC)の 各節に1対ずつ存在し、節ごとにその軸索の形状が 異なる。また、尾部に近いものを刺激すると前進を、 頭部に近いものを刺激すると後退を惹起するという ように、体節特異的な機能を持つ。当研究室の先行 研究において、Wave ニューロンの軸索誘導に関わ る分子の探索が行われ、Drosophila Wnt4(DWnt4) と、その受容体 Drosophila Frizzled 2(DFz2) が同定 された。更に DWnt4 の欠失を導入した幼虫の中枢 神経系を用いて、一細胞形態解析を行い、受容体と 同様の表現型を確認している。このことから、DFz2 は DWnt4 を介して Wave ニューロンの軸索誘導を 行うことが示された。本年度研究においては、Wave ニューロンの配線の変化がその行動制御における機能 にどのような影響を及ぼすのかを調べるため、Wave ニューロンを特異的に胚発生の時期から DFz2 の機 能を欠失させた幼虫と正常の幼虫において頭部を刺 激し、頭側の Wave ニューロンを活性化した際の反 応を評価・定量し行動戦略が変わっているか調べた。 その結果、DFz2 の欠失によって、反応の頻度自体 は変化しない一方で、後退運動が減少し方向転換が 増加するという行動戦略の変化が確認された。本結 果は、コマンドニューロンの軸索配線の変化が行動 制御という神経回路の機能の変化に直接つながるこ とを示唆するものである。一方、Wave の下流回路の 機能解析を可能とするためコネクトームをもとに下 流細胞の探索を行い、前方 Wave ニューロンから直 接入力を受け取り、後退運動実行回路に接続する細 胞の候補である BLT ニューロン、後方 Wave ニュー ロンから直接入力を受け取り、前進運動実行回路に 接続する細胞の候補である A19d ニューロンを同定 し、さらにこれらを標的とする Gal 4系統の候補を 探索した。オプトジェネティクスにより BLT ニュー ロンを活性化させ、幼虫の行動の変化を調べた結果、 前進運動の回数が有意に減少することが確認された。 したがって BLT ニューロンは前進運動を抑制するこ とで、後退運動の生成に寄与する機能を持つと考え られた。今後さらに、DFz2 の機能を欠失させた幼 虫において Wave と下流細胞とのシナプス結合様式 を調べることにより、分子、シナプス結合、回路、行 動をつなぎ、DWnt4/DFz2 シグナルを介した行動戦 略の多様化の仕組みを明らかにしたい。

運動回路の発達初期における自発神経活動の分子及 び細胞基盤 (駒野目ゆう子、曾祥孫澤、能瀬聡直)

多くの動物は、子宮や卵の中にいる間に動き始め る。このような局所的で未熟な動きは運動系の自発 的な神経活動により引き起こされる。この活動の意 義について、「試行的に筋肉を動かし、その結果を体 性感覚のフィードバックを通じて学習することで、出 生や孵化後に見られる協調的かつ成熟な運動パター ンに発達させる」ということを我々は最近証明してき た。さらに未熟な動きを促す M/A27 h神経回路 (M と A27 h細胞から構成される)を同定し、この回路が 運動系形成の初期から IP3 シグナリングに依存した

自発的な活動を生成することを示した。今年度は遺 伝子スクリーニングを用いて IP3 シグナリングの誘 起に関わる上流のGタンパク質共役受容体 (GPCR) を同定することを目的とした。まずアミノ酸配列か ら IP3 シグナリングと関わっている可能性の高い 17 個の GPCR に着目し、RNA 干渉法を用いてそれぞ れを阻害したとき幼虫の前進運動の発達への影響を 調べた。その結果、9 個の GPCR を阻害したとき幼 虫の運動パターンが大きく損なうことを見出した。 次にカルシウムイメージングを用いて行動実験で表 現型の強い 7 個の GPCR を阻害した際に M/A27 h 回路の神経活動を調べ、6 つの GPCR をそれぞれ 阻害した際に自発神経活動の頻度が有意に減少した ことがわかった。また、これらの結果から絞り込ん だ6つの GPCR が実際に M、A27h 細胞に発現があ るのかを遺伝子発現システムを用いて調べた。する と、m GluR と呼ばれる GPCR は M と A27h 細胞 に発現があり、CCHa1R と呼ばれる GPCR では M 細胞で特異的に発現するのを見られた。以上の結果 から CCHa1R とm GluR が M/A27h 回路において |自発活動に必須であることが分かった。更にこの|| つの GPCR が M と A27h 細胞のどちらに機能的に 働きかけるのかを調べるため、M 細胞のみを操作す る遺伝子ツールを用いて、以上の GPCR の M 細胞 における自発活動と運動発達への影響を調べた。す ると CCHa1R を阻害した時のみ神経活動が有意に減 少し、行動実験でも前進運動が損なわれたことがわ かった。従って、今回の実験で運動回路の発達に必 須である M 細胞の自発活動を促す GPCR: CCHa1R の同定に成功した。本研究ではショウジョウバエの 運動系における自発的な神経活動に着目しているが、 このような活動は種を超えて発生期の神経系におい て広く見られることから、その背景に共通の分子・細 胞メカニズムが存在すると予想される。従って、本 研究により発生期回路の形成を制御する仕組みにつ いて普遍的な原理を提出できると期待している。

<受賞>

- [1] 曾祥孫澤、新領域創成科学研究科長賞(博士)、2022 年3月25日
- [2] 駒野目ゆう子、新領域創成科学研究科長賞(修士)、
 2022 年 3 月 25 日

<報文>

(原著論文)

- [3] Zeng X, Kawasaki T, Inada K, Kazama H, Nose A. An electrically-coupled pioneer circuit enables motor development via proprioceptive feedbackin *Drosophila* embryos *Curr. Biol* 31. 5327-5340.e5 (2021)
- [4] Matsuo Y., Nose A. and Kohsaka H. Interspecies variation of larval locomotion kinematics in the genus Drosophila and its relation to habitat temperature. *BMC Biology* 19(1):176 (2021)
- [5] Hiramoto A, Jonaitis J, Niki S, Kohsaka H, Fetter RD, Cardona A, Pulver SR, Nose A. Regulation of coordinated muscular relaxation by a patternregulating intersegmental circuit *Nat. Commun.* 12:2943 (2021)

[6] Fukumasu K., Nose A., and Kohsaka H. Extraction of bouton-like structures from neuropil calcium imaging data *bioRxiv* doi:10.1101/2021.05.28.445372 (2021)

(総説)

[7] 高坂洋史、複数の運動出力パターンを生み出す神経 ネットワーク構造、月刊細胞、54(2):47-49 (2022)

(学位論文)

- [8] 劉英涛: Identification of a neural circuit controlling locomotion speed by regulating the phase delay between the movement of head and tail in Drosophila larvae (博士論文)
- [9] 曾祥孫澤: Self-organized Motor Development via Proprioceptive Feedback of Precocious Movements (博士論文、新領域創成科学研究科)
- [10] 李子源: Intra-species variation and temperaturedependent plasticity in larval locomotion kinematics in Drosophila melanogaster and Drosophila simulans (修士論文)
- [11] 伊達隆久: Dissecting the neural wiring in the central nervous system of Drosophila larvae with Expansion Microscopy (修士論文)
- [12] 川崎賢人:ショウジョウバエ幼虫の前進運動に関連した新規介在ニューロンの機能解析(修士論文、新領域 創成科学研究科)
- [13] 駒野目ゆう子: Molecular underpinnings enabling the emergence of spontaneous patterned activity in developing motor circuits (修士論文、新領域創 成科学研究科)
- [14] 高野詩菜: Molecular and circuit mechanisms underlying the diversification of motor commands in Drosophila larvae (修士論文、新領域創成科学研究科)
- <学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [15] Kazushi Fukumasu, Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka.: Spatial configuration of synaptic population activities underlying the generation of larval motor patterns. Neurobiology of Drosophila, 2021.10.5-8, Cold Spring Harbor Laboratory, USA, Online
- [16] Xu Zhang, Takeshi Awasaki, Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka.: Quantitative analysis of Drosophila larval locomotion based on machine vision, October 17
 21, 2021, Neurogenetics of the Drosophila larva 2021, 2021.10.17-21, USA, Online
- [17] Takahisa Date, Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka. Reconstructing single-neuronal morphology from pan-neuronally labeled samples with Expansion Microscopy, Neurogenetics of the Drosophila larva 2021, 2021.10.17-21, Online

(国内会議)

一般講演

- [18] Kazushi Fukumasu, Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka.: Spatially continuous propagation of synapse population activity and its geometric structure in motor pattern generating circuits. 第 44回日本神経科学大会, 2021.7.28-31, 神戸
- [19] Kazushi Fukumasu, Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka.: Spatial configuration of synapse population activities underlying the generation of larval motor patterns. 第14回日本ショウジョウバ エ研究集会, 2021.9.13-16, online
- [20] Xu Zhang, Takeshi Awasaki, Akinao Nose,Hiroshi Kohsaka.: Quantitative analysis of Drosophila larval locomotion based on machine vision. 第 44 回 日本神経科学大会,2016.7.28-31, 神戸
- [21] Takahisa Date, Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka. Dissecting the central nervous system in Drosophila larvae with Expansion Microscopy, 第 14回日本ショウジョウバエ研究集会, 2021.9.13-16, Online
- [22] Takahisa Date, Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka. Dissecting the 3D structure of the Drosophila larval central nervous system with Expansion Microscopy, 第 44 回日本神経科学大会, 2021.7.28-31, 神戸
- [23] Yuko Komanome, Xiangsunze Zeng, Akinao Nose.: Molecular and cellular underpinnings of spontaneous activities in developing motor circuits. 第 44 回日本神経科学大会. 2021.7.28-31, 神戸
- [24] Yuko Komanome, Xiangsunze Zeng, Akinao Nose.: IP3 signaling in a pacemaker cell mediates spontaneous activities in nascent motor circuits of Drosophila embryos. 第 44 回日本分子生物学会年 会. 2021.12.1-3, 横浜
- [25] Shiina Takano, Suguru Takagi, Xiangsunze Zeng, Akinao Nose Miswiring alters the strategy of motor action in a circuit computing avoidance behaviors、 第 44 回日本神経科学大会、2021.7.28-31, 神戸
- [26] Shiina Takano, Suguru Takagi, Xiangsunze Zeng, Akinao Nose Disruption of a guidance cue receptor alters the strategy of motor action in a backwardinducing circuit in Drosophila larvae、第 44 回日本 分子生物学会年会、2021.12.1-3, 横浜

招待講演

[27] 松尾悠司、真中美穂、福益一司、能瀬聡直、高坂洋史、 ショウジョウバエ近縁種における幼虫運動制御の種 間比較、日本遺伝学会第93回大会、2021.9.8-10、オ ンライン

(講義)

[28] 能瀬聡直、学習院大学大学院集中講義「統合生命科学 特論 III」、2021.9.7-8

7.2 樋口研究室

7.2.1 はじめに

生物は、分子、細胞、動物個体といった構造や機 能の階層性を持っている。個体や細胞の機能は,も とをただせば分子の機能であるわけであるが、生体 分子の多さや複雑さゆえに、分子機能から個体や細 胞機能を直接導くことは困難であるのが現状である。 我々研究室では、この溝を埋めるために、まず分子 の機能を詳しく理解するために、1分子の力や変位 の計測を行い,得られた結果から分子機能をできる だけ仮説を少なくして理解する研究を行った。また、 細胞と分子との関係を結ぶために、分子の機能があ らわになるような細胞の輸送機能や運動機能を研究 した。個体機能は、分子と結ぶことが困難であるが、 これを可能にすべく、マウス個体内の細胞や分子の 観測を行った

7.2.2 ウニ精子鞭毛ダイニン集団が発する 力

ウニ精子鞭毛は、分子から鞭毛に至る階層構造を 有している.その各階層構造においてダイニン集団 がどのような特性を持つ力を発生するのか、またダイ ニン分子の力学特性が鞭毛に近い構造の中でどのよ うな役割を果たすのかはわかっていない。研究では、 これらの問題に答えるため、ウニ精子鞭毛、bundle またはダブレット微小管上のダイニンと平行に重合 微小管を結合し、ダイニンの発する力を光ピンセッ トによって測定した。これら intact な状態に近い 3 つの階層のダイニン集団に加え、精製したダイニン を用いて、鞭毛内でのダイニン集団が発生する力の 特性やダイニン分子の特性を明らかにした。軸糸、 bundle、ダブレット微小管の力の大きさと、軸糸で は軸糸の長さ、bundle およびダブレット微小管では 相互作用している重合微小管の長さの関係を解析し た。その結果、軸糸では力は長さんに比例し、1 µ m あたり 14 - 16 pN の力が発生した。bundle もこれ に従うことが明らかになった。ダブレット微小管上 には1 μ m あたり約 115 分子のダイニンが存在し、 ダイニン1分子が出す力は約5 pN と報告されてい ることから、16 pN はダイニン約3分子の力に相当 し、同時に力を発生するダイニンは全体の約3%であ ることが示唆された。一方でダブレット微小管では 長さと力の大きさに明確な比例関係は見られず、い ずれの長さの微小管でも約5 pN の力が最も高頻度に 測定された。このことから、ダブレット微小管で測 定された力は1分子程度のダイニンによるものと考 えられる。軸糸および bundle では、ダイニン分子の duty ratio (力を出す割合) が低い可能性がある。こ れを検証するため、21S ダイニンの in vitro motility assay で duty ratio を求めた。ダイニン密度と滑り 速度の関係に、Sakakibara らの式でフィットして得 られた duty ratio は約7%となった。このことから、 軸糸および bundle で長さ当たりの力が小さい原因 が低い duty ratio にあることが示された。さらに、

duty ratio が低い原因を探るため、21S ダイニンの ATPase cycle における微小管へのアフィニティーを 調べた結果、ADP、AMPPNP、no nucleotide では ダイニンの微小管へのアフィニティーは1 mM ATP 存在下と比較して 2~3%にまで低下することが明ら かになった。21Sダイニンの ATPase cycle 中で強結 合を観察できなかったことは、ダイニンの duty ratio が低い原因の一つであることを示唆する。単一ダブ レットダイニンと相互作用した微小管は、振動し、振 動数は 10~234 Hz であった。この内の 8 例で step finding algorithm によりステップを検出できた。ス テップの大きさの分布からステップサイズは約7.5 ± nm であることがわかった。さらに、振動数が高 いと dwell time が短くなること、プラス方向とマイ ナス方向で dwell time が変化しないことが明らかに 軸糸では同時に力を発生するダイニンは なった。 全体のわずか約3%で、bundleも同じ特徴を示した。 これはダイニンの duty ratio の低さによることが明 らかになった。Duty ratio が低い要因として、ダイ ニン ATPase cycle 中に強結合が少ないことが示唆 された。Active なダイニンの割合は、Cryo-EM によ り示された生きた精子鞭毛内での割合よりも少ない。 ダイニン分子自体に滑り活性を低く抑える制御機構 が存在し、鞭毛の屈曲などのシグナルにより抑制的 制御が解除される可能性がある。ダイニン振動時の 力が 5pN 以下でステップサイズが約 7.5 nm であっ たことかっら、振動時には、少数分子のダイニンが 微小管の周期 8.2nm にそってステップ運動を行うこ とが明らかとなった。

7.2.3 心筋ミオシン少数分子による力と負 荷の関係

心筋βミオシンは、アクチンフィラメントと相互 作用し power stroke と呼ばれる構造変化を起こすこ とで、心臓の心室の収縮をもたらしている。先行研 究では、ミオシンフィラメント内のβミオシン多分 子がアクチンフィラメントと相互作用し、アクチン フィラメントをステップ状に変位させる様子が、光 ピンセットを用いた実験により観測された。得られ た変位から、step size や dwell time、滑り速度等が 求められ、負荷との関係が調べられた。この先行研 究では、負荷がゼロ付近から、滑り速度がゼロとな る最大負荷付近までの範囲で実験が行われた。一方、 ミオシンの力発生は確率的に起こっているため、複 数のβミオシン分子の中には、最大負荷を超える力 を出す分子や、マイナスの力を出す分子が存在する はずである。そこで、本研究では広い範囲の負荷に おけるβミオシンの運動特性を明らかにするために、 マイナスの負荷から最大力を超える負荷までの範囲 にてβミオシン多分子の力計測を行った。力計測で は、ガラス面に固定されたミオシンフィラメントと 一端にビーズが付けられたアクチンフィラメントを 相互作用させ、そのビーズの変位を記録した。この 時、ビーズは光ピンセットで捕捉されており、変位 に比例する負荷がミオシンに与えられる。本研究で は、実験装置の光路の途中にピエゾミラーを置くこ

とで光ピンセットの位置を電気的に制御できるよう にし、力計測中に光ピンセットを動かすことによっ て最大力を超える負荷やマイナスの負荷を実現した。 マイナスの負荷を与える際には、アクチンフィラメ ントのバックリングが起こらないようにするため、 ビーズをミオシンフィラメントのすぐ近く置いた。 その結果、従来よりも広い負荷範囲でステップ状の 変位を観測することができ、3-5 nm 程度の step size やおよそ 10-30 ms の範囲で負荷に依存して変動す る dwell time を求めることができた。マイナスの負 荷から最大力を超える負荷の範囲でアクチンフィラ メントの滑り速度を求めたことで、無負荷での速度 (455nm/s) や最大力 (37.1pN) を決定することができ た。さらに、dwell time やアクチンフィラメントの 滑り速度等の負荷依存性を、プロセッシブモーター タンパク質の運動を統一的に説明するモデル (Sasaki et al. 2018) に基づく式でフィッティングすることが できた。また、先行研究で構築されたβミオシンの 反応モデル (Hwang et al. 2021) が、本研究の実験 で測定された広い負荷範囲においても成立するかを 検証するために、このモデルに基づいたシミュレー ションを行い、実験結果と比較した。その結果、step size や速度の大部分の領域で実験と良い一致を示し たが、dwell time やマイナスの負荷における速度で は実験結果との差が見られた。これにより、シミュ レーションモデルにおける反応速度の値を変更する 必要性が示唆された。以上、従来よりも広い負荷範 囲でのBミオシン多分子の力計測とシミュレーショ ンを行い、ミオシンの運動の特徴量の負荷依存性を 求めたことによって、βミオシンの運動特性につい ての理解が深まり、またシミュレーションモデルの 改良すべき点を明らかにすることができた。

7.2.4 弱体化した細胞を経時的に観察する ための装置の自動化と弱体化した細 胞における小胞拡散の低下

細胞を生育に適さない環境に晒すと、細胞は弱体 化し、一定時間後の生存確率が低下する。弱体化し た細胞では元気な時に比べ形状収縮などの状態変化 が観察され、そうした細胞状態の変化が細胞の生存 確率に寄与していると考えられるが、弱体化した細 胞が元気な細胞と比べ、どのように状態が異なるの かは詳しくわかっていない。そこで細胞が弱体化し た時の状態変化を測定することで、細胞の生と死が どのように決まるかといった細胞の生死にまつわる 条件を明らかにできる可能性がある。 まず弱体化 した細胞を長時間効率的に観察するために、細胞観 察装置の自動化を行った。自動化に当たっては、制 御用のソフトウェアとして MATLAB を利用し、細 胞へのレーザー照射を制御するシャッターの開閉や 顕微鏡ステージの位置移動、カメラ撮影の開始と終 了をプログラムから制御できるシステムを構築した。 また MATLAB から直接信号をやり取りできなかっ た対物レンズポジショナー等のハードウェアについ ても、MATLAB から電圧制御を行うことで間接的 に自動化することができた。以上、装置の自動化に

よって、MATLAB プログラムから長時間の効率的な 細胞状態の観察を容易にデザインできるようになっ 自動化した装置を使って、ATP 産生を阻害す た。 ることで弱体化した細胞の経時的な状態変化を観察 した。その結果、ATP 産生阻害を受けた細胞では細 胞内の小胞の拡散が劇的に低下することがわかった。 小胞の一粒子追跡から平均二乗変位を算出し、拡散 係数を求めたところ、ATP 産生阻害を始めて2時間 後に小胞の拡散係数が数十分の一に、5時間後には 数百分の一に低下することが判明した。一方で、小 胞の拡散係数が低下した時のタンパク質の拡散係数 を、光退色後蛍光回復法を用いて計測したところ、拡 散係数の時間変化は見られなかった。以上の実験か ら、弱体化した細胞においては細胞内の拡散の低下 が起きることがわかり、さらに細胞内の拡散状態に はスケール依存性があることが明らかになってきた。

7.2.5 Wasserstein 距離を用いたエント ロピー生成

Fokker-Planck 方程式における stochastic thermodynamics と最適輸送理論の関係 について調べた。 L2-Wasserstein 距離によって定義される経路長を用 いて測った 作用によって、エントロピー生成の下限 が与えられることを示した。L2- Wasserstein 距離は 最適輸送理論において幾何学的測度であるため、この 結果は エントロピー生成の幾何学的解釈を示唆する。 また、この解釈を用いることで遷 移時間とエントロ ピー生成の間の熱力学的トレードオフを得ることが できた。こ のトレードオフは熱力学的 speed limit として捉えることができ、既存の研究よ りもタイト なエントロピー生成の制限を与える。また、上記の 結果を部分系に対 しても拡張することで部分エント ロピー生成の新たな下限を導いた。この下限を 用い ることで、情報熱力学における熱力学第二法則を一 般化することができた。 さらに、我々の導いたエン トロピー生成の幾何学的解釈はエントロピー生成を 最小にするプロトコルに対しても幾何学的な描像を 与えることができた。具体例と して、これらの結果 を微小系の熱機関に対して応用し、効率に対して幾 何学的な 制約をしめした。

7.2.6 タンパク質により駆動される生体能 動運動の化学反応モデル

タンパク質によって駆動される能動的な運動は、生体内において重要な役割を果たす。これらの能動的な運動は、並進・回転・伸縮の三つに帰着する。最近になって、本研究室では、二量体モータータンパク質の速度負荷応答を統一的に説明する、佐々木・茅・樋口モデル (SKH モデル)が提案された。元々SKH モデルは、キネシン I、ミオシン V、ダイニン I によって駆動される並進運動への応用が想定されたモデルだったが、DNA ポリメラーゼ、RNA ポリメラーゼ、さらに ATP 合成酵素といった、回転を

含む らせん状運動の速度負荷応答をも説明できると いうことが分かった。しかし、SKH モデルは現象論 であり、その物理的な意味は明らかでない。本研究 の目的は、SKH モデルの物理的な意味、特になぜ反 応速度が2つの指数関数の和で表されるのか、また そのパラメータがどのような意味を持つのかを明ら かにすることである。 この目的を達成するために、 我々は、初期通過時刻の概念を用いた化学反応の拡 散 モデルを立てた。このモデルでは、化学反応は、 その自由度 (反応座標) が熱ゆらぎによって拡散し、 高いエネルギーを持つ活性化状態に到達することに よって進行するとモデル化される。反応にかかる時 間は、初期通過時刻、すなわち反応座標が初めて活性 化状態に到達する時間で定義される。特に、反応座 標が1次元の Fokker-Planck 方程式で記述され、エ ネルギー曲面が 2 つの線形エネルギーの組み合わせ で表されるときに、 反応にかかる時間が反応座標に 加えられる力に対してどのように変化するかを計算 した。反応座標に加えられる力の絶対値が大きいと き、反応時間は指数関数で近似でき、 我々のモデル が SKH モデルと類似した速度負荷応答を示すこと が示唆された。

<報文>

(原著論文)

- Yongtae Hwang, Takumi Washio, Toshiaki Hisada, Hideo Higuchi, and Motoshi Kaya. A reverse stroke characterizes the force generation of cardiac myofilaments, leading to an understanding of heart function. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 118, e2011659118 (2021).
- [2] Seohyun Lee, Hyuno Kim, Hideo Higuchi, and Masatoshi Ishikawa. Classification of Metastatic Breast Cancer Cell using Deep Learning Approach. IEEE ICAIIC) (2021)
- [3] Keiko Hirose, Hideo Higuchi, Shimaa A Abdellatef, Hisashi Tadakuma, Kangmin Yan, Takashi Fujiwara, Kodai Fukumoto, Yuichi Kondo, Hiroko Takazaki, Rofia Boudria, Takuo Yasunaga. Oscillatory movement of a dynein-microtubule complex crosslinked with DNA origami. biorxiv(2021)
- [4] Seohyun Lee, Hyuno Kim, Hideo Higuchi, and Masatoshi Ishikawa. A Machine Learning Approach to Transport Categorization for Vesicle Tracking Data Analysis. Proc. SPIE 11647, 116470W. (2021)
- [5] Muka Nakazato, Sosuke Ito. Geometrical aspects of entropy production in stochastic thermodynamics based on Wasserstein distance. Phys. Rev. Res. 3, 043093 (2021)
- [6] 佐伯喜美子,八幡和志,茅元司,樋口秀男.物理学
 科における生物物理学生実験の光学測定教材実験の
 開発大学の物理教育 27 (3), 159-162 (2021)

<学術講演>

(国内会議)

招待講演

- [7] 樋口秀男 NPO 科学協力学際センター(仙台市) 「地球外生命はいるか?」(2022.3.28) On-line meeting. The 98th Annual Meeting of The Physiological Society of Japan.
- [8] Motoshi Kaya. Single-molecule properties of cardiac myosin leading to cardiac function. 3M 2021: Materials, Mimics, and Microfluidics: Engineering Tools for Mechanobiology online meeting (2021.7.21)
- [9] 茅元司 テーマ「研究者としての歴史について」,細胞生物学会 若手の会 (2021.6.28)
- 一般講演
- [10] 藤原貴史,茅元司,鷲尾巧,真行寺千佳,樋口秀男 精子鞭毛ダブレット微小管上のダイニン集団の振動 とモデル計算 生体運動班会議 (2022.1.7-9)
- [11] 太田英暁,樋口秀男 弱体化した細胞における細胞内 粒子拡散の時間変化 生体運動班会議 (2022.1.7-9)
- [12] Hideaki Ota, Hideo Higuchi. Relations between Motions of Intracellular Particles and Cell Death in Damaged Cells. The 59th Annual meeting of the biophysical society of Japan. (2021.9.25-27)
- [13] Takakuni Fukumoto, Kazuo Sasaki, Hideo Higuchi. Unified Understanding of Active Motions Driven by Proteins. The 59th Annual meeting of the biophysical society of Japan.(2021.9.25-27)
- [14] Seohyun Lee, Hyuno Kim, Masatoshi Ishikawa, Hideo Higuchi. Understanding of vesicle transport using machine learning and image processing technology. The 59th Annual meeting of the biophyscical society of Japan.(2021.9.25-27)
- [15] 太田英暁, 樋口秀男 細胞損傷度の定量化に向けた細胞内ナノ粒子の動態解析 ナノ学会 (2021.5.20-22)

社会貢献

[16] 樋口秀男 東大の研究室をのぞいてみよう! プログ ラム 「地球外生命はいるか?」本部社会連携推進課 対象:高校生 (2022.3.22)

7.3 岡田研究室

生命の基本単位は細胞である。細胞は、タンパク 質や脂質、核酸など様々な生体分子が密に集まった 構造物である。細胞を構成する個々の生体分子につ いては、その構造がオングストロームの解像度で原 子模型が作成できる程度に解明され、動態も分子動 力学計算などにより物理化学的な理解が進んでいる。 しかし、それらが集合することで、細胞という生命現 象が如何にして生じるかは全く判っていない。私た ちは、細胞の中で生体分子やその集合体がどのよう な構造をとり、どのような動態を示し、それによっ てどのような機能が発現されるかを、生きた細胞の 中で生体分子を直接見て・測って・操作することを 通じて理解したいと考えている。そのために、当研 究室では、主に生きた細胞の中を可視光を用いて観 察・計測・操作するための技術開発と、これを用いた 細胞生物学・生物物理学研究を並行して進めている。

7.3.1 顕微鏡開発

構造化照明一分子計測顕微鏡

光学顕微鏡の像は、回折により波長程度の滲む。 このため、1 nm 程度の蛍光分子であっても、その像 は波長程度の直径の円盤状に滲んでしまう(波長 500 nm の緑色光の場合、半径約 220 nm)。このために 顕微鏡の分解能は制限され、分解能の回折限界と呼 ばれている。しかし、1 個の蛍光分子の像であるこ とが判っていれば、その位置は、円盤の中心として 推定することが出来る。この場合、位置の推定精度 は、像のノイズで制限される。蛍光分子 1 個の画像 は暗く、フォトン数が少ないため、ショットノイズ が支配的であるため、位置の推定精度はフォトン数 の平方根にほぼ反比例する(図 7.3.1)。







図 7.3.2: 従来法と新規開発手法の性能比較

しかし、蛍光分子1個から放出されるフォトン数 には上限がある。蛍光分子の蛍光寿命は数ナノ秒程 度であるため、1 秒間に 10⁸ フォトン程度が上限で ある。また、10⁻⁶ 程度の確率で三重項状態に励起さ れ酸素と反応して蛍光を失ってしまう (消褪)ので、 実質的なフォトン数の上限は 10⁶ 程度である。この うち、顕微鏡の対物レンズを通り、検出器まで到達 するのは 1/10 程度で、100 コマの連続撮影をすると すると、1 コマあたりは 10³ 程度という計算になる。 したがって、蛍光分子の位置の推定精度は、回折限 界より約 30 倍改善することができて、10 nm 程度を 達成できる。

タンパク質分子の大きさは 10 nm 程度であるた め、タンパク質分子内の構造変化を計測するために は、これでは不十分である。そこで池崎は、より少 ないフォトン数で高い位置推定精度を達成する計測 手法を開発した。構造化照明を応用した新規の計測 法を実装した顕微鏡を作製し、従来の計測と同程度 のフォトン数の計測条件で 1 nm の位置精度が達成 できることを実証した (図 7.3.2)。

倒立ライトシート顕微鏡

光学顕微鏡画像は基本的に2次元であるため、細胞などの3次元構造の計測では、断層画像を多数枚撮影し、3次元構造を再構築する。そのような用途では、共焦点顕微鏡が用いられてきたが、断層画像を撮影する度に試料全体を照明するために、消褪や光毒性など試料への悪影響が課題となっていた。

近年、観察用の対物レンズの光軸と直交する方向 から薄層化した照明光を入射させ、観察用対物レン ズの焦点面のみを照明するというライトシート顕微 鏡が注目されている。断層画像を撮影するその面だ けを選択的に照明することができるため、消褪や光 毒性などの悪影響を最低限に抑えられるためである。 しかし、高分解能での観察のためには、試料直上に 開口数の大きなレンズを2本直交して配置する必要 があり、取り扱いが困難である(図7.3.3)。試料の取 り扱いやすさという観点からは、通常の倒立顕微鏡 のように、光学系はすべて試料の下側にあり、試料 の上部がフリースペースであることが望ましい。

そこで黒田は、通常の倒立顕微鏡をベースに、1本 の対物レンズでライトシート照明と観察を行う倒立 ライトシート顕微鏡を製作し(図 7.3.4)、良好な結果 が得られつつある。

定量位相差顕微鏡

細胞は可視光をほとんど吸収しない透明な構造で あるため、色素や蛍光色素で染色して観察すること が多い。しかし、染色による影響や、蛍光観察にと もなう光毒性などの悪影響を避けるために、無染色 で生細胞を観察することも重要である。

この目的では、古くから位相差顕微鏡や微分干渉 顕微鏡が用いられてきた。いずれも、タンパク質や 脂質などの生体成分の屈折率が水より大きいことを 利用し、位相遅れを強度に変換して観察するという 顕微鏡法である。さらに、干渉計を組むことで位相



図 7.3.3: 高分解能ライトシート顕微鏡の試料周辺

遅れを定量化すれば、既知の屈折率の値を利用して、 タンパク質や脂質の量を推定することが出来る。こ れは定量位相差顕微鏡法とよばれている。犬塚は、干 渉計を用いるのではなく、偏光を利用した斜光照明 と偏光カメラを巧みに組み合わせることで、一回の 撮影で4方向からの斜光照明画像を取得し位相回復 する polarization-based differential phase contrast (pDPC)法を開発した(図7.3.5, [10])。さらに、その 応用として、犬塚は、無染色生細胞の定量位相差顕 微鏡像の機械学習による解析も行った。機械学習の 手法を利用して、細胞の認識・追跡を自動で行い、さ らに各細胞の画像を畳み込みニューラルネットワー ク(CNN)に学習させることで、細胞周期の自動分類 が出来ることを示した([10])。

7.3.2 蛍光プローブの開発と応用

顕微鏡の開発と並行して、私たちの研究室では、遺 伝子、エピゲノム状態、転写状態、代謝状態など細胞 状態を可視化する蛍光プローブの開発も進めている。

転写状態可視化の蛍光プローブについては、通信 技術総合研究所の原口研究室との共同研究で、細胞に 導入された(トランスフェクション)外来遺伝子が、 どのようにして核にとりこまれ、どのタイミングで 転写が始まるかの解析を行った([3])。これまで、細 胞分裂を頻繁に行っている細胞ではトランスフェク ションが容易であることが経験的に知られていたが、 今回の研究によって、トランスフェクションされた 外来遺伝子は、細胞分裂後の核膜再構築の過程で核 内にとりこまれ、その後に転写が開始されることが 明らかとなった。

代謝状態のプローブでは、柳沼が、細胞内のエネ ルギー通貨ともいわれるアデノシン三リン酸 (ATP) の細胞内濃度を計測することが出来る蛍光プローブ QUEEN-37Cを開発した。37°C前後で維持されるヒ トなどの培養細胞での使用に至適化したプローブで



図 7.3.4: 黒田式倒立ライトシート顕微鏡

ある。ATP の主な合成系路として、解糖系と酸化的 リン酸化がしられており、たとえばガン化の際には 酸化的リン酸化から解糖系へと ATP 合成系路が切り 替わる (ワールブルグ効果) など、細胞状態と代謝経 路には密接な関係がある。柳沼は、イヌ腎臓上皮由 来の MDCK 細胞を用いて、細胞密度によって ATP 合成系路が切り替わるという現象や、その際に細胞 毎に独立に切り替わるのではなく、隣接細胞間で同 調して切り替わるなどの新奇な現象を発見した([7])。 また、この解析の際には、ロモノーソフ記念モスクワ 国立大学から留学中の Alexandr 君が開発した機械 学習ベースの画像処理法 ([?]) がフルに活用された。

7.3.3 情報物理学理論の応用

私たちは、生体分子機械の動作を理解するための 理論的枠組みとして、非平衡系の熱力学・情報物理 学に注目している。

井原は、生物普遍性研究機構 (UBI) の伊藤研究室 との共同研究で、一分子計測で得られる経時的デー タからエントロピー生成を推定できるのではないか という理論的結果を発展させ、実際の実験データへ の適用の可能性を検討している ([11])。

また、特別実験で私たちの研究室に配属された吉田君は、中央大学宗行研究室、UBI 伊藤研究室との共同研究で、生体膜上のポンプの一種である二次能動輸送体 (secondary acrive transporter)の情報熱力学的解析を行った。二次能動輸送体とは、他の物質の膜内外の濃度差をエネルギー源として、濃度勾配に逆らった輸送をする輸送体である。たとえば、糖尿病治療薬の標的分子であるナトリウム依存性グルコース輸送体は、細胞外に高濃度に存在するナトリウム



図 7.3.5: pDPC 法で得られた無染色生細胞画像

イオンが細胞内に流入することと共役させて、細胞 外からグルコース分子を細胞内に汲み上げる輸送体 である。吉田君は、この2つの輸送経路を2つのブ ラウニアン・ラチェットでモデル化するという宗行 先生のモデルを発展させ、2つのラチェットが共役す る一般的な場合について、情報熱力学的解析を行っ た。その結果、uniport, symport, antiport など様々 に分類して記載されてきた膜輸送体が、このモデル で統一的に記述され、その効率が2つのラチェット 間の情報流によって制限されるという結果が得られ た([4])。

- [1] 岡田康志, Blue Flame Award, Addgene, 2022 年 3 月
- [2] 永山龍那, 理学部学修奨励賞, 2022年3月

<報文>

(原著論文)

- [3] T. Haraguchi *et al.*, Transfected plasmid DNA is incorporated into the nucleus via nuclear envelope reformation at telophase, Commun Biol 5, 78 (2022).
- [4] S. Yoshida, Y. Okada, E. Muneyuki, S. Ito, Thermodynamic role of main reaction pathway and multi-body information flow in membrane transport, arXiv:2112.04024 (2021).
- [5] R. Kowada *et al.*, The function of Scox in glial cells is essential for locomotive ability in Drosophila, Sci Rep **11**, 21207 (2021).
- [6] T. S. Nakamura *et al.*, Suppression of Vps13 adaptor protein mutants reveals a central role for PI4P in regulating prospore membrane extension, PLOS Genetics **17**, e1009727 (2021).
- [7] H. Yaginuma, Y. Okada, Live cell imaging of metabolic heterogeneity by quantitative fluorescent ATP indicator protein, QUEEN-37C, bioRxiv 2021.10.08.463131 (2021).

<受賞>

(会議抄録)

[8] Alexandr Y, et al. A method for automatic tracking of cell nuclei with weakly-supervised mitosis detection in 2D microscopy image sequences, ICB-SIP2020 ACM, 67 – 73. (2020)

(国内雑誌)

 [9] 高尾大輔、岡田康志、「AIを用いた細胞画像解析」、肝 胆膵 84, 9-14 (2022)

(学位論文)

- [10] 犬塚悠剛、高解像度定量位相差顕微鏡法とその生物物 理学的応用 (修士論文)
- [11] 井原悠雅、生物時系列データからのエントロピー生成 推定(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

 [12] Yasushi Okada, Live cell imaging technologies for single-cell analysis, Pacifichem 2021, 2021 年 12 月 17 日

(国内会議)

- [13] 岡田康志、細胞や分子を見て、判るためのイメージン グ、日本光学会年会基調講演、2021年10月28日
- [14] 岡田康志、エピゲノム状態・転写・代謝など細胞状態 を可視化する蛍光プローブ技術、ARO協議会第8回 学術集会、2021年9月10日
- [15] 岡田康志、超解像顕微鏡の現状と課題、学振第 125 委員会講演会、2021 年 7 月 16 日

(セミナー)

[16] 岡田康志, Super-resolution live cell imaging and beyond, 京大生命動態研究センター、2021年11月19日

7.4 古澤研究室

生物システムは、様々な環境変化や内部状態の揺 らぎの下で機能し続けられる頑強性(ロバストネス) を持つ一方で、 環境変化などに対して柔軟に内部状 態を変化させる可塑性を持つ。 このロバストネスと 可塑性が両立できるという性質は、生物システムと 人工システムの本質的な違いであるが、 どのように して複雑な化学反応のネットワークがその両立を可 能とするか、そのメカニズムの理解は進んでいない。 一方で、大規模な生物実験データが取得できるよう になり、そうしたデータに基づいてシステムの状態 遷移やそのロバストネスを議論できるようになりつ つある。我々の研究室では、分子から生態系といっ た様々な階層における生物システムの振る舞いに関 して、その状態のロバストネスと可塑性がどのよう な性質を持つか、理論研究と実験研究の双方からの 理解を目指している。

7.4.1 選択圧を動的に変化させることによ り進化過程を制御する手法の開発

ある一つの薬剤を添加した環境での大腸菌進化実 験を行い、その過程において同時に他の複数の薬剤 に対する耐性能を定量することにより、薬剤耐性能 を軸とした高次元空間における軌跡として薬剤耐性 進化のダイナミクスを記述することが出来る。この 耐性能空間においてターゲットとする表現型を指定 し、現在の表現型からそのターゲット表現型へ向け た進化過程を実現する手法を構築した。具体的には、 単純なフィードバック制御の手法と交差耐性・感受 性を表すヤコビ行列を用い、複数薬剤の濃度勾配を 適切に組み合わせることにより、進化軌跡の制御を 実現している。2 次元と 3 次元の耐性能空間におけ る制御が可能であることを確認した。今後は、この 進化制御の手法をより多くの薬剤や環境ストレスの 組み合わせで実装し、どのような進化過程が構成可 能で、どのような表現型の実現が難しいかを明らか にしていく。

7.4.2 複数の微生物種を用いた生態系進化 実験

自然界では生物は単独の種で進化をすることは無 く、他の生物種との相互作用が恒に存在する。ゆえ に進化を定量的に理解し、さらにその予測と制御を 行うためには、相互作用を含んだ生態系としての進 化過程を解析することが重要となる。そこで複数の 微生物種を混合した人工生態系を初期状態として、抗 生物質を添加した環境下で植え継ぎ培養を行う生態 系進化実験を行った。結果として、単独では生存で きない高い抗生物質濃度の環境下でも、より高い耐 性を持つ他種との相互作用を通じて生存することが 可能となるなど、単独微生物種の進化実験とは大き くことなる進化ダイナミクスの振る舞いを観察する ことが出来た。今後は、こうした実験進化の過程に おいて、それぞれの種の表現型と遺伝子型がどのよ うに変化するかを解析することにより、生態系にお ける進化ダイナミクスが持つ性質を明らかとする。

7.4.3 細胞分化の階層性と不可逆性:状態 空間におけるアトラクターの分布と の対応

多細胞生物は各細胞内に同一の遺伝情報を持ちな がら、多種の安定した細胞タイプを持つ。これらの 細胞タイプを作り出す過程(細胞分化)に広く見ら れる性質として、最終的な分化状態に至るまでに複 数の段階を経て分化すること(階層性)と、分化能 は減少していくこと(不可逆性)の2つが挙げられ る。しかしながら、この階層性・不可逆性がどのよ うな機序で獲得されてきたのかは明らかとなっては いない。そこで本研究では、細胞内の遺伝子発現制 御ネットワークを力学系としてモデル化し、発現量 に対する摂動による状態遷移(=細胞分化)がどの ような性質を持つかを解析した。結果として、摂動 が小さい場合には分化経路の階層性がほとんど出現 せず、一方で摂動がある程度大きい場合には、多様 な細胞タイプへの分化を実現するためには階層性が 必要であることが示唆された。加えて、階層性が獲 得されるような条件においては、不可逆性もともに 獲得されていた。この結果は、細胞分化の階層性と 不可逆性が、多様な細胞タイプを出現させるために 同時に獲得される性質であることを示唆している。

7.4.4 人工的な代謝ネットワークの緩和特 性とネットワーク構造

微生物は潤沢に栄養が供給された環境下では指数 関数的にその個体数を増やしていく。一方で栄養を 使い果たした細胞集団は「静止相」と呼ばれる状態に 遷移する。この相において細胞個体数は文字通り静 止しているのだが、近年の実験的な報告により内部 の代謝状態は数時間から数日という、非常に長い時 間スケールで変化していることが明らかになってき た。代謝現象の典型的な時間スケールは高々0.1 秒 程度であることを踏まえるとこの時間スケールは不 思議なほどに長い。この時間スケールはいったいど こから、どのようにして生じているのだろうか?

この問いにアプローチするため、我々は大腸菌中心 代謝経路の動力学モデルの緩和特性を研究した。そ の結果、遺伝子制御などを考慮せずとも ATP などの 多くの反応に参画している化学物質の枯渇によって、 典型的な時定数よりも数万倍遅い「異常緩和」が生 じることを明らかにした。

この研究は大腸菌の中心代謝経路を対象としたも のであった。では、生体内の化学反応が「遅い」ダイ ナミクスを示すための、より普遍的な理論を構築す ることは出来ないだろうか。そこで本研究では、ネッ トワーク構造とダイナミクスの関係を理解するため に「人工的代謝ネットワーク」というモデルを構築 した。これは各反応素過程で物質量が保存されるよ うな化学反応ネットワークに化学反応動力学を導入 したものであり、反応系に供給される栄養物質と目 的物質に応じて多様なネットワーク構造をとる。

まず人工的代謝ネットワークのダイナミクスを網 羅的に数値計算した結果、定常状態への緩和には (i). 指数緩和,(ii).指数緩和+プラトー,(iii).異常緩和の3 通りがあることが分かった。また、これらダイナミ クスの定性的特徴とネットワーク構造の関係を調べ たところ、ダイナミクスのタイプは化学量論行列の (a). ランク、(b). 左零空間、そして (c).Stoichiometric Cone によって決まることが分かった。

7.4.5 空間分割された細胞モデルにおける 触媒反応ネットワークの分業の進化

細胞の内部には多様な空間構造が存在し、各領域 が異なる生化学反応を分担して行っている。このよ うな空間構造の代表例は真核細胞のもつ細胞内小器 官であるが、昨今の液液相分離研究の進展によって、 原核細胞においても空間構造形成行われていること が分かってきた。また、相分離した区画では特定の 分子が凝集し、いくつかの化学反応が強く促進されて いることが報告されている。これらのことより、空 間構造の形成と生化学反応の分業は真核細胞に限ら ず、細胞に広く見られる特徴である可能性が考えら れる。どのような条件で空間構造の形成と分業が発 生するのかを調べるために、シンプルな細胞モデル と進化的シミュレーションを用いた研究を行った。

本研究用いたモデルはランダムな触媒反応ネット ワークを内部に持つ細胞モデルである。モデル細胞 は外部から栄養を取り込み、複数段階の化学反応を 経て、細胞膜に相当する成長因子を生成する。化学 反応を空間的に分業することの利点を調べるために、 まず空間分割は所与のものとし、成長因子をもっと も早く生成出来るように各区画で行う反応の組み合 わせ最適化を行った。この際、一部の化学物質は区 画間を拡散的に透過できるような設定を用いた。ま た、最適化の手法としてはメタヒューリスティック のひとつである遺伝的アルゴリズムを採用した。

その結果、空間分割を行って区画毎に異なる反応 を実行することによって成長速度の増大が見られた。 区画の有無による成長速度の変化は、初期に生成し たランダムな反応ネットワークの構造によって大き くばらつくが、現段階ではネットワークのどのよう な特徴量が区画化による成長速度の増大幅に関連し ているのかは明らかに出来ていない。引き続き研究 を進めていくことで、区画化の恩恵が大きいネット ワークと小さいネットワークの差異を明らかにし、ま た現実の代謝ネットワークとの比較なども行ってい く予定である。

7.4.6 代謝ネットワークの構造とスペシャ リスト・ジェネラリスト戦略

生物の集団動態を理解するために、スペシャリス ト戦略・ジェネラリスト戦略は古くから研究されて きた。スペシャリスト戦略を取る生物種は限られた 環境下で極めて高い適応度を示すが、それ以外の環 境では適応度が低く、他方ジェネラリスト戦略を採 る生物種は多様な環境で平均的な適応度を示す。ス ペシャリスト戦略・ジェネラリスト戦略に関する研 究の多くは、異なる戦略を採用する生物種が生態系 に存在した場合の集団動態に興味が向けられており、 スペシャリスト戦略・ジェネラリスト戦略の両戦略 が存在することは仮定されていた。しかし、なぜ適 応できる環境の多様さと、最大適応度の間にはトレー ドオフがあるのだろうか。広い環境で高い適応度を 示す、いわば「最強生物」のようなものはなぜ禁止 されているのだろうか。この問いに迫るために、本 研究では代謝ネットワークの構造と、その結果とし て生じる戦略の間にどのような関係があるのかをモ デルを用いて調べた。

本研究では代謝ネットワークモデルを用いて、ネッ トワーク構造と複数の環境下における成長速度の関 係を調べた。我々の用いた代謝ネットワークモデル は、複数の栄養物質を外部から取り込み、複数段階の 代謝反応を経て成長因子を生成するものである。代 謝ネットワーク生成時にはあらかじめ代謝物質に「質 量」を割り振り、反応素過程で必ず質量が保存するよ うに代謝物質間にランダムに反応を割り当てた。複 数種類ある栄養物質を様々な組み合わせで代謝ネッ トワークモデルに供給し、各栄養条件下(以下「環境」 と呼ぶ)における成長速度を Flux Balance Analysis を用いて調べた。

その結果、多くの環境で成長するネットワークと、 限られた環境でしか成長できないネットワーク、2種 類のネットワークが典型的に得られた。多くの環境 で成長するネットワークは環境毎の成長速度が全体 的に低く、一部の環境でのみ育つものは、適した環境 下では飛び抜けて高い成長速度を示すことが分かっ た。即ち、反応素過程における質量保存のみを課し たランダムなネットワークという極めてシンプルな モデルから、ジェネラリスト戦略・スペシャリスト 戦略の両者が典型的に出現することが分かった。

次に、上述の手法で生成した代謝ネットワークを 持つ細胞たちの個体数動力学を調べるため、集団動 態シミュレーションを行った。その結果、必ずしも 成長速度の最大値が高い種が生き残るわけでなく、成 長速度の最大値の高さと標準偏差の低さのバランス を取った種が集団内で支配的になることが分かった。

7.4.7 オペロン構造の形成過程の実証実験

細菌では、機能が関連した複数の遺伝子が、オペ ロンと呼ばれる構造にまとめられている。オペロン はゲノム DNA 上の複数の遺伝子が、一つのプロモー ター下に配置された構造である。機能的に関連した 複数の遺伝子がオペロン構造を取ることで、細菌は、 複数の遺伝子を同時に制御でき、様々な環境に対し て迅速に適応できている。オペロン構造を取ること の合理性や利点については、精力的に検証されてき ているが、DNA 上の離れた位置にある複数の遺伝子 が集まってオペロンを形成するメカニズムについて はこれまで不明であった。このオペロン構造の形成 メカニズムについての示唆を得るため、我々は、細菌 において多様な構造変異に関わる挿入配列に注目し た。多くの細菌は、挿入配列と呼ばれる DNA 上を 飛び回る配列(トランスポゾン)を持っている。挿 入配列は、DNA の適当な位置へ自身の配列を挿入さ せるだけでなく、挿入配列近傍の DNA の配列の切 除、自身の配列の切り出しなど、自己および近傍の DNA 配列に多様な構造変異を誘発させることが知ら れている。我々は、挿入配列を挟んで互いに離れた 座位に配置された2つの遺伝子(抗生物質耐性遺伝

子と蛍光タンパク質)をもつ大腸菌を用意し、これ らの DNA 領域の構造変化を追跡可能な進化実験を 行った。

この大腸菌を 20 世代程度培養したところ、挿入 配列の活性が高い条件下では、挿入配列近傍で多様 な構造変化が生じ、多様な蛍光を持つ変異体が生じ ることわかった。この変異体集団の中から、抗生物 質耐性遺伝子と蛍光タンパク質遺伝子がオペロン構 造を形成したと考えられる蛍光強度を示す変異体を、 蛍光セルソーターで分取し、遺伝子型を DNA シー ケンシングで調べた。その結果、これら2つの遺伝 子が実際にオペロン構造を形成したことが確認され た。さらに、多様な蛍光を示す変異体集団の遺伝子 型を調べたところ、挿入配列によって挿入配列近傍 に様々な構造変異が生じていることがわかった。こ れらの構造変異のパターンを考慮すると、挿入配列 による近傍配列の欠損と挿入配列自身の切り出しに よって、注目する2つの遺伝子間が近接し、オペロ ン構造が形成されたことがわかった。以上の結果は、 これまで不明であったオペロン構造の形成メカニズ ムについて、挿入配列が中心的や役割を担いうるこ とを示唆している。

7.4.8 細菌の遺伝子発現量の進化しやすさ を定量する

生物の表現型進化は自由自在ではない。ある表現 型は進化が他の表現型よりも速く、またある表現型で は進化しやすい方向が定まっている。進化生物学の 中心課題の一つは、この表現型進化の速度と方向性に おける制約を司るメカニズムを解明することである。 生物の表現型進化の大部分は遺伝子発現量やその制 御の進化によって引き起こされる。そのため、高次 の表現型の進化の制約は、その表現型を司る個々の 遺伝子の発現量における進化的制約と密接にリンク していると考えられている。実際、遺伝子発現量の 多様化進化の速度は一様ではなく、遺伝子ごとにそ の発現産物の機能や性質に応じて異なっている。特 に、必須な遺伝子や、種間で保存されているコア遺伝 子は、発現量の多様化進化速度が、その他の遺伝子 に比べて遅いことが広く観察されている。発現量の 進化速度における遺伝子ごとの差異はしばしば、遺 伝子ごとに受ける選択圧の違いによって説明されて きた。しかし、進化速度の分散の要因は選択だけで はなく、新たに生じた変異が遺伝子発現量に与える 影響(ME: Mutational Effect)が、遺伝子ごとに-様でないことも、考慮すべき要因の一つである。実 際、必須遺伝子の発現量における進化的制約は、純 化選択だけでなく、ME がより小さな値になるよう にバイアスされていることでも説明できる。理論研 究からも、遺伝子発現量における ME の寄与が無視 できないほど大きいことを示唆する解析結果が提示 されている。

遺伝子発現量における ME のバイアスを検出する ためには、自然選択による交絡要因を排除する必要 がある。遺伝子発現量における ME のバイアスの検 出を試みた研究では、ゲノム全体への変異蓄積実験 が利用されている。変異蓄積実験とは、人為的な選 択を加えずに生物を培養し続けることで、ゲノム全 域に様々な突然変異が導入された生物集団を作成す る実験である。変異蓄積実験で得られた変異体集団 遺伝子発現プロファイルを調べることで、ME のバ イアスを検出でき、背後に潜む遺伝的特徴を抽出す ることができるとされている。酵母による変異蓄積 実験では、より多くの種類の転写因子によって発現 制御を受ける遺伝子ほど ME が大きく、また、TATA ボックスと呼ばれる特徴的な配列を有するプロモー ターによって発現が駆動される遺伝子ほど ME が大 きいことがわかっている。しかしながら、酵母以外 のモデル生物では同様の実験が行われておらず、ME のバイアスを決定づけるとされるこれらの因子の-般性については一切わかっていない。そこで本研究 では、原核生物のモデル生物である大腸菌を用いて 変異蓄積実験を行い、網羅的な遺伝子発現量解析を 行って、ME の遺伝子間バイアスとその遺伝的特徴 量の抽出を行った。

その結果、大腸菌においても、より多くの種類の 転写因子によって発現制御を受ける遺伝子ほど ME が大きいことが明らかとなった。また、転写因子の 種類によっても、ME の大きさが変化することが明 らかとなった。さらに、プロモーター配列において も、シグマ因子の種類によって、ME が変化すること が明らかとなった。これらの実験証拠は、酵母での 先行研究の予想を裏付けており、ME のバイアスが 転写制御ネットワークの構造や性質に依存すること を支持している。次に我々は、ME の大きさが、遺 伝子機能とどのような関係にあるかを調べた。Gene Ontology エンリッチメント解析を行った所、ME が 大きい遺伝子では、運動性や炭素源の中心代謝経路 に関わることが明らかとなった。これらの機能をも つ遺伝子のいくつかは、ME を大きくする転写因子に よって制御されており、また、多くの種類の転写因子 による制御を受けていることを考慮すると、転写制 御ネットワークの構造による ME のバイアスが、ま とまった高次の遺伝子機能、表現型の進化速度や方 向性に影響を及ぼしていることを示唆している。今 後は、これらの予想を確認する実験や解析を行って いく予定である。

<報文>

(原著論文)

- Elevated Sporulation Efficiency in Fission Yeast Schizosaccharomyces japonicus Strains Isolated from Drosophila. Seike T, Sakata N, Matsuda F, Furusawa C. J Fungi (Basel). 2021 Apr 29;7(5):350.
- [2] Laboratory evolution of Mycobacterium on agar plates for analysis of resistance acquisition and drug sensitivity profiles. Maeda T, Kawada M, Sakata N, Kotani H, Furusawa C. Sci Rep. 2021 Jul 23;11(1):15136.
- [3] Mutational property of newly identified mutagen l-glutamic acid γ-hydrazide in Escherichia coli. Maeda T, Shibai A, Yokoi N, Tarusawa Y, Kawada M, Kotani H, Furusawa C. Mutat Res. 2021 Jul 21;823:111759.

- [4] The sixth transmembrane region of a pheromone G-protein coupled receptor, Map3, is implicated in discrimination of closely related pheromones in Schizosaccharomyces pombe. Seike T, Sakata N, Shimoda C, Niki H, Furusawa C. Genetics. 2021 Dec 10;219(4):iyab150.
- [5] Acceleration of target production in co-culture by enhancing intermediate consumption through adaptive laboratory evolution. Kawai R, Toya Y, Miyoshi K, Murakami M, Niide T, Horinouchi T, Maeda T, Shibai A, Furusawa C, Shimizu H. Biotechnol Bioeng. 2022 Mar;119(3):936-945.
- [6] Decoding gut microbiota by imaging analysis of fecal samples. Furusawa C, Tanabe K, Ishii C, Kagata N, Tomita M, Fukuda S. iScience. 2021 Nov 22;24(12):103481.
- [7] Experimental demonstration of operon formation catalyzed by insertion sequence. Kanai Y, Tsuru S, Furusawa C. Nucleic Acids Res. 2022 Jan 24:gkac004.
- [8] Identification of Bacterial Drug-Resistant Cells by the Convolutional Neural Network in Transmission Electron Microscope Images. Hayashi-Nishino M, Aoki K, Kishimoto A, Takeuchi Y, Fukushima A, Uchida K, Echigo T, Yagi Y, Hirose M, Iwasaki K, Shin'ya E, Washio T, Furusawa C, Nishino K. Front Microbiol. 2022; 13:839718.
- [9] Potential contribution of intrinsic developmental stability toward body plan conservation. Uchida Y, Shigenobu S, Takeda H, Furusawa C, Irie N, BMC Biology, in press.
- [10] Distinct survival, growth lag, and ribosomal RNA degradation kinetics during long-term starvation for carbon or phosphate. Himeoka Y, Gummesson B, Sørensen MA, Svenningsen SL, Mitarai N, mShpere, in press
- (国内雑誌)
- [11] 今井正幸,古賀信康,佐甲靖志,原田慶恵,古澤力,澤 井哲,田口英樹:「生物物理」刊行 60 周年記念 連続 座談会 III 生物物理学の概念と展望,生物物理 2021; 61(6):410-418
- [12] 古澤力: 微生物進化実験を用いた進化過程の定量解 析, 生物の科学 遺伝 2022 Jan; 76(1):26-31

(学位論文)

[13] 中村能之:遺伝子制御モデルにおける細胞分化の階層 性と不可逆性(修士論文)

(著書)

[14] Direction and Constraint in Phenotypic Evolution: Dimension Reduction and Global Proportionality in Phenotype Fluctuation and Responses. Kaneko K, Furusawa, C. In: Crombach A. (eds) Evolutionary Systems Biology. Springer 2021, pp. 35-58.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

[15] Y. Kanai, S. Tsuru, C. Furusawa: Emergence of prokaryotic operon structure by insertion sequence activity: an experimental demonstration, RIKEN BDR Symposium 2022, 2022 年 3 月

招待講演

- [16] C. Furusawa: Toward prediction and control of microbial evolution: Analysis of phenotypic constraints, 2nd AsiaEvo Conference, 2021 年 8 月
- [17] S. Suemasa, E. Hayashi, I. Aritome, T. Asano, A. Shibai, S. Tsuru, C. Furusawa: Laboratory Automation for High-level Expression of Recombinant Protein-A in *Escherichia coli*, The 25th SANKEN International Symposium Innovative Science and Technology after the Emergence of COVID-19, 2022 年 1 月
- [18] C. Furusawa: Toward prediction and control of microbial evolution: Analysis of phenotypic constraints in laboratory evolution, BDR Symposium 2022, 2022 年 3 月

(国内会議)

一般講演

- [19] 一井俊介, 姫岡優介, 古澤力:細胞モデルにおける内部 構造の自発形成と成長速度の増大, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月
- [20] 中村能之, 姫岡優介, 斉藤稔, 古澤力: 遺伝子制御ネットワークと細胞分化の遷移ルールの対応, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月
- [21] 姫岡優介, 御手洗菜美子: 大腸菌代謝動力学における 緩和軌道の多様性, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月
- [22] 戸谷吉博,川井隆太郎,三吉健太,村上茉奈美,一色 衣香,堀之内貴明,前田智也,古澤力,清水浩:代謝シ ミュレーションと指向性進化に基づく有用物質生産微 生物の開発,化学工学会第52回秋季大会,2021年9 月
- [23] 井坂諭紀雄,斉藤稔,古澤力:胚発生における遺伝子 発現制御モデルの時空間的妥当性を評価する数理モデ ルの構築,2021年日本バイオインフォマティクス学 会年会・第10回生命医薬情報学連合大会,2021年9月
- [24] 清家泰介,武方宏樹,阪田奈津枝,古澤力,松田史生: ショウジョウバエからの野生酵母の単離と産業への 展開,第73回日本生物工学会大会,2021年10月
- [25] 村上茉奈美,川井隆太郎,前田智也,堀之内貴明,古澤 力,戸谷吉博,清水浩:メバロン酸取り込み能力が強 化された進化株のゲノム変異解析,第73回日本生物 工学会大会,2021年10月
- [26] 古澤力:細胞と生態系の状態を予測し制御する:大規 模進化実験によるアプローチ、シンポジウム「バイオ DX の最前線」、2021 年 11 月

- [27] 安岡有理, 古澤力, 岡崎康司:遺伝子発現の多様性か ら制御ネットワーク進化の制約と方向性を探る, シン ポジウム「バイオ DX の最前線」, 2021 年 11 月
- [28] 清家泰介, 阪田奈津枝, 古澤力: 分裂酵母におけるフェ ロモン認識の分子機構と生殖隔離への影響, 第44回 日本分子生物学会年会, 2021年12月
- [29] 芝井厚, 古澤力: ラボオートメーションで細胞の表現 型を動的に制御する, ウイルス学若手研究集会 2021, 2021 年 12 月
- [30] 前田智也, 古澤力: マイクロバイオームの大規模継代 培養実験による共生関係の解明, 第16回ゲノム微生 物学会年会, 2022年3月
- [31] 清家泰介,武方宏樹,阪田奈津枝,小谷葉月,古澤力, 松田史生:ショウジョウバエから分離された野生酵母の分類と多様性,第16回ゲノム微生物学会年会,2022 年3月
- [32] 一井俊介, 姫岡優介, 古澤力: 空間分割された細胞モ デルにおける触媒反応ネットワークの分業の進化, 日 本物理学会第 77 回年次大会, 2022 年 3 月
- [33] 新美倫太郎、古澤力、姫岡優介:代謝ネットワークの 構造によるジェネラリスト・スペシャリスト戦略の出 現,日本物理学会第77回年次大会,2022年3月
- [34] 中村能之, 姫岡優介, 斉藤稔, 古澤力: 細胞分化の階層 性と不可逆性: 状態空間におけるアトラクターの分布 との対応, 日本物理学会第 77 回年次大会, 2022 年 3 月
- [35] 姫岡優介,御手洗菜美子,Julius Bier Kirkegaard, Sandeep Krishna:人工的な代謝ネットワークの緩 和特性とネットワーク構造,日本物理学会第77回年 次大会,2022年3月
- [36] 大竹和正, 芝井厚, 古澤力, 坂本健作: 非アミノ酸を含 む遺伝暗号の開発と大腸菌進化への影響, 第16回無 細胞生命研究会, 2022年3月
- [37] 金井雄樹,津留三良,古澤力:オペロン構造を基本と する遺伝子発現制御機構の起源に関する IDE 仮説の 実証実験,第46回 生命の起原および進化学会学術講 演会,2022年3月

招待講演

- [38] 古澤力:ロボット駆動実験による新たな生命科学,日本ロボット学会若手ロボティクス研究会「生物学のすすめ 生物学×ロボティクスの学際研究」,2021年7月
- [39] 古澤力: ロボットによる大規模実験系を用いた共生 進化機構の解析,第 23 回日本進化学会年大会,2021 年 8 月
- [40] 前田智也, 古澤力: 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, 第15回細菌学若手コロッ セウム, 2021年8月
- [41] 前田智也, 岩澤諄一郎, 古澤力:実験室進化による薬 剤耐性進化ダイナミクスの解析, 日本生物工学会北日 本支部会・シンポジウム講演, 2021 年 8 月
- [42] 前田智也, 古澤力: 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, 新学術領域「ポストコッホ 生態」 - ACT-X「環境とバイオテクノロジー」合同 シンポジウム, 2021 年 9 月
- [43] 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~, 生命情報科学若手の会 第 13 回研究会, 2021 年 10 月
- [44] 古澤力:細胞の壊し方:進化実験によるアプローチ, 細胞を創る研究会 14, 2021 年 11 月
- [45] 古澤力:大腸菌の大規模進化実験:進化の予測と制 御に向けて,第44回日本分子生物学会年会,2021年 12月
- [46] 細田一史, 瀬尾茂人, 村上なおみ, 長田穣, 松田秀雄, 古澤力, 近藤 倫生:実験モデル生態系により生物進化 と生態系変化をつなげる, 第44回日本分子生物学会 年会, 2021年12月
- [47] 入江直樹,内田唯,重信秀治,古澤力:発生頑健性による進化の慣性力,第44回日本分子生物学会年会,2021年12月

(セミナー)

- [48] 古澤力: 微生物進化の予測と制御へ向けて・大腸菌の 大規模進化実験, 九州大学理学研究院オンラインセミ ナー, 2021 年 7 月
- [49] 古澤力: 生物進化の予測と制御へ向けて:進化実験に よるアプローチ,新化学技術推進協会ライフサイエン ス技術部会講演会, 2021 年 11 月
- [50] 古澤力: 生きている状態をどのように理解するか ~ 理論と実験からのアプローチ~,第 61 回 生物物理若 手の会 夏の学校, 2021 年 9 月
- [51] 堤真人: 機械学習を用いた生物形態の定量化とその応 用について 霊長目の下顎骨を対象として,基礎生物 学研究所部門セミナー, 2021 年 10 月

(アウトリーチ)

[52] 古澤力: 普遍生物学・生きている状態とは何か, 東京 大学理学部オープンキャンパス 2021, 2021 年 8 月

8 技術部門

(八幡、南野、下澤、佐伯、大塚*)

* 技術補佐員

技術部門では、実験装置試作室、安全衛生、IT 関 連、学生実験、研究支援などの業務を行っている。技 術部門の担当教員 (酒井教授、藤堂教授、安東准教 授、岡本准教授) と月に1度の物理技術室ミーティ ングを行った。

8.1 実験装置試作室 (下澤、大塚)

8.1.1 利用状況

2021 年 4 月から 2022 年 3 月までの実験装置試作 室の主な利用状況は以下の通りであった。

- 内部製作図面数:481 枚、総製作個数 1058 個
- 加工依頼
 依頼元別の加工時間数の割合:物理64.2%、化学:15.7%、地殻化学:5.9%、フォトンサイエンス:4.1%、素粒子センター:3.8%、地球惑星:2.5%、生物:3.7%、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、素粒子センター:浅井研、化学・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、昨年度に新規導入したマシニングセン タと3次元形状計測装置を活用している。3D-CAD による図面受付を開始し、外注加工依頼で加工用デー タとしてそのまま送付できる体制を整えつつある。

8.2	技術室	(佐伯、 <i>ī</i>	\幡、南野)
-----	-----	---------------	--------

8.2.1 安全衛生 (八幡)

理学系環境安全管理室員として労働安全に関わる 業務を行った。特に新型コロナウイルスによる感染 症の対応についての、最新情報の収集や、火災に伴 う、電気配線の一斉点検のマニュアル作成に協力し た。

8.2.2 IT 関連

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。

- 大学院入試の問題数や口述試験の日程の変更 があったため、大学院入試システムの修正に携 わった。
- TA 管理システムのカレンダー表示のバグの修 正を行った。
- 教員登録システムの機器更新のための準備を 行った。
- ウェブサーバ、教員登録システム、大学院入試システム、論文システム、TA管理システム、海外出張登録システムの運用管理,保守を行った。
- 共用計算機室の電源、配線、不要物品の整理を 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。
- アカウント発行申請時の項目に使用するサブ ネットを追加したことで、各専攻施設のネット ワーク担当者による発行後の設定作業が不要と なった。
- アカウント通知書にQRコードを追記し、情報 サイトへのアクセスを高速化させた。
- ラーニングサイトの AWS(Amazon Web Services) への移行準備を行った。
- ネットワークインフラの管理として、専攻や研 究室等の Virtual LAN の設定を行った。

また、教職員の在宅勤務のための環境整備のサポートを行った。

8.2.3 学生実験

学部3年生向けの物理学実験 I、II のグループ編 成、スケジューリング、解説書の編集と発注など学生 実験全般の運営を行った。今学生向けの物理学実験 説明会(2回)、実験担当教職員の実験担当者会議(2 回)はオンラインで行った。放射線安全講習は、ア イソトープ総合センターの DVD を使い、オンライ ンで行った。(佐伯)

- 物理学実験I(Sセメスタ)
 「エレクトロニクス」の指導(八幡)
- 物理学実験 II (A セメスタ)
 「生物物理学」の指導 [1, 7] (佐伯)

8. 技術部門

8.2.4 研究支援

- 装置開発 (八幡) 液化アルゴンを利用した実験装置の開発をサ ポートした。
- 寒剤管理(八幡) 通常の理学系のCEタンクの管理と液体窒素の供給とともに、今年度は、老朽化した管理 サーバーの更新を行った。また、チャタリング が発生した電磁バルブを交換した。

8.2.5 各種委員会

- 機器·分析技術研究会 地域代表者 (東京大学) (八幡)
- 第4回東京大学技術発表会実行委員会(八幡)
- 全学高圧ガスワーキンググループ (八幡)
- 寒剤管理連絡担当者 (八幡)
- 理学系環境安全管理室(八幡)
- 理学系技術部運営委員会(下澤)
- 理学系寒剤管理委員会 (八幡)

(原著論文)

 佐伯喜美子、八幡和志、茅元司、樋口秀男:物理学科 における生物物理学生実験の光学測定教材実験の開 発,大学の物理教育(2021年27巻3号 p.159-162).

<報文>

[2] 技術部報告集 2021 (東京大学大学院理学系研究科·理 学部技術部、2022 年 2 月).

<総説>

- [3] 八幡和志、現状ウォッチ! 実際の自動車に見るパワ エレ系の進化、(トランジスタ技術、CQ 出版、2022 年2月).
- [4] 八幡和志、電源にとって「コンデンサの種類」がどれ だけ重要かを見てみる、(トランジスタ技術、CQ出 版、2022年2月).

<学術講演>

[5] K. Yawata, Transitions of students for the pandemic of COVID-19, International Conference on Technology and Social Science (ICTSS2021), 2021/12/7-9 online.

(国内会議)

- [6] 八幡和志、Society5.0 に対応する,教育と研究の要素 技術開発 (II),日本物理学会 2020 年秋季大会,(オン ライン、2021 年 9 月).
- [7] 佐伯喜美子、学生実験における新規実験の開発と実 践、第 33 回 生物学技術研究会 (オンライン、2022 年 2 月).

 \mathbf{II}

Summary of group activities in 2021

1 Fukushima Group

Research Subjects: QCD phase diagram, Lattice simulation, Neutron star, Chiral anomaly

Member: Kenji Fukushima and Arata Yamamoto

In Theoretical Hadron Physics group, many-body problems of quarks and gluons are studied theoretically on the basis of the quantum chromodynamics (QCD). The subjects studied include quark-gluon plasma in relativistic heavy-ion collisions, particle production mechanism, lattice gauge simulations, matter under extreme conditions, neutron stars, etc.

Highlights in research activities of this year are listed below:

- 1. Extreme matter in electromagnetic fields and rotation
- 2. Non-Abelian vortex in lattice gauge theory
- 3. Limitation of the functional RG method for the θ vacuum
- 4. Skyme crystal for dense matter under strong magnetic fields
- 5. Extensive analysis for the neutron star EoS from calculations and observations

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 manybody 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. In particular, a cold atomic gas can be regarded as an ideal testing ground for many-body theories because of its controllability. In this regard, we are also interested in investigating novel many-body phenomena and developing quantum many-body theories through the comparisons with cold-atom experiments.

Highlights in research activities of this year include:

- 1. Charge symmetry breaking force in nuclear DFT
- 2. Cluster structure of atomic nuclei
- 3. Functional renormalization group approach to DFT
- 4. Inverse method to derive nuclear EDF
- 5. Quartet correlations in nuclear matter
- 6. Three-body counterpart of BCS-BEC crossover
- 7. Polaron properties in ultracold atoms and their applications to nuclear systems
- 8. Topological unitary *p*-wave Fermi gas and spin transport in one dimension
- 9. Resonant pair scattering in two-band superconductors
- 10. Sphericity of atoms
- 11. Lipkin model with quantum computation

3 High Energy Physics Theory Group

Research Subjects: Particle Physics and Cosmology

Member: Takeo Moroi, Koichi Hamaguchi, Yutaka Matsuo

We are working on various topics in particle physics and cosmology, such as physics beyond the Standard Model, dark matter, baryogenesis, inflation, phenomenology of supersymmetric models, grand unified theories, string theory, supersymmetric field theories, conformal field theories, holography, entanglement entropy, and so on. Specific subjects studied in this academic year are summarized below:

- 1. Phenomenology
 - 1.1. Inflation models [1]
 - 1.2. New physics search at the ILC beam dump [2]
 - 1.3. Axion phenomenology [3]
 - 1.4. Anomalous magnetic moment of muon [4, 5, 6, 7]
 - 1.5. Supersymmetric grand unified theory [8]
 - 1.6. Supersymmetric phenomenology [9, 10]
 - 1.7. MiniBooNE anomalous excess [11]
 - 1.8. Supernova axion detection [12]
- 2. Superstring theory and formal aspects of quantum field theories
 - 2.1. q-Deformation of Corner Vertex Operator Algebras by Miura Transformation [13]
 - 2.2. Quiver Quantum Toroidal Algebra [14, 15]
 - 2.3. Blackhole and capacity of entanglement [16, 17]
 - 2.4. Supersymmetric gauge theory [18]
 - 2.5. Generalized symmetries [19, 20]
 - 2.6. Lorentz-invariant wave packets [21]

References

- Q. Li, T. Moroi, K. Nakayama and W. Yin, "Hidden dark matter from Starobinsky inflation," JHEP 09, 179 (2021).
- [2] K, Asai, T. Moroi, and A. Niki, "Leptophilic Gauge Bosons at ILC Beam Dump Experiment," Phys. Lett. B 818 (2021) 136374.
- [3] K. Hamaguchi, Y. Kanazawa and N. Nagata, "Axion Quality Problem Alleviated by Non-Minimal Coupling to Gravity", Phys. Rev. D 105, 076008 (2022).
- [4] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto and T. Kitahara, "Supersymmetric interpretation of the muon g 2 anomaly," JHEP 07 (2021), 075.
- [5] S. Heinemeyer, E. Kpatcha, I. Lara, D. E. López-Fogliani, C. Muñoz and N. Nagata, "The new $(g-2)_{\mu}$ result and the $\mu\nu$ SSM," Eur. Phys. J. C 81, no.9, 802 (2021).
- [6] J. Ellis, J. L. Evans, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, "Flipped g_μ 2," Eur. Phys. J. C 81, no.12, 1079 (2021).
- [7] J. Ellis, J. L. Evans, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, "Flipped SU(5) GUT phenomenology: proton decay and g_μ - 2," Eur. Phys. J. C 81, no.12, 1109 (2021).
- [8] J. Ellis, J. L. Evans, N. Nagata and K. A. Olive, "A minimal supersymmetric SU(5) missing-partner model," Eur. Phys. J. C 81, no.6, 543 (2021).

- [9] E. Kpatcha, I. Lara, D. E. López-Fogliani, C. Muñoz, N. Nagata and H. Otono, "Searching for stop LSP at the LHC," Eur. Phys. J. C 82, no.3, 261 (2022).
- [10] S. Chigusa, K. Hamaguchi, T. Moroi, A. Niki, K. Ono, "Studying squark mass spectrum through gluino decay at 100 TeV future circular collider," Phys. Lett. B 817 (2021) 136332.
- [11] C. H. V. Chang, C. R. Chen, S. Y. Ho and S. Y. Tseng, Phys. Rev. D 104, no.1, 015030 (2021) [arXiv:2102.05012 [hep-ph]].
- [12] S. Asai, Y. Kanazawa, T. Moroi and T. Sichanugrist, "Observing Axion Emission from Supernova with Collider Detectors", arXiv:2203.01519.
- [13] K. Harada, Y. Matsuo, G. Noshita and A. Watanabe, "q-Deformation of Corner Vertex Operator Algebras by Miura Transformation," JHEP 4, 202 (2021).
- [14] G. Noshita and A. Watanabe, "A Note on Quiver Quantum Toroidal Algebra," arXiv:2108.07104.
- [15] G. Noshita and A. Watanabe, "Shifted Quiver Quantum Toroidal Algebra and Subcrystal Representations," arXiv:2109.02045.
- [16] K. Kawabata, T. Nishioka, Y. Okuyama and K. Watanabe, "Probing Hawking radiation through capacity of entanglement," JHEP 5, 062 (2021).
- [17] K. Kawabata, T. Nishioka, Y. Okuyama and K. Watanabe, "Replica wormholes and capacity of entanglement," JHEP 10, 227 (2021).
- [18] H. Hayashi, H. C. Kim and K. Ohmori, "6d/5d exceptional gauge theories from web diagrams," JHEP 07 (2021), 128
- [19] Y. Lee, K. Ohmori and Y. Tachikawa, "Matching higher symmetries across Intriligator-Seiberg duality," JHEP 10, 114 (2021)
- [20] J. Kaidi, K. Ohmori and Y. Zheng, "Kramers-Wannier-like Duality Defects in (3+1)D Gauge Theories," Phys. Rev. Lett. 128, no.11, 111601 (2022)
- [21] Kin-ya Oda and J. Wada, "A complete set of Lorentz-invariant wave packets and modified uncertainty relation", Eur. Phys. J. C 81, no.8, 751,(2021)

4 Sakurai Group

Research Subjects: Structure and dynamics of exotic nuclei and exotic atoms

Member: Hiroyoshi Sakurai and Megumi Niikura

Our group investigates the structure and dynamics of exotic nuclei and exotic atoms. Our experimental programs utilize the accelerator facilities at RI Beam Factory (RIBF) in RIKEN, Research Center for Nuclear Physics (RCNP) in Osaka University, and Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC). Some of our research subjects are the following.

Nuclear charge distribution and radius measurements using muonic X ray

The nuclear charge distribution and radius are the most fundamental values of atomic nuclei. The muonic X-ray measurement is one of the most common methods to determine the charge radius. We have developed an analysis procedure using higher transitions of the muonic atom in addition to the lowest K_{α} transitions and reduced the model dependency. Furthermore, we proposed a new method to measure the charge distribution using muonic X rays and evaluated its systematic uncertainty.

High current beamline for transmutation accelerator

A high-current beam accelerator for the transmutation of waste fuels from the nuclear power plant is under development. The difficulty of a high beam current transportation is a larger beam diameter than the conventional system, so the accuracy of the paraxial approximation adopted in the conventional beam optical calculation method deteriorates. In addition, a beam halo is generated by the multipole electromagnetic field excited by the beam and the solenoid magnet. We are developing methods to estimate a beam halo considering the effects of multipole electromagnetic fields and to cancel out the multipole electromagnetic field caused by the space charge effect by an appropriate placement and excitation of the solenoid coil.

HiCARI project at RIBF

HiCARI (High-Resolution Cluster Array at RIBF) aims at measuring high-level density odd nuclei and the lifetimes of the excited states of unstable nuclei. This array consists of 12 germanium detectors gathered from all over the world. A series of experiments were held at RIBF in 2020 with the world's highest beam intensity of unstable nuclei. In December 2020, our proposed experiment to investigate the neutron shell evolution of titanium isotopes has been conducted and the data analysis is now on going.

Study of pion production

We investigate the cluster structure in atomic nuclei by sub-threshold pion production. An experiment to measure the cross-section of pion production was performed at RIBF. π^0 was produced by 52 Ca beam impinged on a carbon target. Two gamma rays emitted from gamma rays from the decay of π^0 were detected by CATANA array. To establish the way to distinguish signals from gamma rays from signals from charged particle, reactions of gamma rays and protons in CATANA were simulated by using Geant4. As a result, 80% of signals from protons regarded as those from protons, and 90% of signals from gamma rays regarded as those from gamma rays.

Performance study of the photon detection system for muonic X-ray spectroscopy

The photon detection system using Ge detectors and Compton suppressors is under development for muonic X-ray spectroscopy. The energy of muonic X-rays of low and high atomic number elements are dozens of keV and about 6 MeV, respectively. In order to test the performance in such a wide dynamic range, a test experiment was held using the resonance reaction of a proton and Al as shown in Fig. 2.1.1.

Study of the equation of state of high-density neutron matter by heavy-ion collision

To study the equation of state of high-density neutron matter experimentally, measurements of the collective flow of protons and neutrons in heavy-ion collisions are promising. We have performed the heavy-ion collision experiment (400-AMeV ¹³²Xe beam + CsI) conducted at HIMAC and confirmed the collective flow of protons and neutrons at the target rapidity for the first time. We are planning a new experiment with a detector with improved resolution of the reaction plane.

Decay spectroscopy of neutron-rich isotopes in BRIKEN project at RIBF

The BRIKEN project targets to measure decay properties of nuclei, such as half-lives, β -delayed neutron emission probabilities and isomeric transitions. These properties are essential for understanding the *r*-process. In April 2021, an experiment for $N \geq 126$ isotopes was performed. The setup included WAS3ABi array, two HPGe clover detectors and 140 ³He counters. Half-lives of at least 28 isotopes from Ir to Po were deduced. Among them, half-lives of 10 isotopes were measured for the first time.

Precision nuclear mass measurement by MRTOF-MS at RIBF

Multi-reflection time-of-flight mass spectrograph (MRTOF-MS) at ZeroDegree spectrometer in RIBF is developed to measure nuclear masses of exotic isotopes. It is capable to achieve mass resolving power of greater than 1000000 with measurement time of 25 ms. In December 2021, masses of ⁷⁴Ni and ⁷⁵Ni were measured for the first time. The study can evaluate neutron separation energy S_n of neutron-rich isotopes which help constrain the *r*-process calculation.

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 groups is the study of neutrino properties and research using neutrino as a probe. We are leading experiments using Super-Kamiokande and Hyper-Kamiokande detectors and the J-PARC accelerator.

T2K long-baseline neutrino oscillation experiment

We have been studying neutrino oscillations with the T2K long-baseline neutrino experiment. In T2K, intense neutrino and anti-neutrino beams produced using the J-PARC accelerator complex are

measured with the SK detector, 295 km away. Our current major research goal is the search for a new source of CP symmetry violation in neutrino oscillations. We have been leading the program to upgrade near neutrino detectors for the reduction of uncertainties associated with understanding of neutrino interactions.

Super-Kamiokande experiment

Super-Kamiokande is the world's largest underground detector for neutrino physics and nucleon decay. In the summer of 2020, we added 13 tons of $Gd_2(SO_4)_3$ to 50,000 tons of ultrapure water and started new observations as SK-Gd. The addition of gadolinium improves the detection efficiency of neutrons. Utilizing this new capability, we aim for the world's first observation of supernova relic neutrinos.

Using the data collected with the Super-Kamiokande detector, we set the most stringent lower limits to the partial lifetimes of proton decay, $p \to e^+ \eta$ and $p \to \mu^+ \eta$.

Hyper-Kamiokande

In order to significantly extend the reach in the neutrino physics and the proton decay search beyond T2K and SK, the next-generation water Cherenkov detector, Hyper-Kamiokande is under construction. The Hyper-Kamiokande will be a large water Cherenkov detector with a cylindrical tank 68 meters in diameter and 71 meters deep, filled with 260,000 tons of ultrapure water. Our group is leading the design and construction of the Hyper-Kamiokande detector system. We are also testing the performance of the photomultiplier tubes and developing calibration methods.

R&D of particle detectors for future experiments

We have been developing novel particle detectors for future experiments. One example is a Time Projection Chamber (TPC) using an organic liquid as a medium for precise measurement of reactor neutrinos and supernova neutrinos. Another is the search for neutrinoless double-beta decay with ¹⁶⁰Gd, utilizing ultra-high purity Gd technology developed for the SK-Gd project.

6 Asai group

Research Subjects: (1) Particle Physics with the energy frontier accelerators (LHC) (2) Physics analysis in the ATLAS experiment at the LHC: (Higgs, SUSY and Extra-dimension) (3) Particles Physics without accelerator using high intensity of Photon (4) Positronium and QED (5) Quantum Technology and Artificial Intelligence (AI)

Member: S.Asai, A.Ishida

- (1) LHC (Large Hadron Collider) has the excellent physics potential. Our group is contributing to the ATLAS group in the Physics analyses: focusing especially on three major topics, the Higgs boson, Supersymmetry, and new diboson resonances (WW and $\gamma\gamma$).
 - Higgs: After the discovery of Higgs Boson, We are measuring the Yukawa coupling precisely.
 - SUSY: We have excluded the light SUSY particles (gluino and squark) whose masses are lighter than 1.4 and 1.5TeV, respectively.
- (2) Small tabletop experiments have the good physics potential to discover the physics beyond the standard model, if the accuracy of the measurement or the sensitivity of the research is high enough. We perform the following tabletop experiments:
 - Dark matter indirect search with multi-wavelength photons.
 - Search for Photon-Photon scattering with XFEL.
 - Search for WISPs in various wavelengths with high-power light sources.
 - Basic study for Bose-Einstein condensation of positronium.
 - Search for vacuum birefringence.

- Search for vacuum diffraction with an XFEL and high power laser beams.
- Precision measurement of the energy spectrum in the orthopositronium decay.
- Measurement of Positronium Hyper-fine splitting.
- Search for weakly coupling neutral particles with ortho-positronium.
- Search for CP violation with ortho-positronium.
- Search for the invisible decay of ortho-positronium.
- Lifetime measurement of ortho-positronium.
- Search for solar axions with Fe-57 resonant absorption.
- (3) Quantum Technology and Artificial Intelligence (AI) for application to fundamental physics.
 - Optimization problems (database search and gradient estimation).
 - Performance evaluation and improvement of quantum machine learning model with repetitive structure.

7 Ogata Group

Research Subjects: Condensed Matter Theory

Member: Masao Ogata, Hiroyasu Matsuura

We are studying condensed matter physics and many body problems, such as strongly correlated electron systems, high- T_c superconductivity, Mott metal-insulator transition, topological materials, Dirac electron systems in solids, thermoelectric materials with large response, organic conductors, and magnetic systems with frustration and/or spin-orbit interactions. The followings are the current topics in our group.

- Dirac electron systems in solids [1,2]
- Thermal transport phenomena [3-6]
- Theories on topological materials [7,8], and on superconductivity [9]
- Orbital magnetic effects [10]
- Organic conductors [11-14]
- Spin systems and spin-orbit interaction [15,16]
- M. Ogata, S. Ozaki, and H. Matsuura: J. Phys. Soc. Jpn. 91, 023708 (2022). "Anomalous Spin Transport Properties of Gapped Dirac Electrons with Tilting" [selected as Editors' choice]
- [2] S. Fujiyama, H. Maebashi, N. Tajima, T. Tsumuraya, H.-B. Cui, M. Ogata, and R. Kato: Phys. Rev. Lett. 128, 027201 (2022). "Large diamagnetism and electromagnetic duality in two-dimensional Dirac electron system"
- [3] Junji Fujimoto and Masao Ogata, Appl. Phys. Lett. 120, 122404 (2022). "Thermoelectric power generation via transverse thermo-spin conversions" [selected as Featured and Scilight of APL]
- [4] J. Endo, H. Matsuura, and M. Ogata: Phys. Rev. B 105, 045101 (2022). "Effect of paramagnon drag on thermoelectric transport properties: Linear response theory"
- [5] H. Matsuura, M. Ogata, T. Mori, and E. Bauer: Phys. Rev. B **104**, 214421 (2021). "Theory of huge thermoelectric effect based on a magnon drag mechanism: Application to thin-film Heusler alloy"
- [6] S. Takarada, M. Ogata, and H. Matsuura: Phys. Rev. B 104, 165122 (2021). "Theory of thermal conductivity of excitonic insulators"
- [7] K. Kitayama and M. Ogata: in preparation. "Momentum and energy tuning of Weyl points in Floquet Weyl semimetal by using bicircular light"
- [8] M. Hosoi, I. Tateishi, H. Matsuura, and M. Ogata: Phys. Rev. B 105, 085406 (2022). "Thin films of topological nodal line semimetals as a candidate for efficient thermoelectric converters"
- [9] H. Yokoyama, K. Kobayashi, T. Watanabe, and M. Ogata: submitted to J. Phys. Soc. Jpn. "Excited States beyond Mott Gap in Half-Filled-Band Hubbard Model"

- [10] S. Ozaki and M. Ogata: in preparation. "Topological contribution to magnetism in the Kane-Mele model: An explicit wave function approach"
- [11] S. Ozaki, I. Tateishi, H. Matsuura, M. Ogata, and K. Hiraki: Phys. Rev. B 104, 155202 (2021). "Nodalline semimetal HMTSF-TCNQ: Anomalous orbital diamagnetism and charge density wave"
- [12] K. Kitayama, M. Mochizuki, Y. Tanaka, and M. Ogata: Phys. Rev. B **104**, 075127 (2021). "Predicted photoinduced pair annihilation of emergent magnetic charges in the organic salt α -(BEDT-TTF)₂I₃ irradiated by linearly polarized light"
- [13] K. Kitayama, Y. Tanaka, M. Ogata, and M. Mochizuki: J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 104705 (2021). "Floquet Theory of Photoinduced Topological Phase Transitions in the Organic Salt α -(BEDT-TTF)₂I₃ Irradiated with Elliptically Polarized Light" [selected as Editors' choice]
- [14] K. Kitayama, M. Ogata, M. Mochizuki, and Y. Tanaka: arXiv:2203.04539. "Predicted novel type of photoinduced topological phase transition accompanied by collision and collapse of Dirac-cone pair in organic salt α -(BEDT-TTF)₂I₃"
- [15] M. Hosoi, E. Z. Zhang, A. S. Patri, and Y. B. Kim: preprint. "Uncovering footprints of dipolar-octupolar quantum spin ice from neutron scattering signatures"
- [16] M. Kato, H. Matsuura, M. Udagawa, M. Ogata: in preparation. "Flux roughening in spin ice with mixed $\pm J$ interactions"

8 Tsuneyuki Group

Research Subjects: Theoretical Condensed-Matter Physics

Member: Shinji Tsuneyuki and Ryosuke Akashi

Computer simulations from first principles enable us to investigate the properties and behavior of materials beyond the limits of experiments, or rather to predict them before experiments. Our main subject is to develop and apply such computational physics techniques to investigate fundamental problems in condensed matter physics. We primarily focus on predicting material properties under extreme conditions like ultra-high pressure or at surfaces where experimental data are limited. Our principal tools are molecular dynamics (MD) and first-principles electronic structure calculation based on the density functional theory (DFT). We are also developing new methods that go beyond the limitation of classical MD and DFT to study the electronic, structural, and dynamical properties of materials. One of such new methods is a structure prediction method with data assimilation, where X-ray powder diffraction data insufficient for experimental structure determination is used to support theoretical structure search.

Major research topics in FY 2021 are as follows.

- Application of the data assimilation method for crystal structure exploration containing hydrogen atoms which are hard to observe by X-ray diffraction
- Superconductivity of oxyhydrides with Wannier-interpolation of phonon dynamical matrix
- Eliashberg theory in the electron-gas limit
- Application of density functional theory to nuclei
- Construction of energy density functional using functional renormalization group
- Deformability of atoms
- Correlated wavefunction theory: Transcorrelated method

9 Todo Group

Research Subjects: Development of simulation algorithms for strongly-correlated systems; Application of machine learning technique to materials science; Fundamental theory of quantum computer; Novel state and critical phenomena in strongly correlated systems; Thermalization and non-equilibrium dynamic of quantum many-body systems; Development of open-source software for nextgeneration parallel simulations

Member: Synge Todo, Tsuyoshi Okubo, and Hidemaro Suwa

We are exploring novel computational physics methods based on sampling methods such as the Monte Carlo algorithm, path integrals to represent quantum fluctuations, information compression using the singular value decomposition and the tensor networks, and statistical machine learning, etc. By making full use of these powerful numerical methods, we aim to elucidate various exotic states, phase transitions, and dynamics in various quantum many-body systems, from quantum spin systems to actual materials. Also, we are studying the basic theory of quantum computers and quantum machine learning algorithms and working on the development and release of open-source software for next-generation large-scale simulations.

- [1] Yutaka Shikano, Hiroshi C. Watanabe, Ken M. Nakanishi, Yu-ya Ohnishi, Post-Hartree-Fock method in Quantum Chemistry for Quantum Computer, Euro. Phys. J. Spec. Top. (2021).
- [2] Hong Yang, Hayate Nakano, Hosho Katsura, Symmetry-protected Topological Phases in Spinful Bosons with a Flat Band, Phys. Rev. Research. 3, 023210 (22pp) (2021).
- [3] H. Yamaguchi, Y. Iwasaki, Y. Kono, T. Okubo, S. Miyamoto, Y. Hosokoshi, A. Matsuo, T. Sakakibara, T. Kida, M. Hagiwara, Quantum critical phenomena in a spin-1/2 frustrated square lattice with spatial anisotropy, Phys. Rev. B 103, L220407 (5pp) (2021).
- [4] H. Yamaguchi, N. Uemoto, T. Okubo, Y. Kono, S. Kittaka, T. Sakakibara, T. Yajima, S. Shimono, Y. Iwasaki, Y. Hosokoshi, Gapped ground state in a spin-1/2 frustrated square lattice, Phys. Rev. B 104, L060411 (5pp) (2021).
- [5] Fumihiro Ishikawa, Hidemaro Suwa, Synge Todo, Neural Network Approach to Construction of Classical Integrable Systems, J. Phys. Soc. Jpn. 90, 093001 (5pp) (2021).
- [6] Yasunari Suzuki, Yoshiaki Kawase, Yuya Masumura, Yuria Hiraga, Masahiro Nakadai, Jiabao Chen, Ken M. Nakanishi, Kosuke Mitarai, Ryosuke Imai, Shiro Tamiya, Takahiro Yamamoto, Tennin Yan, Toru Kawakubo, Yuya O. Nakagawa, Yohei Ibe, Youyuan Zhang, Hirotsugu Yamashita, Hikaru Yoshimura, Akihiro Hayashi, Keisuke Fujii, Qulacs: a fast and versatile quantum circuit simulator for research purpose, Quantum 5, 559 (34pp) (2021).
- [7] Satoru Hayami, Tsuyoshi Okubo, Yukitoshi Motome, Phase shift in skyrmion crystals, Nat. Commum. 12, 6927 (6pp) (2021).
- [8] Daiki Adachi, Tsuyoshi Okubo, Synge Todo, Bond-weighted tensor renormalization group, Phys. Rev. B 105, L060402 (6pp) (2022).
- [9] D. G. Mazzone, Y. Shen, H. Suwa, G. Fabbris, J. Yang, S.-S. Zhang, H. Miao, J. Sears, Ke Jia, Y. G. Shi, M. H. Upton, D. M. Casa, X. Liu, Jian Liu, C. D. Batista, M. P. M. Dean, Antiferromagnetic excitonic insulator state in Sr₃Ir₂O₇, Nat. Commun. **13**, 913 (8pp) (2022).
- [10] Tomoyuki Morishita, Synge Todo, Randomized-gauge test for machine learning of Ising model order parameter, J. Phys. Soc. Jpn. 91, 044001 (9pp) (2022).
- [11] RuQing G. Xu, Tsuyoshi Okubo, Synge Todo, Masatoshi Imada, Optimized Implementation for Calculation and Fast-Update of Pfaffians Installed to the Open-Source Fermionic Variational Solver mVMC, to appear in Comp. Phys. Comm.

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) low-dimensional correlated systems, (ii) off-diagonal long-range order in Hubbard-like models, (iii) symmetry-protected topological phases, (iv) topological magnon systems, and (v) frustration-free spin models. In addition, we are also interested in the mathematical aspects of the above-mentioned fields. Our research projects conducted in FY 2021 are the following:

- Strongly correlated systems
 - Exact analysis of nonlinear Drude weights for quantum spin chains [1, 2]
 - Phase diagram of an extended parafermion chain [3]
 - Bose-Einstein condensation in an interacting boson model with flat bands [4]
 - SU(N) generalization of η -pairing states and off-diagonal long-range order [5]
- Topological phases of matter
 - Symmetry-protected topological phases in spinor Bose-Hubbard models [6]
 - Dirac surface states in magnonic analogs of topological crystalline insulators [7]
 - Nonlinear magnon spin Nernst effect in antiferromagnets and strain-tunable spin current [8]
 - Fractional Skyrmion molecules in a CP^{N-1} nonlinear sigma model [9]
- Mathematical and statistical physics
 - Interrelations among frustration-free models via Witten's conjugation [10]
 - Multiple magnetization plateaus in an extended S = 1 Gelfand ladder [11]
 - Exact solutions of few-magnon problems in the spin-S periodic XXZ chain [12]
 - Performance comparison of typical binary-integer encodings in an Ising machine [13]
- [1] Y. Tanikawa, K. Takasan, and H. Katsura, Phys. Rev. B 103, L201120 (2021) [Selected as Editors' Suggestion].
- [2] Y. Tanikawa and H. Katsura, Phys. Rev. B 104, 205116 (2021).
- [3] J. Wouters, F. Hassler, H. Katsura, and D. Schuricht, SciPost Phys. Core 5, 008 (2022).
- [4] H. Katsura, N. Kawashima, S. Morita, A. Tanaka, and H. Tasaki, Phys. Rev. Research 3, 033190 (2021).
- [5] H. Yoshida and H. Katsura, Phys. Rev. B 105, 024520 (2022).
- [6] H. Yang, H. Nakano, and H. Katsura, Phys. Rev. Research 3, 023210 (2021).
- [7] H. Kondo and Y. Akagi, Phys. Rev. Lett. 127, 177201 (2021).
- [8] H. Kondo and Y. Akagi, Phys. Rev. Research 4, 013186 (2022).
- [9] Y. Akagi, Y. Amari, S. B. Gudnason, M. Nitta, and Y. Shnir, J. High Energ. Phys. 2021, 194 (2021).
- [10] J. Wouters, H. Katsura, and D. Schuricht, SciPost Phys. Core 4, 027 (2021).
- [11] H. Kohshiro, R. Kaneko, S. Morita, H. Katsura, and N. Kawashima, Phys. Rev. B 104, 214409 (2021).
- [12] N. Wu, H. Katsura, S.-W. Li, X. Cai, and X.-W. Guan, Phys. Rev. B 105, 064419 (2022).
- [13] K. Tamura, T. Shirai, H. Katsura, S. Tanaka, and N. Togawa, IEEE Access 9, 81032 (2021).

11 Kabashima Group

Research Subjects: Statistical mechanics of disordered systems and its application to information science

Member: Yoshiyuki Kabashima and Takashi Takahashi

We are working in a cross-disciplinary field between statistical mechanics and information science. Our research interests include error-correcting codes, cryptography, CDMA multi-user detection, data compression, compressed sensing, sparse modeling, high-dimensional statistics, probabilistic inference, neural networks, random matrix, machine learning, spin glasses, etc.

The followings are highlights in our research activities in AY 2021:

- 1. Performance analysis of ℓ_1 -reguralized linear regression for Ising model selection
- 2. Solution analysis of SCAD minimization problem under linear constraints
- 3. Matrix factorization using Gaussian-based belief propagation and its application to matrix completion
- 4. Assessment of transfer entropy from biochemical data
- 5. Statistical mechanics analysis of unbounded knapsack problems
- 6. Analysis of eigenvalue distribution of sample covariance matrix
- 7. Performance analysis of iterative self-training with linear classifier
- 8. Analysis of general objective index

12 Tsuji Group

Research Subjects: Condensed matter theory, nonequilibrium quantum many-body systems

Member: Naoto Tsuji, Huanyu Zhang

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 2021, we worked on the following projects:

- Dynamics of superconductors
 - Higgs mode in superconductors [9]
 - Higher-oder nonlinear optical response and self-interaction of Higgs mode [5, 6]
 - Leggett mode in multiband superconductors [1]
 - η pairing superconductivity and coupling to electromagnetic fields
- Dissipative quantum many-body systems [3]
 - Collective modes and phase transitions in dissipative superfluids [2, 4]
 - Superfluidity induced by spontaneous light emission [8]
- Fluctuation, nonlinear response, and chaos [7]

- Takumi Kamatani, Sota Kitamura, Naoto Tsuji, Ryo Shimano, and Takahiro Morimoto, "Optical response of the Leggett mode in multiband superconductors in the linear response regime", Phys. Rev. B 105, 094520 (2022).
- [2] Kazuki Yamamoto, Masaya Nakagawa, Naoto Tsuji, Masahito Ueda, and Norio Kawakami, "Collective Excitations and Nonequilibrium Phase Transition in Dissipative Fermionic Superfluids", Phys. Rev. Lett. 127, 055301 (2021).
- [3] Masaya Nakagawa, Naoto Tsuji, Norio Kawakami, and Masahito Ueda, "Quantum Many-Body Physics of Open Systems in Ultracold Atoms", Nihon Butsuri Gakkaishi Vol. 77, No. 2, 88 (2022).
- [4] Kazuki Yamamoto, Masaya Nakagawa, Naoto Tsuji, Masahito Ueda, and Norio Kawakami, "Theory of collective excitations and nonequilibrium phase transition in dissipative fermionic superfluids", International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2020), online, September 2021.
- [5] Naoto Tsuji, "Fifth-order nonlinear optical response of superconductors and the self-interaction of Higgs mode", The Physical Society of Japan Annual Meeting, online, March 2022.
- [6] Kazuki Isoyama, Naoto Tsuji, Hirotaka Terai, and Ryo Shimano, "Light-induced amplification of Higgs moderesonating terahertz third harmonic generation in BCS superconductor NbN", The Physical Society of Japan Annual Meeting, online, March 2022.
- [7] Naoto Tsuji, "Fluctuations, nonlinear response, and chaos", Quantum, heat, information mini workshop, online, December 2021.
- [8] Naoto Tsuji, "Nonequilibrium superconductivity toward a realization at high temperature", Condensed matter theory seminar, Osaka University, online, July 2021.
- [9] Naoto Tsuji, "Recent developments of' nonequilibrium physics in quantum many-body systems", Department of Physics, Osaka University, International Physics Course (IPC), Topical Seminar II, online, July 2021.

13 Ashida Group

Research Subjects: Condensed matter theory, theoretical quantum optics

Member: Yuto Ashida

This group focuses on theoretical studies at the intersection of quantum many-body physics and quantum optics. We have been studying physics of open and out-of-equilibrium systems, where quantum systems interact with external world and thus feature nonunitary dynamics. We employ the ideas/methods, including field theory, renormalization group, topology, and variational approach. In addition, we are interested in physical phenomena in the corresponding classical systems as well as their potential applications. We have also been doing studies related to machine learning methods, such as Bayesian inference and reinforcement learning. We list research/review papers published in the academic year of 2021 below.

- Non-Hermitian physics, open quantum systems [1]
- Strongly interacting quantum light-matter systems [2]
- Statistical physics [3]
- [1] Y. Ashida, Z. Gong and M. Ueda, Non-Hermitian Physics, Advances in Physics 69, 3 published 26 Apr. 2021.
- Y. Ashida, A. Imamoglu and E. Demler, Cavity Quantum Electrodynamics at Arbitrary Light-Matter Coupling Strengths, Physical Review Letters 126, 153603 - published 13 Apr. 2021.
- [3] T. Kamijima, S. Otsubo, Y. Ashida, and T. Sagawa, Higher-order efficiency bound and its application to nonlinear nanothermoelectrics, Physical Review E **104**, 044115 published 15 Oct. 2021.

14 Hasegawa Group

Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics

Members: Shuji HASEGAWA and Ryota AKIYAMA

Surfaces/interfaces of materials and atomic-layer materials are platforms of our research where rich physics is expected due to the low-dimensionality, symmetry breaking, a wide variety of structures, and direct access for measurements. (1) Charge/spin/mass transports including superconductivity and spin current, (2) atomic/electronic structures, (3) phase transitions, (4) spin states and spintronics, and (5) epitaxial growths of coherent atomic/molecular layers/wires on surfaces of metals, semiconductors, topological materials, and nano-scale phases such as surface superstructures, ultra-thin films including atomic-layer materials such as graphene and transition metal dichalcogenides. We use various kinds of ultrahigh-vacuum experimental techniques, such as electron diffraction, scanning electron microscopy(SEM), scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy(PES), *in-situ* four-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-four-point probes, and surface magneto-optical effects apparatuses. Main results in this year are as follows.

(1) Surface transport and magnetism:

- soft-magnetic skyrmions at interfaces/heterostructures at ferromagnetic topological insulators
- 2D superconductivity at Ca-intercalated graphene, FeSe atomic layers, and α -Sn layers
- non-reciprocal photocurrent at a Rashba surface induced by irradiation of circularly polarized light
- Weak anti-localization and linear magnetoresistance effect at Cu₂Se thin films
- Ferromagnetic states at intercalated graphene and Mn-doped transition-metal dichalcogenide

(2) Surface phases and atomic-layer materials:

- Epitaxial growth of ultra-flat SnTe films on $SrTiO_3(001)$

(3) New methods:

- Fabrication of a four-point probe UHV system with tunneling-spectroscopy capability
- Fabrication of a UHV-MBE system with polarization-controlled mid-infrared irradiation
- Lateral-ToF system with pulsed laser for carrier mobility measurements
- H. Huang, A. Rahman, J. Wang, Y. Lu, R. Akiyama, S. Hasegawa: Spin-glass-like state induced by Mn-doping into a moderate gap layered semiconductor SnSe₂, Journal of Applied Physics 130, 223903(6pp) (Dec, 2021).
- [2] T. Takashiro, R. Akiyama, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, R. Nakanishi, S. Sato, T. Fukasawa, T. Sasaki, H. Toyama, K. L. Hiwatari, A. V. Zotov, A. A. Saranin, T. Hirahara, S. Hasegawa: Soft-magnetic skyrmions induced by surface-state coupling in an intrinsic ferromagnetic topological insulator sandwich structure, Nano Letters 22(3), 881-887 (Jan, 2022).
- [3] T. Machida, Y. Yoshimura, T. Nakamura, Y. Kohsaka, T. Hanaguri, C.-R. Hsing, C.-M. Wei, Y. Hasegawa, S. Hasegawa, and A. Takayama: Superconductivity near the saddle point in the two-dimensional Rashba system Si(111)-√3 × √3-(Tl,Pb), Physical Review B 105, 064507 (9pp) (Feb, 2022).
- [4] H. Toyama, R. Akiyama, M. Hashizume, S. Ichinokura, T. Iimori, T. Matsui, K. Horii, S. Sato, R. Hobara, Y. Endo, T. Hirahara, F. Komori, S. Hasegawa: *Two-dimensional superconductivity of the Ca-intercalated* graphene on SiC: vital role of the interface between monolayer graphene and the substrate, ACS Nano 16(3), 3582-3592 (Feb, 2022).

15 Okamoto Group

Research Subjects: Experimental Condensed Matter Physics,

Low temperature electronic properties of two-dimensional systems.

Member: Tohru Okamoto and Ryuichi Masutomi

We study low temperature electronic properties of two-dimensional systems. The current topics are following:

1. Two dimensional electrons at cleaved semiconductor surfaces:

At the surfaces of InAs and InSb, conduction electrons can be induced by submonolayer deposition of other materials. Recently, we have performed in-plane magnetotransport measurements on in-situ cleaved surfaces of *p*-type substrates and observed the quantum Hall effect which demonstrates the perfect two dimensionality of the inversion layers. Research on the hybrid system of 2D electrons and adsorbed atoms has great future potential because of the variety of the adsorbates and the application of scanning probe microscopy techniques.

To explore exotic physical phenomena related to spin at a semiconductor surface, magnetic-adatom induced two dimensional electron systems are investigated by using low-temperature scanning tunneling microscopy and spectroscopy combined with transport measurements.

2. Superconductivity of monolayer films on cleaved GaAs surfaces:

Recently, we studied the effect of the parallel magnetic field H_{\parallel} on superconductivity of monolayer Pb films on GaAs(110). Superconductivity was found to occur even for $H_{\parallel} = 14$ T, which is much higher than the Pauli paramagnetic limiting field H_P . The observed weak H_{\parallel} dependence of the superconducting transition temperature T_c is explained in terms of an inhomogeneous superconducting state predicted for 2D metals with a large Rashba spin splitting.

We have studied nonreciprocal charge transport in superconducting ultrathin films. For ultrathin Pb and Al films grown on the cleaved surface of GaAs (110), the antisymmetrized second harmonic magnetoresistance was observed, which suggests that rectification effect occurs in 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 occurs the rectification effect, which is called vortex ratchet.

3. Formation of Dirac cones in ultrathin Bi films

Magnetotransport measurements have been performed on ultrathin Bi films grown on GaAs(110). While large positive magnetoresistance is observed at low temperatures, the Hall resistance is found to be extremely small. This is explained by the cancellation of contributions of electrons and holes, which are estimated to have close density and mobility values. By analogy with graphene near the charge neutral point, magnetotransport properties are discussed in relation to the formation of Dirac cones.

16 Shimano Group

Research Subjects: Optical and Terahertz Spectroscopy of Condensed Matter

Member: Ryo Shimano and Naotaka Yoshikawa

We study light-matter interactions and many body quantum correlations in solids, aiming at light-control of many-body quantum phases. In order to investigate the role of electron and/or spin correlations in the excited states as well as in the ground states, we focus on the low energy electromagnetic responses, in particular in the terahertz(THz) (1 THz \sim 4 meV) frequency range where various quasi-particle excitations and various collective excitations exist. The research topics in FY2021 are as follows.

- 1. Nonequilibrium dynamics of superconductors: We have investigated the photoexcited nonequilibrium dynamics of high- T_c cuprate superconductors and iron-based superconductors, by using collective modes, namely the Higgs mode and nonlinear Josephson current response as a ultrafast probe for the superconducting order parameter.
- 2. Nonequilibrium dynamics of charge density wave system: We have investigated the photoinduced phase transition phenomena(PIPT) in a thin film of transition metal dichalcogenide (TMD) $3R-Ta_{1+x}Se_2$ which shows a charge density wave(CDW) order at low temperatures. As a new route

toward the PIPT, we investigated the direct modulation of the order parameter itself by exciting the amplitude mode. Melting dynamics of the CDW order induced by the large amplitude driving of the CDW amplitude mode was studied by terahertz pump and optical probe experiments.

3. Floquet engineering of Dirac electron systems: We have aimed at realizing Floquet states in Dirac electron system in thin films of Bi and $Co_3Sn_2S_2$. Upon the irradiation of circular polarized mid-infrared light pulses, we observed the light-induced anomalous Hall effect as manifested by the transient Faraday rotation signal in the terahertz frequency range. The results are accounted for by the emergence of light-induced Berry curvature and the induced Hall conductivity is interpreted by the effect of chiral gauge field implemented by the circularly polarized light into the Dirac electron system.

References

- Hiroaki Niwa, Naotaka Yoshikawa, Masashi Kawaguchi, Masamitsu Hayashi, and Ryo Shimano: Switchable generation of azimuthally- and radially-polarized terahertz beams from a spintronic terahertz emitter, Optics Express 29, 13331 (2021). Editors' pick
- [2] Naotaka Yoshikawa, Hiroki Suganuma, Hideki Matsuoka, Yuki Tanaka, Pierre Hemme, Maximilien Cazayous, Yann Gallais, Masaki Nakano, Yoshihiro Iwasa and Ryo Shimano: Ultrafast switching to an insulating-like metastable state by amplitudon excitation of a charge density wave, Nature Physics 17, 909 (2021).
- [3] Kazuki Isoyama, Naotaka Yoshikawa, Kota Katsumi, Jeremy Wong, Naoki Shikama, Yuki Sakishita, Fuyuki Nabeshima, Atsutaka Maeda, and Ryo Shimano: Light-induced enhancement of superconductivity in iron-based superconductor FeSe_{0.5} Te_{0.5}, Communications Physics 4, 160 (2021).
- [4] Romain Grasset, Kota Katsumi, Pierre Massat, Hai-Hu Wen, Xian-Huin Chen, Yann Gallais, and Ryo Shimano: Terahertz pulse-driven collective mode in the nematic superconducting state of Ba_{1-x}K_xFe₂As₂, npj Quantum Materials 7, 4 (2022).

17 Takagi-Kitagawa Group

Research Subjects: Physics of Correlated Electron Systems

Member: Hidenori Takagi, Kentaro Kitagawa, Naoka Hiraoka

We are exploring new compounds with transition metal elements in which novel, exotic and/or functional electronic phases are realized. Our main targets in FY2021 included, 4f lanthanoide honeycomb-lattice compounds with interplay of electron correlations and strong spin orbit coupling, spin liquids, bosonic Bose-Einstein condensation, excitonic ground states, and instrumental development of ultrahigh-pressure magnetometry device.

Realization of spin liquid, where quantum spins fluctuates at absolute zero, should be a milestone in the field of quantum spin physics. After a theoretical achievement of the exactly solvable spin liquid state on a honeycomb lattice, by Alexei Kitaev, a materialization of this Kitaev Honeycomb Model (KHM) has been intensively pursuit. One dimensional spin liquid has been commonly accepted, while in two or three dimensions, typical known frustrated quantum spin liquid materials, like triangular compounds, is not based on an exactly solvable lattice model. We have been focussed on a two-dimensional honeycomb iridate, $H_3LiIr_2O_6$, and discovered that $H_3LiIr_2O_6$ is indeed spin liquid, as the first material of such a liquid, down to 50 mK by specific heat, magnetic susceptibility, and nuclear magnetic resonance experiments. This key result was published in 2018–2021.

The key ingredient to realize KHM is bond-dependent anisotropic Ising-like interactions, and it was suggested that material engineering for spin-orbit coupled $J_{\text{eff}} = 1/2$ quantum pseudo spins of Ir on (hyper-)honeycomb lattice would be a main route. Two kinds of Majorana fermions represent KHM and they are particles on the exactly solved ground state. Since our discovery is an only spin liquid on Kitaev system, and no report was given to proof two Majorana particles. We will pursuit realization of "true" Kitaev material. For this purpose, we are exploring a new route to Kitaev physics, by making Lanthanoid honeycomb materials. For example, Na₂PrO₃ is a newly suggested candidate for a platform of an antiferromagnetic Kitaev-type interaction. We have clarified Na₂PrO₃ exhibits metamagnetic behavior which has been theoretically expected for the antiferromagnetic Kitaev spin liquid and its proximate. We further explore other 4f Lanthanoid honeycomb materials as a new field for quantum magnetism in combination with Material Informatics and traditional crystal growth techniques.

To further accelerate quantum magnetism research in different ways, we apply ultrahigh pressure on such candidate materials to modify the ground state. However, it has been difficult to evaluate magnetic samples above a few giga pascals. This year, we developed a highly sensitive technique to conduct magnetometry under very high pressures up to 7 GPa using an opposed-anvil type cell, which can detect a weak volume susceptibility as small as $\sim 10^{-4}$. The high-pressure cell has an optimized geometry to yield a reduced background in the magnetic response, one order of magnitude smaller than those for previously reported high-pressure cells in a commercial SQUID magnetometer. Using this unique technique, we will explore novel magnetism under pressure.

18 Hayashi Group

Research Subjects: Quantum spintronics/optics

Member: Masamitsu Hayashi, Masashi Kawaguchi

We work in the field of quantum spintronics and optics. Currently we put a particular focus on the strong coupling of spins, photons, magnons and phonons, mediated by the spin orbit interaction of the system, and look for the physics that can be applied to quantum physics.

- Spin current generation
 - Spin currents in Pt-Bi alloy[2]

We have studied the spin torque efficiency of $Pt_{1-x}Bi_x$ alloy. The spin Hall angle increases with Bi concentration and exceeds 0.3 when x is close to 0.9. As the magnetic easy axis of a 0.6 nm thick Co layer deposited on the alloy points along the film normal, the system serves as an ideal system for spin – orbit torque magnetization switching devices.

- Polarized THz pulses from a spintronic THz emitter
- Terahertz wave radiation from via spin current[4]

Two fundamental terahertz cylindrical vector beams (CVBs), azimuthally- and radially-polarized THz pulses, are generated from a spintronic THz emitter. A metallic bilayer, consisting of a ferromagnetic layer and heavy metal layer, is irradiated with a femtosecond laser pulse. By applying appropriate magnetic fields and using a triangular Si prism, THz CVBs are observed from the emitter. The approach facilitates access of CVBs and paves the way toward polarization control in the THz regime.

- Helicity dependent photocurrent in metal/semimetal bilayers[3]

We have studied helicity dependent photocurrent (HDP) in metal/semimetal (Bi) bilayers. Compared to Bi single layer films, we find the HDP is enhanced in metal/Bi bilayers. For the bilayers, the sign of HDP under back illumination reverses from that of front illumination. Using spin transport calculations, we show that the HDP sign reversal under back illumination is caused by spin absorption and spin to charge conversion at the metal/Bi interface. These results show that the HDP can be used to assess interface states with strong spin orbit coupling.

• Chiral magnetism

- Magnetic compensation in rare-earth baed ferrimagnetic alloy thin films[1]

We have studied the magnetic properties of Tb-based rare-earth (RE) - transition metal (TM) ferrimagnetic $\text{Tb}_x(\text{FeCo})_{1-x}$ thin films. We find that the Tb concentration at which the magnetic moments of the RE- and TM-sublattices compensate increases with decreasing film thickness when the films are grown on Pt underlayers. For the thinnest TbFeCo films (1.5 nm-thick), the magnetic compensation is not observed at room temperature, suggesting that the Tb atoms do not contribute to the magnetization. The Tb concentration at which magnetic compensation occurs decreases when the underlayer is changed from Pt to Ta. These findings contribute to developing the understanding of magnetism in ferrimagnetic alloy based thin film heterostructures.

 M. Ishibashi, K. Yakushiji, M. Kawaguchi, A. Tsukamoto, S. Nakatsuji, M. Hayashi, Ferrimagnetic compensation and its thickness dependence in TbFeCo alloy thin films. Appl. Phys. Lett. 120, 022405 (2022).

- [2] Z. Chi, Y.-C. Lau, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Charge-spin conversion in Pt_{1-x}Bi_x alloys for spin-orbit torque switching. APL Mater. 9, 061111 (2021).
- [3] H. Hirose, M. Kawaguchi, Y.-C. Lau, Z. Chi, F. Freimuth, K. Takanashi, M. Hayashi, Interface-enhanced helicity dependent photocurrent in metal/semimetal bilayers. Phys. Rev. B 103, 174437 (2021).
- [4] H. Niwa, N. Yoshikawa, M. Kawaguchi, M. Hayashi, R. Shimano, Switchable generation of azimuthally-and radially-polarized terahertz beams from a spintronic terahertz emitter. Optics Express 29, 13331 (2021).

19 Kobayashi Group

Research Subjects: mesoscopic physics, quantum sensing, diamond NV center, noise & fluctuations, nonequilibrium phenomena

Member: Kensuke Kobayashi and Kento Sasaki

The nano-fabrication technique allows us to investigate fascinating behaviors of "mesoscopic systems", namely, electronic devices that work in the quantum regime. They have been serving as ideal test-beds to demonstrate various quantum effects in a controllable and thus transparent way since the 1980s, as we can precisely tune and probe the electron transport through a single quantum site. Significantly, the Landauer-Büttiker formalism embodies this advantage of mesoscopic physics, and it has successfully applied to many nano-fabricated conductors (e.g. Aharonov-Bohm ring, quantum dot, etc.), through which mesoscopic physics has been established.

We are interested in various phenomena in mesoscopic systems, especially quantum many-body effects, non-equilibrium phenomena, and spin/thermal transport. High-precision measurement of conductance and current fluctuations enables us to understand quantitatively quantum transport, which has been difficult. We now primarily focus on quantum sensing using diamond NV centers (nitrogen-vacancy centers). We are developing a single quantum spin microscope to apply the high-precision measurement of physical properties, especially in mesoscopic systems.

In FY2021, we addressed the following research topics:

- Vector magnetometry using perfectly aligned nitrogen-vacancy center ensemble in diamond.
- Accurate magnetic field imaging using nanodiamond quantum sensors promoted by machine learning.
- Lock-in thermography using diamond quantum sensors.
- Spin wave detection using NV centers.
- Demonstration of Floquet engineering using pulse driving in a diamond two-level system under a large-amplitude modulation.
- Three-body correlations in nonlinear response of correlated quantum liquid.
- Negative correlation between the linear and the nonlinear conductance in magnetic tunnel junctions.
- Thickness-induced crossover from strong to weak collective pinning in exfoliated $FeTe_{0.6}Se_{0.4}$ thin films.
- Charge density wave transitions in mechanically-exfoliated NbSe₃ devices.

Published papers:

- [1] T. Hata et al., Nature Comm. 12, 3233 (2021).
- [2] K. Fujiwara et al., Jpn. J. Appl. Phys. 60, 070904 (2021) [Rapid Comm.].
- [3] S. Iwakiri et al., Phys. Rev. B 103, 245427 (2021).
- [4] M. Tsukamoto et al., Appl. Phys. Lett. 118, 264002 (2021).
- [5] K. Kobayashi and M. Hashisaka, J. Phys. Soc. Jpn. 90, 102001 (2021) [Invited Review].
- [6] R. Nakamura et al., Phys. Rev. B 104, 165412 (2021).

20 Nakatsuji-Sakai Group

A new era in quantum materials research arises, featuring discoveries of novel topological phases of matter and interdisciplinary approaches. Our research activities focus on designing and synthesizing new materials with emergent quantum properties that have never been seen before, then exploring the physics and functionalities of such properties with our world-leading measurement facilities. We aim to lead the innovative quest for new quantum materials that bear a far-reaching impact not only on basic science but also on our everyday life in the future.

Major research themes:

1. Solid-state analogs of relativistic particles and new quantum phenomena in strongly correlated topological phases and frustrated magnets

2. Room-temperature topological transport in magnetic materials

3. Non-Fermi-liquid behavior and exotic superconductivity in multipolar Kondo materials

Summary of research subjects in 2021

1. Large anomalous Nernst effect in an iron-based kagome ferromagnet Fe₃Sn

Anomalous Nernst effect (ANE), a transverse thermoelectric effect that occurs in magnetic material, has recently attracted attention for its application in energy-harvesting technology. It can be exploited in developing high-efficiency energy-harvesting devices with a simple lateral structure, high flexibility, and low production cost. In this work, we reported our observation of a high ANE exceeding 3 μ V/K above room temperature in the kagome ferromagnet Fe₃Sn with the Curie temperature of 760 K [1]. First-principles calculation clarifies that a "nodal plane" produces a flat hexagonal frame with strongly enhanced Berry curvature, resulting in the large ANE. Our discovery suggests that the flat degenerate electronic states provide a useful guide to design magnetic materials with a large ANE.

2. Enhanced Anomalous Hall signal by electrical manipulation in antiferromagnetic Weyl metal Mn_3Sn The topological band structure of antiferromagnetic Mn_3Sn yields surprisingly large anomalous transport, holding promises for next-generation ultrafast magnetic memory devices. Our recent study reports electriccurrent control of the anomalous Hall signal in Mn_3Sn /heavy metal heterostructures[Nature ('20)]. This work further optimizes the multilayer structure and deposition process and realizes a three-time enhancement of the readout signal (Hall resistance). This improved performance is achieved by (i) aligning the Mn_3Sn crystal grains parallel to the direction of the Hall signal and (ii) improving the interfacial condition between Mn_3Sn and the W layer. This finding may bring memory devices based on topological antiferromagnet closer to real-world applications [2].

3. Ferrimagnetic compensation and its thickness dependence in TbFeCo alloy thin films

Rare earth (RE)-transition metal (TM) ferrimagnetic materials feature reduced net magnetization and bulk perpendicular magnetic anisotropy (PMA), leading to compelling advantages in realizing efficient magnetic application devices. This work focuses on the magnetic properties of Tb-based RE – TM ferrimagnetic $[Tb_x(FeCo)_{1 - x}]$ thin films [3]. In films grown on Pt underlayers, a decrease of film thickness leads to increased Tb concentration at which the magnetic moments of the RE- and TM-sublattices compensate. Such magnetic compensation does not occur at room temperature for the thinnest (1.5 nm-thick) TbFeCo films. In these films, inserting a thin Co layer enhances the PMA, while a thin Tb layer insertion reduces the PMA to zero. Such contrasting behavior reveals that the PMA originates from the Pt/Co interface. The Tb concentration at which magnetic compensation occurs decreases when changing the underlayer from Pt to Ta. We infer that Tb becomes magnetically inactive due to intermixing with the Pt underlayer, causing the reduction in PMA.

4. Anomalous scaling behavior of transverse thermoelectric conductivity in ferromagnet CoMnSb

Transverse thermoelectric conductivity α_{yx} is a sensitive measure of momentum-space Berry curvature near the Fermi energy. Recently, critical behavior $\alpha_{yx} \sim T \log T$ arising from a Weyl semimetal state tuned toward a quantum Lifshitz critical point was reported in ferromagnet Co₂MnGa [Nature Physics ('18)]. This study reports the same logarithmic critical behavior in another ferromagnet CoMnSb hosting Weyl semimetal state [4]. Thus, the novel temperature dependence of α_{yx} provides a practical guide to search for new magnetic topological materials.

5. The role of phonons in quantum pyrochlores $Pr_2X_2O_7$ (X = Zr, Ir)

The Pr-based quantum pyrochlores $Pr_2X_2O_7$ (X = Zr, Ir) exhibit exotic liquid states that defy longrange magnetic order. The non-Kramers Pr^{3+} renders strong spin-lattice coupling, and it is essential to understand the role of phonons in shaping their magnetic and electronic properties. We investigate the phonon spectra of single-crystal $Pr_2Zr_2O_7$ and $Pr_2Ir_2O_7$ via Raman spectroscopy [5]. In $Pr_2Zr_2O_7$, lattice dynamics induces a doublet crystal-field excitation splitting at around 55 meV, creating a vibronic state. The phonon spectra of $Pr_2Ir_2O_7$ are similar to that of $Pr_2Zr_2O_7$ but with broadened peaks, attributed to phonon-electron scattering.

6. Record high antiferromagnetic transition in Yb-based heavy fermion proximate to a Kondo insulator The magnetic transition temperature in Yb-based heavy-fermion systems is typically at least one order of magnitude lower than those observed in Ce-based counterparts despite their similar physical properties. Here, we report that Mn-doping at the Al site in α -YbAlB₄ brings its heavy-fermion liquid state close to a Kondo insulator, leading to a record high antiferromagnetic transition reaching 20 K [6].

- T. Chen, S. Minami, A. Sakai, Y. Wang, Z. Feng, T. Nomoto, M. Hirayama, R. Ishii, T. Koretsune, R. Arita, S. Nakatsuji "Large anomalous Nernst effect and nodal plane in an iron-based kagome ferromagnet" Sci. Adv., 8(2), eabk1480(2022).
- [2] H. Tsai, T. Higo, K. Kondou, S. Sakamoto, A. Kobayashi, T. Matsuo, S. Miwa, Y. Otani, S. Nakatsuji "Large Hall Signal due to electrical switching of an antiferromagnetic Weyl semimetal state" Small Sci. 2000025 (2021).
- [3] M. Ishibashi, K. Yakushiji, M. Kawaguchi, A. Tsukamoto, S. Nakatsuji, and M. Hayashi "Ferrimagnetic compensation and its thickness dependence in TbFeCo alloy thin films" Appl. Phys. Let. 120, 022405 (2022).
- [4] H. Nakamura, S. Minani, T. Tomita, A.A. Nugroho, S. Nakatsuji "Logarithmic criticality in transverse thermoelectric conductivity of the ferromagnetic topological semimetal CoMnSb" Phys. Rev. B 104, L161114 (2021).
- [5] Y. Xu, H. Man, N. Tang, T. Ohtsuki, S. Baidya, S. Nakatsuji, D. Vanderbilt, and N. Drichko "Phonon spectrum of Pr₂Zr₂O₇ and Pr₂Ir₂O₇ as evidence of coupling of the lattice with electronic and magnetic degrees of freedom" Phys. Rev. B 105, 075137 (2022).
- [6] S. Suzuki, K. Takubo, K. Kuga, W. Higemoto, T. U. Ito, T. Tomita, Y. Shimura, Y. Matsumoto, C. Bareille, H. Wadati, S. Shin and S. Nakatsuji "High-temperature antiferromagnetism in Yb based heavy fermion systems proximate to a Kondo insulator" Phys. Rev. Res. 3, 023140 (2021).

21 Theoretical Astrophysics Group

Research Subjects:Observational Cosmology, Extrasolar Planets, Star Formation, highenergy astrophysics, and Artificial Intelligence

Member:Yasushi Suto, Naoki Yoshida, Kazumi Kashiyama , Masamune Oguri & Tilman Hartwig

The Theoretical Astrophysics Group conducts a wide range of research programmes. Observational cosmology is our primary research area, but we also pursue other forefront topics such as extrasolar planets, star formation, high-energy astrophysics, and artificial intelligence.

"Observational Cosmology" attempts to understand the evolution of the universe on the basis of the observational data in various wavebands. The proper interpretation of recent and future data provided by Planck, Hubble Space Telescope, ALMA, and wide-field galaxy surveys such as Subaru Hyper-Suprime-Cam survey are very important both in improving our understanding of the present universe and in determining several basic parameters of the universe, which are crucial in predicting the evolution of the universe. Our current interests include non-linear gravitational evolution of cosmological fluctuations, formation and evolution of proto-galaxies and proto-clusters, X-ray luminosity and temperature functions of clusters of galaxies, hydrodynamical simulations of galaxies and the origin of the Hubble sequence, thermal history of the universe and reionization, prediction of anisotropies in the cosmic microwave background radiation, statistical description of the evolution of mass functions of gravitationally bound objects, statistics of gravitationally lensed quasars, and the chemical formation history of the Milky Way.

Astronomical observations utilizing large ground-based telescopes discovered distant galaxies and quasars that were in place when the Universe was less than one billion years old. We can probe the evolution of the cosmic structure from the present-day to such an early epoch. Shortly after the cosmological recombination epoch when hydrogen atoms were formed, the cosmic background radiation shifted to infrared, and then the universe would have appeared completely dark to human eyes. A long time had to pass until the first generation stars were born, which illuminated the universe once again and terminate the cosmic Dark Ages. We study the formation of the first stars and blackholes in the universe. The first stars are thought to be the first sources of light, and also the first sources of heavy elements that enable the formation of ordinary stellar populations, planets, and ultimately, the emergence of life. We perform simulations of structure formation in the early universe on supercomputers. Direct and indirect observational signatures are explored considering future radio and infrared telescopes. We study the formation and mixing of the first heavy elements in the universe. Comparing the predictions of our simulations to observations allows us to better understand the nature of the underlying physical processes.

Can we discover a second earth somewhere in the universe? This puzzling question used to be very popular only in science fictions, but is now regarded as a decent scientific goal in the modern astronomy. Since the first discovery of a gas giant planet around a Sun-like star in 1995, more than 4000 exoplanets have been reported as of March 2021. Though most of the confirmed planets turned out to be gas giants, the number of rocky planet candidates was steadily increasing, which therefore should give the affirmative answer to the above question. Our approaches towards that exciting new field of exoplanet researches include the spin-orbit misalignment statistics of the Rossiter-MacLaughlin effect, simulations of planet-planet scattering, simulations of tidal evolution of the angular momentum of the planetary system, photometric and spectroscopic mapping of a surface of a second earth and detection of possible biomarker of habitable planets.

To maximise the information gain from astrophysical observations and numerical simulations, we also apply and develop state-of-the-art machine learning techniques. We use supervised machine learning algorithms to classify observations of metal-poor stars, quasars, and satellite galaxies of the Milky Way. We improve existing deep learning methods with a new class of activation functions that allow users to improve the extrapolation properties of their neural networks. Artificial intelligence (AI) is a rapidly evolving field with many promising applications. To better understand the social impact of AI research, we also collaborate with social scientists to better understand the impact and public attitudes towards AI research.

Let us summarize this report by presenting recent titles of the PhD and Master's theses in our group;

2021

- Study on the effect of supernova fallback on the neutron star diversity
- Gravitational hierarchical three-body systems with an invisible inner binary: application to binary black-hole search and their dynamical stability
- Analysis of the Large-Scale Structure of the Universe Using Cosmological Simulations and Machine Learning
- Planetary systems predicted from the ALMA disks: planet-disk evolution and long-term orbital stability of multi-planets
- Structure Formation of the Universe with Fuzzy Dark Matter
- Dispersal mechanism of proto-planetary disks

2020

- Observational signatures from tidal disruption events of white dwarfs
- Multiwavelength Signals From Pulsar-Driven Supernovae
- Measuring stellar rotation periods and stellar inclinations of kepler solar-type stars

2019

• Observational characterization of protoplanetary disks, exo-rings, and Earth-twins in exoplanetary systems

- Non-sphericities and alignments of clusters and central galaxies from cosmological hydrodynamical simulation: theoretical predictions and observational comparison
- Probing Cosmic Star-Formation History with Blind Millimetre Searches for Galaxy Emission Lines
- Photoevaporation process of giant planets
- Dilution of heavy elements in galaxies and its implications

2018

- Stellar Inclinations from Asteroseismology and their Implications for Spin-Orbit Angles in Exoplanetary Systems
- Numerical Investigations on Explosion Mechanisms of Core-collapse Supernovae
- Cosmology and Cluster Astrophysics with Weak Gravitational Lensing and the Sunyaev-Zel[']dovich Effect
- Photoevaporation of Protoplanetary Disks and Molecular Cloud Cores in Star-Forming Regions
- Numerical Algorithms for Astrophysical Fluid Dynamics
- Radial velocity modulation of an outer star orbiting an unseen inner binary: analytic perturbation formulae in a three-body problem to search for wide-separation black-hole binaries
- The distribution and physical properties of emission line galaxies in the early universe
- Diversities out of the observed proto-planetary disks: migration due to planet-disk interaction and architecture of multi-planetary systems

2017

- Formation of supermassive stars and black holes via direct gravitational collapse of primordial gas clouds
- Formation and growth of massive black holes in the early universe
- Measuring Dynamical Masses of Galaxy Clusters with Stacked Phase Space
- GCM simulation of Earth-like planets for photometric lightcurve analysis
- Tidal disruption events of white dwarfs caused by black holes
- Radio, Submillimetre, and Infrared Signals from Embryonic Supernova Remnants

22 Murao Group

Research Subjects: Quantum Information Theory

Member: Mio Murao and Akihito Soeda

Quantum mechanics allows a new type of information represented by quantum states which may be in a superposition of 0 and 1 state. Quantum information processing seeks to perform tasks 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. Recently, we are analyzing non-locality, causal structures, parallelizability, and anonymity of quantum information processing and quantum programming by investigating higher-order quantum operations and distributed quantum computation. We also investigate controls for quantum dynamics and quantum resource theory.

This year, our group consisted of two faculty members, Mio Murao (Professor), Akihito Soeda (Assistant Professor), a postdoctoral researcher, Bartosz Regula (JSPS foreign postdoctoral fellow since July), and 4 graduate students, Wataru Yokojima (D2), Atsushi Okamoto (M2), Yutaka Hashimoto (Ms), Kosuke Matsui (M2) and Satoshi Yoshida (M1), and two research students, Yu Tanaka and Timothy Forrer (since October). Our projects engaged in the academic year of 2021 were the following:

- Higher-order quantum operations
 - Probabilistic implementation of inverse map from unknown isometry operations by S. Yoshida, A. Soeda, and M. Murao
 - Storage and retrieval of higher-order quantum operations by W. Yokojima, A. Soeda, and M. Murao
 - Comparison of unknown unitary channels by Y. Hashimoto, A. Soeda, and M. Murao
 - Unitary channel discrimination beyond group structures: Advantages of sequential and indefinitecausal-order strategies, by M. Murao collaborated in collaboration with M.T. Quintino and J. Bavaresco at IQOQI Vienna in Austria
 - Application of Higher-order quantum operations to quantum machine learning by Y. Tanaka, A. Soeda, and M. Murao
- Controls for quantum dynamics
 - Robust control of quantum dynamics for a spin system with unknown parameters by A. Okamoto,
 A. Soeda, and M. Murao
- Distributed quantum information processing
 - Entanglement-efficient implementation protocols for distributed quantum computation with two quantum computers by K. Matsui, A. Soeda, and M. Murao in collaboration with Cambridge Quantum Computing Ltd. in UK, and Jun-yi Wu, at Tamkang University in Taiwan
 - Entanglement cost of distributed implementations of Clifford operations in two quantum computers by T. Forrer, A. Soeda, and M. Murao
- Quantum resource theory
 - Probabilistic transformations of quantum resources by B. Regula
 - One-shot yield-cost relations in general quantum resource theories by B. Regula in collaboration with R. Takagi from Nanyang Technological University in Singapore and M. Wilde from Louisiana State University in US

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 FY2021 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms, nonequilibrium open systems
 - Topological field theory of non-Hermitian systems [1]
 - Novel relation between the Liouvillian gap and relaxation time in open quantum systems with skin effects [2]
 - Extension of the BCS theory to open quantum many-body systems [3]
- Unification of quantum physics, statistical mechanics, information theory, and machine learning
 - Convergent and efficient deep Q network algorithm [4]
 - Fundamental theory for training deep neural networks [5, 6, 7, 8]
- [1] K. Kawabata, K. Shiozaki, and S. Ryu, Phys. Rev. Lett. 126, 216405 (2021) [selected for Editors' Suggestion].
- [2] T. Haga, M. Nakagawa, R. Hamazaki, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. 127, 070402 (2021).
- [3] K. Yamamoto, M. Nakagawa, N. Tsuji, M. Ueda, and N. Kawakami, Phys. Rev. Lett. 127, 055301 (2021).
- [4] Z. T. Wang and M. Ueda, The International Conference on Learning Representations 2022 (ICLR 2022).
- [5] K. Liu*, Liu Ziyin*, and M. Ueda (*equal contribution), Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning (ICML 2021), PMLR 139, 7045 (2021).
- [6] Liu Ziyin*, K. Liu*, T. Mori, and M. Ueda (*equal contribution), The International Conference on Learning Representations 2022 (ICLR 2022) [Spotlight].
- [7] Zhang Zhiyi and Liu Ziyin, 37th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI 2021).
- [8] Liu Ziyin, B. Li, J. B. Simon, and M. Ueda, The International Conference on Learning Representations 2022 (ICLR 2022) [Spotlight].

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. Below is the list of topics studied during the academic year 2021.

Cosmology: Geometrical structure of the spacetime

- Superstring theory and α -attractors
- Breaking of the Lorentz invariance and supersymmetry breaking
- One-loop correction on the primordial curvature perturbation from single-field inflation
- Vacuum decay in the Lorentzian path integral
- Cosmological implications of pulsar timing array observation

Cosmology: Creation and evolution of the material contents

- Reheating in the mixed Higgs- R^2 inflation
- Gravitational particle production as Stokes phenomenon
- Reconsideration of preheating
- Wash-In Leptogenesis
- Baryon isocurvature perturbation from primordial magnetic fields
- Chiral Gravitational Effect in dynamical chiral plasma
- Time evolution of primordial magnetic fields
- Uncertainties in the formalism of the abundance of the primordial blackholes
- Evaluation of the abundance of the primordial blackholes with conditional probability
- Gravitational microlensing by axion stars

Gravitational wave analysis

- Offline noise removal method with environmental monitors
- Ultralight dark matter search

Time-domain astronomy

• Multi-band fast imaging with TriCCS camera

25 Ejiri Group

Research Subjects: high temperature plasma physics experiments, spherical tokamak, wave heating and current drive, nonlinear physics, collective phenomena, fluctuations and transport, advanced plasma diagnostics development

Member: Akira Ejiri, Naoto Tsujii

In Ejiri Group, we study magnetic confinement of a torus plasma to realize nuclear fusion energy. We perform basic tokamak plasma physics studies on the TST-2 device located at the university of Tokyo. We also collaborate with JT-60SA at QST, LHD at NIFS, LATE at Kyoto University, and QUEST at Kyushu University. TST-2 is a spherical tokamak with a major radius of 0.36 m and a minor radius of 0.23 m. The plasma current is <120 kA for inductive operation and <27 kA for RF driven operation. Spherical tokamaks are attractive since they can sustain plasmas with high β (kinetic pressure over magnetic pressure). However, plasma current startup and sustainment is a challenge due to limited space for the central solenoid normally used for current drive. Our present focus on TST-2 is current drive through generation of fast electrons by lower-hybrid waves (LHW). The RF current drive experiments are performed using LH waves at 200 MHz. The LH waves are excited using two capacitively coupled combline antennas located at the outer midplane and the top of the plasma. Since LHW drive current by generating fast electrons, measurements of x-ray radiations by those fast electrons are important.

On FY2021, the fast electron transport model was improved and it was found that LHW affects particle balance in addition to driving currents. Off-midplane launch LHW antenna was newly developed for current drive at mid-radius. Metal target was inserted to the outer scrape-off-layer (SOL). Existence of fast electrons were confirmed from the x-ray measurements. It was also found that substantial fraction of counter-current electrons exist in the SOL. Parametric decay instabilities of LHW have been observed with magnetic probes. This year, a new three-wave coupling was observed during LHW injection. Diagnostics to identify the new mode is being developed. The ion doppler spectroscopy was performed to study the ion temperature response to LH power modulation. It was found that the ion temperature response time was 1 ms in the edge and 4 ms near the axis.

Orbit-averaged Fokker-Planck simulation was developed to model the electron cyclotron (EC) wave breakdown of a tokamak plasma. The simulation was applied to breakdown in the TST-2 trapped particle configuration. The predicted breakdown threshold dependence on the vertical field, neutral gas pressure and EC heating power was consistent with the experimental observations.

Several diagnostic developments were performed in FY2021. A double-pass Thomson scattering configuration was tested to measure electron temperature anisotropy. A new magnetic probe was developed to measure the current profile of the LHW driven plasma. A microwave polarimeter was developed to measure the internal current profile of the LHW driven plasma.

As a collaboration, Thomson scattering diagnostic on QUEST is being developed. Density was measured for the CHI plasma, which reached $6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$. As a collaboration with ENN, we are developing a "finline" antenna which is a corrugated metal surface. In FY2021, a new top-launch finline antenna was fabricated which had improved feeder design. The bench measurement showed that the electric field pattern generated in front of the antenna was consistent with the design.

26 Yamamoto Group

Research Subjects: Millimeter- and submillimeter-wave Astronomy, Star and Planet Formation, Chemical Evolution of Interstellar Molecular Clouds

Member: Satoshi Yamamoto and Yoko Oya

Molecular clouds are birthplaces of new stars and planetary systems, which are being studied extensively as an important target of astronomy and astrophysics. Although the main constituent of molecular clouds is a hydrogen molecule, various atoms and molecules also exist as minor components. The chemical composition of these minor species reflects formation and evolution of molecular clouds as well as star formation processes. It therefore tells us how each star has been formed. We are studying star formation processes from such an astrochemical viewpoint.

Since the temperature of a molecular cloud is 10 - 100 K, an only way to explore its physical structure and chemical composition is to observe the radio wave emitted from atoms, molecules, and dust particles. Particularly, there exist many atomic and molecular lines in the millimeter/submillimeter wave region, and we are observing them toward formation sites of Solar-type protostars mainly with ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array).

So far, it has well been recognized that an envelope/disk system of a Solar-type protostar shows a significant chemical diversity. One distinct case is so called Warm Carbon Chain Chemistry (WCCC),

which is characterized by rich existence of various unsaturated carbon-chain molecules such as C_2H , C_4H , and HC_5N . A prototypical source is L1527 in Taurus. Another distinct case is so called hot corino chemistry, which is characterized by rich existence of various saturated organic molecules such as CH_3OH , $HCOOCH_3$, and C_2H_5CN . A prototypical source is IRAS 16293–2422 in Ophiuchus. Recently, sources having the both characteristics have also be found. Such chemical diversity would reflect the star formation history of each source, more specifically, a duration time of the starless core phase.

We are now studying how such chemical diversity is brought into protoplanetary disks by using ALMA. For the WCCC source L1527, we have found that carbon-chain molecules only exist in an infalling-rotating envelope outside its centrifugal barrier (r = 100 AU), while SO preferentially exists around the centrifugal barrier. For the hot corino source IRAS 16293–2422, OCS traces an infalling-rotating envelope, while saturated organic molecules such as CH₃OH and HCOOCH₃ trace the centrifugal barrier. Hence, chemical compositions drastically change across the centrifugal barrier of the infalling gas. Since a protostellar disk is formed inward of the centrifugal barrier, the chemical diversity at an envelope scale (~ 1000 au) is indeed inherited in the disk forming region (~ 100 au). Then, what is the initial chemical condition of the Solar System? Is it a common occurrence in our Galaxy? To answer these questions, the ALMA large program FAUST (Fifty AU Study of the chemistry in the disk/envelope system of Solar-like protostar) is ongoing. Furthermore, we are now incorporating machine-learning techniques to explore the physical and chemical structures in an unbiased way.

[1] Oya, Y. et al. Infalling-Rotating Motion and Associated Chemical Change in the Envelope of IRAS 16293–2422 Source A Studied with ALMA, Astrophys. J. 824, 88 (2016).

[2] Oya, Y. and Yamamoto, S. Substructures in the Disk-forming Region of the Class 0 Low-mass Protostellar Source IRAS 16293–2422 Source A on a 10 au Scale, Astrophys. J., **904**, 185 (2020).

[3] Okoda, Y. et al. FAUST II. Discovery of a Secondary Outflow in IRAS 15398–3359: Variability in Outflow Direction during the Earliest Stage of Star Formation?, Astrophys. J., **910**, 11 (2021).

[4] Okoda, Y. et al. Molecular Distributions of the Disk/Envelope System of L483: Principal Component Analysis for the Image Cube Data, Astrophys. J, **923**, 168 (2021).

27 Sakai (Hirofumi) Group

Research Subjects: Experimental studies of atomic, molecular, and optical physics

Members: Hirofumi Sakai and Shinichirou Minemoto

Our research interests are as follows: (1) Manipulation of neutral molecules based on the interaction between a strong nonresonant laser field and induced dipole moments of the molecules. (2) High-intensity laser physics typified by high-order nonlinear processes (ex. multiphoton ionization and high-order harmonic generation). (3) Ultrafast phenomena in atoms and molecules in the attosecond time scale. (4) Controlling quantum processes in atoms and molecules using shaped ultrafast laser fields. A part of our recent research activities is as follows:

(1) Stronger orientation of state-selected OCS molecules with relative-delay-adjusted nanosecond two-color laser pulses [1]

Using the all-optical molecular orientation technique with intense nonresonant two-color laser pulses, stronger molecular orientation $|\langle \cos \theta \rangle| \sim 0.34$ is achieved by employing the following two strategies: (1) carbonyl sulfide molecules lying in the lower rotational states are selected using a home-built molecular deflector and (2) the rising parts of the two wavelengths of the pump pulse are adjusted by introducing a Michelson-type delay line in the optical path. The achieved degree of molecular orientation is higher than that observed in the proof-of-principle experiment [Oda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 213901 (2010)] by about an order of magnitude and the highest ever characterized directly by Coulomb explosion imaging with appropriate probe polarization.

(2) All-optical control of pendular qubit states with nonresonant two-color laser pulses [2]

Practical methodologies for quantum qubit controls are established by two prerequisites, i.e., preparation of a well-defined initial quantum state and coherent control of that quantum state. Here we propose a new type of quantum control method, realized by irradiating nonresonant nanosecond two-color (ω and 2ω) laser pulses to molecules in the pendular (field-dressed) ground state. The two-color field nonadiabatically splits the initial pendular ground state $|\tilde{0}, \tilde{0}\rangle$ to a superposition state of $|\tilde{0}, \tilde{0}\rangle$ and $|\tilde{1}, \tilde{0}\rangle$, whose relative probability amplitudes can be controlled by the peak intensity of one wavelength component (ω) while the peak intensity of the other component (2ω) is fixed. The splitting of the quantum paths is evidenced by observing degrees of orientation of ground-state selected OCS molecules by the velocity map imaging technique. This quantum control method is highly advantageous in that any type of polar molecules can be controlled regardless of the molecular parameters, such as rotational energy, permanent dipole moment, polarizability, hyperpolarizability, and hyperfine energy structures.

- 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).
- [2] Je Hoi Mun, Shinichirou Minemoto, Dong Eon Kim, and Hirofumi Sakai, "All-optical control of pendular qubit states with nonresonant two-color laser pulses," to appear in Commun. Phys. (8 pages) (2022).

28 Gonokami Group

Research Subjects: Experimental studies on light-matter interaction in many-body quan-

tum systems, optical phenomena in artificial nanostructures, and development of laser based coherent light sources

Member: Makoto Gonokami and Junji Yumoto

We explore new aspects of many-body quantum systems and their exotic quantum optical effects by designing light-matter interactions. Our current target topics consist of a wide variety of matters, including excitons and electron-hole ensembles in semiconductors, and ultra-cold atomic gases. In particular, we have been investigating the phase of Bose-Einstein condensation of excitons, which has not been experimentally proven while considered as the ground state of an electron-hole ensemble. Based on quantitative spectroscopic measurements, the temperature and density of the excitions are determined in a quasi-equilibrium condition where they are trapped in a highly pure crystal kept below 1 K. We are now investigating a stable quantum degenerate state of dark excitons at the low temperature. We also study novel optical and teraherz-wave responses of artificial nanostructures fabricated by advanced technologies. Furthermore, we are now developing novel coherent light sources and spectroscopic methods. We achieved precision measurements of the refractive index of materials in an EUV region using techniques of higher-order harmonics generation. We also developed laser-based angle resolved photoemission spectroscopy using time-of-flight photoelectron analyzer.

The group activities of this year are as follows:

- 1. The quest for macroscopic quantum phenomena in photo-excited systems:
 - 1.1. Systematic study of the Bose-Einstein condensation transition of excitons using a dilution refrigerator
 - 1.2. Preparation of new quantum many-body systems using ultra-cold atomic gases
- 2. Investigation for non-trivial optical responses and development of applications:
 - 2.1. Circularly polarized coherent VUV generation by photonics crystal nanomembrane
 - 2.2. Exploring the mechanism of laser ablation by femtosecond lasers
 - 2.3. Development of new technology to fabricate micro three-dimensional artificial structures using laser processing and additive manufacturing
- 3. Development of novel coherent light sources and spectroscopic methods:

- 3.1. EUV precision spectroscopy using higher-order harmonics
- 3.2. Laser-based angle resolved photoemission spectroscopy
- 3.3. Institute for Photon Science Technology

29 Ando Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Gravitational Wave, Laser Interferometer

Member: Masaki Ando and Yuta Michimura

Gravitational waves has a potential to open a new window onto the Universe and brings us a new type of information about catastrophic events such as supernovae or coalescing binary neutron stars or binary black holes; these information can not be obtained by other means such as optics, radio-waves or X-ray. Worldwide efforts are being continued in order to construct and improve detectors.

In Japan, we are constructing a large-scale cryogenic gravitational-wave antenna, named KAGRA, at Kamioka underground site. This underground telescope is expected to catch gravitational waves from the coalescence of neutron-star binaries at the distance of 200 Mpc. A space laser interferometer, DECIGO, was proposed through the study of the gravitational wave sources with cosmological origin. DECIGO could detect primordial gravitational waves from the early Universe at the inflation era.

The current research topics in our group are followings:

- KAGRA gravitational wave detector
- Space laser interferometer, DECIGO and precursor missions
- Development of TOBA (Torsion Bar Antenna)
- Dark Matter Seach
- High-precision experiments on relativity and opto-mechanics

Reference

- Koji Nagano, et al.: Axion dark matter search using arm cavity transmitted beams of gravitational wave detectors, Phys. Rev. D 104, 062008 (2021).
- [2] Kentaro Komori, et al.: Improving force sensitivity by amplitude measurement of light reflected from a detuned optomechanical cavity, Phys. Rev. A 104, 031501 (2021).
- [3] Rika Yamada et al.: Reduction of quantum noise using the quantum locking with an optical spring for gravitational wave detectors, Phys. Lett. A 402, 127365 (2021).
- [4] Kiwamu Izumi et al.: The current status of contribution activities in Japan for LISA, PTEP 2021, 05A106 (2021).
- [5] Seiji Kawamura et al.: Current status of space gravitational wave antenna DECIGO and B-DECIGO, PTEP 2021, 05A105 (2021).
- [6] Yuta Michimura et al.: Ultralight dark matter searches with KAGRA gravitational wave telescope, J. of Phys.: Conf. Ser. 2156, 012071 (2022).
- [7] Yuka Oshima et al.: First observation and analysis of DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, J. of Phys.: Conf. Ser. 2156, 012042 (2021).
- [8] Hiroki Fujimoto, et al.: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment DANCE: Design and development of auxiliary cavity for simultaneous resonance of linear polarizations, J. of Phys.: Conf. Ser. 2156, 012182 (2021).
- [9] Takuya Kawasaki, et al.: Angular trapping of a linear-cavity mirror with an optical torsional spring, arXiv:2110.13507 (2021).

30 Bamba Group

Research Subjects: High-energy astrophysics, mainly utilizing X-ray observatories in orbit. Targets are, supernova remnants, black-holes, neutron-stars, magnetars, white dwarfs, active galactic nucleus, and so on.

Member: Associate Prof: Aya Bamba, Assistant Prof: Hirokazu Odaka

Our aim is understanding high energy phenomena in the universe, such as supernova explosions and their remnants, compact stars such as neutron stars and blackholes, and active galactic nucleus. Such high energy objects emit X-rays and gamma-rays, thus we observe such high energy photons using balloons and satellites.

This year we studied the shock structure and heating mechanism in supernova remnant (SNR) systems. We have made detailed spatially resolved spectroscopy of young SNRs, Tycho (SN1572) and resolved threedimentional expansion structure using Doppler broadening of emission lines. We found that the shock is decelerated by the circumsteller medium. This is the first direct discovery of circumsteller material around Tycho, implying the origin of Tycho is not a double-degenerate but a single-degenerate. We have also done similar analysis of Kepler (SN1604) and found asymmetric circumsteller medium [4].

Torus of active galactic nucleus (AGNs) feed supermassive blackholes and important to understand the co-evolution of galaxy and the blackholes. This year we have made systematic analysis of AGNs hidden by their torus with the X-ray emission model we developed ("XClumpy"), and found that around half of AGNs are hidden type. It is found that the covering fluction by their torus is larger than previously expected. Our result implies that there are more undiscovered AGNs hidden by their torus.

We also study on the detector development for the near future missions. For the XRISM, to be launched on the Japanese fiscal year 2022, we fixed the performance verification targets. We also developed the Monte-Carlo based data analysis method for pile-uped data of the X-ray CCD onboard XRISM. For Cipher mission, the first imaging polarimetory cubesat in the hard X-ray band, we completed the readout system and also developed the coded mask pattern with lower noise level. We also started GRAMS mission deverlopment in this year.

- [1] H. Suzuki, A. Bamba, and S. Shibata, ApJ, 914, 103 (2021)
- [2] Y. Yamane, H. Sano, M. D. Filipovic, K. Grieve, K. Tokuda, K. Fujii, Y. Babazaki, I. Mitsuishi, T. Inoue, F. Aharonian, T. Inaba, S. Inutsuka, N. Maxted, N. Mizuno, T. Onishi, G. Rowell, K. Tsuge, F. Voisin, S. Yoshiike, T. Fukuda, A. Kawamura, A. Bamba, K. Tachihara, and Y. Fukui, ApJ, 918, 36 (2021)
- [3] H. Suzuki, P. Plucinsky, T. Gaetz, and A. Bamba, A&A, 655, A116 (2021)
- [4] T. Kasuga, J. Vink, S. Katsuda, H. Uchida, A. Bamba, T. Sato, and J. P. Hughes, ApJ, 915, 42 (2021)
- [5] T. Tamba, H. Odaka, A. Bamba, H. Murakami, K. Mori, K. Hayashida, Y. Terada, T. Mizuno, and M. Nobukawa, PASJ (2022)
- [6] K. Makishima, T. Tamba, Y. Aizawa, H. Odaka, H. Yoneda, T. Enoto, and H. Suzuki, PASJ, 923, 63 (2021)
- [7] R. Uematsu, Y. Ueda, A. Tanimoto, T. Kawamuro, K. Setoguchi, S. Ogawa, S. Yamada, and H. Odaka, ApJ, 913, 1 (2021)
- [8] Y. Terada, M. Holland, M. Loewenstein, M. Tashiro, H. Takahashi, M. Nobukawa, T. Mizuno, T. Tamura, S. Uno, S. Watanabe, C. Baluta, L. Burns, K, Ebisawa, S. Eguchi, Y. Fukazawa, K. Hayashi, R. Iizuka, S. Katsuda, T. Kitaguchi, A. Kubota, E. Miller, K. Mukai, S. Nakashima, K. Nakazawa, H. Odaka, M. Ohno, N. Ota, R. Sato, M. Sawada, Y. Sugahara, M. Shidatsu, T. Tamba, A. Tanimoto, Y. Terashima, Y. Tsuboi, Y. Uchida, H. Uchiyama, S. Yamauchi, and T. Yaqoob, JATIS, 7, 037001 (2021)
- [9] S. Yamada, Y. Ueda, A. Tanimoto, M. Imanishi, Y. Toba, C. Ricci, and G. Privon, ApJS, 257, 61 (2021)
- [10] A. Jana, C. Ricci, S. Naik, A. Tanimoto, N. Kumari, H. Chang, P. Nandi, A. Chatterjee, and S. Safi-Harb, MNRAS, in press (2022)
- [11] A. Tanimoto, Y. Ueda, H. Odaka, S. Yamada, and C. Ricci, ApJS, in press (2022)

31 Kusaka Group

Research Subjects: Observational Cosmology, Cosmic Microwave Background (CMB) Observation. (1) Study of Inflation in the early universe and the evolution of the universe through gravitational lensing using POLARBEAR and Simons Array experiment; (2) Design, Development, and Construction of Simons Observatory aiming to study Inflation, evolution of the universe, Neutrinos, Dark Energy, and Dark Radiation; (3) Research and Development of technologies for Simons Observatory and CMB-S4.

Member: A. Kusaka and K. Kiuchi

- POLARBEAR experiment and its successor, Simons Array, are optimized to measure both inflationary signature and the gravitational lensing effect in CMB polarization. POLARBEAR experiment has concluded its observation campaign, and Simons Array experiment started the osbervation. Our focus is on data analysis as well as the development and characterization of the continuously-rotating half-wave plate (HWP) enabling accurate measurement of CMB polarization.
- Simons Observatory experiment is under construction, with the first light expected in two years. We plan to deploy an array of what we call "small aperture telescopes," which are dedicated for the inflationary signal, and a six-meter "large aperture telescope," which enables observation for Neutrinos and the dark content of the universe. We are primarily focusing on the design and development for the small aperture telescope.
- Research and Development for the next generation experiments such as Simons Observatory and CMB-S4 are crucial component of our research program. We specifically work on superconducting technologies used in the detectors, cryogenic bearing system for HWP, and anti-reflection coating for high-index optical material. We also develop techniques for high-performance computation (HPC) enabling data analysis for new experiments producing order-of-magnitude larger data volume than the current instruments.

32 Takeuchi Group

Research Subjects: Experimental statistical physics for non-equilibrium systems

Members: Kazumasa A. Takeuchi and Daiki Nishiguchi

We aim to explore statistical physics of out-of-equilibrium phenomena experimentally. Using soft and living matter, such as liquid crystal, colloids, and granular materials, as well as bacteria, we carry out experiments that we design to capture underlying physical principles, in addition to the understanding of specific phenomena we observe. As a result, we deal with diverse subjects in the group, sometimes enjoying interesting connections in between. More specifically, we carried out the following projects among others in the academic year 2021:

(1) Non-equilibrium phenomena in soft matter systems

(1-1) Observation of reconnecting topological defect lines in liquid crystal and symmetry restoring [6]

- (1-2) Noise-induced synchronization in liquid crystal convection
- (1-3) Motion, order and fluctuations of populations of self-propelled colloidal particles [4, 7]

(2) Non-equilibrium phenomena in living systems

(2-1) 3D growth of *E. coli* populations and topological defects [5]

- (2-2) Bundle structure formation in *E. coli* populations
- (2-3) Glass transition in motile *E. coli* populations
- (2-4) Swimming of bacteria in quasi-two-dimensional space[8]

(3) Approaches based on nonlinear science

(3-1) Algorithm for studying large deviations of non-equilibrium interfaces

More detailed information can be found at the group's website, https://lab.kaztake.org/

References

- R. A. L. Almeida and K. A. Takeuchi, Phase-ordering kinetics in the Allen-Cahn (Model A) class: universal aspects elucidated by electrically-induced transition in liquid crystals. Phys. Rev. E 104, 054103 (2021).
- [2] Y. T. Fukai and K. A. Takeuchi, Initial perturbation matters: implications of geometry-dependent universal Kardar-Parisi-Zhang statistics for spatiotemptalk chaos. Chaos 31, 111103 (2021).
- [3] T. Shimaya, R. Okura, Y. Wakamoto and K. A. Takeuchi, Scale invariance of cell size fluctuations in starving bacteria. Commun. Phys. 4, 238 (2021).
- [4] J. Iwasawa, D. Nishiguchi and M. Sano, Algebraic correlations and anomalous fluctuations in ordered flocks of Janus particles fueled by an AC electric field. Phys. Rev. Res. 3, 043104 (2021).
- [5] T. Shimaya and K. A. Takeuchi, 3D-induced polar order and topological defects in growing bacterial populations. arXiv:2106.10954.
- [6] Y. Zushi and K. A. Takeuchi, Scaling and spontaneous symmetry restoring in reconnecting nematic disclinations. arXiv:2110.00442.
- [7] A. N. Kato, K. A. Takeuchi, and M. Sano, Active colloid with externally induced periodic bipolar motility and its cooperative motion. arXiv:2203.12882.
- [8] Y. Takaha and D. Nishiguchi, Quasi-two-dimensional bacterial swimming around pillars: enhanced trapping efficiency and curvature dependence. arXiv:2203.16017.

33 Mio Group

Research Subjects: Application of lasers

Member: Norikatsu Mio

Mio Group is conducting research on lasers and their applications. Since the laser was invented in 1960, the laser technology has been widely used in various fields as a fundamental technology that supports modern society, thus is extremely important and indispensable for communication, information technology, material processing and so on. In addition, state-of-the-art photon technology was used in the first observation of a gravitational wave in 2015; photon science and technology work as an important bridge between academia and society.

Our laboratory belongs to Institute for Photon Science and Technology (IPST), where various researches are conducted to deepen science and to promote collaboration with industry. IPST has many members in addition to our laboratory; all of them are working closely together to promote research and education(http://www.ipst.s.u-tokyo.ac.jp).

Physics on laser material processing

The processes such as cutting, welding, cutting, using lasers are called laser processing. Since advances in laser sources have made it possible to use high-power ultraviolet light and to control pulse widths and wavelengths more freely, the development of new processing has become possible.

However, the actual phenomena are non-equilibrium, open systems, and the interaction between laser light and materials is in a region that cannot be explained by a perturbative approach. The goal of this project is to advance our understanding of this phenomenon and to develop its application. We are now investigating the non-linear effects on laser beam propagation for laser material processing and the applications of the fine-processing using femto-sesond laser pulses.

KAGRA project

More than six years have already passed since gravitational waves were actually detected. The number of events detected to date reaches 90 and observations of gravitational waves become important to build a new picture of the universe.

In Japan, KAGRA is being constructed in the Kamioka Mine in Gifu Prefecture. KAGRA takes advantage of the quiet underground environment and incorporates cryogenic technology. to improve its sensitivity.

Currently, we are cooperating with LIGO in the U.S. and VIRGO in Europe. KAGRA is being improved to join international joint observation called O4 (scheduled to start in mid-December 2022). Our group is involved in developing the laser source of KAGRA. Now, a new solid-state laser that has higher power and stability is being evaluated for replacing the current laser source.

34 Nose Group

Research Subjects: Formation and function of neural networks

Member: Akinao Nose and Hiroshi Kohsaka

The aim of our laboratory is to elucidate the mechanisms underlying the formation and function of neural networks, by using as a model, the simple nervous system of the fruitfly, *Drosophila*. A part of our recent research activity is summarized below.

1.Identification of pattern-generating neural circuits that regulate intersegmentally coordinated muscular relaxation.

Typical patterned movements in animals are achieved through combinations of contraction and delayed relaxation of groups of muscles. However, how intersegmentally coordinated patterns of muscular relaxation are regulated by the neural circuits remains poorly understood. Here, we identify Canon, a class of higherorder premotor interneurons, that regulates muscular relaxation during backward locomotion of *Drosophila* larvae. Canon neurons are cholinergic interneurons present in each abdominal neuromere and show wave-like activity during fictive backward locomotion. Optogenetic activation of Canon neurons induces relaxation of body wall muscles, whereas inhibition of these neurons disrupts timely muscle relaxation. Canon neurons provide excitatory outputs to inhibitory premotor interneurons. Canon neurons also connect with each other to form an intersegmental circuit and regulate their own wave-like activities. Thus, our results demonstrate how coordinated muscle relaxation can be realized by an intersegmental circuit that regulates its own patterned activity and sequentially terminates motor activities along the anterior-posterior axis.

2. Role of sensory feedback and electrical circuits during the development of nascent motor circuit.

Precocious movements are widely seen in embryos of various animal species. Whether such movements via proprioceptive feedback play instructive roles in motor development or are a mere reflection of activities in immature motor circuits is a long-standing question. Here we image the emerging motor activities in *Drosophila* embryos that lack proprioceptive feedback and show that proprioceptive experience is essential for the development of locomotor central pattern generators (CPGs). Downstream of proprioceptive inputs, we identify a pioneer premotor circuit composed of two pairs of segmental interneurons, whose gap-junctional transmission requires proprioceptive experience and plays a crucial role in CPG formation. The circuit autonomously generates rhythmic plateau potentials via IP3-mediated Ca2+ release from internal stores, which contribute to muscle contractions and hence produce proprioceptive feedback. Our findings

demonstrate the importance of self-generated movements in instructing motor development and identify the cells, circuit, and physiology at the core of this proprioceptive feedback.

References

- Hiramoto A, Jonaitis J, Niki S, Kohsaka H, Fetter RD, Cardona A, Pulver SR, Nose A. Regulation of coordinated muscular relaxation by a pattern-regulating intersegmental circuit. *Nature Communication* 12, 2943 (2021)
- [2] Zeng X, Komanome Y, Kawasaki T, Inada K, Jonaitis J, Pulver SR, Kazama H, Nose A. An electrically coupled pioneer circuit enables motor development via proprioceptive feedback in *Drosophila* embryos. *Current Biology* 31, 5327 (2021)

35 Higuchi Group

Research Subjects: Protein dynamics in vitro, cells and mice

Member:Hideo Higuchi and Motoshi Kaya

Reverse stroke by cardiac myosin [1]

To understand how myosin molecules work together in cardiac myofilaments, we measured the force production of cardiac myofilaments using optical tweezers. The measurements revealed that stepwise force generation was associated with a higher frequency of backward steps at lower loads and higher stall forces than those of fast skeletal myofilaments. To understand these unique collective behaviors of cardiac myosin, the dynamic responses of single cardiac and fast skeletal myosin molecules, interacting with actin filaments, were evaluated under load. The cardiac myosin molecules switched among three distinct conformational positions, ranging from pre– to post–power stroke positions, in 1 mM ADP and 0 to 10 mM phosphate solution. In contrast to cardiac myosin, fast skeletal myosin stayed primarily in the post–power stroke position, suggesting that cardiac myosin executes the reverse stroke more frequently than fast skeletal myosin. To elucidate how the reverse stroke affects the force production of myofilaments and possibly heart function, a simulation model was developed that combines the results from the single-molecule and myofilament experiments. The results of this model suggest that the reversal of the cardiac myosin power stroke may be key to characterizing the force output of cardiac myosin ensembles and possibly to facilitating heart contractions.

Observation of weakened cells by movement of vesicles and GFP diffusion

The cells are weakened and the survival probability is reduced under unfavored environment conditions. State changes such as shrinking are observed in weakened cells., To understand the state change, First, we measured the vesicle movement and diffusion constant of GFP molecule. Those are recoded for long time by automated MATLAB system equipped with shatter, camera control and imaging PC. The automation of the device has made it possible to easily design long-term efficient observation of cell state. By an automated device, we observed changes in the state of weakened cells over time by inhibiting ATP production. As a result, it was found that the diffusion of intracellular vesicles was dramatically reduced in cells in which ATP production was inhibited. When the mean square distance was calculated from the tracking of a single vesicle and the diffusion coefficient was obtained, we found that the diffusion coefficient of GFP was measured by the fluorescence recovery after photobleaching method. The little time change of the diffusion coefficient was observed. From the results, it has been clarified that the intracellular diffusion is reduced in the weakened cells and size dependent.
Entropy production in stochastic thermodynamics based on Wasserstein distance[5]

We study a relationship between optimal transport theory and stochastic thermodynamics for the Fokker-Planck equation. We show that the lower bound on the entropy production is the action measured by the path length of the L2-Wasserstein distance. Because the L2-Wasserstein distance is a geometric measure of optimal transport theory, our result implies a geometric interpretation of the entropy production. Based on this interpretation, we obtain a thermodynamic trade-off relation between transition time and the entropy production. This thermodynamic trade-off relation is regarded as a thermodynamic speed limit which gives a tighter bound of the entropy production. We also discuss stochastic thermodynamics for the subsystem and derive a lower bound on the partial entropy production as a generalization of the second law of information thermodynamics. Our formalism also provides a geometric picture of the optimal protocol to minimize the entropy production. We illustrate these results by the optimal stochastic heat engine and show a geometrical bound of the efficiency.

< References >

- Yongtae Hwang, Takumi Washio, Toshiaki Hisada, Hideo Higuchi, and Motoshi Kaya. A reverse stroke characterizes the force generation of cardiac myofilaments, leading to an understanding of heart function. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 118, e2011659118 (2021).
- Seohyun Lee, Hyuno Kim, Hideo Higuchi, and Masatoshi Ishikawa. Classification of Metastatic Breast Cancer Cell using Deep Learning Approach. IEEE ICAIIC) (2021)
- [3] Keiko Hirose, Hideo Higuchi, Shimaa A Abdellatef, Hisashi Tadakuma, Kangmin Yan, Takashi Fujiwara, Kodai Fukumoto, Yuichi Kondo, Hiroko Takazaki, Rofia Boudria, Takuo Yasunaga. Oscillatory movement of a dynein-microtubule complex crosslinked with DNA origami. biorxiv(2021)
- [4] Seohyun Lee, Hyuno Kim, Hideo Higuchi, and Masatoshi Ishikawa. A Machine Learning Approach to Transport Categorization for Vesicle Tracking Data Analysis. Proc. SPIE 11647,116470W. (2021)
- [5] Muka Nakazato, Sosuke Ito. Geometrical aspects of entropy production in stochastic thermodynamics based on Wasserstein distance. Phys. Rev. Res. 3, 043093 (2021)

36 Okada Group

Research Subjects: Biophysics, cell biology, super-resolution microscopy, live cell imaging and single molecule imaging.

Member: Yasushi Okada, Sawako Enoki and Keigo Ikezaki

Our primary goal is to answer the very basic question "What is life". To answer this question, we are trying to fill the gap between the world of molecules and the world of living cells. Direct measurement of molecules in living cells would serve as a basic technology to fill this gap. Thus, we have been working on the development of the technologies for the visualization and non-invasive measurement of the molecular processes in living cells. High-speed, super-resolution live-cell imaging and single-molecule measurement in living cells are the two main technologies we develop.

By using these technologies, we are trying to understand the regulatory mechanisms of motor proteins during axonal transport. Despite the many studies in the past decades by our group and others, it is still unclear how the biophysical properties of motor proteins are related to their biological functions. For example, a point mutation in kinesin-1 can cause hereditary spastic paraplegia, but it is unclear why this mutation selectively affects neurons in the longest tract in the aged patients.

Through these studies and development, we have realized the importance of the cellular states, and our microscope technologies can also be applied to the measurement of the cellular states. Thus, we have proposed a project for the visualization, prediction and control of cellular states. We are now leading this project, and the project members in our lab are working on the development of the technologies to visualize and control cellular states.

This year, we had progress in development of several microscope technologies. Ikezaki developed a new method for single fluorescent molecule localization. The precision of localization is limited by the number of

the detected photons from the molecule. With the current method, it has been difficult to achive precision better than 10 nm, because the number of photons emitted from a single fluorescent molecule is limited. Ikezaki introduced a structured illumination optics and succeeded to improve the presicion 10x and achieved precision better than 1 nm.

Kuroda has been working on the development of inverted lightsheet microscope for three-dimensional high-resolution live cell imaging.

Inutsuka developed a single-shot quantitative phase imaging method. polarization-based differential phase constast microscopy, for live imaging of unstained cells. He used his microscope for the imaging of growing HeLa cells, and applied machine-learning techniques for automated segmentation, tracking and prediction of cell cycle states.

Several other students collaborated with Ito-lab of universal biology institute (UBI) and got results with the application of information thermodynamics for the analysis of the biological molecular machines. Ihara is trying to apply the theoretical results of information thermodynamics for the estimation of entropy production from the time-series imaging data. Yoshida extended a theoretical model of secondary active transporters that Muneyuki (Chuo Univ) proposed.

37 Furusawa Group

Research Subjects: Theoretical Biophysics, Evolutionary Biology, Complex Systems

Member: Chikara Furusawa and Yusuke Himeoka

Biological systems have both robustness and plasticity, a property that distinguishes them from artificial systems and is essential for their survival. Biological systems exhibit robustness to various perturbations, including noise in gene/protein expressions and unexpected environmental changes. Simultaneously, they are plastic to the surrounding environment, changing their state through processes such as adaptation, evolution and cell differentiation. Although the coexistence of robustness and plasticity can be understood as a dynamic property of complex and interacting networks consisting of a large number of components, the mechanisms responsible for the coexistence are largely unknown.

Our work extracts the universal features of cellular dynamics responsible for robustness and plasticity in biological systems. We describe the systems using a relatively small number of degrees of freedom with the macroscopic state variables. We expect that such a description will provide novel methods for the prediction and control of complex biological systems.

The current research topics in our group are followings:

- 1. Laboratory evolution of bacterial cells to analyze dynamics of phenotype-genotype mappings
- 2. Construction of macroscopic state theory describing adaptation and evolution of biological systems
- 3. Theoretical analysis of evolutionary process under dynamically changing environments
- 4. Metabolic simulation for understanding growth and lag-phase
- 5. Development of a method to characterize animal morphology using machine learning

References

- Elevated Sporulation Efficiency in Fission Yeast Schizosaccharomyces japonicus Strains Isolated from Drosophila. Seike T, Sakata N, Matsuda F, Furusawa C. J Fungi (Basel). 2021 Apr 29;7(5):350.
- [2] Laboratory evolution of Mycobacterium on agar plates for analysis of resistance acquisition and drug sensitivity profiles. Maeda T, Kawada M, Sakata N, Kotani H, Furusawa C. Sci Rep. 2021 Jul 23;11(1):15136.
- [3] Mutational property of newly identified mutagen l-glutamic acid γ-hydrazide in Escherichia coli. Maeda T, Shibai A, Yokoi N, Tarusawa Y, Kawada M, Kotani H, Furusawa C. Mutat Res. 2021 Jul 21;823:111759.
- [4] The sixth transmembrane region of a pheromone G-protein coupled receptor, Map3, is implicated in discrimination of closely related pheromones in Schizosaccharomyces pombe. Seike T, Sakata N, Shimoda C, Niki H, Furusawa C. Genetics. 2021 Dec 10;219(4):iyab150.

- [5] Acceleration of target production in co-culture by enhancing intermediate consumption through adaptive laboratory evolution. Kawai R, Toya Y, Miyoshi K, Murakami M, Niide T, Horinouchi T, Maeda T, Shibai A, Furusawa C, Shimizu H. Biotechnol Bioeng. 2022 Mar;119(3):936-945.
- [6] Decoding gut microbiota by imaging analysis of fecal samples. Furusawa C, Tanabe K, Ishii C, Kagata N, Tomita M, Fukuda S. iScience. 2021 Nov 22;24(12):103481.
- [7] Experimental demonstration of operon formation catalyzed by insertion sequence. Kanai Y, Tsuru S, Furusawa C. Nucleic Acids Res. 2022 Jan 24:gkac004.
- [8] Identification of Bacterial Drug-Resistant Cells by the Convolutional Neural Network in Transmission Electron Microscope Images. Hayashi-Nishino M, Aoki K, Kishimoto A, Takeuchi Y, Fukushima A, Uchida K, Echigo T, Yagi Y, Hirose M, Iwasaki K, Shin'ya E, Washio T, Furusawa C, Nishino K. Front Microbiol. 2022; 13:839718.
- [9] Potential contribution of intrinsic developmental stability toward body plan conservation. Uchida Y, Shigenobu S, Takeda H, Furusawa C, Irie N, BMC Biology, in press.
- [10] Distinct survival, growth lag, and ribosomal RNA degradation kinetics during long-term starvation for carbon or phosphate. Himeoka Y, Gummesson B, S?rensen MA, Svenningsen SL, Mitarai N, mShpere, in press

 \mathbf{III}

2021年度物理学教室全般に関する報告

1 学部講義概要

1.1 2年生 Aセメスター

1.1.1 電磁気学 I: 櫻井 博儀

- 1. 特殊相対性理論
- 1.1 相対性原理
- 1.2 ローレンツ変換
- **1.3** 速度の変換
- 1.4 時空間の幾何学と時空のダイアグラム
- 1.5 固有時間と時間の遅れ
- 1.6 ローレンツ収縮
- 1.7 相対論的エネルギーと運動量
- 1.8 エネルギーと運動量のローレンツ変換と保存則
- 2. 電磁気学と特殊相対論
- 2.1 スカラー・ベクトル・テンソル
- 2.2 4元ベクトル

1.1.2 解析力学:横山 順一

- 0 力学とは何か
- 1 ニュートンの古典力学
- 2 力学のこれまでとこれから
- 3 ベクトルとスカラー
- 4 仮想仕事の原理・ダランベールの原理
- 5 ラグランジアンの導出
- 6 運動を解くということの別の見方
- 7 汎関数と変分法
- 7.1 汎関数
- 7.2 変分法
- 7.3 汎関数微分

- **2.3** 連続の方程式と4元電流
- 2.4 4元ポテンシャルとローレンツゲージ
- 2.5 一定速度で運動する点電荷がつくる電磁場
- 2.6 電磁場テンソルと場のローレンツ変換

3. 電磁場内の電荷の運動

- 3.1 場の中の粒子の運動方程式
- 3.2 一様な静電場中の運動
- 3.3 一様な静磁場中の運動
- 3.4 一様な静電磁場中の運動
- 3.5 電磁場のラグランジアン
- 3.6 エネルギーと運動量の保存則
- 3.7 点電荷の自己エネルギー
- 8 最小作用の原理
 8.1 作用汎関数
 8.2 最小作用の原理
 9 オイラーラグランジュ方程式の共変性
 10 拘束条件の下での運動
 10.1 拘束条件
 10.2 ラグランジュの未定乗数法
 10.3 多数の拘束があるとき
 11 対称性と保存則
 11.1 運動の積分
 11.2 運動量保存則
 11.3 エネルギー保存則

11.4 空間の等方性と角運動量保存則	16.4 運動の積分とポアソン括弧式
11.5 ネーターの定理	16.5 正準変換に対する不変性
12 ハミルトンの正準方程式	17 位相空間とリュービルの定理
13 ルジャンドル変換	18 終点座標の関数としての作用とハミルトンヤコ ビ方程式
14 変分法による正準方程式の導出	18.1 終点座標の関数としての作用
15 正準変換	18.2 ハミルトンヤコビ方程式
16 ポアソンの括弧式	19 電磁場中の荷電粒子の運動
16.1 時間微分とポアソン括弧式	20 断熱不変量
16.2 ポアソン括弧式の諸性質	21 自然法則はなぜ時間二階微分方程式で表されるか
16.3 ヤコビの恒等式	22 大団円 古典力学はなぜ最小作用の原理に従うか
1.1.3 量子力学 I:諸井 健夫	
1. イントロダクション	4.1 自由粒子の波動関数:平面波
1.1 粒子と波	4.2 散乱問題のいくつかの例
1.2 古典描像から量子描像へ	5. 量子力学の体系
2. シュレディンガー方程式	5.1 エルミート演算子と物理量
2.1 シュレディンガー方程式と波動関数	5.2 波動関数の空間
2.2 確率解釈と物理量の期待値	5.3 ディラックの記法と演算子を用いた定式化
2.3 不確定性関係	5.4 正準量子化
3. 1次元の束縛状態	6. 調和振動子
3.1 1次元の箱に閉じ込められた粒子	6.1 調和振動子の量子論的扱い:演算子法
3.2 井戸型ポテンシャル	6.2 調和振動子の量子論的扱い:波動関数
4. 1次元の散乱	6.3 応用:弦の量子化

1. 序論

1.1 現代物理と科学的手法

- 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	Х	線回	折
-----	---	----	---

6. データ解析と可視化

6.1 グラフ作成

1.1.5 物理数学 I: 濱口 幸一

- 1. 複素関数論
- 1.1 この章の目標
- 1.2 準備
- 1.3 複素関数とその微分、正則関数
- 1.4 複素積分
- 1.5 テイラー展開、ローラン展開と留数、留数定理 2.3 一階微分方程式の解法の例
- 1.1.6 物理数学 II: 辻 直人

1. 偏微分方程式	5.1 ポアソン方程式
1.1 導入	5.2 ラプラス方程式
1.2 線形と非線形	5.3 鏡像法
1.3 重ね合わせの原理	6. ベッセル関数
1.4 2 階の線形偏微分方程式の分類	6.1 ベッセルの微分方程式
1.5 境界条件	6.2 級数展開
1.6 波動方程式	6.3 ベッセル関数の諸性質
2. フーリエ級数	6.4 関連する諸関数
2.1 実フーリエ級数	7. 直交多項式
2.2 フーリエ級数の収束	7.1 ルジャンドル多項式
23 複素フーリエ級数	7.2 古典直交多項式
ウイ ベクトルの問としての目古	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
3.1 周期 L の周期 関数	8.1 ガウスの超幾何関数
3.2 非周期関数のフーリエ変換	8.2 リーマンスキーム
3.3 デルタ関数	8.3 積分表示
4. 熱伝導方程式	8.4 合流型超幾何関数
4.1 初期值問題	9. スツルム・リウビル理論
4.2 初期境界值問題	9.1 スツルム・リウビル型微分方程式
4.3 熱の発生がある場合	9.2 自己随伴演算子
5. グリーン関数	9.3 固有値、固有関数の性質

- 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
- 1.6 一致の定理と解析接続
- 1.7 発展的話題
- 2. 常微分方程式
- 2.1 定義と分類
- 2.2 線形微分方程式

- 9.4 量子力学との関係
- 10. 球面調和関数と回転群
- 10.1 球面調和関数

- 10.2 回転操作
- 10.3 無限小回転
- 10.4 球面調和関数との関係
- 1.1.7 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
- 直接翻訳はするな、和文和訳せよ、物主構文; 句 読点の使い方; Science and Technology
- 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; Questions about the Universe
- パラグラフ・リーディング; 関係代名詞の制限用 法・非制限用法; The Surprising Science of Our Sun
- 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; Tail of Comet
- 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; Fuel Cells
- わかってもらえる英語は「英語の発想で書く」 (Leggett's Trees)、英語活用メモを作り、英借 文する;名詞; Hydrogen for Cars

1.2 3年生 Sセメスター

1.2.1 電磁気学 II:島野 亮

- 1. 電磁場の基本法則
- 1.1 真空中の Maxwell 方程式
- 1.2 微視場と巨視場
- 1.3 分極と磁化
- 1.4 連続媒体 (物質) 中の Maxwell 方程式
- 1.5 電磁場とポテンシャル
- 1.6 電磁場のエネルギー
- 1.7 電磁場の運動量
- 1.8 境界面での境界条件
- 2. 静電場
- 2.1 静電場の方程式
- 2.2 境界値問題とグリーン関数の方法

- 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;Hurricanes and Global Warming
- **9.** 辞書の使い方、参考文献; 短い簡潔な文を書く; Global Warming
- 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; What Computers Can Do
- **11.** 通じる英語のしゃべり方 2;連結語を使う; Micro-Nano Technology
- **12.** 通じる英語のしゃべり方 3;不必要な単語は省 く; Nanoscience's Benefits and Risks
- **13.** 英語口頭発表での注意点; 日本人に多い間違い を直す; Fermat's Last Theorem
- **14.** 元素記号・化学用語発音の仕方:実験ノート(研 究ノート)の書き方; Scientific Fraud

- 2.3 極座標における境界値問題
- 2.4 静電ポテンシャルの多重極展開
- 2.5 誘電体
- 2.6 静電エネルギー
- 2.7 電気容量
- 3. 静磁場と定常電流
- 3.1 静磁場の方程式とアンペールの法則
- 3.2 磁性体の境界値問題
- 3.3 回路のインダクタンス
- **3.4** 準定常電流
- 4. 電磁波
- 4.1 真空中と物質中の電磁波
- 4.2 波動方程式のグリーン関数

4.3 電磁波の伝播 4.6 導波路 **4.4** 電磁波の性質 4.5 誘電関数の模型と性質 4.7 幾何光学

1.2.2 量子力学 II: 福嶋 健二

- 0. 量子力学 I の復習
- 1. 対称性・ユニタリー変換・保存則
- 2. 角運動量代数・スピン
- 3. 角運動量の合成
- 4. 磁場中のスピンの運動・Berry 位相
- 5.3 次元球対称ポテンシャル中の量子力学
- 6. 球面調和関数の性質
- 7. 水素原子
- 8. 時間に依存しない摂動
- 9. 縮退のある場合の Brillouin-Wigner 摂動論
- 10. 摂動計算の例 (Stark 効果・正常および異常 Zeeman 効果)

- 11. 摂動展開の破綻と Borel 再和
- 12. 時間に依存する摂動
- 13. 断熱定理
- 14. Ritz の変分原理
- 15. WKB 近似と Euclid 時空での量子トンネル
- 16. WKB 近似の応用: 摂動展開の漸近形と破綻
- 17. Wigner 関数
- 18. 経路積分法による量子化
- 19. 経路積分法による調和振動子の解法
- 20. ダイヤグラムによる摂動展開
- 1.2.3 現代実験物理学 I: 樋口 秀男, 酒井 明人
- 1. X線による試料の同定 X線の発生、構造解析、元素分析
- 2. 極限環境技術 真空、低温、磁場
- 3. 低温測定技術 比熱、磁化、電気抵抗、ホール効果、熱膨張
- 4. 電子構造及び磁気構造の決定手法

1.2.4 計算機実験I:藤堂 眞治

- 1. 実習環境整備
- 2. 計算機実験の基礎
- 2.1 数值誤差
- 2.2 ニュートン法
- 2.3 二分法
- 2.4 囲い込み法
- 2.5 行列演算
- 2.6 疑似乱数

光電子分光、量子振動、中性子散乱、核磁気共 鳴、ミューオンスピン回転

- 5. レーザー物理学 レーザー光学、画像処理、光学顕微鏡
- 6. 非平衡系物理学 ブラウン運動、生物の運動、生体分子の X 線 構造解析
- 2.7 複素数
- **2.8** ライブラリの利用

3. 常微分方程式

- 3.1 常微分方程式の初期値問題
- 3.2 Numerov法
- 3.3 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 連立一次方程式の直接解法

4.3 連立一次方程式の反復解法	5.4 逆反復法
5. 行列の対角化	5.5 変分法
5.1 固有值問題	
5.2 密行列の対角化	5.6 特異値分解・一般化逆行列
5.3 疎行列に対する反復法	5.7 最小二乗法による回帰分析

1.2.5 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	4.3 アルゴリズムの実装と実習
1.1 量子計算の流れ	5. グローバーのアルゴリズム
1.2 量子計算の概念	5.1 非構造化データの探索
1.3 プログラミングと実習環境	5.2 グローバー探索の量子回路
2. 量子回路を書く	5.3 アルゴリズムの実装と実習
2.1 CHSH 不等式の検証	6. 変分法と変分量子固有値ソルバー
2.2 量子回路シミュレータ	61 量子力学における変分法
2.3 回路の実装と実習	
3. 量子コンピュータでの並列計算	
3.1 さまざまな量子状態を作る	6.3 変力重于凹路を使った美音
3.2 量子フーリエ変換	7. 量子・古典ハイフリッド機械字習
3.3 量子ダイナミクスシミュレーション	7.1 機械学習とニューラルネットワーク
4. ショアのアルゴリズム	7.2 変分量子回路を使った機械学習
4.1 量子位相推定	7.3 素粒子現象の探索への応用
4.2 位数を発見する量子回路	7.4 アルゴリズムの実装と実習
1.2.6 統計力学 I: 竹内 一将	

1. 統計力学とは何か? 3.1 量子力学の復習・確率的な系との対応 1.1 ミクロとマクロ 3.2 状態数 4. 平衡統計力学の基礎 1.2 統計力学の分類 **1.3** 熱力学の復習 4.1 平衡状態とは? 1.4 統計力学の基本精神 4.2 等重率の原理とミクロカノニカル分布 2. 準備1:確率論 4.3 古典系のミクロカノニカル分布 2.1 基本事項 4.4 平衡状態への緩和 2.2 独立な部分からなる系 4.5 カノニカル分布(導入) 2.3 ゆらぎと大数の法則 4.6 カノニカル分布の性質 2.4 連続変数の場合 5. カノニカル分布の応用 3. 準備2:量子論 5.1 理想気体

5.2	相互作用する気体(古典系)
5.3	調和振動子
5.4	常磁性とスピン系
6. 結	晶の比熱
6.1	古典論
6.2	Einstein モデル
6.3	Debye モデル
7. 黒	体放射(輻射)
7.1	熱放射の普遍性
7.2	空洞放射
8. ク	「ランドカノニカル分布

1.2.7 流体力学: 吉田 直紀

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

- 8.1 導入
- 8.2 性質
- 8.3 応用1:理想気体(高温)
- 8.4 応用2:表面吸着
- 9. 量子理想気体
- 9.1 多粒子系の量子力学
- 9.2 量子理想気体の平衡状態
- 9.3 状態密度
- 9.4 理想 Fermi 気体
- 9.5 理想 Bose 気体
- 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

1.3 3年生 Aセメスター

|--|

- 1. イントロダクション
- 2. 真空中の光の性質
- 3. 等方媒質中の光の伝搬
- 4. 結晶光学
- 5. 回折
- 6. 干涉

- 7. 幾何光学
- 8. レーザー
- 9. ビーム光学
- 10. 光共振器
- 11. 光計測:分光、イメージングなど

1.3.2 量子力学 III:常行 真司

1. 電磁場中の荷電粒子	3. 多体系の量子力学的扱い
1.1 電磁場中の古典荷電粒子	3.1 ヘリウム原子
1.2 電磁場中の荷電粒子の量子力学	3.2 多電子原子
1.3 一様な磁場中の荷電粒子	3.3 スピン軌道相互作用と微細構造
1.4 Aharonov-Bohm 効果	3.4 ボルン-オッペンハイマー近似(断熱近似)
1.5 スピンを持つ粒子と磁場の相互作用	3.5 水素分子
2. 散乱問題	3.6 ハートリー・フォック近似
2.1 2 粒子の散乱	4. 第二量子化
2.2 散乱断面積	4.1 数表示
2.3 散乱断面積の計算	4.2 フェルミオン系
2.4 散乱状態の波動関数が満たす積分方程式	4.3 ボソン系
2.5 Born 近似	4.4 場の演算子
2.6 部分波と位相のずれ	4.5 第二量子化におけるハートリー・フォック近似
2.7 共鳴散乱	5. 相対論的量子力学
2.8 同種粒子の散乱	5.1 Klein-Gordon 方程式
2.9 Lippmann-Schwinger 方程式(散乱理論の形式	5.2 Dirac 方程式
論)	5.3 Weyl 方程式
2.10 固体中の電子散乱と擬ポテンシャル	5.4 Dirac 方程式の解

1.3.3 現代実験物理学 II:日下 暁人,山本 智

- 1. 実験物理学のための統計・解析手法 確率分布と誤差の伝播 推定量、Fisher 情報量と Cramér-Rao の限界 最尤法 区間推定 時系列データとフーリエ解析
- 2. 宇宙観測における物理量の求め方 距離、質量、温度の導出方法
- 3. 望遠鏡とその仕組み 解像度を決める要因 光・赤外線望遠鏡の仕組み 電波望遠鏡の仕組み 干渉計と開口合成
- 4. 粒子加速器 加速器の歴史 加速器の性能と限界 衝突点検出器
- 5. 粒子・放射線検出器 粒子と物質の相互作用

様々な検出器 エネルギー、速度の測定方法

- 超伝導検出器 超伝導転移端センサー SQUIDs 量子センサーと量子非破壊測定
- 7. 光検出器 光・赤外線検出器 フォトダイオード、CCD センサー、CMOS センサー 線赤外線検出器 電波検出器 ヘテロダイン検出の理論 SIS ミクサ、HEB ミクサ
 8. 水素原子を巡って 水素様原子の X 線スペクトルとその天体観測
 - 水素様原子のX線スペクトルとその天体観測 水素原子の超微細構造遷移とその天体観測 水素原子のエネルギー準位と QED 反水素原子の実験室実験 陽子サイズの話題

1.3.4 生物物理学:岡田康志、能瀬聡直

- 1. 生物物理学とは
- **2.** 遺伝と進化
- 3. 発生
- 4. 生体高分子の構造
- 5. 生体高分子の機能
- 6. 生物物理学研究の実例:分子モーターの話
- 7. 神経科学概論

1.3.5 物理数学 III: 桂 法称

- 1. 群と対称操作
- **1.1** 群の定義と例
- 1.2 点群と結晶点群
- 2. 群論の基本概念
- 2.1 部分群
- 2.2 共役類
- 2.3 不変部分群
- 2.4 因子群
- 2.5 準同型と同型
- 3. 有限群の表現
- 3.1 表現とは?
- 3.2 既約表現
- 3.3 指標
- 3.4 表現論の量子力学への応用

1.3.6 固体物理学 I: 岡本 徹

- 1. 自由電子フェルミ気体(復習)
- 1.1 電子密度とフェルミエネルギー
- 1.2 状態密度
- 2. 1次元周期ポテンシャル中の電子
- 2.1 ポテンシャルが小さい場合の近似
- 2.2 ブロッホの定理
- 2.3 エネルギーと波数の関係の表示形式
- 2.4 1本のバンド中の状態数

- 8. 神経細胞膜の電気的性質 (1) 平衡電位と静止電位
- 9. 神経細胞膜の電気的性質 (2) 活動電位と H-H 方程式
- 10. 神経ネットワークによる情報処理
- 11. 脳の可塑性と記憶
- 12. 遺伝子組換え技術、神経イメージング、光によ る神経活動操作
- 対称群
 1 対称群と交代群
 1 対称群の共役類と既約表現
 リー群
 リー群
 リー群とは?
 ア列間の距離
 コンパクト線形リー群
 コンパクト線形リー群
 リー群からリー代数へ
 リー代数
 リー代数の定義と具体例
 リー代数の表現
 半単純リー代数
 ルートとウェイト
 SU(n) Hubbard 模型
- **2.5** 金属と絶縁体
- 2.6 クローニッヒ・ペニーのモデル
- 3. 結晶構造
- 3.1 空間格子と単位胞
- 3.2 空間格子の分類
- 3.3 代表的な結晶構造
- 3.4 結晶中の方位や面の表記法
- 3.5 結晶の成り立ち

4. 逆格子	7. 電子の運動
4.1 逆格子とは	7.1 電子の速度
4.2 回折による結晶構造解析	7.2 運動方程式
5. 結晶中の電子状態	7.3 有効質量
5.1 ブロッホの定理とブリルアン・ゾーン	7.4 磁場中の運動
5.2 ポテンシャルが小さい場合	8. 金属中の伝導電子
5.3 束縛が強い場合の近似	8.1 比熱
5.4 グラフェンの電子状態	8.2 交流電場と伝導電子
5.5 カーボンナノチューブの電子状態	8.3 電気伝導と散乱機構
6. 格子振動	8.4 ボルツマン方程式と輸送現象
6.1 格子振動とは	9. 半導体
6.2 同種原子の1次元格子モデル	9.1 電子と正孔
6.3 2種類の原子からなる1次元格子モデル	9.2 不純物ドーピング
6.4 3次元格子の振動	9.3 p-n 接合
6.5 フォノンと量子数の熱平均値	9.4 電界効果トランジスタ
6.6 格子比熱と Debye の近似	9.5 ヘテロ接合

1.3.7 電磁気学 III:浅井 祥仁

- 1. 電磁波の基礎
- 1.1 自由電磁場とその性質
- 2. 電磁波の放射
- 2.1 遅延ポテンシャルと先進ポテンシャル
- 2.2 遅延ポテンシャルの多重極展開
- 3. 荷電粒子の出す電磁波
- 3.1 リエナール-ヴィーヒェルトのポテンシャル
- 3.2 運動する荷電粒子の作る電磁波
- 3.3 制動放射

1.3.8 統計力学 II: 小形 正男

- 1. 相転移
- 1.1 秩序パラメータと対称性の破れ
- 1.2 二次相転移
- 1.3 平均場近似
- 1.4 Landau 理論
- 1.5 相転移における臨界指数と空間次元

- 3.4 点電荷による電磁波の散乱
 3.5 チェレンコフ放射
 4. 電磁波の伝播
 4.1 導波管
 4.2 空洞共振器
 4.3 電磁波の回折
 5. 電磁場の角運動量
- 6. 電磁波と重力波
- 1.6 スケーリング理論とくりこみ群のアイデア
 2. 線形応答理論
 2.1 時間に依存しないときの線形応答
 2.2 時間に依存するときの線形応答
 2.3 具体例:帯磁率、電気伝導度
 2.4 輸送現象

1.3.9 計算機実験 II:藤堂 眞治

1. マルコフ連鎖モンテカルロ	3.5 量子コンピュータ
1.1 乱択アルゴリズム	3.6 疎行列ベクトル積
1.2 物理過程のシミュレーション	4. 少数多体系・分子動力学
1.3 疑似乱数・ヒストグラム	4.1 常微分方程式の初期値問題
1.4 モンテカルロ積分	4.2 ベルレ法
1.5 多体系の統計力学	4.3 シンプレクティック積分法の一般論
1.6 数え上げ	4.4 分子動力学法
1.7 マルコフ連鎖モンテカルロ	4.5 長距離ポテンシャルの計算
2. 偏微分方程式	4.6 ビリアル定理
2.1 偏微分方程式の境界値問題	4.7 温度の制御
2.2 偏微分方程式の初期値問題	5. 最適化問題
2.3 有限差分法	5.1 最適化問題
2.4 クランク・ニコルソン法	5.2 最急降下法と勾配降下法
3. 多体系の量子力学	5.3 共役勾配法
3.1 偏微分方程式の初期値問題	5.4 勾配の計算
3.2 対角化による解法	5.5 Nelder-Mead の滑降シンプレックス法
3.3 横磁場イジング模型	5.6 量子アニーリングとシミュレーテッドアニーリ ング
3.4 多体量子系の時間発展	5.7 最適化手法の比較

1.4 4年生 Sセメスター

- 1.4.1 機械学習概論: 樺島 祥介
- 1. 導入
- 2. 数理基礎 (1)
- 3. 数理基礎 (2)
- 4. 回帰と分類(1)
- 5. 回帰と分類 (2)
- 6. ガウス過程 (1)
- 7. ガウス過程 (2)

1.4.2 場の量子論 I: 松尾 泰

1. 準備

- 8. プログラミング相談会
- 9. 多層ニューラルネット (1)
- 10. 多層ニューラルネット (2)
- 11. 主成分分析と因子分析
- 12. クラスタ分析
- 13. 敵対的生成ネットワーク
- 14. アンサンブル学習
- 1.1 自然単位系

- 1.2 ローレンツ変換
 1.3 相対論的古典力学
 1.4 第二量子化
 2. 相対論的場の方程式
 2.1 Klein-Gordon 方程式
 2.2 Dirac 方程式
 2.3 場のローレンツ変換
 3. 対称性と保存則
 3.1 Euler-Lagrange 方程式
 3.2 ネーターの定理
 3.3 例
 4. 場の正準量子化
- 1.4.3 サブアトミック物理学:横山 将志
- 1. イントロダクション
- 2. サブアトミックな世界の歩き方
- 3. サブアトミックな世界の探り方
- 4. 反粒子
- 5. 量子電磁力学 (QED)
- 6. 弱い相互作用

1.4.4 計算科学概論: 大久保 毅 ほか6名

- 1. 高性能計算機のアーキテクチャ
- 2. スーパーコンピュータと並列プログラミング
- 3. 大規模疎行列固有値問題と量子多体問題
- 4. 大規模疎行列ソルバー入門

1.4.5 統計力学特論: 押川 正毅

- 1. Phase transitions and spontaneous symmetry breaking
- 2. Landau-Ginzburg model and scalar field theory
- 3. Scaling and concept of renormalization group
- 4. Perturbative renormalization group equa-

- 4.1 スカラー場
- 4.2 Causality と Feynman 伝搬関数
- 4.3 Dirac 場
- 4.4 電磁場
- 5. 相互作用と摂動展開
- 5.1 相互作用描像と Dyson 展開
- 5.2 S 行列、Feyman 則, Wick の定理
- 5.3 崩壊率と散乱断面積
- 6. 量子補正概論
- 6.1 ループ振幅
- 6.2 くりこみ理論
- 7. 加速器
- 8. ストレンジネスと CP 非保存
- 9. ニュートリノ
- 10. 原子核とハドロン
- 11. 電弱統一理論
- 5. 高性能プログラミングと性能測定
- 6.1 連続体の並列有限要素法解析入門
- 6.2 構造解析アプリケーションによる CAE 実践
- 7. 格子スピン模型の計算科学

tion and epsilon expansion

- 5. Large-N expansion
- 6. Lower critical dimensions and Mermin-Wagner theorem
- 7. Classical and quantum critical phenomena

1.4.6 現代物理学入門: Haozhao Liang, 酒井 明人

- 1. Frontiers of nuclear many-body theories
- 2. Nuclear density functional theory (DFT)
- 3. Discussion on nuclear DFT
- 4. Towards ab initio nuclear DFT
- 5. Path-integral formalism
- 6. Functional renormalization group (FRG)
- 7. FRG and DFT

1.4.7 一般相対論: 須藤 靖

- 1.4次元時空とシュワルツシルト計量
- 1.1 線素と計量
- 1.2 シュワルツシルト時空の性質
- 2. 一般相対性原理とその数学的表現
- 2.1 特殊相対論の限界: 慣性系とは? 重力は "力"か?
- 2.2 一般相対論の概念構成
- 2.3 物理量の表現: ベクトル
- 2.4 物理量の表現: 双対ベクトル
- 2.5 物理量の表現: テンソル
- 2.6 まとめ: 物理量とテンソル
- 3. 測地線の方程式
- 3.1 重力場のもとでの粒子の運動方程式
- 3.2 ニュートン理論との対応
- 4. 重力場の方程式
- 4.1 マッハの原理と重力場の方程式
- 4.2 エネルギー運動量テンソル
- 4.3 アインシュタイン方程式への道
- 4.4 ニュートン理論との対応
- 4.5 宇宙定数

1.4.8 系外惑星: 須藤 靖, 相川 祐理

- 1. 惑星と恒星
- 1.1 太陽系から銀河宇宙へ

- 8. ベリー位相
- 9. 局面上の平行移動
- 10. ベリー位相と量子物性
- 11. 量子ホール系
- 12. トポロジカル絶縁体
- 13. ワイル半金属
- 4.6 変分原理による定式化
- 5. シュワルツシルト時空とブラックホール
- 5.1 球対称重力場の計量
- 5.2 シュワルツシルト解導出の概略
- 5.3 シュワルツシルト半径と事象の地平線
- 5.4 シュワルツシルトブラックホールのまわりの質 点の運動
- 5.5 一般相対論の古典的検証
- 5.6 水星の近日点移動の計算
- 5.7 光線の曲がり角の計算
- 5.8 ブラックホール天文学
- 6. 重力波
- 6.1 アインシュタイン方程式の弱場近似と重力波
- 6.2 重力波の平面波解
- 6.3 重力波の四重極近似解
- 6.4 重力波によるエネルギー損失率
- 6.5 連星系からの重力波
- 6.6 調和振動子からの重力波
- 6.7 重力波の直接検出
- 1.2 宇宙観の広がりと太陽系外惑星
- 1.3 太陽系天体の典型的スケール

1.4 惑星の明るさ	5.4 ハビタブル惑星の存在率
1.5 天体の光度と等級	5.5 多重惑星系
1.6 主系列星のスペクトル型とハビタブルゾーン	5.6 自転公転角
2. 物理法則と天体	6. 原始太陽系形成と林モデル
2.1 天体形成史	6.1 惑星形成の概略: コア集積モデル
2.2 宇宙の階層構造	6.2 最小質量太陽系モデル – 林モデル –
2.3 物理法則と初期条件	7. 原始惑星系円盤
2.4 ガス惑星の質量	7.1 輻射輸送の基礎事項
2.5 恒星の質量	7.2 円盤の組成と質量分布
9 交从武良癸日山	7.3 円盤の温度分布
	7.4 質量降着円盤
3.1 杀外恐星充見削史	8. 微惑星仮説
3.2 太陽糸外惑星発見の歴史	8.1 ダスト粒子の opacity
3.3 ケブラー探査機と糸外惑星探査の進展	8.2 ダストの沈殿と合体成長
4. 系外惑星検出法	8.3 Radial Drift
4.1 系外惑星の直接検出	8.4 微惑星形成
4.2 ケプラー問題と軌道要素	8.5 微惑星集積
4.3 系外惑星の間接検出	8.6 ガス惑星形成
5. 系外惑星系の統計	9. 円盤観測と惑星系形成理論
5.1 惑星パラメータの分布	9.1 リング-空隙構造
5.2 惑星パラメータ間の相関	9.2 ガス散逸過程
5.3 惑星の存在率	9.3 円盤質量分布と惑星系の多様性

1.4.9 量子光学: 酒井 広文

- 原子と放射の相互作用
 1.1 時間に依存する Schrödinger 方程式
 1.2 相互作用ハミルトニアン
 1.3 遷移速度
- **1.4** B 係数の表式
- 1.5 光学 Bloch 方程式
- 1.6 Rabi 振動
- 1.7 放射広がり
- 1.8 飽和広がり
- 1.9 放射減衰を伴う Rabi 振動

- 1.10 衝突広がり
 1.11 Doppler 広がり
 1.12 合成吸収線の形状
 2. 電磁場の量子化
 2.1 古典電磁場のポテンシャル論
 2.2 Coulomb ゲージ
 2.3 自由古典場
 2.4 量子力学的調和振動子
 2.5 場の量子化
 2.6 場の交換の性質
- 2.7 零点エネルギー

2.8 モード位相演算子
2.9 単一モード個数状態の物理的性質
2.10 コヒーレント光子状態
2.11 単一モードコヒーレント状態の物理的性質
3. 量子化した場と原子との相互作用
3.1 原子の多極モーメント
3.2 多極相互作用ハミルトニアン
3.3 電気双極子近似
3.4 原子ハミルトニアンの第2量子化
3.5 光子の吸収速度と放出速度
4. レーザーの基礎

1.4.10 固体物理学 II:中辻 知

- 1. 強束縛近似とバンド構造
- **1.1** Bloch の定理
- 1.2 強く束縛された電子の近似
- 1.3 グラフェンと Dirac 方程式
- 2. 幾何学と Berry 位相
- 2.1 曲面の曲率と平行移動
- 2.2 量子系への拡張
- 3. 固体中の Berry 位相と電子運動
- **3.1** 磁場中の電子の運動と Aharonov-Bhom 効果
- 3.2 異常速度と異常ホール効果
- **3.3** 二準位系
- 3.4 量子ホール効果

1.4.11 プラズマ物理学: 江尻 晶

- 1. 様々なプラズマ
- 1.1 様々なプラズマ
- 1.2 プラズマを特徴づける量
- 1.3 サハの熱電離平衡
- 1.4 衝突時間
- 1.5 電気抵抗
- 1.6 プラズマ中のスケール
- 1.7 デバイ遮蔽

- 4.1 光共振器のモード
- 4.2 光共振器の安定性
- 4.3 発振条件
- 4.4 波動方程式に基づくレーザー理論
- 4.5 各種のレーザー
- 4.5.1 3準位レーザーと4準位レーザー
- 4.5.2 固体レーザー
- 4.5.3 気体レーザー
- 4.5.4 色素レーザー
- 4.5.5 半導体レーザー
- **3.5** Weyl 半金属
- 4. Mott 絶縁体と Hubbard 模型
- 4.1 Mott 転移
- 4.2 Hubbard Model
- 4.3 超交換相互作用
- 4.4 遷移金属反強磁性体
- 5. 超伝導
- 5.1 超伝導現象
- 5.2 第一種超伝導体と第二種超伝導体
- 5.3 電子と格子振動の相互作用
- 5.4 Cooper pair
- 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 **6.2** 不安定性の例 6.3 交換不安定性の成長率の導出 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 6.4 トマカクにおける良い曲率、悪い曲率 4.1 電磁流体方程式 7. プラズマ中の波 **4.2** MHD 方程式のまとめ 7.1 波動の分類と取り扱い方 4.3 抵抗の役割と磁力線の凍結 7.2 電磁場中の粒子の運動 4.4 MHD 発電, MHD 加速 7.3 誘電率と誘電テンソル 4.5 磁気再結合 **7.4** 屈折率と分散式 5. 平衡と安定性 7.5 分散式の解と様々な波 5.1 プラズマの圧力と磁場の圧力 8. 波と粒子の相互作用 5.2 円柱プラズマの平衡 8.1 ランダウ減衰 5.3 トーラスプラズマの平衡 8.2 トランジットタイム減衰 6. 不安定性 8.3 サイクロトロン減衰 6.1 不安定性の分類 9. プラズマ物理と核融合

1.4.12 宇宙物理学:馬場彩

- 1. 万有引力の法則から見る宇宙と天体
- 2. 電磁波の法則から見る宇宙と天体
- 3. 星の基礎物理
- 4. 星の進化と終末
- 5. 縮退星(白色矮性と中性子星)とブラックホール 9. 宇宙観測の今
- 1.4.13 生物物理学特論 I: 古澤 力, 岡田 真人, 伊藤 創祐
- 1. 錯視図形と三次元視覚世界の再構成
- 2. Marr の三つのレベル
- 3. 運動知覚のダイナミクス
- 4. パターン認識のダイナミクス
- 5. リガンド-受容体の結合に関する統計力学
- 6. 生化学反応のキネティクス

1.4.14 化学物理学: 高木 英典

1. 原子(イオン)の電子状態

- 6. 膨張宇宙の性質
- 7. 初期の宇宙
- 8. 宇宙の超高エネルギー現象
- 7. ブラウン運動と分子モーター
- 8. バクテリアの情報処理
- 9. 生命の起源に関する理論と実験
- 10. 生態系の安定性に関する理論と実験
- 11. 進化プロセスに関する理論と実験
- 12. 免疫システムに関する理論と実験
 - 1.1 水素原子の1電子波動関数

- 1.2 多電子原子(イオン)の電子状態と周期表 1.7 配位子場とイオンの電子状態
- 1.3 電子間相互作用と多重項
- 1.4 孤立イオンの磁性
- 1.5 Hartree -Fock 近似
- 1.6 群論
- 4年生 A セメスター 1.5
- 素粒子物理学:田中純一,大谷航 1.5.1
- 1. Introduction
- 2. Basic Concepts
- 3. Experimental Tools
- 4. Decay and Cross Sections
- 5. Dirac Equation
- 6. Quantum Electrodyamics (QED)

場の量子論 II: Simeon Hellerman 1.5.2

- 1. Path integral formulation of quantum mechanics
- **1.1** Bosonic system
- 1.2 Two-state system
- 2. What is quantum field theory for?

3. S-matrix etc., and how to compute them

- 3.1 S-matrix, decay rate, and cross section
- 3.2 LSZ reduction formula
- 3.3 Time-ordered correlation function and Feynman rule
- 3.4 Other quantities of interest in QFT
- 4. Scattering processes at the leading order
- 4.1 Vector field propagator
- 4.2 e^+ + e^- to mu^+ + mu^- cross section
- **4.3** Crossing symmetry and elastic scattering
- 4.4 Compton/Thomson scattering
- 5. Introduction to 1-loop computation
- 6. Bound states

- 6.1 Bethe-Salpeter equation
- 6.2 Hydrogen atom spectroscopy in QED
- 6.3 Bethe-Salpeter wavefunction in a QFT process
- 7. Unitarity
- 7.1 Partial wave unitarity
- 7.2 Optical theorem
- 8. Low-energy effective field theory
- 9. Path integral formulation in quantum field theory
- **9.1** Repeating the derivation
- 9.2 Partition function, free-energy, effective potential (formal)
- 9.3 Background field method
- 9.4 Imaginary time formalism (thermal field theory)
- 9.5 Real time formalism (Schwinger Keldysh formalism)

- 8. Electroweak Theory
- 9. Quark Model and QCD
- 10. Quark Mixing and CP Violation
- 11. Forefront of Particle Physics
- 7. Weak Interactions

2. 分子の電子状態

2.1 水素分子

2.2 分子軌道

2.3 分子振動

1.5.3 原子核物理学:今井伸明

1. Introduction of nuclear physics

- **1.1** General properties of nucleus
- **1.2** Units
- **1.3** Discoveries of radioactive isotope/proton/neutron

2. Nuclear force

- 2.1 Binding energy
- 2.2 Size of a nucleus
- 2.3 Wavefunction of deuteron

3. Bulk Properties of Nuclei

- **3.1** Scattering theory
- **3.2** Phase shift and nuclear potential
- 3.3 Equation of state of the nuclear matter
- ${\bf 3.4}$ Alpha decay

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

1.5.5 電子回路論:安東 正樹

1. 電磁場と電気回路

4. Microscopic Models of Nuclear Structure

- 4.1 Hartree-Fock single particle Hamiltonian
- 4.2 Deformed single particle state
- 4.3 Spherical Shell model

5. Nuclear reaction

- 5.1 Compound nuclear reaction
- 5.2 Direct reaction
- 5.3 Optical model
- 6. Recent Topics
- 6.1 Nuclear astrophysics
- 6.2 Super heavy element
- **6.3** Memorial of Prof. A. Arima, Interaction Boson model

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

2. 線形システムと回路網	6. 雑音と信号
3. 伝達関数と過渡応答	7. 離散信号とデジタル信号
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	8. ディジタル回路とディジタル信号処理
1.5.6 固体物理学 III: 林 将光	
1. 量子ホール効果	2.4 端状態
1.1 ホール効果	2.5 量子スピンホール効果
1.2 半導体ヘテロ構造	2.6 Z2 指数
1.3 ランダウ準位	2.7 ランダウアー・ブティカ公式と端伝導
1.4 確率流密度	3. 磁性とスピン流
1.5 整数量子ホール効果	3.1 交換相互作用
1.6 グラフェン	32 強結合チデル
1.7 相対論的量子ホール効果	
1.8 ボーア・ゾンマーフェルト量子条件	3.3 // - トモナル
1.9 ベリー位相	3.4 ストーナー条件
2. トポロジカル絶縁体	3.5 スピンフィルタリング効果
2.1 TKNN 公式	3.6 スピンゲージ場
2.2 空間・時間反転対称性	4. 超伝導
2.3 量子異常ホール効果	4.1 クーパー対

1.5.7 非平衡科学:伊藤 創祐

- **1. 序論** 非平衡とは、確率のダイナミクス、定常状態と 平衡状態
- 2. 確率過程 Markov 連鎖、Chapman-Kolmogorov 方程 式、マスター方程式、Fokker-Planck 方程式、 Onsager-Machlup 関数、Langevin 方程式
- 3. ゆらぎの熱力学 流れと力、熱力学第二法則、非平衡定常状態で の熱力学と Kirchhoff の法則、線形不可逆熱力 学と Onsager 相反関係、Fokker-Planck 方程式 における熱力学第二法則、

1.5.8 普遍性生物学:古澤力,金子邦彦

- 1. 生命システムのマクロ状態理論の可能性
- 1.1 基本的性質: 多様性、活動性、ロバストネス、 可塑性

- f報量とゆらぎの熱力学 Shannon エントロピーと微分エントロピー、 Kullback-Leibler ダイバージェンス、Fisher 情 報行列、情報理論における不等式、エントロピー 生成と Kullback-Leibler ダイバージェンス、揺 らぎの定理、詳細釣り合い条件におけるエント ロピー生成率と Kullback-Leibler ダイバージェ ンス、熱力学第二法則と平衡状態の安定性
- 5. 力学系と安定性 確率過程とパラメータの力学系、レート方程 式、化学熱力学と平衡状態の安定性、非線形性 と不安定な固定点、非線形性と分岐
- 1.2 階層整合性: 定常成長系の普遍法則
- 2. 化学反応から複製細胞へ 生命における「非平衡性」、少数性制御、区画

化、成長のマクロ法則と相(付録:人工複製系 構築実験について)

- 細胞の適応
 揺らぐ成長系の帰結、ノイズによる環境依存ア
 トラクター選択
- 4. 細胞ホメオスタシスと適応 触媒量制御、多自由度適応系
- 5. 細胞の記憶: 動的記憶とガラス
- 6. 細胞分化と発生過程の不可逆性 マクロ現象論、分化多能性の表現、相互作用に よる内部状態の分岐、分化能の喪失とリプログ

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

1.5.10 物理学のための科学英語特論:小野義正

1. 英語論文作成の概要 1 科学・技術英語論文の概要、科学・技術英語と は、論文査読報告(英文が悪い):理由と対策、 分かってもらえる英語論文は「英語の発想」で (Leggett's Trees) 日本人英語が通じない理由 と対策(脱日本的発想)、英語論文執筆の鉄則、 直接翻訳はするな⇒「和文和訳」して、簡潔な 物主構文へ ラミング

- 7. 表現型の進化 (I) 進化揺動応答関係、ノイズによる分散と遺伝分 散の関係、安定性の進化
- 8. 表現型の進化 (II) 適応進化におけるルシャトリエ原理
- 9. 発生一進化対応
- **10. 多様性の進化** 表現型変化の遺伝的固定, 共生、種分化、多様 性の進化
- 11. まとめと展望: 生物普遍性の現象論へ
- **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
- ${\bf 4.6} \ {\rm Gaussian} \ {\rm Random} \ {\rm Variables}$
- 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
- 2. 英語論文作成の概要 2 英語論文執筆の鉄則 (つづき): 結論を先に、理 由を後に、英語の基本は三拍子 (パラグラフ構 造)、「起承転結」 vs. 「序論・本論・結論」、 否定文を避けて肯定文で書く、日本語では明確 な表現を避けるが、英語でははっきりと言い切 る、「英語活用メモ」をつくり、英借文する; 読みやすい英語論文を書く

3. 英語論文の構成と作法 1

効率のよい論文執筆の進め方、よい英語論文の 書き方、日本人英語の脱却ポイント、英語論文 執筆の基本的な注意、英語論文の構成(IMRAD 方式)、英語論文執筆のフローチャート、英語 論文の構成項目の書き方(表題、著者と所属、 抄録、略語)

4. 英語論文の構成と作法 2 英語論文の構成項目の書き方(つづき)(序論、 本論、結果、考察、結論、謝辞、引用文献、図 と表)、辞書の使い方

5. 作文技術 1

文頭、数字(アラビア数字とアルファベットを 書き分けする)、用語の統一、リスト項目の一 貫性(並列構造で書く)、つづりの統一(英国式 か米国式か)、短い、簡潔な文を書く、受動態 を避け、能動態を使う、修飾する節や句は修飾 対象のすぐ近くに、文意を明確にする言葉(連 結語)を使う

6. 作文技術 2

不必要な単語を省く、日本人に多い間違いを 直す、自動詞と他動詞の取り違え、動名詞と不 定詞の使い方、よく使われる略語、注意すべき 単語

7. 文法的事項 1

動詞の適切な時制、主語を明確に(懸垂分詞を 避ける)、冠詞の使い方、名詞の使い方、和製 英語、スペリングに注意

8. 文法的事項 2

前置詞、句読法、数字・数式の表現ほう、記号 の読み方、元素記号の読み方、参考書

9. 論文投稿と査読者対策

10. 英語プレゼンの概要

プレゼンテーションとは、プレゼンテーション (口頭発表)の心構え、プレゼンテーションの プラニング、英語プレゼンテーションの構成、 スライドの効果的な使い方、標準スライド

11. 英語の構造としゃべり方 英語の構造、講演用英語表現 vs. 論文用英語表現、わかってもらえる英語のしゃべり方、うま く聞こえる発音のコツ、カタカナ英語に注意、 分かってもらえる英語のしゃべり方

12. 発表のマナー・テクニック

原稿は読むべきか、読んではならないか、聞い てわかる原稿。メモ作成上の注意、発表練習 (リハーサル)、発表時のマナー・テクニック、 Non-verbal Communication, PC (パソコン) によるプレゼンの注意、プレゼンテーション当 日のコツ(まとめ)

13. 英語プレゼンの実際

口頭発表での決まり文句(最初の挨拶)、プレ ゼンの流れと決まり文句、個々のスライドの説 明、図隊的な図表の説明、数字・数式・記号の 読み方、グラフ表現・図形

14. 質疑応答・ポスターセッション

質疑応答(Q&A)の心構えと指針、質問が聞 き取れなかったとき、質問に答えられないと き、ポスターセッションの利点、わかりやす いポスターと発表の技術、プレゼンでの注目 点と評価のポイント、チェックリスト、Hints for Successful Conference,参考書補遺:国際会 議用アブストラクトの執筆手順、Professional Self Introduction

2 各賞受賞者紹介

2.1 辻 直人 准教授

— 令和3年度東京大学卓越研究員 —

辻直人准教授が「非平衡量子多体系の物性物理学」により令和3年度東京大学卓越研究員に選ばれました。量 子多体系の非平衡状態は、これまでに見つかっていない新奇な量子状態、物性、物理の新概念の宝庫と考え られ、近年興味が高まっている分野です。辻氏はこれまで非平衡量子多体系の理論研究に取り組んできてい ますが、その中でも超伝導体におけるヒッグスモードと光の間の非線形相互作用の理論研究は、辻氏と実験 グループとの共同研究により純粋な超伝導体におけるヒッグスモードの世界初の実験的な観測に繋がりまし た。また、非平衡量子多体系における新奇臨界現象、光誘起モット絶縁体・フロッケ金属転移、非平衡動的 平均場理論の開発、量子カオスと揺動散逸定理の研究など、非平衡物理の基礎的・先駆的な研究を多岐にわ たって行っています。このように、今後ますます重要性が増し発展が見込める非平衡量子多体系の研究を世 界的にリードできる研究者として期待できることが評価されました。

2.2 酒井 明人 講師

— 第 19 回(令和 3 年度)物性研究所 所長賞 ISSP 学術奨励賞 —

酒井明人講師が「室温巨大異常ネルンスト効果を示すトポロジカル磁性体の開拓」により、第 19 回(令和 3 年度)物性研究所所長賞 ISSP 学術奨励賞を受賞されました。この賞は物性研究所で行われた独創的な研究、 学術業績により学術の発展に貢献したものに与えられます。酒井氏は世界の競合グループに先駆けて、ワイ ル強磁性体 Co₂MnGa およびノーダルウェブ磁性体 Fe₃X (X = Ga, Al)と新規トポロジカル磁性体を相次い で発見し、これらの物質において巨大異常ネルンスト効果が室温で発現することを実験的に示しました。新 たなトポロジカルな電子構造として学術的に大きな価値があり、強相関・量子物性、スピントロニクスなど の分野に大きな影響を与えました。またこれらの成果は、光電子分光によるワイル点の観測、薄膜での巨大 スピンホール角の発見など様々な研究に発展し、異常ネルンスト効果を用いた熱電応用研究にも繋がりまし た。これらの独創性と先駆性が評価され、本賞の受賞に至りました。

— 日本物理学会第 27 回論文賞 —

["Three-Dimensional Dirac Electrons at the Fermi Energy in Cubic Inverse Perovskites: Ca₃PbO and Its Family" T. Kariyado and M. Ogata, J. Phys. Soc. Japan **80**, 083704 (2011)] の論文が第 27 回日本物理学会 論文賞に選ばれました。この論文では立方晶アンチペロブスカイト構造を持つ物質群(Ca₃PbO 系)の低エ ネルギーのバンド構造に、3 次元のディラック電子が現れることを第一原理計算を用いて示しました。ここ 10 年来、相対論的電子が固体中で発現するというディラック・ワイル半金属が盛んに研究されてきましたが、その黎明期にそれまで注目されていなかった物質を発掘するという非常に先駆的な研究を行いました。さら に、論文中では 3 次元ディラック電子系における結晶対称性の役割についても指摘しており、それも含めた 先見性から論文賞の受賞に至りました。苅宿俊風氏の今後のますますの研究の発展が期待されます。

2.4 白井 達彦 氏(宮下研、藤堂研、現 早稲田大学)

— 第 16 回(2022年)日本物理学会若手奨励賞 —

白井達彦氏が第16回(2022年)日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。白井氏は宮下研究室で博士号 を取得し、その後、藤堂研究室でも特任研究員として研究を行いました。統計物理学において近年、量子多 体系の熱化の現象が理論的にも実験的にも活発に議論されていますが、白井氏は周期外場に駆動された量子 系のダイナミクスにおける散逸の効果や、定常状態を記述するフロケ-ギブス状態の成立条件など、理論とシ ミュレーションの両面から先駆的な研究を行ってきました。フロケエンジニアリング・散逸エンジニアリン グと呼ばれる新しい分野の発展に対する貢献が高く評価され、今回の受賞に至りました。

— 第 16 回(2022 年)日本物理学会若手奨励賞 —

対宿俊風氏が第16回日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。近年、相対論的電子が固体中の有効模型と して現れるというディラック電子系が注目を集めてきました。苅宿氏はディラック電子系の理論的探索に関 して先駆的な研究を行いました。特にアンチペロブスカイト構造を持つ一連の酸化物(Ca₃PbO系)が新し い3次元ディラック電子系となるということを理論的に提案し、さらに3次元ディラック電子系における結 晶対称性の果たす役割を指摘したことなどが高く評価され、受賞に至りました。該当の物質群はのちに本物 理学教室の高木英典研究室等において実験的検証にかけられるなど、波及効果の高い研究であったことも評 価されました。今後のさらなる活躍を期待したいと思います。

2.6 佐々木 健人 助教(小林研)

— 第 38 回(2021 年度)井上研究奨励賞 —

佐々木健人助教が「ダイヤモンド中の窒素-空孔中心を用いた電子スピンと核スピンの検知」の博士論文によ り、第 38 回(2021 年度)井上研究奨励賞を受賞しました。核磁気共鳴(NMR)は幅広い研究分野で利用され る分析手法です。同氏は、ダイヤモンド中の窒素-空孔(NV)中心を磁場の量子センサとして利用する先端技 術を利用/開発し、核磁気共鳴(NMR)の感度と空間分解能を劇的に向上させました。特に、単一の炭素核ス ピンの三次元的な高精度位置決定技術の開発と実証や、室温での単一陽子スピンの検出と量子操作などは、世 界的に優れた成果です。これらの先駆的な成果は高く評価され、今回の受賞に至りました。

2.7 諏訪 秀麿 助教(藤堂研)

— 第16回(2022年)日本物理学会若手奨励賞 —

藤堂研の諏訪秀麿助教が「多体問題に対する効率的なモンテカルロ法の開発」により、第16回日本物理学会 若手奨励賞を受賞しました。統計力学や物性物理学において、数値計算手法の開発はますますその重要性を 増しており、しばしばアルゴリズム等の抜本的な改良が必要となります。また非自明な物理現象の解明には、 時として新しい解析手法の開発を要します。諏訪氏は、広く用いられているモンテカルロ法において、その効 率を大幅に向上させるアルゴリズムや新しい計算手法を提案し、それらの有効性を実証しました。さらに、モ ンテカルロ法が苦手としてきた励起エネルギーの計算法の開発し、モンテカルロレベルスペクトロスコピー と呼べる解析法を確立しました。これらの成果はモンテカルロ法の新しい地平を切り拓くものであり、多く の分野で応用されていることが評価され、受賞に至りました。

2.8 鈴木 剛 氏(島野研、現 物性研究所)

— 第16回(2022年)日本物理学会若手奨励賞 —

鈴木剛氏が第16回(2022年)日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。鈴木氏は半導体に光励起された電 子正孔系が示す励起子モット転移の観測、多数の半導体量子ドットの系におけるラビ振動の観測とコヒーレ ント量子操作、励起子絶縁体候補物質 Ta2NiSe5 における光誘起絶縁体金属転移の解明など、超高速分光によ る電子物性研究で優れた研究業績を挙げました。最近では電子・格子相互作用の強さをバンド・モード選択 的に測定できる周波数領域角度分解光電子分光法を開発し、光励起による非平衡現象の研究に新たな展開を もたらしています。これら一連の研究が高く評価されました。今後の益々のご活躍を期待しています。

2.9 谷内 稜 氏(櫻井研、現 ヨーク大学)

— 第 38 回(2021 年度)井上研究奨励賞 —

谷内稜氏の博士論文「⁷⁸Niのインビームガンマ線核分光」が第 38 回井上研究奨励賞の受賞対象となりました。 谷内氏らはニッケル-78 原子核の二重魔法性を調べるために、理化学研究所「RI ビームファクトリー」で得ら れる不安定核ビームを用いて、ニッケル-78 の励起準位を効率よく生成し、脱励起ガンマ線を高効率のガンマ 線検出器で観測しました。第一励起準位のエネルギーが周りの原子核に比べ非常に大きいことを明らかにし、 二重魔法性の直接証拠を得ました。谷内氏は総勢 71 名の国際共同研究の主要なメンバーとして活躍し、本成 果を第一著者としてまとめた原著論文は世界的な注目を浴びています。現在谷内氏は英国ヨーク大学に身を 置き、ニッケル-78 の原子核構造のさらなる探究に加えて、原子核内の核子間相関の問題に挑戦しており、今 後の益々の活躍が期待されます。

2.10 有冨 尚紀 氏(安東研、現 国立天文台)

— 第16回(2022年)日本物理学会若手奨励賞 —

有富尚紀氏が第16回日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。対象となったのは、重力波望遠鏡の性能を 向上させるための,周波数依存性を持った光スクイージングの生成、およびその安定な制御法の実験的研究で す。それまで、周波数依存スクイージングの生成原理や実証は先行研究で行われていましたが、実際に重力波 観測を行う100Hz付近の周波数帯での実現が大きな課題となっていました。有富氏は、共同研究者らととも に、国立天文台に設置された基線長300mの光共振器を用いて、この周波数帯での周波数依存光スクイージン グを世界で初めて実現しました。また、有富氏はその長期間安定動作に必要な光学系制御手法を考案し、そ の有効性を実証しました。これらは、世界の重力波研究分野を大きく前進させた意義のある研究でした。今 後の更なる活躍が期待されています。

2.11 大小田 結貴 氏(山本研)

- 2021 年度 第 16 回 ロレアル - ユネスコ女性科学者 日本奨励賞 --

博士課程3年の大小田結貴氏が「ロレアル-ユネスコ女性科学者日本奨励賞」を受賞されました。大小田氏 は、恒星の誕生現場をアルマ望遠鏡によって観測し、得られた分子分布をもとに、誕生直後の原始星におい て、惑星系のもととなる円盤構造がすでに形成していることを見出しました。また、その段階の原始星が、ア ウトフローの大きな方向変化などの激しい活動性を伴うことを、衝撃波領域に特徴的な分子分布を手掛かり にして明らかにしました。これらの発見は、「星と惑星系の"始まり"」の新しい姿を描き出したもので、太 陽系の起源の理解を進めることに貢献しました。大小田さんの研究は、天文学・宇宙物理学としての意義の みならず、物質科学研究の広がりとしても高く評価され、今回の受賞に輝きました。

2.12 川畑 幸平 氏(上田研)

— 第12回(令和3年度)日本学術振興会育志賞 —

川畑幸平氏が第12回(令和3年度)日本学術振興会育志賞を受賞されました。量子力学の教科書には、観測 量が実数であるためそれを記述する作用素がエルミート性を有する必要があると書かれています。しかし、原 子核の崩壊現象など自然界には有限の寿命を持ち、エネルギーが複素数値をとる現象は古くから知られてき ました。このような現象を記述する理論として非エルミート作用素に基づく量子力学が近年盛んに研究され ています。川畑幸平氏は、対称性とトポロジーという物理学における基礎概念が、非エルミート物理系にお いてどのように理解されるかという問題に取り組み、その基礎理論の構築に成功しました。川畑氏が成し遂 げた一連の研究成果は、非エルミート作用素で記述されるさまざまな物理現象を理解する理論的枠組みを与 え、基礎物理の観点から重要であるだけではなく、トポロジカルデバイスをデザインする上での指導原理を 与えるという意味でも重要です。川畑氏の育志賞受賞に心からお祝いを申し上げます。

2.13 藤本 悠輝 氏(福嶋研)

— 第 16 回(2022 年)日本物理学会若手奨励賞 —

藤本悠輝さんが 2022 年日本物理学会理論核物理領域:若手奨励賞(第 23 回核理論新人論文賞)を受賞しました。藤本さんの研究テーマは、高密度核物質・クォーク物質の状態方程式の決定です。中性子星内部では重力と圧力が釣り合っていて、状態方程式と呼ばれる密度と圧力の関係をしらずに、中性子星の構造を理解することはできません。将来の重力波天文学の可能性を探るうえで中性子星内部の物質研究は重要ですが、理論計算はとても難しいのです。そこで藤本さんは中性子星の観測データから深層学習を用いて状態方程式を 推定する方法を提唱しました。それだけでなく深層学習の汎化性能を議論するなど、新しい研究基軸を打ち出したことが高い評価につながりました。

2.14 森脇 可奈 氏(吉田研)

— 令和3年度東京大学総長賞総長大賞 —

森脇可奈氏が令和3年度東京大学総長賞総長大賞を受賞されました。森脇可奈氏は初期宇宙の銀河形成や宇 宙再電離過程に関する研究で顕著な業績をあげました。スーパーコンピュータシミュレーションや宇宙観測 データを用いた研究成果を数多く発表し、博士論文では輝線強度マッピングという新しい観測手法に対して 機械学習を用いた研期的な手法を提案しました。輝線強度マッピングでは、異種の天体からのシグナルが同 一波長に混在するため、シグナル源の同定が困難であり、観測データの統計解析に大きな不定性が残ります。 森脇氏は機械学習を用いて銀河輝線シグナルを分離する方法を提案し、3次元的な銀河分布を再構築する手法 を世界で初めて提案しました。現在世界中で計画されている同種の観測から多くの発見が導かれると期待さ れます。これらの最先端の研究活動を行いつつも、一般向けの科学記事を執筆し、高校や大学・研究機関で の理系女子イベントで講演するなど、広く宇宙物理学の普及と女子学生の科学啓蒙にも貢献しています。

2.15 理学系研究科研究奨励賞·理学部学修奨励賞

以下の方々が令和3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) 森脇 可奈 氏、藤本 悠輝 氏、柴田 直幸 氏、内藤 智也 氏
- 理学系研究科研究奨励賞(修士課程) 吉田 博信 氏、吉村 耕平 氏、野下 剛 氏、駒木 彩乃 氏
- 理学部学修奨励賞 增木 貫太 氏、永山 龍那 氏、坪内 健人 氏

皆様の今後の更なるご活躍を期待します。

3 人事異動

[物理学教室に来られた方々] 、 中島 康博 本学宇宙線研究所 准教授 R3/4/1採用 採用 田島 裕之 助教 (Liang 研) 高知大学 R3/4/1石橋 未央 特任研究員(未来社会) R3/4/1採用 日本学術振興会特別研究員 内山 博喜 特任研究員(未来社会) 採用 R3/4/1小鷲 智理 特任研究員(岡田研) R3/4/1採用 日本学術振興会特別研究員 藤本 純治 特任研究員(小形研) R3/4/1採用 中国科学院大学 特任研究員(JSR 包括連携) 採用 本学名誉教授 宮下 精二 R3/4/1宮脇 守 特任専門員(未来社会) R3/4/1本学産学協創推進本部 (兼務) 採用 係長(物理教務) 宮本 めぐみ 配置換え R3/4/1本学農学部 竹内 朝子 事務補佐員(上田研) R3/4/1採用 本学フォトンサイエンス研究機構 大森 寛太郎 助教(松尾研) 採用 R3/5/1Stony Brook University Andraus Robayo Sergio Andres 特任研究員(JSR 包括連携) R3/5/1 採用 本学生産技術研究所 特任研究員(浅井研) Yang Yi Lin R3/5/1 採用 本専攻博士課程 特任研究員 (濱口研) 採用 Ramirez Quezada Maura Elizabeth R3/7/1Durham University 西川 幸江 特任研究員(未来社会) R3/8/1 採用 Wang Haoyu 特任研究員(安東研) R3/8/1採用 武漢大学 青木 舞 事務補佐員(物理事務) R3/9/1 採用 Le Minh Cristian 特任研究員(常行研) R3/10/1 採用 本専攻博士課程 上田 恵子 特任専門職員(竹内研) R3/10/1 採用 特任研究員(中辻研) 本専攻博士課程 唐 楠 R3/10/16 採用 国立天文台 西合 一矢 採用 特任研究員(山本研) R3/11/1 井土 宏 特任准教授(社会連携講座) R4/1/1採用 東北大学 採用 本専攻特任研究員 見波 将 特任助教(社会連携講座) R4/1/1藤澤 幸太郎 特任助教 (須藤研) R4/3/1採用 本学ビッグバンセンター 特任研究員(JSR 包括連携) 物質・材料研究機構 石河 孝洋 R4/3/1採用 [物理学教室から移られた方々] 本学量子ソフトウェア寄付講座 特任講師 (藤堂研) 退職 大久保 毅 R3/6/30 榎 佐和子 助教(岡田研) R3/8/31 退職 本学生物普遍性研究機構 飯田 珠緒 事務補佐員 R3/8/31 退職 中山 和則 助教(諸井研) R3/9/30 退職 東北大学 特任研究員(JSR 包括連携) 本学未来ビジョン研究センター 堀之内 裕理 R3/9/30 退職 特任研究員 (浅井研) R3/9/30 退職 Yang Yi Lin Southern Methodist University 青木 舞 事務補佐員(物理事務) R3/11/30 退職 佐藤 龍平 特任研究員 (常行研) 退職 東北大学 R3/12/31特任研究員(中辻研) 本専攻社会連携講座 見波 将 R3/12/31 退職 金子 邦彦 教授 R4/3/31 定年退職 Niels Bohr Institute 櫻井 博儀 教授 R4/3/31 退職 理化学研究所 添田 彬仁 助教(村尾研) R4/3/31 国立情報学研究所 退職 新倉 潤 助教(櫻井研) R4/3/31 退職 理化学研究所 道村 唯太 助教 (安東研) R4/3/31 退職 California Institute of Technology 小鷲 智理 特任研究員(岡田研) R4/3/31 退職 産業技術総合研究所 特任研究員(山本研) 西合 一矢 R4/3/31 退職 鹿児島大学 特任研究員 (安東研) R4/3/31 本学ビッグバンセンター Wang Haoyu 配置換え 八幡 和志 技術専門職員 R4/3/31 退職 防衛医科大学校 野澤 新吾 上席係長(物理教務) R4/3/31 転出 放送大学 木暮 志保 係長(物理事務) R4/3/31 本学研究推進部 配置換え 事務補佐員(JSR 包括連携) 江口 恭代 R4/3/31 退職 事務補佐員 (未来社会) 清家 展子 R4/3/31 退職

4 役務分担

【役務】	【教員】	【職員】
専攻長・学科長	常行	木暮、野澤、右田
幹事	吉田、浅井	
専攻主任	村尾	物理教務
専攻副主任	吉田	物理教務
常置委員	高木、須藤	物理教務
教務	小形(理)、馬場(大学院)、	物理教務
	竹内(ガイダンス)、北川(学生相談)	
学生実験	安東、岡本、日下	佐伯、八幡
卓越大学院	浅井・安東(XPS)、山本(FoPM)、	物理教務、物理事務
	須藤(IGPEES)、長谷川・常行(MERIT)、	
	藤堂(Q-STEP)	
【外国人学生・留学】		
優先配置	福嶋	物理教務
海外学部生インターンシップ受入	高木、島野	物理教務
GSGC 留学生支援	横山 (順)、Liang	物理教務
留学	濱口	物理教務
【駒場生進学】		
進学指導/推薦入試アドバイザー	小形、竹内	物理教務
駒場対策	教務担当者が兼務	物理教務
【奨学金・支援】		
奨学金		物理教務
博士課程学生支援制度	岡本	渡辺、右田
就職	長谷川	仁井田、野澤
部屋割	林	木暮
安全衛生	酒井 (広)	八幡
放射線	横山 (将)	物理事務
管理技術室	酒井 (広)(統括、試作室)	下澤
(技術室会議メンバー)	安東(学生実験)	佐伯、八幡
	酒井 (広)、岡本(安全衛生・低温)	八幡
	藤堂(IT 関連)	南野
図書	諸井、岡本、酒井 (明)	総務課図書チーム
コロキウム	古澤、濱口、桂	物理事務
年次報告	小林、辻	仁井田、八幡
記録係		物理事務、物理教務
理交会	藤堂	木暮
親睦会	樺島	レクリエーション委員
ホームページ、IT	藤堂、蘆田	南野
オープンキャンパス	蘆田	物理事務
JSR 東大 包括連携 CURIE	中辻、島野、常行	
緊急対応教職員	酒井 (広)、松尾	

5 教室談話会

2022年3月7日(月)17:00-18:30
 川上 恵里加 氏(理化学研究所・理研白眉研究チームリーダー)
 「液体ヘリウム上に浮いている電子を用いた研究ー高性能な量子ビット実現へ向けてー」

6 物理学教室コロキウム

- 第119回コロキウム 2021年6月11日(金) 17:00-18:30
 川口 喬吾 氏(理化学研究所)
 「細胞運命決定のメカニズム推定問題」
- 第120回コロキウム 2021年6月25日(金) 17:00-18:30
 Chris Done 氏 (University of Durham)
 "Black holes, Einsteins gravity and rocket science"
- 第121回コロキウム 2021年7月9日(金)17:00-18:30
 新井田 貴文 氏(筑波大学)
 「高速回転するクォーク・グルーオン流体 スピン偏極で探る宇宙最速の渦 -」
- 第122回コロキウム 2021年7月16日(金) 17:00-18:30
 山本 倫久 氏(理化学研究所)
 「電子干渉計で見るスピンの遮蔽雲」
- 第123回コロキウム 2021年11月12日(金)17:00-18:30
 小林 徹也 氏(東京大学 生産技術研究所 准教授)
 「生命現象をとらえる理論的方法とその展開:情報から構造まで」
- 第124回コロキウム 2021年11月26日(金) 17:00-18:30
 Andrea Cavalleri 氏 (Max Planck Institute, Professor)
 "Driven Quantum Materials"
- 第125回コロキウム 2021年12月17日(金)17:00-18:30
 渡辺 悠樹 氏(東京大学 大学院工学系研究科 准教授)
 「多極子絶縁体の分数コーナー電荷」
- 第126回コロキウム 2022年2月4日(金)17:00-18:30
 山崎 雅人 氏(東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構 准教授)
 「量子場の理論の数理」

7 金曜ランチトーク

- 2021年7月9日(金) 13:00-13:25
 佐々木 健人(小林研究室 助教)
 "Application of diamond nitrogen vacancy centers as quantum sensors"
 「ダイヤモンド窒素空孔中心の量子センサーとしての応用」
- 2021年9月10日(金) 13:00-13:25
 中桐 洸太(横山将志研究室 助教)
 "Closing in on the matter-antimatter symmetry violation in neutrinos"
 「ニュートリノにおける物質・反物質対称性の破れの探索」
- 2021年11月12日(金)13:30-13:55
 高橋昂(樺島研究室助教)

"Performance evaluation and efficient computation of stability selection" 「安定性選択法の効率的計算と性能評価」

- 2021年11月26日(金) 13:00-13:25
 田島 裕之(LIANG 研究室 助教)
 "Clustering and condensation phenomena in quantum many-body systems"
 「量子多体系におけるクラスタリングおよび凝縮現象」
- 2022年1月7日(金) 13:00-13:25

大森 寛太郎(松尾研究室 助教)

"Kramers-Wannier-like duality defects in (3+1)d gauge theories"

「3+1 次元ゲージ理論における Kramers-Wannier 型双対性位相欠陥」

2022年2月18日(金)13:00-13:25
 姫岡優介(古澤研究室助教)

"Emergence of growth and dormancy from metabolic dynamics : Towards a theory for cell-death" 「代謝動力学モデルから生じる成長状態・休眠状態:細胞死の理論の構築に向けて」

8 ニュートン・カフェ

新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の流行により失われた、学生と教員、そして学生同士の交流を図 るため、少人数の学部学生(主に2年生と3年生)を対象として、研究セミナー"ニュートン・カフェ"を12 回にわたって開催した。実施にあたっては物理学科3年生のニュートン祭委員の協力を得た。

- 第1回2021年10月8日(金)18:00-19:00
 開催研究室:横山(将)研究室、上田研究室、長谷川研究室、古澤研究室、安東研究室
- 第2回2021年10月13日(水)18:00-19:00
 開催研究室:中島研究室、小形研究室、小林研究室、須藤研究室、竹内研究室
- 第3回2021年10月18日(月)18:00-19:00
 開催研究室:藤堂研究室、蘆田研究室、林研究室、岡田(康)研究室、日下研究室
- 第4回2021年10月27日(水)18:00-19:00
 開催研究室:濱口研究室、樺島研究室、桂研究室、馬場研究室
- 第5回2021年11月4日(木)18:00-19:00
 開催研究室:常行研究室、小林研究室、安東研究室
- 第6回2021年11月9日(火)18:00-19:00
 開催研究室:横山(将)研究室、辻研究室、中辻・酒井(明)研究室
- 第7回2021年11月19日(金)18:00-19:00
 開催研究室:上田研究室、長谷川研究室、馬場研究室、島野研究室
- 第8回2021年12月1日(水)18:00-19:00
 開催研究室:濱口研究室、桂研究室、竹内研究室
- 第9回 2021 年 12 月 13 日 (月) 18:00-19:00
 開催研究室:藤堂研究室、小形研究室、岡田 (康) 研究室
- 第10回 2022年1月13日(木) 18:00-19:00
 開催研究室:中島研究室、須藤研究室、中辻・酒井(明)研究室
- 第11回2022年2月9日(水)18:00-19:00
 開催研究室:樺島研究室、島野研究室、古澤研究室、日下研究室
- 第12回2022年2月18日(金)18:00-19:00
 開催研究室: 蘆田研究室、常行研究室、辻研究室、林研究室

年次研究報告 2021年度

2022年5月30日 東京大学大学院理学系研究科・理学部 物理学教室 発行 小形正男 編集 樺島祥介 辻 直人 仁井田和子