ISSN 0910-0709

Department of Physics

School of Science

The University of Tokyo

Annual Report

2016

平成28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

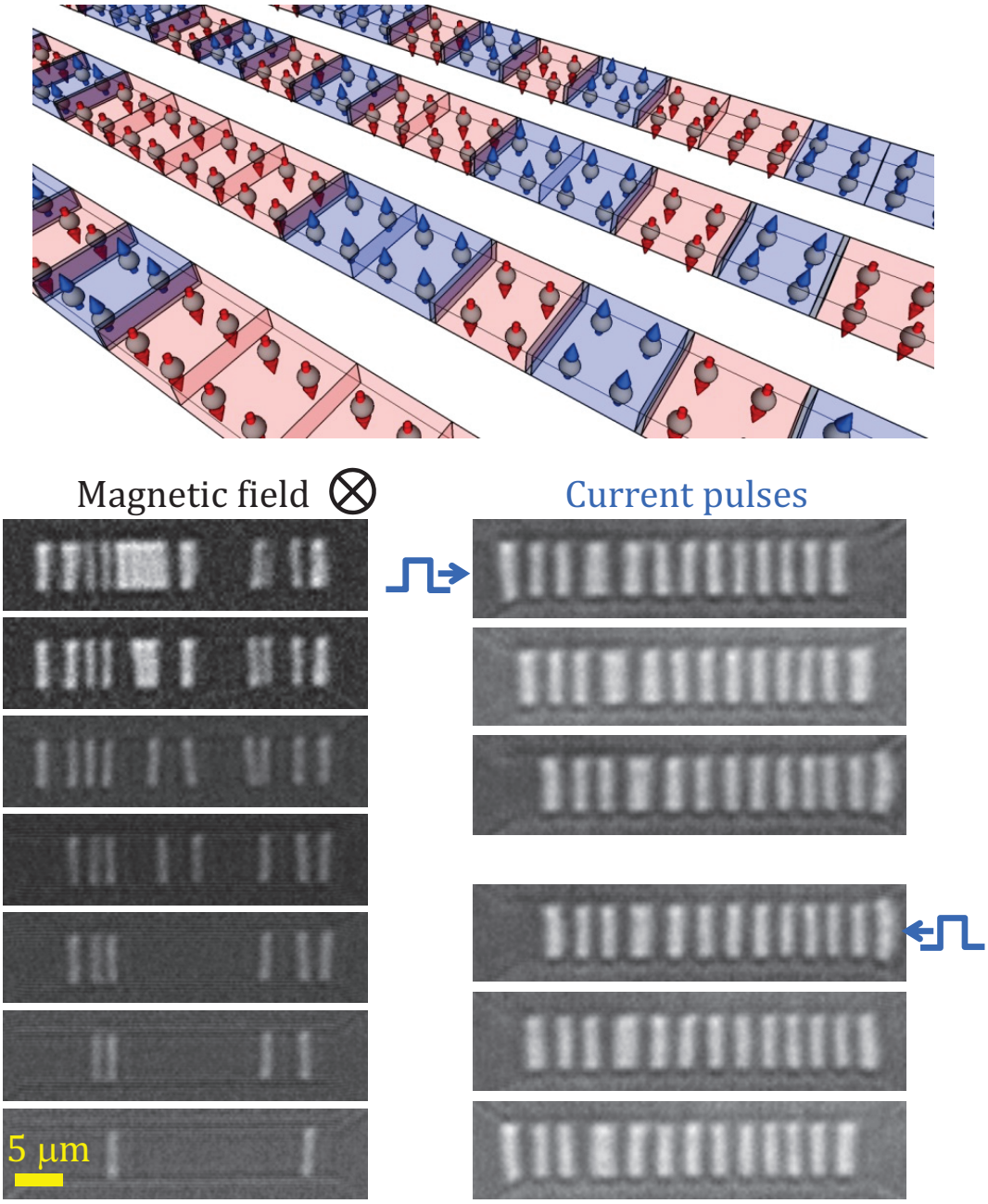

図 0.0.1: デジタルビットに相当するスピン配列を磁場とスピン流で制御する様子を磁気光学顕微鏡で観察した結果。スピン配列に磁場を印加すると、配列パターンは大きく変化し、ビットに相当する配列が消滅していく（左下図）。一方、スピン配列に電流を流すと、スピンホール効果によってスピン流が生成され、配列パターンが電流の方向に従って平行移動する（右下図）。（林研究室）

Magneto-optical microscopy imaging of chiral domain walls driven by magnetic field (bottom left) and spin current (bottom right). Upon applying magnetic field, chiral domain walls are annihilated (due to their strong repulsive interaction, the field required to annihilate the walls are larger than typical non-chiral domain walls). In contrast, when current is passed along the wire, spin current generated via the spin Hall effect drives all domain walls in sync along the current flow direction. (Hayashi group)

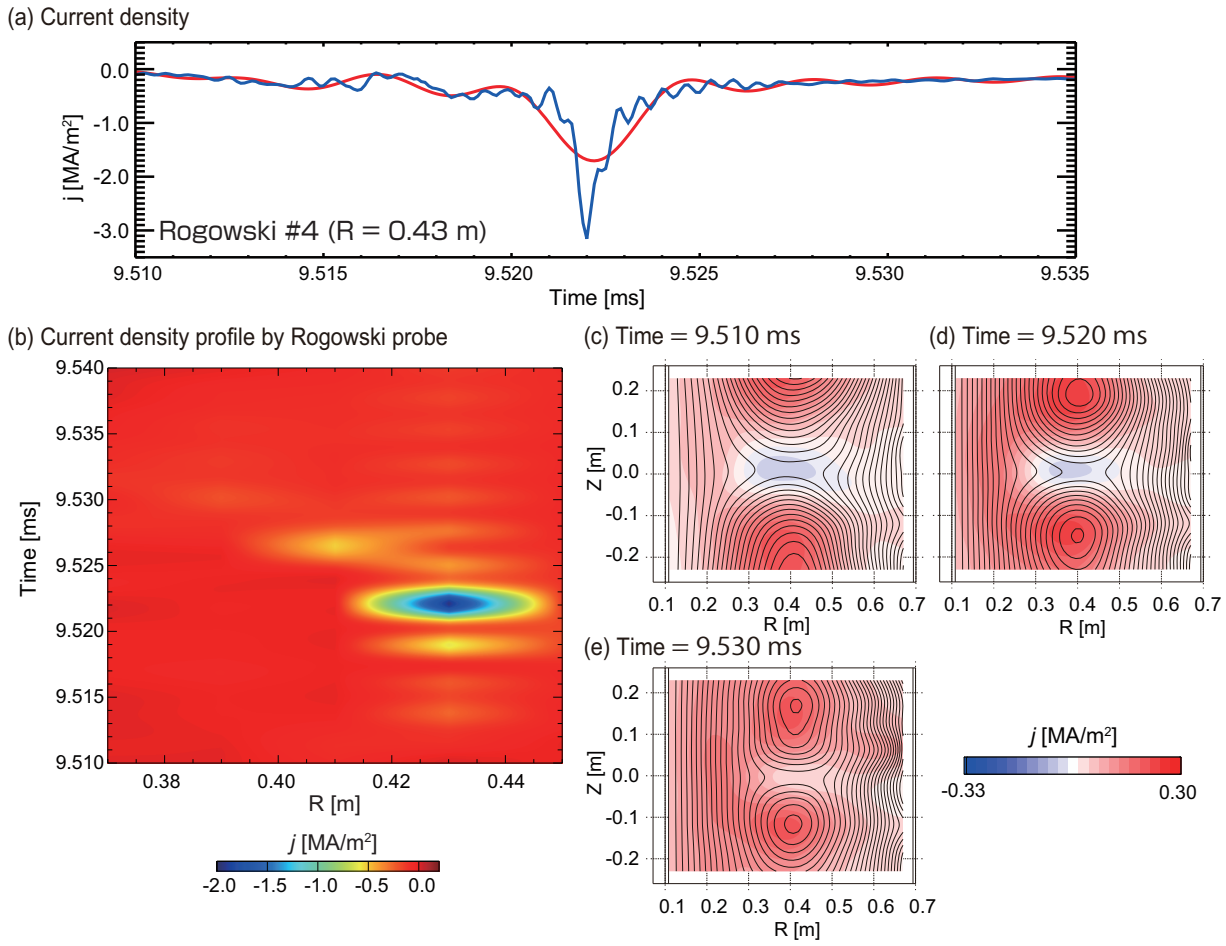

図 0.0.2: トーラスプラズマ合体装置 UTST で、新たに開発したロゴスキーコイルアレイで測定した電流シートの時間発展 (a)–(b)。磁気リコネクション時に、X 点に局在した大きな電流が確認された。電流密度の最大値は ∼2.0 MA/m^2、R（大半径）方向の幅は 20–40 mm、Z（鉛直）方向の幅は 20 mm 程度であり、電流は従来の磁場計測からの推定 (c)–(e) より小さい領域に局在していることが明らかとなった。（高瀬研究室）

Evolution of the current sheet (a)–(b) was measured with a newly developed Rogowski coil array in the toroidal plasma merging device UTST. A large current localized at the X-point was confirmed during magnetic reconnection. The maximum current density was ∼2.0 MA/m^2, the width in the R (major radial) direction was 20–40 mm, and the width in the Z (vertical) direction was about 20 mm, clarifying that the current is localized in a narrower region than the estimate from conventional magnetic measurements (c)–(e). (Takase Group)

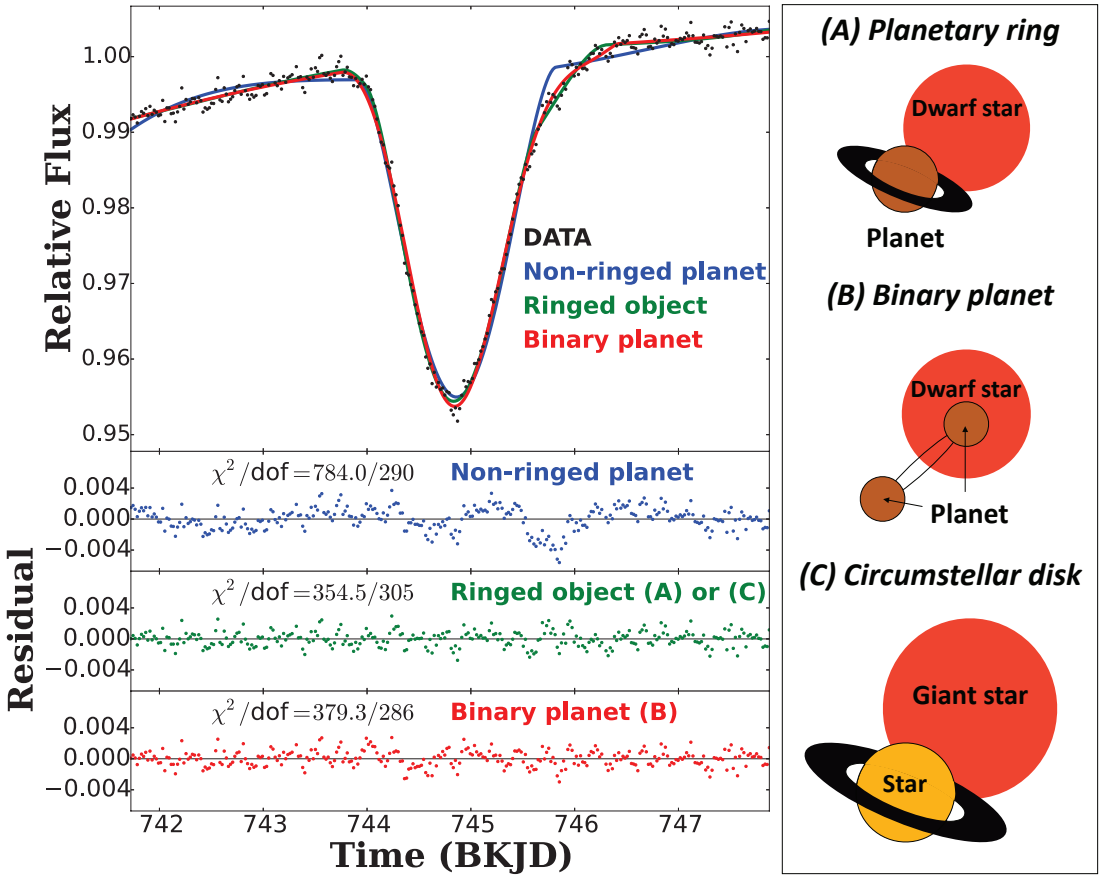

図 0.0.3: 2009 年に打ち上げられたケプラー衛星は 3500 個以上の惑星を発見したものの、その中で土星のような惑星リングを持つ惑星は報告されていなかった。我々は、惑星リングの兆候を探すための手法を開発し、それをケプラーデータへ適用した結果、初めての惑星リング候補を発見した。その惑星リング候補の食の光度曲線とモデルとの残差を左図に示す。リングなしの惑星では説明できないずれが、リングを仮定することで (右図 A) 非常にうまく説明できる。もっとも、それ以外の可能性として、冥王星とカロンのような 2 重惑星 (右図 B)、あるいは星回りの円盤も同様に残される (右図 C)。惑星リングと 2 重惑星のいずれも場合であっても太陽系外で初の発見となり、すばる望遠鏡による追観測を含め、今後さらに研究を継続する予定である。本研究は米国天文学会の Web サイトでも、注目論文 [1] としてとりあげられた [2]。(宇宙理論研究室)

While over 3500 exoplanets have been detected by the Kepler satellite launched in 2009, no evidence of a Saturnian ring around exoplanets has been reported yet. We developed a methodology to identify exoplanetary rings, applied it to the Kepler data, and consequently, found a ringed-planet candidate for the first time. The left figure shows the transit light curves and the residuals obtained from models fitted to the data. While a ringless planet does not explain the data, a ringed planet fits the data consistently. In addition to the planetary ring hypothesis (A in right panel), there remain two alternative scenarios: a transiting binary planet like the system of Pluto and Charon (B in right panel) and an eclipsing binary star with a circumstellar disk (C in right panel). If our candidate is confirmed as a ringed planet or a binary planet, it is the first detection of such objects outside the Solar System. We will continue to study this candidate in various ways including the spectroscopic follow-up with the Subaru telescope. This result [1] was also featured by American Astronomical Society on the web [2]. (Theoretical astrophysics group)

[1] Aizawa, M., et al. 2017, AJ, 153, 193
[2] AAS NOVA Features, "The Search for Ringed Exoplanets", (http://aasnova.org/2017/04/07/the-search-for-ringed-exoplanets/)

序

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・理学部物理学科の平成 28 年度（2016 年 4 月-2017 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、岡田康志氏（生物物理学実験：理研より）、古澤力氏（生物物理学理論：理研より）、准教授として、林将光氏（物性実験：物質・材料研究機構より）、馬場彩氏（宇宙物理実験：青山学院大学より）、講師として、井手口拓郎氏（光科学：化学専攻より）、助教として、河口真志氏（林研）、齋藤稔氏（古澤研）、永田夏海氏（濱口研）、樫山和己氏（吉田研）、榎佐和子氏（岡田研）が着任されました。また、川野輝彦助教（松尾研）が京都府立医科大学准教授に、渡邉祥正助教（山本研）が筑波大学数理物質系物理学域助教として転出されました。大塚孝治先生と早野龍五先生が本年度定年を迎えられました。また、梅木誠助教、石川隆助手が退職されました。

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。福山秀敏名誉教授が文化功労者に選ばれました。また、吉田直紀教授が第 13 回日本学術振興会賞と日本学士院学術奨励賞を、林将光准教授が文部科学大臣表彰若手科学者賞を、桂法称准教授が Nevill F. Mott Prize を、樽家篤史氏（元須藤研助教、現京都大学) が第 10 回湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞を、角田佑介氏（元大塚研)、伊藤創祐氏（元佐野研)、中島秀太氏（元上田研)、鎌田耕平氏（元横山順一研）が第 11 回日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。学生では、増田賢人君（須藤研) が第 7 回日本学術振興会育志賞を、樊星君（浅井研) が東京大学総長賞を受賞しました。また、西口大貴君、高橋文雄君、増田賢人君、堀尾眞史君が平成 28 年度理学系研究科研究奨励賞（博士課程）を、樊星君、榎本雄太君、米田浩基君、吉田聡太君が研究奨励賞（修士課程）を、川畑幸平君、萩原大佑君、森脇可奈さんが平成 28 年度理学部学修奨励賞を受賞しました。

当物理教室では、さまざまな形で国際化を図っています。外国人大学院生を対象に奨学金付きの修博一貫コース Global Science Graduate Course (GSGC) を開始し、昨年 9 月に第 1 期生が入学し、この 3 月には今年 9 月に入学する第 2 期生の合格を発表しました。また、GSGC 特任教授・准教授として海外大学から教員を招聘して 2、3 ヶ月間雇用し、集中講義と共同研究を行う制度も開始しました。これによってすでに数人の先生方が来日されました。この GSGC は、まもなく開始される国際卓越大学院制度のパイロット事業として理学系研究科全体で強力に推し進められています。また、UTRIP(The University of Tokyo Research Internship Program) や STEPS(Students and Researchers Exchange Program in Sciences) 制度のもと、多数の外国人学部生および大学院生が当物理教室に滞在し、ますます国際色豊かになってきています。大学院または大学院・学部共通講義のいくつかも英語で講義され、その数が増えつつあります。日本人大学院生の海外派遣は、従来からリーディング大学院プログラムのもとで活発に行われています。

物理教室では、これからも学科・専攻のあり方について真剣に考え、世界に発信する物理学の一大研究教育拠点として、その卓越性を維持・発展させていきたいと考えています。今後とも、先輩の先生方、関係各位の皆様のご支援のほど、よろしくお願い申し上げます。

この年次研究報告は、馬場彩准教授、桂法称准教授、八幡和志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。

2017 年 5 月 1 日

物理学専攻 専攻長・物理学科 学科長

長谷川 修司

目 次

I 研究室別 2016 年度 研究活動報告 **1**

1 原子核・素粒子理論 **3**
1.1 原子核理論 (大塚・福嶋) 研究室 . . . 3
1.1.1 原子核構造 (大塚研) . . . 3
1.1.2 理論ハドロン物理研究室 . . . 8
1.2 素粒子論研究室 . . . 11
1.2.1 現象論 . . . 11
1.2.2 弦理論、場の理論全般 . . . 13

2 原子核・素粒子実験 **17**
2.1 原子核実験グループ 【早野・櫻井・Wimmer】 . . . 17
2.1.1 反物質の研究（早野研究室） . . . 17
2.1.2 陽子ビームを用いたパイ中間子原子の分光実験（早野研究室） . . . 18
2.1.3 インビームガンマ線分光による核構造研究（櫻井研究室） . . . 18
2.1.4 中性子過剰核におけるクラスター構造の研究（櫻井研究室） . . . 19
2.1.5 MuSIC での Pd 同位体のミューオン捕獲の研究（櫻井研究室） . . . 19
2.1.6 直接反応を用いたエキゾチック核の核分光 (Wimmer 研究室) . . . 20
2.1.7 実験装置開発 (櫻井・Wimmer 研究室) . . . 20
2.2 駒宮研究室 . . . 25
2.2.1 電子・陽電子リニアコライダー ILC 計画 . . . 25
2.2.2 LHC 実験 . . . 26
2.2.3 小規模実験 . . . 28
2.3 相原・横山研究室 . . . 30
2.3.1 （スーパー）B ファクトリー実験 . . . 30
2.3.2 HSC 暗黒エネルギー研究 . . . 32
2.3.3 加速器ニュートリノ振動実験 . . . 32
2.3.4 陽子崩壊の探索 . . . 34
2.3.5 次世代大型水チェレンコフ検出器・ハイパーカミオカンデ . . . 34
2.3.6 アクシオンおよび軽い暗黒物質探索実験 . . . 35
2.4 浅井研究室 . . . 39
2.4.1 LHC・ATLAS 実験での研究 . . . 39
2.4.2 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 . . . 40

3 物性理論 **45**
3.1 宮下研究室 . . . 45
3.1.1 量子応答、量子ダイナミクス . . . 45
3.1.2 協力現象の統計力学 . . . 46
3.2 小形研究室 . . . 49
3.2.1 高温超伝導の理論 . . . 49
3.2.2 ディラック電子系 . . . 50
3.2.3 反磁性 . . . 50

3.2.4 トポロジカル物質の理論 . . . 51
3.2.5 重い電子系および多軌道電子系理論 . . . 52
3.2.6 磁性体およびスピン軌道相互作用 . . . 52
3.3 常行研究室 . . . 55
3.3.1 高温超伝導を示す硫化水素の高圧下マグネリ相 . . . 55
3.3.2 スピンゆらぎを取り入れた超伝導密度汎関数理論 . . . 55
3.3.3 YNi_2B_2C における異方的超伝導ギャップの起源の探求 . . . 56
3.3.4 ラットリング原子の非調和振動と特異な熱伝導 . . . 56
3.3.5 ScF_3 の負の熱膨張率 . . . 56
3.3.6 2 次元的電子状態をもつ一連のペロブスカイト型酸水素化物 $A\mathrm{TiO_2H}$（A = Li, Na, K, Rb, Cs） . . . 56
3.3.7 金属における非熱的アブレーションの機構解明とそのモデリング . . . 57
3.3.8 微量元素添加型焼結磁石材料における磁気異方性の解明 . . . 57
3.3.9 相関波動関数を用いた周期系の第一原理電子状態計算手法開発 . . . 57
3.3.10 分割統治法に基づくナノ構造全系電子状態計算手法の開発 . . . 57
3.3.11 不完全な実験データを活用した結晶構造探査手法の開発 . . . 58
3.4 藤堂研究室 . . . 61
3.4.1 強相関多体系における新奇な状態や相転移現象の探索と解明 . . . 61
3.4.2 強相関多体系に対する新たな計算手法の開発 . . . 63
3.4.3 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の開発 . . . 63
3.5 桂研究室 . . . 65
3.5.1 強相関系 . . . 65
3.5.2 トポロジカル系 . . . 66
3.5.3 可解模型・統計力学 . . . 67
3.5.4 その他 . . . 68

4 物性実験 70
4.1 藤森研究室 . . . 70
4.1.1 高温超伝導 . . . 70
4.1.2 スピントロニクス，界面 . . . 70
4.2 長谷川研究室 . . . 75
4.2.1 表面電子・スピン輸送 . . . 76
4.2.2 表面ナノ構造 . . . 77
4.2.3 新しい装置・手法の開発 . . . 77
4.3 福山研究室 . . . 81
4.3.1 2 次元ヘリウムの量子相研究 . . . 82
4.3.2 グラフェンの電子物性研究 . . . 83
4.3.3 カーボンナノチューブ・ランダムネットワークの 1 次元電子物性 . . . 84
4.3.4 多機能超低温走査プローブ顕微鏡の開発 . . . 84
4.3.5 小型サブミリケルビン連続冷凍装置の開発 . . . 85
4.3.6 走査型プローブ顕微鏡用ヘリウム循環冷却システムの開発 . . . 85
4.4 岡本研究室 . . . 86
4.4.1 劈開表面に形成された 2 次元電子系 . . . 87
4.4.2 金属超薄膜の超伝導 . . . 87
4.5 島野研究室 . . . 90
4.5.1 半導体電子正孔系の高密度励起現象 . . . 90
4.5.2 超伝導体の光応答・光制御 . . . 91
4.5.3 ランダウ量子化したグラフェンの非摂動論的光学応答 . . . 93
4.6 高木・北川研究室 . . . 95
4.6.1 新しい量子スピン液体 . . . 95
4.6.2 3 次元ディラック電子 . . . 95

4.6.3 励起子絶縁体 96
4.7 林研究室 98
4.7.1 スピン流物理 98
4.7.2 界面スピン軌道相互作用 99

5 一般物理理論 101
5.1 宇宙理論研究室 (須藤・吉田) 101
5.1.1 観測的宇宙論 101
5.1.2 系外惑星 104
5.1.3 星・ブラックホール形成 105
5.1.4 高エネルギー天文現象 105
5.2 村尾研究室 112
5.2.1 高階量子演算 113
5.2.2 多体量子状態の量子情報的解析 114
5.2.3 ハイブリッド量子系の量子情報処理 114
5.2.4 エンタングルメント理論 115
5.2.5 量子非局所性 115
5.3 上田研究室 117
5.3.1 冷却原子気体 117
5.3.2 量子論・統計力学と情報理論の融合 118
5.4 横山（順）研究室 123
5.4.1 初期宇宙論 123
5.4.2 観測的宇宙論 124
5.4.3 重力理論 124
5.4.4 重力波 125

6 一般物理実験 130
6.1 高瀬研究室 130
6.1.1 TST-2 実験の概要 130
6.1.2 高周波プラズマ立ち上げ実験 130
6.1.3 オーミックプラズマ実験 131
6.1.4 計測器開発 132
6.1.5 共同研究 133
6.2 佐野研究室 136
6.2.1 非平衡系の動力学・統計力学 136
6.2.2 アクティブマターの動力学 137
6.2.3 非平衡系としての生命現象 137
6.3 山本研究室 142
6.3.1 星形成の観測研究 142
6.3.2 系外銀河の分子組成 144
6.3.3 テラヘルツ帯観測技術の開拓 144
6.4 酒井広文研究室 147
6.4.1 レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展 147
6.4.2 面配列したベンゼン分子中から発生する高次高調波 149
6.4.3 フェムト秒 EUV 自由電子レーザーパルスと近赤外パルスによる 2 色超閾イオン化過程の観測 149
6.4.4 その他 150
6.5 五神-湯本-井手口研究室 151
6.5.1 物質系の巨視的量子現象の探索 151
6.5.2 非自明な光学現象の探索とその応用 153
6.5.3 新規コヒーレント光源開発と新しい分光手法開拓 154

6.6 安東研究室 . . . 158
6.6.1 大型重力波検出器 KAGRA . . . 159
6.6.2 宇宙空間レーザー干渉計 . . . 160
6.6.3 ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA . . . 160
6.6.4 相対論・量子光学精密実験 . . . 161
6.7 馬場・中澤研究室 . . . 164
6.7.1 はじめに . . . 164
6.7.2 「ひとみ」衛星とそのリカバリー . . . 165
6.7.3 高密度天体の X 線研究 . . . 165
6.7.4 超新星残骸 . . . 166
6.7.5 銀河団とその衝突・合体 . . . 167
6.7.6 その他の宇宙 X 線観測研究 . . . 168
6.7.7 雷雲ガンマ線の研究 . . . 168
6.7.8 将来計画 . . . 168

7 生物物理 174
7.1 能瀬研究室 . . . 174
7.1.1 神経回路の活動ダイナミクス . . . 174
7.1.2 運動神経回路を構成する神経細胞の同定 . . . 175
7.2 樋口研究室 . . . 177
7.2.1 分子研究 . . . 177
7.2.2 細胞研究 . . . 179
7.2.3 個体研究 . . . 180
7.3 岡田研究室 . . . 183
7.3.1 超解像蛍光顕微鏡の開発と応用 . . . 183
7.3.2 細胞内一分子イメージングの高速化と細胞内 1 分子キネティクス計測 . . . 183
7.4 古澤研究室 . . . 185
7.4.1 適応進化ダイナミクスの解析 . . . 185
7.4.2 多細胞システムの多様性と安定性 . . . 186
7.4.3 生体内化学反応における少数性効果 . . . 186

8 技術部門 189
8.1 実験装置試作室 . . . 189
8.1.1 利用状況 . . . 189
8.1.2 工作実習 . . . 189
8.2 技術室 . . . 189
8.2.1 安全衛生 . . . 189
8.2.2 IT 関連業務 . . . 189
8.2.3 学生実験 . . . 189
8.2.4 研究支援 . . . 189
8.2.5 各種委員会 . . . 190

II Summary of group activities in 2016 191
1 Theoretical Nuclear Physics Group . . . 193
2 Theoretical Particle and High Energy Physics Group . . . 194
3 Hayano Group . . . 196
4 Sakurai Group . . . 197
5 Wimmer Group . . . 198
6 Komamiya group . . . 199
7 Aihara-Yokoyama Group . . . 200

8 Asai group . . . 201
9 Miyashita Group . . . 202
10 Ogata Group . . . 203
11 Tsuneyuki Group . . . 204
12 Todo Group . . . 205
13 Katsura Group . . . 206
14 Fujimori Group . . . 207
15 Hasegawa Group . . . 208
16 Fukuyama Group . . . 209
17 Okamoto Group . . . 210
18 Shimano Group . . . 211
19 Takagi-Kitagawa Group . . . 212
20 Hayashi Group . . . 213
21 Theoretical Astrophysics Group . . . 213
22 Murao Group . . . 215
23 Ueda Group . . . 216
24 Yokoyama(J) Group . . . 217
25 Takase Group . . . 218
26 Sano Group . . . 219
27 Yamamoto Group . . . 220
28 Sakai (Hirofumi) Group . . . 221
29 Bamba-Nakazawa Group . . . 222
30 Gonokami, Yumoto and Ideguchi Group . . . 223
31 Ando Group . . . 224
32 Nose Group . . . 224
33 Higuchi Group . . . 225
34 Okada Group . . . 226
35 Furusawa Group . . . 227

III 2016 年度 物理学教室全般に関する報告 229

1 学部講義概要 231
1.1 2 年生 Aセメスター . . . 231
1.1.1 電磁気学 I : 早野 龍五 . . . 231
1.1.2 解析力学 : 横山 順一 . . . 232
1.1.3 量子力学 I : 福嶋 健二 . . . 232
1.1.4 物理実験学 : 福山 寛, 山本 智 . . . 232
1.1.5 物理数学 I ：常行 真司 . . . 233
1.1.6 物理数学 II : 村尾 美緒 . . . 233
1.2 3 年生 S セメスター . . . 233
1.2.1 電磁気学 II : 岡本 徹 . . . 234
1.2.2 量子力学 II : 立川 裕二 . . . 234
1.2.3 現代実験物理学 I ： （前半）北川 健太郎,（後半）樋口 秀男 . . . 234
1.2.4 流体力学 : 吉田 直紀 . . . 235
1.2.5 統計力学 I ： 桂 法称 . . . 235
1.2.6 計算機実験 ： 藤堂 眞治 . . . 235
1.3 3 年生 Aセメスター . . . 235
1.3.1 物理数学 III: 上田 正仁 . . . 235
1.3.2 量子力学 III : 諸井 健夫 . . . 236
1.3.3 固体物理学 I : 小形 正男 . . . 236

1.3.4 現代実験物理学 II : 駒宮 幸男, 浅井 祥仁 . . . 236
1.3.5 電磁気学 III : 安東 正樹 . . . 236
1.3.6 生物物理学 : 能瀬 聡直, 岡田 康志 . . . 236
1.3.7 統計力学 II : 宮下 精二 . . . 237
1.4 4 年生 S セメスター . . . 237
1.4.1 場の量子論 I : 松尾 泰 . . . 237
1.4.2 サブアトミック物理学 : Kathrin Wimmer . . . 237
1.4.3 一般相対論 : 須藤 靖 . . . 237
1.4.4 宇宙物理学: 中澤 知洋 . . . 238
1.4.5 プラズマ物理学 : 江尻 晶 . . . 238
1.4.6 固体物理学 II : 長谷川 修司 . . . 239
1.4.7 量子光学 : 酒井 広文 . . . 239
1.4.8 生物物理学特論 : 樋口 秀男, 酒井 邦嘉, 陶山 明 . . . 240
1.4.9 統計力学特論 : 常次 宏一 . . . 240
1.5 4 年生 A セメスター . . . 240
1.5.1 化学物理学 : 藤森 淳 . . . 240
1.5.2 素粒子物理学: 横山 将志 . . . 240
1.5.3 場の量子論 II : 渡利 泰山 . . . 241
1.5.4 原子核物理学 : 大塚 孝治 . . . 241
1.5.5 固体物理学 III : 高木 英典, 吉岡 孝高 . . . 241
1.5.6 電子回路論 : 勝本 信吾 . . . 241
1.5.7 現代物理学入門 : 馬場 彩, 林 将光 . . . 242
1.5.8 普遍性生物学 : 金子 邦彦, 古澤 力 . . . 242
1.5.9 系外惑星 : 須藤 靖, 生駒 大洋 . . . 243

2 各賞受賞者紹介 244
2.1 福山秀敏 名誉教授 . . . 244
2.2 吉田直紀 教授 . . . 244
2.3 林将光 准教授 . . . 244
2.4 桂法称 准教授 . . . 245
2.5 増田賢人 氏（須藤研) . . . 245
2.6 樊星 氏（浅井研) . . . 245
2.7 角田佑介 氏（大塚研、現 附属原子核科学研究センター) . . . 245
2.8 中島秀太 氏（上田研、現 京都大学) . . . 246
2.9 鎌田耕平 氏（横山順一研、現 アリゾナ州立大学) . . . 246
2.10 樽家篤史 氏（須藤研助教、現 京都大学基礎物理学研究所) . . . 246
2.11 平成 28 年度 理学系研究科 研究奨励賞・理学部 学修奨励賞 . . . 246

3 人事異動 248

4 役務分担 250

5 教室談話会 251

6 物理学教室コロキウム 252

7 金曜ランチトーク 253

I

研究室別 2016年度 研究活動報告

1 原子核・素粒子理論

1.1 原子核理論 (大塚・福嶋) 研究室

原子核物理学の理論研究では、原子核やハドロンに関係した広範囲の理論的研究を行っている。その活動は主に二つに分けられる。一つは多数の核子から成る量子多体系としての原子核の構造とそれを支配する動力学についての研究であり、一般に「原子核構造」と呼ばれている分野である。二つ目は、ハドロンの多体系の構造や運動を、量子色力学に基づいて研究する分野で、「ハドロン物理学」と呼ばれる。「原子核構造」は大塚孝治教授、阿部喬助教、博士研究員と大学院学生らによって、「ハドロン物理学」は福嶋健二准教授、山本新助教、博士研究員と大学院生らによって世界的にも先端を行く研究が活発に行われた。ここではそれらの活動と成果の概要を述べる。

1.1.1 原子核構造 (大塚研)

原子核構造と言われる分野には色々な問題が含まれるが、我々の研究室では

1) 不安定核の構造と核力
2) 現代的な殻模型計算や有効核力理論による原子核の多体構造の解明
3) 原子核の表面の運動や、時間に陽に依存する現象 (反応、融合、分裂)

のテーマを主に追求している。研究室のメンバーによる研究は後で述べられているので、ここでは背景と概略を述べ、共同研究者によって後で述べられている研究についてはほとんど省略する。ここで参照される文献、講演も後で出て来ないものが主である。

安定核とは、我々の身のまわりの物質を構成している原子核で、陽子の数と中性子の数はほぼ等しいか、中性子の方が少し多い程度である。名前のとおり、無限に長いか、十分に長い寿命を持っている。一方、これから話題にするエキゾチック核とは、陽子数と中性子数がアンバランスな、安定核から見れば特異（エキゾチック）なものである。アンバランスのために寿命が短く、不安定核と呼ばれることもある。短い寿命のために、実験の対象にするには人工的に作らなければならない。そこで稀少なものでもあり、英語では Rare Isotope (RI; 稀少アイソトープ) とも呼ばれる。エキゾチック核は、陽子数と中性子数の比のアンバランスのために、様々な特異な量子的性質を示すことが分かってきた。つまり、未知の性質や現象に満ち溢れたフロンティアでもある。その例として、魔法数があげられる。原子の場合と同じように原子核でも (陽子或は中性子の数としての) 魔法数があり、構造上決定的な役割を果たす。魔法数は 1949 年のメイヤー・イェンゼンの論文以来、安定核では 2, 8, 20, 50, 82, 126 という決まった数であった。しかし、不安定核の殻構造 (一粒子軌道エネルギーのパターン) は陽子や中性子の数によって変わり (殻進化と言う) 、不安定核での魔法数は安定核のそれとは異なることが最近判明しつつある。その原因は核力のスピン・アイソスピン依存性、特にテンソル力のそれによるものが大きい、ということも 2005 年頃から分かってきた。これは我々の研究室から発信された予言であり、その影響する範囲の広さとインパクトの大きさから世界の原子核研究に明確な指針を与えてきた。それを受けて、2010 年 1 月に Phys. Rev. Lett. に掲載された論文は特に重要な 2% に入る論文として Viewpoint 紹介論文に選ばれた。この研究成果は今後の核構造論研究の方向性を左右し、進める原動力となり、世界各地でそれに関する実験が多く行われている。最近の特筆できる成果としては、以上のメカニズムに基づき我々が予言した魔法数 34 がカルシウム 54 の原子核で実現していることが、理研の重イオン加速器 RIBF での実験で見つかった事が挙げられ、それは 2013 年に雑誌 Nature に論文発表された。

核子の間には 2 体力だけでなく、3 体力も働く。テンソル力に加えて、3 体力が不安定核の殻構造、魔法数、ドリップライン (存在限界) に特徴的な効果を及ぼすことをやはり我々のグループが見つけた。藤田-宮沢 3 体力は 50 年前からその存在が知られている。バリオンの一つであるデルタ粒子に核子が転換されるプロセスに起因するものである。この 3 体力が多体系に及ぼす効果はほとんど研究されて来なかった。我々は、その力の効果の中に、強いモノポール斥力があることを発見した。その定量的な評価は伝統的な π 中間子ーデルタ粒子結合からもできるし、有効場の理論などの核力の最近の研究によっても調べられ、似た結果を出す。計算の詳細にはよらずに、極めて特徴的な効果を生むことが示せるので、不安定核の構造の (中性子数などの変化の関数としての) 進化に新しいパラダイムを提供するものとして注目されつつある。このように、核力の果たす役割の重要性が改めて認識され直している。

原子核内で働く有効核力に関する理論研究も進めており、EKK 法という新しい方法に基礎を置いた研究を進め [9]、殻構造が変化していくエキゾチック核ではその研究は特に重要である。今後の大きな発展も期待されており、上述の 3 体力も含め、カイラル摂動論に基づく核力から多体問題に使える有効核力を導く研究も精力的に行っている。

我々が 1994 年頃からオリジナルな理論手法として提唱・発展させてきたモンテカルロ殻模型を中心にした研究も展開している。この方法は原子核に於ける量子多体系の解法における大きなブレークスルーとなり、不安定核攻略の重要な武器である。この手法により、多数の一粒子軌道からなるヒルベルト空間に多数の粒子を入れて相互作用させながら運動させる事が可能になった。殻構造がどんどん変わって

いく不安定核では特に重要になっており、世界の 10 箇所以上のグループと、それぞれの研究対象である原子核に関して理論計算を受け持って共同研究をしている。多くの新しい知見が得られており、中性子数が 18 や 19 の原子核でも、不安定核であればN＝20 の魔法数構造が普遍的に壊れていることを示した。これは旧来の平均ポテンシャル描像や Warburton らの「Island of Inversion」模型では理解できないもので、重要なものである。さらに、通常の考えでは二重閉殻原子核のはずの ^{42}Si がオブレートに大きく変形していることなども示した。最近の大きな成果としては、テンソル力による殻進化が一つの原子核の中でも起こることを示したことである。これは第 2 種殻進化（Type II shell evolution）と呼ばれ、形の共存現象などに大きな影響を与える [4, 7]。

また、モンテカルロ殻模型は多数の核子がコヒーレントに運動する集団運動の微視的な解明を、平均場理論の壁を越えて行うことも可能にしている。モンテカルロ殻模型を第一原理計算に使う研究も本格的に進行している。同時に、計算機用プログラムを並列計算機用に大幅に改良し、又、外挿による厳密解の予知も行えるようになりつつある。それらによる、スーパーコンピューターによる計算を行い、次世代スパコンでのさらに大きな計算に備えている。ニュートリノと原子核の反応なども引き続き研究の対象であり、天体核現象への応用を行っている。

従来型の直接対角化による殻模型計算において、計算機技術上、及び、並列計算アルゴリズム上のブレークスルーがあり、ここ数年、計算可能な最大次元数が 10 億程度に止まっていたのが、一気に 1000 億にまで拡大した。それにより、質量数 100 近辺の原子核の構造解明が進みつつある。従来型の計算は計算時間が次元の指数関数で増大するので、ここで述べたブレークスルーの効用は計算限界が質量数で 20 程度先に延びることになり、その範囲内ではモンテカルロ殻模型よりも有用である。限界の先はモンテカルロ殻模型を使うことになる。一方、従来型の計算方法でも、二重ベータ崩壊核行列要素など新たな物理量の計算により [15]、特に実験データの解析を共同で行った研究もある。

原子核には表面が球形から楕円体に変形し、楕円体に固定されて回転したり、変形の度合が時間とともに変化する振動が起こったりする。これらには多数の核子がコヒーレントに関与しているので集団運動と呼ばれる。集団運動と表面の変形は密接に関係しており、核子多体系の平均場理論によって記述される。一方、集団運動をボソンによって記述する相互作用するボソン模型も成功を収めてきた。前者は、核子系から原子核の固有座標系での密度分布は出しやすいが、励起状態のエネルギーなどは出しにくい。後者は現象論的であるが、励起エネルギーなどは実験をよく説明するものを出せる。この 2 つを結びつける方法を考案し、その研究は当グループ出身者によって発展されている。これにより、相互作用するボソン模型に予言能力が付与されて実験のない不安定核への応用が可能になり、また、平均場理論との関連があきらかになって理解の深化が可能になるなど、発展の道が開かれた。

これらとは別に、核子間の有効核力から集団運動状態を直接導く量子多体計算が可能になって、そこでの量子自己組織化の新たな概念を実証しつつある [32, 33, 37, 55]。このように、原子核物理学における当初からの使命であった、原子核集団運動の核子多体系としてのより完全な解明に近づきつつある。また、様々な実験との共同研究も推進している [3, 5, 6, 7, 8]。

軽い核でのモンテカルロ殻模型による第一原理計算

近年の計算機性能の向上と核子多体系における数値計算手法の発展により、現実的核力を用いた核子多体系における第一原理計算が実行可能となった。しかしながら、閉殻芯を仮定しない殻模型などに代表される第一原理手法による大規模数値計算は、現在のスーパーコンピュータをもってしても、その適用領域は軽い核の領域か中重核でも閉殻近傍に限られる。そこで、従来の閉殻芯を仮定する殻模型計算において、より重い核へと適用領域を広げることに成功したモンテカルロ殻模型を第一原理手法のひとつである閉殻芯を仮定しない殻模型へと応用する試みを行っている。今年度は、これまでと同様に p, sd 殻核領域の原子核を主に対象として、さらに計算規模を広げた計算を京コンピュータなどで行った。相互作用は、これまで使ってきた現象論的に 3 体力の効果を取り込むように逆散乱理論を用いて構築された JISP16 という 2 体核力だけでなく、カイラル有効場の理論に基づいて構築された核力やその有効核力を用いた。さらに、3 体核力を 2 体有効核力に近似して取り入れた計算にも着手した。物理量については、主に基底状態のエネルギーを系統的に解析し、その模型空間無限大への外挿などを試みた。これらの成果に関しては、国内での会議で口頭発表を行った。[44, 56] 今後、3 体核力や連続状態との結合をモンテカルロ殻模型に導入し、京コンピュータなどを用いてさらに重い原子核や中性子過剰核などのエキゾチック原子核へと適用できれば、この閉殻芯を仮定しないモンテカルロ殻模型は現実的核力に基づいた原子核における多体構造の系統的理解へ向け有力な手法のひとつになりうると期待される。

Double-beta decay and Dark Matter scattering off nuclei

- Neutrinoless double-beta decay

The nuclear matrix elements of neutrinoless double-beta decay have been studied. An invited review article on the status and future of calculations for the nuclear matrix elements have been completed and published in Reports on Progress in Physics [10]. The main results of this work are summarized in a conference prodeedings [14] and have been presented in several international conferences [18, 19, 38, 40, 43] and an invited seminar [58].

- Dark Matter scattering off nuclei

The possible interaction of Dark Matter particles with nuclei was explored in detail in the case of general spin-independent scattering [11]. A novel contribution of Dark Matter coupling to two nucleons was obtained, and an analysis of Dark Matter direct detection experiments was proposed. The main results of this work are summarized in a conference prodeedings [14] and have been presented in several international conferences [19, 39, 41, 42] and an invited seminar [58].

ユニタリ模型演算子法による中重核の基底状態

原子核物理の基本的な目標の一つは核力に基づいて原子核の構造・反応を理解する事である。近年、量子多体問題の計算手法や計算機技術の発展により、この目標に向けた理論的なアプローチが可能になりつつある。我々が用いる計算手法、ユニタリ模型演算子法（UMOA）は閉殻近傍の原子核に適用可能な第一原理的な数値計算手法の一つである。2016 年度は、主に広い質量領域にわたって系統的に基底状態の UMOA 計算を行った。計算にはカイラル有効場の理論による相互作用を相似くりこみ群 (SRG) 変換した 2 体力を使用した。得られた結合エネルギーと半径は核子数の増加とともに実験値からのずれが大きくなっていき、SRG 変換の際に導入されるパラメータに依存することと合わせると、実験値を再現するためには少なくとも 3 体力の導入が必要である。ただし、陽子数-中性子数の非対称性に起因する量は SRG 変換のパラメータよらず一意に決定可能で、特に中性子スキン厚は実験値の傾向とも近いことが分かった。これらの内容を学会などで発表し [20, 21, 45, 46, 48, 59]、博士論文にまとめた [16]。3 体力を直接的に取り扱うために、これまでの UMOA の枠組みを拡張して 3 体クラスター項を明示的に取り扱い、さらに 3 体相関演算子を導入した。新しい UMOA の枠組みのテスト計算として、^{4}He の基底状態エネルギーを計算し、他の第一原理的な数値計算結果と良く一致し、3 体相関の影響が小さいことを示した。[22, 47]

カイラル有効場の理論に基づく核力と、殻模型有効相互作用の基本的性質

原子核の構造や諸性質を議論する上で不可欠となるのが、核力に対する理解である。近年、カイラル有効場の理論に基づく核力の記述や、それを出発点とした軽い核や二重閉殻近傍の原子核における第一原理計算の発展には目覚ましいものがある。しかしながら、質量数の増加に伴う爆発的な計算コストの上昇を鑑みると、中重核領域における系統的な原子核を記述する上では、第一原理計算には適用限界がある。こうした領域では、閉殻芯を仮定した殻模型計算が非常に強力な枠組みのひとつとなる。殻模型計算のインプットとして必要になるのが、考えたい系に適した模型空間上での有効核力 (殻模型有効相互作用) である。カイラル有効場の理論に基づく 2 体力および 3 体力を応用し、多体摂動論に基づく殻模型有効相互作用を導出し、比較的計算が簡単な質量領域の原子核に適用した。計算の結果、少なくとも *sd* 殻領域では、In-midium similarity renormalization group の手法に基づく殻模型有効相互作用と同程度の記述能力を有した有効核力が得られ、核力に基づいた中重核の理解に向けて研究が進行している。また、これらの研究成果については、国内外の学会講演やセミナーで精力的に紹介した [24, 50, 51, 52, 60]。

一方、経験的な有効相互作用に基づく中性子過剰核におけるベータ崩壊の記述に関しても並行して研究を行い、半減期や遅発中性子放出確率等の実験データを高精度に記述した。実験と共著で論文を投稿するとともに、講演等も行った [13, 23, 49]。

また、3 年間に渡り実験が継続した京都大学の卒業研究の成果を投稿し [12]、京都大学の総長賞を受賞した [1]。

＜**受賞**＞

[1] 平成 28 年度京都大学総長賞 物理科学課題研究 P4

[2] 平成 28 年度東京大学理学系研究科研究奨励賞 吉田聡太

＜**報文**＞

(原著論文)

[3] C. Babcock *et al.*, “Quadrupole moments of odd-A $^{53-63}$Mn: Onset of collectivity towards $N = 40$”, Phys. Lett. B 760, 387(2016).

[4] T. Togashi, Y. Tsunoda, T. Otsuka, and N. Shimizu, “Quantum Phase Transition in the Shape of Zr isotopes”, Phys. Rev. Lett. **117**, 172502 (2016).

[5] C. Kremer *et al.*, “First Measurement of Collectivity of Coexisting Shapes Based on Type II Shell Evolution: The Case of 96Zr” Phys. Rev. Lett. **117**, 172503 (2016).

[6] H. Heylen *et al.*, “Changes in nuclear structure along the Mn isotopic chain studied via charge radii”, Phys. Rev. C **94**, 054321 (2016).

[7] A. I. Morales *et al.*, “Type II shell evolution in A = 70 isobars from the N >= 40 island of inversion”, Phys. Lett. B 765, 328 (2016).

[8] N. Paul *et al.*, “Are There Signatures of Harmonic Oscillator Shells Far from Stability? First Spectroscopy of ^{110}Zr”, Phys. Rev. Lett. **118**, 032501 (2017).

[9] N. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M.H. Jensen, K. Takayanagi,and T. Suzuki, “Exotic neutron-rich medium-mass nuclei with realistic nuclear forces”, Phys. Rev. C **95** 021304(R) (2017).

[10] J. Engel, and J. Menéndez, ”Status and future for nuclear matrix elements for neutrinoless double-beta decay: a review”, Rep. Prog. Phys. **80** 046301 (2017).

[11] M. Hoferichter, P. Klos, J. Menéndez, and A. Schwenk, "Analysis strategies for general spin-independent WIMP-nucleus scattering", Phys. Rev. D **94** 063505 (2016).

[12] T. Kawabata *et al.*, "Time-Reversal Measurement of the p-Wave Cross Sections of the ^{7}Be$(n,\alpha)^{4}$He Reaction for the Cosmological Li Problem", Phys. Rev. Lett. **118**, 052701 (2017).

[13] V. Tripathi *et al.*, "β decay of ^{38,40}Si ($T_z = +5, +6$) to low-lying core excited states in odd-odd ^{38,40}P isotopes", Phys. Rev. C **95**, 024308 (2017).

(会議抄録)

[14] J. Menéndez, "Nuclear physics insights for new-physics searches using nuclei: neutrinoless double-beta decay and dark matter direct detection", EPJ Web of Conf. **137** 08011 (2017).

(国内雑誌)

(出版物)

[15] 大塚孝治, 「２重ベータ崩壊核行列要素と大規模殻模型計算」, 雑誌「パリティ」２０１７年１月号.

(学位論文)

[16] 宮城宇志, "Properties of the many-nulceon system in the unitary-model-operator approach", 博士論文.

[17] 吉田聡太, "Nuclear shell model based on chiral effective field theory", 修士論文.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[18] J. Menéndez, "New insights on double-beta decay matrix elements", International workshop on Neutrino Nuclear Responses for Double Beta Decays and Astro-Neutrino Interactions (NNR16), Osaka (Japan), September 29-30, 2016.

[19] J. Menéndez, "Nuclear structure for double-beta decay and dark matter searches", International workshop on Double-beta decay and underground science (DBD16), Osaka (Japan), November 8-10, 2016.

[20] T. Miyagi, T. Abe, R. Okamoto, M. Kohno, and T. Otsuka, "Single-particle energies of oxygen isotopes in the unitary-model-operator approach", Nuclei in the Cosmos XIV School, Niigata, Japan, June, 2016.

[21] T.Miyagi, T. Abe, R. Okamoto, M. Kohno, and T. Otsuka, "Ground-state energies of oxygen isotopes in the unitary-model-operator approach", The 15th CNS International Summer School, Wako, Japan, August, 2016.

[22] T. Miyagi, T. Abe, R. Okamoto, M. Kohno, and T. Otsuka, "Towards the inclusion of three-body forces in the unitary-model-operator approach", TRIUMF workshop on Progress in Ab Initio Techniques in Nuclear Physics, Vancouver, Canada, February-March, 2017.

[23] S. Yoshida, Y. Utsuno, N. Shimizu, T. Otsuka, "Shell-model description of beta-decay in *sd-pf* shell region", The 15th CNS International Summer School (CNSSS16), RIKEN, Saitama, Japan, August 24 - 30, 2016.

[24] S. Yoshida, "Shell evolution based on chiral nuclear forces", Progress in Ab Initio Techniques in Nuclear Physics, TRIUMF, Vancouver, BC Canada, February 28 - March 3, 2017.

招待講演

[25] T. Otsuka,"Is the atomic nucleus a single quantum liquid?", Mol BriX Workshop, Mol, Belgium, May 9, 2016.

[26] T. Otsuka,"Shell evolution and spectroscopic factors", DREB 2016, Saint Mary's University, Halifax, Canada, July 11, 2016.

[27] T. Otsuka, "Shape Coexistence, Shape Transition and Nuclear forces", Nuclear Structure 2016 conference, Hilton Hotel, Knoxville, Tennessee, USA, July 28, 2016.

[28] T. Otsuka,"DBD NMEs and the modern shell model", International Workshop on Neutrino Nuclear Responses for Double Beta Decays and Astro-Neutrino Interactions (NNR16), Osaka, Japan, September 30, 2016.

[29] T. Otsuka, "Nuclear Shapes in Monte Carlo Shell Model calculations", Correlations in Nuclei Symposium, Technical University Munich, Munich, Germany, November 3, 2016.

[30] T. Otsuka, "Theory of magic numbers", ANPhA Symposium, Tohoku University, Sendai, Japan, November 25, 2016.

[31] T. Otsuka, "Shell evolution, shape transition and shape coexistence with realistic nuclear forces", Int. Workshop on Shapes and Symmetries in Nuclei: From Experiment to Theory (SSNET' 2016) CNRS, Gif sur Yvette, France, November 8, 2016.

[32] T. Otsuka, "Quantum Self-Organization and Nuclear Shapes", 40th ASRC International Workshop "Experimental and Theoretical Advances in Fission and Heavy Nuclei", Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Japan, December 12, 2016.

[33] T. Otsuka, "Quantum Self-Organization and its implication in nucleosynthesis", International Workshop XLV on Gross Properties of Nuclei and Nuclear Excitations Neutron star mergers: From gravitational waves to nucleosynthesis Hirschegg, Austria, January 18, 2017.

[34] T. Otsuka, “Shell model, innovation for the future”, NUSTAR conference 2017, GSI, Darmstadt, March 1, 2017.

[35] T. Otsuka, “Ab initio Monte Carlo Shell Model calculations on Be and C isotopes”, 11th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics, the University of Napoli Federico II Napolli, Italy, May 25, 2016.

[36] T. Otsuka,“Shell Evolution, Shape Transition And Shape Coexistence With Realistic Nuclear Forces”, International Nuclear Physics Conference (INPC2016), Adelaide Convention Centre. Australia, September 13, 2016.

[37] T. Otsuka, “Quantum Self Organization and Nuclear Dynamics”, First Tsukuba-CCS-RIKEN joint Workshop on Microscopic Theories of Nuclear Structure and Dynamics, Tsukuba (Japan), December 12-16, 2016.

[38] J. Menéndez,“Nuclear matrix elements for neutrinoless double-beta decay”, Fudan-Tokyo-Yonsei workshop on particle and nuclear physics, Shanghai (China), April 14-15, 2016.

[39] J. Menéndez,“Leading corrections to spin-independent scattering and strategies for spin-independent analyses”, Workshop on Dark Matter Interpretations for Direct Detection, Oxford (United Kingdom), August 9, 2016.

[40] J. Menéndez,“Status and future of neutrinoless double-beta decay nuclear matrix elements”, XIIth Quark Confinement and the Hadron Spectrum conference (CONF12), Thessaloniki (Greece), August 28-September 4, 2016.

[41] J. Menéndez,“Chiral effective field theory for dark matter detection”, XIIth Quark Confinement and the Hadron Spectrum conference (CONF12), Thessaloniki (Greece), August 28-September 4, 2016.

[42] J. Menéndez, “Nuclear structure aspects of dark matter direct detection”, KITP workshop on Symmetry Tests in Nuclei and Atoms, Santa Barbara (United States), September 19-23, 2016.

[43] J. Menéndez, “Towards double-beta decay matrix elements with theoretical uncertainties”, First Tsukuba-CCS-RIKEN joint Workshop on Microscopic Theories of Nuclear Structure and Dynamics, Tsukuba (Japan), December 12-16, 2016.

(国内会議)

一般講演

[44] 阿部喬, P. Maris, 大塚孝治, 清水則孝, 宇都野穣, J. P. Vary, “カイラル有効場の理論による核力を用いた軽い核でのモンテカルロ殻模型による第一原理計算”, 日本物理学会秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 23 日 (9 月 21-24 日).

[45] 宮城宇志, 阿部喬, 岡本良治, 河野通郎, 大塚孝治,「ユニタリ模型演算子法における 2 重魔法数原子核の 1 粒子エネルギー」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 木花キャンパス, 2016 年 9 月.

[46] 宮城宇志, 阿部喬, 岡本良治, 河野通郎, 大塚孝治,「ユニタリ模型演算子法による中重核の第一原理的な計算」, 素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム, 筑波大学, 東京キャンパス, 2017 年 2 月.

[47] 宮城宇志, 阿部喬, 岡本良治, 河野通郎, 大塚孝治,「3 体力の効果を取り込んだ UMOA 計算に向けて」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学, 豊中キャンパス, 2017 年 3 月.

[48] 宮城宇志, 阿部喬, 岡本良治, 河野通郎, 大塚孝治,「ユニタリ模型演算子法による重い核の計算」, 基研研究会「核力に基づく核構造、核反応物理の展開」, 基礎物理学研究所, 京都大学, 2017 年 3 月.

[49] 吉田聡太, 宇都野穣, 清水則孝, 大塚孝治, “殻模型による $sd-pf$ 殻領域の中性子過剰核におけるベータ崩壊の記述”, 日本物理学会秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 20-24 日.

[50] 吉田聡太, 角田直文, 阿部喬, 大塚孝治, 河野通郎, 鈴木俊夫, “カイラル有効場の理論に基づく 3 体力のテンソル成分の効果”, 日本物理学会秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 20-24 日.

[51] 吉田聡太, 宮城宇志, 阿部喬, 大塚孝治, 角田直文, 清水則孝, 河野通郎, “有効 2 体化 3 体力の効果を含む、中重核領域における殻模型計算”, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学, 2017 年 3 月 17-20 日.

[52] 吉田聡太, 宮城宇志, 阿部喬, 大塚孝治, 角田直文, 清水則孝, 河野通郎 “カイラル有効場の理論に基づく核力と殻模型”, 核力に基づく核構造、核反応理論の展開, 京都大学基礎物理学研究所, 2017 年 3 月 27-29 日.

招待講演

[53] 大塚孝治, “坂井 quasi band とその現代に至る意義”, 坂井光夫先生追悼研究会, 学士会館, 2016 年 7 月 25 日.

[54] 大塚孝治, “アボガドロ級計算で見えてきた原子核の未知の世界”, 第 8 回「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム—発展する計算科学と次世代の計算機—, 筑波大学大学会館国際会議室, 2016 年 10 月 17 日.

[55] 大塚孝治, “量子自己組織化と核力 (Quantum Self-Organization and Nuclear Forces)”, 基研研究会「核力に基づく核構造・核反応物理の展開」, 京都大学基礎物理学研究所, 2017 年 3 月 29 日 (3 月 27-29 日).

[56] 阿部喬, “Recent progress and future perspectives in the no-core Monte Carlo shell model”, 基研研究会「核力に基づく核構造・核反応物理の展開」, 京都大学基礎物理学研究所, 2017 年 3 月 27 日 (3 月 27-29 日).

(セミナー)

[57] T. Otsuka, “Quantum Phase transition in Zr isotopes and nuclear forces”, Liverpool University, Liverpool, England, June 22, 2016.

[58] Javier Menéndez, “Towards ab-initio nuclear structure, spectroscopy and matrix elements along the nuclear chart”, (University of Surrey, United Kingdom, August 11, 2016)

[59] T. Miyagi, T. Abe, R. Okamoto, M. Kohno, and T. Otsuka, ”Nuclear ab initio calculations from the unitary-model-operator approach”, Osaka, Japan, November, 2016.

[60] Sota Yoshida, “The application of chiral NN and NNN force into valence shell-model”, TRIUMF, Vancouver, BC Canada, March 7, 2017.

1.1.2 理論ハドロン物理研究室

ハドロン (核子、中間子、及びその励起状態) はクォークとグルーオンの束縛状態であり、量子色力学 (QCD) がその相互作用を支配している。QCD はシンプルなラグランジアンで記述されるが、その非摂動性のために複雑で興味深い物性を示す。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、高電磁場中のクォーク物質の物性、実時間量子シミュレーションなどについて、QCD の量子多体問題という観点から研究を行っている。

Lefschetz thimble 上の積分を用いた複素 Langevin 法の改善

複素 Langevin 法は符号問題の解決策の有力な候補の一つである。しかし作用の虚部が大きく符号問題が厳しい場合、低次元の簡単な模型でさえも正しい答えを得ることができない。一方 Lefschetz thimble 上の積分もまた符号問題の解決策の候補の一つであり、複素 Langevin 法よりも数学的に強固な地盤を持つが、数値計算の負荷が非常に大きくなるという問題がある。そこで我々は、Lefschetz thimble の構造を複素 Langevin 法に取り込む処方を用いて、ゼロ次元の toy-model である quartic 模型の複素 Langevin 法の収束性を改善した。

Enhancement of the Schwinger mechanism, chiral magnetic effect, and magnetic catalysis in inhomogeneous electromagnetic fields

The enhancement of the Schwinger mechanism, and in turn the chiral magnetic effect from the generated chirality, in spatially inhomogeneous magnetic fields was found to manifest itself as a spontaneous symmetry breaking, and hence an enhancement of the chiral condensate. Several sample spatially modulated magnetic fields were investigated including a Sauter-like pulse, a 1-D Coulomb-like field, and an inverted field. The inverted field was found to quadratically shift the fermion mass term yielding significant enhancements, as aforementioned, which could even compete with the “dynamically assisting” enhancement in temporally inhomogeneous electric fields [5].

縦膨張系におけるカイラル運動学的理論

Boltzmann 方程式にフェルミオンのスピン構造に由来する Berry 曲率を取り入れたカイラル運動学的理論は、アノマリーの効果を系統的に含むために非平衡下でのアノマリー輸送現象への有効なアプローチとして現在積極的に研究が進められている。本研究ではこの理論を重イオン衝突実験で実現するような縦膨張系へと適用し、縦膨張に特有なカレント成分と、非自明な粒子数密度保存の関係を得た [43]。

格子 QCD シミュレーションによるダイクォーク状態の探索

ダイクォーク描像はエキゾチックハドロンを自然に説明する代表的なシナリオの 1 つである。現象論的モデルによるとクォーク間の引力は、good diquark と呼ばれるカラー反三重項、フレーバー反対称、スピン一重項の正パリティチャネルで大きくなり、またこのチャネルでのダイクォーク質量が最も軽いとされている。本研究では、静的クォークに 2 つの軽いクォークを組み合わせてゲージ不変なバリオン演算子を構成することで、good diquark とその他のチャネルでのダイクォークの質量差を計算した。加えて、クォークの密度－密度相関関数を計算することでクォーク間の引力のクォーク間距離依存性を計算した。その結果、そのような現象論的予言を格子 QCD 計算が支持することがわかった。

相対論的フェルミオン系に対する境界の効果

回転系では相対論的因果律のために熱力学的極限が正当化されず、粒子は必ず有限のエネルギーギャップを持つ。ここで回転が有効的な密度効果に見なされることに着目すると、このギャップはちょうど回転がマクロな物理量に影響を与えるかどうかの閾値に相当する。本研究では、フェルミオンに関する適切な境界条件を課すことで、ゼロ温度極限における熱力学量には回転の効果が決して現れないことを示した。これにより、これまで議論されていた「回転系のカイラル相転移」に対しても、こうした有限サイズ効果が重要であることを強く訴える結論が導かれた [11]。

Leptogenesis in Chern-Simons modified gravity

We provided a constrain for the $\dot{\theta}$ parameter in Chern-Simons (CS) modified gravity by observa-

tions on matter-antimatter asymmetry. CS modified gravity can be thought as a low energy limit of a more fundamental theory of quantum gravity. It has also been shown to lead to a theory with torsion, particularly, in the presence of fermions this torsion corrections result into new two-fermion point interactions. This interaction, mediated by the axial current, was studied in the problem of neutrino-antineutrino asymmetry during the inflationary period. The net particle per helicity was calculated and translated into baryon asymmetry, this quantity dependent on the free $\dot{\theta}$ parameter was finally constrained by WMAP observations on baryogenesis.

Phases of field-theoretic description of a perfect fluid

We studied further consequences of our formulation on the field theory of a perfect fluid. Our formalism allows for non-conservation of the fluid's rest mass mediated by Clebsch potential field interactions. We have found that the Lagrangian density governing the dynamics of the fluid contains four phases and incompressible states, two of which are stable. These novel phases were presented on [27, 28] are to be submitted for publication.

運動論の非平衡ダイナミクスにおける不動点とフロー解析

量子多体系の熱化の過程は長らく解明されていない問題である。特に第一原理計算による場の量子論の時間発展の記述は、計算量の問題もさることながら根本的な問題も抱えている。熱化を物理的に理解するには、系の非平衡ダイナミクスを本質的に記述する少数の変数を見出すことが必要である。場の値が結合定数に比べて十分小さく揺らぎが支配的であるとき、系のダイナミクスはボルツマン方程式で記述される。特に空間的一様性と運動量空間での等方性を課して単純化したボソン・ボルツマン方程式を本研究では解析した。初めに、時間発展の不動点 (方程式の解) を調べた。平衡解としてボース・アインシュタイン分布と、その高密度における漸近形であるレイリー・ジーンズ型の分布と、低密度における漸近形であるマクスウェル・ボルツマン分布が知られている。他に非自明な不動点としてコルモゴロフ・ザハロフスペクトルが、高密度極限と低密度極限のそれぞれについて 2 種類ずつ存在する。また、本研究では自己相似な時間発展する形式解の存在を指摘した。この解は一般には高密度極限と低密度極限でそれぞれ存在する漸近解だが、他の不動点との相互関係により特定の条件の下で厳密解となることを示した。これらの不動点を含むように分布関数を媒介変数表示し、系のダイナミクスを媒介変数の時間発展として捉え直す。これにより媒介変数の空間上でくりこみ群フローと同様の解析が可能になる。つまり、各不動点の周りの時間発展の構造が可視化され、物理的な議論が容易になる。結果として、コルモゴロフ・ザハロフ解は一次元アトラクターまたはリペラーの端点となることが分かった。また最終的なフローの行き先によって領域を分割することによって、複数の非自明な臨界線が存在することも分かった。

Chiral kinetic theory from the quantum field theory

Chiral kinetic theory (CKT) is an effective kinetic theory for chiral fermions. Although several different groups have already obtained this kinetic theory from different approaches, the general derivation for more general systems beyond local equilibrium is still missing. On the other hand, non-manifestation of Lorentz invariance in CKT has been widely discussed by several papers. It has not been fully understood from quantum field theory. Thirdly, the collision term in CKT needs to be systematically incorporated in this framework. In our work, we obtained the CKT through the quantum field theory, and studied the non-manifestation of Lorentz invariance. We also studied the collision term in CKT.

格子 QCD によるベリー位相の計算

ベリー位相は、量子系におけるトポロジーを記述する普遍的概念である。ハドロン物理学においても、カラーの閉じ込めやカイラル磁気効果などを説明するためにベリー位相の概念が用いられてきた。格子 QCD によってベリー位相を計算する手法を定式化し、その有効性をテスト計算で確認した [4]。

トポロジカル相転移の量子モンテカルロ計算

電子間のクーロン相互作用がトポロジカル絶縁体に与える影響を、量子モンテカルロシミュレーションによって解析した。同様に、クーロン相互作用が引き起こすワイル半金属が絶縁体への相転移を、量子モンテカルロシミュレーションによって解析した [9]。

＜報文＞

(原著論文)

[1] S. Benic, A. Yamamoto, "Quantum Monte Carlo simulation with a black hole", Phys. Rev. D **93**, 094505 (2016).

[2] R. Fukuda, A. Nakamura, S. Oka, "Canonical approach to finite density QCD with multiple precision computation", Phys. Rev. D **93**, 094508 (2016).

[3] H.-L. Chen, K. Fukushima, X.-G. Huang, K. Mameda, "Analogy between rotation and density for Dirac fermions in a magnetic field", Phys. Rev. D **93**, 104052 (2016).

[4] A. Yamamoto, "Berry phase in lattice QCD", Phys. Rev. Lett. **117**, 052001 (2016).

[5] P. Copinger, K. Fukushima, "Spatially assisted Schwinger mechanism and magnetic catalysis", Phys. Rev. Lett. **117**, 081603 (2016); (E) **118**, 099903 (2017).

[6] K. Fukushima, Y. Hidaka, "Magnetic shift of the chemical freeze-out and electric charge fluctuations", Phys. Rev. Lett. **117**, 102301 (2016).

[7] K. Mameda, A. Yamamoto, "Magnetism and rotation in relativistic field theory", Prog. Theor. Exp. Phys. 093B05 (2016).

[8] Y. Abe, K. Fukushima, "Analytic studies of the complex Langevin equation with a Gaussian ansatz and multiple solutions in the unstable region," Phys. Rev. D **94**, 094506 (2016).

[9] A. Yamamoto, T. Kimura, "Quantum Monte Carlo simulation of topological phase transitions", Phys. Rev. B, **94**, 245112 (2016).

[10] K. Fukushima, "Evolution to the quark-gluon plasma", Rept. Prog. Phys. **80**, 022301 (2017).

[11] S. Ebihara, K. Fukushima, K. Mameda, "Boundary effects and gapped dispersion in rotating fermionic matter", Phys. Lett. B **764** (2017) 94.

[12] S. Benic, K. Fukushima, O. Garcia-Montero, R. Venugopalan, "Probing gluon saturation with next-to-leading order photon production at central rapidities in proton-nucleus collisions", JHEP **1701**, 115 (2017).

[13] S. Benic, K. Fukushima, "Photon from the annihilation process with CGC in the pA collision", Nucl. Phys. A **958**, 1-24 (2017).

(会議抄録)

[14] R. Fukuda, A. Nakamura, S. Oka, A. Suzuki, Y. Tanizaki, "Study of the sign problem in canonical approach", PoS **LATTICE2016**, 060 (2016).

[15] R. Fukuda, Ph. de Forcrand, "Searching for evidence of diquark states using lattice QCD simulations", PoS **LATTICE2016**, 121 (2016).

[16] A. Yamamoto, "Lattice QCD simulation of the Berry curvature", PoS **LATTICE2016**, 311 (2016).

[17] S. Pu, D. L. Yang, "Analytic Solutions of Transverse Magneto-hydrodynamics under Bjorken Expansion," EPJ Web Conf. **137**, 13021 (2017).

(国内雑誌)

[18] 福田龍太郎、「格子 QCD シミュレーションを用いた高密度 QCD の探索」、サイバーメディア HPC ジャーナル、大阪大学サイバーメディアセンター、No.6, 2016 年.

(学位論文)

[19] 福田龍太郎, "Canonical approach to finite density QCD", 博士論文.

[20] 豆田 和也, "Chiral symmetry and vacuum structure in rotating relativistic systems," 博士論文.

[21] 阿部雄哉、「ガウス型仮設解による複素ランジュバン法の安定性解析」、修士論文.

[22] P. Copinger, "Enhancement of the Schwinger Mechanism, Chiral Magnetic Effect, and Magnetic Catalysis in Inhomogeneous Electromagnetic Fields", 修士論文.

[23] 海老原周, "Anomaly-Induced Effect by Circularly Polarized Electric Fields", 修士論文.

＜**学術講演**＞

(国際会議)

一般講演

[24] A. Yamamoto: "Lattice QCD simulation of the Berry curvature", The XXXIV International Symposium on Lattice Field Theory, University of Southampton, Southampton, UK, July 24-30, 2016.

[25] R. Fukuda, Ph. de Forcrand: "Searching for evidence of diquark states using lattice QCD simulation", 34th International Symposium on Lattice Field Theory, University of Southampton, Southampton, UK, July 24-30, 2016.

[26] K. Mameda: "Novel chiral structure realized by rotation", XQCD 2016, Plymouth, UK, Aug. 1, 2016.

[27] P. Morales, T. Ariki: "Field Theory of the Perfect Fluid", International Conference on Particle Physics and Cosmology (COSMO-16), Ann Harbor, Michigan, USA, Aug. 8-12, 2016.

[28] P. Morales, T. Ariki: "Vacuum and negative-mass states of the perfect fluid", International Conference on Particle Physics and Cosmology (COSMO-16), Ann Harbor, Michigan, USA, Aug. 8-12, 2016.

招待講演

[29] K. Mameda: "Novel chiral structure realized by rotation", Fudan-Tokyo-Yonsei workshop on particle and nuclear physics, Shanghai, China, Apr. 14, 2016.

[30] K. Fukushima: "Magnetic shift of the chemical freezeout and electric charge fluctuations", Workshop on Magnetic Fields in Hadron Physics, Sao Paulo, Brazil, May 9, 2016.

[31] K. Fukushima: "Magnetic shift of the chemical freezeout and electric charge fluctuations", Critical Point and the Onset of Deconfinement 2016, Wroclaw, Poland, June 3, 2016.

[32] K. Fukushima: “Phase Diagram of QCD”, QCD Phase Structure III in CCNU Wuhan, Wuhan, China, June 9, 2016.

[33] K. Fukushima: “Holography for hot and dense magnetized quark matter”, 14th Workshop on Nonperturbative QCD, Paris, France, June 16, 2016.

[34] K. Fukushima: “Extreme Matter in Strong External Electromagnetic Fields”, Nuclear Physics School in Erice, Erice, Italy, Sep. 19, 2016.

[35] K. Fukushima: “Opportunities in Diquark Physics”, JAEA/ASRC Reimei Workshop, Inha, Korea, Oct. 24, 2016.

[36] K. Fukushima: “Quarkyonic matter as realized in a quantum percolation picture”, Quarkyonic Matter from Theory to Experiment, Wuhan, China, Oct. 27, 2016.

[37] K. Fukushima: “Worldline Instantons and Novel Phenomena in Inhomogeneous Magnetic Fields”, Gauge Topology: from lattice to colliders, Trento, Italy, Nov. 8, 2016.

[38] A. Yamamoto: “Quantum Monte Carlo simulation of the Berry curvature”, Topological Materials Science: Intensive-Interactive Meeting 2016, Keio University, Kanagawa, Japan, Nov. 17-18, 2016.

[39] K. Fukushima: “Chirality and vorticity in nontrivial geometry at finite temperature”, QCD in Finite Temperature and Heavy-Ion Collisions, New York, USA, Feb. 14, 2017.

(国内会議)

一般講演

[40] 福田龍太郎、岡将太郎：「カノニカル法に基づいた格子 QCD 計算による、有限温度、有限密度での QCD 相構造の解析」、JHPCN 第 8 回シンポジウム、THE GRAND HALL (品川)、2016 年 7 月 14 日.

[41] R. Fukuda: “Canonical approach to finite density QCD”, RIKEN summer school 2016, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, Sep. 9, 2016.

[42] 阿部雄哉、福嶋健二：“Semi-analytical study with the Gaussian complex Langevin method,” 日本物理学会第 72 回年次大会、宮崎大学、2016 年 9 月 23 日.

[43] 海老原周、福嶋健二：「縦膨張系でのカイラル運動論における異常スケーリング則」、日本物理学会 2017 年年次大会、大阪大学、2017 年 3 月 17-20 日.

[44] P. Copinger, K. Fukushima: “Spatially Assisted Schwinger Mechanism, Chiral Magnetic Effect, and Magnetic Catalysis,” JPS 72nd Annual Meeting, Osaka, March 17-20, 2017.

招待講演

[45] 福嶋健二：“Chiral Transport”, 熱場の量子論、理研、埼玉県、2016 年 8 月 22 日.

[46] 福嶋健二：「量子異常の異常な世界」, 東北大学、宮城県、2016 年 11 月 11 日.

[47] 山本新：「格子 QCD と非相対論系への応用」、研究会「第一回 量子スピン液体研究の新展開」、東京大学、2016 年 7 月 14-15 日.

[48] 山本新：“Lattice QCD with External Fields,” 離散的手法による場と時空のダイナミクス研究会 2016、静岡、2016 年 9 月 16-19 日.

(セミナー)

[49] R. Fukuda: “Canonical approach to finite density QCD”, Quantum Hadron Physics Seminar, RIKEN, Wako, Japan, May 10, 2016.

[50] P. Morales: “Field Theory of the Perfect Fluid”, RIKEN, Wako, Saitama, Japan, May 31, 2016.

[51] S. Ebihara: “Anomaly-Induced Effect by Circularly Polarized Electric Fields” （MPI-PKS、2016 年 6 月 21 日）

[52] K. Fukushima: “Photon as a probe to dense QCD media”, Heidelberg University, July 7, 2016.

[53] K. Fukushima: “Analytical studies of the Gaussian approximated complex Langevin equations and the sign problem”, University of Giessen, July 13, 2016.

[54] K. Fukushima: ”Some controversies on fermionic matter with vorticity”, Goethe University Frankfurt, Aug. 9, 2016.

[55] 山本新：“Lattice simulations under rotation and gravity” （慶応大学、2016 年 6 月 27 日）

[56] S. Pu: “Bjorken flow in relativistic magnetohydrodynamics” （東京大学、2016 年 11 月 25 日）

[57] 豆田和也：“Chiral symmetry and vacuum structure in rotating relativistic systems” （京都大学、2016 年 12 月 9 日）

1.2 素粒子論研究室

1.2.1 現象論

超対称模型の現象論

諸井は、横崎、柳田とともに、extra matter を含む超対称模型について研究した。そしてそのような模型において、Higgs 粒子の質量 125GeV が実現されるパラメータ領域におけるグルイーノ粒子の質量上限が、extra matter が存在しない場合と比べて著しく小さくなることを指摘した [1].

Bae, 永田は、Baer, Serce (Oklahoma 大) とともに、ILC におけるニュートラリーノ・チャージーノ質量の精密測定によって超対称標準模型のパラメーターを決定する見込みについて、またそれを通じて “自然な” 超対称スペクトルの証拠を掴みうる可能性について議論した [2]。

永田は、Baer, Savoy (Oklahoma 大), Barger (Wisconsin 大) とともに、“自然な” 超対称標準模型におけるスカラー・トップ質量の予言と、その探索可能性を議論した [3]。この結果、“自然な” 超対称標準模型が予言するスカラー・トップ質量の全領域を LHC で検証するのは困難であること、33 TeV のハドロン衝突型加速器ではこれが可能であること、が明らかになった。

永田は、音野（九州大）、白井（IPMU）とともに、最も軽い超対称粒子と縮退したグルイーノを LHC にて探る方法について研究した [4]。特に、従来知られていた探索方法に加えて、消失トラック事象に基づく探索方法も有用であることを示した。

大統一理論

千草、諸井は、Anomaly mediation から期待される超対称粒子のスペクトルの下で、大統一理論の予言であるボトムクオーク、タウレプトンの湯川結合定数の統一が可能であるパラメータ領域を探索し、Anomaly mediation は大統一理論と相性が悪いことを示した [5]。

永田は、Olive, Zheng (Minnesota 大) とともに、SO(10) 大統一理論における asymmetric dark matter シナリオの実現可能性を議論した [6]。その結果、最も簡単な模型の大部分は現在の実験制限により排除されていることが明らかになった。加えて、それらの模型を最小限に拡張することで、現在の実験制限と無矛盾な模型を構築しうることを示した。

永田は、Ellis (King's College London, CERN), Evans (KIAS), Nanopoulos (Texas A&M 大, HARC, Academy of Athens), Olive (Minnesota 大) とともに、no-scale 大統一模型に対する現在の実験制限を議論した [7]。その結果、最小の仮定に基づく no-scale 大統一理論は現在までの実験結果と両立し難いことがわかった。また、この困難は、ヒッグス場に対する Giudice–Masiero 項を導入することで解決できることも示された。

750 GeV diphoton excess

ATLAS, CMS によって報告された 750 GeV diphoton excess を受けて、いくつかの現象論的研究が行われた。

Bae, 遠藤, 浜口, 諸井は 750 GeV diphoton excess を説明出来る素粒子模型におけるゲージ結合や湯川結合の繰り込み群による running を解析し、カットオフスケール Λ の関数として、diphoton イベントの断面積 $\sigma(pp \to S \to \gamma\gamma)$ に対して模型によらない上限があることなどを示した [8]。

浜口, Liew は約 375GeV の vector-like クォークが 750 GeV の束縛状態を作りそれが diphoton excess を説明するような模型について、模型構築を行い、LHC での他の excess のヒント（ATLAS on-Z excess）を同時に説明する可能性や暗黒物質の現象論について解析を行った [9]。

Bae, 浜口は C. R. Chen 氏 (National Taiwan Normal University), I. Low 氏 (Northwestern University) と共に、vector-lile クォークが (i) diphoton excess を説明するループダイアグラムに寄与すると共に、(ii) LHC での他の excess のヒント（multilepton excess）を同時に説明するような模型構築を行い、LHC でのシグナルや暗黒物質の現象論について解析を行った [10]。

Bae, 浜口, 諸井, 柳は、750 GeV diphoton excess を説明出来る素粒子模型において、ループダイアグラムに寄与する新粒子を国際リニアコライダー（ILC）で検証する可能性について解析を行い、新粒子の直接生成が出来ない場合でも $e^+e^- \to f\bar{f}$ を通した間接測定によって検証し得ることを示し、また $f\bar{f}$ の角度分布を解析することにより模型を区別し得ることを示した [11]。

伊藤と諸井は、LHC 実験により示唆された 750GeV 質量の共鳴粒子を、将来の e^+e^- 線型加速器によって生成・検出する可能性を研究した [12]。

電弱真空の不安定性

ヒッグス粒子の質量の実験値からは、電弱真空が準安定であることが示唆されている。江間、中山は向田（IPMU）とともに、インフレーション終了後のパラメータ共鳴により電弱真空が崩壊する可能性があることを詳細なシミュレーションによって示し、宇宙初期から現在に至るまで宇宙が安定に存在するための条件を求めた [13]。さらに、ヒッグス場と重力程度の結合を持つモジュライ場を導入することで、真空崩壊の問題を簡単に避けられることを示した [14]。

粒子生成と再加熱

江間、中山は神野（IBS）、向田（IPMU）とともに、一般に宇宙初期にスカラー場がコヒーレント振動をしている際の、重力の効果による粒子生成の効果を詳しく調べた。その結果、これが暗黒物質の生成機構として働くこと、アインシュタイン重力と拡張重力模型でこの効果に大きな違いがあることなどを示した [15]。

さらに江間、中山、神野（IBS）、向田（IPMU）はヒッグスインフレーション模型に代表されるような重力との非標準結合を持つインフレーション模型における再加熱を詳細に解析し、これまで知られていなかった特異な現象 (violent preheating) を発見し、従来見積もられていたよりも遥かに激しい粒子生成が起こることを示した [16]。

超重力インフレーション模型

中山は、斎川（DESY）、寺田（KIAS）、山口（東工大）とともに、超重力理論において D-term attractor 模型と呼ばれる新たなインフレーション模型を提案

した [17] 。これは密度揺らぎのスペクトル指数が Planck 衛星等の観測値とよく合う。

永田は、Ellis (King's College London, CERN), Garcia (Rice 大), Nanopoulos (Texas A&M 大, HARC, Academy of Athens), Olive (Minnesota 大) とともに、no-scale 型の超重力理論における SO(10) 大統一理論に基づくインフレーション模型を構築した [18]。この模型は Planck 衛星等の観測値をうまく説明する一方で、ニュートリノ振動実験や陽子崩壊実験などとも無矛盾であることが示された。

グラビティーノ問題

超対称性理論において重力子の超対称パートナーであるグラビティーノが、様々な宇宙論的問題を起こすことがある（グラビティーノ問題)。江間、中山は向田（IPMU)、寺田（KIAS）とともに非熱的なグラビティーノ生成過程を詳細に調べた。特に通常の摂動的なインフラトン崩壊の描像では記述できない場合の生成過程を解析し、インフレーション模型への新たな制限を得るとともに、グラビティーノ生成に関する統一的な理解を得た [19]。

さらに中山、長谷川（東大宇宙線研)、向田（IPMU)、寺田（KIAS)、山田（Stanford 大）は nilpotent superfield と呼ばれる場を導入した新たなクラスのインフレーション模型におけるグラビティーノ生成を解析し、通常の場合よりも遥かに多くのグラビティーノが生成され、深刻な宇宙論的問題を引き起こすことを指摘した [20]。

アフレック・ダインレプトン数生成

アフレック・ダインレプトン数生成機構は超対称性理論における有力なバリオン数生成機構の一つであるが、ニュートリノ質量が不自然に軽くなりすぎることが問題であった。浜口、中山は Bae（IBS)、Baer（オクラホマ大）とともに、ニュートリノ質量が Peccei-Quinn 場の値によって与えられる模型におけるアフレック・ダインレプトン数生成機構を解析し、この場合ニュートリノ質量が自然な値に収まることを示した [21]。

Flaxion 模型

江間、浜口、諸井、中山は Flaxion 模型と呼ばれる素粒子模型を提案した。これは素粒子標準模型に複素スカラー場および右巻きニュートリノを加えただけのシンプルな模型であるが、クォーク・レプトンの世代間階層性、Strong CP 問題、ニュートリノ質量、暗黒物質、バリオン非対称性、インフレーションといった標準模型では説明できない問題を全て同時に解くことが出来る [22]。

高エネルギー宇宙線

江間と諸井は、IceCube が高エネルギーニュートリノを観測したことを受けて、これが重い長寿命粒子の崩壊によって説明できることを指摘し、この長寿命粒子を含む素粒子模型の宇宙論を議論した [23]。

暗黒物質と dark radiation

Tang は、Ko (KIAS) とともに、ベクトル暗黒物質と dark radiation とがともに隠れた非可換ゲージ・ボソンから生じる模型を構築した [24]。また、宇宙背景輻射による観測結果と宇宙の大規模構造の観測結果との間にある不一致がこの模型では自然に説明されることを示した。

暗黒物質の熱的残存量

リュウは、Luo (IPMU) とともに、共対消滅シナリオにおける媒介粒子の束縛状態が暗黒物質の熱的残存量に大きく寄与することを指摘した [25]。

1.2.2 弦理論、場の理論全般

超対称ゲージ理論の数理的研究

福田・朱・松尾は J.-E.Bourgine (ボローニャ大)、張弘（西江大）と共同で、5 次元超対称ゲージ理論のインスタントン解の分配関数が持つ代数的な性質を調べた。ゲージ理論は Quiver 図とよばれる図形的な表示で表すことができるが、それを分解しより基本的な部品（Gaiotto 状態、intertwiner) の組み合わせにより分配関数が書き表されることを示した。さらにそれぞれの部品の量子変形された W-無限大代数（Ding-Iohara-Miki 代数と呼ばれる）による特徴づけを与え、qq-character と呼ばれる 2 パラメータ変形を行った指標を与えた。これを用いると、超対称ゲージ理論に関連する Seiberg-Witten 曲線の量子変形を書き表すことができる。特に 5 次元に特有の Chern-Simons 項の寄与の評価を与えることに成功した [26, 43, 55, 44, 63, 67, 75]。

福田はこの研究成果と関連論文をまとめて修士論文にした [33]。

原田は福田・朱・松尾などと議論し、量子変形された W-無限代数を用いた可解統計模型を構成し特に R 行列の性質を調べた [68]。

福田・原田・朱・松尾は J.-E. Bourgine (KIAS) と共同で上記の研究を更に発展させて双対性に対して不変な形でゲージ理論の定式化を行った。特に粟田・Feigin・白石の位相的頂点演算子に対する DIM 代数の作用を明らかにし、Gaiotto 状態、intertwinner などの頂点演算子による表式を求めた。これにより NS ブレーンや D ブレーンの幾何学的な配置に対するゲージ理論の分配関数を代数的に表現する方法を求めた [56, 57]。

南部括弧と M 理論

松尾は Pei-Ming Ho (台湾大学）と共同で行ってきた南部括弧式とその M 理論への応用に関するレビュー論文を書いた [27]。

場の理論のエンタングルメントエントロピー

中口と西岡は、最近提唱された Rényi エントロピーのホログラフィック公式の妥当性を検証するため、ユニタリー性を満たす量子系で満たされるべき Rényi エントロピーに関するいくつかの不等式が、ホログラフィックな系でも成立するための条件を調べた。結果としてホログラフィー原理が適用可能な物理的に尤もらしい状況下ではホログラフィック公式が正しい不等式を満たすことがわかった [28]。

西岡は Herzog (Stony Brook) とともに、自由スカラー場について知られていたいくつかの相反する結果が、エンタングルメントエントロピーを定義する際に現れる余次元 2 の境界項を適切に導入することで矛盾なく説明できることを示した [29]。

$Sp(N)$ 模型のエンタングルメント・エントロピー

佐藤は、$Sp(N)$ ベクトル模型のエンタングルメント・エントロピーについて研究を行った。エルミートではない場の理論でも、適切なユニタリー演算子を導入することで、エンタングルメント・エントロピーが導入できることを示した [45]。

超弦の場の理論

川野は、岸本氏 (新潟大) と共同で、最近、國友氏と大川氏によって提唱された開弦の超弦理論の場の理論について、その拡張の関する研究を行っているところで、まだ研究途中である。

＜受賞＞

＜報文＞

(原著論文)

[1] T. Moroi, T. T. Yanagida and N. Yokozaki, "Upper Bound on the Gluino Mass in Supersymmetric Models with Extra Matters," Phys. Lett. B **760** (2016) 681.

[2] K. J. Bae, H. Baer, N. Nagata and H. Serce, Phys. Rev. D **94**, no. 3, 035015 (2016) [arXiv:1606.02361 [hep-ph]].

[3] H. Baer, V. Barger, N. Nagata and M. Savoy, Phys. Rev. D **95**, no. 5, 055012 (2017) [arXiv:1611.08511 [hep-ph]].

[4] N. Nagata, H. Otono and S. Shirai, JHEP **1703**, 025 (2017) [arXiv:1701.07664 [hep-ph]].

[5] S. Chigusa and T. Moroi, "Bottom-tau unification in a supersymmetric model with anomaly-mediation," Phys. Rev. D **94** (2016) no.3, 035016 [arXiv:1604.02156 [hep-ph]].

[6] N. Nagata, K. A. Olive and J. Zheng, JCAP **1702**, no. 02, 016 (2017) [arXiv:1611.04693 [hep-ph]].

[7] J. Ellis, J. L. Evans, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, Eur. Phys. J. **77**, 232 (2017). [arXiv:1702.00379 [hep-ph]].

[8] K. J. Bae, M. Endo, K. Hamaguchi and T. Moroi, Phys. Lett. B **757** (2016) 493 [arXiv:1602.03653 [hep-ph]].

[9] K. Hamaguchi and S. P. Liew, Phys. Rev. D **94** (2016) no.3, 035012 [arXiv:1604.07828 [hep-ph]].

[10] K. J. Bae, C. R. Chen, K. Hamaguchi and I. Low, Phys. Rev. D **94** (2016) 015035 [arXiv:1604.07941 [hep-ph]].

[11] K. J. Bae, K. Hamaguchi, T. Moroi and K. Yanagi, Phys. Lett. B **759** (2016) 575 [arXiv:1604.08307 [hep-ph]].

[12] H. Ito and T. Moroi, "Production and Decay of Di-photon Resonance at Future e^+e^- Colliders," Phys. Rev. D **94** (2016) no.1, 015021.

[13] Y. Ema, K. Mukaida and K. Nakayama, JCAP **1610**, no. 10, 043 (2016) [arXiv:1602.00483 [hep-ph]].

[14] Y. Ema, K. Mukaida and K. Nakayama, Phys. Lett. B **761**, 419 (2016) [arXiv:1605.07342 [hep-ph]].

[15] Y. Ema, R. Jinno, K. Mukaida and K. Nakayama, Phys. Rev. D **94**, no. 6, 063517 (2016) [arXiv:1604.08898 [hep-ph]].

[16] Y. Ema, R. Jinno, K. Mukaida and K. Nakayama, JCAP **1702**, no. 02, 045 (2017) [arXiv:1609.05209 [hep-ph]].

[17] K. Nakayama, K. Saikawa, T. Terada and M. Yamaguchi, JHEP **1605**, 067 (2016) [arXiv:1603.02557 [hep-th]].

[18] J. Ellis, M. A. G. Garcia, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, JCAP **1611**, no. 11, 018 (2016) [arXiv:1609.05849 [hep-ph]].

[19] Y. Ema, K. Mukaida, K. Nakayama and T. Terada, JHEP **1611**, 184 (2016) [arXiv:1609.04716 [hep-ph]].

[20] F. Hasegawa, K. Mukaida, K. Nakayama, T. Terada and Y. Yamada, Phys. Lett. B **767**, 392 (2017) [arXiv:1701.03106 [hep-ph]].

[21] K. J. Bae, H. Baer, K. Hamaguchi and K. Nakayama, JHEP **1702**, 017 (2017) [arXiv:1612.02511 [hep-ph]].

[22] Y. Ema, K. Hamaguchi, T. Moroi and K. Nakayama, JHEP **1701**, 096 (2017) [arXiv:1612.05492 [hep-ph]].

[23] Y. Ema and T. Moroi, "Early decay of Peccei-Quinn fermion and the IceCube neutrino events," Phys. Lett. B **762**, 353 (2016) [arXiv:1606.04186 [hep-ph]].

[24] P. Ko and Y. Tang, Phys. Lett. B **768**, 12 (2017) [arXiv:1609.02307 [hep-ph]].

[25] S. P. Liew and F. Luo, JHEP **1702** (2017) 091 [arXiv:1611.08133 [hep-ph]].

[26] J. E. Bourgine, M. Fukuda, Y. Matsuo, H. Zhang and R. D. Zhu, "Coherent states in quantum $\mathcal{W}_{1+\infty}$ algebra and qq-character for 5d Super Yang-Mills," PTEP **2016**, no. 12, 123B05 (2016) [arXiv:1606.08020 [hep-th]].

[27] P. M. Ho and Y. Matsuo, "The Nambu bracket and M-theory," PTEP **2016**, no. 6, 06A104 (2016) [arXiv:1603.09534 [hep-th]].

[28] Y. Nakaguchi and T. Nishioka, "A Holographic Proof of Rényi Entropic Inequalities," JHEP **1612** (2016) 129 [arXiv:1606.08443 [hep-th]].

[29] C. P. Herzog and T. Nishioka, "The Edge of Entanglement: Getting the Boundary Right for Non-Minimally Coupled Scalar Fields," JHEP **1612** (2016) 138 [arXiv:1610.02261 [hep-th]].

(会議抄録)

(国内雑誌)

(学位論文)

[30] 修士論文: S. Chigusa, "Bottom-Tau Unification in Supersymmetric Models".

[31] 修士論文: 土屋竣, "暗黒物質を含む拡張した標準模型とミューオン $g-2$".

[32] 修士論文: K. Yanagi, "The Minimal Supersymmetric Standard Model in the light of the Muon $g-2$ Anomaly and Dark Matter".

[33] 修士論文: M. Fukuda, "Deformed $\mathcal{W}$ algebra and Quantum qq-Character ∼Algebraic Approach to Generalized Alday-Gaiotto-Tachikawa Correspondence∼".

[34] 博士論文: S.P. Liew, "Aspects of dark matter coannihilations ".

[35] 博士論文: Y. Nakaguci, "Quantum entanglement and hologrpahy".

[36] 博士論文: K. Ohmori, "Six-Dimensional Superconformal Theories and Their Torus Compactifications".

(著書)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[37] S. Chigusa, Bottom-Tau unification in Supersymmetric Model with Anomaly-Mediation, SUSY conference 2016, Melbourne University (Australia), 2016 年 7 月.

[38] S. Chigusa, Bottom-Tau Unification in Supersymmetric Models, New Physics Forum, IPMU, 2017 年 2 月.

[39] T. Moroi, "Bottom-Tau Unification in Supersymmetric Model with Heavy Sfermions," PASCOS 2016, (July 10 – 16, 2016), Quy Nhon, Vietnam.

[40] K.Nakayama, "Moduli-assisted electroweak vacuum", Hidden Sector Physics and Cosmophysics, YITP, Kyoto (2016/12/15).

[41] K. Yanagi, "Probing the origin of the 750 GeV diphoton excess with the precision measurement at the ILC", Summer Institute 2016, Xitou, Taiwan, 2016 年 8 月.

[42] K. Yanagi, "Muon $g-2$, Dark Matter and MSSM", KEK-PH 2017, Ibaraki, 2016 年 2 月.

[43] R. D. Zhu, "Derivation of qq-characters within the framework of quantum $W_{1+\infty}$ algebra", 4th String Theory in Greater Tokyo, April 12, 2016.

[44] R. D. Zhu, "Coherent states in Ding-Iohara algebra and qq-character for 5d SYM", Strings 2016 poster session, China, August 1, 2016.

[45] Y. Sato, "Entanglement entropy in pseudo-Hermitian models", Quantum Information in String Theory and Many-body Systems, June 9, 2016.

招待講演

[46] 濱口幸一, "Probing the origin of the 750 GeV diphoton excess with the precision measurements at the ILC," 2016 年 6 月 1 日, ECFA-LC 2016, Santander, Spain.

[47] 濱口幸一, "Beyond the Standard Model," 2016 年 9 月 10-12 日, The 22nd Vietnam School of Physics (VSOP-22), Quy Nhon, Vietnam.

[48] 濱口幸一, "Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model," 2017.2.16, KEK-PH 2017, KEK.

[49] T. Moroi, "Wino dark matter and supersymmetric model with heavy sfermions"
Dark Matter from aeV to ZeV, (November 21 – 25, 2016), Durham, United Kingdom.

[50] T. Moroi, "Lectures on Cosmology," 2016 Asia-Europe-Pacific School of High-Energy Physics, (October 12 – 25, 2016), Beijin, China.

[51] N. Nagata, "Direct search of electroweak-charged dark matter", Oct. 24-28, 2016, The 6th KIAS Workshop on Particle Physics and Cosmology and the 2nd Durham-KEK-KIPMU-KIAS Joint Workshop, KIAS, Korea.

[52] N. Nagata, “A Supersymmetric two-field relaxion model”, Dec. 5-9, 2016, Focus Workshop on Particle Physics and Cosmology , IBS-CTPU, Daejeon, Korea.

[53] N. Nagata, “A Supersymmetric two-field relaxion model”, Dec. 12-15, 2016, The 5th UTQuest Workshop: Hidden Sector Physics and Cosmophysics , YITP, Kyoto, Japan.

[54] K. Nakayama, “Gravitational waves as a probe of physics beyond the standard model”, Physics in LHC and the early Universe, University of Tokyo (2017/01/10).

[55] Yutaka Matsuo, “Quantum deformation of W_∞ and quantum geometry of quiver gauge theories”, workshop “Classical and quantum integrable systems and supersymmetry”, Tajin, September 19-24, 2016.

[56] Yutaka Matsuo, “Toroidal symmetry and duality in string theory”, in a workshop “String and M-theory in Okinawa”, OIST, March 6-9, 2016.

[57] Yutaka Matsuo, “Brane web and DIM algebra–Description of duality and qq-character”, in a workshop “Progress in Quantum Field Theory and String Theory II”, Osaka City University, March 27-31, 2017.

[58] T. Nishioka, “Supersymmetric Rényi Entropy,” YKIS long term workshop 2016, YITP, Kyoto, Japan, May 31, 2016.

[59] T. Nishioka, “A Holographic Proof of Rényi Entropic Inequalities,” Strings 2016, Tsinghua University, China, August 4, 2016.

[60] T. Nishioka, “A Holographic Proof of Rényi Entropic Inequalities,” Simons workshop “Entanglement and Dynamical Systems”, Stony Brook, USA, October 24, 2016.

[61] T. Nishioka, “Entanglement and holography,” APCTP 2016 Workshop on Frontier of Physics, Korea, December 14, 2016.

[62] T. Nishioka, “Supersymmetric Rényi Entropy,” Progress in Quantum Field Theory and String Theory II, Osaka City University, Japan, March 28, 2017.

[63] M. Fukuda, ”Coherent states in spherical DAHA and qq-character for 5D Super Yang-Mills”, YITP Workshop ”Strings and Fields 2016” August 11, 2016.

(国内会議)

一般講演

[64] S. Chigusa, Bottom-Tau unification in Supersymmetric Model with Anomaly-Mediation, 日本物理学会 2016 年度秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月.

[65] 中山和則 “Electroweak vacuum stabilized by moduli” 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 22 日.

[66] 柳　圭祐, “LHC diphoton excess に関する物理の ILC 精密測定による探索”, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月.

[67] R. D. Zhu, ”Brane web in DIM algebra and qq-characters”，日本物理学会 第 72 回年次大会, 大阪大学, 2017 年 3 月 20 日.

[68] 原田浩一，”Ding-Iohara-Miki 代数の R 行列の退化極限および自由ボソン表示”，日本物理学会 第 72 回年次大会，大阪大学, 2017 年 3 月 20 日.

招待講演

[69] 濱口幸一，“LHC の最新結果を踏まえた TeV コライダーによる新物理探索”, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 21 日.

[70] 濱口幸一，“新物理 直接探索”, Flavor Physics Workshop 2016, 岩室温泉ゆもとや, 新潟県, 2016 年 10 月 26 日.

[71] 永田夏海、“超対称性理論とリラクシオン機構”, 基研研究会 PPP2016, 京都大学基礎物理学研究所, 2016 年 9 月 5–9 日.

[72] 永田夏海、“大統一模型における WIMP 暗黒物質”, 日本物理学会 2016 年度秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 21–24 日.

[73] 永田夏海、“暗黒物質直接探索：理論計算の方法，理論模型からの動機付けと展望”, 第一回 B, E 班合同若手研究会, 神戸大学, 2016 年 11 月 21–22 日.

[74] 中山和則 “インフレーション理論の現状”, 第 6 回日大 理工・益川塾連携シンポジウム, キャンパスプラザ京都, 2016 年 10 月 15 日.

[75] Yutaka Matsuo, “Supersymmetric gauge theories and the duality of q-deformed W_∞ algebra”, workshop “AGT の物理と数学”, 中央大学, 2016 年 10 月 28–29 日.

(セミナー)

2　原子核・素粒子実験

2.1　原子核実験グループ　【早野・櫻井・Wimmer】

原子核実験グループは、早野研、櫻井研、Wimmer 研の三つの研究室で構成され、国内外の加速器を利用して原子核物理の実験的研究を行っている。それぞれの研究室が取り組んでいる研究テーマは各々異なるが、大学院生の居室や実験室は共通とし、セミナーやコロキウムも共催している。

早野研究室では、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) の分光実験を進めている。CERN の反陽子減速器にて反陽子ヘリウム原子と反水素原子を、大阪大学核物理研究センターにおいては π 中間子原子を研究し、陽子の質量起源、粒子・反粒子の対称性、物理定数の決定など、物理学の基本的な課題に取り組んでいる。

櫻井研究室では、天然に存在する安定核よりも中性子数または陽子数が極端に多い不安定核を生成し、その高アイソスピンに由来するエキゾチックな性質を探る実験研究を行っている。特に近年は中性子過剰核に現れる特異な現象に着目し、中性子過剰核のハロー構造や殻構造の変化 (魔法数の喪失や新魔法数の発見)、核反応を用いた動的性質の研究を進めている。実験は、主に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) で得られる高強度な不安定核ビームを利用している。

Wimmer 研究室では、直接反応によって原子核を構成する核子の一粒子軌道の波動関数を求めることで、エキゾチック原子核の性質を研究している。実験は、アメリカ超電導サイクロトロン研究所 (NSCL)、カナダ国立素粒子原子核研究所 (TRIUMF)、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) で行っている。

2.1.1　反物質の研究（早野研究室）

早野研究室は、世界唯一の超低速反陽子源である CERN 研究所の反陽子減速器施設において ASACUSA（Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons）という研究グループを率い、反物質研究を行っている。

反陽子ヘリウム原子のレーザー分光

準安定反陽子ヘリウム（化学記号 $\bar{\mathrm{p}}\mathrm{He}^+$）は、ヘリウム原子核のまわりを基底状態の電子と、高い主量子数 $n \sim 38$ と軌道角運動量量子数 $\ell \sim n+1 \sim 38$ を持つ反陽子がまわる三体系のリドベルグ原子である。この原子の遷移エネルギーをレーザー分光で精密に測り、JINR 研究所の V.I. Korobov らによる三体量子電磁力学（QED）計算と比較することによって、反陽子と電子の質量比 $M_{\bar{\mathrm{p}}}/m_{\mathrm{e}}$ を求め、陽子のものと等価か検証する事ができる。遷移ごとに粒子の質量の影響や様々な量子電磁力学の影響、ヘリウム原子核が有限の大きさをもつことによる影響が異なるため、多くの遷移で精密分光実験を行うことが重要である。

2016 年度、早野研究室とマックスプランク量子光学研究所らの実験グループは温度 $T \sim 1.5$–1.8 K に冷却された $\bar{\mathrm{p}}^4\mathrm{He}^+$ に対して波長 417.8 nm と 372.6 nm の逆方向に進行する 2 つのレーザーを用いて二光子遷移を励起する実験を行った。さらに $\bar{\mathrm{p}}^3\mathrm{He}^+$ の 3 つの状態 $(n,\ell) = (34,32), (36,34)$ および $(39,35)$ の占有率の時間推移を標的圧力 $p \sim 1$ mb、温度 $T \sim 1.5$–1.8 K で初めて測定した。遷移 $(n,\ell) = (39,35) \rightarrow (40, 34)$ (波長 1168 nm) は初めて測定した遷移であり、状態 $(n,\ell) = (34,32), (36,34)$ は過去の実験と比較し標的密度が 400 倍変化しても、寿命がほとんど変化しない事を確認した。

また、反陽子と電子の質量比を、8×10^{-10} の標準相対不確かさで決定し、結果を Science 誌に発表した [25]。この結果と、すでに知られている陽子と電子の質量比の値との比較は、CPT 対称性の最も高精度な検証の一つである。

超低速反陽子の原子核吸収断面積測定

反陽子は原子核に強く吸収され、原子核表面付近の核子と対消滅する。この吸収断面積は反陽子と原子核との相互作用を調べるため様々な運動量領域で測定されている。我々は、2015 年に 100 MeV/c の反陽子を用いた吸収断面積測定実験を行った。この領域では、反陽子とアイソスピン対称性を持つ反中性子の吸収断面積が、いくつかの原子核中において従来の実験、理論から予想される値よりも大きくなることが報告されている。反陽子と反中性子のデータを系統的に比べることでこの振る舞い、強い相互作用の仕組みをより深く理解できると期待されているが、反中性子のデータに比べ反陽子のデータが少ないのが現状である。本実験では、標的として作りやすく、かつ反中性子の比較するデータが存在する炭素を標的とした実験を行った。

実験は CERN の反陽子減速器を用いて行われ、特にビームの形状や強度について注意深く調整が行われた。反陽子の標的中での消滅イベントは時間的に特定されるため、本実験ではキッカーのタイミングを調節し従来の 200 ns の幅のビームを 60 ns まで時間的に短くした。また検出器の飽和を避けるため、通常の single extraction ではなく multiple extraction

を用い、1 パルスごとに含まれる反陽子の数を 1×10^5 程度まで減らした。この様な条件下で、反陽子が原子核中に放出されるパイ中間子をシンチレーションカウンターで検出し、間接的に反陽子の原子核中での消滅イベントを特定した。また実験中にはビームダンプ付近にチェレンコフ検出器を置きビームの相対強度を測定した。検出器のビーム強度に対する得られる信号強度の線形性をより高めるため、ホトダイオードで読み出すチェレンコフ検出器を開発した。ラジエータとホトダイオードの種類について実験前に試験が行われ、ラジエータとしては光量が試験した中でもっとも多かったフッ化鉛を、ホトダイオードについては nuclear counter effect を減らすためにアバランシェホトダイオードを用いた。上記の条件のもと 2 週間実験を行い、データを取得した。

2016 年度は上のデータを解析し、100 MeV/c における反陽子-炭素原子核消滅断面積を決定した。得られた結果を用いて過去の反中性子-炭素原子核の実験結果と比較し、また他の原子核標的を用いた際のデータを使った消滅断面積の A-dependence が調べられた。[56]

2.1.2 陽子ビームを用いたパイ中間子原子の分光実験（早野研究室）

有限密度におけるカイラル対称性の回復は近年のハドロン物理学の重要な研究課題の一つである。我々はこの課題に対して、錫や鉛などの重い原子核のパイ中間子原子の分光実験を行うことによって取り組んでいる。パイ中間子原子の 1s や 2s などの深い束縛状態の束縛エネルギーは有限密度におけるカイラル対称性のオーダーパラメーターの大きさと関連していることが知られている。現在までにドイツの GSI や理研において (d,^{3}He) 反応を用いた実験が行われ、原子核媒質中においてカイラル対称性が回復していることが示されてきた。

パイ中間子原子の研究をさらに進めるために、大阪大学核物理センターにおいて、(p,^{2}He) 反応を用いた分光実験を新たに計画している。この実験では二つの陽子を Grand-Raiden スペクトロメーターで測定することにより、パイ中間子原子の束縛エネルギーを測定する。また、近年新設された GRAF ビームラインを用いて大強度の一次ビームを用いる。高分解能のスペクトロメーターである Grand-Raiden と一次ビームのエネルギー広がりの影響を小さくする分散整合光学系を用いることにより、従来の実験よりも測定の分解能を向上させることを目指す。

2016 年度は新たに 3 日間のテスト実験を行い、実験の実現可能性について研究を行った。テスト実験では (p,^{2}He) 反応のバックグラウンドの測定を行った。^{2}He の測定ではビームの同一のバンチの中で 2 回の非弾性散乱が起きる現象が主なバックグラウンドとなる (アクシデンタルバックグラウンド)。^{120}Sn 標的に 390 MeV の陽子を入射し、非弾性散乱した陽子を Grand-Raiden スペクトロメータで測定し、断面積を評価した。その結果 (p,p') 反応の断面積は 1.5 mb/sr/MeV となり、上記のアクシデンタルバックグラウンドは予想されるシグナルに比べて許容できるレートであることが明らかになった。テスト実験ではその他にもビームエネルギーの較正方法の確認などを行った。テスト実験の結果をまとめて実験の提案を行い、12.4 日の本実験を行うことが承認された。現在は本実験で用いる予定の検出器の制作や実験プランの策定などの準備を進めている。[91, 92, 93, 94]

2.1.3 インビームガンマ線分光による核構造研究（櫻井研究室）

SEASTAR 国際共同研究

我々は、RIBF で得られる高強度不安定核を用いたインビーム γ 線核分光測定を通じて、陽子・中性子比率が安定核とは異なる原子核の構造の異常性を研究している。これまで 2014 年 5 月と 2015 年 5 月と二回にわたり極めて中性子過剰な原子核の励起エネルギーを体系的に測定を行う、SEASTAR 国際共同実験（Shell Evolution And Search for Two-plus energies At RIBF）を主導してきた。励起状態を効率的に生成し、かつビーム重心系での γ 線エネルギーを精度よく再構成するため、厚い液体水素標的と反跳陽子の軌跡を測定する TPC を組み合わせ、核反応が起きた位置を再構成する MINOS 検出システムと、高検出効率で脱励起 γ線 を測定する NaI(Tl) シンチレーターアレイ DALI2 という二つの検出器を用いた。本年度は、^{110}Zr ならびに ^{112}Mo の励起状態測定から、これらの原子核が調和振動子ポテンシャルによる描像で表現される球形で安定な構造と異なり、強く変形していることを示した。また、既存の不安定核の中で最も中性子過剰な二重魔法数核である ^{78}Ni を始めとして、^{79}Cu、^{81,82,83,84}Zn、^{84,86,88}Ge、^{88,90,92,94}Se、^{98,99,100}Kr など不安定核の励起状態の解析をすすめ、理論計算との比較とともにその核構造を議論している。[36, 79, 81, 89]

逆転の島の一粒子構造

$Z = 10$–12, $N = 20$–22 の領域の核種は、魔法数 $N = 20$ の近傍にありながら大きな集団運動性が測定されてきた。この大きな集団運動性は、殻模型の枠組みでは 2 つの中性子が $N = 20$ のシェルギャップを越えてエネルギー的に高い一粒子軌道を占有する配位として解釈されており、この領域は「逆転の島 (island of inversion)」と呼ばれている。このような「逆転の島」領域の Mg や Ne 同位体における変形の変化とその微視的なメカニズムを探るために、我々は 2010 年に理化学研究所 RIBF においてクーロンおよび核力分解反応の断面積測定、およびインビームガンマ線核分光による励起準位構造を調べる実験を行った。

近年「逆転の島」領域よりもさらに中性子過剰な ^{36}Mg や ^{38}Mg においても大きな変形が測定され、^{42}Si を中心とする魔法数 $N = 28$ の消失した領域と「逆

転の島」領域が接続し、一つの大きな変形核領域を形成していることが実験・理論の両面から議論されている。我々は中性子配位に敏感な一中性子ノックアウト反応によって ^{36}Mg から ^{35}Mg を生成することで、この領域の変形のメカニズムと中性子配位の関係を明らかにする実験を行った。実験結果の解析により複数の γ 線のエネルギーと放出断面積を導出し、ガンマ線同時計数解析によって ^{35}Mg の励起準位の構造を実験的に推定した。さらに、^{35}Mg 残留核の運動量分布の解析により、価中性子の一部が p 軌道を占有していることを明らかにした。これらの結果を反対称化分子動力学法および独自に行った殻模型計算の結果と比較し、一粒子起動準位について議論した。

2.1.4 中性子過剰核におけるクラスター構造の研究（櫻井研究室）

原子核を構成する陽子と中性子が幾つかまとまって α 粒子のような構成要素となり、核全体がその構成要素の集合体となっている構造をクラスター構造と呼ぶ。例えば ^{12}C の励起状態には、三つの α 粒子がガス状にゆるく束縛したクラスター構造もつ共鳴状態 (ホイル状態) が存在する。中性子過剰核である ^{16}C では、^{12}C に 4 つの余剰中性子が加わった系として、三つの α 粒子が直鎖状や三角形を形作った幾何的なクラスター構造を持つことが理論的に予想されている。こうした不安定核のクラスター構造をもつ準位 (クラスター準位) を実験的にどのように探索していけばよいのかが課題になっている。中性子過剰な ^{16}C の共鳴状態からの崩壊は中性子崩壊が支配的になるが、クラスター準位からの脱励起は α 崩壊に有意な分岐比を持つのではないか、と考えられる。

実験は 2013 年 4 月に理化学研究所 RIBF で行った。核子あたり 200 MeV の ^{16}C 二次ビームを液体 ^{4}He 標的に入射して、共鳴状態へ励起した。SAMURAI スペクトロメータで α 粒子や中性子を含む全ての崩壊片の四元運動量と γ 線のエネルギーを測定した。$^{12}\mathrm{Be}^{(*)}+\alpha$、$^{11}\mathrm{Be}^{(*)}+\alpha+n$ といった α 崩壊や $^{15}\mathrm{C}^{(*)}+n$ のような中性子崩壊から不変質量法により共鳴励起準位を再構成した。このうち、α 崩壊から再構成された励起準位がクラスター準位の候補となる。[75, 77, 90]

2.1.5 MuSIC での Pd 同位体のミューオン捕獲の研究（櫻井研究室）

ミューオンは第二世代の荷電レプトンであり、原子核や核子との微視的相互作用は電子に準ずると考えられている。一方で、電子捕獲と同様に負ミューオンも原子核に吸収されるが (ミューオン捕獲)、この過程を満足に記述する理論は未だ存在していない。ミューオン捕獲は電子捕獲に比べて反応の運動量移行が数十 MeV と非常に大きいため、反応後に娘核の複雑な高励起状態が現れる。このような数十 MeV の運動量移行を持つレプトン-原子核反応には、他にも宇宙での高エネルギーレプトン-原子核反応や 0 ニュートリノ二重 β 崩壊 ($0\nu\beta\beta$) などの実験的検証の難しい現象が多く存在する。比較的実験が容易なミューオン捕獲をモデル反応としてこれらの反応を理解しようとする試みが近年活発になっており、より広い核種にわたるさらに詳細な実験データの蓄積が求められている。

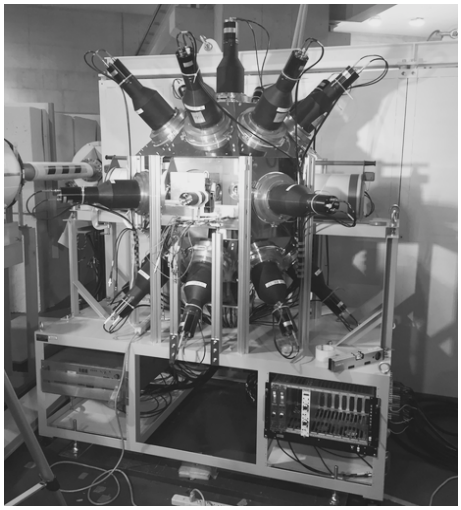

図 2.1.1: MuSIC 実験エリアにインストールされた SEAMINE の写真。架台から飛び出した黒い円筒は液体シンチレータに接続された光電子増倍管である。

ミューオン捕獲によって生成した娘核がいくつ中性子を放出するか（中性子放出多重度）は、ミューオン捕獲後の励起状態の構造を反映する基礎的な物理量であるのみならず、ミューオン捕獲の最終的な生成物の分岐比を決定するために応用上も重要な物理量である。例えば、ミューオン捕獲によって原子核は陽子数の一つ小さい原子核に核変換されることに着目し、ミューオン捕獲を利用して放射線廃棄物の低減を目指す応用研究が進められている。櫻井研を中心とする研究グループでは、長寿命核分裂廃棄物である ^{107}Pd のミューオン核変換に関連して、Pd 同位体のミューオン捕獲の中性子多重度を測定する研究を行っている。2016 年 5 月には Pd 同位体のミューオン捕獲遅発 γ 線の測定実験、2017 年 2 月に ^{108}Pd のミューオン捕獲遅発中性子の測定実験をそれぞれ行った。

実験はどちらも大阪大学核物理研究センター (RCNP) に新規に建設された DC ミューオンビームライン MuSIC を用いて行った。2016 年の実験では同位体濃縮 Pd 標的を用いて各安定 Pd 同位体の全ミューオン捕獲率（これは崩壊の寿命に相当する物理量である）およびミューオン原子 X 線が測定されたが、娘核の核構造の複雑さから中性子多重度を求めることはできなかった。それを踏まえて 2017 年には実験では図 2.1.1 に示した液体シンチレータアレイ SEAMINE を新たに製作し、放出中性子の直接測定を行った。[58, 82, 88]

2.1.6 直接反応を用いたエキゾチック核の核分光 (Wimmer 研究室)

エキゾチック原子核の構造は、よく知られている安定核のものとは大きく異なることがこれまでの実験および理論研究から明らかになってきてている。Wimmer 研究室では、直接反応を用いた中性子過剰核の核分光測定を進めている。直接反応は原子核の一粒子構造を知るとても良い手法であり、その波動関数を実験的に得ることができる。この手法により、我々は変形共存や新魔法数出現のメカニズムを明らかにすべく研究を行っている。

中性子数 28 核の三重変形共存

一つの原子核において 3 つの異なる形が共存する現象を変形共存と呼ぶ。たとえば、^{44}S 核では低励起エネルギーに 3 つの 0^+ 準位が存在し、それぞれ球形、プロレート変形 (ラグビーボール型)、オブレート変形 (ディスク型) をしていることが予想されている。それぞれの変形の波動関数を知るためには、一粒子準位構造の測定が有効である。我々は 2015 年 10 月にアメリカ国立超伝導サイクロトロン研究所 (NSCL) において、^{44}S の基底状態の波動関数を一核子ノックアウト反応によって測定する実験を行った。この測定によって、^{44}S の基底準位における $f_{7/2}$ 軌道と $p_{3/2}$ 軌道の混合率を導出し、3 つの変形の共存と混合率を求めることができる。

アイソスピン -1 核 ^{70}Kr の核分光

極端に陽子過剰な原子核は、原子核のアイソスピン対称性を研究する良い対象である。アイソスピンを保存しない相互作用は、陽子数と中性子数を入れ替えた原子核間で異なる構造を示すが、このような研究はこれまで軽い原子核に限られてきた。我々は、理化学研究所の RIBF において、^{70}Kr の構造をクーロン励起および核子ノックアウト反応によって研究した。この原子核はこれまで全く励起順位が知られていなかったが、我々の研究によって 3 つの新たな励起準位を発見した。理論計算との比較から、陽子過剰核 ($N < Z$) において、クーロン相互作用とアイソスピン対称性を破る核力要素が核構造を決める主要な役割を果たすことが明らかになった。

中性子数 60 核に見られる急激な形状変化

中性子数 60 の Sr、Zr、Mo 同位体に見られる原子核の形状遷移は、原子核の基底準位における変形遷移現象のなかでも最も急激なものとして知られている。この変形の変化に潜む波動関数の振る舞いを理解するために、基底準位における一粒子軌道構造の測定が待ち望まれている。我々は、これまでカナダ国立素粒子原子核研究所 (TRIUMF) において、(d, p) 核子移行反応を用いた一粒子軌道エネルギー測定とその遷移率測定を行ってきた。この研究をさらに進めるため、現在三重水素標的を用いた二核子移行反応の実験研究を計画している。二核子移行反応は、特に異なる形状を持つ 0^+ 励起準位を選択的に励起することができ、核図表中の最も急激な変形遷移現象を見せるこの領域の謎を解明する鍵となる。

中性子数 40 領域の核異性体及びベータ崩壊分光

中性子数 40 は古典的な魔法数ではないが、この中性子数を持つ原子核は時として典型的な閉殻構造を持つことがある。この調和振動子のシェルギャップは、中性子過剰な原子核では消えて原子核は集団性を持つが、より中性子過剰な ^{60}Ca に近づくと核の集団性が減少することが知られている。我々は RIBF において、AIDA と EURICA を用いた核異性体及びベータ崩壊分光を ^{60}Ti 近傍核において実施した。実験では、多くの原子核で新たに半減期を測定したほか、ガンマ線分光のデータを得ることができた。[57]

中性子 32 の魔法数

最近、中性子過剰核において中性子数 32 が魔法数的な性質を持つことが発見された。我々は、中性子数 32 を持つ ^{52}Ca において、魔法数の性質を調べる二つの相補的な実験を計画している。まずは、その集団運動の性質をクーロン励起による遷移強度測定によっておこなう。さらに、基底準位の一粒子軌道の占有率を、一中性子、一陽子ノックアウト反応から導出する。この 2 つの相補的な測定により ^{52}Ca が持つ魔法数的な性質をより詳細に研究することができ、また最新の殻模型計算との比較により、この二重魔法数核の微視的構造を明らかにすることができる。このインビームガンマ線分光法を用いた実験計画は、2014 年の RIBF の実験審議委員会によって承認され、近いうちに理研 RIBF におけるインビーム γ 線核分光実験を実施する予定である。

2.1.7 実験装置開発 (櫻井・Wimmer 研究室)

波形識別型粒子検出器 NiGIRI の開発

電荷を持たない粒子である中性子と γ 線 (光子) は、磁場によりその軌道を曲げることが出来ないため、中性子と光子の識別のためには飛行時間法が主に利用される。しかし、エネルギーの高い中性子は γ 線と十分な時間差がないため、飛行時間法では区別できない。そこで我々は、エネルギー損失により信号の減衰時定数が異なる有機シンチレーターを用いて波形解析による粒子識別を可能にした新しい検出器 NiGIRI (Neutron, ion and Gamma-ray Identification for Radioactive Isotope beam) の開発を行っている。

本年度は、粒子識別能力の評価のため、^{252}Cf 線源から放出される中性子および γ 線を FlashADC を用いて取得し、波形解析による粒子識別性能の評価を行った。[59]

二中性子移行反応実験のための標的開発

二核子移行反応は、変形共存や対相関といったある種の核構造を研究するとても良い方法であることが知られている。現在 RIBF で建設が進んでいる OEDO で二中性子移行反応実験を行うためには、新しい標的システムの開発が必要となる。東京大学では、大型のチタンにトリチウム埋め込んだ自立トリチウム標的を開発している。今年度は、トリチウムの代わりに重水素を埋め込んだプロトタイプ標的のテストを理化学研究所で行い、その特性を知ることができた。現在までに多くの水素を含んだ新しい標的の制作に成功し、2017 年度にはビームを用いた実験を行う予定である。[95]

＜報文＞

(原著論文)

[1] A. Jungclaus *et al.*, "First observation of γ rays emitted from excited states south-east of ^{132}Sn: The $\pi g_{9/2}^{-1}$ (X) $\nu f_{7/2}$ multiplet of ^{132}In$_{83}$", Phys. Rev. C **93**, 041301 (2016).

[2] P. Doornenbal *et al.*, "Mapping the deformation in the "island of inversion": Inelastic scattering of ^{30}Ne and ^{36}Mg at intermediate energies", Phys. Rev. C **93**, 044306 (2016).

[3] I. Celikovic *et al.*, "New Isotopes and Proton Emitters-Crossing the Drip Line in the Vicinity of ^{100}Sn", Phys. Rev. Lett. **116**, 162501 (2016).

[4] K. Nowak *et al.*, "Spectroscopy of ^{46}Ar by the (t,p) two-neutron transfer reaction", Phys. Rev. C **93**, 044335 (2016).

[5] A. Gade *et al.*, "Single-particle structure at $N = 29$: The structure of ^{47}Ar and first spectroscopy of ^{45}S", Phys. Rev. C **93**, 054315 (2016).

[6] Y. Sada *et al.*, "Structure near the K^-+ p plus p threshold in the in-flight ^{3}He$(K^-, \Lambda$p) n reaction", Prog. Theo. Exp. Phys. **5**, 051D01 (2016).

[7] S. Nomura *et al.*, "An evaluation of early countermeasures to reduce the risk of internal radiation exposure after the Fukushima nuclear incident in Japan", Health Policy and Planning **31**, 425 (2016).

[8] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), "Measurement of the higher-order anisotropic flow coefficients for identified hadrons in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$=200 GeV", Phys. Rev. C **93**, 051902 (2016).

[9] J. Aysto *et al.*, "Experimental program of the Super-FRS Collaboration at FAIR and developments of related instrumentation", Nucl. Instr. Methods **B376**, 111 (2016).

[10] H. Otsu *et al.*, "SAMURAI in its operation phase for RIBF users", Nucl. Instrum. Meth **B376**, 175 (2016).

[11] J. Yasuda *et al.*, "Inverse kinematics (p,n) reactions studies using the WINDS slow neutron detector and the SAMURAI spectrometer", Nucl. Instrum. Meth **B376**, 393 (2016).

[12] B. Blank *et al.*, "New neutron-deficient isotopes from ^{78}Kr fragmentation", Phys. Rev. C **93**, 061301 (2016).

[13] H. Tatsuno *et al.*, "Absolute Energy Calibration of X-ray TESs with 0.04 eV Uncertainty at 6.4 keV in a Hadron-Beam Environment", J. Low Temp. Phys. **184**, 930 (2016).

[14] A. Jungclaus *et al.*, "β decay of semi-magic ^{130}Cd: Revision and extension of the level scheme of ^{130}In", Phys. Rev. C **94**, 024303 (2016).

[15] K. Todoroki *et al.*, "Instrumentation for measurement of in-flight annihilations of 130 keV antiprotons on thin target foils", Nucl. Instr. Methods **A835**, 110 (2016).

[16] S. A. Milne *et al.*, "Isospin symmetry at high spin studied via nucleon knockout from isomeric states", Phys. Rev. Lett. **117**, 082502 (2016).

[17] C. Loelius *et al.*, "Lifetime measurement of the 4_1^+ state of ^{58}Ni with the recoil distance method", Phys. Rev. C **94**, 024340 (2016).

[18] A. Mutschler *et al.*, "A proton density bubble in the doubly-magic ^{34}Si nucleus", Nature Physics **13**, 152 (2016).

[19] H. Watanabe *et al.*, "Long-lived K isomer and enhanced γ vibration in the neutron-rich nucleus ^{172}Dy: Collectivity beyond double midshell", Phys. Lett. **B760**, 641 (2016).

[20] S. Okada *et al.*, "First application of superconducting transition-edge sensor microcalorimeters to hadronic atom X-ray spectroscopy", Prog. Theor. Exp. Phys. **9**, 091D01 (2016).

[21] M. Bazzi *et al.*, "K-series X-ray yield measurement of kaonic hydrogen atoms in a gaseous target", Nucl. Phys. **A954**, 7 (2016).

[22] T. Goigoux *et al.*, "Two-proton radioactivity of ^{67}Kr", Phys. Rev. Lett. **117**, 162501 (2016).

[23] D. Q. Fang *et al.*, "Proton-proton correlations in distinguishing the two-proton emission mechanism of ^{23}Al and ^{22}Mg", Phys. Rev. C **94**, 044621 (2016).

[24] H. Wang *et al.*, "First spectroscopic information from even-even nuclei in the region "southeast" of ^{132}Sn: Neutron-excitation dominance of the 2_1^+ state in ^{132}Cd", Phys. Rev. C **94**, 051301 (2016).

[25] M. Hori *et al.*, "Buffer-gas cooling of antiprotonic helium to 1.5 to 1.7 K, and antiproton-to-electron mass ratio", Science **354**, 610 (2016).

[26] T.K. Tanaka *et al.*, "Measurement of Excitation Spectra in the ^{12}C(p, d) Reaction near the η' Emission Threshold", Phys. Rev. Lett. **117** ,202501 (2016).

[27] P.-A. Soderstrom *et al.*, "K-mixing in the doubly mid-shell nuclide ^{170}Dy and the role of vibrational degeneracy", Phys. Lett. **B762**, 404 (2016).

[28] J. Taprogge *et al.*, "Proton-hole and core-excited states in the semi-magic nucleus ^{131}In$_{82}$", Eur. Phys. J. **A52**, 347 (2016).

[29] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), "Measurements of directed, elliptic, and triangular flow in Cu + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$=200 GeV", Phys. Rev. C **94**, 054910 (2016).

[30] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), "Azimuthally anisotropic emission of low-momentum direct photons in Au plus Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$=200 GeV", Phys. Rev. C **94**, 064901 (2016).

[31] M. Miyazaki and R. Hayano, "Individual external dose monitoring of all citizens of Date City by passive dosimeter 5 to 51 months after the Fukushima NPP accident (series): 1. Comparison of individual dose with ambient dose rate monitored by aircraft surveys", Journal of Radiological Protection **37**, 1 (2017).

[32] T. Hashimoto *et al.*, "Beamline Test of a Transition-Edge-Sensor Spectrometer in Preparation for Kaonic-Atom Measurements", IEEE Trans. Appl. Sup. **27**, 2100905 (2017).

[33] F. Recchia *et al.*, "Neutron single-particle strengths at $N = 40$, 42: Neutron knockout from ^{68,70}Ni ground and isomeric states", Phys. Rev. C **94**, 054324 (2016).

[34] E. Lunderberg *et al.*, "In-beam γ-ray spectroscopy of $^{38-42}$S", Phys. Rev. C **94**, 064327 (2016).

[35] E. Ideguchi *et al.*, "μs isomers of ^{158,160}Nd", Phys. Rev. C **94**, 064322 (2016).

[36] N. Paul *et al.*, "Are There Signatures of Harmonic Oscillator Shells Far from Stability? First Spectroscopy of ^{110}Zr", Phys. Rev. Lett. **118**, 032501 (2017).

[37] J. J. Parker IV *et al.*, "Isomeric Character of the Lowest Observed 4^+ State in ^{44}S", Phys. Rev. Lett. **118**, 052501 (2017).

[38] A. I. Morales *et al.*, "Type II shell evolution in $A = 70$ isobars from the $N \geq 40$ island of inversion", Phys. Lett. **B765**, 328 (2017).

[39] J. Wu *et al.*, "94 β-Decay Half-Lives of Neutron-Rich ^{55}Cs to ^{67}Ho: Experimental Feedback and Evaluation of the r-Process Rare-Earth Peak Formation", Phys. Rev. Lett. **118**, 0722701 (2017).

[40] D. Weisshaar *et al.*, "The performance of the γ-ray tracking array GRETINA for γ-ray spectroscopy with fast beams of rare isotopes", Nucl. Instrum. and Meth. **A847**, 187 (2017).

[41] N. Nakatsuka *et al.*, "Observation of isoscalar and isovector dipole excitations in neutron-rich ^{20}O", Phys. Lett. **B768**, 387 (2017).

(会議抄録)

[42] T. Yamaga *et al.*, "Study of the Elementary (K^-, n) Reactions to Search for the $\overline{K}$NN Bound State via the He-3 (K^-, n) Reaction at J-PARC ", AIP Conference Proceedings **1735**, (2016).

[43] J. Marton *et al.*, "SIDDHARTA Results and Implications of the Results on Antikaon-Nucleon Interaction ", AIP Conference Proceedings **1735**, (2016).

[44] J. Marton *et al.*, "Strong interaction studies with kaonic atoms', EPJ Web of Conferences **113**, 03009 (2016).

[45] H. Shi *et al.*, "Precision X-ray spectroscopy of kaonic atoms as a probe of low-energy kaon-nucleus interaction", EPJ Web of Conferences **126**, 04045 (2016).

[46] H. Tatsuno *et al.*, "Future projects of light kaonic atom X-ray spectroscopy ", EPJ Web of Conferences **130**, 01018 (2016).

[47] T.K. Tanaka *et al.*, "Search for η' mesic nuclei by missing-mass spectroscopy of the C-12(p,d) reaction", EPJ Web of Conferences **130**, 02010 (2016).

[48] K. Itahashi *et al.*, "Precision spectroscopy of pionic atoms and chiral symmetry in nuclei", EPJ Web of Conferences **130**, 01017 (2016).

[49] H. Aghai-Khozani *et al.*, "New results of the antiproton-carbon annihilation cross section measurement at low energies", EPJ Web of Conferences **130**, 07014 (2016).

[50] L. A. Gurgi *et al.*, "Isomer Spectroscopy of Neutron-rich ^{165,167}Tb", Acta Phys. Pol. **B48**, 601 (2017).

(国内雑誌)

[51] 櫻井博儀, 「2 重に魔法数をもったニッケル-78」, パリティ, 2016 年 12 月号.

[52] 早野龍五, 「反粒子の世界 —反粒子の発見から最近の実験まで」, 数理科学, 2016 年 7 月号.

[53] 櫻井博儀, 「百年の計」, Isotope News [特別号 No.1], 2017 年 1 月号.

[54] 本林透, 櫻井博儀, 「魔法数の帰趨をめぐって」, 原子核研究第 61 巻 2 号 1, 2017.

(学位論文)

[55] 博士論文: 西隆博, "Precision spectroscopy of deeply bound pionic states in ^{121,116}Sn".

[56] 博士論文: 村上洋平, "Measurement of the In-flight Antiproton Annihilation Cross Section on Carbon at 100 MeV/c".

[57] 修士論文: 安藤孝志, “Study of isomers in neutron-rich nuclei near $N = 40$ via gamma-ray spectroscopy”.

[58] 修士論文: 齋藤岳志, “Pd 同位体の負ミューオン捕獲に関する研究”.

[59] 修士論文: 長峰駿介, “波形弁別能力を持つプラスチックシンチレーション検出器の開発”.

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[60] R. Hayano, “Keynote Lecture”, MIN16 Meson in Nucleus 2016, July 31, 2016, YITP, Kyoto, Japan.

[61] 早野龍五, “Fukushima five years on —what worked, what didn’t?”, G8 & G20 Youth Summits Japan, May 3, 2016, Waseda University, Tokyo, Japan.

[62] 早野龍五, “Empowering the young —radiation protection in Fukushima”, Disaster management and recovery for children and communities 2016, 5 years of the Soma Area, May 8, 2016, Soma, Japan.

[63] K. Wimmer, “^{32}Mg: Collective and single-particle structure in the Island of Inversion”, MOTO16: International Symposium on Modern Technique and its Outlook in Heavy Ion Science, June 26–27, 2016, Rikkyo University, Tokyo, Japan.

[64] H. Sakurai, “Nuclear magic numbers”, The 71st Fujihara Seminar-Shimoda 2016, July 2016, Shimoda, Japan.

[65] H. Sakurai, “Decay studies of exotic nuclei at RIKEN”, The 2016 Zakopane Conference on Nuclear Physics ”Extremes of the Nuclear Landscape”, Aug. 2016, Zakopane, Poland.

[66] H. Sakurai, “Post RIBF project”, RIBF Users Meeting 2016, Sep. 2016, Wako, Japan.

[67] H. Sakurai, “Long-lived Fission Product Transmutation”, 21st International Conference on Cyclotrons and their applications, Sep. 2016, Zurich, Switzerland.

[68] H. Sakurai, “Recent highlights and future projects at RIBF”, Shapes and Symmetries in Nuclei: from Experiment to Theory, Nov. 2016, Orsay, France.

[69] H. Sakurai, “Recent Activities and Plans at RIBF”, IBS-RIKEN Conference on Recent Developments in RI Physics, Nov. 2016, Daejeon, Korea.

[70] H. Sakurai, “The status and future of RIBF”, ANPhA2916 Symposium, Nov. 2016, Sendai, Japan.

[71] K. Wimmer, “Isospin symmetry and shape coexistence at $N = Z$: the case of ^{70}Kr”, Workshop in the framework of JSPS-FWO collaboration, Nov. 29, 2016, Tokyo, Japan.

[72] H. Sakurai, “New Magicity and Magicity Loss in Atomic Nuclei”, Joint 13th Asia Pacific Physics Conference and 22nd Australian Institute of Physics Congress, Dec. 2016, Brisbane, Australia.

[73] K. Wimmer, “Shape and isospin symmetry in $A = 70$ nuclei: Spectroscopy of the $T_z = -1$ nucleus ^{70}Kr”, Experimental and Theoretical Advances in Fission and Heavy Nuclei, Dec. 12–13, 2016, JAEA, Tokai, Japan.

[74] R. Hayano, “Radiological Protection Issues after the Fukushima accident”, Les Ateliers de la Radioprotection, INSTN Saclay, Mar 21, 2017, Saclay, France.

一般講演

[75] S. Koyama, “Cluster structure on neutron rich nuclei ^{16}C”, 11th international Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics, May 23, 2016, Naples, Italy.

[76] K. Wimmer, “Normal and Intruder configurations in the Island of Inversion”, Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2016), July 11–15, 2016, Halifax, Canada.

[77] S. Koyama, “Study of cluster structure in ^{16}C via α inelastic scattering”, Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2016), July 11–15, 2016, Halifax, Canada.

[78] K. Wimmer, “Shape Coexistence at $N = Z$: Spectroscopy of the $T_z = -1$ Nucleus ^{70}Kr”, International Nuclear Physics Conference, Sep. 11–16, 2016, Adelaide, Australia.

[79] R. Taniuchi, “First spectroscopy of the Doubly-Magic ^{78}Ni”, International Nuclear Physics Conference, Sep. 11–16, 2016, Adelaide, Australia.

[80] K. Wimmer, “Mirror Energy Differences and Shape Coexistence in Proton-Rich Nuclei”, 5th Sunflower Workshop, Sep. 18–20, 2016, Hong Kong, China.

[81] R. Taniuchi, “First spectroscopy of the Doubly-Magic ^{78}Ni”, 5th Sunflower Workshop, Sep. 18–20, 2016, Hong Kong, China.

[82] T. Saito, “Muon Nuclear Capture Reaction on Pd Isotopes”, MXG16: The 6th Yamada workshop on Muonic X and Gamma ray Spectroscopy, Sep. 27, 2016, Osaka, Japan.

[83] K. Wimmer, “Shape coexistence along $N = 40$”, EURICA: Celebration & Collaboration Meeting, Sep. 6–7, 2016, Wako, Japan.

[84] M. Niikura, “Decay spectroscopy around ^{78}Ni”, EURICA: Celebration & Collaboration Meeting, Sep. 6–7, 2016, Wako, Japan.

(国内会議)

招待講演

[85] 櫻井博儀, “魔法数研究　RIPS から RIBF への展開と今後”, 日本物理学会秋の分科会、2016 年 9 月, 宮大学.

[86] 櫻井博儀, “理研 RIBF における核物理研究”, 東海・重イオン科学シンポジウムータンデム加速器成果報告会, 2017 年 1 月, 東海.

[87] K. Wimmer, “Nucleon removal reactions and in-beam gamma-ray spectroscopy”, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 17 日, 大阪大学.

一般講演

[88] 齋藤岳志, “RCNP MuSIC における安定 Pd 同位体の μ^- 捕獲現象の研究”, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 17 日, 大阪大学.

[89] 谷内稜, “First spectroscopy of the Doubly-Magic ^{78}Ni”, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 18 日, 大阪大学.

[90] 小山俊平, “^{16}C のクラスター構造”, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 20 日, 大阪大学.

[91] Y. N. Watanabe, “Spectroscopy of Pionic Atoms Via (p, 2He) Reaction”, MENU2016, 2016 年 7 月 29 日, 京都大学.

[92] 渡辺珠以, “RCNP におけるパイ中間子原子分光の検討”, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 22 日, 宮崎大学.

[93] 渡辺珠以, “RCNP における陽子ビームを用いたパイ中間子原子分光の実験計画”, ELPH 研究会 C015, 2016 年 12 月 2 日, 東北大学.

[94] 渡辺珠以, “三交替の面構造を持つ MWDC のシミュレーションによる研究”, 日本物理学会 2017 年春季大会, 2017 年 3 月 17 日, 大阪大学.

ポスター発表

[95] 小岩井拓真, “2 中性子移行反応測定のためのトリチウム標的の開発”, 日本物理学会 2017 年春季大会, 2017 年 3 月 18 日, 大阪大学.

(集中講義)

[96] 早野龍五, “Exotic Atoms —Production, spectroscopy and symmetry”, Apr. 21–23, 2016, 立教大学.

[97] Ryugo Hayano, “Exotic Atoms —Production, spectroscopy and symmetry”, May 11–June 7, 2016, University of Vienna, Austria.

[98] 早野龍五, “あらためて学ぶ水素原子”, 東京大学 現代科学史概論, Feb. 3, 2017, 東京大学.

(セミナー)

[99] 早野龍五, “Fukushima Accident Five years on —what worked, what didn’t?”, 三菱総合研究所 萌芽研究勉強会「ふくしまの課題をじっくり考える」, Apr. 19, 2016.

[100] Ryugo Hayano, “Fukushima five years on —what worked, what didn’t?”, May 24, 2016, University of Mainz, Germany.

[101] 早野龍五, “Fukushima Accident Five years on —what worked, what didn’t?” , 在ウィーン国際機関邦人職員会 June 1, 2016, IAEA, Wien, Austria.

[102] 早野龍五, “原発事故から 5 年 —BABYSCAN から見える福島の今”, 体験教室「エネルギー・放射線のフシギ」, June 23, 2016, 科学技術館.

[103] Ryugo Hayano, “Fukushima Five Years On”, Paul Scherrrer Institute, Villigen, Switzerland.

[104] 早野龍五, “今後求められる個人被ばく線量測定について —外部被ばく測定の事例を中心に”, 福島県内の放射線アドバイザーによるセミナー, July 25, 2016, 郡山市.

[105] Ryugo Hayano, ‘Radiation Protection —Why are measurements important & what are the results in Fukushima?”, 2016 Radiation Protection Workshop, Aug. 15, 2016, The University of Tokyo.

[106] H. Sakurai, “RIB Experiments”, ICTP-IAEA workshop on Nuclear Structure and Decay Data: Experiment, Theory and Evaluation, Aug. 2016, Trieste, Italy.

[107] 櫻井博儀：“”親子一緒に”先端研究者から科学を学ぼう”, 2016 年 7 月, 東京大学.

[108] 早野龍五, “科学的に考えることの大切さ「知ろうとすること。」続編”, エネサポくらぶ講演会, Sep 4, 2016, 名古屋.

[109] Hayano, RS, “Fighting radiophobia psychological impacts of Fukushima”, Nuklearforum Schweiz, Sep 29, 2016, Zurich, Switzerland.

[110] 早野龍五, “科学的に考えることの大切さ「知ろうとすること。」続編”, 神田外語大学 MULC 講演会, Oct 17, 2016.

[111] K. Wimmer, “Isospin-Symmetry and Shape Coexistence along $N = Z$ Nuclei”, MLL Kolloquium, Oct. 20 2016, Garching, Germany.

[112] 早野龍五, “福島の高校生と続ける「知ろうとすること。」”, 番來舎講演会, Dec. 12, 2016, 駒場.

[113] 早野龍五, “Fighting radiophobia —psychosocical impacts of Fukushima”, NAGRA (National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste) Seminar, Jan. 13, 2017, Wettingen, Switzerland.

[114] 早野龍五, “福島の高校生と続ける「知ろうとすること。」”, チューリッヒ日本人会講演, Jan. 14, 2017, ETH, Zurich, Switzerland.

[115] Ryugo Hayano, “Keynote”, The NEA Workshop on Stakeholder Involvement in Nuclear Decision Making, Jan. 17, 2017, OECD/NEA, Paris, France.

[116] 早野龍五, “測って伝える —BABYSCAN から見える福島の今”, Jan. 27, 2017, 中部原子力懇談会, 名古屋.

[117] 早野龍五, “測って、伝えて、袋小路。—どこで掛け違ったのだろう”, March 3, 2017, 東京電力本社.

[118] 早野龍五, “測って、伝えて、袋小路。—どこで掛け違ったのだろう”, March 18, 2017, 「あのときの、あれからの福島」シンポジウム, 東京大学.

2.2 駒宮研究室

われわれは、素粒子物理の本質的な問題を実験的なアプローチで解明することを目指している。これにはエネルギーフロンティア（最高エネルギー）における粒子衝突型加速器（コライダー）実験がもっとも有効な手段であることは実験的な事実として認められている。

2012 年 7 月に、世界最高エネルギーの陽子・陽子相互衝突型加速器 LHC でヒッグス粒子が発見された。これを「7 月革命」と呼んでいる。ヒッグス粒子は真空と同じ量子数を持つのでヒッグス場が真空に凝縮し、素粒子はこれと相互作用する事で質量を得る。ヒッグス場が真空中に凝縮すると素粒子が質量を持つことは教科書に書いてあるが、なぜヒッグス場が真空に凝縮するかは、標準理論を越える問題である。従って、この粒子の性質の詳細を研究することで、標準理論を越える素粒子物理学の新たな方向を決定できる。即ち、ヒッグス粒子は、標準理論を越えて見通す窓である。7 月革命はさらなる大革命の前哨戦に過ぎない。将来は LHC に続く電子・陽電子衝突のリニアコライダー ILC(図 2.2.1) を建設し、精密実験によってヒッグス粒子の詳細を研究し、新粒子を探索して、標準理論を越える素粒子物理学の方向を呈示する。

ILC 関連の技術開発では、特に、衝突点でのナノスケールのビームのサイズを測定する「新竹ビームサイズモニター」の開発研究を行ない、KEK の ATF2 において実証実験を行なっている。さらに ILC での実験の検討においては、ILC 実験で主要な電磁カロリメータの開発研究を、2012 年秋から新たに研究室に参加したイギリス人の研究者が中心となって研究を行なってきた。また、CERN の LHC における ATLAS 実験のデータ解析にはヒッグス粒子や超対称性の探索に大学院学生が参加している。

エネルギーフロンティアにおける加速器実験に加えて、中小規模の実験で本質的な素粒子物理研究を行う為に、小規模実験や粒子検出器の開発研究を行っている。超冷中性子の地球の重力場中での束縛量子状態の測定においては、その証拠である超冷中性子の鉛直分布の凹凸を明確に観測して、それらを量子力学で説明することができた。現在この研究を進化させて、新しい短距離力の探索を行うとともに、弱い等価原理を量子力学の下で検証する実験の準備を行っている。

2.2.1 電子･陽電子リニアコライダー ILC 計画

電子と陽電子 (e^- と e^+) は、素粒子とみなすことができるので、それらの衝突は素過程である。また、e^- と e^+ は粒子と反粒子の関係にあるので、衝突によって対消滅が起こり、その全ての衝突エネルギーは新たな粒子の生成に使われる。従って、エネルギーフロンティア（世界最高エネルギー）での e^+e^- 衝突反応の実験研究は、素粒子の消滅生成の素過程反応

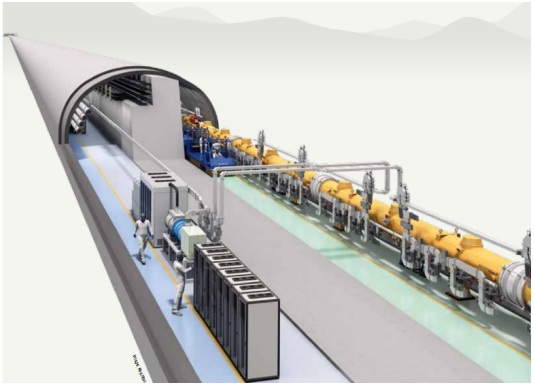

図 2.2.1: 電子・陽電子衝突のリニアコライダー、ILC

そのものを直接、詳細に観測できるという本質的利点を有する。しかし、LEP のような円形 e^+e^- コライダーではシンクロトロン放射によって電子や陽電子のエネルギーが急速に失われる。従って、電子・陽電子を向かい合わせて直線的に加速して正面衝突させるシンクロトロン放射の出ないリニアコライダーの方が経済的である。日本はいち早く e^+e^- リニアコライダーを高エネルギー物理の次期基幹計画として取り上げ、主加速器の技術開発と極細いビームを作り衝突点で衝突させる技術の開発を進めてきた。13 年前から ICFA（International Committee for Future Accelerators) では、超伝導主加速器を主体としたリニアコライダーを国際的に推進する体制を整えた。2012 年 7 月にはヒッグス粒子が発見され、ILC の初期に行う物理学が明確になり、2013 年には技術設計書が完成しプロジェクトは国際的に大きく進展した。2013 年からは ILC は新たな国際組織 LCC（Linear Collider Collaboration) で運営される。LCC を監督するのが LCB(Linear Collider Board) であり、駒宮はその議長を 2016 年末まで務めた。2012 年 3 月には我が国の素粒子実験分野の「将来計画検討小委員会」が ILC の早期建設を提唱し、10 月には、高エネルギー物理学研究者会議（研究コミュニティー）は、ILC を早期に我が国に建設して、ヒッグス粒子の詳細研究から始めることを提案した。また、2016 年 12 月に盛岡で開催したリニアコライダーワークショップにおいて大幅なコスト削減が提案された。現在、日米で超伝導加速管のコスト削減の研究を行っているが、これに加えて重心系エネルギーを 500GeV から 250GeV に下げて、ヒッグスファクトリーとしてプロジェクトを運営するということに、国際コミュニティは賛成している。これらのコスト削減によって、全体のコストは従来の 60%以下になると考えられ、ILC 実現の可能性が大きくなった。本研究室は、わが国に ILC を誘致するべく、物理学教室の相原研究室と浅井研究室、素粒子物理国際研究センターとも連携し、KEK をはじめ全国の研究者と共に努力を重ねている。

ATF2 レーザー干渉型電子ビームサイズモニターの開発研究

ILC での重要なテーマの 1 つにルミノシティの向上がある。そのためには電子ビームを絞る必要があり、現在 ILC でデザインされている鉛直方向のビームサイズは 5.9 nm である。KEK にある先端加速器試験施設 (ATF) では、電子ビーム最終収束試験ビームライン (ATF2) を用いて、これについての実証試験を行っている。ILC と ATF との電子ビームのエネルギーの違いからスケールして、ATF2 では鉛直方向にビームサイズを 37 nm に絞ることが目標となっている。この極小ビームサイズを測定するために用いられるのが新竹モニターである。

新竹モニターは電子ビームとの仮想衝突点にレーザー干渉縞を形成し、ここで発生したコンプトン散乱光を下流に設置したガンマ線検出器で測定することによってビームサイズを計算する。電子ビームが干渉縞の強度の山に入った場合は散乱光子数は多くなり、谷に入った場合は少なくなる。このときの散乱光子数の変調はビームサイズに依存するので、変調を測定することでビームサイズを測ることができる。このビームサイズ測定方式は新竹積氏によって提唱され、先行する FFTB 実験では波長 1064 nm のレーザーを用いて、ビームサイズ 65 nm の測定に成功した。

ATF2 における改良点は、より小さい 37 nm のビームサイズを測定するために二倍高調波による波長 532 nm のレーザーの使用、ビームを固定したまま測定できるように光学遅延の導入、水平方向のビームサイズ測定にも対応するレーザーワイヤー方式の導入、フィードバックシステムのためのマルチバンチビーム運転への対応を目的にガンマ線検出器を時間応答性の良いアクリルチェレンコフ検出器に変更したことなどがある。新竹モニターはレーザー干渉を用いる革新的な手法により、100 nm 以下の鉛直方向の非衝突型の電子ビームサイズを測れる唯一の手段であり、ATF2 の目標達成と ILC の実現にとって不可欠である。2016 年 2 月には世界記録である 41 nm の測定に成功して、ほとんど ATF2 の目標を達成した。

現在は新竹モニター測定時の様々な系統誤差要因の評価と改善が行なわれている。そのうちの 1 つのアプローチとして、レーザーのプロファイルを調べることで、レーザーの伝搬する様子を再現する実験を行った。またレーザーワイヤー方式に起因する収差の影響を、さらに手前のミラーを調整することで軽減するという手法を確立した。

ILD 電磁カロリメータ

測定器コンセプトの一つである ILD (International Large Detector) の、電磁カロリメータの開発を進めている。ILC でターゲットとする物理事象の多くは複数のジェットを伴うため、いかにしてそのエネルギー分解能を高めるかが鍵となる。LHC などのハドロンコライダーでは、ジェットエネルギーの大部分をカロリメータで測定していたが、荷電粒子についてはより分解能の高いトラック情報を用いるなどの、粒子の種類別に適した方法で測定するアルゴリズムが提案されている。そのアルゴリズムの性能は、電磁カロリメータでのクラスタの分離能で大きく左右される。そのために、測定器に高い細密度を要請する。

本研究室では、5 mm 四方のピクセルを持つ高密シリコン PIN フォトダイオードをセンサーとした、Si/W サンドイッチカロリメータの開発を中心に推し進めてきた。世界各国の共同研究グループにおいて、実装に向けた細部の仕様決定と確認作業をしている中で、主に、電気的特性試験によるセンサー性能の担保、および、放射線損傷による性能劣化の物理過程の特定とセンサー寿命の測定を担当している。2015 年度に神戸大学海事科学研究科のタンデム静電加速器において中性子損傷によるセンサーの耐久試験を行ったところ、数桁におよぶ暗電流量の悪化が確認されたが、これでも十分に仕様を満たす。飛跡貫通型検出器を用いて計測した照射中性子量から、ILC での運用で予想される中性子量のもとでの耐性を評価したところ、50 年から 100 年程度の使用に耐えることが確認された。またセンサーと同時に、読み出し電源で使われる大型コンデンサと、検出器と読み出し基板をつなぐ導電性エポキシ接着剤の耐性試験も行った。これらは ILC100 年相当の範囲で有意な損傷の兆候は見られなかった [9]。

電磁カロリメータのハードウエア開発の一方で、ILD 検出器のシミュレーションコードの開発を進めている。主に、電磁カロリメータにおける光子のクラスタリングアルゴリズム (GARLIC) の整備と検出器ノイズなどの効果の導入を行っている。また、ヒッグス粒子からタウ粒子へ崩壊する過程を用いて、重いヒッグス粒子等の CP 混合度の測定アルゴリズムの開発を行っている。タウ粒子等の質量など、既知の物理量を用いた保存則による制限を解析過程に課すことで、より高精度な混合度測定が期待できる。

2.2.2 LHC 実験

LHC は 2015 年 6 月、2 年のシャットダウン期間を経た後重心系エネルギーを 13 TeV に上げて陽子陽子衝突運転を再開した (Run2)。2015 年は 13 TeV での最初の物理解析の結果も発表されるなど実り多き一年であったが、2016 年にはビームの強度を上げてさらにハイペースで衝突事象を発生させ、前年のおよそ 10 倍のデータ量を記録することに成功した。これによる物理結果の改善、特に重い新粒子の探索感度の上昇は著しく、解析のアップデートが非常に注目されている。本研究室では ATLAS 実験で記録したデータを用いて、超対称性粒子生成事象や、未知粒子から多光子への崩壊事象などの新物理事象の探索を幅広く行っている。

超対称性粒子探索

超対称性理論は標準理論の自然な拡張によって、ダークマターなどの標準理論抱える諸問題を包括的に解決できると期待されている有力な新物理理論体系の一つである。実験による検証は常に高い関心を集めており、LHC における近年の探索は特にホットである。本研究室では以下の 3 つに照準を絞って解析を行っている。

レプトン終状態を用いたグルイーノ探索 強い相互作用を通じた超対称性グルーオン (グルイーノ) の生成は LHC での断面積が際立って高く、発見が最も期待されている新物理過程の一つである。2015 年に発表された 13 TeV の最初の結果 (積分ルミノシティー:3.2 fb^{-1}) では有意な兆候は見られなかったが、データ量の増加に伴いより重いグルイーノに感度を持つため依然として発見の余地は大きく残されている。2016 年はその夏までに記録した約 5 倍のデータ (積分ルミノシティー:14.8 fb^{-1}) を用いて解析の更新を行った。本研究室ではレプトンを終状態に含むチャネルの解析に参加し、解析手法の改善に取り組んだ。中でも新しい背景事象推定法の開発は大きな成果であり、MC シミュレーションをベースとした従来の方法と完全に独立した data-driven な手法を採用することによって従来の方法では不安のあった高エネルギージェットが多数生成される事象のモデリングの安定性を大幅に改善することに成功した [22]。残念ながら今回の結果でもデータは標準理論と無矛盾であったが 、これによりレプトンを生ずるグルイーノ崩壊シナリオに対する制限を大きく更新した [3] (図 2.2.2)。2016 年後半のデータも足した新しい解析も現在進行しており、2017 年度内に発表される予定である。

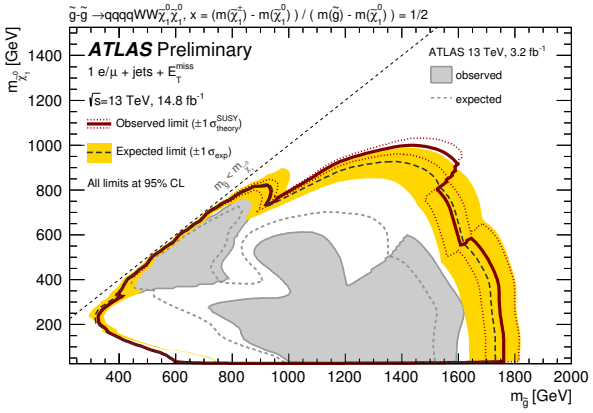

図 2.2.2: 2016 年夏までのデータを用いた 1 レプトン解析による荷電ゲージーノを経由するグルイーノ崩壊モードに対する制限。最大でグルイーノ質量 1.8TeV まで棄却した。

マルチレプトン終状態を用いた電弱ゲージーノ解析 軽い電弱ゲージーノは超対称性ダークマターシナリオなど、超対称性理論において非常に広い枠組みで存在が支持されているが、生成断面積が小さいために探索感度が低く、Run2 の大統計量データを用いて初めて重い質量領域での本格的な探索が開始することが期待されている。桁違いにレートが高い標準理論過程の背景事象を抑制するため終状態にレプトンを複数要求するチャネルが有力であり、本研究室ではその解析手法確立のための準備研究に取り組んで来たが、2016 年はそれに並行して生成断面積が比較的大きくなるスレプトンが軽いシナリオにターゲットを絞って Run2 での最初の探索結果をまとめた [4]。結果は標準理論と無矛盾であったが、当該のシナリオに対して Run1 より大幅に厳しい制限をつけることに成功した。

消失飛跡探索 超対称性理論の中でも宇宙論等の観点から AMSB や PGM は非常に有望なモデルである。これらでは $SU(2)$ ゲージボゾンの超対称性パートナーである中性ウィーノが最も軽い超対称性粒子であり、さらに荷電ウィーノと質量差 160 MeV 程度で縮退することが予言されている。このとき荷電ウィーノの寿命は典型的に 0.2 nsec 程度と長寿命なため、陽子陽子衝突で荷電ウィーノが生成された場合は ATLAS 検出器で途中まで飛跡を残し、検出器内で中性ウィーノと低エネルギーパイオンに崩壊した後は消えたように見えるという、消失飛跡と呼ばれる特徴的な信号を残す。標準理論ではこのような崩壊過程は存在せず、飛跡の再構成ミスに由来する事象のみが背景事象となるため感度が高い。Run2 初期ではグルイーノ崩壊を通じた荷電ウィーノ生成事象の探索が有力であり、直接生成事象と共に解析を進め、Run2 最初の結果を発表した。ATLAS 最内層に追加されたピクセル検出器を用いたピクセル 4 層のみからなるトラックを使うことで感度を大幅に改善することができたが、標準理論からの超過は見られていない [5, 17, 31]。

多光子終状態解析

2015 年の LHC 測定データを用いた、ATLAS 実験と CMS 実験の二光子終状態探索において、標準理論からの大きな超過の兆候が見られたことが話題となった (「750 GeV excess」)。この兆候の理論的な説明として、「光子ジェット事象」のモデルが有効な説明の一つであった。光子ジェット事象とは、大きなエネルギーを持ち大きくブーストされた軽い粒子が、複数の光子に崩壊することによって、複数の光子の進行方向が近接 (数 mrad 程度) している事象のことである。大きな質量をもつ共鳴粒子 (BSM Higgs など) が複数の軽い中間粒子に崩壊し、この中間粒子が複数の光子に崩壊するとき、このような事象が生じる。このような事象は、カロリメーターにおいて一つのクラスターとして測定されるため、検出器では一つの光子として検出される。2016 年前半の測定データを足した解析によって、この「750 GeV excess」は統計的なふらつきによるものであり、存在しないと

確認されたことが 2016 年夏に公表された。しかし、この光子ジェット事象は、物理的・実験的に興味深い事象であるため、現在も探索を進めている。光子ジェット事象は従来用いられている検出アルゴリズムでは検出が難しいため、より効果的な探索手法の開発を行った。従来では探索が行われていないような事象トポロジーにおいて、新物理を探索することが目的である。MC シミュレーションを用いた解析手法の開発は完了し、測定データの統計解析を進めている。

2.2.3 小規模実験

超冷中性子の重力束縛実験

空間の余剰次元理論を内在するような素粒子標準理論を超えた理論体系の中には、微視的スケールにおいて、質量やバリオン数などを結合荷とした新しい相互作用を示唆するものがある。これらは、ニュートン重力の逆二乗則に従わない現象として表れ、場合によっては弱い等価原理を破る源となる可能性を持つ。

私たちは、これら重力または重力に準ずる相互作用の検証を目的に、地球重力に束縛された超冷中性子の量子効果の観測実験を進めてきた。2014 年の初めには、量子論的束縛状態を起因とした特徴的な存在確率分布を、位置分解能を持つ中性子測定器を用いて 0.7 μm 以下の位置精度で捉えることに成功した。

分布は 5 μm 程度の構造を持つ。仮に、このスケールで上記の新しい重力的相互作用が存在するのであれば束縛ポテンシャルに変更を与え、中性子の存在確率分布に歪みが表れる。その歪みを高精度で評価することで、重力的相互作用の手掛かりを探ることができる。

これまでは、浜松ホトニクス製の CCD 検出器にコンバータとしてボロンを蒸着した中性子測定器を用いてきた。しかしながら、空間分解は 3 μm 程度で、上記の束縛構造を見るためには、いくぶん性能が足りていない。そこで、円筒形の凸面ミラーによる拡大機構を併用し、約 20 倍に拡大する光学系を組んで測定を行った。凸面反射の光学計算は、位相空間上の量子効果を記述するウィグナー擬分布関数によって精度良く計算できたが、スケール因子の決定に不定性が残り、新しい相互作用の探索感度を持つまでは至っていない。そこで、検出部設計の見直しを行い、改善の後に期待される到達感度の算定を進めている。

超冷中性子の重力束縛状態は特徴的な存在確率分布を示すと同時に、ポテンシャルの変化に伴った時間発展も量子力学に由来する特徴的なものである。本研究室では、中性子チョッパーと時間分解能を持つ中性子検出器を用いて、数十 μm の段差から落下する超冷中性子の波動関数の時間発展を観測する新たな実験手法を考案した。このような時間発展を観測することは、波動関数の床でのバウンドを見ることに対応しており、微視的スケールでの重力を検証する新手法である。シミュレーション結果からシュレーディンガー方程式における弱い等価原理を 0.1%の精度で検証できると見積もられており、現在実験に向けた準備を進めている [8, 12, 14, 24, 29, 33]。

冷中性子散乱実験

冷中性子ビームとキセノンガスの散乱過程を詳細に調べることにより、ナノメートルのスケールにおける新しい重力的相互作用の探索を進めている。これまで、韓国原子力研究所にある物性研究用の小角中性子散乱ビームラインを用い、測定された散乱角分布を既知の相互作用からなる分布と比較し評価したところ、0.4 Å から 4 Å の到達距離を持った新相互作用について、世界で最も厳しい制限を付けることに成功した。

今年度は、実験感度をさらに向上させるべく、フランスの Institut Laue-Langevin (ILL) 研究所 における冷中性子ビームラインを用いた実験を検討してきた [12, 14, 35]。まず始めに、実験セルの散乱分布やフラックスモニターによる系統誤差の見積りを主な目的とし、ILL-D22 と呼ばれる世界でも最も強度の高い中性子ビームラインの一つにおいて約 3 日間のビームタイムを獲得して、散乱実験を行った (図 2.2.3)。その結果を元に、次期の高統計測定へ向けて実験設計を進めている。

また、標的キセノンガスをより高圧にすることで、実験の統計感度を大きく改善させる可能性を議論した。これまで標的ガスは十分に理想気体であるとして扱ってきたが、高圧であることによる構造因子の影響と標的内における減衰について十分に議論したところ、少なくとも一桁程度の感度改善が期待できる。これらの結果を日本物理学会などで報告した [15, 27, 28, 30]。

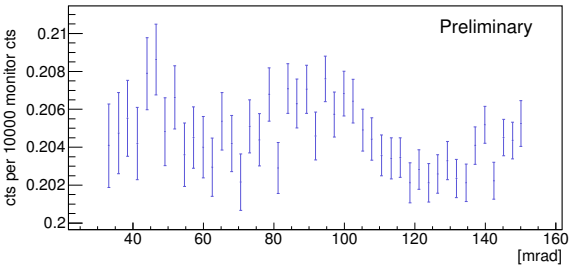

図 2.2.3: 1 気圧のキセノンによる中性子散乱の角度分布。横軸は散乱角度、縦軸はフラックスモニターでの 1 万カウントで規格化した散乱強度。

＜報文＞

(原著論文)

[1] B. Freund, C. Neubüser, J. Repond *et al.* (The CALICE collaboration), “DHCAL with minimal absorber: measurements with positrons”, Journal of Instrumentation **11**, P05008 (2016)

[2] G. Eigen, T. Price, N. K. Watson *et al.* (The CALICE collaboration), “Hadron shower dicomposition in the highly granular CALICE analogue hadron calorimeter”, Journal of Instrumentation **11**, P06013 (2016)

[3] ATLAS Collabolation: “Search for squarks and gluinos in events with an isolated lepton, jets and missing transverse momentum at $\sqrt{s}$ = 13 TeV with the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2016-054, 2016.

[4] ATLAS Collabolation: “Search for supersymmetry with two and three leptons and missing transverse momentum in the final state at $\sqrt{s}$ = 13 TeV with the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2016-096, 2016

[5] ATLAS collabolation: “Search for long-lived charginos based on a disappearing-track signature in pp collisions at $\sqrt{s}$=13 TeV with the ATLAS detector”, ATLAS-CONF-2017-017, 2017

(会議抄録)

[6] 奥木 敏行、照沼 信浩、加納 勇也 *et al.*：「ATF2 焦点における FONT パルス内フィードバックを使ったジッター低減」、第 13 回日本加速器学会年会プロシーディングス、2016 年 11 月 24 日

(学位論文)

[7] 南雄人：“Search for Supersymmetric Partners of Gluons in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s}$ = 13 TeV” 博士論文（東京大学大学院理学系研究科）2016 年 4 月

[8] 内田健太：「重力場による超冷中性子の量子状態を利用した弱い等価原理の検証に向けた研究」修士論文 (東京大学大学院理学系研究科) 2017 年 3 月

[9] 中西均：「ILD 測定器における電磁カロリメータの中性子耐性の研究」修士論文（東京大学大学院理学系研究科）2017 年 3 月

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[10] C.Kozakai: “Overview on displaced vertices and disappearing tracks analysis”, ATLAS SUSY workshop, 13-15 April 2016, Sussex University, England

[11] Y.Kano: “Beam size measurement with/without FONT feedback”, ECFA - Linear Collider Workshop 2016, 1 June 2016, Santander, Spain

[12] Y. Kamiya, K. Yamada, K. Uchida, Y. Sasayama, K. Itagaki, M. Tani, S. Komamiya and G. N. Kim: “Fifth Force Search with Neutron Scattering”, High Sensitivity Experiments beyond the Standard Model, 31 July - 7 August 2016, Quy Nhon, Vietnam

[13] S. Komamiya: “Report of the Linear Collider Board”, International Committee for Future Accelerators, 7 August 2016, Chicago, USA

[14] Y. Kamiya, K. Yamada, K. Uchida, Y. Sasayama, K. Itagaki, M. Tani, S. Komamiya and G. N. Kim: “Search for new gravity-like interactions and test of the equivalence principle using slow neutrons”, Physics of Fundamental Symmetries and Interactions - PSI2016, 16 - 20 October 2016, Zurich, Switzerland

[15] K. Yamada: “The search experiment for new short-range interaction using cold neutron scattering from Xe fluid”, Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2017), 9 January 2017, Kyoto University, Japan

[16] S. Chen: “Searches for squarks and gluinos in final states with a lepton, jets and missing transverse momentum with the ATLAS detector”, 11 January 2017, Kraków, Poland

[17] C.Kozakai: “SUSY LLP search Disappearing track”, ATLAS CERN-Tokyo 2017 Winter/Spring Workshop, 23 - 25 March 2017, The University of Tokyo, Japan

招待講演

[18] S. Komamiya: “International Linear Collider - Latest Status towards Realization-”, International Particle Accelerator Conference, 9 May 2016, BEXCO, Busan, Korea

(国内会議)

一般講演

[19] 駒宮幸男：「LCB、ICFA、FALC 報告」、LC 計画推進委員会、2016 年 10 月 5 日、高エネルギー加速器研究機構、つくば市、茨城

[20] 駒宮幸男：「国際リニアコライダー（ILC）-物理とプロジェクトの推進-」、富山大学理学部物理学教室セミナー、2016 年 10 月 13 日, 富山

[21] 小坂井千紘、齊藤真彦、加地俊瑛、山中隆志、浅井祥仁：「LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるマルチジェット終状態での消失飛跡検出による超対称性事象探索」、日本物理学会秋季大会、2016 年 9 月 21 - 24 日、宮崎大学

[22] 陳詩遠：「LHC ATLAS 実験 Run2 における 1 レプトンを持つ終状態を用いた超対称性粒子探索」 日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 21 - 24 日、宮崎大学

[23] 加納勇也、浅井祥仁、石野雅也、奥村恭幸、田中純一、寺師弘二、留目和輝、山口洋平：「LHC-ATLAS 実験 Run2 における電磁カロリメーター情報を用いた 750 GeV 二光子共鳴の研究」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 21 - 24 日、宮崎大学

[24] 内田健太、神谷好郎、駒宮幸男：「超冷中性子を用いた弱い等価原理の検証実験に向けた進展」 日本物理学会秋季大会、2016 年 9 月 21 - 24 日、宮崎大学

[25] 中西均、Junping Tian、駒宮幸男：「ILC での Jet Clustering Algorithm の精度評価と改善」 日本物理学会秋季大会、2016 年 9 月 21 - 24 日、宮崎大学

[26] 安居孝晃、駒宮幸男、神谷好郎、照沼信浩、田内利明、奥木敏行：「ATF2 のレーザー干渉型ビームモニターの現状と展望」日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 21 - 24 日、宮崎大学

[27] 山田耕史、神谷好郎、駒宮幸男、Guinyun Kim：「低速中性子散乱を用いた未知短距離力探索実験の改善」日本物理学会秋季大会、2016 年 9 月 21 - 24 日、宮崎大学

[28] 山田耕史、神谷好郎、駒宮幸男：“A search for new short-range interaction using neutron scattering from Xe gas fluid”, 低速中性子研究会、2017 年 1 月 10 日、名古屋大学

[29] 内田健太：「重力場による超冷中性子の量子状態を利用した弱い等価原理の検証に向けた研究」 第 23 回 ICEPP シンポジウム、2017 年 2 月 19 - 22 日、長野

[30] 山田耕史：「高圧散乱体による低速中性子散乱を用いた短距離力探索実験の手法」 第 23 回 ICEPP シンポジウム、2017 年 2 月 19 - 22 日、長野

[31] 小坂井千紘、齊藤真彦、加地俊瑛、山中隆志、澤田龍、浅井祥仁：「LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるチャージーノ消失飛跡検出によるグルイーノ崩壊事象探索」、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 17 - 20 日, 大阪大学

[32] 加納勇也、浅井祥仁、石野雅也、奥村恭幸、田中純一、寺師弘二、留目和輝、山口洋平：「LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるコリメートした光子群に崩壊する共鳴状態の探索」、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 17 - 20 日、大阪大学

[33] 内田健太、神谷好郎、駒宮幸男、三島賢二：「超冷中性子の重力束縛状態を利用した弱い等価原理の検証実験に向けた研究」 日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 17 - 20 日、大阪大学

[34] 安居孝晃、駒宮幸男、神谷好郎、照沼信浩、田内利明、奥木敏行：「ATF2 のレーザー干渉型電子ビームサイズモニターのレーザー性能の研究」日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 17 - 20 日、大阪大学

[35] 山田耕史、神谷好郎、駒宮幸男：「低速中性子－高圧キセノン散乱による未知短距離力探索実験に向けた進展」日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 17 - 20 日、大阪大学

招待講演

[36] 駒宮幸男：「素粒子物理学の発展と次世代加速器」、三井住友 PreEMP 講義、2016 年 9 月 20 日、東京大学伊藤国際ホール、東京

[37] 駒宮幸男：「素粒子と宇宙」、国立大学附置研究所・センター長会議　第一部シンポジウム、2016 年 10 月 6 日、ナレッジキャピタル超学校、大阪

[38] 駒宮幸男：「素粒子と宇宙」、神奈川県立高等学校教科研究会理科部会、2016 年 12 月 1 日、神奈川県立翠嵐高等学校、横浜、神奈川

[39] 駒宮幸男：「素粒子物理学の発展と ILC」、量子ビーム研究部門交流会、2016 年 12 月 8 日、量子科学研究開発機構、高崎量子応用研究所、高崎、群馬

2.3 相原・横山研究室

当研究室では, 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の B ファクトリー加速器を使った実験（Belle 実験）およびその高度化（Belle II 実験), ハワイ・マウナケア山頂にある国立天文台・すばる望遠鏡に搭載した超広視野 CCD カメラ (Hyper Suprime-Cam) によるダークエネルギーの研究, 岐阜県飛騨市のスーパーカミオカンデ検出器でのニュートリノおよび核子崩壊の研究, 茨城県東海村の J-PARC 加速器とスーパーカミオカンデ検出器を使った長基線ニュートリノ振動実験（T2K 実験), 次世代大型水チェレンコフ検出器（ハイパーカミオカンデ）の準備研究, さらに, それら将来の研究計画に向けた新型光検出器（HPD・MPPC）の開発, アクシオンおよび軽い暗黒物質の探索実験のための開発, などを行っている。これら, 我が国が誇る世界最先端の実験設備を駆使して, 素粒子や宇宙の謎を実験的に解き明かすことが, 当研究室の目標である。

2.3.1 （スーパー）B ファクトリー実験

Belle 実験

1999 年から 2010 年にかけて運転した KEK の B ファクトリー（KEKB 加速器/Belle 測定器）では, 約 11 億の B 中間子・反 B 中間子対や約 9 億のタウ・反タウ対に代表される高統計データを蓄積した。このデータを使って, 素粒子物理学の喫緊の課題である, 標準模型と呼ばれる現パラダイムを越える新しい, より根源的な原理の探求を行っている。本研究室では特に, 第三世代レプトンであるタウレプトンの異常磁気能率の測定による新物理探索と, クォークの粒子–反粒子対称性（CP 対称性）の破れのパラメータのひとつ ϕ_3 の測定に関する研究を行っている。

われわれは KEK B ファクトリー加速器で得られた大量のタウ・反タウ対を使って, タウレプトンの性質を精密に測定することで標準理論の厳密な検証を行っている。新物理の寄与の大きさはモデルや測定する物理量に依存するが, 典型的には, 新物理の発現するエネルギースケールを Λ とすると, レプトン質量 (m_ℓ) と Λ の比の二乗 $(m_\ell/\Lambda)^2$ に比例する。タウレプトンの質量はミューオンの質量の約 17 倍であり, 新物理に対してその二乗, 約 290 倍の感度を有する。

標準模型では, 電弱カレントの Lorentz structure は V−A 型をとる。レプトン崩壊のパラメータである Michel パラメータを測定し, 標準模型の予言する値と比較することで, V−A 型以外の結合を持つ新物理の寄与を探索することができる。特に, 輻射レプトン崩壊（radiative leptonic decay ; $\tau \to \mu\nu\nu\gamma$ と $\tau \to e\nu\nu\gamma$）を用いることで, 通常の崩壊では測定できない Michel パラメータ $\bar{\eta}$ と $\xi\kappa$ の測定が可能となる。対生成されたタウレプトンのスピン相関を用いる困難な測定が必要となるが, 測定可能な粒子のすべての運動学的変数とその相関の情報を用いることで感度を最大化する解析手法を開発した。Belle 検出器で記

録された約 7 億のタウ・反タウ対の情報を用いることで，タウレプトンのこれら二つのパラメータに対し，世界で初めての測定を行い，$\bar{\eta}^{\mu} = -1.3 \pm 1.5 \pm 0.8$, $(\xi\kappa)^{\mu} = 0.8 \pm 0.5 \pm 0.3$, $(\xi\kappa)^{e} = -0.4 \pm 0.8 \pm 0.9$ という結果を得た。

さらに，$\tau^- \to l^- l'^+ l'^- \bar{\nu}_l \nu_\tau$ $(l, l' = e, \mu)$ の崩壊分岐比を測定することで，新しい相互作用を探索するための研究を進めている。本年度はこのモードのイベントジェネレーターを準備し，事象選択を最適化して背景事象を抑制する研究を行った。また，本年度から $\tau^- \to \pi^- \ell^+ \ell^- \nu_\tau$ $(\ell = e, \mu$ の崩壊モードの解析を開始し，これまで未測定であったこのモードの崩壊分岐比の測定を目指している。

標準模型では，B 中間子系での CP 対称性の破れの大きさはユニタリティ三角形と呼ばれる複素平面上の三角形の三つの内角（ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3）をパラメータとして表すことができる。このうち，ϕ_3 と呼ばれるパラメータについては $B^- \to DK^-$ 崩壊の観測から理論的不定性が非常に小さい測定が可能である。しかし，この崩壊の分岐比が小さいために，現時点では三つの角度の中で測定精度が最も悪く，代替の測定法がいくつか提案されている。ϕ_3 の測定は，今後 Belle II 実験でさらに大量のデータを集めたとき，新物理探索に重要な役割を果たすことが期待されている。本研究室では，Belle 実験のデータ解析から $B^- \to DK^-$ 事象に加えて $B^- \to D^* K^-$ 事象を使うことで更なる測定精度向上ができることを示し，このモデル非依存解析法を用いた解析を進めている。Belle 実験の全データを用い ϕ_3 の測定を更新するとともに，Belle II 実験でのソフトウェアフレームワークで同モードの精密測定精度の実現可能性も研究している。

Belle II 実験

小林・益川両博士のノーベル賞受賞の決め手になるなど多大な成功を収めた Belle 実験のアップグレードとして，SuperKEKB 加速器と Belle II 測定器の建設が進行中である。SuperKEKB は，KEKB の 40 倍のルミノシティ (8×10^{35} cm^{-2}s^{-1}) を得ることを目標とする最先端ファクトリー型加速器であり，Belle II 測定器（図 2.3.1）は，その加速器から最大限の物理成果を引き出すために最先端技術を駆使して作る測定器である。本研究室は Belle II 測定器の構成要素である SVD 検出器と ECL 検出器の開発・量産を主導している。

B ファクトリー実験で物理成果を引き出すためには，多くの場合 B 中間子の崩壊点を高精度で再構成するための崩壊点検出器と呼ばれる装置の性能が鍵となる。Belle II 検出器の崩壊点検出器はビーム衝突点近傍からピクセル型 (PXD) 検出器 2 層と両面ストリップ型 (SVD) 検出器 4 層の計 6 層からなる。PXD，SVD 検出器ともにラダーと呼ばれる短冊状の検出器モジュールがビーム衝突点を中心に円筒状に配置される。Belle 実験に比べ，Belle II では崩壊点検出器をより外側まで配置することにより K_S 粒子の再構成の S/N 比が高まり，超対称性模型などの素粒子標準模型を超えた新物理への感度があると期待される $b \to s$ や $b \to s\gamma$ などの K_S を含む崩壊モードの検出効率が改善される。一方で，大面積を覆うために，特に最外層のラダーはこれまでの検出器に比べ格段に長くなり，製作にはさらに高度な技術が要求される。

最外層の 6 層目ラダーは最新設備をもつ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) 内にて製造される。本研究室は，Kavli IPMU 内の実験室創設時から SVD 検出器のラダーモジュールの量産に向けた量産研究開発を主導してきた。本研究室で開発された 6 層目ラダーの組立手法は，海外の研究機関による 3, 4, 5 層目ラダーの製造にも適用されている。6 層目ラダーの量産は，本研究室を中心に，Kavli IPMU，KEK，東北大学，新潟大，東京理科大，韓国の慶北大，ソウル大との共同開発で進めている。本年度は，実験で使用されるラダーを 6 台量産することに成功した。来年度には，Belle II 検出器で必要な全てのラダーが完成する予定である。

本実験では SVD 最内層の 3 層目ラダーが最もヒット占有率が高くなることが予想され，両面ストリップ検出器特有のゴーストヒットがトラッキング性能に影響する可能性がある。2016 年 4 月に，崩壊点検出器各層の実機ラダーを 1 つずつ使い，ドイツ電子シンクロトロン研究所 (DESY) にてシステム統合ビーム試験を行った。この実験データを用い，3 層目ラダーの P 側と N 側のストリップの信号の相関情報を用いて実粒子とゴーストヒットを識別する手法の開発を行っている。これにより崩壊点の再構成精度が高まり，さらにトラッキングに組込むことにより低運動量粒子の検出効率が向上する可能性がある。

本研究室では，電子や γ を含む終状態のエネルギー測定で重要な役割を担う ECL(電磁カロリメータ) 検出器に関しても，SuperKEKB における高輝度・高バックグラウンド環境に対応するための新しい読み出しエレクトロニクスの開発試験，およびシンチレータの試験を行っている。ECL 検出器のアップグレードオプションとして，使用する結晶を CsI(Tl) から，より時定数の短い pure CsI に取り換えることで更なる性能向上を目指す案がある。本研究室では様々な pure CsI 結晶サンプルや波長変換材を組み合わせて発光量や検出効率を測定し，さらに後段の Avalanche

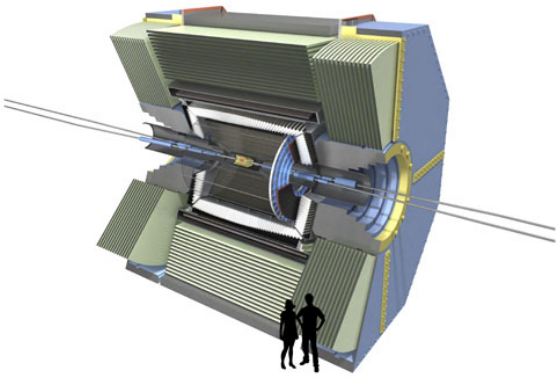

図 2.3.1: Belle II（ベルツー）測定装置の完成予想図

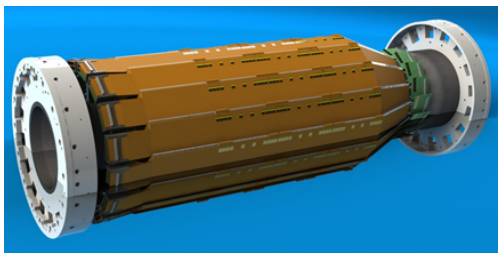

図 2.3.2: 本研究室で製作中の，Belle II SVD 測定器の完成予想図

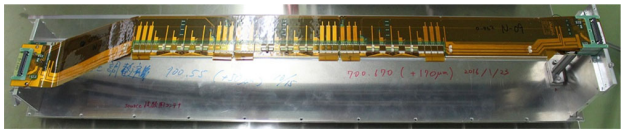

図 2.3.3: 本研究室を中心に製作した，Belle II SVD 6 層目ラダーの量産機

Photodiode 検出器 (APD) に接続される増幅回路の改良を含め，総合的な性能向上に取り組んでいる。

2.3.2 HSC 暗黒エネルギー研究

宇宙の全エネルギーのうち，既知の物質が占めるのはたった約 5%であり，約 27%は暗黒物質に，残りの約 68%は，暗黒エネルギーによって占められていることが観測的に明らかになっている。特に加速膨張の源である暗黒エネルギーは正体不明であり，素粒子物理学と天文学に跨がる，現代物理学の大きな謎である。

本研究室では，すばる望遠鏡次世代超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam(HSC) を開発し，それを用いて暗黒エネルギーの性質に強い制限を付けることを目指している。HSC は 1.77 平方度の視野を 104 枚の CCD(1.2 ギガピクセル) で撮像する。これにより 1400 平方度を限界等級 26 等という深さでサーベイする。この観測領域に含まれる 約 1 億個程度の銀河の形状測定から，宇宙の大規模構造によって引き起こされる重力レンズ効果 (宇宙論的弱重力レンズ効果) を測定することによって，暗黒エネルギーの性質に制限を付ける。

HSC の開発は 2012 年 8 月に完了し，2014 年 3 月より大規模サーベイ観測を開始している。試験観測では，全視野を平均して 0.6 秒角以下のシーイングが得られ，設計通りの高精度観測が可能であることが示された。2014 年度から HSC での本格的な観測が始まり，2016 年度はサーベイの観測の第 1 期データが公開された。試験観測データの解析から復元した暗黒物質マップを図 2.3.5 に示す。

HSC-SSP サーベイチームでは，第 1 期のデータを用いて，重力レンズ解析をはじめとする幅広いサイエンスについて多くの論文の執筆が計画されている。今後は，これまで当研究室が開発してきた銀河の形状測定アルゴリズムなどを用い重力レンズ効果の解析を進め，サーベイの最初の段階で得られるデータから暗黒物質の正体に迫る物理結果を出していきたい。

2.3.3 加速器ニュートリノ振動実験

2015 年のノーベル物理学賞は，ニュートリノ振動の発見に対し与えられた。ニュートリノ振動は，素粒子の標準模型を超えるものとしてこれまで確立した唯一の現象であり，より根源的な原理を探求する上での手がかりとなると期待されている。また，ニュートリノ振動を利用することでレプトンの粒子–反粒子対称性（CP 対称性）の破れに関する研究が可能であり，宇宙の物質–反物質の非対称性の謎を解く鍵を与える可能性がある。

我々は，人工のニュートリノビームを用いてニュートリノ振動を精密に測定する，長基線ニュートリノ振動実験を行っている。また，ニュートリノ振動測定の系統誤差を削減することを目的として，長基線ニュートリノ振動実験に関連した，研究室規模で可能な比較的小規模な実験の立案・遂行を進めている。

T2K 長基線ニュートリノ振動実験

T2K 長基線ニュートリノ振動実験では，茨城県東海村の J-PARC （大強度陽子加速器）実験施設で大強度のミューオンニュートリノビームを生成し，295 km 離れた岐阜県飛騨市の大型水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデでニュートリノ事象を観測することで，世界最高精度でのニュートリノ振動の測定を行っている。

T2K 実験は 2010 年にデータ収集を開始し，震災や事故による中断を挟みながらも J-PARC 加速器の強度向上に合わせてデータ量を増やしてきた。我々のグループは，実験全体の運用と将来計画の策定を主導しているほか，ニュートリノビームの安定的な生成，およびビームの品質の継続的な監視を行うための，ニュートリノビームのビーム軸上に置かれた前置検出器（INGRID 検出器と呼ばれる）の運用の中核を担っている。

レプトンセクターでの CP 対称性の破れの探索　宇宙初期に大量に対生成されたはずの物質と反物質のうち，物質だけが残ったことを説明するための，いわゆる「サハロフの 3 条件」のひとつに，CP（Charge-Parity）対称性が破れていることがある。物質を形作る素粒子には大きく分けてクォークとレプトンの 2 種類がある。これまでに実験的に CP 対称性の破れが確認されているのは，クォークに関してのみである。1964 年の発見以降様々な研究が行われた結果，B ファクトリー等の成果により，クォークの CP 対称性の破れは小林-益川理論で説明できることがわかったが，一方で，その破れの大きさは宇宙の物質量を

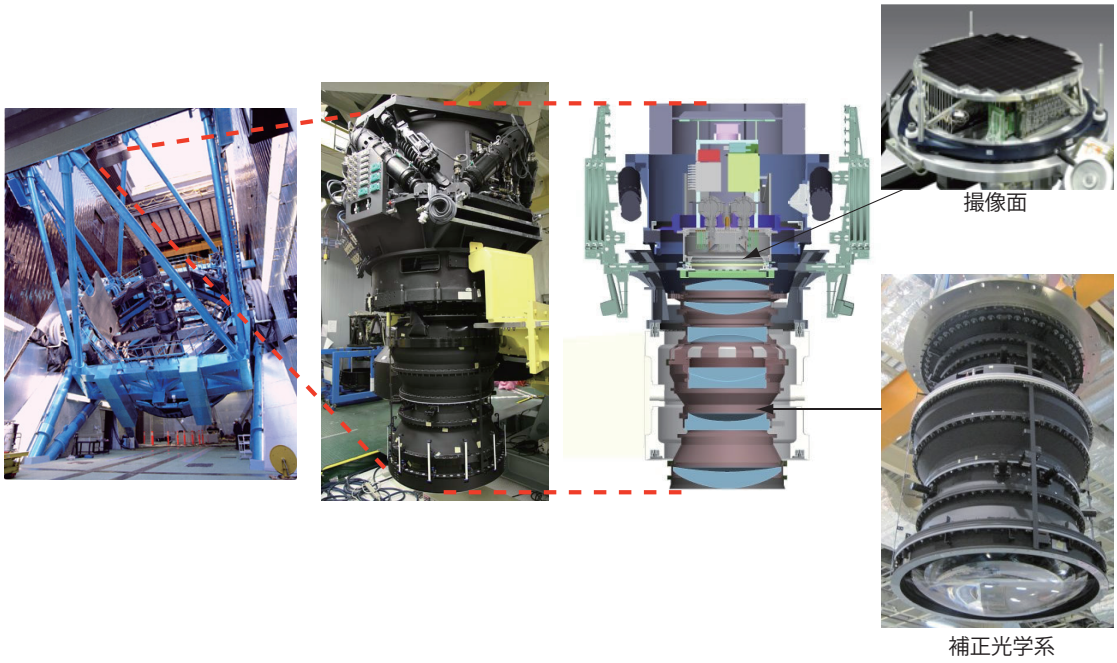

図 2.3.4: 完成した Hyper Suprime-Cam の概観。

説明するには不十分であり，さらに他の起源が必要と考えられている。

ニュートリノ振動の発見により，ニュートリノの性質の研究，さらには素粒子の新たな性質や，より基礎的な法則の探求を行うための様々な研究が可能となった。中でも，ニュートリノの振動確率と，反ニュートリノの振動確率を比べることで，レプトンセクターでの CP 対称性の破れを直接的に検証できる可能性が議論されてきた。この測定にはミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの変換を用いるが，T2K 実験の開始前にはこの変換の存在自体がまず実験的に確認されていなかった。そこで，T2K 実験の第一の目標はこの電子ニュートリノ出現の存在を発見することであった。我々は，2011 年から 2013 年にかけて，まずニュートリノビームによるデータを蓄積し，電子ニュートリノ出現の存在を確認することに成功した。

そこで，次なる目標を CP 対称性の測定に定め，2014 年夏から 2016 年にかけて，反ニュートリノビームのデータを収集した。T2K 実験で 2016 年夏までに取得した，標的に照射した陽子数（Protons On Target, POT）にして 1.5×10^{21} POT（ニュートリノ・反ニュートリノそれぞれ約 7.5×10^{20} POT）のデータを解析した結果，T2K 実験以前には全く測られていなかった，レプトンセクターでの CP 対称性の破れのパラメータ δ_{CP} に対しての制限を初めて得た。反ニュートリノデータを用いることで，T2K 実験単独でも δ_{CP} に対しての制限を得ることができている。

ニュートリノ混合角 θ_{13} に対する原子炉ニュートリノ実験からの制限を用い，3 世代の標準的なニュートリノ混合行列を仮定したとき，正質量階層（負質量階層）に対し，δ_{CP} の許容範囲は 90%信頼度で $-3.13 < \delta_{CP} < -0.39$ $(-2.09 < \delta_{CP} < -0.74)$ となった。CP 対称性を保存する値である $\delta_{CP} = 0$ や $\delta_{CP} = \pi$ を 90%信頼度で棄却しており，ニュートリノ振動で CP 対称性が大きく破れている可能性を示唆する，今後のニュートリノ研究の指針となる成果である。

また，振動パラメータ $\sin^2\theta_{23}$，$|\Delta m^2_{23}|$ に関しても，世界最高精度の測定を行っており，今後さらなる精密測定を目指す。

T2K phase II と前置検出器アップグレード　T2K 実験グループでは，電子ニュートリノ出現の発見という成果をもとに，J-PARC からのビーム強度を設計強度である 750 kW に，さらにはそれを超えて 1.3 MW 程度までアップグレードするとともに，解析手法の改良と系統誤差の改善を行うことで，CP 非保存現象の探索をはじめとする，新たな物理に対する感度をさらに向上させることを提案している。特に，レプトンセクターの CP に関して，現在の結果から示唆されるように対称性の破れが比較的大きい場合には，3σ 以上の有意度で観測が可能となると期待される。

この T2K Phase II と呼ばれる実験計画に関連して，前置ニュートリノ検出器を大幅にアップグレードすることを検討している。本研究室では，この前置ニュートリノ検出器アップグレードプロジェクトを主導しており，検出器システムの概念設計の検討と，物理感度の改善の見込みに関する研究を行っている。

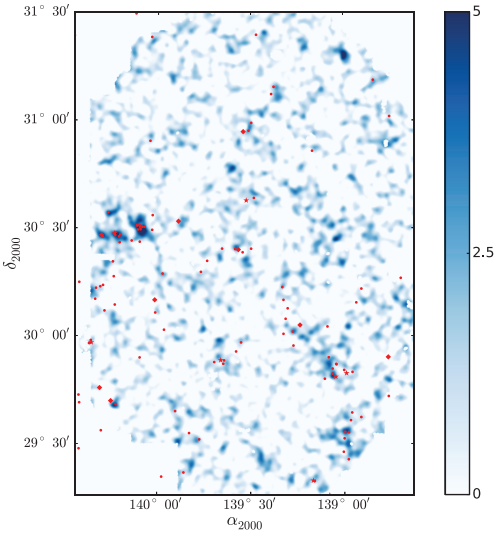

図 2.3.5: HSC の初期エンジニア観測による暗黒物質マップ。詳細な密度構造の復元に成功している。Astrophys. J. **807**, no. 1, 22 (2015) より。

水標的でのニュートリノ反応断面積測定実験（WAGASCI 実験）

T2K 実験では前置検出器での測定によりニュートリノ-原子核反応断面積の系統誤差を削減しているが，1）スーパーカミオカンデが水，前置検出器では主にプラスチック（炭化水素）という標的原子核の違い，2）スーパーカミオカンデ（全方向）と前置検出器（主にビームの前方方向）の角度アクセプタンスの違い，という検出器の違いにより主な系統誤差が生まれている。今後，T2K 実験でより多くのデータを蓄積するにつれ，ニュートリノ-原子核反応断面積の不定性による系統誤差がニュートリノ振動測定の精度を制限することが予想される。そこで，我々のグループを中心に，この系統誤差を削減するための新しい実験を行っている。

我々は，水とプラスチックの反応断面積の比を 3% の精度で測定し，T2K 実験の系統誤差を削減することを目標にした新実験の検討を 2013 年から開始し，前置検出器ホール地下 2 階のスペースに，水標的かつ大角度まで高いアクセプタンスを持った新しい検出器を設置し，ニュートリノビームによる測定を行う計画を立案した。この実験を 2014 年 5 月に J-PARC でのテスト実験（T59:実験名 WAGASCI）として提案し，採択された。さらに，この標的モジュールの一部を先行して既存の T2K 前置検出器の上流に置き，性能評価とともにニュートリノ反応の研究を行う計画（INGRID water module）も提案した。本年度は，INGRID water module を 2016 年夏に設置し，秋からの実験で取得したデータの解析を進めるとともに，T59 の検出器製作を進めた。

図 2.3.6: 製作中の WAGASCI モジュール。薄いプラスチックシンチレータを格子状に組んだ層と，平面的に並べた層を交互に並べた構造。シンチレータの間の空間に水を入れてニュートリノ反応の標的とする。

2.3.4 陽子崩壊の探索

素粒子の標準模型は，近年の Higgs 粒子の発見に象徴されるように非常に成功した模型であるが，様々な未解決の謎を残しており，より基本的な物理法則を表す理論の低エネルギーでの有効理論であると考えられている。標準模型を超えた物理の理論として有力なものとして，「大統一理論」がある。大統一理論では，4 つの基本的な相互作用のうち，標準模型で統一された電磁相互作用と弱い相互作用に加え，10^{16}GeV 程度の超高エネルギーで，さらに強い力も統一される。また，クォークとレプトンも統一される一方で，陽子の崩壊が予言される。陽子崩壊の探索は，大統一理論の唯一の直接的検証法である。

我々の研究室では，スーパーカミオカンデのデータを用い，陽子崩壊を世界最高の感度で探索している。すべての光電子増倍管の情報を使う，新しい再構成ソフトウェアを開発することで，既存の解析よりも感度を向上させることが可能となった。新しい再構成アルゴリズムの性能を引き出すためには，光電子増倍管のゲインや水の透過率などの検出器の動作状況の時間変動を考慮する必要があるため，それらを宇宙線などの較正用データで評価・較正する作業を行った。その上で，陽子崩壊の主要なモードと考えられている $p \to e^+\pi^0$ 崩壊の探索を行い，陽子の寿命の下限値として $\tau_p/\mathrm{Br}(p \to e^+\pi^0) > 1.88 \times 10^{34}$ 年という結果を得た。これは，現在のところ陽子崩壊の寿命に対して世界で最も厳しい制限である。

2.3.5 次世代大型水チェレンコフ検出器・ハイパーカミオカンデ

レプトンセクターで CP 非対称性の測定をするための最も現実的で有望な方法は，電子ニュートリノ発現事象の頻度をニュートリノと反ニュートリノで比較することであるが，非対称性の詳細な研究のためには T2K 実験の数十倍の統計が必要となる。ま

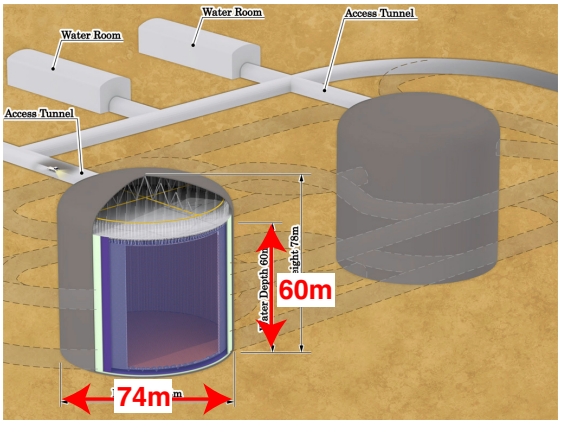

図 2.3.7: ハイパーカミオカンデ検出器の概念図。

た，これまで 20 年にわたってスーパーカミオカンデで行ってきた陽子崩壊の探索感度を飛躍的に向上させるためにも，より大きく高性能の検出器の建設が望まれる。当研究室では，このような次世代の実験を行うために，現行のスーパーカミオカンデよりひと桁大きな実験装置，「ハイパーカミオカンデ」検出器（図 2.3.7）の実現のための研究を進めている。ハイパーカミオカンデ検出器は，ニュートリノの CP 非対称性測定，陽子崩壊の探索や，超新星からのニュートリノ検出などを世界最高感度で行うことのできる，宇宙と素粒子の分野にわたる幅広い研究を行うための実験装置である。

我々の研究室では，2009 年から宇宙線研究所，京都大学，KEK，名古屋大学などの国内関係者に呼びかけてワーキンググループを結成し研究を推進するとともに，ハイパーカミオカンデでの最も重要なテーマのひとつである，J-PARC 加速器からのニュートリノビームを使った長基線実験での CP 対称性の破れに対する研究を主導してきた。2015 年 1 月には国際共同実験グループが発足し，世界各国で実現に向けた研究を協力して進めている。本研究室では，実験全体の方針策定を主導し，物理感度研究のまとめ役を担うほか，計画の成否を決める基幹技術のひとつである新型光検出器の開発を行っている。今後は，計画の実現に向け，開発・研究をさらに精力的に進めていく。

2.3.6 アクシオンおよび軽い暗黒物質探索実験

アクシオンは量子色力学の強い CP 問題を解決するために導入された擬スカラー粒子である。世界中で様々なアクシオン探索実験が行われているが，本研究室ではハドロニックアクシオンと呼ばれるアクシオン模型に特化した探索実験装置の開発を本年度から開始した。太陽コア中心で熱的に励起した ^{57}Fe 原子核の M1 エネルギー準位から放出たれるアクシオンを地上の ^{57}Fe で吸収し，脱励起で放出される 14.4 keV の γ 線を検出する計画である。

また，この実験をさらに高感度化することで軽い暗黒物質探索を行う可能性の研究も神戸大・京都大とともに行っている。暗黒物質の存在は確実視されており，様々な大規模実験で直接生成・直接探索による試みが行われているが，発見には至っていない。このような実験では主に 100GeV 以上の重い暗黒物質をターゲットとしているため，数 GeV 以下の軽い暗黒物質に対する感度は高くない。シリコン検出器は軽い暗黒物質の直接探索にも適しており，低エネルギー閾値が比較的容易に実現でき，検出器をコンパクトにできる点で有利である。

本年度は実験室に検出器冷却と環境放射線遮蔽を実現するチャンバー装置の設計・建設，およびバックグラウンド解析を行った。温度 −85 度，遮蔽用鉛 10 cm 厚までの実験環境が実現できるチャンバーを開発した。このチャンバー内に京都大学と高エネ研のグループによって開発された SOI(Silicon On Insulator) ピクセル検出器 XRPIX を設置し，γ 線，X 線，β 線の検出に成功し，更に α 線，宇宙線などの信号にも対応したクラスタリング法を実装した。検出器開発においては京都大学，大阪大学，宮崎大学，東京大学工学部などと XRPIX 素子の近接スタック化を実現するための新しい XRPIX 実装基板，フレキシブル基板，読出し基板の共同開発を進め，設計を行った。次年度からアクシオン探索実験を開始することを目指している。

一方，軽い暗黒物質直接探索実験に関しては，検出器の高アレイ化を実現できた場合の到達感度を計算したところ，最終目標仕様の XRPIX 素子を 16 個アレイ化することで既存の実験を上回る性能を有することが分った (図 2.3.8)。

両実験の更なる高感度化研究として，Ge 検出器でスタック XRPIX 検出器に用いられる実装基板・表面実装素子のバックグラウンド測定を行った。これにより，低バックグラウンド部材の選定が可能になった。今後はアクシオン実験を速やかに実施し，その経験をもとに軽い暗黒物質探索実験の実現化を目指す。

＜報文＞

(原著論文)

B ファクトリー関連

[1] B. Pal *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of the decay $B_s^0 \to K^0\overline{K}^0$," Phys. Rev. Lett. **116**, no. 16, 161801 (2016).

[2] K. Negishi *et al.* [Belle Collaboration], "First model-independent Dalitz analysis of $B^0 \to DK^{*0}$, $D \to K^0_S\pi^+\pi^-$ decay," PTEP **2016**, no. 4, 043C01 (2016).

[3] A. Garmash *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of Zb(10610) and Zb(10650) Decaying to B Mesons," Phys. Rev. Lett. **116**, no. 21, 212001 (2016).

[4] Z. King *et al.* [Belle Collaboration], "Search for the decay $B^0 \to \phi\gamma$," Phys. Rev. D **93**, no. 11, 111101 (2016).

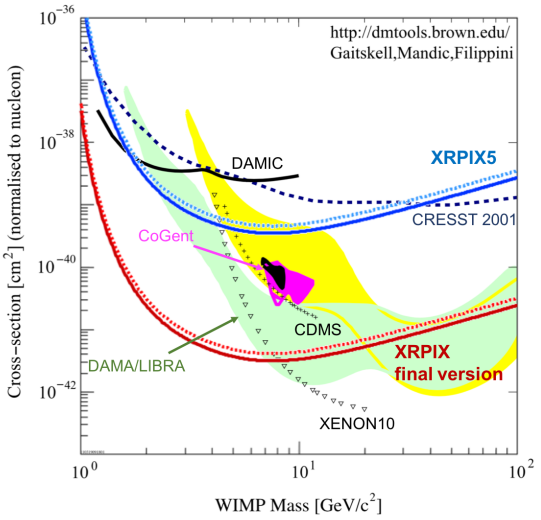

図 2.3.8: 軽いダークマターの質量と反応断面積の探索領域。XRPIX5 検出器 ($21.9\times13.8\times t0.5\ mm^3$) を 6 アレイの場合と，XRPIX 最終仕様検出器 ($49.2\times15.8\times t0.5\ mm^3$) を 16 アレイの場合で，それぞれ 45 日間，2 年間の測定で到達する理論感度曲線を示す。実線，点線はそれぞれ 90%，95% C.L. に対応する。

[5] C. P. Shen *et al.* [Belle Collaboration], "Search for XYZ states in $\Upsilon(1S)$ inclusive decays," Phys. Rev. D **93**, no. 11, 112013 (2016).

[6] S. B. Yang *et al.* [Belle Collaboration], "First Observation of Doubly Cabibbo-Suppressed Decay of a Charmed Baryon: $\Lambda_c^+ \to pK^+\pi^-$," Phys. Rev. Lett. **117**, no. 1, 011801 (2016).

[7] C. P. Shen *et al.* [Belle Collaboration], "First observation of $\gamma\gamma \to p\bar{p}K^+K^-$ and search for exotic baryons in pK systems," Phys. Rev. D **93**, no. 11, 112017 (2016).

[8] C. S. Park *et al.* [Belle Collaboration], "Search for a massive invisible particle X^0 in $B^+ \to e^+X^0$ and $B^+ \to \mu^+X^0$ decays," Phys. Rev. D **94**, no. 1, 012003 (2016).

[9] Y. Kato *et al.* [Belle Collaboration], "Studies of charmed strange baryons in the ΛD final state at Belle," Phys. Rev. D **94**, no. 3, 032002 (2016).

[10] V. Vorobyev *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the CKM angle φ_1 in $B^0 \to \bar{D}^{(*)0}h^0$, $\bar{D}^0 \to K^0_S\pi^+\pi^-$ decays with time-dependent binned Dalitz plot analysis," Phys. Rev. D **94**, no. 5, 052004 (2016).

[11] J. Yelton *et al.* [Belle Collaboration], "Study of Excited Ξ_c States Decaying into Ξ_c^0 and Ξ_c^+ Baryons," Phys. Rev. D **94**, no. 5, 052011 (2016).

[12] R. Mizuk *et al.* [Belle Collaboration], "Energy scan of the $e^+e^- \to h_b(nP)\pi^+\pi^-$ ($n = 1, 2$) cross sections and evidence for $\Upsilon(11020)$ decays into charged bottomonium-like states," Phys. Rev. Lett. **117**, no. 14, 142001 (2016).

[13] Y. Sato *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the branching ratio of $\bar{B}^0 \to D^{*+}\tau^-\bar{\nu}_\tau$ relative to $\bar{B}^0 \to D^{*+}\ell^-\bar{\nu}_\ell$ decays with a semileptonic tagging method," Phys. Rev. D **94**, no. 7, 072007 (2016).

[14] E. Won *et al.* [Belle Collaboration], "Search for a dark vector gauge boson decaying to $\pi^+\pi^-$ using $\eta \to \pi^+\pi^-\gamma$ decays," Phys. Rev. D **94**, no. 9, 092006 (2016).

[15] S. Jia *et al.* [Belle Collaboration], "Search for the 0^{--} Glueball in $\Upsilon(1S)$ and $\Upsilon(2S)$ decays," Phys. Rev. D **95**, 012001 (2017).

[16] Y.-T. Lai *et al.* [Belle Collaboration], "Search for D^0 decays to invisible final states at Belle," Phys. Rev. D **95**, 011102 (2017).

[17] T. Nanut *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of $D^0 \to \rho^0\gamma$ and search for CP violation in radiative charm decays," Phys. Rev. Lett. **118**, 051801 (2017).

[18] S. Wehle *et al.* [Belle Collaboration], "Lepton-Flavor-Dependent Angular Analysis of $B \to K^*\ell^+\ell^-$," Phys. Rev. Lett. **118**, 111801 (2017). doi:10.1103/PhysRevLett.118.111801 [arXiv:1612.05014 [hep-ex]].

T2K/Super-K/Hyper-K 関連

[19] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Measurement of the muon neutrino inclusive charged-current cross section in the energy range of 1–3 GeV with the T2K INGRID detector," Phys. Rev. D **93**, no. 7, 072002 (2016).

[20] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Real-Time Supernova Neutrino Burst Monitor at Super-Kamiokande," Astropart. Phys. **81**, 39 (2016).

[21] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Measurement of Muon Antineutrino Oscillations with an Accelerator-Produced Off-Axis Beam," Phys. Rev. Lett. **116**, no. 18, 181801 (2016).

[22] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Measurement of double-differential muon neutrino charged-current interactions on C_8H_8 without pions in the final state using the T2K off-axis beam," Phys. Rev. D **93**, no. 11, 112012 (2016).

[23] E. Richard *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Measurements of the atmospheric neutrino flux by Super-Kamiokande: energy spectra, geomagnetic effects, and solar modulation," Phys. Rev. D **94**, no. 5, 052001 (2016).

[24] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Solar Neutrino Measurements in Super-Kamiokande-IV," Phys. Rev. D **94**, no. 5, 052010 (2016).

[25] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Search for Neutrinos in Super-Kamiokande associated with Gravitational Wave Events GW150914 and GW151226," Astrophys. J. **830**, no. 1, L11 (2016).

[26] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Measurement of Coherent π^+ Production in Low Energy Neutrino-Carbon Scattering," Phys. Rev. Lett. **117**, no. 19, 192501 (2016).

[27] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Search for proton decay via $p \to e^+\pi^0$ and $p \to \mu^+\pi^0$ in 0.31 megaton·years exposure of the Super-Kamiokande water Cherenkov detector," Phys. Rev. D **95**, no. 1, 012004 (2017).

[28] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "First measurement of the muon neutrino charged current single pion production cross section on water with the T2K near detector," Phys. Rev. D **95**, no. 1, 012010 (2017).

(会議抄録)

[29] Nobuhiro Shimizu, "New Physics search in rare τ decays at Belle and prospects at Belle II," Proceedings of Science (FPCP2016) 022, (2016).

[30] Watson, I.J. on behalf of the Belle Collaboration, "Experimental Overview of ϕ_3," Proceedings of Science (FPCP2016) 003 (2016).

[31] Tianmeng Lou, "Development and Performance Evaluation of Large-Aperture Hybrid Photo-Detector for Hyper-Kamiokande", Neutrino 2016 conference proceedings, published by IOP Publishing.

[32] Y. Jin, H. Aihara, O. V. Borshchev, D. A. Epifanov, S. A. Ponomarenko, and N. M. Surin, "Study of a pure CsI crystal readout by APD for Belle II endcap ECL upgrade," Nucl. Instrum. Meth. A 824 (2016): 691-692.

(学位論文)

博士論文

[33] Nobuhiro Shimizu, "Measurement of the tau Michel parameters $\bar{\eta}$ and $\xi\kappa$ in the radiative leptonic decay $\tau \to \ell\nu\bar{\nu}\gamma$," Feb. 2017.

修士論文

[34] 婁 天濛, "Development of 50 cm Diameter Hybrid Photo-Detector for Hyper-Kamiokande," 修士論文, 2017 年 1 月

＜学術講演＞

(国際会議)

ポスター発表

[35] Yoshiyuki Onuki, Tatsuki Ose, and Alejandro Mora, "Feasibility study of Axion and WIMP search experiment with SOI pixel detector," International Symposium on Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research, May 11-13, 2016, University of Tokyo, Tokyo.

[36] Yifan Jin, "A scintillation counter consisting of a pure CsI crystal, WLS and APD for Belle II," 38th International Conference on High Energy Physics, 3–10 August, 2016, Chicago, USA.

[37] Yifan Jin, "Study of $\tau^- \to \pi^-\ell^+\ell^-\nu_\tau$ at Belle," The 14th International Workshop on Tau Lepton Physics (Tau2016), 19–23 September, 2016, IHEP, Beijing, China.

[38] Junya Sasaki, "Study of five-body leptonic decays of tau at Belle," *ibid.*

[39] Tianmeng Lou, "Development and Performance Evaluation of Large-Aperture Hybrid Photo-Detector for Hyper-Kamiokande," XXVII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2016), July 4–9, 2016, Imperial College London, South Kensington, London, UK.

[40] Tatsuki Ose, "Development of Low Background Construction for Axion Search with SOI pixel Detector," International Workshop on "Double Beta Decay and Underground Science" (DBD16), November 8-10, 2016, Osaka University, Osaka.

[41] Alejandro Mora, "Geant4 Simulation for Low Background Axion-WIMP Detection Experiment," *ibid.*

[42] Hiroko Niikura, "Detection of universality of dark matter profile from Subaru weak lensing measurements of 50 massive clusters," The 6th Subaru International Conference in Hiroshima, Nov 28-Dec 2, 2016, International Conference Center Hiroshima, Hiroshima, Japan.

[43] Riku Tamura, "Development of new electronics for a new detector WAGASCI," International workshop on future potential of high intensity accelerators for particle and nuclear physics (HINT2016), December 5–8, 2016, J-PARC, Tokai, Ibaraki, Japan.

[44] Junya Sasaki, "Study of five-body leptonic decays of tau at Belle," *ibid.*

一般講演

[45] Watson, I.J., "ϕ_3 Sensitivity Study with a Model-independent $B^\pm \to [K_S\pi^+\pi^-]_D K^\pm$ Dalitz Analysis with Belle II," 4th B2TiP Workshop, May 23-25, 2016. Pittsburgh, Pennsylvania, USA.

[46] Nobuhiro Shimizu, "New Physics search in rare τ decays at Belle and prospects at Belle II," Flavour Physics and CP violation (FPCP), June 6–9, 2016, Caltech, Pasadena CA, USA.

[47] Watson, I. J., "Experimental Overview of ϕ_3," *ibid.*

[48] Masashi Yokoyama, "Physics of Neutrino Detection," International Neutrino Summer School 2016, Jul.y 17–29, Quy Nhon, Vietnam.

[49] Nobuhiro Shimizu, "Measurement of the Michel parameters ($\bar{\eta}$, $\xi\kappa$) in the radiative leptonic decay of τ," The 14th International Workshop on Tau Lepton Physics (Tau 2016), September 19–23, 2016, IHEP, Beijing, China.

[50] Masashi Yokoyama, "The T2K Near Detector Upgrade," Workshop on Neutrino Near Detectors based on gas TPCs, November 8–9, CERN.

[51] Yoshiyuki Onuki,「Experimental Status of phi3 measurement」, International workshop on future potential of high intensity accelerators for particle and nuclear physics(HINT2016), December 5–8, 2016, J-PARC, Tokai, Ibaraki, Japan.

[52] Masashi Yokoyama, "Hyper-Kamiokande," Prospects in Neutrino Physics (NuPhys 2016), December 12–14, London, UK.

[53] Masashi Yokoyama, "Japanese neutrino program," Second Workshop on Neutrino Near Detectors based on gas TPCs, March 20–21, CERN.

招待講演

[54] Masashi Yokoyama, "Hyper-Kamiokande, Near Detectors and Physics Potencials," Korean Physics Society pioneer symposium, October 20, 2016, Gwangju, Korea.

[55] H. Aihara, "ILC250, Higgs Factory in Japan," ARC Centre of Excellence for Particle Physics at the Terascale, Adelaide, Australia, February 23, 2017.

(国内会議)

ポスター発表

[56] 新倉広子,「アンドロメダ銀河の広域モニター観測による原始ブラックホール探索」, 2016 年度 第 46 回天文・天体物理若手夏の学校, 長野県戸倉市, 2016 年 7 月 26 日–29 日.

[57] Junya Sasaki, "Study of five-body leptonic decays of tau at Belle," Flavor Physics Workshop 2016, 新潟県岩室温泉, 2016 年 10 月 26 日–29 日

[58] 竹馬匠泰,「J-PARC T59 WAGASCI 実験における信号読出しシステムの開発」, 新学術領域「ニュートリノフロンティア」研究会, 石川県加賀市, 2016 年 11 月 28 日–30 日.

[59] 細見郁直, "Construction of new water module for the WAGASCI experiment", 同上.

[60] 新倉広子,「アンドロメダ銀河の HSC 観測による原始ブラックホール探査」, 第 29 回理論懇シンポジウム, 東北大学, 2016 年 12 月 20 日–22 日.

[61] Hiroko Niikura,「アンドロメダ銀河の HSC 観測による原始ブラックホール探索」, Why does the Universe accelerate? - Exhaustive study and challenge for the future - Mar2017, 高エネルギー加速器研究機構, 2017 年 3 月 8 日–10 日.

一般講演

[62] 田村陸,「陽子相関検出器 NINJA 検出器の開発」, 高エネルギー物理 春の学校 2016, 滋賀県大津市, 2016 年 5 月 12–14 日

[63] 新倉広子,「アンドロメダ銀河の広視野深探索観測による原始ブラックホール探索」, 日本天文学会 2016 年秋季年会, 愛媛大学, 2016 年 9 月 14 日–16 日.

[64] 須田祐介,「Super-Kamiokande 実験における核子崩壊探索 $p \to e^+\pi^0$ および $p \to \mu^+\pi^0$ の最新結果」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学 木花キャンパス, 2016 年 9 月 21–24 日

[65] 婁天濛,「ハイパーカミオカンデに向けた大口径ハイブリッド型光検出器の開発及び実証試験」, 同上.

[66] 古賀太一朗,「新ニュートリノ検出器 INGRID Water Module で取得した宇宙線データと MC シミュレーションとの比較結果」, 同上.

[67] 竹馬匠泰,「WAGASCI 実験の信号読み出しシステムの開発」, 計測システム研究会 2016, J-PARC, 2016 年 10 月 13–14 日.

[68] 新倉広子,「アンドロメダ銀河の HSC 観測による原始ブラックホール探索」, 第 5 回観測的宇宙論ワークショップ, 広島大学, 2016 年 11 月 24 日–26 日.

[69] 横山将志, "Recent T2K oscillation results and future prospects," 新学術研究会「ニュートリノフロンティアの展望」, 石川県加賀市, 2016 年 11 月 29 日.

[70] 細見郁直,「水とプラスチックにおけるニュートリノ反応断面積測定のための WAGASCI 実験」, 第 23 回素粒子物理国際研究センターシンポジウム, 長野県白馬村, 2017 年 2 月 19 日–22 日.

[71] 竹馬匠泰,「ニュートリノ検出器 WAGASCI におけるデータ収集システムの開発」, 第 72 回 日本物理学会年次大会, 大阪大学豊中キャンパス, 大阪府豊中市, 2017 年 3 月 17–20 日

[72] 田村陸,「ニュートリノ検出器 WAGASCI に向けた SPIROC2D を用いた新エレクトロニクスの性能評価試験」, 同上.

[73] 古賀太一朗,「格子型ニュートリノ検出器 INGRID Water Module を用いた ニュートリノ・水原子核反応断面積の測定」, 同上.

[74] 細見郁直,「WAGASCI 実験のための新たな水モジュール検出器の建設」, 同上.

[75] Alejandro Mora, "Background Modelling and Pixel Clustering for Low-Background Axion-WIMP Search Pilot Experiment," 同上.

[76] 小瀬樹,「^{57}Fe を用いた太陽アクシオン探索に向けたパイロット実験」, 同上.

[77] Kun Wan, "The feasibility study of ghost hits reduction in Belle2/SVD, using P/N charge correlation from 2016 beam test data," 同上.

[78] Kun Wan, “The feasibility study of ghost hits reduction in Belle2/SVD, using P/N charge correlation from 2016 beam test data,” The 3rd ALPS Symposium on Photon Science, March 24, 2017, University of Tokyo, Tokyo, Japan.

招待講演

[79] Masashi Yokoyama, “Exploring the Universe with Elusive Neutrinos, from 1000m Underground,” IOP Publishing Young Researchers’ Meeting: Frontiers in Fundamental and Applied Physics, University of Tokyo, February 21, 2017.

(セミナー，その他)

[80] 相原博昭「環境安全・安全衛生の社会的・科学的位置づけ」2016 年度学術フロンティア講義「環境安全衛生入門」第 1 回，東京大学，2016 年 4 月 6 日.

[81] 横山将志，「ニュートリノ研究の発展と展望」，第 28 回東京大学理学部公開講演会 梶田隆章教授ノーベル賞受賞記念連続講演会「カミオカから宇宙をみる」，2016 年 4 月 24 日.

[82] 横山将志，「ニュートリノ振動研究の最前線」，東京大学理学部オープンキャンパス，2016 年 8 月 3-4 日.

[83] 横山将志，「ニュートリノ検出器」，高エネルギー加速器セミナー OHO’16，KEK, 2016 年 9 月 9 日.

[84] Hiroko Niikura, “Tightest upper bound on the abundance of primordial black holes with Hyper Suprime-Cam dense-cadence observation of M31 stars,” 2016 WPI Site Visit, Sep 30, 2016, Kavli IPMU, Chiba, Japan

[85] Hiroko Niikura, “Constraining primordial black hole dark matter with HSC observation of M31,” IPMU Astro Lunch Seminar, Nov 15, 2016, Kavli IPMU, Chiba, Japan.

[86] 横山将志，「ニュートリノでさぐる素粒子と宇宙の謎」，平成 28 年度 愛媛県高等学校教育研究会理科部会 全体会講演，松山市，2016 年 12 月 21 日.

[87] H. Aihara, “Science Council of Japan recommended Major Research Facilities and Large Research Projects — Master Plan 2017—,” EU Science & Technology Counsellors meeting, EU embassy, Tokyo, March 24, 2017.

2.4 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。

図 2.4.1: LHC 加速器

2.4.1 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 2.4.1) は、2015 年から LHC 加速器は重心系エネルギーが 13TeV に増強されて運転を再開している。2016 年は、積算ルミノシティーで約 $40fb^{-1}$ の実験データが得られ、本研究室は、**ヒッグス粒子の発見**につづいて、超対称性粒子の探索を行っている。

超対称性は、力の統一を実現する上で鍵となる性質であり、LHC での発見が大いに期待されている。ヒッグス粒子の質量 125GeV をうけて、naturalness などを一部緩和しなおして超対称性粒子発見可能な探索モードの再考を行い、以下の 3 つのモードに絞って、研究を行っている。

1. グルイーノ の対生成から生成する 4 ジェット事象
2. スカラートップクォークの対生成
3. 電弱ゲージーノがウィーノだったときの異常な飛跡

一番軽い超対称性粒子は宇宙の暗黒物質の良い候補であり、物質と反応しないで検出器を通り抜けてしまう。そのため横方向消失運動量 (mE_T と呼ぶ) が、バックグラウンドと比べて超対称性粒子の信号は大きな mE_T を持っている。これはどのモードにも共通の特徴である。今年度は特に、 1. と 3. のモードに関して新しい結果を公表した。

グルイーノの対生成から生成する 4 ジェット事象

グルイーノの対生成では、信号からは高い横向き運動量 (P_T) を持った複数のジェットが放出される特徴があるので、mE_T とジェットの P_T のスカラー和 (M_{eff}) も、信号はバックグラウンドに比べて高くなる。図 2.4.2 は、2016 年度の結果 (M_{eff} 分布) を示す。まだ有意な超過が観測されていない。これから、グルイーノについて約 2.0TeV の質量下限が得られた。図 2.4.3 に、棄却した領域を、グルイーノ質量と一番軽い超対称性粒子 (ニュートラリーノ) 質量平面で示している。

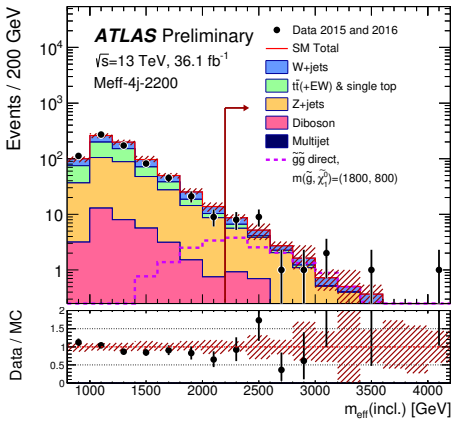

図 2.4.2: レプトンを含まない超対称性探索モードで期待される横方向消失運動量とジェットの横運動量のスカラー和分布 (Meff):共に黒点が 2015–2016 年度に実験したデータ、実線ヒストグラムがバックグラウンド (標準モデル過程)、点線が期待される信号

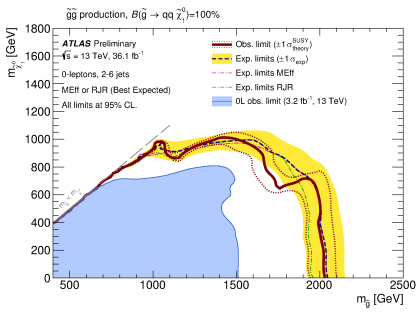

図 2.4.3: グルイーノとニュートラリーノの質量平面で棄却された領域　赤線の左側が今回棄却した領域 (95%CL)

電弱ゲージーノがウィーノだったときの異常な飛跡

ウィーノが最も軽い超対称性粒子 (LSP) のとき、消えたように見える短い飛跡 (消失飛跡) が観測される。4 点のヒットだけを使った非常に短い飛跡を捉えるアルゴリズムを新たに開発し、信号の超過を探したが、現時点では有意な超過は観測されていない (図 2.4.4)。ウィーノの質量に対して 430 GeV の質量下限が得られた。図 2.4.5 に今回棄却された領域を、ウィーノの質量と寿命の平面に対して示した。

2.4.2 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。

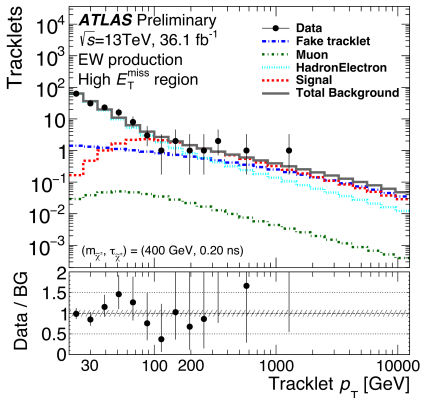

図 2.4.4: 短い飛跡探索で期待される飛跡の横運動量分布. 黒点が観測されたデータ、灰色線がバックグラウンド、赤線が期待される信号

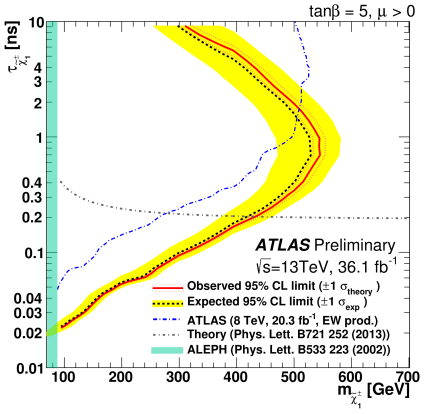

図 2.4.5: ウィーノの質量と寿命平面で棄却された領域　赤線の左側が今回棄却した領域 (95%CL)

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) の束縛系であるポジトロニウム (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 (BEC) を起こすと考えられる。Ps BEC が実現できれば、重力の研究や物質と反物質の対称性の研究、ガンマ線レーザーなど多くの応用が期待できる。本研究室では、ポジトロニウムの熱化とレーザー冷却を組み合わせた新しい冷却手法を提案した。レーザーシステムを五神研究室・工学系研究科吉岡研究室と共同で開発している。非線形光学結晶を用いた波長変換などに成功し、高パワーシステムの設計を開始した。また、Pick-off 消滅を用いた 100 K までのポジトロニウムの熱化測定を完了し (図 2.4.6)、新しい装置を用いて 4 K までの熱化測定をしている。さらに、産総研や九州大学と協力して高輝度陽電子ビームや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。

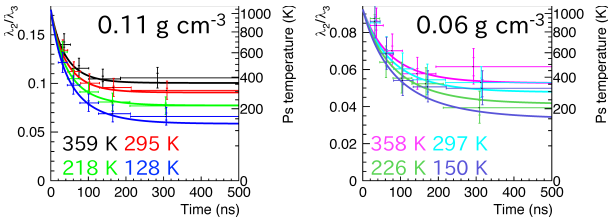

図 2.4.6: Pick-off 消滅率と 3 光子自己崩壊率の比と温度の時間発展。 [128]

放射光施設とパルス磁石を用いた光と弱い結合をもつ粒子の探索

X 線自由レーザーを光源とし、X 線 → 弱結合未知粒子 →X 線の変換を行う “Light Shining through a Wall (LSW)” と呼ばれる手法で、アクシオンなどの弱結合未知粒子を探索している。X 線と未知粒子の変換は強磁場の印加により行うが、磁場の強度が探索感度を決める。本研究室ではパルス磁石を使用して強磁場を発生させる。昨年 SPring-8 のビームライン BL19LXU で最初の探索を行い、結果を [5] に発表した。今後は磁石を改良して世界最高輝度 SACLA での測定を目指す。

SACLA を用いた光子・光子散乱の測定

量子電磁力学 (QED) では、古典電磁気学と異なり、光子と光子が相互作用し、散乱することが予言されている。QED の究極の検証であるこの光子・光子散乱を SACLA のパルス X 線を用いて行った。新しい結果を [4] に発表した。今後は SACLA の性能向上などによる感度向上を目指す。

高フィネス共振器とパルス磁石を用いた真空複屈折の探索

QED で予言されている強場下の物理として、真空の複屈折が挙げられる。真空に強い磁場を掛けると、真空偏極によってそこを通った光の偏光状態が変化すると予想される。先述のパルス磁石と赤外レーザーを用いて真空複屈折を探索する計画だが、感度向上のためには高フィネスのファブリ・ペロー共振器を用いて光路長を稼ぐ事が重要となる。五神研究室・吉岡研究室と共同で国内最高のフィネス $\sim 670,000$ の共振器を製作した。今年度はフィネス $\sim 350,000$ の装置を用いて、窒素ガスの複屈折及び偏光回転を測定し、真空複屈折の探索を行った。その結果、質量 0.1 eV 付近の Millicharged Particles に対して世界で初めての制限を得た (図 2.4.7)。今後は共振器及び磁石のアップグレードを行い、真空複屈折の世界初観測を目指す。

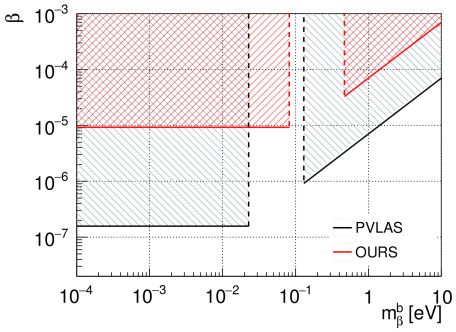

図 2.4.7: 真空複屈折探索によるボソン Millicharged Particles への制限。 [127]

SACLA と大強度レーザーを用いた真空回折の探索

強場下の QED の物理として、真空回折も挙げられる。真空偏極によって真空の屈折率が変化するため、非一様磁場中では屈折率勾配が生じ、そこを通った光 (プローブ光) は一部が回折されると予想される。この真空回折を世界で初めて観測するため、高強度場として高強度レーザーを、プローブ光として SACLA を用いる。今年度は、2.5 TW レーザーを用いてレーザーと X 線間の時間及び位置合わせ技術の確認を行い、1.6 ps, 12 μm 精度でのアラインメントに成功した。来年度は SPring-8 においてスタディを行い、バックグラウンドを抑制して世界初の真空回折探索を行う予定である。再来年以降は 500 TW レーザーを用い、真空回折の初観測を目指す。

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 Hidden Photon が挙げられる。これは電磁場と混ざり合うので、もしこれが暗黒物質であれば、導体表面から垂直に電磁波を放出させると予想される。この電磁波をパラボラアンテナを用いて集光し SBD で検出することで、特に今迄未開拓であったミリ波領域で暗黒物質を探索している。福井大学にある電波暗室にて 3 ヶ月間データを取得し、現在解析を進めている。将来的には SIS 検出器などを用いてより高感度な探索を目指す。

＜受賞＞

[1] 周健治、Student prize awarded for outstanding Student Presentation at 14th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques & Applications, 2016 年 5 月.

[2] 樊星、Best Student award, International School of Subnuclear Physics 2016, 2016 年 6 月.

[3] 樊星、平成 28 年度学生表彰「東京大学総長賞」(学業)、2017 年 3 月.

＜報文＞

(原著論文)

[4] T. Yamaji, T. Inada, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi *et al.*, "An experiment of X-ray photon-photon elastic scattering with a Laue-case beam collider", Phys. Lett. B 763, 454 (2016).

[5] T. Inada, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi *et al.*, "Search for Two-Photon Interaction with Axionlike Particles Using High-Repetition Pulsed Magnets and Synchrotron X Rays", Phys. Rev. Lett. 118, 071803 (2017).

[6] T. Yamazaki, T. Inada, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi *et al.*, "Repeating pulsed magnet system for axion-like particle searches and vacuum birefringence experiments", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 833, 122 (2016).

[7] The ALPHA Collaboration, "Observation of the 1S-2S transition in trapped antihydrogen", Nature 541, 506 (2017).

The ATLAS Collaboration

[8] Phys. Rev. C 93, 034914 (2016).

[9] Eur. Phys. J. C 76, 6 (2016).

[10] Eur. Phys. J. C 76, 45 (2016).

[11] Eur. Phys. J. C 76, 4 (2016).

[12] Eur. Phys. J. C 76, 199 (2016).

[13] Phys. Lett. B 753, 69 (2016).

[14] Eur. Phys. J. C 76, 5 (2016).

[15] Eur. Phys. J. C 76, 12 (2016).

[16] Eur. Phys. J. C76, 11 (2016).

[17] JHEP 01, 172 (2016).

[18] Eur. Phys. J. C 76, 55 (2016).

[19] JHEP 01, 032 (2016).

[20] Eur. Phys. J. C 76, 87 (2016).

[21] Phys. Rev. Lett. 116, 172301 (2016).

[22] Eur. Phys. J. C 76, 238 (2016).

[23] Eur. Phys. J. C 76, 210 (2016).

[24] Eur. Phys. J. C 76, 81 (2016).

[25] Phys. Rev. D 93, 052003 (2016).

[26] Phys. Rev. D 93, 052002 (2016).

[27] Phys. Lett. B 753, 552 (2016).

[28] Phys. Rev. D 93, 052009 (2016).

[29] JHEP 02, 110 (2016).

[30] Phys. Rev. D 93, 032009 (2016).

[31] Eur. Phys. J. C 76, 581 (2016).

[32] JHEP 04, 023 (2016).

[33] JHEP 01, 064 (2016).

[34] Phys. Rev. D 93, 072007 (2016).

[35] Phys. Rev. D 93, 012002 (2016).

[36] Phys. Lett. B 754, 214 (2016).

[37] Eur. Phys. J. C 76, 538 (2016).

[38] JHEP 02, 062 (2016).

[39] Phys. Lett. B 756, 228 (2016).

[40] Phys. Rev. D 93, 092005 (2016).

[41] Phys. Lett. B 756, 10 (2016).

[42] Phys. Lett. B 754, 302 (2016).

[43] Eur. Phys. J. C 76, 291 (2016).

[44] JHEP 03, 026 (2016).

[45] Nucl. Phys. B 907, 717 (2016).

[46] JHEP 03, 127 (2016).

[47] Eur. Phys. J. C 76, 283 (2016).

[48] Phys. Lett. B 755, 285 (2016).

[49] Phys. Rev. Lett. 116, 101801 (2016).

[50] Phys. Lett. B 756, 52 (2016).

[51] Eur. Phys. J C 76, 295 (2016).

[52] JHEP 03, 041 (2016).

[53] JHEP 08, 147 (2016).

[54] Eur. Phys. J. C 76, 232 (2016).

[55] JHEP 06, 067 (2016).

[56] Eur. Phys. J. C76, 322 (2016).

[57] Eur. Phys. J. C 76, 658 (2016).

[58] Eur. Phys. J. C 76, 442 (2016).

[59] Phys. Lett. B 758, 249 (2016).

[60] Phys. Lett. B 757, 334 (2016).

[61] The Eur. Phys. J. C 76, 259 (2016).

[62] Eur. Phys. J. C 76, 375 (2016).

[63] JHEP 09, 029 (2016).

[64] Phys. Rev. D 93, 092004 (2016).

[65] Eur. Phys. J. C 76, 403 (2016).

[66] JHEP 06, 093 (2016).

[67] Eur. Phys. J. C 76, 292 (2016).

[68] Phys. Lett. B 759, 229 (2016).

[69] Phys. Lett. B 759, 555 (2016).

[70] Phys. Lett. B 759, 601 (2016).

[71] JINST 11, P05013 (2016).

[72] JHEP 06, 059 (2016).

[73] JHEP 08, 104 (2016).

[74] JHEP 05, 160 (2016).

[75] Eur. Phys. J. C 76, 513 (2016).

[76] Phys. Rev. D 93, 112015 (2016).

[77] Phys. Rev. D 93, 112002 (2016).

[78] Phys. Rev. D 94, 032006 (2016).

[79] Phys. Rev. D 94, 032005 (2016).

[80] JHEP 06, 005 (2016).

[81] Eur. Phys. J. C 76, 392 (2016).

[82] Eur. Phys. J. C 76, 565 (2016).
[83] New J. Phys. 18, 093016 (2016).
[84] Phys. Lett. B 763, 313 (2016).
[85] JHEP 06, 081 (2016).
[86] Phys. Rev. D 94, 032003 (2016).
[87] JHEP 08, 159 (2016).
[88] Eur. Phys. J. C 76, 502 (2016).
[89] JHEP 08, 009 (2016).
[90] Eur. Phys. J. C 76, 666 (2016).
[91] JHEP 08, 045 (2016).
[92] JHEP 11, 112 (2016).
[93] Phys. Lett. B 760, 520 (2016).
[94] Phys. Lett. B 761, 350 (2016).
[95] Phys. Rev. Lett. 117, 182002 (2016).
[96] Phys. Lett. B 761, 136 (2016).
[97] Phys. Lett. B 762, 1 (2016).
[98] Phys. Rev. D 94, 052009 (2016).
[99] JHEP 09, 1 (2016).
[100] Phys. Lett. B 762, 334 (2016).
[101] Phys. Rev. D 94, 052002 (2016).
[102] Phys. Lett. B 760, 647 (2016).
[103] Eur. Phys. J. C 76, 526 (2016).
[104] Eur. Phys. J. C 76, 605 (2016).
[105] Eur. Phys. J. C 76, 547 (2016).
[106] JHEP 09, 074 (2016).
[107] Phys. Lett. B 761, 372 (2016).
[108] Phys. Rev. D 94, 032011 (2016).
[109] Eur. Phys. J. C 76, 683 (2016).
[110] Phys. Lett. B 761, 158 (2016).
[111] Phys. Rev. D 94, 092003 (2016).
[112] Eur. Phys. J. C 76, 541 (2016).
[113] Eur. Phys. J. C 76, 670 (2016).
[114] JHEP 09, 175 (2016).
[115] Eur. Phys. J. C 76, 585 (2016).
[116] JHEP 11, 110 (2016).
[117] Phys. Lett. B 763, 251 (2016).
[118] Phys. Lett. B 763, 114 (2016).
[119] Eur. Phys. J. C 76, 653 (2016).
[120] JINST 11, P11020 (2016).
[121] Phys. Lett. B 765, 11 (2016).

(会議抄録)

[122] K. Shu, T. Murayoshi, X. Fan, A. Ishida, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami *et al.*"Study on Bose-Einstein condensation of positronium", J. Phys.: Conf. Ser. 791, 012007 (2017).

[123] A. Ishida, "New Precision Measurement of Hyperfine Splitting of Positronium", Def. Diff. Forum 373, 75 (2017).

(国内雑誌)

[124] 浅井祥仁, "ヒッグス粒子発見とその後の展開", RADIOISOTOPES 66, 43 (2017).

[125] 山崎高幸、浅井祥仁、光を使って真空や時空を探る、月刊「化学工業」2017 年 3 月号 (Vol.68 No.3)、pp. 170–175 (2017).

(学位論文)

[126] 森永真央, "Search for Heavy Higgs Bosons Decaying to a Pair of τ Leptons in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV", 博士論文 (2016).

[127] 樊星, "高速繰り返しパルス磁石と Fabry-Pérot 共振器を用いた真空の複屈折の探索", 修士論文 (2017).

[128] 周健治, "ボース・アインシュタイン凝縮実現を目指したポジトロニウム冷却の研究", 修士論文 (2017).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[129] K. Shu, "Study on Bose-Einstein Condensation of Positronium", 14th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques & Applications (SLOPOS14), May 24, 2016, 島根県立産業交流会館.

[130] S. Kamioka, "Search for Vacuum Magnetic Birefringence with Pulsed Magnets", 9th International workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA), January 10, 2017, 京都大学桂キャンパス.

ポスター

[131] A. Ishida, "Monte Carlo Simulation of Positronium Cooling for Bose-Einstein Condensation", 14th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques & Applications (SLOPOS14), May 24, 2016, 島根県立産業交流会館.

(国内会議)

招待講演

[132] 浅井祥仁, "光を使って真空や時空を探る", 理研シンポジウム, 2016 年 11 月 1 日, 理研.

一般講演

[133] 周健治, 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、京都大学原子炉実験所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」、2016 年 12 月、京都大学原子炉実験所.

[134] 樊星, パルス磁石と Fabry-Pérot 共振器を用いた電磁場の非線形相互作用の探索、第 23 回素粒子物理国際研究センターシンポジウム、2017 年 2 月、長野県北安曇郡白馬村岳美山荘.

第 53 回アイソトープ・放射線研究発表会:東京大学弥生講堂:2016 年 7 月

[135] 周健治, “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 I”.

[136] 村吉諄之, “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 II”.

日本物理学会秋季大会:金沢大学:2016 年 9 月

[137] 石田明, “ポジトロニウムのボース・アインシュタイン凝縮に向けたレーザー冷却”.

日本物理学会秋季大会:宮崎大学:2016 年 9 月

[138] 山道智博, “SPring-8/SACLA における光子光子散乱の探索”.

[139] 樊星, “パルス磁石を用いた真空複屈折の探索 I”.

[140] 上岡修星, “パルス磁石を用いた真空複屈折の探索 II”.

[141] 周健治, “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 I”.

[142] 村吉諄之, “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 II”.

[143] Stefan Knirck, “WISPy Dark Matter Search with a Dish Antenna Setup in Tokyo”.

[144] 森永真央, “LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるタウ粒子対に崩壊する MSSM ヒッグス粒子の探索”.

[145] 安達俊介, “LHC-ATLAS 実験 Run2 における 0 レプトン終状態を用いた超対称性粒子探索の改良”.

[146] 齊藤真彦, “LHC-ATLAS 実験 Run2 における 4 点ヒットから作られる消失飛跡検出を用いた電弱ゲージーノ直接生成事象の探索”.

日本物理学会:第 72 回年次大会:大阪大学:2017 年 3 月

[147] 樊星, “パルス磁石と高フィネス共振器を用いた真空複屈折の探索 I”.

[148] 上岡修星, “パルス磁石と高フィネス共振器を用いた真空複屈折の探索 II”.

[149] 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 I”.

[150] 周健治, “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 II”.

[151] 桶作愛嬉, “ミリ波領域における Hidden Photon WISP Dark Matter 探索”.

[152] 安達俊介, “LHC-ATLAS 実験 Run2 における 0 レプトン終状態を用いたグルイーノの探索 (2)”.

[153] 齊藤真彦, “LHC-ATLAS 実験 Run2 における消失飛跡検出による電弱ゲージーノ直接生成事象の探索”.

[154] 邱奕寰, “LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるタウ粒子対に崩壊する MSSM ヒッグス粒子の探索”.

3　物性理論

3.1　宮下研究室

統計力学・物性基礎論を理論的に研究、特に、
(1) 相転移・臨界現象、
(2) 秩序形成に伴う非平衡現象、
(3) 強く相互作用している量子系の秩序形態の特徴、
(4) 時間的に変動する外場下での量子ダイナミクス、
(5) 確率過程、非平衡現象
などについて研究を進めている。28 年度の研究概要は以下の通りである。

3.1.1　量子応答、量子ダイナミクス

時間変化する外場のもとでの量子ダイナミクス、応答は我々の研究室の重要なテーマであり、28 年度は以下のテーマについて研究を進めた。

1 次元 XXZ 模型の ESR 線形のサイズ、温度依存性

我々はこれまで系のミクロな情報を反映するハミルトニアンから直接、久保公式によって電子スピン共鳴のスペクトルを調べる方法を開発してきた。系の量子力学的時間発展を求め、その Fourier 変換からスペクトルを求める方法（AC 法）を用い、1 次元異方性ハイゼンベルク模型の高温でのスペクトルのダブルピーク構造のサイズ依存性に関して研究を進めてきた。28 年度は ESR スペクトルを特定の磁化間の遷移によって分類し、それぞれの寄与に関してモーメント法を用いることでサイズ依存性を明らかにした。また、温度依存性についても調べ、高温でのいわゆる常磁性共鳴から低温でのシフトした共鳴周波数でのピークへの変化を明らかにした [2]。また、ESR 応答の直接数値計算法に関する一連の研究に関して解説を ESR 学会誌に掲載した。[14]

Optical conductivity におけるスピン軌道相互作用と磁場の相乗効果

Hubbard 模型などの系における有限周波数の電気伝導（Optical conductivity）におけるスピン軌道相互作用と磁場の相乗効果に関する研究を行った。特に、1 次元系でクーロン相互作用（Hubbard U）がない場合では、スピン軌道相互作用あるいは磁場がそれぞれ単独で存在しても Optical conductivity への寄与がないことが知られているが、両者が共存するときは相乗効果によって Optical conductivity が現れることを発見し、その効果のそれぞれの相互作用を特徴づける方向の相対角度依存性を明かにした。さらに、U の効果についても、U が小さい極限、大きな極限などでスピン軌道相互作用と磁場の相乗効果についても研究を進めた [39, 42, 47]。

量子 Stoner-Wohlfarth 模型における準安定崩壊現象

量子系においてどのように準安定状態が表せるか、またそこからの緩和、特に準安定状態が崩壊するいわゆるスピノーダル点（単一磁化では Stoner-Wohlfarth (SW) 点）における特異性がどのように表せるかについて、大きさ S のスピンを用いて量子効果の特徴を調べている。

28 年度は、磁場を SW 点を超えて掃引した場合に各磁場における固有状態にどのように状態が分布するかについて調べ、S に依存しない分布関数の特徴を明らかにした。また、昨年度発見した、SW 点以降で現れる量子ビート現象における外界からの散逸効果を量子マスター方程式を用いて明かにした [20, 23, 26, 32]。

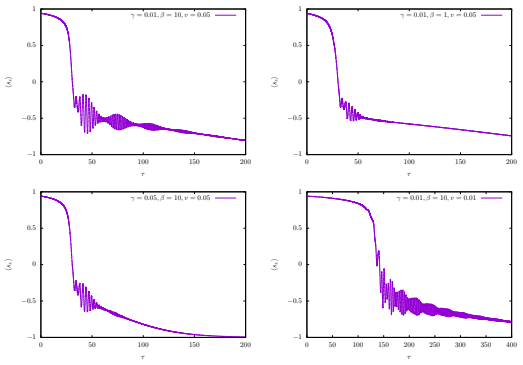

図 3.1.1: 量子 Stoner-Wohlfarth 模型に現れる量子ビート現象における散逸効果

周期外場によって駆動された量子開放系の定常状態

周期外場によって駆動された量子系が外界の熱浴と相互作用すると、系は長時間後、周期的な定常状態に達する。そのような状態はフロケ演算子の固有状態の分布関数で与えられるが、実際にどのような分布が得られるかは非平衡量子系の理論として興味深いのみならず、周期駆動により新しい物性制御の方法を開発するという観点からも重要な問題である。我々は、熱浴との相互作用の強さや、熱浴のスペクトル密度がある条件を満たしているときには、この

周期的な定常状態がフロケ状態のカノニカル分布で与えられることを明らかにした [8]。

孤立量子系における熱平衡化と熱力学第二法則

外界から孤立した量子系のダイナミクス、特に熱平衡状態への緩和の問題は近年大きな注目を集めている。28 年度は、この問題を一般的なアンサンブルの等価性の問題として考える立場から研究を行なった。特に、初期状態が非常にたくさんの、しかしヒルベルト空間の次元に比べれば指数関数的に少ない個数のエネルギー固有状態の重ね合わせによって構成されているときには、熱平衡状態への緩和が生じることを明らかにした [9]。この結果は、多体系の熱平衡状態が一般的に持つ大偏差的性質を用いることによって得られた。

また、クエンチにおける熱力学第二法則を、孤立量子系の観点から証明した。これまでの研究で、一般的な断熱操作のもとでエントロピーが非減少であることはすでに証明されていたが、クエンチのような素早い断熱操作によって、エントロピーが大きく増大しなければならないことは証明されていなかった。28 年度は、クエンチの操作によって、エントロピーは実際に系の体積に比例する大きな増大を示すことを一般的に証明した [10]。

量子マスター方程式

熱浴と結合した系の散逸現象を記述する方法に量子マスター方程式がある。その導出として、熱浴の自由度を縮約する方法が用いられるが、多くのスピンを含む系で系の一部を観測系、その他を熱浴と見なし、全系の量子ダイナミクスを大規模数値計算でもとめ、具体的に縮約操作を実行し、縮約された系の運動が量子マスター方程式の形で記述されているかどうかに関する研究を行った [7]。

非ガウスノイズ

量子ドットを流れる電流の分布関数を特徴づける研究が進んでいるが、その測定器のもつゆらぎの効果として、熱浴から来るガウス的なゆらぎの他に電子が移動することによるポアソン的なゆらぎが存在する。これらのゆらぎの効果の下でどのように量子効果が現れるかを明らかにした [15]。

エンタングルメントを起源とする準定常状態への緩和現象

冷却原子系で実現可能な模型で前期熱平衡化現象の原理を明らかにするため、調和ポテンシャルに閉じ込められた粒子系、一次元ボース気体を記述する朝永 –Luttinger 模型において、エンタングルメントを起源とする前期熱平衡化現象について研究した [11, 18]。

3.1.2 協力現象の統計力学

多体の要素が相互作用によって引き起こす協力現象も、我々の研究室の重要なテーマであり、28 年度は以下のテーマについて研究を進めた。また、相転移の総説として Parity に「相転移ことはじめ」として 1 年間連載をした [13] 。

フラストレーション系の相転移

相互作用が競合するフラストレーション系ではいろいろな秩序形態の競合によって興味深い相転移現象が現れる。その典型的な系として三角格子反強磁性体がある。次近接相互作用に副格子を安定化する強磁性相互作用を加えたイジング模型（目片モデル）の相転移構造に関して調べた。次近接相互作用の大きさによって、単純なフェリ構造への直接転移と、中間相としての部分無秩序状態への転移を起こすが、そのちょうど境目で異常なサイズ効果が現れることを発見した。またこの模型と 6 状態クロック模型の関係も明らかにした [4]。

局所格子構造のちがう双安定系での協力現象の研究

スピンクロスオーバー系は格子の局所的な構造に双安定性がありイジングモデルでモデル化される。しかし、格子変形に伴う弾性相互作用効果が現れる。そのため、ある種のスピンクロスオーバー系においては光照射によって、熱効果による膨張に先駆けて「弾性相互作用誘起膨張現象」が起こることが実験的に発見されている。その現象に関する理論構築を行っている [28, 29]。

保磁力の統計力学機構解明

元素戦略・磁性材料拠点に参加し、実際の磁石の保磁力の統計力学機構解明に向けて研究を進めている [21]。これらの系では、従来の統計力学の対象とは異なり、焼結と呼ばれる微小結晶への分割が本質的であることが知られている。28 年度は、強い強磁性である母物質微小結晶からなる磁化グレインの境界に弱い磁性体が境界層として存在する場合に境界層での核形成や磁壁デピニングの起こる閾値磁場のパラメータ依存性の温度依存性を明らかにした [6]。さらに、$Nd_2Fe_{14}B$ 磁石の複雑な結晶構造を取り入れたシミュレーションスキームを構築し、有限温度確率的 LLG(Landau-Lifshitz-Gilbert) 方程式やモンテカルロ法によって、実験で求めらている磁化や異方性の温度依存性を再現することの成功し、さらにドメイン壁構造の温度変化やそこでの磁化反転過程

の実時間シミュレーションを行った [1, 3, 5, 51]。さらに、磁化反転過程にはスピン間の双極子相互作用の効果が重要と考えられる。その効果のサイズ依存性や反磁場との関係や、有効な数値化計算法についての研究も進めている [41, 45]。

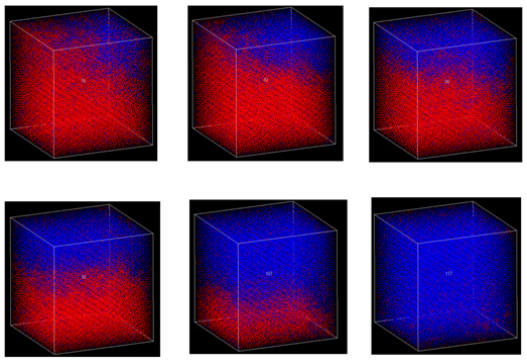

図 3.1.2: $Nd_2Fe_{14}B$ の逆磁場下での磁化反転のシミュレーション

＜報文＞

(原著論文)

[1] Masamichi Nishino, Yuta Toga, Seiji Miyashita, Hisazumi Akai, Akimasa Sakuma and Satoshi Hirosawa, Atomistic-model study of temperature-dependent domain walls in the neodymium permanent magnet $Nd_2Fe_{14}B$, Phys. Rev. B **95**, 094429 (2017).

[2] Hiroki Ikeuchi, Hans De Raedt, Sylvain Bertaina, and Seiji Miyashita, Size and temperature dependence of the line shape of ESR spectra of the XXZ antiferromagnetic chain, Phys. Rev. B **95**, 024402 (2017).

[3] Yuta Toga, Munehisa Matsumoto, Seiji Miyashita, Hisazumi Akai, Shotaro Doi, Takashi Miyake, and Akimasa Sakuma, Publisher's Note: Monte Carlo analysis for finite-temperature magnetism of $Nd_2Fe_{14}B$ permanent magnet, Phys. Rev. B **94**, 219901 (2016).

[4] Masamichi Nishino and Seiji Miyashita, Anomalous finite-size effect due to quasidegenerate phases in triangular antiferromagnets with long-range interactions and mapping to the generalized six-state clock model, Phys. Rev. B **94**, 184434 (2016).

[5] Yuta Toga, Munehisa Matsumoto, Seiji Miyashita, Hisazumi Akai, Shotaro Doi, Takashi Miyake, and Akimasa Sakuma, Monte Carlo analysis for finite-temperature magnetism of $Nd_2Fe_{14}B$ permanent magnet, Phys. Rev. B **94**, 174433 (2016).

[6] Sasmita Mohakud, Sergio Andraus, Masamichi Nishino, Akimasa Sakuma, and Seiji Miyashita, Temperature dependence of the threshold magnetic field for nucleation and domain wall propagation in an inhomogeneous structure with grain boundary, Phys. Rev. B **94**, 054430 (2016).

[7] P. Zhao, H. De Raedt, S. Miyashita, F. Jin, and K. Michielsen, Dynamics of open quantum spin systems: An assessment of the quantum master equation approach, Phys. Rev. E **94**, 022126 (2016).

[8] Tatsuhiko Shirai, Juzar Thingna, Takashi Mori, Sergey Denisov, Peter Hanggi and Seiji Miyashita, Effective Floquet, Gibbs states for dissipative quantum systems, New J. Phys. **18**, 053008 (2016).

[9] Takashi Mori, Macrostate equivalence of two general ensembles and specific relative entropies, Phys. Rev. E **94**, 020101(R) (2016).

[10] Takashi Mori, Extensive increase of entropy in quantum quench, J. Phys. A **49**, 44403 (2016).

[11] Tatsuhiko N. Ikeda, Takashi Mori, Eriko Kaminishi, and Masahito Ueda, Entanglement prethermalization in an interaction quench between two harmonic oscillators, Phys. Rev. E **95**, 022129 (2017).

[12] Jun Sato, Rina Kanamoto, Eriko Kaminishi, and Tetsuo Deguchi, Quantum states of dark solitons in the 1D Bose gas, New J. Phys. **18**, 075008 (2016).

(国内雑誌)

[13] 宮下精二、「相転移ことはじめ」 No. 1～ 12, パリティ: Vol.31, No. 04, 丸善, pp. 58-63 (2016), Vol.31, No. 05, pp. 62-65 (2016), Vol.31, No. 06, pp. 60-63 (2016), Vol.31, No. 07, pp. 62-65 (2016), Vol.31, No. 08, pp. 51-55 (2016), Vol.31, No. 09, pp. 50-54 (2016), Vol.31, No. 10, pp. 53-57 (2016), Vol.31, No. 11, pp. 60-65 (2016), Vol.31, No. 12, pp. 63-67 (2016), パリティ: Vol.32, No. 01, pp. 98-103 (2017), Vol.32, No. 02, pp. 52-58 (2017), Vol.32, No. 03, pp. 46-51 (2017).

[14] 宮下精二, 久保公式の直接数値評価による ESR スペクトルの研究, 電子スピンサイエンス, **14**, 90-95 (2016).

(学位論文)

[15] Takafumi Suzuki: Nonequilibrium current fluctuation in interacting mesoscopic systems (相互作用のあるメゾスコピック系における非平衡電流揺らぎ), 博士論文 (東京大学 2017)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[16] Taichi Hinokihara, Atsushi Tsuruta, Kazumasa Miyake, RISB study on f^2-configuration quasiparticle systems, International Symposium on New Horizons in Condensed Matter Physics, University of Tokyo, 2016-06-18-19.

[17] Takashi Mori, Tomotaka Kuwahara, and Keiji Saito, Rigorous bound on energy absorption and generic relaxation in periodically driven quantum systems, STATPHYS26, Lyon, France, 2016-07-18-22.

[18] Eriko Kaminishi, Takashi Mori, Tatsuhiko N. Ikeda, and Masahito Ueda, New interpretation of pre-thermalization in the Tomonaga-Luttinger model, STATPHYS26, Lyon, France, 2016-07-18-22.

[19] Takafumi J. Suzuki, Non-Gaussianity in quantum conductors, STATPHYS26, Lyon, France, 2016-07-18-22.

[20] S. Miyashita, Collapse of Metastable State in a Large S State, (ICMM2016) The 15th International Conference on Molecule-Based Magnets, Sendai International Center, 2016-09-04-08.

[21] S. Miyashita and M. Nishino, Temperature Dependence of Threshold of Magnetic Fields for Nucleation and Domain Wall Propagation, TMS2017 146th Annual Meeting & Exhibition, San Diego Convention Center and Marriott Marquis & Marina, San Diego, 2017-02-26-03-02.

招待講演

[22] Takashi Mori, Rigorous analysis of Floquet-Magnus theory and generic transient dynamics in periodically driven quantum systems, CEMS Topical Meeting on Cold Atoms, RIKEN, 2016-06-10-11.

[23] S. Miyashita, Quantum and classical dynamics of metastable magnetization reversal under magnetic field in the opposite direction, Coma-ruga-2016.12th International Workshop on Magnetism and Superconductivity at the nanoscale, Spain, Barcelona, 2016-07-03-07.

[24] Takashi Mori, Nonadditivity in the quasi-equilibrium state of a short-range interacting system, Conference on Long-Range-Interacting Many Body Systems: from Atomic to Astrophysical Scales, Trieste, Italy, 2016-07-25-29.

[25] S. Miyashita, Peculiar additional phase transitions due to the elastic interaction in spin-crossover materials with two-step ordering, (ICMM 2016 Satellite Meeting)New Magnetic Functionalities on Molecular Based Magnets, Koahiba Hall,The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2016-09-09-10.

[26] S. Miyashita, Distribution of eigenstates and response of systems under time-dependent external field, 那須研究会, 2016/09/22.

[27] Seiji Miyashita, Hiroki Ikeuchi, Tatsuhiko Shirai, Hans De Raedt, Sylvain Bertaina, Direct numerical approach to ESR spectrum, ENS-UT workshop, Paris, France, 2016-11-17.

[28] S. Miyashita, M. Nishino, Per A. Rikvold, C. Enachescu, Elastic effect on spin-crossover transition, PDSTM2016, Gandi'a Valencia, 2016-11-28.

[29] S. Miyashita, M. Nishino, Per A. Rikvold, C. Enachescu, Elastic effect on spin-crossover transition, LIA, The University of Tokyo, 2016-12-12.

[30] S. Miyashita1, M. Nishino, Y. Toga, S. Mohakud, S. Andraus, T. Miyake,S. Hirosawa, H. Akai, S. Doi, and A. Sakuma, Microscopic approach to the magnetization reversal by stochastic LLG and MC simulations, CDMSI International Workshop on Scale bridging for the atomistic design of high performance materials, Station conference Tokyo, 2017-2-20.

[31] Seiji Miyashita, Hiroki Ikeuchi, Tatsuhiko Shirai, Hans De Raedt, Sylvain Bertaina, Size- and temperature dependence of the ESR spectrum of the antiferromagnetic Heisenberg chain and cavity QED, Workshop on quantum dynamics and response, University of Tokyo, 2017-03-15.

[32] S. Miyashita, Distribution of eigenstates and response of systems under time-dependent external field, Quantum Tuesday, Spain, Zaragoza, 2017-03-23.

(国内会議)

一般講演

[33] 宮下精二, スピンモデルによる磁化反転核の生成挙動、及び単磁区粒子の磁化反転挙動の解析, 第 9 回 ESICMM 成果報告会 Tukuba NIMS, 2016-06-04.

[34] 西野正理, 宮下精二, Per Arne Rikvold, Two-step スピンクロスオーバー系の弾性力による長距離相互作用と反強磁性的短距離相互作用の競合における揺らぎの効果, 日本物理学会秋季大会, 金沢大学角間キャンパス, 2016-09-13-16.

[35] 栂裕太, 土居抄太郎, 松本宗久, 宮下精二, 赤井久純, 三宅隆, 佐久間昭正, スピン模型による磁気異方性の有限温度特性に対する表面効果の解析, 日本物理学会秋季大会, 金沢大学角間キャンパス, 2016-09-13-16.

[36] 森貴司, アンサンブルの等価性の一般化と第二法則への応用, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス, 2016-09-13-16.

[37] 檜原太一, 鶴田篤史, 三宅和正, 回転不変スレーブボソン法による f^2 電子配置重い電子状態の理論, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス, 2016-09-13-16.

[38] 鈴木貴文, 早川尚男, 量子導体における非ガウス揺らぎの測定スキーム, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス, 2016-09-13-16.

[39] Adrien Bolens, 小形正男, 桂法称, 宮下精二, 量子応答におけるスピン依存複素ホッピングと磁場の相乗効果, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス , 2016-09-13-16.

[40] 宮下精二, 核生成理論と単磁区反転機構理論の整備, 第 10 回 ESICMM 成果報告会, 物質・材料研究機構（千現地区）, 2016/12/16-17.

[41] 檜原太一, 西野正理, 栂裕太, 宮下精二, Effects of dipole interactions depending on crystal shape of magnets, 第 10 回 ESICMM 成果報告会, 物質・材料研究機構（千現地区）, 2016-12-16-17.

[42] Adrien Bolens, Electric-dipole spin resonance in the Hubbard model, Workshop on quantum dynamics and response, 東京大学本郷キャンパス, 2017-03-13-15.

[43] 西野正理, 宮下精二, Per Arne Rikvold, 反強磁性短距離相互作用と Husimi-Temperley 型長距離相互作用の競合による新奇な相図, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス, 2017-03-17-20.

[44] 栂裕太, 土居抄太郎, 松本宗久, 宮下精二, 赤井久純, 三宅隆, 佐久間昭正, スピン模型による局所磁化反転時におけるエネルギー障壁の外場依存性, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス, 2017-03-17-20.

[45] 檜原太一, 西野正理, 栂裕太, 宮下精二, 磁化反転過程における双極子相互作用の効果, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス, 2017-03-17-20.

[46] 鈴木貴文, ローレンツ型の周期外場下にある量子ドットの輸送特性, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス, 2017-03-17-20.

[47] Adrien Bolens, 小形正男, 桂法称, 宮下精二, spin-orbit 相互作用と電子のホッピングの相乗作用, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス, 2017-03-17-20.

[48] 鳩村拓矢, Bernard Barbara, 宮下精二, 量子 Stoner-Wohlfarth 模型におけるエネルギーギャップ構造の臨界的性質と磁場掃引下での磁化ダイナミクス, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス, 2017-03-17-20.

招待講演

[49] 宮下精二, スピンモデルによる磁化反転核の生成挙動、及び単磁区粒子の磁化反転挙動の解析, 元素戦略磁性材料研究拠点第 9 回磁性材料研究拠点成果報告会, 物質・材料研究機構 (千現地区), 2016-06-04.

[50] 宮下精二, 量子応答の直接数値解析法, 「フロンティア機能性物質創製センター」オープンセミナー（第 19 回), 兵庫県立大学理学部, 2016-08-22.

[51] 宮下精二, 西野正理, 栂裕太, 広沢哲, 佐久間昭正, 三宅隆, 赤井久純, 土居抄太郎, 永久磁石開発の元素戦略 5　—応用に向けた材料研究の課題 “原子レベルからの磁化反転シミュレーション, 日本金属学会 2017 年春期講演大会, 首都大学東京, 2017-03-16.

(セミナー)

[52] 鳩村拓矢, 量子系における準安定状態とスピノーダル現象矢上統計物理学セミナー, 慶應義塾大学矢上キャンパス, 2016-05-06.

[53] 森貴司, Relaxation process of periodically driven quantum systems in the high-frequency regime, QHP Seminars, 理研（初田研究室）, 2016-06-21.

[54] 鈴木貴文, 量子ドット系の非平衡輸送：汎関数くりこみ群法による解析, 今田研究室セミナー, 東京大学本郷キャンパス, 2016-07-27.

[55] 森貴司, 孤立量子系の緩和過程の理論（集中講義）2016 年羽田野研究室夏合宿, 日光, 2016-08-27-29.

[56] 鈴木貴文, メゾスコピック量子導体における非ガウスゆらぎ, 羽田野研究室セミナー, 東京大学生産技術研究所, 2016-10-14.

3.2 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、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。手法としては、場の理論、厳密解、くりこみ群、計算機シミュレーションなどを組み合わせて用いている。

3.2.1 高温超伝導の理論

高温超伝導は、モット絶縁体に動けるキャリアを導入することによって発現するので、超伝導と絶縁体との関係は強相関電子系における最も面白い研究の 1 つである (図 3.2.1 参照)。これを理解するために、金属絶縁体転移および相関の強い場合の超伝導について調べている。

フラックス状態

高温超伝導体における有限温度の擬ギャップ状態は、未だに理解が難しい問題である。我々は時間反転対称性を破ったフラックス状態が擬ギャップ状態の候補ではないかという観点から詳しく検討した。高温超伝導の本質であると考えられる「ドープされたモット絶縁体」という概念に基づき、図 3.2.1 右図のような、二重占有状態 (doublon) と正孔 (holon) の束縛という観点を加味して、フラックス状態の安定性を議論した。また、新しく波動関数に適切なゲージ位相をつけることによって運動エネルギーが下がるという効果があることが明らかになった。[4, 26, 40, 44, 55]

電子ドープ銅酸化物高温超伝導体の微視的モデル

T′ 型構造をもつ電子ドープ系の銅酸化物超伝導体において、相図の大幅な変更を示唆する実験結果が相次いで報告されている。試料に適切な還元処理を施すと、キャリアドーピングなしでもモット絶縁体とならずに超伝導が発現するというものである。一方、これらの試料の電子状態を光電子分光で見ると、フェルミ面の形状が還元処理の前後で大きく異なり、実効的に電子キャリアが注入された状況になっているともいわれている。これらを理論的に解明するために、酸素 2p 軌道を取り入れた有効 2 バンド模型を用い、FLEX 近似の範囲内で超伝導転移の様子を調

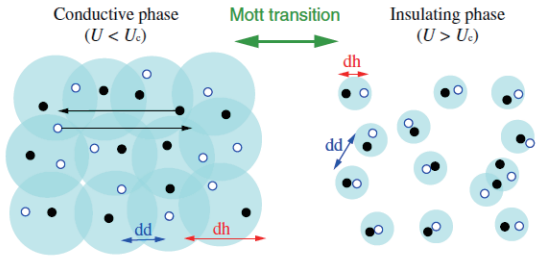

図 3.2.1: 黒丸が doublon、白丸が holon を表す。右は束縛状態を作った絶縁体状態（モット絶縁体）で、左は束縛状態が重なり合って金属となった状態。右図の状態に動けるキャリアがドープされた状態が、高温超伝導の舞台であると考えられる。

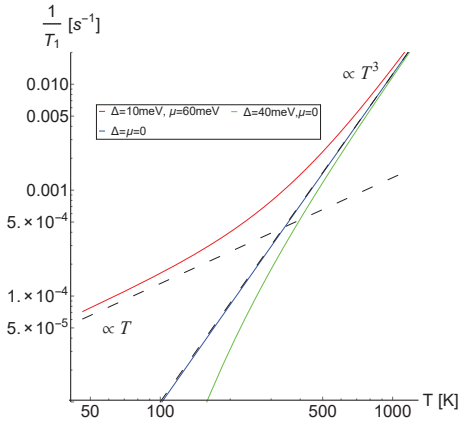

図 3.2.2: ディラック電子系での核スピン緩和率

べた。その結果、過剰酸素が無く、Cu と O の軌道間のエネルギー差 Δ が比較的大きい領域において、キャリアドープなしで超伝導状態が発現しうることがわかった。また、過剰酸素の有無により電子の占有状態が変わり、フェルミ面が変形する。これは、光電子分光の結果を説明する。[16, 27, 45, 56]

不純物系の電子状態の解析

$Ag_{1-x}Sn_{1+x}Se_2$ は高温超伝導ではないが、超伝導体としての性質や、関連物質が熱電材料である点で、近年実験において注目を集めている。この物質の理論的理解のため我々は、不純物系の計算に適している KKR-CPA 法による第一原理計算を用いた解析を行った。その結果、フェルミエネルギー上では Ag の状態密度が小さく、fcc 構造の SnSe を用いたリジッドバンド描像で記述できることがわかった。また、リジッドバンド描像のもとで強束縛模型を導出した。さらに、得られたモデルを用いて絶対零度での超伝導ギャップを求め、超伝導転移温度のドープ量依存性に関する実験結果を定性的に説明することを示した。[53, 61]

3.2.2 ディラック電子系

単層グラファイト（グラフェン）や有機導体 α-$(ET)_2I_3$、さらに古くから調べられている物質である Bi（ビスマス）などの一連の物質においては、電子の運動が相対論的量子力学におけるディラック方程式と全く同じ形式で記述されることが示されている。こうした固体中のディラック電子は、これまでにない新しい伝導現象を生み出しうると予想され、新たな電子状態として非常に興味が持たれている。

物質中の量子電気力学

ディラック電子系物質の電気力学は、物質中の量子電気力学とみなすことができ、それ自身興味深いだけでなく物理学における階層性の新たな例を提供する。特に、絶対零度で化学ポテンシャルがギャップ内にある絶縁体物質は、量子電気力学における真空（ディラックの海）の対応物であり、その誘電率は真空分極の理論と類似の理論から導くことができる。我々は、質量異方性のあるディラックハミルトニアンに基づき、電磁場の自己エネルギーを計算することによって、ディラック電子系物質の誘電率と反磁性軌道磁化率の間に顕著な相関があることを見出した。この電磁的相関は、物質中の有効的ローレンツ共変性に起因しており、巨大反磁性と呼応した巨大誘電率を引き起こす。この理論を用いて、ビスマスの誘電率の実験値を定量的に説明するとともに、絶縁体である Bi-Sb 合金の動的誘電率の周波数依存性を予言した。[42, 51, 60]

ディラック電子系物質の核スピン緩和率

ディラック電子系物質である Bi-Sb 合金の核スピン緩和率は、コリンハ則からずれた特異な温度依存性を示す。このため、電子の反磁性軌道電流に起因する核スピン緩和の重要性が指摘されている。我々は、物質中の量子電気力学の理論を用いて、ディラック電子系物質の核スピン緩和率を計算し、その温度依存性を得た (図 3.2.2)。金属か絶縁体かにかかわらず、高温領域で軌道効果による核スピン緩和率が温度の 3 乗に比例することを見い出した。Bi-Sb 合金以外にも、アンチペロブスカイトなどの新たなディラック電子系物質の開発が進んでおり、理論と実験の整合性について発展が期待される。[54]

3.2.3 反磁性

ブロッホ電子の帯磁率の一般論

磁場下のブロッホ電子の運動は長年の基本的な問題であるが、熱力学ポテンシャルをゲージ不変な形で導出するという方法によって、ブロッホ波動関数を用いた厳密な帯磁率の一般表式を導き出すことに成功した。通常知られている Landau-Peierls による

軌道帯磁率以外に、すべての寄与は 5 つの項にまとめることができ、それぞれの物理的な意味も明らかとなった。スピン軌道相互作用の効果、時間・空間反転対称性の破れの効果も一般的に含まれている。さらに、厳密な表式なので、Van Vleck 項、内殻電子による反磁性項 (Langevin 項)、Berry 曲率からの寄与などをすべて含む。[3, 24, 39, 64]

パイエルス位相の補正を含めた軌道磁化率

固体中の軌道磁化率を求める方法として、グリーン関数を用いた福山公式による方法と、パイエルス位相による方法とが知られている。しかし、通常用いられるパイエルス位相による方法では、その導出過程に近似が入るため、結果として福山公式を用いて導出された軌道磁化率とは異なることが分かった。[1, 2, 22] そこで、パイエルス位相導出の際の近似を行うことなく計算を進めて軌道磁化率を導出し、福山公式から導出された軌道磁化率と一致することを明らかにした。[5, 41, 59]

励起子絶縁体の磁化率

近年、Ta_2NiSe_5 は励起子絶縁体の候補物質として注目を集めている。励起子絶縁体の理論は、BCS 理論と類似した構造を持つため、超伝導現象との関連において活発に議論されている。一方、Ta_2NiSe_5 の磁化率の実験結果は古くから知られており、その温度変化は励起子絶縁体の軌道磁性に由来すると考えられていた。しかし最近まで理論的に未解決だった。

そこで、励起子絶縁体での軌道磁化率の温度依存性を明らかにするため、磁場下で電子とホールが励起子絶縁体を構成する二軌道模型を構築し、平均場近似を用いて解析した。また、磁場下での問題を扱うために、強束縛近似にパイエルス位相とその補正をとりいれた方法を用い、軌道磁化率を導出した。解析の結果、励起子絶縁体転移に伴い、軌道磁化率が負に大きくなることが分かった。さらに、Ta_2NiSe_5 の磁化率の温度依存性が、励起子絶縁体に伴った軌道磁化率による可能性があることを示した。[6, 50]

ほとんど自由な電子系における軌道帯磁率

電子相関のない系での厳密な軌道帯磁率の計算は以前から知られていたが、最近、物理的意味によって軌道帯磁率をいくつかの寄与に分類する定式化ができた。この定式化を用いて、ほとんど自由な電子系における軌道帯磁率の物理的意味を調べた。その結果、軌道帯磁率の化学ポテンシャル依存性は、軌道間効果に由来する項によって生じることが示された。また、化学ポテンシャルが大きい領域において、異符号の大きな 2 項の相殺が生じた。物理的には小さくなるべきこれら 2 項の振る舞いは、定式化の改良などを示唆していると考えられる。[21]

3.2.4 トポロジカル物質の理論

マグノンスピン運動量ロッキングの提唱

運動量空間で特異なスピン構造を示すスピン運動量ロッキングは、スピン回転対称性の破れを必要とするため、通常はスピン軌道相互作用の強い電子系において議論されてきた。我々は、磁性体中マグノンの作るバンド構造にスピン運動量ロッキングの概念を拡張し、具体例としてカゴメ格子反強磁性における例を構築した。この例の Hamiltonian はスピン回転対称性を有しているが、基底状態およびマグノン励起状態は対称性が自発的に破れた状態にあり、スピンを良い量子数として持たない。この結果は、自発的対称性の破れという新たな視点をスピン運動量ロッキングの研究に与えるものである。[9, 34, 36, 38, 63]

トポロジカル絶縁体/強磁性体界面の理論

トポロジカル絶縁体の表面状態では、運動量空間のスピンが渦構造を成すスピン運動量ロッキングが起こっている。この性質は高効率なスピン電荷変換を可能にするので、強磁性との接合系実験が行われてきた。我々は、この系における微視的な理論を 2 次元 Dirac 電子と 3 次元マグノンの相互作用に着目して記述した。その結果 (i) 表面状態の電場に誘起されるマグノンスピン流の表式、(ii) スピンゼーベック効果で観測される電場の表式を求めた。後者では Bi_2Te_3 と YIG の値を用いた数値計算を行い、実験で見られる特異な化学ポテンシャル依存性を一定程度説明する事に成功した。[10, 11, 30, 31, 48, 62, 74]

Dirac 半金属系におけるスピン流及び軸性カレント

トポロジカル相転移点直上で実現する Dirac 半金属系の輸送を議論した。具体的には、4×4 の質量項無し Dirac Hamiltonian について、自己無撞着 Born 近似の範囲で量子輸送方程式を書き下し、空間について 2 次の勾配近似を行った。その結果、電荷・スピン 3 成分・軸性チャージ等を含む 8 自由度のカップルした拡散方程式群を得た。この方程式群を電場下の定常状態において解き、慣習的スピン流演算子が 0 であるのにも関わらず、試料端でスピン蓄積を伴うスピンホール効果が起こる事を明らかにした。また軸性カレントが、試料端において電場及びスピン流に垂直な方向に流れていることを示した。[12, 75]

フラクタルと量子ホール係数の関係

2 次元正方格子遍歴電子系に垂直磁場を印加すると、Hofstadter's butterfly と呼ばれるフラクタルな量子相図が現れる。このとき、整数量子ホール効果との間に興味深い関係が存在することがわかった。単位格子当たりの磁束 $\phi = p/q$ の分母の偶奇に応じて、ゼロ点近傍に $|k|$ に比例するディラックコーンまたは k^2 分散が生じる。これらのバンドは付加的な磁束によりランダウ量子化され、準位間で σ_{xy} が量子化される。格子系ではランダウ準位が分裂するが、σ_{xy} の総和は分裂前と変わらないため、特定の条件下で

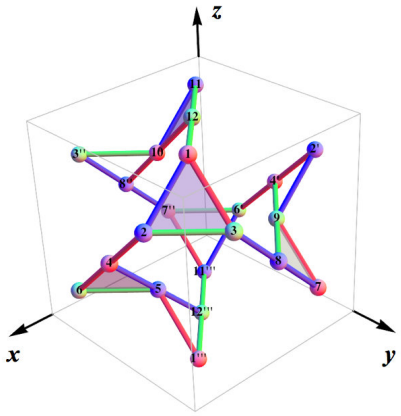

図 3.2.3: ハイパーカゴメ格子の構造

は σ_{xy} が簡単に求められる。我々は、この条件とフラクタルの間に共通する規則が存在することを明らかにした。[13]

3.2.5 重い電子系および多軌道電子系理論

U や Pr などの f 軌道に電子が 2 個占有している強相関系 (f^2 電子配置) では、局在サイトで非磁性一重項基底が実現しているとされる UPt_3, UBe_{13} 等において異常な物性が観測されている。これを理解するために、多軌道周期アンダーソン模型に対して Rotationally invariant slave boson 法の鞍点近似を適用して準粒子状態と非磁性一重項との関連性を調べた。その結果、非磁性一重項はその対称性によって 2 種類の異なる性質が現れることがわかった。(1) Γ_1 一重項基底の場合、局在電子数が 2 の近傍で、局在化した結晶場一重項基底と 2 種類の遍歴電子状態の合計 3 相が現れることがわかった。さらに、結晶場一重項基底状態においては、重い準粒子状態が現れないことを示した。(2) 一方、六方晶系での Γ_4 一重項では、上記とは異なり重い準粒子状態を形成する。この違いは Γ_1 と Γ_4 基底状態の波動関数の違いによって説明できることを示した。この電子状態は UPt_3 の磁場に鈍感なフェルミ液体状態に対応していると考えられる。[18, 28, 46]

3.2.6 磁性体およびスピン軌道相互作用

ハイパーカゴメ格子を有するイリジウム酸化物の磁気相図

ハイパーカゴメ格子 (図 3.2.3) を有するイリジウム酸化物 $Na_4Ir_3O_8$ は、3 次元量子スピン液体の実現候補物質として注目されている。本物質の低温でのスピン状態を解明するために、我々はまずスピン軌道相互作用を含む多軌道ハバード模型からミクロにスピン模型を導出した。その結果、等方的なハイゼンベルグ反強磁性相互作用の他に 3 つの異方的相互作用を含むスピン模型を得た。得られたスピン模型に対し、古典スピンを仮定して基底状態相図を求めた。その結果、非整合磁気秩序や反強磁性秩序の他に、3 つの非共面的な $q = 0$ の磁気秩序相を得た [7, 19, 23, 29, 32, 67, 71, 72]。

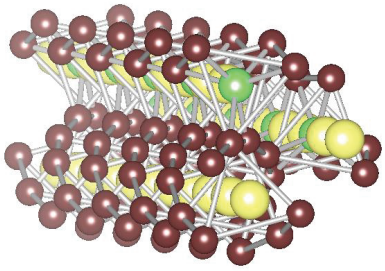

図 3.2.4: CrNb3S6 の結晶構造。下半分の濃い色の硫黄イオンが、らせん形に巻いている。(現実の結晶より、らせん構造を誇張して描いている。)

カゴメ格子 J_1-J_2-J_3 イジング模型における磁気モノポール間相互作用の効果

フラストレートした古典スピン模型に現れる分数自由度 (磁気モノポール) の間に相互作用が働くと、新奇な状態が発現することが期待される。我々はカゴメ格子上の J_1-J_2-J_3 イジング模型の基底状態および熱力学的性質を調べた。その結果、同符号のモノポールが引力相互作用をもつとき、新しい古典スピン液体が発現することを明らかにした。この新しい古典スピン液体は、同符号のモノポールが六員環構造を形成することに特徴づけられる。また、六員環内の相関に由来して、磁気構造因子に「半月型」のパターンが現れることがわかった [8, 19, 33, 35, 37, 47, 73]。

カイラルソリトン格子の電流下ダイナミクス

カイラルソリトン格子 (CSL) は、ジャロシンスキー・守谷 (DM) 相互作用とゼーマンエネルギーの競合から生じる一次元スピン配列である (図 3.2.4)。その周期や形状は外部磁場の大きさでコントロールできる。この特性のため、CSL の構造変化が伝導電子に影響を与えることが知られているが、構造変化とダイナミクスがどう結びついているかは未解決だった。そこで我々は、電流下の CSL のダイナミクスを、CSL の集団座標に対するスピントランスファートルクを用いて調べた。その結果、CSL は電流とは逆方向に定常的な運動をすることがわかった。また、駆動速度の外部磁場依存性を明らかにした。[20, 52]

強磁性体/重金属界面におけるジャロシンスキー守谷相互作用の RKKY メカニズムによる微視的導出

ジャロシンスキー守谷相互作用 (DMI) はスピントロニクスの分野において、興味深い性質を引き起こす。強磁性体と重い原子を含む金属 (重金属) 接合界面において、DMI によると思われる磁気モーメント反転などの現象が見られている。これを理解するために、表面ラシュバ相互作用と重金属中の RKKY メカニズムを同時に考慮して、強磁性体内の DMI を微視的に評価した。ラシュバ相互作用の大きさによって、DMI の絶対値に上限があること、ラシュバ相互作用が大きすぎると DMI はむしろ減少してしまうことを見出した。また、強磁性体と重金属の格子定数の比や、重金属側の化学ポテンシャルの位置によって、DMI の符号が変わることも見出した。これらは実験結果の解釈に役立つと思われる。[14, 25, 58, 70]

＜報文＞

(原著論文)

[1] M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 064709-1-11 (2016). “Orbital Magnetism of Bloch Electrons: II. Application to Single-Band Models and Corrections to Landau-Peierls Susceptibility”

[2] M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 104708-1-10 (2016). “Orbital Magnetism of Bloch Electrons: III. Application to Graphene”

[3] M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 044713-1-18 (2016). “Theory of Magnetization in Bloch Electron Systems”

[4] H. Yokoyama, S. Tanuma and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 124707-1-21 (2016). “Staggered Flux State in Two-Dimensional Hubbard Model”

[5] H. Matsuura and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 074709-1-6 (2016). “Theory of Orbital Susceptibility in the Tight-Binding Model: Corrections to the Peierls Phase”

[6] H. Matsuura and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 093701-1-4 (2016). “Theory of Orbital Susceptibility on Excitonic Insulator”

[7] T. Mizoguchi, K. Hwang, K.-H. Lee, and Y. B. Kim: Phys. Rev. B **94**, 064416 (2016). “Generic model for the hyperkagome iridate in the local-moment regime”

[8] T. Mizoguchi, L. D. C. Jaubert, and M. Udagawa: submitted to Phys. Rev. Lett. “Clustering of Topological Charges in Kagome Classical Spin Liquid”

[9] N. Okuma: arXiv:1702.02575. “Magnon Spin-Momentum Locking: Possible Realizations in Noncollinear Antiferromagnets”

[10] N. Okuma and K. Nomura: Phys. Rev. B **95**, 115403-1-8 (2017). “Microscopic derivation of magnon spin current in topological insulator/ ferromagnet heterostructure”

[11] N. Okuma, M. R. Masir and A. H. MacDonald: to appear in Phys. Rev. B. “Theory of the spin-Seebeck effect at a topological-insulator/ ferromagnetic-insulator interface”

[12] N. Okuma and M. Ogata: Phys. Rev. B **93**, 140205-1-4 (2016). “Unconventional Spin Hall Effect and Axial Current Generation in a Dirac Semimetal”

[13] N. Yoshioka, H. Matsuura, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 064712-1-6 (2016). “Quantum Hall Effect of Massless Dirac Fermions and Free Fermions in Hofstadter’s Butterfly”

[14] T. Shibuya, H. Matsuura, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 114701-1-4 (2016). “Magnetic Chirality Induced from RKKY Interaction at an Interface of a Ferromagnet/Heavy Metal Heterostructure”

[15] Y. Tanaka and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 104706-1-6 (2016). “Correlation Effects on Charge Order and Zero-Gap State in the Organic Conductor α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$”

(会議抄録)

[16] K. Yamazaki, T. Yoshioka, H. Tsuchiura, and M. Ogata: to appear in J. Phys.: Conf. Ser. (2017). “An effective Hamiltonian and its phase diagram for T′-structure cuprates”

(国内雑誌)

[17] 松浦弘泰、三宅和正: 固体物理 **109**, 51 (2016). “スピン軌道相互作用と多体効果の協奏”

(学位論文)

[18] 檜原太一：“Slave Boson Analysis on Multi-Orbital Periodic Anderson Model” (スレーブボソン法を用いた多軌道アンダーソンモデルの解析)(博士論文)

[19] 溝口知成:“Theoretical study on frustrated magnets related to kagome lattice” (カゴメ格子に関連したフラストレート磁性体の理論的研究)(博士論文)

[20] 徳宿邦夫：“Dynamics of Cycloidal Soliton Lattice” (サイクロイド型ソリトン格子のダイナミクス)(修士論文)

[21] 宮藤大輔：ほとんど自由な電子系における軌道磁性に関する理論的研究 (Theoretical Study on Orbital Magnetism in Nearly Free Electron Systems)(修士論文)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[22] M. Ogata: International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2016) (Hangzhou, China, May 8–13, 2016). “Orbital Magnetism of Bloch Electrons: Applied to Single-Band Models and Graphene”

[23] T. Mizoguchi and Y. B. Kim: (SCES2016) “Magnetic Phase Diagram in Hyperkagome Iridate $Na_4Ir_3O_8$”

[24] M. Ogata: 14th Bilateral Japanese-German Symposium (Sapporo, Japan, September 26–29, 2016). “Orbital Magnetism of Bloch Electrons”

[25] H. Matsuura: Chiral Core to Core meeting (Takeo, Saga, February 4–6, 2017). “Study of interfacial DM interaction in a heavy metal/ferromagnet heterostructure and Orbital Magnetism”

[26] H. Yokoyama、R. Sato, K. Kobayashi, and M. Ogata: 29th International Symposium on Superconductivity (ISS2016) (Tokyo, Japan, December 13–15, 2016). “Effects of Impurity Potential on Antiferromagnetic and d-wave Superconducting State in Hubbard Model”

[27] K. Yamazaki, T. Yoshioka, H. Tsuchiura, and M. Ogata: (ISS2016) “An effective Hamiltonian and its phase diagram for T′-structure cuprates”

[28] T. Hinokihara, A. Tsuruta, K. Miyake: International Symposium on New Horizons in Condensed Matter Physics (Tokyo, June 18–19, 2016). “RISB study on f^2-configuration quasiparticle systems”

[29] T. Mizoguchi and Y. B. Kim: (New Horizons) “Magnetic Phase Diagram in Hyperkagome Iridate $Na_4Ir_3O_8$”

[30] N. Okuma, M. R. Masir, A. H. MacDonald: Quantum Spintronics (September 2016). “Theory of spin Seebeck effect in topological insulator/magnetic insulator heterostructure”

[31] N. Okuma and K. Nomura, International workshop on nano-spin conversion science & quantum spin dynamics (Tokyo, September 2016). “Microscopic derivation of spin current in topological insulator/magnetic insulator heterostructure”

[32] T. Mizoguchi and Y. B. Kim: International Conference on Highly Frustrated Magnetism (Taipei, Taiwan, September 7–11, 2016). “Magnetic Phase Diagram in Hyperkagome Iridate $Na_4Ir_3O_8$”

[33] T. Mizoguchi, M. Udagawa, and L. D. C. Jaubert: International School on Topological Science and Topological Matters (Kyoto, February 13–18, 2017). “Effect of interaction between fractional charges on classical spin liquid on kagome lattice”

[34] N. Okuma: (International School of Topological) “Magnon Spin Texture in Momentum Space: Possible Realizations in Frustrated Antiferromagnets”

[35] T. Mizoguchi, M. Udagawa, and L. D. C. Jaubert: Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems (Kashiwa, February 20–22, 2017). “Effect of interaction between fractional charges on classical spin liquid on kagome lattice”

[36] N. Okuma: (Topological Phases) “Magnon Spin Texture in Momentum Space”

[37] T. Mizoguchi, M. Udagawa, and L. D. C. Jaubert: APS March Meeting 2017 (New Orleans, USA, March 13–17, 2017). “Effect of interaction between fractional charges on classical spin liquid on kagome lattice”

[38] N. Okuma: APS March Meeting 2017 “Magnon spin texture in momentum space”

(国内会議)

一般講演

[39] 小形正男：日本物理学会、金沢大学 2016, 9.13–9.16（秋季大会）“スピン軌道相互作用があるときの帯磁率”

[40] 小形正男、横山寿敏：日本物理学会、金沢大学 “擬ギャップ状態の候補としての t-J モデルにおける Flux 相”

[41] 松浦弘泰、小形正男：日本物理学会、金沢大学 “強束縛近似を用いた軌道帯磁率の理論：パイエルス位相の補正項の考察”

[42] 前橋英明、小形正男、福山秀敏：日本物理学会、金沢大学 “固体ディラック電子におけるローレンツ共変性と電磁応答：誘電率と反磁性磁化率の関係”

[43] Adrien Bolens、小形正男、桂法称、宮下精二：日本物理学会、金沢大学 “量子応答におけるスピン依存複素ホッピングと磁場の相乗効果”

[44] 小林憲司、横山寿敏、小形正男：日本物理学会、金沢大学 “交替磁束状態と d-波超伝導状態の共存・競合関係について”

[45] 山崎国人、土浦宏紀、吉岡匠哉、小形正男：日本物理学会、金沢大学 “電子ドープ型超伝導体の有効モデルと超伝導状態”

[46] 檜原太一，鶴田篤史，三宅和正：日本物理学会、金沢大学 “回転不変スレーブボソン法による f^2 電子配置重い電子状態の理論”

[47] 溝口知成、宇田川将文、Ludovic D. C. Jaubert：日本物理学会、金沢大学 “古典スピン液体における分数励起間相互作用の効果”

[48] 大熊信之, M. R. Masir, A. H. MacDonald：日本物理学会、金沢大学 “トポロジカル絶縁体/磁性体界面における電子マグノン相互作用の理論的研究”

[49] 小形正男、福山秀敏：日本物理学会、大阪大学 2017, 3.17–3.20（年次大会）“熱電応答久保理論”

[50] 松浦弘泰、小形正男：日本物理学会、大阪大学 “励起子絶縁体の軌道磁化率の理論”

[51] 前橋英明、小形正男、福山秀敏：日本物理学会、大阪大学 “固体ディラック電子におけるローレンツ共変性と電磁応答 II：異方性の効果”

[52] 徳宿邦夫、岸根順一郎、小形正男：日本物理学会、大阪大学 “サイクロイド型ソリトン格子のダイナミクス”

[53] 立石幾真、松浦弘泰、小形正男：日本物理学会、大阪大学 “$Ag_{1-x}Sn_{1+x}Se_2$ における電子状態の解析”

[54] 廣澤智紀、前橋英明、小形正男：日本物理学会、大阪大学 “ディラック電子系の軌道効果による核スピン緩和時間”

[55] 横山寿敏、佐藤諒、小林憲司、小形正男：日本物理学会、大阪大学 “ハバード模型における反強磁性状態に対する不純物ポテンシャルの影響”

[56] 山崎国人、土浦宏紀、吉岡匠哉、小形正男：日本物理学会、大阪大学 “T′ 型銅酸化物超伝導体のハーフフィリング近傍における超伝導転移の解析”

[57] Adrien Bolens、小形正男、桂法称、宮下精二：日本物理学会、大阪大学 “spin-orbit 相互作用と電子のホッピングの相乗効果”

[58] 松浦弘泰：超低速ミュオンが拓く科学シンポジウム (いばらき量子ビーム研究センター) 2016, 8.26–27 “バルク内やヘテロ構造におけるスピン軌道相互作用の効果 $+\alpha$”

[59] 松浦弘泰：第二回ディラック電子系マルチフェロイクス研究会, 名古屋大学野依記念物質科学研究館, 2016, 11.17–18 “強束縛近似を用いた軌道帯磁率の理論：パイエルス位相の補正項の考察”

[60] 前橋英明、小形正男、福山秀敏：第二回ディラック電子系マルチフェロイクス研究会, “固体中のディラック電子におけるローレンツ共変性と動的応答関数”

[61] 立石幾真、松浦弘泰、小形正男：第二回ディラック電子系マルチフェロイクス研究会, “$Ag_{1-x}Sn_{1+x}Se_2$ における電子状態の解析”

[62] 大熊信之, M. R. Masir, A. H. MacDonald：第 2 回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会, (2016 年 12 月) “トポロジカル絶縁体/強磁性体接合におけるスピンゼーベック効果の理論”

[63] 大熊信之：同研究会 “マグノンスピンの運動量依存性に関する研究”

招待講演

[64] 小形正男：ワークショップ：物性物理・現状と将来, 秋田大学 2016, 6.23–25 “軌道磁性：再考”

[65] 松浦弘泰：AIST-eF/TUS (エネルギー創成科学懇談会) 研究交流会～熱電変換技術～, 産総研, 2017, 3.7 “FeSb2 の電子状態と輸送係数の理論研究の現状”

[66] 松浦弘泰：豊田理研ワークショップ「高温超伝導をめぐる最近の発展と展望」, トヨタ産業技術記念館ホール (名古屋市), 2016, 7.30–31 “$Pb_{1-x}Tl_xTe$ の理論”

[67] 溝口知成：第一回量子スピン液体研究の新展開、東京大学, 2016, 7.14–15 “ハイパーかごめ格子をもつイリジウム酸化物における異方的相互作用の効果”

(セミナー)

[68] M. Ogata: Colloqium at Fudan University (Shanghai, 2016, April 11) “Spin Hall effect, large diamagnetism, and spin-polarization in magneto-optical conductivity of Dirac electrons”

[69] M. Ogata: Seminar at Fudan University (Shanghai, 2016, April 12) “Crossover between BCS superconductivity and doped Mott insulator in two-dimensional Hubbard model”

[70] 松浦弘泰：キラル若手の学校、(大阪府立大学 i-site なんば, 2016, December 12) “(実践的な) 磁性入門”

[71] T. Mizoguchi: Seminar at OIST (Okinawa, 2016, June 21) “Magnetic Phase Diagram in Hyperkagome Iridate $Na_4Ir_3O_8$”

[72] T. Mizoguchi：藤森研セミナー (Tokyo, 2016, October 18) “Effect of anisotropic interactions on hyperkagome iridate $Na_4Ir_3O_8$”

[73] T. Mizoguchi：統計力学セミナー (Tokyo, 2016, December 6) “Effect of interaction between fractional charges on classical spin liquid on kagome lattice”

[74] 大熊信之: Seminar at MacDonald lab. at Texas-Austine (2016 年 11 月) “Spin Seebeck effect at ferromagnetic/topological insulator interface”

[75] 大熊信之: 東京大学, 長谷川研究室・林研究室合同セミナー (2016 年 10 月) “Topological materials”

3.3 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たり，あるいは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ながら，物性物理学および物質科学の基礎研究を行っている. 電子相関の強い系やナノ構造体を取り扱うための新しい第一原理電子状態計算手法の開発，緩和の遅い熱伝導現象を第一原理に基づいてシミュレーションするためのモデリング手法の開発，超伝導転移温度の第一原理計算手法の開発，熱電材料の熱物性、超高圧下など極限条件下の結晶構造探索と物性予測，物質の光励起、水素を含む新物質の理論予測などが主要な研究テーマである.

3.3.1 高温超伝導を示す硫化水素の高圧下マグネリ相

昨年度提案した硫化水素超伝導相の転移温度の圧力依存性 (Tc) の研究をさらに進めた．シミュレーションにより発見した H_2S および H_3S スラブが任意の厚さでスタックした構造と，遷移金属酸化物などで古くから知られる”Magneli 相”との類似性を指摘，”硫化水素 Magneli 相”という概念を提案した．また，発見された構造について X 線回折シミュレーションを行い，実験との比較を行った．以上の結果は Physical Review Letters 誌の Editor’s Suggestion に選出された [1].

3.3.2 スピンゆらぎを取り入れた超伝導密度汎関数理論

超伝導密度汎関数理論 (SCDFT) に基づく転移温度計算手法に、スピンゆらぎの効果を取り込む拡張手法 (Essenberger et al., 2014) を実装し、これをバ

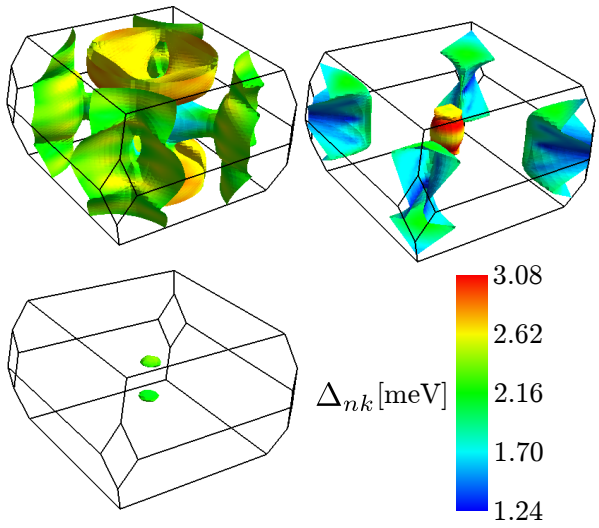

図 3.3.1: SCDFT に基づく計算によって得られた、0.1 K での YNi_2B_2C の Fermi 面上での超伝導ギャップ関数.

ナジウムおよびニオブに応用した．これらの物質の Tc が、フォノン、プラズモン媒介引力と強磁性スピンゆらぎによるペアリング抑制力の微妙なバランスによって定まっている点を解明した [15] .

3.3.3 YNi_2B_2C における異方的超伝導ギャップの起源の探求

YNi_2B_2C はフォノン媒介型超伝導体でありながら異方的超伝導ギャップを生じるという特徴を持つ．我々はこの異方的超伝導ギャップの起源を探ることにより、特にフォノン型の超伝導体の発現機構に対してさらなる知見を得ることを目的として、超伝導密度汎関数理論 (SCDFT) に基づく第一原理計算を行った [9]．計算で得られた超伝導転移温度、同位体効果係数は実験値と定量的に一致した．また、我々の計算した準粒子状態密度はトンネル透過率実験で観測されるなまされたピーク構造と関連付けられ、それが大きな異方性を持つ超伝導ギャップ関数 (図 3.3.1) によるものであることが確かめられた．さらにこの異方性は、Fermi 面上で Ni 3d 軌道成分の強い領域で超伝導ギャップが著しく小さくなるために生じる事が分かった．この領域では電子-フォノン結合も特異的に弱まっており、これは Ni 3d 軌道自身による強い遮蔽が働いているためであると考えられる．

3.3.4 ラットリング原子の非調和振動と特異な熱伝導

当研究室では格子振動の非調和効果を考慮した高精度なフォノン計算手法の開発を行っている．例えば 3 次非調和項によるフォノン散乱確率や 4 次非調和項によるフォノン振動数の繰り込み効果を第一原理的に評価することが可能であり、誘電体や熱電材料などに見られる特異な原子ダイナミクスや熱伝導を解析するのに有効である．今年度は熱電材料として知られているクラスレート化合物 $Ba_8Ga_{16}Ge_{30}$ における 4 次非調和性と格子熱伝導率の関係性について、密度汎関数理論とセルフコンシステントフォノン (SCPH) 近似に基づく定量的な解析を行った．その結果、ゲスト原子 Ba の 4 次非調和性はゲスト原子の可動域増加に伴い強くなり、この大きな 4 次非調和効果によってラットリング振動の振動数が顕著に増加することを明らかにした．また、4 次非調和性に伴うラットリング振動数の温度変化を考慮する事で、高温域で見られる熱伝導率の特異な温度依存性を部分的に説明可能であることを示した．

3.3.5 ScF_3 の負の熱膨張率

熱伝導に寄与する原子間相互作用の非調和項は、物質の熱膨張率を決める主要な要因でもある．我々はこれまで開発してきた格子振動の非調和効果のシミュレーション手法を拡張し、近年幅広い温度領域で負の熱膨張率を示すことが見いだされた Sc_3 のシミュレーションとその解析を行った．先行研究では第一原理分子動力学法による大規模計算で実験結果の再現に成功した例があるが、本研究ではよく行われる準調和近似から SCPH、さらには Improved SCPH (ISC) へと近似精度を上げることで、熱膨張率の温度依存性の定量評価に成功し、その物理的起源についても明らかにした [16].

3.3.6 2 次元的電子状態をもつ一連のペロブスカイト型酸水素化物 $ATiO_2H$（A = Li, Na, K, Rb, Cs）

ペロブスカイト型酸水素化物とは，ペロブスカイト型酸化物 ABO_3 の酸素アニオン O^{2-} を一部，水素アニオン H^- に置換した物質を指す．このアニオン置換によって酸素原子の $2p$ 軌道は水素原子の $1s$ 軌道に置き換わるため，酸水素化物は特異な電子状態を発現する可能性がある．実際に，我々はペロブスカイト型酸水素化物 $KTiO_2H$ が価電子帯上端に 2 次元的な電子状態をもつことを第一原理計算により予測した [3]．この 2 次元的性質は $KTiO_2H$ に限らず，アルカリ金属チタン酸水素化物 $ATiO_2H$（A = Li, Na, K, Rb, Cs）において普遍的に現れる．また，これら $ATiO_2H$ の結晶構造・電子状態・誘電特性はアルカリ金属を変えるにつれて変化し，これらが物質群をなすことがわかる [13].

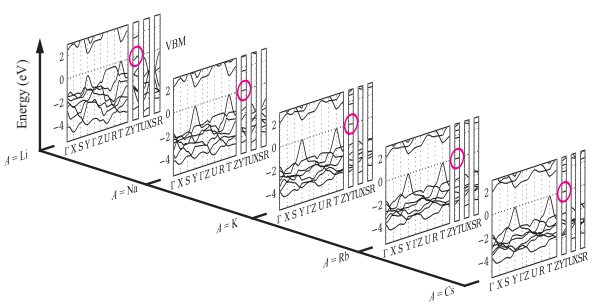

図 3.3.2: ATiO$_2$H（A = Li, Na, K, Rb, Cs）のバンド構造．赤丸内に 2 次元的な電子状態がある．

3.3.7 金属における非熱的アブレーションの機構解明とそのモデリング

現在，金属加工の多くの現場でレーザが用いられている．照射するレーザのパルス幅をサブピコ秒より短くすることで，熱的効果では説明できない非熱的アブレーションが誘起され，さらなる精密加工が可能となる．しかし，その物理的機構には不明瞭な点が多く，シミュレーションから最適なレーザ照射条件を予測することは現状困難である．そこで我々は，非熱的アブレーションの物理的機構の解明とその実験結果を再現できる数理モデルの構築を試みた．本研究では銅を具体的な対象とし，高強度の超短パルスレーザ照射直後の状態を高温の電子系，低温の格子系として表現した (二温度モデル)．第一原理計算の結果，電子温度が約 2 万 K を越えると電子エントロピーの寄与により，凝縮状態が不安定化することが確認できた．我々は，その原因を体積変化による電子状態の変化によるものと結論付けた．その後，この電子エントロピーの効果を取り入れた数理モデルを構築し，アブレーション深さのシミュレーションを行うことで，このモデルが実験を定量的に再現できることを示した．

3.3.8 微量元素添加型焼結磁石材料における磁気異方性の解明

Nd-Fe-B 焼結磁石は, 高温領域における保磁力維持のために高価な Dy を添加している．これまでの詳細な実験から, 主相である 2-14-1 相とそれを取り巻く多種の副相がなす界面構造と磁気状態の理解が, 保磁力機構の解明に重要であると認識されつつある．近年, Dy を添加する代わりに, より安価な Cu, Ga を添加することで NdFeB 磁石の保磁力が向上するという実験的報告があり, 本年度は多種の微量添加型 $Nd_2Fe_{14-x}M_xB$ モデル構造 (M は Mg, Al, Si, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge) の第一原理計算を進め, 構造の安定性および保磁力と直結している Nd の磁気異方性改善に関する解析を行った．生成エネルギーの計算から, Nd-Fe-B 層に存在する Fe 原子は Mg, Ca, Sc, Cu, Zn, Ga と置換されやすいこと, 特に Nd-Fe-B 層が表面にさらされている場合に Fe 原子は容易に置換されることが分かり, その他の Fe サイト置換に関しては, 構造的に不安定であることも確かめられた．更に, Nd-Fe-B 層の Fe 原子置換によって Nd 原子の磁気異方性が改善されることが理解された．このことから, 実験的に Cu や Ga 以外の Mg, Ca, Sc, Zn 元素を添加することで界面の Nd の磁気異方性を改善する可能性があることが本研究から示唆される．

3.3.9 相関波動関数を用いた周期系の第一原理電子状態計算手法開発

当研究室では、ジャストロウ-スレーター型の相関波動関数を用いて、ハミルトニアンの相似変換により、モンテカルロ法を使わずに電子相関を取り込んだ電子状態計算を実現する、トランスコリレイティッド法の開発に取り組んでいる．2016 度は、前年新アルゴリズム導入により高速化したプログラムを用いて、遷移金属酸化物 ZnO のバンド構造の実証計算を行い、バンドギャップ、価電子帯のバンド幅、3d バンドの深さなどの基本的な電子状態に関して、密度汎関数理論のみならず、多体摂動論である GW 法よりも定量的に優れた結果を得ることに成功した [6].

3.3.10 分割統治法に基づくナノ構造全系電子状態計算手法の開発

第一原理計算の計算コストは，系の大きさの 3 乗に比例して増加するため，大規模系の研究においては計算の効率化が不可欠となる．分割統治法とは，大規模系を小さな部分系に分割し，個々の部分系における電子状態計算を独立に行う事で，計算コストを系の大きさの 1 乗に収める手法（オーダー N 法）である．全系の加法的物理量は部分系の結果を統合する事で得られるが，一方で全系の波動関数を各部分系の波動関数から単純に統合して得る事は不可能であり，これを解決する新たな手法の開発が望まれていた．

そこで，我々は分割統治法の部分系軌道を組み合わせて全系ハミルトニアンを再構成し，全系波動関数計算を可能にする手法の開発を行ってきた．特に，近年は固体への適用を目指して平面波基底分割統治法の拡張に取り組んでいる．今年度は，部分系軌道から基底を生成する過程の改良と，本手法のハイブリッド汎関数への適用を推進した．前者に関して，部分系軌道から部分系の緩衝領域に由来する寄与を除去する過程に改良を加えることで，基底数の大幅な削減を実現した．後者に関しても不純物を含む Ge 結晶などの計算により，ハイブリッド汎関数を用いた全系波動関数の高速計算が可能であることを実証した [7, 14].

3.3.11 不完全な実験データを活用した結晶構造探査手法の開発

結晶構造は物質の性質を知るうえで欠かせない情報の一つである．実験では，X 線・中性子線・電子線回折などの結晶構造解析手法が数多く発展してきた．しかし，極限条件下の実験やサンプルが微小な場合など，実験データが不完全な場合は構造決定は困難となる．理論的な構造予測も，さまざまな最適化手法の応用によって盛んに発展してきたが，原子数が多く，複雑な結晶構造の予測は未だに困難である．そこで我々は，不完全な実験データを用いて理論的な結晶構造予測を効率化する手法を開発した．従来の手法では，（自由）エネルギーの最適化により安定構造を予測してきたが，本手法では，そこに実験データの一部から構成されるコスト関数を加え，新たな評価関数を構成し，その最適化により構造予測を行う．このように構成された評価関数の最適化は，コスト関数により探査空間が制限されるため，エネルギーの最適化よりも容易であると考えられる．特に，X 線回折データの角度情報のみを使って定式化された “結晶化度” を用いてコスト関数を構成し，既知の SiO_2 の多形の構造予測を行い，従来の手法よりも効率的に安定構造を発見できることを示した．原理的にはコスト関数の構成にいかなる実験データも使えるため，本手法は非常に応用範囲が広い．結晶構造のみならず，既存の手法では決定が困難であった表面・界面・アモルファスなどの構造決定にも本手法は応用可能である．

＜報文＞

(原著論文)

[1] R. Akashi, W. Sano, R. Arita, S. Tsuneyuki Possible ”Magneli” phases and self-alloying in superconducting sulfur hydride Phys. Rev. Lett. 117, 075503 (2016).

[2] M. Ochi, R. Akashi, and K. Kuroki: Strong Bilayer Coupling Induced by the Symmetry Breaking in the Monoclinic Phase of BiS2-Based Superconductors J. Phys. Soc. Jpn. 85, 094705(2016).

[3] N. Sato and S. Tsuneyuki, Perovskite-type oxyhydride with a two-dimensional electron system: First-principles prediction of $KTiO_2H$, Appl. Phys. Lett. 109, 172903 (2016).

[4] T. Miyamachi, S. Nakashima, S. Kim, N. Kawamura, Y. Tatetsu, Y. Gohda, S. Tsuneyuki, and F. Komori: Epitaxially stabilized iron thin films via effective strain relief from steps, Phys. Rev. B 94, 045439 (2016).

[5] Y. Tatetsu, Y. Gohda, and S. Tsuneyuki: First-Principles Study of the Role of Cu in Improving the Coercivity of Nd-Fe-B Permanent Magnets, Phys. Rev. Appl. 6, 064029 (2016)

[6] M. Ochi, R. Arita, and S. Tsuneyuki, Correlated Band Structure of a Transition Metal Oxide ZnO Obtained from a Many-Body Wave Function Theory, Phys. Rev. Lett. 118, 026402 (2017).

[7] S. Yamada, F. Shimojo, R. Akashi, and S. Tsuneyuki, Efficient method for calculating spatially extended electronic states of large systems with a divide-and-conquer approach, Phys. Rev. B 95, 045106 (2017).

[8] R. Arita, T. Koretsune, S. Sakai, R. Akashi, Y. Nomura, and W. Sano, Nonempirical Calculation of Superconducting Transition Temperatures in Light-Element Superconductors, Adv. Mater. 1602421 (2017)

[9] M. Kawamura, R. Akashi, and S. Tsuneyuki, Anisotropic superconducting gaps in YNi_2B_2C: A first-principles investigation, Phys. Rev. B 95, 054506 (2017).

[10] H. Katow, J. Usukura, R. Akashi, K. Varga, and S. Tsuneyuki, Numerical investigation of triexciton stabilization in diamond with multiple valleys and bands, Phys. Rev. B 95, 125205 (2017).

(国内雑誌)

[11] 明石遼介、是常隆、有田亮太郎、常行真司「高圧下で硫化水素が示す高温超伝導：これまでのまとめ」，固体物理 vol.51, 729 (2016).

[12] 合田義弘, 立津慶幸, 常行真司「ネオジム磁石の粒界構造と局所磁性の電子論」，日本金属学会誌 vol.81(1), 26 (2017).

(学位論文)

[13] 佐藤暢哉，Theoretical predictions of perovskite-type oxyhydrides based on first-principles calculations（第一原理計算に基づくペロブスカイト型酸水素化物の理論予測）（東京大学，2017 年 3 月，博士（理学））.

[14] 山田俊介, First-principles calculations of spatially extended electronic states for nanostructures with a divide-and-conquer method （ナノ構造体のための分割統治法に基づく第一原理全系波動関数計算）（東京大学，2017 年 3 月，博士（理学））

[15] 堤建太朗, First-principles calculation of superconducting transition temperatures including the effect of spin fluctuations （スピン揺らぎの効果を取り入れた超伝導転移温度の第一原理計算） （東京大学, 2017 年 3 月 修士）

[16] 大庭悠輔, First-principles study of phonon anharmonicity and negative thermal expansion in ScF_3（ScF_3 におけるフォノンの非調和効果と負熱膨張に関する第一原理的研究）（東京大学, 2017 年 3 月 修士）

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[17] R. Akashi, M. Kawamura, W. Sano, Y. Nomura, R. Arita, and S. Tsuneyuki: Magneli-type phases as

the missing link of the low-Tc–high-Tc superconducting phases in compressed sulfur hydride International Workshop: Towards Room Temperature Superconductivity: Hydrides and More, Rome, Italy, May 9-10, 2016

[18] Y. Tanaka and S. Tsuneyuki: Nonthermal crystal-to-amorphous transition of $Ge_2Sb_2Te_5$ by irradiating ultrashort pulse laser, New Horizons in Condensed Matter Physics, Tokyo, Japan, May 19, 2016 (poster).

[19] N. Sato, R. Akashi, and S. Tsuneyuki, First-principles prediction of perovskite-type oxyhydrides $A\mathrm{TiO_2H}$ (A = K, Rb, Cs) with a two-dimensional electronic state, International Symposium on New Horizons in Condensed Matter Physics, Tokyo, Japan, Jun. 18–19, 2016 (poster).

[20] K. Yoshizawa, Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki: First principles simulation by using GUI software TAPIOCA and C-Tools, International Symposium on New Horizons in Condensed Matter Physics, Tokyo, Japan, Jun. 19, 2016 (poster).

[21] Y. Tatetsu, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda : Ab-initio study on transition-metal-doped Nd-Fe-B magnets, International Symposium on New Horizons in Condensed Matter Physics, Tokyo, Japan, June 18-19, 2016 (poster).

[22] M. Ochi, R. Arita, and S. Tsuneyuki, "Accurate band structure of wurtzite ZnO calculated with the bi-orthogonal transcorrelated method', International Symposium on New Horizons in Condensed Matter Physics, Tokyo, Japan, Jun. 19, 2016 (poster).

[23] R. Akashi: General relation between interference of the Bloch phase and stacking geometry in layered materials, ATI2016 Nano Carbon Zao Meeting (Zao 16), Yamagata, Japan, Jul. 19-20, 2016

[24] Y. Tatetsu, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda: Theoretical analysis of Cu addition effects in Nd-Fe-B magnets, 8th joint European Magnetics Symposia (JEMS 2016), Glasgow, UK, Aug. 21-26, 2016.

[25] Y. Tatetsu, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda: Ab-initio calculations of magnetic properties in Nd-Fe-B magnets with Cu existing around the interface, The 24th International Workshop on Rare-Earth and Future Permanent Magnets and Their Applications (REPM 2016), Darmstadt, Germany, Aug. 28 - Sep. 1, 2016.

[26] N. Sato, R. Akashi, and S. Tsuneyuki, Prediction of unsynthesized oxyhydrides $A\mathrm{TiO_2H}$ (A = K, Rb, Cs) with two-dimensional electronic states, ASIAN-19, Hsinchu, Taiwan, Oct. 31–Nov. 2, 2016 (poster).

[27] S. Yamada, R. Akashi and S. Tsuneyuki: An efficient post processing method for eigenstate calculations of large systems based on the ab initio divide-and-conquer method, The 19th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, Hsinchu, Taiwan, Nov. 1, 2016 (poster).

[28] K. Yoshizawa, Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki: First principles electronic structure calculation by using DFT codes input support tool C-Tools, 1st International Symposium on Research and Education of Computational Science, Tokyo, Japan, Nov. 29, 2016 (poster).

[29] J. Hwang, Y. Tanaka, S. Ishino, and S. Watanabe: Artificial Neural Network Modeling to Predict Viscosity of Oxide Glasses, The 11th General Meeting of ACCMS-VO, Miyagi, Japan, Dec. 19, 2016.

[30] Y. Tatetsu, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda: Ab-initio study of transition-metal-doping effects on magnetic anisotropy in Nd-Fe-B sintered magnets, TMS 2017 146th Annual Meeting & Exhibition, San Diego, USA, Feb. 26 - Mar. 2, 2017.

[31] T. Tadano and S. Tsuneyuki: Efficient and accurate first-principles method for modeling phonon anharmonicity and thermal conductivity, MANA International Symposium 2017, Tsukuba, Japan, Mar. 1, 2017.

[32] M. Ochi, R. Arita, and S. Tsuneyuki, "First-principles band structure of correlated material obtained with a many-body wave function theory', CEMS-QPEC Symposium on Emergent Quantum Materials, Tokyo, Japan, March 13, 2017.

[33] R. Akashi, C. Moricea, T. Koretsune, S. S. Saxena, and R. Arita: Weak phonon-mediated pairing in BiS_2 superconductor from first principles APS March meeting 2017, New Orleans, USA, Mar. 13–17, 2017

[34] N. Sato, R. Akashi, and S. Tsuneyuki, First-principles predictions of perovskite-type alkali metal titanium oxyhydrides with two-dimensional electronic states, APS March Meeting 2017, New Orleans, USA, Mar. 13–18, 2017.

[35] N. Tsujimoto, D. Adachi, S. Todo, R. Akashi and S. Tsuneyuki: Crystal structure prediction supported with diffraction data, APS March Meeting 2017, New Orleans, USA, Mar. 13-17, 2017.

[36] K. Tsutsumi, M. Kawamura, R. Akashi, and S. Tsuneyuki: Reduction of superconducting transition temperature by spin fluctuations in elemental transition metals: first-principles study, APS March meeting 2017, New Orleans, USA, Mar. 13–17, 2017

招待講演

[37] R. Akashi, W. Sano, R. Arita, and S. Tsuneyuki: Emergent Magneli-type crystal phases and their mixture in pressurized sulfur hydride, SUPERSTRIPES 2016, Ischia, Italy,Jun. 23-29, 2016.

[38] S. Tsuneyuki: First-principles modeling of the thermal properties of materials, The 14th International Nanotech Symposium & Nano-Convergence

Expo, NANO KOREA 2016, KINTEX, Korea, Jul. 16, 2016.

[39] S. Tsuneyuki: First-principles theoretical study of exotic high-pressure phases, The17th International Conference on High Pressure in Semiconductor Physics (HPSP-17) & The Workshop on High pressure Study on Superconducting, (WHS), Sanjo-Kaikan, The University of Tokyo, Tokyo, Aug. 8, 2016 (Plenary).

[40] R. Akashi: Possible 'Magneli' phases in sulfur hydride under high pressure, The 2nd Extreme Materials Science Workshop, Wako, Japan. Aug. 15, 2016.

[41] S. Tsuneyuki: First-Principles Calculation and Modelling of Thermal Transport in Heavily Anharmonic Crystals, Japan-France-Spain Joint-Symposium on Theoretical and Computational Science of Complex Systems, Fukui Institute for Fundamental Chemistry, Kyoto University, Kyoto, Oct. 28, 2016.

(国内会議)

一般講演

[42] 吉澤香奈子, 吉本芳英, 常行真司:「第一原理計算 GUI 支援ソフトウェア TAPIOCA と C-Tools の開発」, 物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会, 東京大学物性研究所（柏市）, 2016 年 4 月 4 日.

[43] 只野央将，常行真司：「第一原理に基づく非調和格子振動のスパースモデリングと熱物性計算への応用」, 第 1 回ポスト「京」重点課題（7）研究会 「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成」, 東京大学（文京区），2016 年 7 月 21 日.

[44] 立津慶幸, 常行真司, 合田義弘：「磁性材料の高性能化－大規模電子状態計算による探索」, 第 1 回ポスト「京」重点課題 (7) 研究会「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成」, 東京大学 (文京区), 2016 年 7 月 21 日 - 22 日.

[45] 吉澤香奈子, 吉本芳英, 常行真司: 「DFT コードに対する GUI 支援ツール C-Tools を用いた第一原理シミュレーション」, 第 1 回ポスト「京」重点課題（7）研究会, 東京大学本郷キャンパス（文京区）, 2016 年 7 月 21 日.

[46] 吉澤香奈子, 吉本芳英, 常行真司: 「GUI 支援ツール C-Tools による第一原理シミュレーションの自動セットアップ」, 第 2 回ポスト「京」重点課題（7）研究会, 東京大学物性研究所（柏市）, 2016 年 7 月 21 日

[47] 吉澤香奈子, 岩崎誉志紀, 合田義弘, 常行真司: 「ルチル TiO_2 中の不純物水素の電子状態と超微細構造」, 超低速ミュオンが拓く科学シンポジウム, いばらき量子ビーム研究センター（東海村）, 2016 年 8 月 26 日.

[48] 明石遼介: First-principles study on superconducting sulfur hydride under high pressure TIA"かけはし"ポスター交流会, エポカルつくば (つくば市) 2016 年 8 月 30 日 (poster).

[49] 只野央将，常行真司：“First-principles modeling of strong lattice anharmonicity and thermal conductivity in thermoelectric materials”， “TIA かけはし” ポスター交流会，エポカルつくば（つくば市），2016 年 8 月 30 日 (poster).

[50] K. Yoshizawa, Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki: Computational science simulation by DFT input support tool C-Tools, TIA かけはし”ポスター交流会, エポカルつくば（つくば市）, 2016 年 8 月 30 日 (poster).

[51] 佐藤暢哉，明石遼介，常行真司：「核磁気共鳴ケミカルシフトの局所的寄与への分割および第一原理計算」, 日本物理学会 2016 年秋季大会，金沢大学角間キャンパス（金沢市），2016 年 9 月 13.

[52] 只野央将, 常行真司：「I 型クラスレートにおけるラットリングフォノンと熱伝導率の温度・体積依存性の第一原理計算」, 日本物理学会２０１６年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス（金沢市）, 2016 年 9 月 13 日.

[53] 越智正之, 有田亮太郎, 常行真司：「平面波基底トランスコリレイティッド法の固体 ZnO への適用」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス（金沢市）, 2016 年 9 月 13 日.

[54] 堤建太朗, 河村光晶, 明石遼介, 常行真司：「スピン揺らぎ効果を取り入れた超伝導転移温度の第一原理計算」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス（金沢市）, 2016 年 9 月 13 日.

[55] 明石遼介，佐野航，有田亮太郎，常行真司：「高圧下硫化水素超伝導体におけるマグネリ相と低 Tc-高 Tc 相変態」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学 (金沢市), 2016 年 9 月 14 日.

[56] 立津慶幸, 常行真司, 合田義弘：「第一原理計算による微量元素添加型 Nd2Fe14B の磁気異方性解析」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス（金沢市）, 2016 年 9 月 14 日.

[57] 大庭悠輔, 只野央将, 明石遼介, 常行真司：「ScF_3 におけるフォノンの非調和効果と負熱膨張に関する第一原理的研究」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス（金沢市）, 2016 年 9 月 15 日.

[58] 田中悠太，常行真司：「金属における非熱的アブレーションの第一原理的研究」，日本物理学会 2016 年秋季大会，金沢大学角間キャンパス（金沢市），2016 年 9 月 15 日 (poster).

[59] 加藤洋生, 薄倉淳子, 明石遼介, K. Varga, 常行真司：「ダイアモンドにおける Polyexciton 安定化機構の数値的検証」日本物理学会 2016 年秋季大会，金沢大学（石川），2016 年 9 月 15 日 (poster).

[60] 足立大樹, 藤堂眞治, 常行真司：「粉末 X 線実験データと第一原理計算を組み合わせた構造推定手法の開発」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス（金沢市）, 2016 年 9 月 16 日 (poster).

[61] 立津慶幸, 常行真司, 合田義弘：「永久磁石の微細構造特性解析と新化合物探索」, 第 3 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会, 品川コクヨホール (東京都), 2016 年 10 月 21 日 (poster).

[62] 立津慶幸, 常行真司, 合田義弘 :「第一原理計算による Nd-Fe-B 磁石へのアプローチ」, 第 16 回 琉球大学物性研究会, 琉球大学 (沖縄県), 2016 年 11 月 26 日.

[63] 立津慶幸, 常行真司, 合田義弘 :「 Nd-Fe-B 磁石における微量元素添加の効果と界面電子状態」, 第 2 回ポスト「京」重点課題（7）研究会 「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成」, 東京大学物性研究所 (千葉県), 2016 年 12 月 6 日 (poster).

[64] 田中悠太, 常行真司 :「金属における電子エントロピー誘起非熱的アブレーションのシミュレーション」, 応用物理学会 2017 年春季大会, パシフィコ横浜（神奈川）, 2017 年 3 月 15 日.

[65] 吉澤香奈子, 岩崎誉志紀, 合田義弘, 常行真司: 「ルチル TiO_2 の酸素欠陥と複数の不純物水素」日本物理学会 第 72 回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス（豊中市）, 2017 年 3 月 17 日.

[66] 立津慶幸, 常行真司, 合田義弘 :「Ga 添加型 Nd2Fe14B の第一原理計算」, 日本物理学会 2017 年春季大会, 大阪大学 (大阪府), 2017 年 3 月 18 日.

[67] 大庭悠輔, 只野央将, 明石遼介, 常行真司 :「非調和性を段階的に考慮した第一原理計算による ScF_3 の負熱膨張の解析」, 日本物理学会 2017 年春季大会, 大阪大学 (大阪府), 2017 年 3 月 18 日.

[68] 山田俊介, 下條冬樹, 明石遼介, 常行真司 :「分割統治電子状態計算法の開発と ハイブリッド汎関数への適用」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス（豊中市）, 2017 年 3 月 20 日 (poster).

招待講演

[69] 常行真司 :「物質構造と電子状態の第一原理シミュレーション手法の開発と応用」、物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会「計算物質科学の今と未来」（物性研究所、柏）, 2016 年 4 月 4 日.

[70] 常行真司 :「データ科学と計算・実験の連携による材料研究への期待」, 日本学術振興会「マテリアル・インフォマティックスによるものづくりプラットフォームの戦略的構築」に関する先導的研究開発委員会 (TKP 市ヶ谷コンファレンスセンター、東京) , 2016 年 5 月 26 日.

[71] 常行真司 :「データ科学と計算・実験の連携による材料研究への期待」, 2016 年度 第 1 回 CAC フォーラムセミナー（日本化学会 化学会館、東京）, 2016 年 8 月 1 日.

[72] 常行真司 :「計算科学とインフォマティクス手法を用いた材料開発への期待」, パナソニック株式会社 材料計算科学研究会（パナソニック株式会社先端研究本部、大阪）, 2016 年 8 月 2 日.

[73] 明石遼介 :「高圧下硫化水素超伝導体におけるマグネリ相」、超伝導研究の最先端：多自由度、非平衡、電子相関、トポロジー 京都大学基礎物理学研究所 (京都市) 2016 年 10 月 10 日–12 日

[74] 常行真司 :「材料創製のためのインフォマティクスの課題」, 戦略的創造研究推進事業（新技術シーズ創出）平成２９年度戦略目標の策定等に関するワークショップ（文部科学省）, 2016 年 11 月 13 日.

[75] 常行真司 :「計算科学とインフォマティクス手法を用いた材料開発への期待」, 第 9 回 三菱マテリアル・早大理工学術院 産学連携セミナー（早稲田大学 西早稲田キャンパス, 東京）, 2016 年 11 月 18 日.

[76] 常行真司 :「パネルディスカッション：計算物質科学のエコシステム構築に向けて」（パネリスト）, 高度情報科学技術研究機構 第 3 回材料系ワークショップ ー 計算物質科学を拓く第一原理計算とその機能モジュール ー （秋葉原 UDX、東京）, 2017 年 2 月 23 日

[77] 常行真司 :「計算科学とインフォマティクス手法を用いた材料開発への期待」, 九州工業大学第 30 回 Kyuteck 物性グループセミナー （九州工業大学, 福岡）, 2017 年 3 月 13 日.

3.4 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、完全な解を求めることはできない。そこで、もとの方程式の中に含まれる、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、モンテカルロ法に代表される確率的なシミュレーション、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、古典/量子スピン系やボーズハバード系などに代表される強相関多体系における新奇な状態や相転移現象の探索・解明を目指している。また、最先端のスーパーコンピュータの能力を活かすための並列化手法の研究、次世代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。

藤堂研究室: `http://exa.phys.s.u-tokyo.ac.jp`

3.4.1 強相関多体系における新奇な状態や相転移現象の探索と解明

脱閉じ込め量子臨界点でのスピノン線形分散関係

脱閉じ込め量子臨界は、相転移現象の基礎となっているランダウ・ギンツブルグ・ウィルソンパラダイムの範疇を超える興味深い物理現象である。臨界点では分数励起であるスピノンが閉じ込めから脱し、ほぼ自由な粒子として振る舞うと期待されている。我々は経路積分量子モンテカルロ法と一般化モーメント法を用いて、二次元量子スピン模型–J-Q 模型–におけるスピノンの線形分散関係を明らかにした。さらにシングレット励起とトリプレット励起の非自明な縮退を見出し、模型が持つ対称性より高い対称性の創発を示唆する結果を得た [8, 11, 15, 19, 20, 21, 24]。

ランダムネスに相関を持つ RFIM の有効次元

ランダム磁場イジング模型 (RFIM) では、ランダム性のない純粋系と比較して有効次元の低い系に相当する臨界現象が現れることが知られている。さらに、ランダム場が独立ではなくべき的 (減衰指数 ρ) な相関を持つ場合においては $D = d - \rho$ で表される D 次元非相関ランダム系に相当する振る舞いとなる事がくりこみ理論により予想されている。我々は、べき的な相関をもつランダム磁場を数値的に生成し、モンテカルロシミュレーションを行った。三次元 RFIM についてランダムネスの相関と臨界的振る舞いの関係を精査した結果、ある相関の強さを境界に特定の温度での臨界的な振る舞いが消失する様子が見られ、くりこみ群の予想を支持するようなランダム場の相関による下部臨界次元への到達が示唆された [29]。

強い空間的・時間的異方性をもつ系の量子臨界現象

シミュレーションによる臨界現象の分類には、臨界指数などの臨界性を定量的に特徴づける量を精度良く求めることが不可欠である。しかしながら、系に強い空間的異方的がある場合には、強い有限サイズ効果など、精密な解析が難しい場合も多い。さらに、量子系に対するモンテカルロ法においては、虚時間と呼ばれる新たな軸を導入して量子ゆらぎを正確に取り込むが、これにより新たな長さスケール因子が導入されるだけでなく、特に系がランダムネスを持つ場合には、もう一つの非自明な臨界指数 (動的臨界指数 z) があらわれることもある。我々は量子モンテカルロ法と機械学習的な手法である確率的最適化を組み合わせた新しい方法を開発した。通常の有限サイズスケーリング解析では、温度や相互作用に関してパラメータスキャンが必要となるが、我々の手法では、系のアスペクト比も含む様々なパラメータがシミュレーション実行中に自動調整される。その結果、臨界点が自動的に求まるだけでなく、臨界振幅やスピン波速度等も精度良く計算することが可能となった。また、ランダムネスをもつ量子系に対してもこの手法を拡張した [16, 33]。

長距離相互作用を持つスピン系の臨界減衰指数

長距離相互作用を持つスピン系は、近接相互作用のみの系とは異なった臨界現象を示すことが知られている。しかしながら、平均場的領域、中間領域、近接的領域、それぞれの境界については、これまで明らかではなかった。我々は、べき的に減衰する長距離相互作用を持つ二次元正方格子イジング模型を、オーダー N クラスターアルゴリズムを用いてシミュレーションを行い、臨界指数と臨界係数を精度よく評価した。また、「combined Binder ratio」と呼ばれる、スケーリング補正項を打ち消すユニバーサルな方法を開発し、境界領域における相転移の臨界指数の振る舞いを明らかにした。さらに、相関のあるランダムネスをもつ長距離相互作用スピン系に対するシミュレーション手法を開発し、その臨界特性の解析を行った [1, 9, 18]。

二次元 SPT 相におけるトポロジカル秩序変数

$S = 1$ 反強磁性ハイゼンベルグ鎖におけるハルデン状態は、対称性に保護されたトポロジカル (SPT) 状態の代表例として知られている。一次元の SPT 相に対しては、ストリング秩序変数、ひねり秩序変数など、トポロジカルな秩序を特徴づける様々な隠れた秩序変数が提案され、数値シミュレーションでもその正当性が検証されている。しかしながら、二次元以上において SPT 相が存在するかどうか、さらにそれを特徴づけるトポロジカル秩序変数は何か、など未解明の問題も多い。我々は、近年提案された「Strange Correlator」と呼ばれる相関関数を量子モンテカルロ法を用いて精度良く計算する手法を開発した。また、一次元系において、Strange Correlator が SPT 相を正しく特徴付けることを確認した。この手法は二次元の SPT 相に対しても同様に適用可能である。

共振器系での動的な協力現象

共振器系は電磁場と物質との間の相互作用によって起こる現象を調べるための基本的な系であり、レーザー光を掛けることで非平衡環境を実現することが可能となる。この系で起こる現象を記述する Tavis-Cummings 模型では、熱力学的極限において平均場による取り扱いが正当化されることが知られており、その手法を用いることで様々な協力現象が現れる。特に我々は、「Optical Bistability」と呼ばれる不連続な転移を伴う動的な協力現象をミクロな自由度から理解することを目指した。有限サイズでの非平衡定常状態またその緩和過程を求めるため、Lanczos 法と並列化計算を組み合わせることで大規模計算が可能となるようなプログラム開発を行った [14]。

ガラスで起こるシアバンド

ガラスは剛性を持つが、そのミクロな原子配置は一見するとランダムである。その剛性のミクロな起源を明らかにするため、長さスケールの絡んだ現象であるシアバンドを分子動力学法の手法の下で調べた。シアバンドとは、壁を通じて剪断を系に加えた際に異なる剪断速度を持った領域が共存する現象である。この現象が、ガラスを生成するときの冷却速度や壁の間の距離にどのように依存するかを調べた。その結果、壁からの相互作用の影響や気液共存のようなバルクとしての相共存としてこの現象を理解することはできず、ガラスに埋め込まれている何らかの長さスケールがこの現象を支配していることを明らかにした [32]。

3.4.2 強相関多体系に対する新たな計算手法の開発

幾何的に最適化された向き付きワームアルゴリズム

ワームアルゴリズムは、古典・量子系どちらの場合においても、最も効率的なモンテカルロ法のひとつである。我々はワームに「向き」を導入し遷移確率を幾何的に最適化することで、さらなる効率化に成功した。応用例として三次元イジング模型の臨界点で、従来のワームアルゴリズムと比較して約 25 倍高速化することを示した。さらにワームダイナミクスの動的臨界指数を推定し、Wolff クラスター更新法の場合と同じになる証拠を得た。この新しい手法は、スカラー場理論、ポッツ模型、ループ模型、格子 QCD 模型、スピンアイス系等広く応用できる。

重ね合わせ最適化法と構造決定への応用

複雑な原子配列を持つ物質の構造をシミュレーションや実験データから決定することは、物質科学の最も重要なつ困難な課題の一つである。しかしながら、エネルギーの最適化や実験データの再現性を高める方法は、局所安定な構造が多く現れてしまい、正しい最適化が行われないことが多い。今回、勾配降下法を一般化した「重ね合わせ最適化法」を開発した。この最適化手法は、複数の評価関数を同時に最適化する際、一方の評価関数のみの最適解に陥りにくいという特徴を持っている。この手法を数値シミュレーションにより計算した「エネルギー」及び「粉末 X 線回折のピーク位置のずれ」を評価関数として用いて同時構造最適化を行った結果、Si のダイヤモンド構造や Si の quartz 構造において、高い確率で最適解が得られた [5, 22, 26, 30]。

非定常緩和を用いたパラメータ推論と逆イジング問題への応用

スピン変数の相互作用や局所磁場をスピン配位から推論する問題は逆イジング問題とよばれる。この問題を解くためには、相関関数の期待値が必要であり、これまでマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) が広く用いられてきた。しかしながら、特に複雑系における MCMC の収束にかかるまでのステップ数の増加が大きな問題となっていた。近年、より高速なアルゴリズムとして、MCMC を用いた期待値計算を非定常分布で置き換える Contrastive Divergence (CD) 法が提案された。CD 法は経験的には高い性能を示すが、誤った推定解を与える場合や収束しない場合があることが知られている。我々は、ある特定の遷移確率を用いる場合について、CD 法の評価関数を明らかにし、その凸性を示した [6, 10, 27, 28, 31]。

モンテカルロ法による量子スピン系の励起速度計算

多くの量子スピン系は、O(N) 非線形シグマ模型と呼ばれる有効理論で記述できることが知られており、磁気秩序相・無秩序相・臨界点を包括的にとり扱うことができる。その理論は、磁化・スティッフネス・励起速度の 3 つの物理量をパラメータとして持つ。この中で磁化とスティッフネスの計算法は確立されていたが、励起速度を高精度に計算することは難しかった。我々は、効率的なエネルギーギャップ計算法と巻き付き数を用いた手法を用いることで、一次元・二次元・二層系の反強磁性体における励起速度を近似なしに高精度に計算した。そして非線形シグマ模型のラージ N 極限と比較し、有限の N(=3) での非自明な補正を明らかにした [8, 11, 15, 20, 21]。

3.4.3 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の開発

並列厳密対角化パッケージの開発

強相関量子多体系の研究において、数値対角化法は最も基本的かつ最も汎用性の高い手法として幅広く使われている。しかしながらその一方で、必要となるメモリ量や計算時間が系のサイズに対して指数関数的に爆発するため、その利用範囲は限られてきた。我々は、並列計算機の進歩や、新しい量子統計力学の計算手法を取り入れた現代的な量子格子模型ソルバー「HΦ」を開発・公開してきた。この並列厳密対角化パッケージでは、ハイゼンベルグ模型やハバード模型、近藤格子模型など、幅広い格子模型を解析することが可能となっている。また、従来のランチョス法による基底状態の計算だけでなく、熱的純粋量子状態を用いた比熱や構造因子の温度依存性やシフト型クリロフ部分空間法を用いた高速かつ安定した励起スペクトル計算も可能となっている。シフト型クリロフ部分空間法のルーチンについては、「Kω」という独立した数値ライブラリとしても整備・公開した [3]。

物質科学シミュレーションのポータル MateriApps の開発

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。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、Live USB Linux システム「MateriApps LIVE!」、MateriApps 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 [23, 25]。

藤堂研で開発・公開しているオープンソースソフトウェアの例

ALPS 量子格子模型のシミュレーションソフトウェア
http://alps.comp-phys.org

ALPSCore 次世代版 ALPS コアライブラリ [2]
http://alpscore.org

ALPS/looper ループアルゴリズム量子モンテカルロ法
http://wistaria.comp-phys.org/alps-looper

BCL (Balance Condition Library) 詳細つりあいを満たさないマルコフ連鎖モンテカルロのためのライブラリ
https://github.com/cmsi/bcl

Cluster-MC クラスターアルゴリズムモンテカルロ法
https://github.com/wistaria/cluster-mc

HΦ 並列計算機に対応した数値厳密対角化法による有効模型ソルバーパッケージ [3]
http://ma.cms-initiative.jp/ja/listapps/hphi

Kω シフト型クリロフ部分空間法に基づく線形演算ライブラリ
http://ma.cms-initiative.jp/ja/listapps/komega

MateriApps 物質科学シミュレーションのポータル [23, 25]
http://ma.cms-initiative.jp

MateriApps Installer MateriApps アプリケーションのインストールスクリプト集 [23, 25]
https://github.com/wistaria/MateriAppsInstaller

MateriApps LIVE! 物質科学アプリケーションを気軽に試すことのできる Live USB Linux システム [23, 25]
http://cmsi.github.io/MateriAppsLive

Rokko 並列厳密対角化パッケージ
https://github.com/t-sakashita/rokko

standards 計算科学に用いられる標準アルゴリズムライブラリ
https://github.com/todo-group/standards

worms ワームアルゴリズム量子モンテカルロ法
https://github.com/wistaria/worms

＜報文＞

(原著論文)

[1] Toshiki Horita, Hidemaro Suwa, Synge Todo, Upper and lower critical decay exponents of Ising ferromagnet with long-range interaction, Phys. Rev. E **95**, 012143 (2017).

[2] Andrey E. Antipov, Gabriele Carcassi, Tianran Chen, Xi Chen, Qiaoyuan Dong, Lukas Gamper, Jan Gukelberger, Ryo Igarashi, Sergey Iskakov, Mario Knz, James P. F. LeBlanc, Ryan Levy, Ping Nang Ma, Joseph E Paki, Hiroshi Shinaoka, Synge Todo, Matthias Troyer, Emanuel Gull, Updated Core Libraries of the ALPS Project, Comp. Phys. Comm **213**, 235–251 (2017).

[3] Mitsuaki Kawamura, Kazuyoshi Yoshimi, Takahiro Misawa, Youhei Yamaji, Synge Todo, Naoki Kawashima, Quantum Lattice Model Solver $\mathcal{H}\phi$, to appear in Comp. Phys. Comm.

(国内雑誌)

[4] 渡辺宙志, 藤堂眞治, 特集「『京』が拓いた物性物理」について, 分子シミュレーション研究会会誌 アンサンブル **18**, 5–6 (2016).

(学位論文)

[5] Daiki Adachi, Combined optimization method using X-ray diffraction data and ab initio calculation (修士論文)

[6] Kai Shimagaki, Performance analysis of parameter inference using unsteady relaxation and application to inverse Ising problem (修士論文)

(著書)

[7] 「ケイサンブッシツカガク」, 計算科学イニシアティブ, 藤堂眞治編, 学研プラス (2016).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[8] Hidemaro Suwa, “Linearly Dispersing Spinons at the Deconfined Quantum Criticality,” Quantum Criticality and Topology in Itinerant Electron Systems, August 2016, Albuquerque.

[9] Toshiki Horita, Hidemaro Suwa, Synge Todo, “Upper and Lower Critical Decay Exponents of Ising Ferromagnets with Long-range Interactions,” 1st International Symposium on Research and Education of Computational Science, November 2016, Tokyo.

[10] Kai Shimagaki, Synge Todo, “Transition kernel dependence of systematic bias in the contrastive divergence method,” 1st International Symposium on Research and Education of Computational Science, November 2016, Tokyo.

[11] Hidemaro Suwa, Arnab Sen, Anders W. Sandvik, “Spinon dispersion at deconfined quantum critical point,” 1st International Symposium on Research and Education of Computational Science, November 2016, Tokyo.

[12] Alexander Wietek, Andreas Luchli, “Large Scale Exact Diagonalization in Condensed Matter Physics,” 1st International Symposium on Research and Education of Computational Science, November 2016, Tokyo.

[13] Alexander Wietek, “Chiral Spin Liquids in Frustrated Quantum Magnetism,” Theory of Correlated Topological Materials, March 2017, ISSP.

[14] Tatsuhiko Shirai, “Floquet Gibbs state in open quantum systems,” Workshop on quantum dynamics and response, March 2017, Tokyo.

[15] Hidemaro Suwa, Arnab Sen, Anders W. Sandvik, “Linearly dispersing spinons at the deconfined quantum critical point,” APS March Meeting 2017, March 2017, New Orleans.

[16] Synge Todo, “Dynamical property of strongly anisotropic quantum criticality in random spin systems,” Workshop on quantum dynamics and response, March 2017, Tokyo.

招待講演

[17] Hidemaro Suwa, “Dynamical exponent at superfluid–Bose-glass transition of hard-core Bose-Hubbard model,” Extraordinary series on quantum phase transition in magnetic systems: II, April 2016, Beijing.

[18] Synge Todo, “Critical Decay Exponent of Ising Ferromagnet with Long-range Interaction,” 2nd Conference on Condensed Matter Physics, July 2016, Nanjing.

[19] Hidemaro Suwa, “Multiple Gapless-Excitation Modes at Neel to Valence-Bond-Solid Transition,” 2nd Conference on Condensed Matter Physics, July 2016, Nanjing.

[20] Hidemaro Suwa, “Quantum Monte Carlo Analysis of Linearly Dispersing Spinons at Deconfined Quantum-Critical Poin,” Riken Seminar, August 2016, Wako.

[21] Hidemaro Suwa, “Quantum Monte Carlo Analysis of Linearly Dispersing Spinons at Deconfined Quantum-Critical Point,” CNLS Seminar, August 2016, Los Alamos.

(国内会議)

一般講演

[22] 足立大樹, 藤堂眞治, 常行真司, 「Structure estimation using power X-ray experimental data and first-principles calculation」, TIA ポスター交流会, 2016 年 8 月, 筑波.

[23] 藤堂眞治, 加藤岳生, 「Material Science Simulation by MateriApps LIVE」, TIA ポスター交流会, 2016 年 8 月, 筑波.

[24] 諏訪秀麿, Arnab Sen, Anders W. Sandvik, 「Neel-VBS 転移におけるマルチギャップレス励起モード」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月, 金沢大.

[25] 藤堂眞治, 加藤岳生, 「MateriApps による物質科学シミュレーション〜MateriApps LIVE! と格子模型計算」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月, 金沢大.

[26] 足立大樹, 藤堂眞治, 常行真司, 「粉末 X 線実験データと第一原理計算を組み合わせた構造推定手法の開発」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月, 金沢大.

[27] 島垣凱, 藤堂眞治, 「Minimum Probability Flow を用いたイジング模型のモデルパラメータ推定と、遷移確率の依存性の解析」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月, 金沢大.

[28] 島垣凱, 「Inverse Ising problem」, Symposium on NonlinearScience, 2016 年 9 月, 産総研.

[29] 堀田俊樹, 諏訪秀麿, 藤堂眞治, 「相関をもつランダム磁場イジング模型の臨界現象」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月, 阪大.

[30] 足立大樹, 辻本直人, 明石遼介, 藤堂眞治, 常行真司, 「重ね合わせ最適化法と構造決定への応用」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月, 阪大.

[31] 島垣凱, 藤堂眞治, 「Contrastive Divergence における系統的バイアスの遷移確率依存性の解析」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月, 阪大.

[32] 白井達彦, 中村壮伸, 「乱れた系で起こるシアバンドのミクロな構造から見た解析」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月, 阪大.

招待講演

[33] 藤堂眞治, 「確率的最適化によるランダムスピン系の量子臨界現象の研究」, 物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会「計算物質科学の今と未来」, 2016 年 4 月, 物性研.

[34] 藤堂眞治, 「ケイサン ブッシツ カガク」, 見える化シンポジウム 2017 〜シミュレーションの価値〜, 2017 年 3 月, 東京.

3.5 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。また、量子多体系や可解模型に関する数理物理学的研究も同時に行っている。

3.5.1 強相関系

量子トライマー模型

RVB(resonating valence-bond) 状態は、量子スピン液体を模式的に表す状態として、Anderson の提案

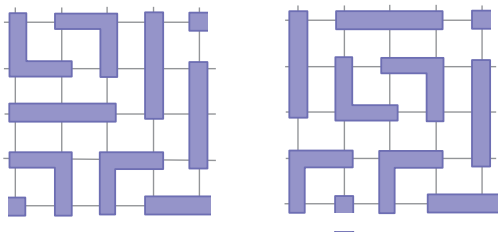

図 3.5.1: 正方格子上のトライマー配置の例。

以来多くの関心を集めてきた。また、この状態を記述する有効模型である量子ダイマー模型も、近年ではトポロジカル秩序との関係から注目されている。桂は、物性研の Lee, 成均館大 (韓国) の Oh, Han と、量子ダイマー模型の自然な拡張としてトライマーを基本単位とする、量子トライマー模型を構成しその性質を調べた [6, 19]。物理的には、トライマーは 3 つのスピン 1 から構成されるスピン一重項状態を表している。このようなトライマーの配置の数は、正方格子上では系のサイズに関して指数関数的に増大する。(トライマー配置の例として図 3.5.1 を参照。) このようなトライマー配置の数を転送行列法を用いて調べた。また、模型の Rokhsar-Kivelson (RK) ポイントに主に着目してその基底状態を調べた。この点では、基底状態は可能なトライマー配置の重ね合わせ状態として表される。また、トーラス上ではトライマー配置をトポロジカルに異なるセクターに分けられることに対応して、基底状態の縮退度は 9^g (g は種数) となる。この RK ポイントにおける種々の相関関数を数値的に調べ、相関長は格子間隔程度と非常に短いことを明らかにした。このことは、RK ポイントにおけるエネルギーギャップの存在を示唆する。したがって、この系は三角格子上の量子ダイマー模型の自然な拡張であり、$\mathbf{Z}_3$ トポロジカル秩序を持つことが期待される。

超対称性の破れと南部-Goldstone フェルミオン

大域的な連続対称性の破れに伴い現れるギャップレス励起を南部-Goldstone (NG) ボゾンという。近年、非相対論的な系における自発的対称性の破れと NG ボゾンが大きな注目を集めている。一方、超対称性の破れによっても、ギャップレスな励起モードが現れるということが相対論的な場の理論で知られている。この励起モードのことを NG フェルミオン、またはゴールドスティーノという。非相対論的な格子模型においても、超対称性の破れに伴って NG フェルミオンが出現するかどうかは非自明な問題である。

三ノ宮と桂は立教大の中山と、格子フェルミオン系における超対称性の破れと NG フェルミオンの関係について調べた [5]。具体的には、Nicolai 模型と呼ばれる超対称性を有する 格子模型を拡張し、超対称性が自発的に破れる場合があることを示した。さらに、不等式などの数学的手法によって、超対称性の破れに伴ってギャップレスなフェルミオン的励起が存在することを示した。また、数値対角化および場の理論的手法を用いて、この励起が線形な分散関係を持ち、連続極限で質量のない Thirring フェルミオンで記述されることを明らかにした。三ノ宮らは、さらに $\mathbf{Z}_2$ Nicolai 模型と名付けた U(1) 対称性のない格子模型を導入し、この模型においても超対称性の自発的な破れに伴うギャップレス励起が存在することを示した [7]。また、この励起の分散関係が、波数の三乗に比例するという、エキゾチックなものであることを明らかにした。これらの成果は国際会議での招待講演などで発表された [18, 22, 30]。また、三ノ宮は、これらの結果を修士論文にまとめた [10].

3.5.2 トポロジカル系

Hofstadter の蝶と整数量子ホール効果

2 次元正方格子遍歴電子系に垂直磁場を印加すると、Hofstadter の蝶と呼ばれる、フラクタルな量子相図が得られる。この系は、冷却原子系でのハミルトニアンの実現可能性が近年見出され、再注目を浴びている。吉岡は、東京大の松浦・小形と共に、自己相似性と整数量子ホール係数との間に興味深い関係があることを見出した。単位格子当たりの磁束 $\phi = p/q$ の分母に応じて、ゼロエネルギー近傍に線形または二乗分散が現れる。これらはそれぞれ、質量のない Dirac フェルミオン、非相対論的自由フェルミオンで記述できる。したがって、付加的な磁束 $\Delta\phi$ の下では Landau 量子化され、バンド当たりのホール伝導度 σ_{xy} が量子化される。格子系を扱っているため、各 Landau 準位はミニバンドへと分裂するが、トポロジカルな議論により σ_{xy} の総和保存が保証される。そのため、特定の条件下では陽に計算することなく σ_{xy} を求めることができる。この条件とフラクタルの間には、共通する記述規則が存在することが示された。これらの結果は投稿論文としてまとめられた [2]。

桂は、ジュネーブ大の初田, IPMU の立川と、Hofstadter の蝶と Calabi-Yau 幾何のトポロジカル不変量の間の関係を明らかにした。特に、Hofstadter 問題の状態密度と量子 A 周期と呼ばれる量の虚部の微分が対応することを示した。これらの結果は、論文 [4] にまとめられた。

乱れのあるトポロジカル絶縁体のトポロジカル数

トポロジカル絶縁体とは、自明なバンド絶縁体とはギャップを閉じない限り断熱的に接続することができない絶縁体で、非自明なトポロジカル数により特徴づけられる。このトポロジカル数は、並進対称性がある場合には、波数空間での積分により自然に定義することが可能であるが、乱れのある場合には、その定義は自明ではない。昨年度、桂は、学習院大の高麗と、乱れのある 2 次元の時間反転対称なトポロジカル絶縁体 (class AII) に対するトポロジカル数を、非可換幾何の手法を用いて導入した。今年度は、この手法を用いて、トポロジカル絶縁体・超伝導体

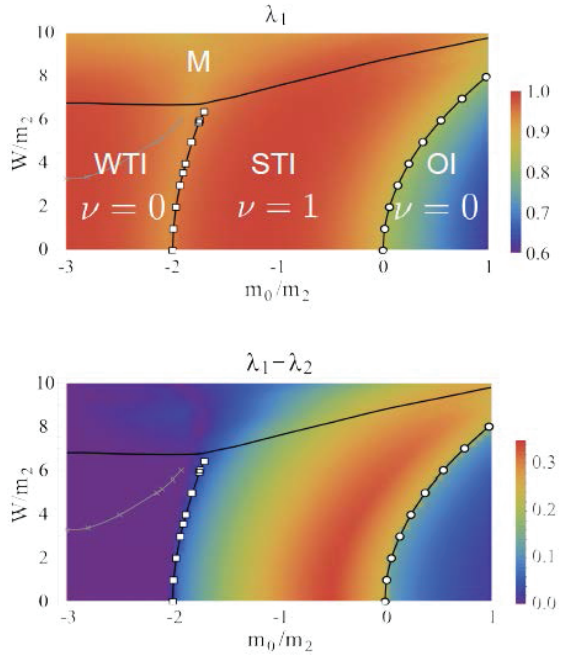

図 3.5.2: Wilson-Dirac 型模型における質量項 m_0, 乱れの強さ W に対する λ_1 と $\lambda_1 - \lambda_2$。M, WTI, STI, OI は、それぞれ diffusive metal, 弱いトポロジカル絶縁体, 強いトポロジカル絶縁体, 通常の絶縁体の各相を表す。また各相における、$\mathbf{Z}_2$ トポロジカル数 ν の値も示した。

の全てのクラスに対して、そのトポロジカル数を定義することを試み、成功した。また、これらのトポロジカル数の摂動に対する安定性を証明した [9]。

得られた結果の応用として、赤城と桂は、乱れのある 3 次元トポロジカル絶縁体におけるトポロジカル数を調べた。具体的には、3 次元 Wilson-Dirac 型模型に乱れを導入した模型における $\mathbf{Z}_2$ トポロジカル数を数値的に求めた。得られた結果を、図 3.5.2 に示す。ここで、λ_1, λ_2 は、2 つの射影演算子の差で定義される演算子の (縮退度を含めて) 大きい方から 1 番目と 2 番目の固有値を表す。強いトポロジカル絶縁体相では、λ_1 は、1 に十分近い値をとり、かつ λ_2 と有意な差が生じる。一方、自明な絶縁相では、1 に近い固有値は現れない。得られた相図は、独立な手法である転送行列を用いて小林らにより得られた相図 [K. Kobayashi, T. Ohtsuki, and K. Imura, Phys. Rev. Lett. **110**, 236803 (2013)] とよく一致しており、我々により導入されたトポロジカル数が、乱れがあるトポロジカル絶縁体においても有効であることが明らかとなった。これらの結果は、研究会などで発表された [17, 23, 29, 31]。

3.5.3 可解模型・統計力学

量子スピン鎖のエンタングルメント・スペクトルと角転送行列

桂は、成均館大 (韓国) の Kim, Han, オハイオ大 (米国) の Trivedi と、SU(N) 対称性のある臨界的なスピン鎖（開放境界条件）の基底状態におけるエンタングルメントの性質について、密度行列繰り込み群 (DMRG) を用いて数値的に調べた [3]。その結果、そのエンタングルメント・スペクトル (ES) は、調べた全ての場合 ($N = 2, 3, 4$) において、コーナー・ハミルトニアンと呼ばれる、角転送行列の生成子のスペクトルと非常に良い一致を示すことを明らかにした。その他にも、臨界的な量子 Ising 模型や、$S = 1$ bilinear-biquadratic スピン鎖の可積分な場合についても、この ES とコーナー・ハミルトニアンのスペクトルの間に同様の対応が見られ、さらに非可積分、あるいは非臨界的な場合にも、可積分な場合の近傍では、同様の対応関係が見られることを数値的に明らかにした。また、SU(N) Heisenberg 模型において、ES の縮退構造は、注目する部分系の長さについて振動する振る舞いを見せるが、これを SU(N) の基本表現のテンソル積の既約分解に基づいて、定性的に説明した。

Fredkin スピン鎖のエンタングルメント

近年、新しいクラスの可解なスピン鎖が注目を集めている。通常、局所相互作用からなる 1 次元量子系の基底状態のエンタングルメント・エントロピー (EE) は、系のサイズ n に関して定数で抑えられる (面積則)、あるいは対数的に振る舞う。一方、この新しいクラスの模型は、ハミルトニアンが局所的かつバルクでは並進対称な相互作用からなるにもかかわらず、基底状態の EE は、$\sqrt{n}$ あるいは n に比例する (体積則) という特異な振る舞いを見せる。宇田川, 桂とヴァージニア大 (米国) の Zhang, Klich, ニューヨーク州立大学ストーニーブルック校 (米国) の Salberger, Korepin は、Fredkin スピン鎖と呼ばれる半奇整数スピン鎖を拡張し、その解析を行った。この模型の厳密な基底状態は、色付き Dyck パスと呼ばれる、組み合わせ論的オブジェクトの重ね合わせにより記述される。スピン $s = 1/2$ の場合、模型のパラメター t が、$t \neq 1$ のとき、基底状態の EE は面積則を満たす。一方、$s > 1/2$ の場合、$t < 1$ のとき、EE は同じく面積則を満たすが、$t > 1$ のときは体積則を満たすことを明らかにした。このことと Hastings による結果を組み合わせると、$s > 1/2$, $t > 1$ の場合には、この系はギャップレスであることが分かる。これらの結果は、投稿論文 [8] としてまとめられた。

3.5.4 その他

桂は、物性研の加藤, 和田, 東京理科大の堺と、近藤問題の代数的 Bethe 仮設を用いた定式化と、その形状因子の計算への応用についての研究を行った [25]。また、桂は、東大理物の Bolens, 宮下, 小形と遍歴電子系におけるスピン・軌道相互作用、磁場、電子相関の相乗効果とその応答関数への影響を、久保公式を用いて調べた [26, 32]。

吉岡は、ETH(スイス) の Sigrist と、カイラル超伝導体におけるノード構造とその熱ホール効果に与える影響について調べ、それらの結果を国際会議などで発表した [13, 15, 27]。また、修士論文としてもまとめている [11]。

＜受賞＞

[1] 桂 法称, 2016 Nevill F. Mott Prize, “seminal theories of the mechanisms of spin-driven ferroelectricity and the thermal Hall effect in quantum magnets”, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES), 2016 年 5 月 11 日.

＜報文＞

(原著論文)

[2] Nobuyuki Yoshioka, Hiroyasu Matsuura, and Masao Ogata: Quantum Hall Effect of Massless Dirac Fermions and Free Fermions in Hofstadter’s Butterfly, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 064712 (2016).

[3] Panjin Kim, Hosho Katsura, Nandini Trivedi, and Jung Hoon Han: Entanglement and corner Hamiltonian spectra of integrable open spin chains, Phys. Rev. B **94**, 195110 (2016).

[4] Yasuyuki Hatsuda, Hosho Katsura, and Yuji Tachikawa: Hofstadter’s Butterfly in Quantum Geometry, New. J. Phys. **18**, 103023 (2016).

[5] Noriaki Sannomiya, Hosho Katsura, and Yu Nakayama: Supersymmetry breaking and Nambu-Goldstone fermions in an extended Nicolai model, Phys. Rev. D **94**, 045014 (2016).

[6] Hyunyong Lee, Yun-Tak Oh, Jung Hoon Han, and Hosho Katsura: Resonating Valence Bond States with Trimer Motifs, Phys. Rev. B, **95**, 060413(R) (2017).

[7] Noriaki Sannomiya, Hosho Katsura, and Yu Nakayama: Supersymmetry breaking and Nambu-Goldstone fermions with cubic dispersion, Phys. Rev. D, **95**, 065001 (2017).

[8] Olof Salberger, Takuma Udagawa, Zhao Zhang, Hosho Katsura, Israel Klich, and Vladimir Korepin: Deformed Fredkin Spin Chain with Extensive Entanglement, to appear in J. Stat. Mech.

[9] Hosho Katsura and Tohru Koma: The Noncommutative Index Theorem and the Periodic Table for Disordered Topological Insulators and Superconductors, arXiv:1611.01928 (2016).

(学位論文)

[10] 三ノ宮典昭: Supersymmetry Breaking and Nambu-Goldstone Fermions in Lattice Models (修士論文).

[11] 吉岡信行: Theoretical Study on Thermal Hall Effect in Chiral Superconductors (修士論文).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[12] Yutaka Akagi (Hiroaki T. Ueda, Nic Shannon): Topological defects in quantum spin-nematics, *SCES 2016*, Hangzhou, China, May 2016.

[13] Nobuyuki Yoshioka: Thermal Hall Effects in Topological Superconductors, *Trends in Theory of Correlated Materials 2016 (TTCM 2016)*, Zurich, Switzerland, May 2016.

[14] Yutaka Akagi: Topological Excitations in Frustrated Magnets, *International Symposium on New Horizons in Condensed Matter Physics*, Tokyo, Japan, June 2016.

[15] Nobuyuki Yoshioka: Nodal Effects on Thermal Hall Conductance in Chiral Superconductors, *Journées de la Matière Condensée (JMC15)*, Bordeaux, France, August 2016.

[16] Yutaka Akagi (Hiroaki T. Ueda, and Nic Shannon): Topological Excitations in Quantum Spin-nematics, *Highly Frustrated Magnetism 2016*, Taipei, Taiwan, Sept. 2016.

[17] Yutaka Akagi: The noncommutative $\mathbf{Z}_2$ index of 3D topological insulators with disorder, *International School on Topological Science and Topological Matters*, Kyoto, Japan, Feb. 2017.

[18] Noriaki Sannomiya: Spontaneous SUSY breaking and Nambu-Goldstone fermions in extended Nicolai models, *International School on Topological Science and Topological Matters*, Kyoto, Japan, Feb. 2017.

[19] Hyunyong Lee (Yun-tak Oh, Jung Hoon Han, and Hosho Katsura): Resonating Valence Bond States with Trimer Motifs, *Theory of Correlated Topological Materials*, Chiba, Japan, Feb. 2017.

[20] Ryohei Kobayashi (Kohei Kawabata, Ning Wu, and Hosho Katsura): Majorana zero mode without edges, *Theory of Correlated Topological Materials*, Chiba, Japan, Mar. 2017.

招待講演

[21] Hosho Katsura: Microscopic mechanisms of spin-driven ferroelectricity and the thermal Hall effect in insulating magnets, SCES 2016, Hangzhou, China, May 2016.

[22] Hosho Katsura: Supersymmetry breaking and Nambu-Goldstone fermions in lattice models, Quantum Matter, Spacetime and Information (YKIS2016), Kyoto, Japan, Jun. 2016.

[23] Hosho Katsura: Disordered topological insulators with time-reversal symmetry: $\mathbf{Z_2}$ index, Topological Materials Science: Intensive-Interactive Meeting, Tokyo, Japan, Nov. 2016.

(国内会議)

一般講演

[24] 桂法称: 強相関トポロジカル相のエッジ状態・低エネルギー励起, 新学術領域「トポ物質」公募班キックオフミーティング, 2016 年 6 月, 京都大学.

[25] 加藤岳生, 和田義人, 桂法称, 堺和光: 近藤模型のベーテ仮設解と形状因子, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月, 金沢大学.

[26] Adrien Bolens, 小形正男, 桂法称, 宮下精二: 量子応答におけるスピン依存複素ホッピングと磁場の相乗効果, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月, 金沢大学.

[27] 吉岡信行, M. Sigrist: トポロジカル超伝導体中におけるノード構造と熱ホール効果, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月, 金沢大学.

[28] 桂法称: A supersymmetric Kitaev honeycomb model, 第 2 回トポ物質科学領域研究会, 2016 年 12 月, 東北大学.

[29] 赤城裕: 乱れのあるトポロジカル絶縁体のトポロジカル不変量 –非可換指数定理に基づくアプローチ–, 第 6 回 強相関電子系理論の最前線, 2016 年 12 月, 紀伊勝浦.

[30] 三ノ宮典昭, 桂法称, 中山優: U(1) 対称性のない拡張 Nicolai 模型における超対称性の破れと南部-Goldstone フェルミオン, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月, 大阪大学.

[31] 赤城裕, 桂法称, 高麗徹: 乱れのある 3 次元トポロジカル絶縁体の非可換 $\mathbf{Z}_2$ 指数, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月, 大阪大学.

[32] Adrien Bolens, 小形正男, 桂法称, 宮下精二: spin-orbit 相互作用と電子のホッピングの相乗作用, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月, 大阪大学.

(セミナー)

[33] 赤城裕: Topological defects in quantum spin-nematics, Keio Topological Science Project Seminar 2016 年 5 月, 慶應大学.

[34] 赤城裕: Topological Excitations in Frustrated Magnets, 統計力学セミナー 2016 年 5 月, 東京大学.

[35] 赤城裕: フラストレート磁性体におけるトポロジカル励起, 阪大川村研セミナー 2016 年 7 月, 大坂大学.

[36] 桂法称: パズドラと Hubbard 模型, 物理学第一教室談話会 2016 年 10 月, 京都大学.

[37] 桂法称: Supersymmetry breaking and Nambu-Goldstone fermions in lattice models, 統計力学セミナー 2016 年 10 月, 東京大学.

[38] 桂法称: 1 次元量子臨界系のサイン二乗変形, 数理物理セミナー 2016 年 11 月, 立教大学.

[39] 赤城裕: 乱れのある 3 次元トポロジカル絶縁体の非可換 $\mathbf{Z}_2$ 指数, 学習院大学数理物理セミナー 2016 年 12 月, 学習院大学.

[40] 桂法称 : Exact Ground States and Topological Order in Interacting Kitaev Chains, Department of Physics Seminar, 2017 年 2 月, 香港中文大学.

4 物性実験

4.1 藤森研究室

藤森研究室では, 角度分解光電子分光（angle-resolved photoemission spectroscpy: ARPES)，軟 X 線磁気円二色性（soft x-ray magnetic circular dichroism: XMCD) 測定等の放射光分光実験により，高温超伝導，スピントロニクス材料，薄膜・界面の電子状態の研究を行っている。遷移金属酸化物，遷移金属化合物，強磁性半導体，強磁性合金が示す超伝導，金属－絶縁体転移，磁気異方性，界面における新奇物性等の発現機構解明をめざしている。紫外光から X 線に至る放射光源（KEK フォトンファクトリー，SPring-8，スタンフォード放射光，広島大放射光，台湾放射光)，レーザー光源（物性研)，実験室光源（本郷）を用いて実験を行っている。

4.1.1 高温超伝導

銅酸化物における高温超伝導は，その発見以来 20 年余りにわたって多くの研究が積み重ねられてきたが，今だに機構解明に至らない世紀を超えた難問である。また，その後発見された鉄系高温超伝導体は，銅酸化物と多くの共通点を持つ一方で，多くの相違点も有している。我々は，これらの超伝導物質における超伝導発現機構解明と，擬ギャップ等の異常な物性の発現機構の解明を目指して，角度分解光電子分光（ARPES）を用いて電子状態を調べている。

スピン-軌道相互作用による鉄系超伝導体の超伝導ギャップの異常

一部の鉄系高温超伝導体では，超伝導ギャップがフェルミ面の一部で閉じたノード構造を示す。とくに，3 次元性が強い 122 型鉄系高温超伝導体では，3 枚のホールフェルミ面のうち最も外側のフェルミ面に d_{z^2} 軌道成分が混成し”水平ノード”が開きやすいことが理論的にも実験的にも報告されている。我々は，122 型超伝導体 $Ba(Fe_{1-x}Ru_x)_2As_2$ において，2 枚のホールフェルミ面に”水平ノード”が開いていることを ARPES 測定から見出した。これまで理論的に d_{z^2} 軌道成分は 1 枚のフェルミ面のみに混成できるとされていたが，我々はスピン-軌道相互作用を取り入れた計算を行い，2 枚のホールフェルミ面に d_{z^2} 軌道成分が混成し，双方でギャップの大きさが減少することを示した。この結果は，鉄系超伝導体の超伝導にスピン-軌道相互作用が重要な役割を果たすことを示している。[11]。

鉄系超伝導体母体反強磁性体の時間分解 ARPES

近年、超伝導体におけるクーパー対や常伝導キャリアーの励起-緩和ダイナミックスを、パルスレーザーによる高強度励起と時間分解 ARPES を用いて調べることができるようになってきた。鉄系高温超伝導体の母体反強磁性体を Ar ガス高調波パルスレーザー（∼1.5 eV）で励起し、それが緩和する様子を時間分解 ARPES を測定した。励起直後（∼0.1 ps）は反強磁性状態（スピン密度波（SDW）状態）状態が融解し、その後時定数約 ∼0.6 ps で SDW 状態に緩和することが観測された [13]。

4.1.2 スピントロニクス，界面

金属-絶縁体転移，巨大磁気抵抗，スピン・電荷・軌道秩序など多彩な物性を示す遷移金属酸化物，半導体に磁性原子をドープした強磁性半導体，重金属-遷移金属接合界面は，従来のエレクトロニクスにスピンの自由度を導入したスピントロニクスの材料として期待されている。これらの物質・試料における磁気異方性，基板圧力効果を光電子分光および X 線磁気円二色性（XMCD）測定により調べている。とくに，元素選択的・局所的な磁性プローブである XMCD 測定を，磁場方向，偏光方向を自由に変えられるベクトル型超伝導マグネット装置を開発して行っている。

IV 族強磁性半導体の電子構造

従来の強磁性半導体は II-VI 族，III-V 族などの化合物半導体に磁性イオンをドープしたものであったが，代表的な IV 族半導体 Ge に Fe をドープすることによって室温付近の高温強磁性が発現することが最近報告された。我々は、Fe ドープ Ge の電子構造を ARPES と超格子を仮定した第一原理計算により調べた。磁性イオンのドーピングによる半導体の電子構造の変化については、代表的な Mn ドープ GaAs に関して、リジッドバンドか不純物バンドかの論争が長年にわたって続いてきたが、Fe ドープ Ge でも価電子帯頂上がフェルミ準位より数 100 meV 上方に観測され、計算でも不純物バンドが現れるなど、不純物バンド説を支持する結果が得られた [9]。

＜受賞＞

[1] 坂本祥哉 : 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids (PASPS9) (Kobe, August 8-11, 2016), 若手研究者最優秀ポスター賞.

[2] 堀尾眞史 : UVSOR シンポジウム 2016, 優秀ポスター賞

[3] 坂本祥哉：第 77 回応用物理学会秋季学術講演会，英語講演奨励賞

[4] 野中洋亮：第 17 回日韓台強相関電子系ワークショップ，優秀ポスター賞

[5] 堀尾眞史：2016 年度量子ビームサイエンスフェスタ，優秀ポスター賞

[6] 堀尾眞史：理学系研究奨励賞

＜紹介記事＞

[7] Observation of high temperature superconductivity without effect of magnetism, Asia Pacific Physics Newsletter (APPN), Vol. 5, No. 2, pp. 66-67 (2016).

＜報文＞

(原著論文)

[8] B. A. Frandsen, L. Liu, S. C. Cheung, Z. Guguchia, R. Khasanov, E. Morenzoni, T. J. S. Munsie, A. M. Hallas, M. N. Wilson, Y. Cai, G. M. Luke, B. Chen, W. Li, C. Jin, C. Ding, S. Guo, F. Ning, S. J. L. Billinge, S. Sakamoto, A. Fujimori, T. Murakami, H. Kageyama, J. A. Alonso, G. Kotliar, M. Imada, and Y. J. Uemura, Volume-wise destruction of the antiferromagnetic Mott insulating state through quantum tuning, Nat. Commun. **7**, 12519 (2016); arXiv:1603.06971.

[9] S. Sakamoto, Y. K. Wakabayashi, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, H. Suzuki, Y. Ban, H. Yamagami, M. Tanaka, S. Ohya, and A. Fujimori: Origin of robust nanoscale ferromagnetism in Fe-doped Ge revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy and first-principles calculation, Phys. Rev. B **95**, 075203–1-5 (2017); arXiv:1605.05275.

[10] Y. K. Wakabayashi, R. Akiyama, Y. Takeda, M. Horio, G. Shibata, S. Sakamoto, Y. Ban, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, M. Tanaka, and S. Ohya, Origin of the large positive magnetoresistance of $Ge_{1-x}Mn_x$ granular thin films, Phys. Rev. B **95**, 014417–1-6 (2017); arXiv:1606.04263.

[11] L. Liu, K. Okazaki, T. Yoshida, H. Suzuki, M. Horio, L. C. C. Ambolode II1, J. Xu, S. Ideta, M. Hashimoto, D. H. Lu, Z.-X. Shen, Y. Ota, S. Shin, M. Nakajima, S. Ishida, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Mikami, T. Kakeshita, Y. Yamakawa, H. Kontani, S. Uchida, and A. Fujimori: Unusual nodal behaviors of the superconducting gap in the iron-based superconductor $Ba(Fe_{0.65}Ru_{0.35})_2As_2$: Effects of spin-orbit coupling, Phys. Rev. B **95**, 104504–1-5 (2017); arXiv:1611.04266.

[12] Y.-J. Zhang, L. Wu, J. Ma, Q.-H. Zhang, A. Fujimori, J. Ma, Y.-H. Lin, C. -W. Nan, and N.-X. Sun: Interfacial orbital preferential occupation induced controllable uniaxial magnetic anisotropy observed in Ni/NiO(110) heterostructures, npj Quantum Mater. **2**, 17–1-7 (2017).

[13] H. Suzuki, K. Okazaki, T. Yamamoto, T. Someya, M. Okada, K. Koshiishi, M. Fujisawa, T. Kanai, N. Ishii, M. Nakajima, H. Eisaki, K. Ono, H. Kumigashira, J. Itatani, A. Fujimori, and S. Shin: Ultrafast melting of spin-density-wave order in $BaFe_2As_2$ observed by time- and angle-resolved photoemission spectroscopy with extreme-ultraviolet higher harmonic generation, Phys. Rev. B **95**, 165112–1-6 (2017); arXiv:1608.06124

[14] K. Yano, T. Okane, Y. Takeda, H. Yamagami, A. Fujimori, K. Nishimura, and K. Sato: Element specific electronic states and spin-flip-like behavior of Ce in $(Ce_{0.2}Gd_{0.8})Ni$ composed of heavy Fermion CeNi and ferri-magnet GdNi through XMCD method, Physica B, in press.

(綜説，解説，その他)

[15] S.-i. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagami, E. Yamamoto, Y. Haga, Y. Onuki: Electronic structures of uranium compounds studied by soft x-ray photoelectron spectroscopy, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 062001–1-33 (2016).

[16] T. Yoshida, M. Kobayashi, K. Yoshimatsu, H. Kumigashira, and A. Fujimori: Correlated electronic states of $SrVO_3$ revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **208**, 11-16 (2016); arXiv:1601.01762

[17] S.-i. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagami, E. Yamamoto, Y. Haga, Y. Onuki: Recent progress of soft X-ray photoelectron spectroscopy studies of uranium compounds, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **208**, 105-110 (2016).

[18] 坂本祥哉，若林勇希，竹田幸治，藤森伸一，鈴木博人，伴芳祐，山上浩志，田中雅明，大矢忍，藤森淳：軟 X 線角度分解光電子分光による強磁性半導体 $Ge_{1-x}Fe_x$ の電子構造の解明（放射光科学合同シンポジウム学生発表賞），放射光 **29**, No. 2, 104-105 (2016).

[19] 藤森淳：銅酸化物高温超伝導体に関する最近の実験的進展，固体物理 **51**, No.11 (特集号：超伝導の新しい潮流), 627-638 (2016).

[20] A. Fujimori: Optically driven superconductivity, Journal Club for Condensed Matter Physics, http://www.condmatjournalclub.org/?p=3000

(学位論文)

[21] 堀尾眞史：Photoemission studies of new electron-doped cuprate high-temperature superconductors（博士論文）

[22] 池田啓祐：X-ray magnetic circular dichroism study of $L1_0$-ordered FePt thin films（修士論文）

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[23] A. Fujimori: Magnetic anisotropy of ferromagnetic oxide thin films studied by XMCD, *4th International Workshop on Complex Oxides (Santorini 4)* (Porquerolles, France, June 13-17, 2016).

[24] A. Fujimori, M. Horio, Y. Mori, A. Takahashi, T. Konno, T. Ohgi, H. Sato, T. Yoshida, H. Suzuki, G. Shibata, K. Okazaki, J. Xu, K. Koshiishi, D. Ootsuki, T. Mizokawa, K. Ono, M. Kobayashi, M. Minohara, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Anzai, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, T. Adachi, and Y. Koike: Suppressed antiferromagnetism and enlarged superconducting phase in protect-annealed electron-doped cuprates, *International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2016)* (Ludwigsburg, June 19-24, 2016).

[25] A. Fujimori: Competing orders/fluctuations in high-temperature superconductors revealed by ARPES, *Quantum in Complex Matter: Superconductivity, Magnetism and Ferroelectricity (SUPERSTRIPES 2016)* (Ischia, Italy, June /23-28, 2016).

[26] A. Fujimori: Electronic structure of dilute ferromagnetic semiconductors revealed by ARPES, *14th RIEC Workshop on Spintronics* (Tohoku University, November 16-20, 2016).

[27] A. Fujimori: Origins of magnetic anisotropy studied by angle-dependent XMCD, *Max Planck-UBC-U Tokyo Meeting on Quantum Materials* (University of Tokyo, December 5-6, 2016).

[28] A. Fujimori: Electronic structure of dilute ferromagnetic semiconductors revealed by soft x-ray ARPES and supercell calculation, *37th REIMEI Workshop on Frontiers of Correlated Quantum Matters and Spintronics* (Tokai, January 14-16, 2017).

[29] A. Fujimori: Electronic structure of new electron-doped and non-doped cuprate superconductors, *CEMS-QPEC Symposium on Emergent Quantum Materials* (University of Tokyo, January 16-17, 2017).

[30] A. Fujimori: Electronic structure of the new electron-doped cuprate superconductors in bulk and thin film forms, *17th Korea-Taiwan-Japan Workshop on Strongly Correlated Electron System* (Yongpyong, Korea, February 19-24, 2017).

一般講演

[31] S. Ideta, T. Yoshida, S. Ishida, K. Takashima, S. Uchida, A. Fujimori, and K. Tanaka: Observation of triple-layer splitting in high-Tc cuprate $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$ observed by ARPES, *International Conferences on Low-Energy Electrodynamics in Solids (LEES 2016)* (Biwako, May 29-June 3).

[32] K. Koshiishi, L. Liu, K. Okazaki, H. Suzuki, J. Xu, M. Horio, Y. Nonaka, H. Kumigashira, K. Ono, M. Nakajima, S. Ishida, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, S. Uchida, and A. Fujimori: Angle-resolved photoemission study of the electronic structure of $BaFe_2As_2$ in the electronic "nematic" phase, *ibid.*

[33] Y. Nonaka, G. Shibata, R. Koborinai, K. Ishigami, S. Sakamoto, K. Ikeda, Z. Chi, T. Koide, A. Tanaka, T. Katsufuji, and A. Fujimori: X-ray magnetic circular dichroism and cluster-model analysis of the spinel-type vanadate CoV_2O_4, *International Symposium on New Horizons in Condensed Mater Physics* (University of Tokyo, June 18-19, 2016).

[34] K. Koshiishi, L. Liu, K. Okazaki, H. Suzuki, J. Xu, M. Horio, Y. Nonaka, H. Kumigashira, K. Ono, M. Nakajima, S. Ishida, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, S. Uchida and A. Fujimori: Angle-resolved photoemission study of the electronic structure in the electronic "nematic" phase of $BaFe_2As_2$, *ibid.*

[35] M. Horio, Y. Krockenberger, K. Yamamoto, Y. Yokoyama, K. Takubo, Y. Hirata, S. Shin, A. Yasui, E. Ikenaga, H. Yamamoto, H. Wadati, and A. Fujimori: Electronic structure of superconducting parent compound of T'-cuprate superconductors Nd_2CuO_4 studied by hard x-ray photoemission and soft x-ray absorption spectroscopies, *ibid.*

[36] H. Suzuki, K. Okazaki, T. Yamamoto, T. Someya, M. Okada, K. Koshiishi, M. Fujisawa, T. Kanai, N. Ishii, M. Nakajima, H. Eisaki, K. Ono, H. Kumigashira, J. Itatani, A. Fujimori, and S. Shin: Coherent phonons and transient electronic states in $BaFe_2As_2$ observed by time- and angle-resolved photoemission spectroscopy using extreme-ultraviolet higher harmonic generation *International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2016)* (Ludwigsburg, June 19-24, 2016).

[37] T. Yoshida, D. Shimonaka, A. Fujimori, H. Kumigashira, K. Ono, S. Komiya, and Y. Ando: Momentum dependence of the self-energy in high-T_c cuprates revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy, *ibid.*

[38] Y. Krockenberger, M. Horio, Y. Yokoyama, K. Yamamoto, K. Takubo, Y. Hirata, S. Shin, A. Yasui, E. Ikenaga, H. Wadati, A. Fujimori, and H. Yamamoto: HXPES of superconducting and non-superconducting $Nd_2CuO_{4+\delta}$, *Gordon Research Conference "New Kinds of Electronic Order in Quantum Materials"* (Mount Holyoke College, USA, June 26-July 1, 2016).

[39] K. Horiba, M. Kitamura, K. Yoshimatsu, M. Minohara, E. Sakai, M. Kobayashi, A. Fujimori, and H. Kumigashira: Isotropic kink in $La_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$ thin films studied by in situ angle-resolved photoemission spectroscopy, *39th International conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics*

(VUVX2016) (Paul Scherrer Institut, July 3-8, 2016).

[40] M. Kitamura, K. Horiba, M. Kobayashi, E. Sakai, M. Minohara, T. Mitsuhashi, A. Fujimori, T. Nagai, H. Fujioka, and H. Kumigashira: Charge transfer phenomena across the heterointerface between perovskite oxides $LaNiO_3$ and $LaMnO_3$, *ibid.*

[41] S. Sakamoto, Y. K. Wakabayashi, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, H. Suzuki, Y. Ban, H. Yamagami, M. Tanaka, S. Ohya, and A. Fujimori: Electronic structure of the ferromagnetic semiconductor $Ge_{1-x}Fe_x$ revealed by soft x-ray angle-resolved photoemission spectroscopy, *9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids* (Kobe, August 8-11, 2016).

[42] Y. K. Wakabayashi, R. Akiyama, Y. Takeda, M. Horio, G. Shibata, S. Sakamoto, Y. Ban, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, M. Tanaka, and S. Ohya: Origin of the large positive magnetoresistance in $Ge_{1-x}Mn_x$ granular films, *ibid.*

[43] G. Shibata, M. Kitamura, M. Minohara, K. Yoshimatsu, T. Kadono, K. Ishigami, T. Harano, Y. Takahashi, S. Sakamoto, Y. Nonaka, K. Ikeda, Z. Chi, J.-i. Fujihira, A. Uchida, K. Watanabe, H. Fujihira, S. Fujihira, M. Furuse, S. Fuchino, M. Okano, H. Kumigashira, T. Koide, and A. Fujimori: Anisotropy of spin-density distribution in $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ thin films: Angle-dependent XMCD study, *DMREF-FCMP Symposium on Mott Transitions and Computational Approaches* (University of Tokyo, January 17, 2017)

[44] M. Horio, K. Koshiishi, S. Nakata, K. Hagiwara, M. Kobayashi, K. Horiba, H. Kumigashira, Y. Krockenberger, H. Irie, H. Yamamoto, and A. Fujimori: ARPES on the superconducting parent compound of the electron-doped cuprate superconductors Pr_2CuO_4, *ibid.*

[45] Y. Nonaka, C. F. Chang, G. Shibata, X. Liu, S. Sakamoto, K. Ikeda, Z. Chi, A. Tanaka, M. Sakamaki, K. Amemiya, L. H. Tjeng, and A. Fujimori: Angle-dependent XMCD study of magnetite Fe_3O_4, *ibid.*

[46] K. Koshiishi, L. Liu, K. Okazaki, H. Suzuki, J. Xu, M. Horio, Y. Nonaka, H. Kumigashira, K. Ono, M. Nakajima, S. Ishida, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, S. Uchida, and A. Fujimori: The electronic structure of $BaFe_2As_2$ in the electronic "nematic" phase revealed by angle-resolved photoemission, *ibid.*

[47] K. Ikeda, G. Shibata, T. Seki, K. Ishigami, S. Sakamoto, Y. Nonaka, M. Sakamaki, K. Amemiya, N. Kawamura, M. Suzuki, K. Takanashi, and A. Fujimori: Magnetic moment anisotropies of $L1_0$-ordered FePt films studied by x-ray magnetic circular dichroism, *ibid.*

[48] K. Hagiwara, M. Horio, K. Koshiishi, S. Nakata, M. Ishikado, S. Ishida, H. Eisaki, S. Shamoto, S. Ideta, K. Tanaka, K. Ono, H. Kumigashira, T. Yoshida, A. Fujimori: Energy gap of the superconducting $PrFeAsO_{1-y}$ studied by ARPES, *ibid.*

[49] S. Nakata, M. Horio, K. Koshiishi, K. Hagiwara, H. Kumigashira, K. Ono, D. Song, Y. Yoshida, H. Eisaki, and A. Fujimori: Serach for a nematic state in the cuprate superconductor Bi2212 by angle-resolved photoemission spectroscopy, *ibid.*

[50] Z. Chi, G. Shibata, R. Kawabe, Y. Takeda, S. Sakamoto, Y. Nonaka, K. Ikeda, Y. K. Wakabayashi, R. Nakane, H. Hojo, M. Azuma, and A. Fujimori: Origin of enhanced magnetization in cobalt-substituted bismuth ferrite studied by x-ray magnetic circular dichroism, *ibid.*

[51] M. Horio, K. Koshiishi, S. Nakata, K. Hagiwara, M. Kobayashi, K. Horiba, H. Kumigashira, Y. Krockenberger, H. Irie, H. Yamamoto, and A. Fujimori: ARPES on the superconducting parent compound of the electron-doped cuprate superconductors Pr_2CuO_4 , *CEMS-QPEC Symposium on Emergent Quantum Materials* (University of Tokyo, January 16-17, 2017).

[52] Y. Nonaka, C. F. Chang, G. Shibata, X. Liu, S. Sakamoto, K. Ikeda, Z. Chi, A. Tanaka, M. Sakamaki, K. Amemiya, L. H. Tjeng, and A. Fujimori: Angle-dependent XMCD study of magnetite Fe_3O_4, *ibid.*

[53] K. Koshiishi, L. Liu, K. Okazaki, H. Suzuki, J. Xu, M. Horio, Y. Nonaka, H. Kumigashira, K. Ono, M. Nakajima, S. Ishida, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, S. Uchida, and A. Fujimori: The electronic structure of $BaFe_2As_2$ in the electronic "nematic" phase revealed by angle-resolved photoemission, *ibid.*

[54] K. Hagiwara, M. Horio, K. Koshiishi, S. Nakata, M. Ishikado, S. Ishida, H. Eisaki, S. Shamoto, S. Ideta, K. Tanaka, K. Ono, H. Kumigashira, T. Yoshida, A. Fujimori Energy gap of the superconducting $PrFeAsO_{1-y}$ studied by ARPES, *ibid.*

[55] Z. Chi, G. Shibata, R. Kawabe, Y. Takeda, S. Sakamoto, Y. Nonaka, K. Ikeda, Y. K. Wakabayashi, R. Nakane, H. Hojo, M. Azuma, and A. Fujimori: Origin of enhanced magnetization in cobalt-substituted bismuth ferrite studied by x-ray magnetic circular dichroism, *ibid.*

[56] Y. Nonaka, C. F. Chang, G. Shibata, X. Liu, S. Sakamoto, K. Ikeda, Z. Chi, A. Tanaka, M. Sakamaki, K. Amemiya, L. H. Tjeng, and A. Fujimori: Search for complex orbital order in magnetite Fe_3O_4 by magnetic-field-direction dependent XAS and XMCD measurements, *17th Korea-Taiwan-Japan Workshop on Strongly Correlated Electron System* (Yongpyong, Korea, February 19-24, 2017).

(国内会議)

招待講演

[57] 堀尾眞史：光電子分光から見た電子ドープ型銅酸化物高温超伝導体におけるアニール効果，高温超伝導フォーラム第 4 回会合（金沢，2016 年 9 月 12 日）

[58] 芝田悟朗：共鳴軟 X 線散乱による Mn 酸化物薄膜の界面電子状態の研究，日本物理学会秋季大会 シンポジウム「遷移金属酸化物表面・界面の新しい電子状態とその分光手法による解明」（金沢，2016 年 9 月 14 日）

[59] 藤森淳：鉄系超伝導体の超伝導ギャップ異方性，基研研究会「超伝導研究の最先端：多自由度，非平衡，電子相関，トポロジー」（京大基研 2016 年 10 月 10-12 日）

一般講演

[60] 堀尾眞史, 奥石佳佑, 鈴木博人, 徐健, 野中洋亮, 扇太郎, 今野巧也, 高橋晶, 佐藤秀孝, 橋本信, D. Lu, Z.-X. Shen, 足立匡, 小池洋二, 藤森淳：T' 型銅酸化物高温超伝導体 $Pr_{1.3-x}La_{0.7}Ce_xCuO_4$ アンダードープ試料の角度分解光電子分光，日本物理学会秋季大会（金沢，2016 年 9 月 13-16 日）

[61] 野中洋亮, 芝田悟朗, 小堀内類, 鈴木博人, 徐健, 堀尾眞史, 奥石佳佑, 小林正起, 堀場弘司, 組頭広志, 田中新, T. Saha-Dasgupta, 勝藤拓郎, 藤森淳：スピネル型バナジウム酸化物 CoV_2O_4 の共鳴光電子分光，同上．

[62] 萩原健太, 堀尾眞史, 奥石佳佑, 中田勝, 石角元志, 石田茂之, 永崎洋, 社本真一, 藤森淳：角度分解光電子分光による $PrFeAsO_{1-y}$ の超伝導ギャップ測定，同上．

[63] 奥石佳佑, 小林達也, 堀尾眞史, 野中洋亮, 橋本信, D. Lu, Z.-X. Shen, 宮坂茂樹, 田島節子, 藤森淳：鉄系超伝導体類似反強磁性体 $Ba(Fe_{1-x}Cr_x)_2As_2$ の角度分解光電子分光，同上．

[64] 岡崎浩三, 劉亮, 吉田鉄平, 鈴木博人, 堀尾眞史, L. C. C. Ambolode IIA, 徐健 A, 出田真一郎, 橋本信, D. Lu, Z.-X. Shen, 大田由一，　辛埴, 中島正道, 石田茂之, 木方邦宏, 李哲虎，　伊豫彰, 永崎洋, 三上拓也, 掛下照久, 内田慎一, 藤森淳, 山川洋一, 紺谷浩：$Ba(Fe_{0.65}Ru_{0.35})_2As_2$ における超伝導ギャップの k_z 依存性とスピン軌道相互作用，同上．

[65] 岡崎浩三, 鈴木博人, 山本貴士, 染谷隆史, 岡田大, 小川優, 中島正道, 永崎洋, 藤澤正美, 金井輝人, 石井順久, 板谷治郎, 藤森淳, 辛埴：高次高調波時間分解光電子分光による鉄系超伝導体母物質 $BaFe_2As_2$ におけるコヒーレントフォノン励起の観測，同上．

[66] 北村未歩, 堀場弘司, 小林正起, 坂井延寿, 簑原誠人, 湯川龍, 三橋太一, 雨宮健太, 藤森淳, 藤岡洋, 組頭広志, 野中洋亮, 芝田悟朗：ペロブスカイト酸化物 $LaNiO_3/LaMnO_3$ ヘテロ界面における界面強磁性の発現，同上．

[67] 山本航平, 田久保耕, 堀尾眞史, 横山優一，　山本真吾, 久保田雄也, 松田巌, 平田靖透, 関剛斎, 池永英司, 高梨弘毅, 藤森淳, 尾崎泰助, 和達大樹：垂直磁化膜 Fe(Pt,Pd) の硬 X 線光電子分光と軟 X 線磁気円二色性，同上．

[68] 藤森伸一, 小畠雅明, 竹田幸治, 岡根哲夫, 斎藤祐児, 藤森淳, 山上浩志, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 大貫惇睦：ARPES による $5f$ 電子状態の圧力効果，同上．

[69] 出田真一郎, 吉田鉄平, 藤森淳, 石田茂之, 高島憲一, 内田慎一, 田中清尚：角度分解光電子分光による三層系銅酸化物高温超伝導体 Bi2223 の三重層分裂の観測，同上．

[70] 山本航平, 平田靖透, 堀尾眞史, 横山優一, 田久保耕, 簑原誠人, 組頭広志, 山崎裕一, 中尾裕則, 村上洋一, 藤森淳, 和達大樹：軟・硬 X 線で見た $La_{1/3}Sr_{2/3}FeO_3$ 薄膜の電荷・磁気秩序の膜厚依存性，同上．

[71] S. Sakamoto, N. T. Tu, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, P. N. Hai, L. D. Anh, Y. K. Wakabayashi, G. Shibata, M. Horio, K. Ikeda, Y. Saitoh, H. Yamagami, M. Tanaka, and A. Fujimori: Electronic structure of the p-type ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb，第 77 回応用物理学会秋季学術講演会（新潟，2016 年 9 月 13-16 日）

[72] 池田啓祐，芝田悟朗，関剛斎，石上啓介，堀尾眞史，坂本祥哉，野中洋亮，河村直己，鈴木基寛，高梨弘毅，藤森淳：Pt $L_{2,3}$ 端 XMCD により観測した $L1_0$ 秩序型 FePt 薄膜の磁気モーメントの異方性，同上．

[73] Y. K. Wakabayashi, R. Akiyama, Y. Takeda, M. Horio, G. Shibata, S. Sakamoto, Y. Ban, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, M. Tanaka, and S. Ohya: Origin of the large magnetoresistance in $Ge_{1-x}Mn_x$ granular thin films, 同上．

[74] 出田真一郎，吉田鉄平，藤森淳，石田茂之，高島憲一，内田慎一，田中清尚：角度分解光電子分光による三層系銅酸化物高温超伝導体 Bi2223 の三重層分裂の観測，第 30 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム（神戸，2017 年 1 月 7- 9 日）

[75] 北村未歩，堀場弘司，小林正起，坂井延寿，簑原誠人，湯川龍，三橋太一，雨宮健太，野中洋亮，芝田悟朗，藤森淳，藤岡洋，組頭広志：ペロブスカイト酸化物 $LaNiO_3/LaMnO_3$ ヘテロ構造における界面強磁性の起源解明，同上．

[76] 堀尾眞史, 岡崎浩三, 竹田幸治, 鈴木博人, 徐健, 奥石佳佑, 石上啓介, 芝田悟朗, 高橋文雄, 若林勇希, 坂本祥哉, 野中洋亮, 池田啓祐, 小林正起, 堀場弘司, 組頭広志, 小野寛太, 小出常晴, 斎藤祐児, 山上浩志, 藤森伸一, 並木宏允, 片桐隆雄, 笹川崇男, 藤森淳：ARPES と XMCD で調べる Sr2VFeAsO3-d における強磁性と超伝導の共存，第 8 回 低温センター研究交流会（東大，2017 年 2 月 23 日）

[77] 芝田悟朗，北村未歩，簑原誠人，吉松公平，門野利治，石上啓介，原野貴幸，高橋文雄，坂本祥哉，野中洋亮，池田啓祐，池震棟，古瀬充穂，淵野修一郎，岡野眞，藤平潤一，内田公，渡邊和訓，藤平秀幸，藤平誠一，組頭広志，小出常晴，藤森淳：角度依存 X 線磁気円二色性による $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ 薄膜の磁気異方性と電子分布異方性の観測，同上．

[78] 奥石佳佑，大塚匠，堀尾眞史，中田勝，萩原健太，C. Lin，Y. Wan，組頭広志，小野寛太，渡辺孝夫，藤森淳：Te アニールした低 Se ドープ 11 型鉄系超伝導体 $FeTe_{1-x}Se_x$ の角度分解光電子分光，同上．

[79] 若林勇希, 秋山了太, 竹田幸治, 堀尾眞史, 芝田悟朗, 坂本祥哉, 伴芳祐, 斎藤祐児, 山上浩志, 藤森淳, 田中雅明, 大矢忍 : Origin of the large magnetoresistance in $Ge_{1-x}Mn_x$ granular thin films，同上.

[80] 堀尾眞史, Y. Krockenberger, 山本航平, 横山優一, 田久保耕, 平田靖透, 坂本祥哉, 奥石佳佑, 保井晃, 池永英司, 辛埴, 山本秀樹, 和達大樹, 藤森淳 : 硬 X 線光電子分光と軟 X 線吸収分光で調べる銅酸化物母物質超伝導体 Nd_2CuO_4 薄膜の電子構造，ISSP-Workshop「SPring-8 BL07LSU が照らしだす物質機能の起源」（物性研，2017 年 3 月 8 日）

[81] 山本航平, 平田靖透, 堀尾眞史, 横山優一, 田久保耕, 簑原誠人, 組頭広志, 山崎裕一, 中尾裕則, 村上洋一, 藤森淳, 和達大樹:硬・軟X線回折でみる La1/3Sr2/3FeO3 薄膜の電荷・磁気秩序の膜厚依存性，同上.

[82] 堀尾眞史, 奥石佳佑, 中田勝, 萩原健太, 小林正起, 堀場弘司, 組頭広志, Y. Krockenberger, 入江宏, 山本秀樹, 藤森淳 : T' 型銅酸化物母物質超伝導体 Pr_2CuO_4 薄膜の角度分解光電子分光，2016 年度 量子ビームサイエンスフェスタ（つくば，2017 年 3 月 14-15 日）

[83] 奥石佳佑，小林達也，堀尾眞史，鈴木博人，徐健，芝田悟朗，石上啓介，野中洋亮，立石廉晟，小林正起，堀場弘司，三橋太一，組頭広志，橋本信，D. Lu，Z.-X. Shen，宮坂茂樹，田島節子，藤森淳 : 光電子分光を用いた鉄系超伝導体類似反強磁性体 $Ba(Fe_{1-x}Cr_x)_2As_2$ の電子状態の観測，同上.

[84] 野中洋亮, C. F. Chang, 芝田悟朗, X. H. Liu, 坂本祥哉, 池田啓祐, 池震棟, 田中新, 酒巻真粧子, 雨宮健太, L. H. Tjeng, 藤森淳 : 角度依存 XMCD の精密測定で探る Fe_3O_4 の複素軌道秩序，同上.

[85] 萩原健太，堀尾眞史，奥石佳佑，中田勝，石角元志，石田茂之，永崎洋，社本真一，出田真一郎，田中清尚，小野寛太，組頭広志，吉田鉄平，藤森淳 : 角度分解光電子分光で観測した $PrFeAsO_{1-y}$ の超伝導ギャップ，同上.

[86] 中田勝, 堀尾眞史, 奥石佳佑, 萩原健太, 組頭広志, 小野寛太, D. Song, 吉田良行, 永崎洋, 藤森淳 : 電子ネマティック状態における銅酸化物高温超伝導体 Bi2212 の角度分解型光電子分光，同上.

[87] 小林正起, 吉松公平, 三橋太一, 北村未歩, 坂井延寿, 湯川龍, 簑原誠人, 藤森淳, 堀場弘司, 組頭広志 : 強相関金属酸化物 $SrVO_3$ 量子井戸における金属-絶縁体転移近傍のフェルミ液体破綻，同上.

[88] 池田啓祐，芝田悟朗，関剛斎，石上啓介，堀尾眞史，坂本祥哉，野中洋亮，酒巻真粧子，雨宮健太，河村直己，鈴木基寛，高梨弘毅，藤森淳 : X 線磁気円二色性による $L1_0$ 秩序型 FePt 薄膜の磁気異方性の研究，第 64 回応用物理学会秋季学術講演会（横浜，2017 年 3 月 14-17 日）

[89] 芝田悟朗, 北村未歩, 簑原誠人, 坂本祥哉, 野中洋亮, 池田啓祐, 池震棟, 組頭広志, 小出常晴, 藤森淳 : $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ 薄膜のスピン分布異方性の基板応力効果 : 角度依存 XMCD による研究，日本物理学会第 72 回年次大会（阪大豊中，2017 年 3 月 17-20 日）

[90] 堀尾眞史, 奥石佳佑, 中田勝, 萩原健太, 小林正起, 堀場弘司, 組頭広志, Y. Krockenberger, 入江宏, 山本秀樹, 藤森淳 : T' 型銅酸化物母物質超伝導体 Pr_2CuO_4 薄膜の角度分解光電子分光，同上.

[91] 野中洋亮, C. F. Chang, 芝田悟朗, X. Liu, 坂本祥哉, 池田啓祐, 池震棟, 田中新, 酒巻真粧子, 雨宮健太, L. H. Tjeng, 藤森淳 : ステップ基板上に作製したマグネタイト Fe_3O_4 の磁場方向依存 XAS，XMCD の温度変化，同上.

[92] 中田勝, 堀尾眞史, 奥石佳佑, 萩原健太, 組頭広志, 小野寛太, D. Song, 吉田良行, 永崎洋, 藤森淳 : 角度分解型光電子分光による銅酸化物高温超伝導体 Bi2212 の電子ネマティック状態の探索，同上.

[93] Z. Chi, G. Shibata, S. Sakamoto, Y. Nonaka, K. Ikeda, M. Sakamaki, K. Amemiya, M. Hayashi, A. Fujimori : Orbital moment anisotropy in Co-heavy metal heterostructures studied by x-ray magnetic circular dichroism，同上.

[94] 下中大也, 山脇一真, 川本雅人, 小寺健二朗, 柴田大輔, 大槻太毅, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 出田真一郎, 田中清尚, 笹川崇男, 藤森淳, 吉田鉄平 最適ドープ $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ の自己エネルギー解析，同上.

[95] 大槻太毅, 山本紳太郎, 下中大也, 柴田大輔, 小寺健二朗, 大川万里生, 齋藤智彦, 堀尾眞史, 藤森淳, 組頭広志, 小野寛太, 池永英司, 宮坂茂樹, 田島節子, 吉田鉄平 : 光電子分光による $Nd_{1-x}Sr_xVO_3$ の金属絶縁体転移近傍における擬ギャップ構造の観測，同上.

セミナー他

[96] 藤森淳 : 放射光 X 線分光による強磁性材料の研究（新日鐵住金 先端技術研究所，2016 年 12 月 14 日）.

4.2 長谷川研究室

4 月から修士課程 1 年生として中西亮介と武内康範が、10 月から Hongrui HUANG が新しくメンバーに加わった。たま、中国科学アカデミーからの派遣博士研究員として JianLin WANG が 12 月から加わった。3 月には学振特別研究員の一ノ倉聖が物質材料研究機構に移動した。

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、トポロジカル絶縁体やトポロジカル結晶絶縁体結晶の表面状態、ラシュバ効果によるスピン分裂した表面状態、グラフェン、シリセン、原子層超伝導などである。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。また、これらの研究のために、新しい手法・装置の開発も並行して行っている。以下に、本年度の具体的な成果を述べる。

4.2.1 表面電子・スピン輸送

タリウム２原子層での超伝導－金属－絶縁体転移

Si(111) 表面に形成されるタリウム（Tl）２原子層において、Tc = 0.96 K の超伝導が発現することを発見したが、本年度はその面直磁場依存性を調べた。図 4.2.1 のように 0.4 T 以上の磁場中では絶縁体的な温度依存性となり、磁場誘起「超伝導-絶縁体転移」と解釈できる。0.4 T 以下の弱磁場中では、挿入図のように、あたかも「常伝導金属」のように、面抵抗が最低温度付近で一定の有限値をとった。これは、磁束運動による散逸に起因すると考えられており、「Bose 金属モデル」が最も良く磁場依存性を再現した。これは局所的に Cooper 対が生じているものの、系全体にコヒーレンスが広がっていない状態を指す。（ロシア科学アカデミーとの共同研究）

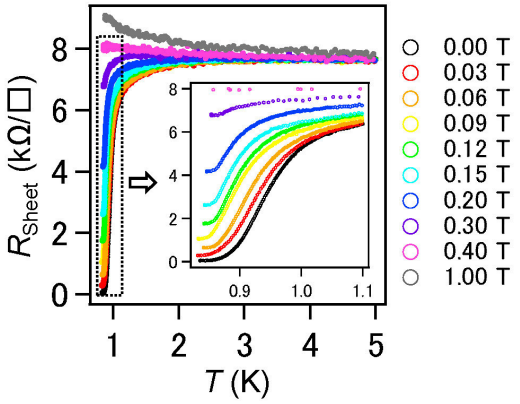

図 4.2.1: Si(111) 表面上のタリウム２原子層の電気抵抗の温度・印加磁場依存性. (S. Ichinokura, *et al.*, 2D Materials **4**, 025020 (2017)).

Pb/Ge(111) 原子層の超伝導

Ge(111) 表面上では、1.354 原子層（ML）の Pb が SIC(striped incommensurate) 構造と呼ばれる相を形成し、それ以上の吸着量では SIC と Pb の３次元島が共存する。この系の極低温・強磁場下での電気伝導測定を行った結果、SIC 構造では、$T < 5$ K で弱反局在効果に由来する電気抵抗の増加を観測した。SIC と Pb の３次元島の共存状態では、２段階の電気抵抗の減少を観測した。$T \sim 7$ K 付近での抵抗減少は Pb 島に由来した超伝導転移と考えられ、$T < 2$ K での抵抗減少は SIC 構造に由来した超伝導転移であり $T_C = 0.75$ K と見積もられた。SIC 構造の超伝導発現には、Pb 島からのキャリアドープまたは Pb 島からの超伝導近接効果が寄与していると考えられる。

水素終端 $SrTiO_3$ 表面の輸送特性

$SrTiO_3$(001)-1 × 1(TiO_2 面) に原子状水素 H を暴露すると金属状態が出現することが報告されている。本研究では超高真空独立駆動 4 探針 STM 装置を用い、*in situ* で電気伝導特性を解析することにより、H 照射後の伝導が２次元的であり、伝導が表面領域でのみで起こっていることを明らかにした。さらに、抵抗値の温度依存性が熱活性型の特性を示した。表面近傍でバンドが下方に湾曲し、観測された伝導は表面空間電荷層由来であると言える。

２層グラフェンのインターカレーションとベリー位相

AB 積層構造の２層グラフェンではバンド分散が放物線的となるが、AA 積層構造ではベリー位相が π となりディラックコーン状の直線分散となって移動度が大幅に上昇する。しかし AA 積層構造を人工的に作成することは難しい。今回、超高真空中で AB 積層の２層グラフェンに Li をインターカレートして、更にそれを 900 ℃に加熱して Li を脱離させると、観測されたシュブニコフドハース振動から、そのベリー位相は π となり、移動度が上昇することがわかった。この結果から AA 積層構造が実現していると言える。（東北大学との共同研究）

スピン軌道相互作用系での円偏光誘起光起電力

強いスピン軌道相互作用をもつ表面ラシュバ系やトポロジカル絶縁体表面では、いわゆる「スピン・運動量ロッキング効果」により、特定の向きのスピンをもつ電子を光励起すると、それとは直角方向に光電流が流れ出す（逆ラシュバ・エーデルシュタイン効果）。よって、右向きか左向き円偏光よって生じる光起電力に違いが生じる（円偏光 photogalvanic 効果 CPGE）。超高真空中の試料に対して可視光および赤外光でこの効果を高感度で測定するためのシステムを作成した。その結果、Bi(111) および Bi/Ag(111) の表面ラシュバ系では CPGE が検出できなかったが、トポロジカル絶縁体である Bi_2Te_3 表面では大きな CPGE が検出できた。前者では反対向きのスピンをもつ電子による相殺効果が効いて CPGE が消失しているが、後者ではその相殺効果が無いためと考えられる。

トポロジカル結晶絶縁体 SnTe 薄膜

SnTe はトポロジカル結晶絶縁体であり、鏡映対称性によって保護された表面状態を持つ。Si(111)-$\sqrt{3} \times \sqrt{3}$-Bi 表面を基板として MBE 法で薄膜作製した結果、極めて平坦性の高い単結晶薄膜の作製に成功した。電気伝導においてもトポロジカル表面状態由来と思われる弱反局在を観測した。また、キャリア補償のため、SnTe に 1% 程度の Li をドープした試料を作製して、電気抵抗の温度依存性を測定した

結果、低温で抵抗が増加する半導体的振る舞いが見られた。

4 探針型 STM による有機分子膜の電気伝導測定

4 探針型 STM を用いて、各種有機分子膜のナノスケールでの電気伝導の測定を試みている。化学専攻西原研から提供いただいた金属 Dithiolen 錯体ナノシートの電気伝導測定を行った。金属 Dithiolen 錯体は π 共役電子系を持ち、有機伝導体として知られる。特に PtDithiolen 薄膜については、電子線照射やアニールによってキャリアがドープされて電気伝導度が 5 桁以上増加して縮退半導的振る舞いを示すことを見出した。(化学専攻との共同研究)

4.2.2 表面ナノ構造

$Pb_{1-x}Sn_xTe$ の角度分解光電子分光測定

SnTe や $Pb_{1-x}Sn_xTe$ では多数の Sn 欠損によって p 型になりやすいが、Sb をドーピングすることでフェルミ準位をバンドギャップ中に移動させることに成功した。その試料群において ARPES 測定を行った結果、理論計算によるバルクバンドからは導き出されないバンドを見出し、それが 2 次元性を持つ表面バンドであることが確証された。(広島大学・筑波大学との共同研究)

(Pb,Bi)/Si(111) 原子層の電子状態

Si(111) 表面上に作成した (Pb,Bi) 原子層合金は、重元素のために強いスピン軌道相互作用と超伝導の可能性が期待できる。その電子状態を明らかにするため、走査トンネル顕微鏡・分光 (STM/S) 測定および角度分解光電子分光 (ARPES) 測定を行った。Pb と Bi の蒸着量比に応じて、$2\sqrt{3}\times2\sqrt{3}$、6×6、2×2 など、様々な周期を取る表面規則合金を見出した。特に、6×6 においては、大きなフェルミ面を持つ金属的なバンド分散を観測した。(ロシア科学アカデミーとの共同研究)

磁性絶縁体/トポロジカル絶縁体のヘテロ構造

トポロジカル絶縁体において時間反転対称性を破ると異常量子スピンホール効果など興味深い現象を引き起こす。トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 表面上に MnSe を蒸着した際、Bi_2Se_3 第一層目内部に $MnBi_2Se_4$ という新たな構造が形成されることが示された。この新規構造について、自然科学研究機構分子科学研究所極端紫外光研究施設 (UVSOR) での X 線磁気円二色性 XMCD 測定、及び東京大学低温センターの MPMS で磁化特性測定を実施した。Mn の L_2,L_3 端で残留磁化に由来する XMCD スペクトルを観測し、MPMS によって、面直・面内方向双方で 4 K および室温において M-H カーブのヒステリシスが観測された。これらから、この新規構造が室温においても強磁性であること、及びその強磁性がトポロジカル表面状態にバンドギャップを誘起していることが分かった。(東京工業大学との共同研究)

Au+Pb 表面合金相の観測

近年、我々は Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-(Tl,Pb) のような強いスピン軌道相互作用によってスピン分裂したバンドを持つ超伝導体を発見した。このような系ではスピン一重項と三重項クーパーペアの混合など興味深い現象が予言されている。さらに、我々はより転移温度の高い Rashba 超伝導体の候補物質として、Au と Pb を Si(111) 及び Ge(111) 基板上に蒸着して形成される表面合金超構造を研究した。その結果、Si(111)-$2\sqrt{3}\times2\sqrt{3}$-(Au,Pb) と Ge(111)-$3\sqrt{3}\times3\sqrt{3}$-(Au,Pb) の 2 種類の表面超構造が金属的なバンドを持つことがわかった。今後、極低温での電気伝導測定を行う。(ロシア科学アカデミーとの共同研究)

2 層グラフェンの陽電子回折

グラフェン層間に金属原子 (Li, Ca, K など) をインターカレートした系では、超伝導が発現したり特異な積層構造が形成される。本研究では、SiC(0001) 上に成長した 2 層グラフェンに Li 原子をインターカレートした C_6LiC_6 の構造解析を、最表面原子層に極めて敏感な全反射高速陽電子回折法で行った。グラフェン層間への Li 原子のインターカレーション以外に、グラフェン-バッファー層間へもインターカレーションされ、層間距離が約 0.5 Å程度増加することもわかった。さらに、Li 原子インターカレート前後での 2 層グラフェンの積層構造の変化が観測された。(高エネルギー加速器研究機構との共同研究)

4.2.3 新しい装置・手法の開発

純スピン流注入プローブの開発

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・測定ができる純スピン流注入プローブの開発を行っている。本年度は昨年度までに開発した試作プローブの検証を行った。金の細線に面内方向の純スピンを注入すると、逆スピンホール効果によりスピンの向きと垂直な方向に電圧が発生する。プローブの向きを変更しながらこの電圧を測定することでスピン注入の検証した。測定された逆スピンホール抵抗は最大 3mV/A であったが、これは金としては典型的な値である。

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われました。記して感謝いたします。

・日本学術振興会 科研費 基盤研究A「超高真空SQUIDによる表面超構造超伝導のマイスナー効果の検出」(代表 長谷川修司)
・文部科学省 科研費 新学術領域研究「分子アーキテクトにクス：単一分子の組織化と新機能創成」計画研究「機能性４探針ＳＴＭによる分子の電子・スピン輸送特性の研究」(代表 長谷川修司)
・文部科学省 科研費 新学術領域研究「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」応募研究「単層２次元トポロジカル結晶絶縁体の開発と、超伝導体との接合による協奏現象の探求」(代表 秋山了太)
・日本学術振興会 科研費 若手研究Ｂ「強磁性トポロジカル結晶絶縁体の開発とその空間反転対称性からみた特性の解明」(代表 秋山了太)
・日本学術振興会 科研費 若手研究Ｂ「独立駆動４探針・磁性探針 STM によるスピン偏極した１次元電子系の研究」(代表 高山あかり)
・日本学術振興会 科研費 挑戦的萌芽研究「多探針 STM を用いた純スピン流プローブの開発」(代表 保原麗)

＜受賞等＞

[1] 遠藤由大：第 36 回表面科学学術講演会 講演奨励賞（スチューデント部門）「SiC 結晶上２層グラフェンの輸送特性および Li インターカレートによる影響」(2017 年 3 月 10 日）.

[2] 遠藤由大：日本表面科学会 第４回関東支部セミナーポスター賞（日本表面科学会）「SiC 上２層グラフェンにおける量子輸送特性」(2016 年 10 月 18 日).

[3] 一ノ倉聖：Springer Thesis Award, (2016 年 5 月 20 日)

[4] 一ノ倉聖：平成 28 年日本学術振興会リンダウ・ノーベル賞受賞者会議派遣事業　採用・派遣 (2016 年 6 月 26 日-7 月 1 日).

[5] 一ノ倉聖：表面科学会 第１回関東支部講演大会 講演奨励賞（日本表面科学会）「その場４端子電気伝導測定による SiC 上２層グラフェンの輸送特性」(2016 年 4 月).

[6] 遠藤由大：表面科学会 第１回関東支部講演大会 学生講演奨励賞（日本表面科学会）「カルシウムをインターカレートした２層グラフェンにおける超伝導」(2016 年 4 月).

[7] 長谷川 修司：2015 年度（第 14 回）APEX/JJAP 編集貢献賞 （応用物理学会）2016 年 4 月.

＜報文＞

(原著論文)

[8] S. Ichinokura, L. Bondarenko, A. Tupchaya, D. Gruznev, A. Zotov, A. Saranin, and S. Hasegawa: *Superconductivity in thallium double atomic layer and transition into an insulating phase intermediated by a quantum metal state*, 2D Materials **4**, 025020 (2017).

[9] T. Nakamura, R. Yoshino, R. Hobara,S. Hasegawa, and T. Hirahara: *Development of a convenient in situ UHV scanning tunneling potentiometry system using a tip holder equipped with current-injection probes*, e-J. Surf. Sci. Nanotech. **14**, 216-224 (2016).

[10] S. Ito, B. Feng, M. Arita, A. Takayama, R.-Y. Liu, T. Someya, W.-C. Chen, T. Iimori, H. Namatame, M. Taniguchi, C.-M. Cheng, S.-J. Tang, F. Komori, K. Kobayashi, T.-C. Chiang, and I. Matsuda: *Proving Nontrivial Topology of Pure Bismuth by Quantum Confinement*, Phys. Rev. Lett. **117**, 236402 (2016).

[11] Y. K. Wakabayashi, R. Akiyama, Y. Takeda, M. Horio, G. Shibata, S. Sakamoto, Y. Ban, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, M. Tanaka, and S. Ohya, *Origin of the large positive magnetoresistance of $Ge_{1-x}Mn_x$ granular thin films*, Phys. Rev. B **95**, 014417 (2017).

[12] R. Ishikawa, T. Yamaguchi, Y. Ohtaki, R. Akiyama, S. Kuroda, *Thin film growth of a topological crystal insulator SnTe on the CdTe (111) surface by molecular beam epitaxy*, Journal of Crystal Growth **453**, 124-129 (2016).

(国内雑誌)

[13] 一ノ倉聖, 保原麗, 高山あかり, 長谷川修司, Andrey V. Matetskiy, Leonid V. Bondarenko, Alexandra Y. Tupchaya, Dimitry V. Gruznev, Andrey V. Zotov, Alexander A. Saranin：*In situ* 電気伝導測定による *Rashba* 型表面構造（*Tl, Pb)/Si(111)* の超伝導の観測, 表面科学 **37** (8), 363-368（2016).

(著書)

[14] A. Takayama: *Anomalous Rashba effect of Bi thin film studied by spin-resolved ARPES*, in e-Book: *Modern Technologies for Creating the Thin-film Systems and Coatings*, ISBN 978-953-51-5056-5.

[15] 長谷川修司: 物理学を例にとって考える“研究する意味” , in 科学の技法―東京大学「初年次ゼミナール理科」テキスト―、東京大学教養教育高度化機構初年次教育部門 増田建・坂口菊恵 編　（2017 東京大学出版会）pp. 214-221.

(その他)

[16] 長谷川修司：役に立つ、役に立たない (巻頭エッセイ), 化学 **71** (10), 11-12（2016).

[17] 長谷川修司：学会の国際化 (巻頭言), 表面科学 **37** (9), 415-415（2016).

(学位論文)

[18] 遠藤由大：SiC 上２層グラフェンにおける量子輸送特性 (修士論文).

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[19] S. Hasegawa: *Parity-Brokn Monatomic-Layer Superconductors*, APCTP-Quantum Materials Symposium 2017, 2017 年 2 月 22 日, YongPyong Resort, Korea.

[20] S. Hasegawa: *Parity-Brokn Monatomic-Layer Superconductors*, 2017 中華民国物理年会 Taiwan-AVS Symposium on Frontiers of 2D Materials, 2017 年 1 月 17 日, 淡江大学、新台北、台湾.

[21] S. Hasegawa: *Low-Dimensionality, Symmetry Breaking, and Topology on Surfaces*, 2016 IBS Conference -Surface Atomic Wires-, 2016 年 8 月 17 日, Pohang, Korea.

[22] S. Hasegawa: *Atomic-Layer Superconductors*, The 20th International Vacuum Congress, 2016 年 8 月 26 日, Busan, Korea.

[23] S. Hasegawa: *Symmetry-Broken Monolayer Superconductors The 10th International Workshop on LEEM/PEEM*, 2016 年 9 月 14 日, Monterey, California, USA.

[24] S. Hasegawa: *Superconductivity and Spin Current at Surface States*, Workshop at the Research Center Julich on Charge transport at surfaces and nanostructures with multi-probe techniques, 2016 年 9 月 21 日, Julich, Germany.

[25] S. Hasegawa: *Parity-Broken Monatomic-Layer Superconductors*, Workshop of ENS-UTokyo, 2016 年 11 月 17 日, Ecole Normale Superieure, Paris (France).

[26] S. Hasegawa: *Parity-Broken Atomic-Layer Superconductors*, MPI-UBC-UTokyo Workshop, 2016 年 12 月 5 日, 東京大学.

[27] A. Takayama: *One-Dimensional Edge States with Giant Spin Splitting in a Bismuth Thin Film studied by spin-resolved ARPES*, Spintronics-EMN Las Vegas Meetings, 2016 年 10 月 12 日, Las Vegas, USA.

[28] S. Ichinokura: *Superconducting Properties of Tl Double Atomic Layer on Si(111)*, The 2nd Asia-Pacific Symposium on Solid Surfaces and Crsoo-Strait Symposium on Solid Surfaces, 2016 年 11 月 14 日, National Taiwan University, Taipei.

[29] S. Ichinokura, K. Sugawara, A. Takayama, T. Takahashi, S. Hasegawa: *Superconductivity in Calcium-Intercalated Bilayer Graphene detected by in situ Resistivity Measurements in Ultrahigh Vacuum*, The 1st International Conference Graphene and related Materials: Properties and Applications, 2016 年 5 月 24 日, Paestum, Italy.

一般講演

[30] S. Hasegawa, T. Nakamura, S. Ichinokura, R. Hobara, R. Akiyama, A. Takayama, A. V. Matetskiy, A.V. Zotov, and A. A. Saranin, H. Kim, Y. Hasegawa: *A Parity-Brokn Monatomic-Layer Superconductor*, Symposium on Surface and Nano Sciences 2017, 2017 年 1 月 13 日, 富良野、北海道.

[31] D. Fan , H. Ishihara, R. Akiyama, R. Hobara, A. Takayama and S. Hasegawa: *Optical-Helicity-dependent Photocurrent in Strong Spin-Orbit Coupling Thin Films Grown on Si Substrate*, The 2nd Asia-Pacific Symposium on Solid Surfaces and Crsoo-Strait Symposium on Solid Surfaces, 2016 年 11 月 14 日, National Taiwan University, Taipei.

- **The 20th International Vacuum Congress (IVC-20)**, 2016 年 8 月 21-26 日, Busan, Korea

[32] Y. Endo, S.Ichinokura, K. Suzuki, K. Sugawara, R. Akiyama, A. Takayama, T. Takahashi, S. Hasegawa: *Transport properties of bilayer graphene studied by in situ four-point probe resistance measurements*, 8 月 24 日.

[33] A. Takayama, Y. Endo, D.Fan, M. Imamura, K. Takahashi, S. Hasegawa: *Electronic Properties of Pb/Ge(111) studied by ARPES and transport measurements*, 8 月 25 日.

[34] R. Akiyama, K. Sumida, S. Ichinokura, A. Kimura, K. Kokh, O. Tereshchenko, S. Hasegawa: *Observation of the Shubnikov-de Haas oscillation in topological insulator* $(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3$ *flakes*, 8 月 25 日.

[35] T. Nakamura, H. Kim, S. Ichinokura, A. Takayama, R. Akiyama, A. A. Saranin, A. V. Zotov, Y. Hasegawa, S. Hasegawa: *STS measurements of monatomic-layer superconductor, Tl-Pb compound on Si(111)*, 8 月 25 日.

[36] D. Fan, H. Ishihara, R. Akiyama, R. Hobara, A. Takayama, S. Hasegawa: *Helicity-dependent photovoltaic effect on Bi and Bi/Ag thin films*, 8 月 25 日.

[37] N. Fukui, R. Hobara, A. Takayama, R. Akiyama, S. Hasegawa: *Electrical resistance across atomic steps on topological insulator Pb-doped Bi2Te3 surface*, 8 月 25 日.

[38] S. Ichinokura, K. Sugawara, A. Takayama, T. Takahashi, S. Hasegawa: *Superconductivity in Ca-intercalated Bilayer Graphene*, 8 月 22 日.

[39] R. Akiyama, H. Ishihara, D. Fan, R. Hobara, A. Takayama, and S. Hasegawa: *Observation of Spin-splitting Surface States in Bi and Bi/Ag Thin Films by Photogalvanic Effect*, PASPS-9, Kobe, Hyogo (2016 年 7 月 10 日).

[40] R. Akiyama, K. Sumida, S. Ichinokura, A. Kimura, K. Kokh, O. Tereshchenko, and S. Hasegawa: *Shubnikov-de Haas oscillations in n and p-type topological insulator* $(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3$ *flakes*, NTTI2016 and NGS 17, Wuerzburg University (2016 年 7 月 25 日).

[41] S. Ichinokura, K. Sugawara, A. Takayama, T. Takahashi, A. V. Matetskiy, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, A. V. Zotov, A. A. Saranin, and S. Hasegawa: *Atomically Thinned*

Two-dimensional Superconductors, The 66th Lindau Nobel Laureate Meeting, Lindau, Germany (2016 年 6 月 28 日).

(国内会議)

招待講演

[42] 長谷川修司: ラシュバ超伝導, 領域 4，領域 7，領域 8，領域 9 合同シンポジウム『原子層関連物質における 2 次元超伝導現象』, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 19 日 (日) 大阪大学（豊中）（大阪）.

[43] 長谷川修司: 原子層二次元物質の超伝導, （公財）科学技術交流財団「次世代デバイス実現に向けた先端二次元物質の物理と化学」第 1 回研究会 2016 年 7 月 19 日 (火) 科学技術交流財団交流センター（名古屋）.

[44] 長谷川修司: パリティの破れた原子層超伝導, 物性研短期究会「走査トンネル顕微鏡による物性研究の現状と展望 」, 2016 年 11 月 1 日 (火) 東京大学物性研究所（柏）.

[45] 秋山了太: トポロジカル（結晶）絶縁体における電気伝導特性、第 1 回 TIA 連携プログラム「強磁場計測とデータ解析技術の融合によるエネルギーデバイス材料評価システムの確立に向けた基礎調査研究」オープンセミナー、2016 年 7 月 20 日、物質材料研究機構.

[46] 秋山了太:*Properties of topological insulators probed by a magnetic field*, 東京大学物性研究所短期研究会「強磁場コラボラトリー、国際協力と強磁場科学」、2016 年 6 月 23 日、東京大学物性研究所.

一般講演

[47] 保原麗、長谷川修司: 純スピン流生成プローブの開発, 応用物理学会春季学術講演会, 2017 年 3 月 14 日 (火) パシフィコ横浜（横浜）.

- **日本物理学会 第 72 回年次大会**, 2017 年 3 月 17 日-20 日 (大阪大学 豊中キャンパス)

[48] 中西亮介, 秋山了太, 鎮西弘毅, 長谷川修司: *Si(111)-*$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$*-Bi* 上に成長したトポロジカル結晶絶縁体 *SnTe* 薄膜への *Li* ドーピング効果, 3 月 17 日.

[49] 中村友謙, Kim Howon, 一ノ倉聖, 高山あかり, 秋山了太, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川幸雄, 長谷川修司: 単原子層超伝導体 *Si(111)-* $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$*-(Tl, Pb)* における非 *BCS* 的超伝導の観測, 3 月 17 日.

[50] 武内康範, 秋山了太, 保原麗, 一ノ倉聖, 湯川龍, 松田巌, 長谷川修司: *in situ* 独立 *4* 探針 *STM* を用いた $SrTiO_3$ 表面への水素照射の影響評価, 3 月 17 日.

[51] 遠藤由大, 望月出海, 深谷有喜, 高山あかり, 兵頭俊夫, 長谷川修司: 全反射高速陽電子回折法による *SiC* 上の *Li* インターカレーション *2* 層グラフェンの構造解析, 3 月 17 日.

[52] 高山あかり, 中村友謙, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司: *STM・ARPES* による *(Pb,Bi)/Si(111)* の構造および電子状態, 3 月 17 日.

[53] 中西亮介, 秋山了太, 奥山裕磨, 高木康多, S. V. Eremeev, E. V. Chulkov, 横山利彦, 長谷川修司, 平原徹: トポロジカル絶縁体/磁性絶縁体超薄膜ヘテロ接合 *II* : 磁化特性, 3 月 17 日.

[54] 遠藤由大, 一ノ倉聖, 鈴木克郷, 菅原克明, 秋山了太, 高山あかり, 野村健太郎, 高橋隆, 長谷川修司: *SiC* 結晶上 2 層グラフェンの輸送特性および *Li* インターカレートによる影響, 第 8 回低温センター研究交流会, 東京大学, 2017 年 2 月 23 日.

[55] 中西亮介、秋山了太、鎮西弘毅、長谷川修司: *Si(111)-* $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$*-Bi* 上トポロジカル結晶絶縁体 *SnTe* 薄膜への *Li* ドーピング効果, 第 2 回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会, 東北大学, 2016 年 12 月 16 日.

[56] 中村友謙, H. Kim, 一ノ倉聖, 高山あかり, 秋山了太, A. V. Matetskiy, A. Z. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川幸雄、長谷川修司: 走査トンネル分光測定による表面超構造 *(Tl,Pb)/Si(111)* における超伝導の観測, 2016 真空・表面科学合同講演会, 名古屋国際会議場（名古屋）, 2016 年 12 月 1 日

[57] 遠藤由大, 一ノ倉聖, 鈴木克郷, 菅原克明, 秋山了太, 高山あかり, , 野村健太郎, , 高橋隆, 長谷川修司: *SiC* 結晶上 2 層グラフェンの輸送特性および *Li* インターカレートによる影響, 2016 真空・表面科学合同講演会, 名古屋国際会議場（名古屋）, 2016 年 12 月 1 日.

[58] Fan Di, 石原大嵩, 秋山了太, 高山あかり, 保原麗, , 長谷川修司, *Helicity-dependent photocurrent in thin films*, 2016 真空・表面科学合同講演会, 名古屋国際会議場（名古屋）, 2016 年 11 月 29 日.

[59] 中村友謙, H. Kim, , 一ノ倉聖, 高山あかり, 秋山了太, 長谷川修司 , A. V. Matetskiy, A. Z. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川幸雄: 空間反転対称性の破れたモノレイヤー超伝導 —*STS* 編—, 平成 28 年度東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会「電荷とスピンの制御に基づく精密物性科学の構築とデバイス応用 」技, 茂庭荘（仙台）, 2016 年 11 月 21 日.

[60] 中村友謙, H. Kim, , 一ノ倉聖, 高山あかり, , 秋山了太, A. Z. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川幸雄, 長谷川修司: 走査トンネル分光測定による *(Tl, Pb)/Si(111)* 表面超構造における 超伝導の観測, 物性研短期究会「走査トンネル顕微鏡による物性研究の現状と展望 」, 東京大学物性研究所（柏）, 2016 年 10 月 31 日.

[61] 保原麗、福居直哉、T. Pal, 坂本良太, 西原寛、長谷川修司: *4* 探針 *STM* による *Pt* ジチオレン錯体系分子性導体の電気伝導測定, 分子アーキテクトニクス研究会第 7 回研究会, 九州大学, 2016 年 10 月 20 日.

[62] Di Fan, 秋山了太, 石原大嵩, 保原麗, 高山あかり, 長谷川修司, *Helicity-dependent Photocurrent in Strong Spin-Orbit Coupling Thin Films*, 日本表面科学会第 4 回関東支部セミナー，東京大学，2016 年 10 月 18 日.

[63] 遠藤由大, 一ノ倉聖, 鈴木克郷, 菅原克明, 秋山了太, 高山あかり, 野村健太郎, 高橋隆, 長谷川修司: 2 層グラフェンの弱局在効果と *Li* インターカレートによる影響, 日本表面科学会第 4 回関東支部セミナー，東京大学，2016 年 10 月 18 日.

[64] 中村友謙, H. Kim, 一ノ倉聖, 高山あかり, 秋山了太, A. Z. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川幸雄, 長谷川修司 : 走査トンネル分光測定による *(Tl,Pb)/Si(111)* 表面超構造における超伝導の観測, 物性研短期究会「走査トンネル顕微鏡による物性研究の現状と展望」, 東京大学物性研究所（柏), 2016 年 10 月 31 日.

[65] Di Fan, 秋山了太, 石原大嵩, 保原麗, 高山あかり, 長谷川修司, *Helicity-dependent Photocurrent in Strong Spin-Orbit Coupling Thin Films*, 第 36 回表面科学学術講演会，名古屋国際会議場，2016 年 11 月 30 日.

[66] 高山あかり : *TRHEPD* を用いた *2* 層グラフェン層間化合物 C_6LiC_6 の構造解析, 陽電子回折研究会, 高エネルギー加速器研究機構（つくば）, 2017 年 1 月 20 日.

- **日本物理学会 2016 秋季大会**, 2016 年 9 月 13 日-16 日 (金沢大学, 角間キャンパス)

[67] 高山あかり, 遠藤由大, Fan Di, 今村真幸, 高橋和敏, 長谷川修司: *Pb/Ge(111)* 超薄膜における電子構造および輸送特性の膜厚依存性, 9 月 16 日.

[68] 一ノ倉聖, Leonid V. Bondarenko, Alexandra Y. Tupchaya, Dimitry V. Gruznev, Andrey V. Zotov, Alexander A. Saranin, 秋山了太, 長谷川修司: *Si(111)*-1 × 1-Tl 表面上に作製した Tl 単原子層における超伝導, 9 月 16 日.

[69] 遠藤由大, 一ノ倉聖, 鈴木克郷, 菅原克明, 秋山了太, 高山あかり, 高橋隆, 長谷川修司, 野村健太郎: *In situ* 極低温四端子電気伝導測定による *SiC* 上 *2* 層グラフェンの量子輸送特性, 9 月 15 日.

[70] 秋山了太, 中西亮介, 遠藤由大, 一ノ倉聖, 長谷川修司: *Si(111)*$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-*Bi* 上におけるトポロジカル結晶絶縁体 *SnTe* 薄膜の成長とその評価, 9 月 13 日.

[71] 保原麗, 秋山了太, 長谷川修司: 純スピン流生成プローブの開発, 9 月 13 日.

[72] 秋山了太: 単層 2 次元トポロジカル結晶絶縁体の開発と超伝導体との接合による協奏現象の探求, 新学術領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」公募班キックオフミーティング, 京都大学, 2016 年 6 月 4 日.

[73] 一ノ倉聖，菅原克明，高山あかり，高橋隆，長谷川修司: カルシウムをインターカレートした 2 層グラフェンにおける超伝導, 表面科学会 第 1 回関東支部講演大会，東京大学，2016 年 4 月 9 日.

[74] Fan Di, 石原大嵩, 保原麗, 高山あかり, 秋山了太, 長谷川修司, *Photogalvanic effect on spin-splitting surface states in Bi and Bi/Ag thin films* , 表面科学会 第 1 回関東支部講演大会，東京大学，2016 年 4 月 9 日.

(セミナー)

[75] 長谷川修司: *Parity-Broken Atomic-Layer Superconductors*, 超伝導コロキウム, 2016 年 6 月 6 日, 東京大学物理学教室 (本郷).

(講義等)

[76] 長谷川修司 : 固体物理学 II（学部）・物性物理学 I（大学院）, 2016 年度夏学期（本郷）.

[77] 長谷川修司, 高山あかり, 中村友謙 (TA), 遠藤由大 (TA)、中西 亮介 (TA)、武内康範 (TA) : 物理学実験 I（３年生）電子回折, 2016 年度冬学期（本郷）.

(アウトリーチ)

[78] 長谷川修司: ナノサイエンス ―私たちの体や日常を支える極微の世界を探る―, 日本鉄道運輸サービス協会 経営セミナー, JR 神田万世橋ビル, 2016 年 11 月 11 日.

[79] 長谷川修司: 実験課題レポートの書き方、および LED によるプランク定数測定実験, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 静岡県教育委員会主催「オリンピックチャレンジ」, 2016 年 12 月 11 日, 静岡県総合教育センター（掛川):茨城県立水戸第一高等学校, 2016 年 6 月 4 日: 栃木県立大田原高等学校, 2017 年 3 月 20 日.

[80] 長谷川修司 : キャリア・ディベロップメント, 科学先取りグルーバルキャンパス岡山（GSCO), 2017 年 3 月 26 日, 岡山大学 (岡山).

[81] オープンキャンパス研究室公開 「表面的でない表面物理学」, 2016 年 8 月 4 日, 理学部 1 号館 B101 号室 (東京大学)

[82] 模擬授業および研究室見学　福岡県立筑紫丘高等学校, 2016 年 8 月 2 日:神奈川県立湘南高等学校, 2016 年 8 月 3 日 : 島根県立松江北高等学校, 2016 年 10 月 6 日:群馬県立前橋高等学校, 2016 年 11 月 8 日 : 栃木県立宇都宮高等学校, 2016 年 11 月 29 日.

4.3 福山研究室

極低温環境では乱雑な熱撹乱に邪魔されることなく、物質固有の性質を反映した非日常的な現象や状態が顕わになる。我々は、できるだけ純粋かつ単純な 2 次元および 1 次元物質を対象として、これまで知られていない、そして一般性のある基底状態、素励起、相転移現象を、室温からマイクロケルビンに至る広大な温度範囲で探索している。具体的には、量子効果が強いヘリウムの液体や固体 (量子液体・固体)、炭素の 2 次元シートであるグラフェン、それを筒状に丸めた擬 1 次元系のカーボンナノチューブ (CNT) が対象物質である。

実験手法は、自作の核断熱消磁冷凍機や超低温・高磁場・超高真空の多重極限環境下で作動する走査トンネル顕微・分光装置 (STM/S)、無冷媒型の希釈冷凍機を中心に、比熱、NMR(核磁気共鳴)、ねじれ振り子、走査トンネル分光 (STS)、電気伝導度、磁化測定など多彩な手法を用いる。

また、本学低温センターを中心に信州大学や大阪大学など国内の実験グループとの共同研究を進めており、新しい低温実験技術の開発や新材料の低温物性評価では複数の国内企業と共同研究をしている。国内外の多数の理論家とも活発に議論を進めている。

4.3.1 2 次元ヘリウムの量子相研究

液体ヘリウムは実験室で扱える最も純粋な物質であり、その単純な構成からは想像できないような複雑で多彩な量子現象を極低温で示す。ヘリウム 4(^{4}He) とその安定同位体であるヘリウム 3(^{3}He) は同一の原子間相互作用をもちながら、前者はボース統計に従うスピン 0 の中性粒子、後者はフェルミ統計に従うスピン 1/2 の中性粒子である。原子質量が小さいため量子効果が大きく、それらの液体と固体は、統計性の違いを反映して、超流動、異方的 BCS 状態、核磁気秩序など豊富な物理を表出する。Kosterlitz と Thouless(KT) が理論予測したトポロジカル相転移が、ヘリウム 4(^{4}He) 薄膜の超流動転移で初めて実験的に確認されたように、He 薄膜は物理の新概念を探索検証する上で重要な舞台である。

我々は、原子スケールで平坦なグラファイト表面に物理吸着させることで ^{4}He や ^{3}He を 2 次元空間に閉じ込め、その物性を 100 μK に至る超低温度まで調べ、超固体相や量子スピン液体相など物質のまったく新しい量子状態を探索している。2 次元 He は 3 次元 He より量子性が強く、粒子相関もはるかに広い範囲で制御できる量子多体系のフロンティアである。

量子固体の融解現象

量子性の強い粒子系は、絶対零度でも零点振動の運動エネルギー K を下げるために固化 (局在) せず、気体または液体に止まる。これが量子気体、量子液体である。例えば、クーロン相互作用 $U \propto r^{-1}$ は $K \propto r^{-2}$ より長距離力なので、電子系は低密度にすると相互作用のため局在する (Wigner 結晶)。一方、He 粒子間の斥力相互作用 $U \propto r^{-12}$ は短距離力なので、He 系は高密度にすると相互作用のため固化すると単純には期待される。実際、数十気圧以上の高圧下で He は固化する。

ところが、$T = 0$ で ^{3}He の方が ^{4}He より低密度で固化する (より固化しやすい) という量子効果 (同位体効果) の観測事実はこれと矛盾する。なぜなら、より重く運動エネルギーがより小さな ^{4}He の方が ^{3}He より固化しやすいはずだからである。この矛盾は、“相互作用のため固化する” という考えに間違いがあるためである。実は He の固化は運動エネルギーを下げるために局在する “量子局在” 現象なのである。平均粒子間距離が剛体球半径に比べて無視できないくらい高密度になると、自由に運動できる位相空間の幾何学形状が液体相では極度に非等方的で、同じ密度の固体相はより等方的で運動エネルギーをより下げられるのである。

我々は最近、他のすべての量子固体の融点についてもまったく同じ量子効果が現れることに気付いた。密度が同じ固体 He の融点 $T_{\rm m}$ は bcc 相でも hcp 相でも ^{3}He の方が高い。この負の同位体効果 ($dT_{\rm m}/dm < 0$) は、グラファイト上に吸着した 1 層目や 2 層目の 2 次元固体 He、さらには水素同位体分子の 3 次元および 2 次元の固体でもすべて成り立ち、$-0.2 \leq dT_{\rm m}/dm \leq -0.02$ の範囲にある。ここで、m は粒子質量である。

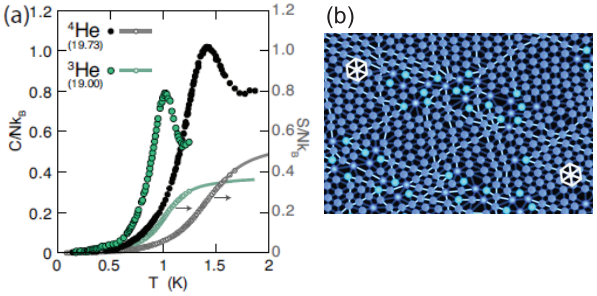

図 4.3.1: (a) グラファイト上吸着 2 層目の低密度局在相 (C2 相) の融解に伴う比熱異常。^{4}He の方が ^{3}He より 40%も融点が高い。(b) C2 相で予想されている 2 次元量子液晶相の一つ「量子ヘキサティック相」の概念図。ボンド配向性の準長距離秩序はもつが、並進対称性は破れていない。

量子局在の転移温度がもつこの負の量子効果は一般的な法則と考えて良い。

超流動量子液晶の可能性

上記の同位体効果の符合が逆転した例外的な量子局在相があることを最近我々は見出し、これを “量子液晶” と名付けた。具体的には、これまで我々のグループで長年研究してきた、グラファイト上吸着 2 層目の低密度局在相 (C2 相) である。図 4.3.1(a) に示すように、より重い ^{4}He の方が 40%も融点が高い ($dT_{\rm m} = +0.40$)。これには何か特別なメカニズムが働いているに違いない。我々の提案は以下の通りである。

まず、C2 相の並進対称性の破れは部分的であり、絶対零度でもかなりの流動性を保つ量子液晶、恐らくは量子ヘキサティック相と呼ばれる 6 回対称のボンド配向の準長距離秩序だけをもつ新奇な量子相であると考える (図 4.3.1(b))。これにはさまざな状況証拠もある。そして、ボソン系である ^{4}He の C2 相は 1 K 以下で超流動性を併せもつために、超流動性と結晶性のそれぞれの秩序の絡み合いが融点を大きく押し上げていると考える。これが、正方格子系では見られない三角格子系特有の効果であることは、トポロジカル量子欠陥の理論的考察からも指摘されている。

以上の考察は、^{4}He-C2 相の低温相が新奇な “超流動液晶” であることを示している。実際、過去の複数のねじれ振り子実験が、C2 相近傍密度で超流動レスポンスを報告している。しかし、それらの密度スケールには不定性が残るため、9%の密度幅しか安定化しない C2 局在相そのものが超流動レスポンスを示すのかどうかの確認が急務である。現在、比熱とねじれ振り子を同時測定できる実験を準備している。

水素分子膜上の 2 次元 ^{3}He の量子相図

グラファイト表面を重水素化水素 (HD)2 分子層でプレコートした上に吸着した単原子層の 2 次元 ^{3}He について、その量子相図を $0.2 \leq T \leq 90$ mK、$0.2 \leq \rho \leq 14$ nm^{-2} の広い温度と密度範囲で比熱測定から調べている。今年度は、この研究に用いてきた核断熱消磁冷凍機の保守と修理に多くの時間を費やし、新しい実験データは取得できていない。しかし、その詳細なデータ解析を通じて、(1) これまでの我々の研究結果と同様に、この系でも 1 nm^{-2} 以下の臨界密度をもつ 2 次元 ^{3}He の気液相分離現象が観測されていること、(2) 4/7 局在相に向かって 2 次元液体 ^{3}He の密度を増してゆくと、準粒子有効質量が Mott-Hubbard 的な発散を示すという従来の英国グループの主張は、実験データの解析方法に誤りがあるらしいことなどが分かってきた。同冷凍機は保守と修理を終え、現在、再稼働してる。これまで不足していた密度域のデータ取得を補完して、HD2 分子層上の 2 次元 ^{3}He の量子相図の完成を目指している。

4.3.2 グラフェンの電子物性研究

グラフェンは炭素原子のハニカム格子からなる理想的な 2 次元物質である。ディラック点で線形に交わるエネルギーバンドをもつことから電子やホールが質量ゼロのディラック粒子として振舞い、ゼロエネルギーのランダウ準位をもつなど基礎物理学の観点からも興味深い。同時に、高い熱および電気伝導度をもち機械的にも強くしなやかなことから、次世代エレクトロニクス素材としても注目されている。

ジグザグ端をもつ六角形ナノピットの形成とその STS 観測

グラフェンにはジグザグ型とアームチェア型の 2 種類の端構造がある。ジグザグ端では、2 種類ある副格子の対称性が完全に破れているため、端に局在した電子状態 (ジグザグ端状態) がフェルミエネルギー近傍に形成されるが、アームチェア端には現れない。この局在電子状態はバンド幅が狭く、わずかな摂動でスピン偏極するので、ジグザグ端で挟まれた幅数ナノメートルのナノリボンが作成できれば、端のスピン偏極やバンドギャップの形成・制御が実現できると期待されている。しかし、原子スケールで純粋なジグザグ端を人工的に作るのは現実には非常に難しい。我々は、昨年度詳しく報告したように、高温にしたグラファイトを水素プラズマに曝すことで、その表面に、他の方法に比べてかなり直線性の高いジグザグ端で囲まれた単原子層深さの六角形ナノピット (一辺、数十 ∼ 数百 nm) を多数作成することに成功した。今年度は、水素圧力の条件も最適化することで、グラファイト表面での欠陥の核生成と選択的にジグザグ端を残す異方的エッチングの両方をほぼ自在に制御できるようになった。

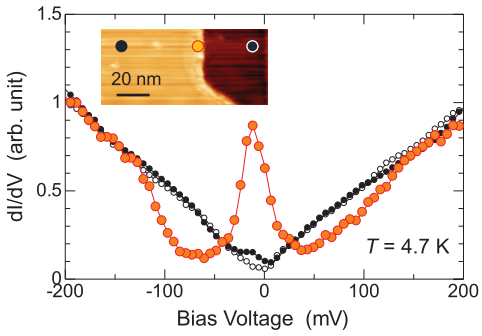

図 4.3.2: 水素プラズマエッチング法で作成したジグザグ端近傍のトンネル分光データ。テラス上でエッジから離れた地点や、エッジ近傍であっても下層ならば、dI/dV はグラファイト的な V 型のスペクトルを示す。一方、端直上では、ジグザグ端状態に対応する強いピークと、その両脇のエネルギーでの落ち込みが明瞭に観測された。

こうして形成したジグザグ端直上と端から十分に離れたテラス上の 2 カ所で計測したトンネル分光データを図 4.3.2 に比較する。縦軸の微分トンネルコンダクタンス (dI/dV) は試料の局所状態密度 (LDOS) に比例する量である。端直上では、ジグザグ端状態に対応して、これまで観測されたことのない明瞭なピークが観測された。ピーク強度は端から離れるに従い距離の指数関数で急減する。その減衰長 ($\xi = 1.6 \pm 0.7$ nm) は、以前我々が自然に存在する単原子層ステップのジグザグ端で観測した $\xi (= 1.2 \pm 0.2$ nm) と同程度である。さらに、ピークの両脇のエネルギー帯に明瞭な電子状態密度の落ち込み (ギャップ構造) も観測された。このような構造は、2 種類の副格子のアンバランスが大きい場所ほど、つまりジグザグ端が純粋であるほど顕著に現れることが理論計算から知られていたが、実験的に観測されたのはこれが初めてである。水素プラズマエッチング法で人工的に作成した六角ナノピットの端がこれまでになく高品質なジグザグ端からなることを強く示唆している。今後は、二つの六角ナノピットに挟まれたグラフェンナノリボンの走査トンネル分光測定に傾注する予定である。

SiO_2 上に劈開した多層グラフェンのプラズマエッチング加工

開発した水素プラズマエッチング法を、SiO_2 基板上に劈開した微少多層グラフェン試料に応用する研究を始めた。ジグザグ端で挟まれたグラフェンナノリボンや、六角ナノピットを多数内包するグラフェンナノリボンの形成がその目的である。欠陥作成が支配的な低い水素分圧でのエッチングでは、グラフェンは面積が小さくなると同時に厚さも薄くなる。逆

に分圧が高いエッチングでは、グラフェンの厚さはあまり変化しない。低圧エッチングでは、ラマン分光にランダムな形状の端や欠陥に起因する D バンドが現れる。その試料を続けて高圧エッチングすると、D バンド信号が消失するこも確認できた。これらは、グラファイト表面で STM/S 観測したピット形状の変化ともよく一致する。バレー間散乱が許されないジグザグ端では D バンドは現れないからである。今後は、後述する開発中の多機能超低温走査プローブ顕微鏡を使って、STS と輸送特性を同時測定する予定である。

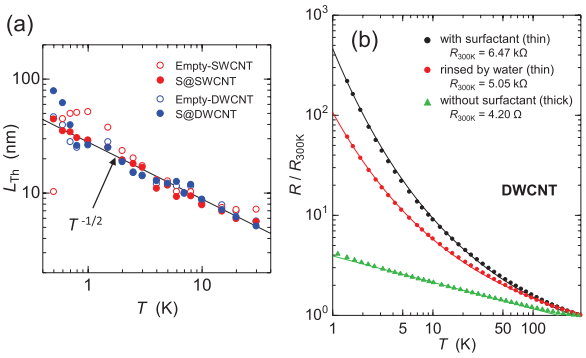

図 4.3.3: (a) CNT ネットワークの磁気抵抗の弱局在成分から求めた位相緩和長 (L) の温度依存性。(b) 界面活性剤の多寡による 2 層 CNT ネットワークの電気抵抗の温度依存性の違い。抵抗は $T = 300$ K での値で規格化してある。データは下から、界面活性剤を使っていない試料、よく洗浄した試料、洗浄しなかった試料。

4.3.3 カーボンナノチューブ・ランダムネットワークの 1 次元電子物性

グラフェンが直径 1〜数 nm の極微の円筒状に丸まった擬 1 次元物質であるカーボンナノチューブ (CNT) では、相互作用する 1 次元電子系特有の朝永-Luttinger 液体 (TLL) の振る舞いが予測され、その実験例もいくつか報告されている。しかし、CNT1 本、あるいは CNT 数十本からなる CNT バンドル 1 本の長さは 1 μm 以下と短く、その低温伝導測定にはメゾスコピック系特有の試料依存性や帯電効果の補正などの問題を避けられない。また、電極端子が系に及ぼす影響 (エンドコンタクトかバルクコンタクト) の制御の困難もある。我々は、無数の CNT バンドルのランダムネットワークであるバルク試料 (buckypaper) に着目し、その伝導特性を調べている。本研究では 99 %以上金属型の単層 CNT と、その内部に ^{60}C 分子を導入後熱分解して作成した 2 層 CNT のネットワーク試料の実験結果を比較した。後者の製作法は peapod 法と呼ばれる。

昨年度報告した通り、ゼロ磁場下の電気抵抗率の温度依存性は、単層 CNT ネットワークの場合、3 次元可変長ホッピング (3D-VRH) モデルで比較的よく表される一方、2 層 CNT ネットワークは $2 \leq T \leq 100$ K の広い範囲で、冪指数 α の値も含めて TLL 理論計算とよく一致する冪型の温度依存性 ($\rho \propto T^{-\alpha}$, $\alpha = 0.233 \pm 0.009$) に従うことを見出した。

今年度は、磁気抵抗データを重点的に取得し、3D-VRH による正の磁気抵抗成分と金属的伝導に特徴的な 3D 弱局在効果による負の磁気抵抗成分を注意深く分離し、後者の詳しい解析から位相緩和長 (Thouless 長 : L) の温度変化を求めた (図 4.3.3(a))。その結果、観測した全温度範囲 ($0.5 \leq T \leq 30$ K) で $L < w$ が成り立っていることが分かった。ここで $w(= 100 - 200$ nm) は CNT-CNT 接合間の平均距離である。これから、各 CNT バンドル内の 1 次元伝導特性がネットワーク全体の伝導特性を決めており、最低温度付近になって L が w に比べて無視できないまで伸びてきて、弱局在性が伝導特性に顔を出してくるというシナリオが浮かんでくる。2 層 CNT ネットワーク試料の接合抵抗は何らかの理由で単層系よりかなり小さく、バルクコンタクトが実現しているようである。実際、2 層系試料を作成する過程で使用する界面活性剤の洗浄をわざと不完全に行い、その一部が接合部に残留するよう作成した試料の抵抗率の温度依存性を測定したところ、図 4.3.3(b) のように、TLL 的な冪乗則から VRH 型の大きな温度依存性に変化することを確認した。

本研究は、信州大学環境・エネルギー材料科学研究所との共同研究である。

4.3.4 多機能超低温走査プローブ顕微鏡の開発

我々はこれまで、超低温 (30 mK)・高磁場 (13 T)・超高真空 (10^{-8} Pa 以下) という多重極限下で動作する走査トンネル顕微鏡 (ULT-STM) を開発し、主に低次元電子系の物性研究に活用してきた。ULT-STM は超高真空環境を破ることなく試料や探針を交換できるため、ほとんど全ての導電性物質に応用できるユニークかつ強力な実験装置である。しかし STM では絶縁体試料を対象とすることができないため、例えば SiO_2 基板上に作成した劈開グラフェンへの応用はこれまで困難であった。また、試料全体の電気伝導特性は別の実験装置で測定する必要があり、同一試料に対して同一環境下で、STM による原子スケールの局所情報とマクロな伝導特性を直接比較することはできなかった。そこで我々は、今年度、ULT-STM に新らたに原子間力顕微鏡 (AFM) 機能と伝導特性測定機能を組み込んだ多機能の走査プローブ顕微鏡 (multi-functional scanning probe microscope; MF-SPM) に改良する開発を行い、現在その冷却テストを行っている。今後、カーボンナノチューブをはじめ、より広い物性研究に応用してゆく計画である。

本開発は、(株) ユニソクとの共同研究で進めている。

4.3.5 小型サブミリケルビン連続冷凍装置の開発

近年、試料の高品質化が進んだ物質科学研究や高感度な X 線・赤外線検出器など様々な分野で、サブミリケルビン温度域の実験環境が望まれている。通常、1 mK 以下の超低温生成には銅の核断熱消磁冷凍機を用いる。これは、8 T 近い最大磁場と 70 mm 以上のボア径をもつ大型の超伝導マグネットに 100 mK で 200 μW 以上の冷却能力をもつ ^{3}He-^{4}He 希釈冷凍機を組み合わせる必要があるので大型となり、実験ピットなど特殊仕様の実験室でなければ設置が難しい。さらに単発式冷却なので超低温を連続発生することはできない。そこで我々は、市販の希釈冷凍機あるいは衛星にまで搭載できるほど小型で、0.7 mK までの任意の温度を連続発生でき、かつ自動制御で取り扱いも簡便な “小型サブミリケルビン連続冷凍装置”の開発を進めている。

作業物質には増強核磁性体 $PrNi_5$ を用いる。van Vleck 常磁性物質である $PrNi_5$ に印加した外部磁場は、超微細相互作用を通じて Pr 原子核に実効的に 12 倍に増強した内部磁場を作る。そのため、1.2 T の磁場を印加すれば、8 T を印加した銅と同程度の冷却能力（単位体積当りのスピンエントロピー減少量）が得られる。そのため、断熱消磁用の超伝導ソレノイドを小型化でき、高透磁率体シールドで囲んで外界への遺漏磁場を抑えることも容易なので、外径 40 mm、長さ 150 mm 程度の断熱消磁ユニットを 2 つ直列に近接して設置することで小型化が実現できる。両ユニットの間と、混合器と 1 段目ユニットの間にそれぞれ Zn 超伝導熱スイッチを挿入することで、試料ステージの熱的バッファの役目を担う 2 段目ユニットから 1 段目ユニットへ、そして混合器へとエントロピーポンピングをして外界からの熱流入や試料部での発熱のもとでも超低温を連続して維持することが可能となる (図 4.3.4(a))。

今年度は、システム各部の概要設計を行い、熱スイッチの Zn フォイルと Ag フォイル間の接触熱抵抗をできるだけ低く押さえることが最低維持温度の性能を決める重要な要素であることが分かった。そこで、熱拡散接合の熱処理条件を実測から最適化し、電気抵抗換算で 50 nΩ 以下の低抵抗熱スイッチを製作できる目処が立った。

本開発は本学低温センターとの共同研究である。

4.3.6 走査型プローブ顕微鏡用ヘリウム循環冷却システムの開発

極低温走査型プローブ顕微鏡 (LT-SPM) は基礎研究分野で広く使われているが、その冷却方法はほぼ例外なく液体ヘリウムを寒剤とする浸漬式である。これは、機械式のパルス管冷凍機や GM 冷凍機が発生する振動ノイズを除去して、SPM の原子分解能を維持するのが技術的にかなり困難だからである。しかし、パルス管冷凍機を使ったヘリウム再凝縮装置を SPM とは隔離して設置し、両者を低振動伝達・低

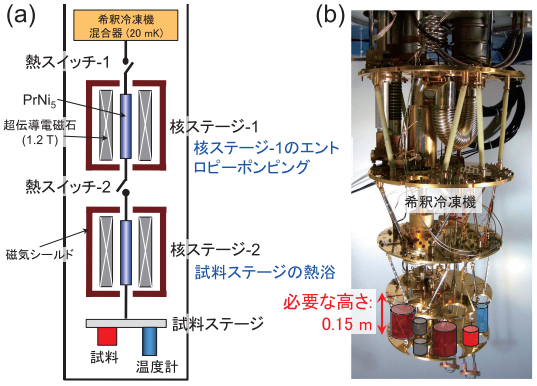

図 4.3.4: 小型サブミリケルビン連続冷凍装置の (a) 概念図と (b) 希釈冷凍機の混合器上に搭載したときの配置図。

熱損失の高性能な液体ヘリウム移送管で接続して循環冷却できれば、寒剤の再充填で中断することなく数日間にわたる連続 STS 測定が可能となり、エネルギー分解能が大きく向上する。また、液体ヘリウム寒剤が容易に入手できない地域での LT-SPM 利用も可能となる。一般のフロークライオスタットにこの移送管を使えば、液体ヘリウム消費量を低減できるなど、応用範囲は広い。我々は、この SPM 用ヘリウム循環冷却システムの開発を 2 年前から始め、今年度は、最も重要な構成要素である低振動伝達・低熱損失液体ヘリウム移送管の設計と製作、そしてその試作機の断熱性能を実測した。

移送管の断熱構造の設計に際しては、性能と製作の容易さの両立を図った。具体的には、SPM 側の気液セパレータから蒸発するヘリウムガスの一部を移送管内に帰還させて送液管を囲む熱シールドを冷却し、送液管への輻射熱と伝導熱を低減する、シンプルな断熱二重管方式を採用した。コの字型をした移送管の 2 カ所のコーナーには、溶接ベロー二つからなる T 字型除振機構を採用した。断熱性能のテスト実験の結果、入熱量 (ヒートリーク) は 0.21 W で、1 時間あたりに蒸発する液体ヘリウム量に換算して 0.29±0.06 L/h という性能をもつことが分かった。これは通常の移送管の蒸発量 (3~6 L/h) と比べて 1 桁以上高い断熱性能である。今後は、移送管の振動伝達率を実測し、再凝縮装置の設計製作を行う予定である。

本開発は、本学低温センターと (株) ユニソクとの共同研究で進めている。

＜報文＞

(原著論文)

[1] S. Nakamura, K. Matsui, T. Matsui, and H. Fukuyama, Possible quantum liquid crystal phases of helium monolayer, Physical Review B **94**, 180501(R) (2016).

(国内雑誌)

[2] 寺岡 総一郎、戸田 亮、福山　寛、技術ノート　ウェットかドライか？ 低温センターの TSCP 活動平成 27 年度　低温センター年報 pp.120-125 (2016).

(学位論文)

[3] 中山 和貴 : Studies of Electronic Properties of Nanocarbon Materials by Transport Measurement (ナノカーボン物質系の電子状態の輸送測定による研究) (博士論文).

[4] 中村 龍司 : 単原子層ヘリウム 3 の量子スピン液体状態の研究 (Studies of Quantum Spin Liquid State in Monolayer Helium Three) (修士論文).

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[5] Hiroshi Fukuyama, Sachiko Nakamura, Masahiro Kamada, Ryuji Nakamura, and Tomohiro Matsui: A possible quantum-liquid-crystal phase in helium monolayers adsorbed on graphite, International Conference on Quantum Fluids and Solids 2016 (QFS2016), (Prague, Czech Republic, Aug. 10-16, 2016).

(国内会議)

一般講演

[6] 戸田 亮、村川 智、福山 寛 : 小型超低温連続冷凍システムの開発 I、2016 年度春季 第 93 回 春季低温工学・超電導学会 (東京都、2016 年 5 月 30 日-6 月 1 日).

[7] 寺岡 総一郎、横田 統徳、佐々木 徹、宮武 優、福山 寛 : 走査プローブ顕微鏡用ヘリウム循環冷却システムの熱解析、2016 年度春季 第 93 回 春季低温工学・超電導学会 (東京都、2016 年 5 月 30 日-6 月 1 日).

[8] 福山 寛、中村 祥子、鎌田 雅博、中村 龍司、松井 朋裕 : 2 次元ヘリウムにおける量子液晶状態の可能性、日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学、2016 年 9 月 13-16 日).

[9] 松井 朋裕、宇佐美 潤、加藤 伸行、福山 寛 : 超流動フィルムフロー速度と基板表面粗さの関係、日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学、2016 年 9 月 13-16 日).

[10] 中村 祥子、藤井 武則、松川 将治、片桐 誠之、福山 寛 : シアネートエステル樹脂の低温物性、日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学、2016 年 9 月 13-16 日).

[11] 八幡 和志、松井 朋裕、福山 寛 : 液体ヘリウムの第二音波の学生実験教材開発 (I)、日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学、2016 年 9 月 13-16 日).

[12] 宇佐美 潤、加藤 伸行、松井 朋裕、福山 寛 : 超流動フィルムフローのフロー速度と基板表面粗さの関係、第 8 回 低温センター研究交流会 (東京大学、2017 年 2 月 23 日).

[13] 中村 祥子、藤井 武則、松川 将治、片桐 誠之、福山 寛 : シアネートエステル樹脂の低温物性、第 8 回 低温センター研究交流会 (東京大学、2017 年 2 月 23 日).

[14] Andre E. B. Amend、Hideki Sato、Tomohiro Matsui、Hiroshi Fukuyama : STS Studies of Graphene Edges Produced by Hydrogen-plasma Etching、第 8 回 低温センター研究交流会 (東京大学、2017 年 2 月 23 日).

[15] 戸田 亮、村川 智、福山 寛 : 小型超低温連続冷凍システムの開発、第 8 回 低温センター研究交流会 (東京大学、2017 年 2 月 23 日).

[16] 戸田 亮、村川 智、福山 寛 : 小型超低温連続冷凍システムの開発、総合技術研究会 2017 東京大学 (東京大学、2017 年 3 月 8-10 日).

[17] 寺岡 総一郎、戸田 亮、福山 寛 : ヘリウムリサイクルの優位性　低温センターの TSCP 活動、総合技術研究会 2017 東京大学 (東京大学、2017 年 3 月 8-10 日).

[18] 八幡 和志、松井 朋裕、中村 祥子、福山 寛 : 液体ヘリウムの第二音波の学生実験教材開発 (II)、日本物理学会 第 72 回年次大会 (大阪大学、2017 年 3 月 17-20 日).

[19] 横井 雅彦、河村 智哉、荒川 智紀、福山 寛、新見 康洋、小林 研介 : 表面弾性波を用いた超伝導 $NbSe_2$ 薄膜の伝導特性の変調、日本物理学会 第 72 回年次大会 (大阪大学、2017 年 3 月 17-20 日).

[20] Andre E. B. Amend, Hideki Sato, Tomohiro Matsui, and Hiroshi Fukuyama : STS Studies of Graphene Edges Produced by Hydrogen-plasma Etching、日本物理学会 第 72 回年次大会 (大阪大学、2017 年 3 月 17-20 日).

[21] 戸田 亮、村川 智、福山 寛 : 超小型サブミリケルビン連続冷凍システムの開発 II、日本物理学会 第 72 回年次大会 (大阪大学、2017 年 3 月 17-20 日).

[22] 中村 祥子、戸田 亮、青木 隆明、鈴木 基己、福山 寛 : 単原子層量子液晶ヘリウム 4 における超流動性の検証実験、日本物理学会 第 72 回年次大会 (大阪大学、2017 年 3 月 17-20 日).

招待講演

[23] 福山 寛 : 単原子層ヘリウムの新奇量子相〜量子液晶、超結晶、マヨラナ磁気素励起〜、日本物理学会 第 72 回年次大会 (大阪大学、2017 年 3 月 17-20 日).

(セミナー)

[24] 福山 寛 : 絶対零度への道とその風景、東京大学理学部 高校生のための春休み講座 2016 (東京大学、2016 年 4 月 4 日).

[25] 中山 和貴 : 金属型カーボンナノチューブ・ネットワークの低温物性、信州大学 環境・エネルギー材料科学研究所 セミナー (信州大学、2016 年 6 月 7 日).

[26] 福山 寛 : 宇宙の未来 : 極低温の世界、静岡東高校・研究室見学会講義 (東京大学、2016 年 8 月 5 日).

4.4 岡本研究室

本研究室では、低次元電子系等における新奇な物理現象の探索と解明を行っている。^{3}He-^{4}He 希釈冷

凍機を用いた 20 mK までの極低温および 15 T までの強磁場環境において、さまざまな独自技術により新しい自由度を持たせた研究を行っている。

4.4.1 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

近年、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。本年度はさらに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開始した。特に本研究では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。現時点おいてコバルトなどを用いた２次元電子系の作成に成功し、STM/S による磁性不純物の空間分布の観測に成功している。今後、局在スピン（磁性不純物）と伝導電子、局在スピン間の交換相互作用をトンネル分光法により実空間で精密に測定することにより、新奇な磁気的物理現象の観測を目指す。

4.4.2 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きた。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。特に、重い元素の単原子層膜においては、空間反転対称性の破れによって生じる２次元面に対する垂直方向のポテンシャル勾配が原子スピン軌道相互作用との結合することによって、Rashba 効果による大きなスピン分裂が期待できる。

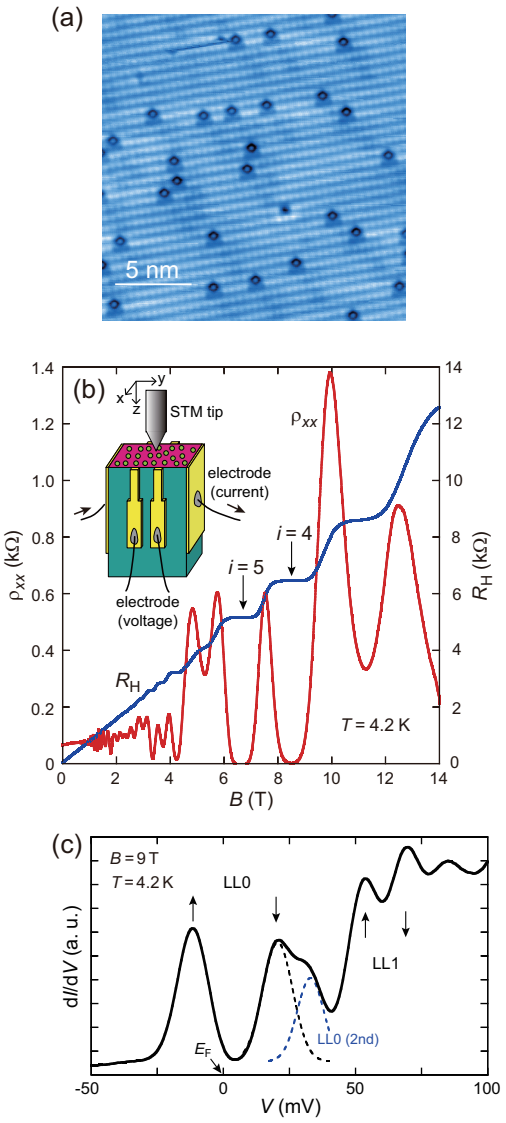

図 4.4.1: (a) InSb 劈開表面に鉄を 0.01 ML つけた場合の STM 像（20×20 nm^2）。黒い輪郭を持った丸が Fe であり、明るい縞模様が Sb の格子である。(b) 4.2 K における縦抵抗率とホール抵抗の磁場依存性。明瞭な整数量子ホール効果が観測されている。(c) 走査トンネル分光の測定例。微分コンダクタンスから２次元電子系の状態密度を調べることができる。ここでは、スピン分裂したランダウ準位が観測されている。

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

面内磁場印加可能な極低温走査トンネル顕微鏡の開発

半導体表面に形成された単原子層超伝導体は半導体基板と真空に挟まれているため、２次元面に対して垂直方向にポテンシャル勾配が生じ、空間反転対称性が破れている。さらに、Pb などの重い原子を用いた場合、強いスピン軌道相互作用により大きな Rashba 効果が生じ、スピン方向に依存してフェルミ面が分裂した系が実現すると考えられている。このような系において、強い面内磁場を印加した場合、有限の運動量をもったクーパー対が実現する可能性がある。本研究ではこの FFLO 状態に類する超伝導状態の実空間での直接観測を目指している。本年度はヘリウム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に着手した。来年度中には装置の開発を終え、試運転後に測定を開始する予定である。

磁場によって引き起こされる超伝導

外部磁場および磁性不純物は、クーパー対の時間反転対称性を破り、超伝導を壊す働きをすることが知られている。しかし、両者が結びつくことによる効果については明らかにされていない。外部磁場の効果として、軌道効果とパウリ常磁性効果が挙げられるが、磁性体を含む超伝導体においては、第三の効果、すなわち局在磁気モーメントの方向が外部磁場により変化することによる効果が考えられる。母体の超伝導体として Pb 超薄膜を用いれば、軌道効果とパウリ常磁性効果にかき消されてしまうことなしに、磁性体を通じた効果のみを調べることが期待できる。本年度、庭田が中心となり、いくつかの磁性体を不純物として加えた Pb 超薄膜に対して研究を行い、多くの試行錯誤の結果、磁場誘起超伝導の観測に成功するとともに超伝導超薄膜表面に吸着した磁性体の電子状態に対する知見を得た。

磁性不純物として Ce を用いた場合に、最も顕著な振る舞いが観測された。ただし、Ce と Pb との磁気相互作用は弱く、単体 Pb 超薄膜表面上に Ce 原子を吸着させるだけでは、強い効果が得られなかったので、合金の超薄膜（$d = 1.1$ nm）を作製した。7.4%の Ce を含む合金超薄膜では、ゼロ磁場中の超伝導転移温度は Pb 単体膜の値（$T_c \sim 3$ K）から 0.6 K へ大きく引き下げられたが、平行磁場の印加により大きく上昇することが明らかになった。さらに、10%の Ce を含む合金超薄膜では、ゼロ磁場中では超伝導の兆候は見られず、強い平行磁場を印加したときにだけ超伝導が観測された。また、軌道効果による超伝導破壊を調べたところ、トータル磁場の増加に伴って超伝導領域の幅が広くなり、この測定においても平行磁場により超伝導が安定化することが確認された。

磁場によって超伝導が壊されることは 1914 年の Kamerlingh Onnes の実験以降、広く知られているが、磁場によって超伝導が誘起される現象はこれまでに数例しか報告されていない。スピン三重項超伝導体と考えられている URhGe を除くと、いずれも Jaccarino-Peter（JP）機構によって説明されている。JP 機構では、伝導電子は磁性元素の局在磁気モーメ

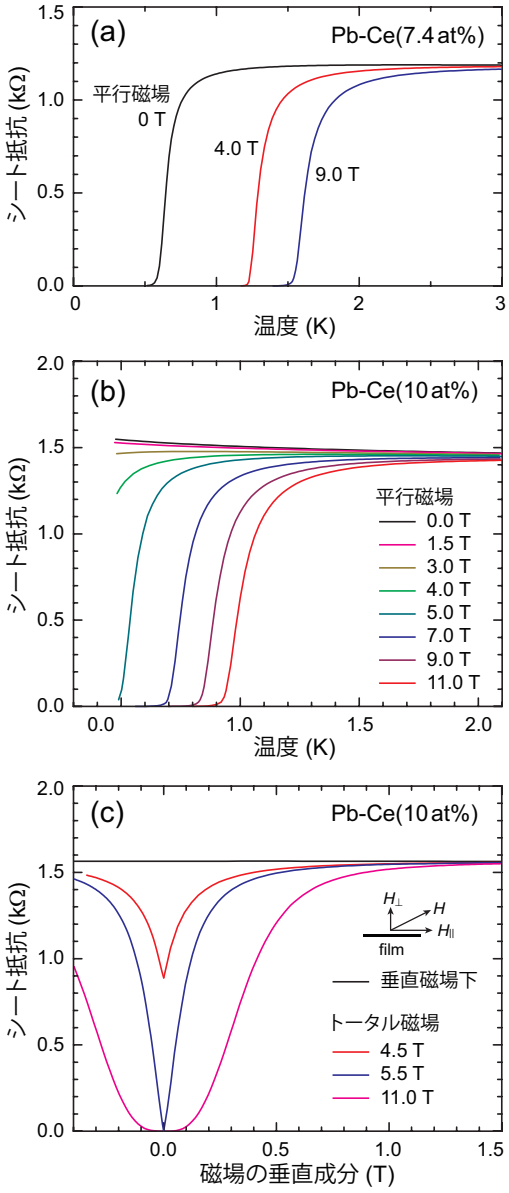

図 4.4.2: Pb-Ce 合金超薄膜で観測された磁場誘起超伝導。(a) 7.4%の Ce を含む合金超薄膜のシート抵抗の温度依存性。平行磁場の印加とともに超伝導転移が高温側にシフトしている。(b) 10%の Ce を含む合金超薄膜のシート抵抗の温度依存性。この試料ではゼロ磁場では超伝導は観測されずに、平行磁場中でのみ超伝導が出現する。(c) 磁場を垂直方向に印加、あるいは磁場の大きさを変えずに磁場の方向を平行位置から回転させたときのシート抵抗の変化を磁場の垂直成分に対してプロットしたもの。

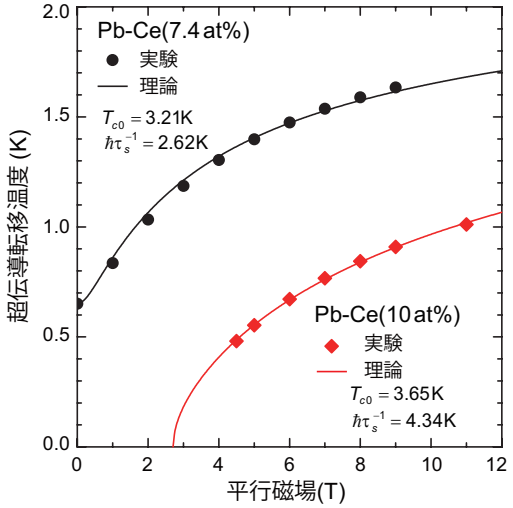

図 4.4.3: Pb-Ce 合金超薄膜の超伝導転移温度の平行磁場依存性。実線は、Kharitonov と Feigelman の理論に基づく計算。

ントとの交換相互作用に由来する平均場の影響を受ける。交換相互作用の符号が反強磁性的である場合、外部磁場は磁性体からの平均場によるパウリ常磁性効果を打ち消すことになり、外部磁場の大きさが適当な範囲にあるときに超伝導が出現することになる。しかし、我々の系では、パウリ常磁性効果は非常に抑制されていると考えている。単体 Pb におけるパウリ限界による臨界磁場は 100 T 程度と見積もられており、今回の磁場誘起超伝導に要した磁場よりも２桁大きい。平均場がゼロであるはずのゼロ磁場で超伝導が最も不安定であることなども併せると、今回観測した磁場誘起超伝導が JP 機構によるものだとは考えにくい。

伝導電子と磁性不純物との交換相互作用は、平均場を与えるだけではなく、磁気散乱を引き起こすことにより超伝導を破壊する。Kharitonov と Feigelman (KF) は、この効果の磁場依存性を詳細に計算し、磁場による超伝導転移温度の上昇と磁場誘起超伝導の可能性を指摘した。彼らの理論は我々の実験結果をよく説明する。磁気散乱が無い場合の超伝導転移温度を T_{c0}、磁気散乱時間を τ_s とすると $\hbar\tau_s^{-1} > 0.88 k_B T_{c0}$ に対してゼロ磁場で超伝導が観測されなくなるが、今回の二つの試料は丁度この前後にあると考えられる。KF の計算によれば、磁場効果は磁性体のスピンが小さいほど大きい。Ce のスピンは 1/2 であり、顕著な磁場効果が観測できた原因の一つであると考えている。

磁気モーメントと伝導電子との相互作用は、$4f$ より $3d$ 遷移元素の方が大きい。実際、Ce の場合とは対照的に、Mn や Cr をわずかに蒸着するだけで Pb 超薄膜の超伝導転移温度は大きく下がる。しかし、Mn や Cr を Pb 超薄膜に直接乗せた場合には、Ce で見られたような平行磁場による超伝導転移温度の上昇は見られなかった。交換相互作用が強すぎるために

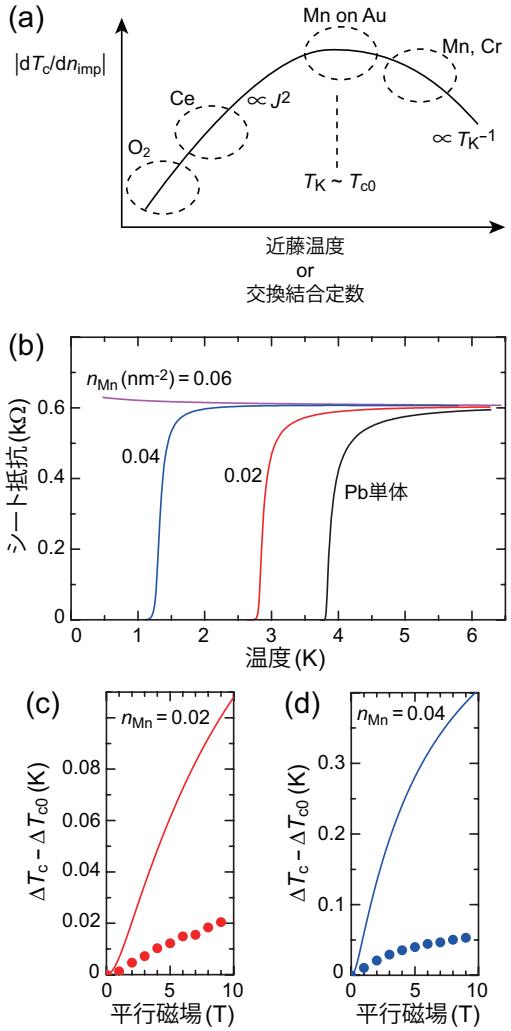

図 4.4.4: (a) 磁性原子濃度に対する超伝導転移温度の変化率が交換結合の大きさによって変化する様子を示した概念図。(b) 約 1 原子層の Au で覆った後で Mn を蒸着した Pb 超薄膜のシート抵抗の温度依存性。Ce の場合よりも、わずかな蒸着量で T_c が大きく減少する。(c) 超伝導転移温度の平行磁場による変化。Pb 単体での変化を引いている。実線は、Kharitonov と Feigelman の理論に基づく計算。

近藤一重項が形成され、磁気モーメントが見かけ上消失したためだと考えられる。$T_K \gg T_{c0}$ において、近藤一重項の形成はクーパー対に参加する電子の数を減らし、実効的な斥力として働く。T_K が下がるほど、フェルミ面近くの電子の寄与が大きくなって、不純物量に対して超伝導転移温度が敏感に変化する。一方で、$T_K \ll T_{c0}$ では、感度は交換相互作用の大きさの自乗に比例する。Ce の場合は、この領域にあると考えている。

Mn の局在スピンと伝導電子との交換結合を弱めるために、Pb 超薄膜の表面を約 1 原子層の Au で覆い、その上から Mn を蒸着した。Mn 蒸着に対する超伝導転移温度の減少率は Au を挟まない場合よりもさらに大きくなり、平行磁場に対する超伝導転移温度の上昇が観測されるようになった。ただし、変化量は KF の理論に基づく計算値よりも小さく、$T_K \sim T_{c0}$ で近藤一重項の形成が部分的に緩んだ領域にあると考えている。

酸素分子は $S = 1$ のスピンをもつ。酸素分子を物理吸着させた Au や Ag の表面に対して STS 測定を行った先行研究において、100 K 程度以下の温度領域で近藤一重項が形成される可能性が指摘されている。このことは、酸素分子と金属の伝導電子との間に強い交換結合が存在することを意味する。この検証のため、我々は Pb 超伝導薄膜を 1 原子層程度の Au または Ag で覆った後、酸素分子を物理吸着させて、超伝導転移温度の変化を調べた。酸素の分子の吸着に伴う T_{c0} の減少が観測されたが、その大きさは全面が酸素に覆われたと思われる吸着量においても 0.3 K 程度であった。少なくとも我々の系においては、酸素分子と伝導電子との間に交換結合はあるものの、近藤一重項を形成するには不十分な大きさであることが示された。

＜報文＞

(国内雑誌)

[1] 枡富龍一、岡本徹: 走査トンネル顕微鏡と電気抵抗測定で探る量子ホール効果, 東京大学低温センター 平成 27 年度年報, 6-12 (2016).

[2] 岡本徹、枡富龍一: 単原子層超伝導と空間反転対称性の破れ, 固体物理 **52**, 97-103 (2017).

(学位論文)

[3] 庭田正人: 「Pb 超薄膜の超伝導に対する磁性不純物効果の平行磁場による制御」(修士論文)

[4] 笛田健人: 「イオン液体を用いた GaAs への電界ドーピング」(修士論文)

＜学術講演＞

(国内会議)

一般講演

[5] 庭田正人、枡富龍一、岡本徹: 磁性体を吸着した Pb 超薄膜における平行磁場による超伝導の増強, 第 8 回低温センター研究交流会 (東京大学小柴ホール) 2017 年 2 月 23 日.

[6] 庭田正人、枡富龍一、岡本徹: Pb 超薄膜超伝導に対する磁性不純物の影響と平行磁場印加による超伝導転移温度の上昇, 日本物理学会 第 72 会年次大会 (大阪大学) 2017 年 3 月 17 日-20 日.

4.5 島野研究室

島野研究室では、レーザー分光の手法を用いて、凝縮系における光と物質の相互作用の解明、光励起によって発現する多体の量子現象、量子凝縮相の探求に取り組んでいる。特に、低エネルギー (テラヘルツ周波数帯) に発現する素励起 (マグノン、励起子内部遷移、プラズモン、準粒子ギャップ、集団モード) に着目し、それをプローブとして、広範な物質群を対象にその基底状態の性質を明らかにするとともに、光による量子凝縮相の実現やその制御を行うことをテーマとしている。最近では、光による物質相制御の観点から、光励起によって生じる超高速時間領域の相転移現象や、光励起状態で現れる新規量子相の観測とそのダイナミクスの解明に関する研究を行っている。本年度は、以下に挙げる研究を進めた。

4.5.1 半導体電子正孔系の高密度励起現象

励起子モット転移

半導体中に高密度に光励起された電子正孔系はその密度、温度に依存して励起子ガス、電子正孔プラズマ、電子正孔液体といった多彩な相を示すことが知られている。十分低温下では、励起子ボース-アインシュタイン凝縮 (BEC) や電子正孔バーディーン-クーパー-シュリーファー (BCS) 状態 (励起子絶縁体とも呼ばれる) といった量子凝縮相が発現すると考えられている。電子正孔対密度の増加に伴う絶縁的な励起子気体相から金属的な電子正孔プラズマ相への移行は励起子モット転移と呼ばれ、絶縁体金属転移の典型問題の一つとして長い研究の歴史がある。古くはランダウやモットによって長距離のクーロン相関が働く系では (半導体電子正孔系のような連続自由度の系であっても) モット転移が低温で 1 次相転移になる可能性が議論されていたが、モット転移密度近傍の中間密度領域で電子相関の効果を理論的に扱うことは難しく、未だに結論に至っていない。実験的にも、高温域ではクロスオーバーになることは明らかにされてきたが、低温での励起子モット転移は未解明の問題である。

我々はこの問題に、テラヘルツ (THz) 分光法という新たな手法で取り組んできた。多くの半導体では、励起子の束縛エネルギーが THz 周波数帯にあり、電子正孔系が励起子を形成しているか、あるいは励起子が解離した自由な電子正孔気体となっているかは、THz 帯の誘電関数や光学伝導度のスペクトルから明確に判別できるためである。さらに、励起子を共鳴的に光励起することで、電子正孔系に余剰エネルギーを与えずに低温高密度の励起子を初期状態として用意し、その後系がどのように時間発展するかを調べることとした。このために、直接遷移型半導体 GaAs を対象として実験を行った。その結果、モット転移密度を超えた高密度領域において、電子正孔間のクーロン相互作用に起因すると考えられる異常金属的な状態が過渡的に発現することが明らかになった。異常金属状態とは、電子相関効果によって電子の有効

質量が増大し、対応して電子の平均散乱時間の逆数に相当する緩和定数が周波数依存性を示し、低エネルギー領域の光学伝導度が自由な（相関のない）ドルーデ型の応答と比べて大きく抑制されているような金属の状態である。実験で得られた THz 帯光学伝導度スペクトルに対して、拡張ドルーデモデルを用いて解析すると、このような異常金属的な振る舞いが見出された。異常金属の状態はモット絶縁体近傍の金属相や銅酸化物高温超伝導体における常伝導相で観測されるが、半導体電子正孔系で観測されたのは今回が初めての例である。さらに、この異常金属的振る舞いは、バンド間光励起された電子正孔プラズマ状態では観測されず、電子正孔間のクーロン相互作用に起因する低温高密度相であることがわかった。これらの特徴から、観測された異常金属状態は、約半世紀前からその存在が理論的に予言されている電子正孔 BCS 状態の前兆であると解釈して矛盾がない。さらに、励起子共鳴励起後の励起子モット転移のダイナミクスを調べたところ、光励起後はまず過飽和な低温高密度励起子状態が生成され、その後、密度に依存する潜伏期間を経たのちに異常金属状態に至ることが明らかになった。この振る舞いを理解するために、いったん励起子が解離し自由な電子正孔対ができるとクーロン相互作用の遮蔽効果が強くなり、より一層励起子の解離が進むというフィードバック効果を考慮し、加えて励起子と自由な電子正孔対との間の詳細釣合いの条件を課したレート方程式による数値シミュレーションを行ったところ、励起子モット転移の 1 次転移性や潜伏期間の発現など、実験結果と整合する結果を得ることに成功した。

続いて、励起子共鳴励起による励起子モット転移の際に、化学ポテンシャルがどのように変化しているかを明らかにするために、光ポンプ光プローブ分光によるバンド間遷移の光吸収スペクトルの振る舞いを調べた。その結果、化学ポテンシャルを反映すると考えられる差分透過スペクトルの符号変化の位置が、励起子モット転移の前後でステップ的に時間変化する様子が観測された。これは、励起子のイオン化率の不連続な跳びを示唆していると考えられ、励起子モット転移の 1 次転移性を反映していると考えられる。今後は試料構造の最適化を行い、化学ポテンシャルの位置を直接決定する実験を行うことを計画している。

励起子間相互作用の定量評価

近年、励起子と共振器光子が結合した共振器ポラリトン系で、斥力相互作用を反映したポラリトン凝縮状態の基底エネルギーのシフトが観測され、冷却原子系の BEC における平均場エネルギーシフトとの類似性が議論されている。励起子 BEC においても同様に、高密度下では励起子間相互作用の大きさを反映して励起子のエネルギー分散が変化すると期待される。励起子間相互作用は、これまで主に量子井戸系を舞台に実験・理論の両面で定量的に議論され、発光・吸収スペクトル計測や四光波混合過程などの非線形光学応答を通して詳しく調べられてきたが、バルクの励起子系ではその絶対値の定量評価はほとんどなされていなかった。そこで、高品質の直接遷移型半導体 GaAs を用いて近赤外光ポンプ-プローブ分光を行い、励起子共鳴励起下でのエネルギーシフトの定量評価を行った。また、相互作用パラメータを決定するために、同じ光励起条件のもとで THz 分光測定により励起子密度の定量評価を行った。円偏光励起により初期状態としてスピン偏極した低温の軽い正孔 1s 励起子を高密度に生成すると、軽い正孔 1s 励起子と重い正孔 1s 励起子の吸収ピークがともに高エネルギーシフトする様子が観測された。一般に励起子実励起に伴う吸収ピークの高エネルギーシフトは励起子を構成する電子・正孔のパウリの排他効果が主要因であると解釈されてきた。しかし、本研究で観測されたピークシフトは、その偏光依存性からパウリの排他効果では説明することができず、低温高密度の励起子系の特徴を反映した励起子間相互作用に起因することを示唆する結果を得た。

4.5.2 超伝導体の光応答・光制御

我々はこれまでに非線形光学結晶 $LiNbO_3$ による光整流発生過程を利用した高強度 THz 波パルス光源の開発に成功し、THz 波による物質相制御に向けた研究を行ってきた。そしてこの開発した光源を用いて、s 波超伝導体 $Nb_{1-x}Ti_xN$ における秩序パラメーターの振幅の振動に相当する集団励起モード、いわゆるヒッグスモードの観測に成功したことをこれまでに報告してきた。

本年度は、NbN の非線形感受率においてヒッグスモードがどの程度寄与するかを明らかにする偏光分解 THz 高次高調波分光の他、銅酸化物高温超伝導体や鉄系超伝導体に対して高強度 THz 波を用いた時間分解測定を行い、集団励起の存在や非平衡ダイナミクス、超伝導秩序形成とクーパー対形成の相関を調べた。また銅酸化物高温超伝導体において THz 帯に現れる c 軸ジョセフソンプラズマ共鳴を観測し、光励起非平衡状態における振る舞いから、強い光励起が CuO 面間ジョセフソン結合にどのような影響を与えるかを調べた。

ヒッグスモードと電荷密度揺らぎの分離

超伝導ギャップ周波数以下の強い THz 波パルスを NbN 超伝導薄膜に入射すると、その第三高調波 (THG) が発生し、さらに入射周波数の 2 倍の周波数が超伝導ギャップ 2Δ と一致したとき THG 強度が最大になる (2014 Science)。この結果は非線形感受率に現れるヒッグスモードと電磁波の共鳴効果として解釈することができる。

一方、この THG には個別励起である電荷密度揺らぎの寄与も存在しうることがわかってきた。BCS 平均場近似の範囲ではむしろ電荷密度揺らぎの寄与の方が大きいと考えられたが、現実の系では電子-格子相互作用の遅延効果や不純物散乱のように平均場近似では取り扱われない機構があり、平均場近似ではヒッグスモードの寄与を何桁も過小評価してしま

うことも最近明らかにされた。そこで多体効果の近似方法に依らず 2 つの機構の寄与を明確に区別するため、我々は結晶の対称性と THz 波の偏光を用いた実験手法に着目した。

単結晶 (100)NbN 薄膜試料を用いて、入射電場の偏光方向を結晶軸に対して回転させながら非線形 THz 透過測定を行い、THG を観測した。THG 強度は 3 次非線形感受率の絶対値の 2 乗に比例する。電荷密度揺らぎに由来する非線形感受率はバンド分散に大きく依存するため、電荷密度揺らぎの寄与が支配的であれば、fcc 構造を持つ NbN において入射電場の偏光が [100] から [110] に変わると THG 強度は大きく増強することが予測された。しかし実験では入射 THz 波の偏光の変化に対し、THG 強度はほぼ一定であった。これは s 波秩序パラメーターの等方性を反映してヒッグスモードが THG に大きく寄与していることを意味している。さらに入射電場と垂直な偏光方向における THG が全く観測されないことからも、ヒッグスモードの寄与が支配的であるという結論を得た。

この結果は、NbN のように電子-格子相互作用が強く働く超伝導体の非線形感受率においては、フォノンの遅延効果等によって平均場近似が破綻しており、ヒッグスモードの寄与を著しく過小評価してしまうことを意味している。この結果は同時に、古くから超伝導体のラマン散乱測定において対破壊ピーク（電荷密度揺らぎ）と解釈されてきたスペクトルについても実際には集団励起が大きく寄与している可能性を示唆している。

銅酸化物高温超伝導体におけるヒッグスモードの観測

d 波のペアリング対称性を持つ銅酸化物超伝導体の性質に着目し、複数のドープ濃度のバルク $Bi_2Sr_2CaCuO_8$ 結晶に対して、高強度 THz 波パルス励起実験を行った。銅酸化物高温超伝導体では、軌道自由度との混成を考慮すると d 波ペアリング対称性を反映した複数のヒッグスモードが存在しうることが理論的に予測されている。一方で、s 波超伝導体と異なり超伝導ギャップにノードがあるため、ヒッグスモードから個別励起への強い緩和により過減衰となることも予測され、実験による観測が待たれている。そこで我々は、d 波超伝導体におけるヒッグスモードの観測を目指し、高強度 THz 波を $Bi_2Sr_2CaCuO_8$ に照射し、誘起された非平衡ダイナミクスを可視光の反射率変化を通して測定した。

その結果、反射率変化には転移温度以下で顕著となる THz 波パルス電場の 2 乗に追随するコヒーレントな信号成分と、THz 波パルス励起後も有限寿命残存するインコヒーレントな信号成分が現れることが分かった。インコヒーレントな信号は温度に依存して符号が敏感に変化し、可視光で励起した際のダイナミクスと類似していることから、THz 波パルスによる準粒子励起であると考えられる。一方でコヒーレントな信号は、転移温度以下で急速に増大することから超伝導秩序の発達に伴うものと結論された。ポンプとプローブの電場の偏光を結晶軸に対して様々な組み合わせで測定したところ、ポンプとプローブの電場の偏光に依存しない全対称な成分が見出された。この信号は、非共鳴条件で励起されたヒッグスモードの強制振動を反映している可能性が高いと考えられる。今後はドープ濃度の違いによるダイナミクスの違いを詳細に解析し、THz 波励起による非平衡ダイナミクスの起源を明らかにしていく予定である。さらに、超流動成分に敏感なプローブとして THz 波パルスを用い、THz 波励起後の秩序パラメーターのダイナミクスを追究していく。

光励起銅酸化物高温超伝導体における c 軸ジョセフソンプラズマ共鳴

超伝導体では、対称性の自発的破れに伴い発現する位相自由度の集団励起である位相モード（南部-ゴールドストーンモード）は、アンダーソン-ヒッグス機構によって消失し、代わりにゲージ場であるフォトンが質量を獲得し、有限周波数のプラズマ振動として現れる。銅酸化物高温超伝導体ではこれは、2 次元 CuO 面の積層方向である c 軸方向の THz 帯反射率に明瞭なプラズマエッジとして観測される。このプラズマ振動は CuO 面間のジョセフソン結合に由来しており、超伝導のバルクコヒーレンスを直接反映する。このためその振る舞いが盛んに研究されてきた。最近では光誘起超伝導状態のプローブとしても利用されているが、光励起の役割や超伝導秩序パラメータのダイナミクスは必ずしも明らかではない。そこで我々は光で強く励起した非平衡状態における銅酸化物超伝導の性質を、ジョセフソンプラズマ共鳴の振る舞いを観測することで詳しく調べることとした。

最適ドープした超伝導体 $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ に対して、近赤外のフェムト秒パルスレーザーで励起すると、ジョセフソンプラズマ周波数が低エネルギー側にシフトする様子が観測された。さらに、1 mJ/cm^2 を超えるほどの励起密度で強励起すると、高エネルギー側から新たな反射率のピークが現れることがわかった。複素誘電率解析から損失関数スペクトルと光学伝導度スペクトルを求めると、元々の縦モードのジョセフソンプラズマ共鳴に加えて、もう一つの縦モードが出現し、それに付随して新たに横モードも出現したことを示していた。これは光励起によって超伝導状態が c 軸方向に周期的に変調を受け、自発的に超周期構造をとっていることを示唆しており、現在、その詳細な解析を進めている。

鉄系超伝導体 $FeSe_{1-x}Te_x$ における超伝導揺らぎの観測

フェルミオン系の対凝縮現象である BCS 超伝導・超流動状態は、フェルミオン間の引力相互作用を強めていくと、やがてボソン系の凝縮現象である BEC 状態へと連続的に接続するとされ、この現象は BCS-BEC クロスオーバーと呼ばれている。弱結合極限の BCS 領域ではフェルミオンはクーパー対形成と同

時に凝縮状態へと相転移するが、中間のクロスオーバー領域では対形成が転移温度より高温から始まると考えられている。BCS-BEC クロスオーバー現象はこれまで冷却原子系で盛んに研究されてきたが、固体系、すなわち多電子系において前例がなくその性質は未解明であった。近年発見された鉄系超伝導体 $FeSe_{1-x}Te_x$ は、フェルミエネルギーと超伝導ギャップがともに数 meV 程度と同程度であることからこのクロスオーバー領域に位置する特異な系であることが示唆されている。

我々はパルスレーザー堆積法により作成された CaF_2 基板上の $FeSe_{1-x}Te_x$ 薄膜 ($x = 0.2, 0.4$) に対して THz ポンプ-THz プローブ分光を行い、非平衡状態のダイナミクスの観測を行った。その結果、転移温度 T_c 以下では、THz ポンプ光による超伝導クーパー対の破壊とその回復のダイナミクスを観測した。一方、T_c 以上においても T_c 以下のときと類似のポンププローブ信号が現れることを見出した。この信号は、転移温度以上でも THz 波によって励起される成分が存在することを示唆している。この信号の有力な起源として転移温度以上で存在するクーパー対、すなわち超伝導揺らぎが考えられる。一方、Te ドープ量 $x < 0.2$ の試料で超伝導転移温度以上で構造相転移が生じることが知られている。$x > 0.2$ では $x < 0.2$ で現れるような T_c 以上での構造相転移は抑制されているが、ポンププローブ信号の起源として構造相転移の影響が残存している可能性も排除できない。そこで今後は、より系統的に Te ドープ濃度の異なる試料に対してポンププローブ分光を行うことで、クーパー対形成温度を明らかにしていく予定である。

4.5.3 ランダウ量子化したグラフェンの非摂動論的光学応答

炭素原子が蜂の巣格子状に 2 次元配列したグラフェン中の電子は、その運動エネルギーが結晶運動量に比例するという特異な性質を持ち、相対論的粒子である質量ゼロ・ディラック粒子とみなすことができる。このため、グラフェンに垂直に磁場を印加すると、通常の 2 次元電子系では磁場 B に比例するサイクロトロン周波数の間隔でランダウ準位が等間隔に形成されるのとは異なり、準位間隔が $B^{1/2}$ に比例し、かつ非等間隔なディラック電子系に特徴的なランダウ準位が形成される。さらに、ランダウ準位間の双極子モーメントは磁気長程度の距離で決定される非常に巨大な値を持つため、ランダウ準位間エネルギーに相当する THz 帯や中赤外領域においてディラック電子系のランダウ準位における非調和性に基づいた大きな非線形光学効果が発現することが予測される。また高強度 THz 波パルスを用いると、ラビ周波数が相互作用する THz 波の周波数を大きく上回る非摂動論的な強結合領域に到達できると期待される。

この強結合領域での光と物質との相互作用を調べるために、我々は 4H − SiC(0001) 基板上にエピタキシャル成長した単層グラフェンを対象に磁場下での THz ポンプ THz プローブ分光を行った。観測されたポンププローブ信号から、右（左）回り円偏光に対する光学伝導率スペクトルを抽出した。直線偏光 THz 波ポンプ下では、右回り円偏光に対して吸収飽和が、左回り円偏光に対して誘導吸収が生じることがわかった。ランダウ準位間遷移に対する光学遷移選択則を考慮すると、右回り円偏光に対する吸収飽和はフェルミエネルギー付近の電子の励起によるパウリの排他効果を反映しているものと理解された。一方、左回り円偏光で観測された誘導吸収は、フェルミエネルギーよりはるか下の価電子帯のランダウ量子化した占有準位に THz 波パルス励起下で空孔が生じたことを意味する。この実験で観測された非線形 THz 応答の起源を定量的に理解するため、回転波近似を用いずに密度行列の運動方程式を数値的に解くことによってシミュレーションを行った。電子の緩和機構として電子-不純物散乱に加え、電子-格子相互作用行列を数値的に計算することによって電子-格子散乱も考慮した。得られた数値シミュレーション結果は、右（左）回り円偏光に対して観測された吸収飽和（誘導吸収）をよく再現した。実験と理論との比較により評価したラビ周波数は実際に THz 波の中心周波数を大きく上回っていることも確認され、THz 波パルスの励起強度依存性は実験、シミュレーションともに電磁波との相互作用が非摂動論的領域に達していることを示した。以上の結果から、ランダウ量子化したグラフェンは強結合領域での光と非線形光学応答を探求する舞台となるとの結論を得た。

＜受賞＞

[1] Kaito Tomari: Best Poster Award at International Conference on Low-Energy Electrodynamics in Solids 2016 (2016 年 6 月)

＜報文＞

(原著論文)

[2] Ryusuke Matsunaga and Ryo Shimano: Nonlinear terahertz spectroscopy of Higgs mode in s-wave superconductors, Phys. Scr. **92**, 024003 (2017).

[3] Fumiya Sekiguchi,Toshimitsu Mochizuki, Changsu Kim, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, and Ryo Shimano: Anomalous metal phase emergent on the verge of an exciton Mott transition, Phys. Rev. Lett. **118**, 067401 (2017).

(会議抄録)

[4] Ryusuke Matsunaga and Ryo Shimano: Higgs mode excitation in superconductors by intense terahertz pulse, Proceedings of SPIE 9835, Ultrafast Bandgap Photonics, 98351G (2016).

[5] Fumiya Sekiguchi, Changsu Kim, Hidefumi Akiyama, and Ryo Shimano: Exciton Mott transition in GaAs studied by terahertz spectroscopy, Proceedings of SPIE 10102, Ultrafast Phenomena and Nanophotonics XXI, 101020T (2017).

(学位論文)

[6] 湯本郷：”Ultrafast nonlinear optical responses of Landau-quantized graphene in the terahertz range”（博士論文）

[7] 泊開人：「高温超伝導体 $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ の光励起非平衡状態におけるテラヘルツ分光」（修士論文）

[8] 室谷悠太：「過渡吸収分光による GaAs 中に光励起された低温電子正孔系の研究」（修士論文）

(プレスリリース)

[9] 島野亮、関口文哉、秋山英文：「光照射した極低温の半導体で異常な金属状態を発見」、2017 年 2 月 8 日

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[10] Kaito Tomari, Yuki I. Hamada, Ryusuke Matsunaga, Hiroshi Eisaki, and Ryo Shimano: Photoexcited nonequilibrium dynamics of c-axis Josephson plasma in $La_{2-x}Sr_xCuO_4$, Low Energy Electrodynamics in Solids 2016, Shiga, Japan, May 30, 2016.

[11] Yuki I. Hamada, Keisuke Tomita, Kaito Tomari, Ryusuke Matsunaga, Lee Jiang Hao Kegan, Setsuko Tajima, and Ryo Shimano: Terahertz nonlinear response in an optimally-doped $YBa_2Cu_3O_7$ single crystal, Low Energy Electrodynamics in Solids 2016, Shiga, Japan, May 30, 2016.

[12] Go Yumoto, Ryusuke Matsunaga, Hiroki Hibino, and Ryo Shimano: Ultrafast terahertz nonlinear effect of Landau level transition in graphene, CLEO:2016, San Jose, USA, June 7, 2016.

[13] Fumiya Sekiguchi, Changsu Kim, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, and Ryo Shimano: Mott transition in excitonic system, International Symposium on New Horizons in Condensed Matter Physics , Tokyo, Japan, June 19, 2016.

招待講演

[14] Ryusuke Matsunaga and Ryo Shimano: Higgs mode excitation in superconductors by intense terahertz pulse, SPIE DCS Defense+Security: Ultrafast Bandgap Photonics, Baltimore, USA, April 20, 2016.

[15] Ryo Shimano: Nonlinear THz spectroscopy of collective modes in superconductors, Low Energy Electrodynamics in Solids 2016, Shiga, Japan, June 2, 2016.

[16] Ryo Shimano: Ultrafast Nonlinear Terahertz Spectroscopy of Quantum Condensates in Solids, CLEO:2016, San Jose, USA, June 7, 2016.

[17] Ryo Shimano: Study of nonequilibrium responses in quantum matter - from QHE to superconductor, International Symposium on New Horizons in Condensed Matter Physics, Tokyo, Japan, June 18, 2016.

[18] Ryusuke Matsunaga and Ryo Shimano: Higgs amplitude mode in superconductors studied by nonlinear terahertz spectroscopy, Spectroscopies in Novel Superconductors, Stuttgart, Germany, June 21, 2016.

[19] Ryusuke Matsunaga: Collective Higgs amplitude mode in superconductors studied by strong terahertz pulse, International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids, Paris, France, July 21, 2016.

[20] Ryo Shimano: Ultrafast spectroscopy of Higgs modes in superconductors, International Research School: Electronic States and Phases Induced by Electric or Optical Impacts IMPACT 2016, Aug 26, 2016.

[21] Fumiya Sekiguchi, Changsu Kim, Hidefumi Akiyama, and Ryo Shimano: Exciton Mott transition in GaAs studied by terahertz spectroscopy, Ultrafast Phenomena and Nanophotonics XXI, San Francisco, USA, Jan. 28, 2017.

[22] Go Yumoto and Ryo Shimano: Nonlinear optical responses of non-equidistant Landau levels in graphene in terahertz frequency range, The 6th International Workshop on Far-Infrared Technologies and The 2nd International Symposium on Development of High Power Terahertz Science and Technology, Fukui, Japan, Mar. 9, 2017.

(国内会議)

一般講演

• 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 13-16 日、金沢大学）

[23] 濱田裕紀, 富田圭祐, 泊開人, 松永隆佑, 李祈願, 宮坂茂樹, 田島節子, 島野亮：$YBa_2Cu_3O_y$ 単結晶におけるテラヘルツ波パルス誘起超高速コヒーレント非線形光学応答

[24] 室谷悠太, 高山正行, 松永隆佑, 関口文哉, 金昌秀, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, 島野亮：光ポンプ-テラヘルツポンプ-光プローブ分光による励起子モット転移ダイナミクスの観測

[25] 湯本郷, 松永隆佑, 日比野浩樹, 島野亮：強磁場下単層グラフェンの非等間隔ランダウ準位に基づく超高速非線形テラヘルツ応答

• 第 7 回東京大学低温センター研究交流会 (2017 年 2 月 23 日、東京大学）

[26] 泊開人, 濱田裕紀, 松永隆佑, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮：高温超伝導体 $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ の光励起非平衡状態における c 軸ジョセフソンプラズマの観測

[27] 澤野拓也, 関口文哉, 松永隆佑, 島野亮：黒リンの光ポンプテラヘルツプローブ分光

[28] 湯本郷, 松永隆佑, 島野亮：単層グラフェンにおける非等間隔ランダウ準位の超高速非線形テラヘルツ応答

[29] 高山正行, 室谷悠太, 金昌秀, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, 島野亮: バルク GaAs における低温高密度励起子状態での励起子間相互作用の研究

[30] 室谷悠太, 高山正行, 金昌秀, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, 島野亮：THz 電場によるイオン化を用いた励起子モット転移ダイナミクスの観測

[31] 松永隆佑, 島野亮：超伝導体 NbN の非線形感受率における Higgs モードと電荷密度揺らぎの寄与

[32] 勝見恒太, 濱田裕紀, 松永隆佑, R.D. Zhong, J. Schneeloch, G.D. Gu, Y. Gallais, 島野亮: 高温超伝導体 $Bi_2Sr_2CaCuO_{8+x}$ 単結晶におけるテラヘルツ波励起非平衡ダイナミクス

[33] 富田圭祐, 松永隆佑, 川合将敬, 浅見大亮, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮：鉄系超伝導体 $FeSe_{1-x}Te_x$ の THz ポンププローブ分光

• 日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 17-20 日 大阪大学)

[34] 富田圭祐, 松永隆佑, 川合将敬, 浅見大亮, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮：THz ポンププローブ分光による Fe(Se,Te) 薄膜における超伝導ゆらぎの観測

[35] 泊開人, 濱田裕紀, 松永隆佑, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮：高温超伝導体 $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ の光励起非平衡状態におけるジョセフソンプラズマの観測

[36] 勝見恒太, 濱田裕紀, 松永隆佑, R.D. Zhong, J. Schneeloch, G.D. Gu, Y. Gallais, 島野亮: $Bi_2Sr_2CaCuO_{8+x}$ 単結晶におけるテラヘルツ波励起非平衡ダイナミクス

[37] 高山正行, 室谷悠太, 金昌秀, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, 島野亮: バルク GaAs における低温高密度励起子状態での励起子間相互作用のダイナミクス

招待講演

[38] 島野亮: グラフェンの量子ファラデー効果, 学振第 182 委員会, 2016 年 4 月 14 日, 東北大学東京分室

(セミナー)

[39] Ryusuke Matsunaga : Terahertz field control of superconducting order parameter via Higgs amplitude mode, Seminar at University of Erlangen-Nuremberg, Erlangen, Germany, Jun. 16, 2016

[40] Ryusuke Matsunaga : Higgs amplitude mode in superconductors studied by terahertz pump-terahertz probe spectroscopy, Seminar at Max Planck Institute, Stuttgart, Germany, Jun. 17, 2016

[41] 松永隆佑 : 高強度テラヘルツ電場による非平衡超伝導ダイナミクスの研究, 第 42 回極限コヒーレント光科学センター, 東京大学物性研究所, 2016 年 11 月 7 日

[42] 島野亮 : Optical control of superconductors, Superconducting Colloquium, 東京大学, 2017 年 3 月 9 日

4.6 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。平成 28 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電子相、特にスピン液体、3 次元ディラック電子の創成に注力した。

4.6.1 新しい量子スピン液体

ハニカム格子・ハイパーハニカム格子 Ir 酸化物系ではスピン軌道相互作用由来の量子スピン（合成角運動量 $J_{\rm eff} = 1/2$）に特有な異方的相互作用を巧みにエンジニアリングすることにより、Kitaev Honeycomb 模型量子スピン液体の実現が期待されてきた。これまではこの試みの初の実証として、正にハニカム格子 $H_3LiIr_2O_6$ が少なくとも最低温の 1 K までスピン液体的であることを核磁気共鳴実験等により明らかにした。平成２８年度は、熱力学的量（比熱）観測でも同様な磁場依存のフェルミ統計的な励起が極低温 20 mK まで成り立つこと、重水素置換体でも同様の振る舞いを持つことなどを示した。さらに、3 次元的なハイパーハニカム格子 β-Li_2IrO_3 が 3.3 GPa（万気圧）の超高圧下においてやはりきれいな量子スピン液体であることを核磁気共鳴測定より見出した。（ハイパー）ハニカム格子系の量子スピン液体は Kitaev らによる厳密解が存在するという点において、これまで発見されてきた幾つかの三角・カゴメ格子上の量子スピン液体とは学術的意味が異なる。今後、新量子スピン液体のマヨラナフェルミオンの分数素励起、異常な磁場応答などの研究を推進していく。

4.6.2 3 次元ディラック電子

アンチペロブスカイト型酸化物

Sr_3PbO を舞台として、3 次元ディラック電子の示す新奇な物性を探索している。キャリア濃度の異なる二つの試料について ^{207}Pb の NMR 測定を行った。低キャリア濃度試料について、磁気緩和の温度依存性が高温でのコリンガ則からずれること見出し、3 次元ディラック型分散（状態密度）の反映としてデータを解釈した。低キャリア濃度試料のナイトシフトにディラック電子に期待される巨大反磁性が現れている可能性を指摘した。また、磁気輸送現象を測定し、磁場と電場が平行な場合に期待されるカイラル異常の検出を目指した。平行配置付近で劇的な磁場方向依存性が観測された。磁場誘起の伝導異方性による強い電流の不均一分布（電流ジェット効果）とその他の効果が相乗していると考えられ、さらに詳細を調べている。

ペロブスカイト型イリジウム酸化物

$AIrO_3$ (A=Sr,Ca) ペロブスカイトは結晶対称性と時間反転対称性に保護された 3 次元のディラックノード電子バンドと重い正孔バンドがフェルミ準位に僅か

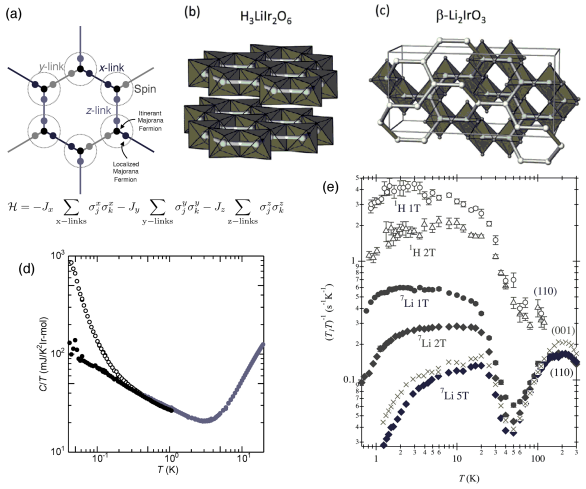

図 4.6.1: ハニカム格子・ハイパーハニカム格子系における量子スピン液体 (a) Kitaev Honeycomb 模型ハミルトニアンのスピンとマヨラナフェルミオンの関係。(b) ハニカム型 $H_3LiIr_2O_6$ (c) ハイパーハニカム型 β-Li_2IrO_3。(d) $H_3LiIr_2O_6$ の比熱。核比熱を引いた電子系の比熱 C/T（黒丸）は 20 mK までギャップレス的に振る舞う。(e) $H_3LiIr_2O_6$ の核磁気緩和率 $1/T_1$。低磁場の 1 T ではギャップレス的であるが、高磁場側ではギャップ的に変化する。

に重なる半金属であるとされている。これらの物質中の Ir を一部 Sn で置換した $AIr_{1-x}Sn_xO_3$(A=Sr,Ca) を $SrTiO_3$(001) 基板上にエピタキシャル成長させ、その電気輸送、磁化特性の置換率依存性を調べた。x の増加に伴い電気抵抗率は増大し、また温度依存の常磁性半金属-弱強磁性絶縁体転移を示すようになった。また、$CaIr_{1-x}Sn_xO_3$ では、$SrIr_{1-x}Sn_xO_3$ よりも小さい x で相転移を示すようになった。これらは、Ir イオンの希薄化、Ir-O-Ir 結合の歪みの増強の 2 つの方法でクーロン相互作用の強調が達成されたことを示唆する。観測された相転移は、磁気秩序の発現に伴う結晶・時間反転対称性の低下によるディラックノードのギャッピングという描像と矛盾しない。半金属-絶縁体転移の新奇な例として、これらの物質の相境界および磁場への応答を詳しく調べている。

4.6.3 励起子絶縁体

励起子絶縁体とはナローギャップ半導体もしくは半金属において、電子-正孔がクーロン相互作用により対（励起子）を形成することで絶縁化した状態である。昨年度までに 5d 遷移金属層状カルコゲナイド Ta_2NiSe_5 が励起子絶縁体の最も有力な候補物質であることを示した。この物質について、圧力下での輸送現象や光学伝導度の測定を続けている。Ta_2NiS_5 との比較や S と Se 固溶系の実験などから、T_c=325 K 以下で 0.2 eV 程度の励起子ギャップが生じる最も典型的な q=0 励起子絶縁体であると結論した。共同研究による時間分解過渡分光の測定結果は、T_c 以下で特定の格子モードに付随する振動強度の温度依存性、入射光強度依存性の異常を観測し、励起子秩序パラメータと格子系の結合モードと解釈できることが判明した。この結果は励起絶縁体であるとの結論と矛盾しない。

＜受賞＞

[1] 高木英典: Outstanding Referee, Journal of the Physical Society of Japan, 2017 年 3 月 18 日.

＜報文＞

(原著論文)

[2] K. Taniguchi, Y. Gu, Y. Katsura, T. Yoshino, and H. Takagi: Rechargeable Mg-battery cathode TiS_3 with d-p orbital hybridized electronic structures, Applied Physics Express **9**, 011801 (2016).

[3] S. Mukherjee and B. Pal, D. Choudhury, I. Sarkar and W. Drube, M. Gorgoi, O. Karis, H. Takagi, J. Matsuno, and D. D. Sarma: Origin and distribution of charge carriers in $LaAlO_3$-$SrTiO_3$ oxide heterostructure in the high carrier density limit, Phys. Rev. B **93**, 245124 (2016).

[4] T. Eknapakul, I. Fongkaew, S. Siriroj, R. Vidyasagar, J. D. Denlinger, L. Bawden, S.-K. Mo, P. D. C. King, H. Takagi, S. Limpijumnong, and W. Meevasana: Nearly-free-electron system of monolayer Na on the surface of single-crystal $HfSe_2$, Phys. Rev. B **94**, 201121(R) (2016).

[5] D. Samal, H. Nakamura, and H. Takagi: Molecular beam epitaxy of three-dimensional Dirac material Sr_3PbO, Appl. Phys. Lett. Materials **4**, 076101 (2016).

[6] A. Yamasaki, H. Fujiwara, S. Tachibana, D. Iwasaki, Y. Higashino, C. Yoshimi, K. Nakagawa, Y. Nakatani, K. Yamagami, H. Aratani, O. Kirilmaz, M. Sing, R. Claessen, H. Watanabe, T. Shirakawa, S. Yunoki, A. Naitoh, K. Takase, J. Matsuno, H. Takagi, A. Sekiyama, and Y. Saitoh: Three-dimensional electronic structures and the metal-insulator transition in Ruddlesden-Popper iridates, Phys. Rev. B **94**, 115103 (2016).

[7] D. Prpper, A. N. Yaresko, M. Hppner, Y. Matiks, Y.-L. Mathis, T. Takayama, A. Matsumoto, H. Takagi, B. Keimer, and A. V. Boris: Optical anisotropy of the $J_{\rm eff}$=1/2 Mott insulator Sr_2IrO_4, Phys. Rev. B **94**, 035158 (2016).

[8] F. Steckel, A. Matsumoto, T. Takayama, H. Takagi, B. Bchner, and C. Hess: Pseudospin transport in the $J_{\rm eff}$=1/2 antiferromagnet Sr_2IrO_4, EPL **114**, 57007 (2016).

[9] S. Y. Kim, C. H. Kim, L. J. Sandilands, C. H. Sohn, J. Matsuno, H. Takagi, K. W. Kim, Y. S.

Lee, S. J. Moon, and T. W. Noh: Manipulation of electronic structure via alteration of local orbital environment in [$(SrIrO_3)_m$, $(SrTiO_3)$] (m = 1, 2, and ∞) superlattices, Physical Review B **94**, 245113 (2016).

[10] T. Takayama, A. Matsumoto, G. Jackeli, and H. Takagi: Model analysis of magnetic susceptibility of Sr_2IrO_4: A two-dimensional $J_{\rm eff}$=1/2 Heisenberg system with competing interlayer couplings, Physical Review B **94**, 224420 (2016).

[11] Y. F. Lu, H. Kono, T. I. Larkin, A. W. Rost, T. Takayama, A. V. Boris, B. Keimer, and H. Takagi: Zero-gap semiconductor to excitonic insulator transition in Ta_2NiSe_5, Nature Communications **8**, 14408 (2017).

[12] A.S.Gibbs, A. Yamamoto, A. N. Yaresko, K. S. Knight, H. Yasuoka, M. Majumder, M.Baenitz, P. J. Saines, J. R. Hester, D. Hashizume, A. Kondo, K. Kindo, and H. Takagi: S=1/2 quantum critical spin ladders produced by orbital ordering in Ba_2CuTeO_6, Phys. Rev. B **95**, 104428 (2017).

(博士論文)

[13] 田代勇太: 銅カルコゲナイドにおけるコンバージョン反応型マグネシウム二次電池正極材料の開発

(修士論文)

[14] 末次祥大: アンチペロブスカイトにおける三次元デイラック電子の電磁応答 (Electromagnetic response of three-dimensional Dirac electrons in antiperovskites)

[15] 高野陸: ハニカム格子 Ir 酸化物における量子スピン液体状態の NMR (Quantum spin liquid state of honeycomb lattice iridium oxides measured by NMR)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[16] S. Suetsugu: Magnetotransport studies of antiperovskites, (Workshop Strongly Correlated Electron Systems, Kreuth, Germany, Apr. 11, 2016)

[17] N. Ohta: Control of dimensionality and carrier density in Ir super lattice, (Workshop Strongly Correlated Electron Systems, Kreuth, Germany, Apr. 13, 2016)

[18] K. Kitagawa, T. Takayama, Y. Kishimoto, R. Takano, H. Takagi: New spin liquids on honeycomb iridates as seen by NMR, (Topo Mat Meeting, Stuttgart, Germany, Sep. 19, 2016)

[19] N. Hiraoka, N. Matsui, S. Ando, H. Takagi: Tuning electronic transport property of strontium iridates by superlattice formation and doping, (Topo Mat Meeting, Stuttgart, Germany, Sep. 19-21, 2016)

[20] S. Suetsugu, K. Kitagawa, K. Hayama, A.W. Rost, J. Bruin, C. Muhle, J. Nuss, H. Takagi: Magnetotransport and NMR properties in three-dimensional Dirac electron: anti-perovskite Sr_3PbO, (Topo Mat Meeting, Stuttgart, Germany, Sep. 19-21, 2016)

[21] M. Negishi, N. Hiraoka, H. Takagi: Semimetal-magnetic insulator transition and magnetoresistance in perovskite $SrIr_{1-x}Sn_xO_3$ thin films, (Topo Mat Meeting, Stuttgart, Germany, Sep. 19-21, 2016)

[22] K. Kitagawa: Honeycomb-lattice iridate as spin-orbital complex quantum liquid, (Workshop on Solid-state chemistry for oxide and mixed-anion systems, Kyoto, Dec. 6-8. 2016).

招待講演

[23] K. Kitagawa: New spin liquids on honeycomb iridates as seen by NMR, (5th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2016), Fethiye,Turkey, Apr. 24-30, 2016)

[24] H. Takagi: Quantum spin liquid state in honeycomb-based complex iridium oxides, (Gordon Research Conference on Correlated Electron Systems, Mount Holyoke, USA, Jun. 26, 2016).

[25] H. Takagi: Chemistry and physics of complex iridium oxides, (International Symposium on Structure-Property Relationship in Solid Materials-2016, Nantes, France, Jul. 4, 2016).

[26] H. Takagi: Exploring the signature of Kitaev spin liquid in complex iridium oxides with honeycomb-related structure, (Condensed Matter Physics in the City 2016, London, UK, Jul. 12, 2016).

[27] H. Takagi: Exotic magnetism produced by strong spin-orbit coupling in complex Ir oxides, (Swiss Physical Society Meeting, Lugano, Switzerland, Aug. 24, 2016).

[28] H. Takagi: Strong spin-orbit coupling and exotic magnetism in complex Ir oxides (Plenary), (8th International Conference on Highly Frustrated Magnetism, Taipei, Taiwan, Sep. 10, 2016).

[29] K. Kitagawa: Strong spin-orbit coupling and exotic magnetism in complex Ir oxides, (2016 Hefei Conference on Novel Phenomena in High Magnetic Fields (2016nphmf), Hefei, China, Oct 29-Nov 1, 2016).

[30] H. Takagi: Spin-orbit coupling meets with electron correlations a guided tour to exotic electronic states of 5d transition metal oxides, (2nd PKU-IMPRS Joint Workshop on Condensed Matter Science, Beijing, PR China, Nov. 14, 2016).

[31] H. Takagi: Spin-orbit coupling meets with electron correlations a guided tour to exotic electronic states of 5d transition metal oxides, (Material Physics, 5 years of IBS, IBS Daejeon, Korea, Nov. 17, 2016).

[32] H. Takagi: Quantum Liquid state of $J_{\rm eff}$=1/2 isospins, (17th Korea-Taiwan-Japan Workshop on Strongly Correlated Electron Systems, Yongpyong Resort, Korea, Feb. 18, 2017)

コロキウム

[33] H. Takagi: Spin-orbit coupling meets with electron correlations a guided tour to exotic electronic states of 5d transition metal oxides, (1st SFB Colloquium, University of Cologne, Germany, Oct. 4, 2016).

[34] H. Takagi: Interplay of spin-orbit coupling and electron correlations in complex 5d oxides, (Zernike Kolloquium, Groningen, The Netherlands, Oct. 6, 2016).

[35] H. Takagi: Spin-orbit coupling meets with electron correlations a guided tour to exotic electronic states of 5d transition metal oxides, (Condensed Matter Physics Colloquium, Stanford, USA, Oct. 20, 2016).

[36] H. Takagi: Spin-orbit coupling meets with electron correlations a guided tour to exotic electronic states of 5d transition metal oxides, (Physics colloquium, Cornell University, Ithaka, USA, Oct. 25, 2016).

[37] H. Takagi: Spin-orbit coupling meets with electron correlations - A guided tour to complex iridium oxides -, (Colloquium, Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland, Mar. 24, 2017).

(国内会議)

一般講演

[38] 末次祥大, 葉山慶平, A.W. Rost, J. Bruin, C. Muhle, J. Nuss, 高木英典; 3 次元 Dirac 電子系アンチペロブスカイト酸化物 Sr_3PbO におけるカイラル異常誘起の負の縦磁気抵抗効果, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス（金沢）, 2016 年 9 月 13 日.

[39] 高野陸, 北川健太郎, 高山知弘, 高木英典: 二次元ハニカム $A_3LiIr_2O_6$ (A=H,D) における量子スピン液体状態の NMR 測定日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス（金沢）, 2016 年 9 月 13 日.

[40] 根岸真通, 太田奈緒香, 北川健太郎, 高木英典: ペロブスカイト型 $SrIr_{1-x}Sn_xO_3$ 薄膜の半金属 磁性絶縁体転移と磁気抵抗日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス（金沢）, 2016 年 9 月 13 日.

[41] 根岸真通, 平岡奈緒香, 高木英典, 浜根大輔: ペロブスカイト型 $CaIr_{1-x}Sn_xO_3$ 薄膜の輸送特性, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス（大阪）, 2017 年 3 月 17 日.

[42] 林義之, 北川健太郎, 岸本恭来, 高山知弘, 高木英典: ハイパーハニカム β-Li_2IrO_3 単結晶の NMR, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス（大阪）, 2017 年 3 月 17 日.

[43] 末次祥大, 北川健太郎, 葉山慶平, A.W. Rost, C. Muhle, J. Nuss, 高木英典: 3 次元ディラック電子系アンチペロブスカイト Sr_3PbO の NMR 測定日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス（大阪）, 2017 年 3 月 20 日.

4.7 林研究室

林研究室では、物質中の電子スピンが誘起するさまざまな現象を探求し、背後にある物理を探求する研究を行っています。電子は「電荷」と自転に相当する角運動量「スピン」、さらに原子核の周りを周回する事による角運動量「軌道」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」を制御し、デジタル情報のストレージは「スピン」の集合体である強磁性体を利用することで大きく発展してきました。また物質中では、電子の電荷とスピンが相互作用することにより、磁気抵抗やスピン移行トルクなどのさまざまな物理現象が発現することがわかってきました。

さらに、最近では電子のスピンと軌道の相互作用を利用することで、これまでの延長線上にない新たな物性、物理が発見されています。たとえば、スピンと軌道の相互作用が大きい金属に電流を流すと、「スピンホール効果」によってスピンの向きに依存した散逸のない電子の流れ、いわゆる「スピン流」が生成されることがわかってきました。また、空間対称性が破れた物質の表面や、異なる物質を組み合わせたヘテロ構造の界面では、スピン軌道相互作用が及ぼす効果が最大化されることが多く、物理と物質科学を融合した研究が活発化しています。

林研究室では 2016 年度、薄膜ヘテロ構造におけるスピン軌道相互作用に起因する現象の物理解明に関する研究を行い、下記の成果を得ました。

4.7.1 スピン流物理

スピン流とは、スピンの向きによって電子の移動する方向が異なる電子の流れを指します。たとえば、上向きのスピンを持った電子が右に、下向きの電子が左に動いたとき、右から左にスピン流が生じたというになります。生成されたスピン流は、例えば強磁性体の磁化の向きを制御することに利用でき、情報記憶技術に応用できるとして期待されています。林研究室では、スピン流生成機構の解明と、スピン流の生成効率の物質依存性を明らかにすることを目的として研究を行いました。2016 年度は特に、「スピンホール効果」の物理解明に関する研究を中心に進めました。

5d 遷移金属のスピンホール伝導度

スピン軌道相互作用が大きい非磁性金属に電流を流すと、スピンホール効果によって電流と直交する方

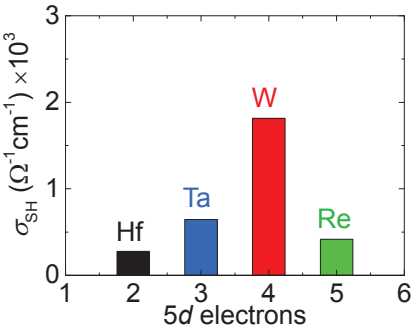

図 4.7.1: 5d 遷移金属のスピンホール伝導度と 5d 電子数の関係。

向にスピン流が発生することが知られています。また、非磁性金属と強磁性絶縁体からなる 2 層膜に電流を流すと、スピンホール効果に由来する磁気抵抗が発現することが Nakayama らの研究で最近明らかになりました (Phys. Rev. Lett. 110 206601 (2013))。この磁気抵抗はスピンホール磁気抵抗と呼ばれ、非磁性金属のスピンホール効果の大きさに依存することが理論的に予測されていました。

林研究室では、スピンホール磁気抵抗効果を利用して、5d 遷移金属のスピンホール効果の大きさを調べました。スピンホール効果の大きさを表す指標として、電流と直交する方向に流れるスピン流の伝導度「スピンホール伝導度」を求めました。5d 電子数が違う非磁性金属 (Hf, Ta, W, Re) のスピンホール伝導度を調べた結果、W が最も大きな値を持つことがわかりました。この結果は、5d 遷移金属のスピンホール効果が、バンド構造に由来した内因的な機構によるものだと示唆しているものと考えられます [5]。

4.7.2 界面スピン軌道相互作用

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。

林研究室では構造反転対称性が破れた人工物質を原子レベルで制御し、界面の電子状態やスピン軌道相互作用を自在に操作することで、電子のスピンが誘起する新たな物理現象を探求しています。2016 年度は界面ジャロシンスキー・守谷相互作用によって発現するカイラル磁区構造と、電界が界面垂直磁気異方性に及ぼす影響に関する研究を中心に行いました。

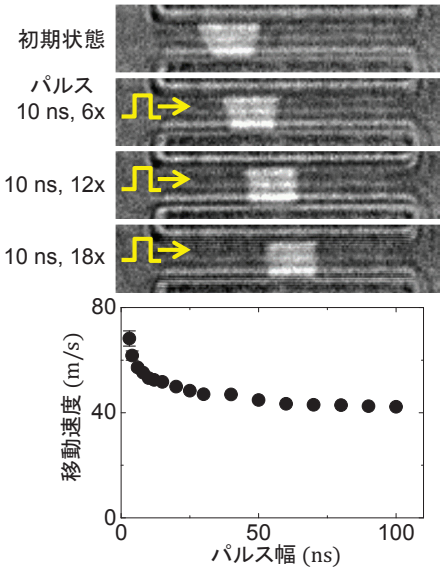

図 4.7.2: カイラル磁壁が電流で駆動される様子を磁気光学顕微鏡で観察した結果。電流で駆動した際の移動速度がパルス幅に依存するのは、移動時と静止時の有効質量が異なることを反映している。

カイラル磁壁の質量

ジャロシンスキー・守谷相互作用が大きいヘテロ構造において発現するカイラル磁壁の有効質量を調べました。磁壁とは、磁化の向きが異なる磁区と磁区の境界で、たとえば磁場や電流を印加すると磁壁が移動することで磁化の反転が誘起されます。磁壁の移動速度や、磁壁を駆動するのに必要な磁場、電流は、強磁性体の磁化制御の際、重要なパラメータとなります。また、擬似 1 次元細線の中の磁壁は、粒子的に振舞うことが知られており、その運動を記述する物理に関する研究も盛んに行われています。

本研究では、ジャロシンスキー・守谷相互作用が作用しているカイラル磁壁の粒子性を調べ、磁壁の有効質量が静止しているときと動いているときで異なることを見出しました。(カイラル磁壁とは、旋回性を有する磁区構造で発現する磁壁を指します。) カイラル磁壁の特異な粒子性をあらわす結果であり、磁壁の有効質量がジャロシンスキー・守谷相互作用などの物質パラメータで自在に制御できることを証明しました [3]。

カイラル磁区構造の電流制御

大きなジャロシンスキー・守谷相互作用を有するヘテロ構造におけるカイラル磁壁間に、反発する相互作用があることを実証しました。反発力により、結合したカイラル磁壁が生成でき、電流で駆動できる

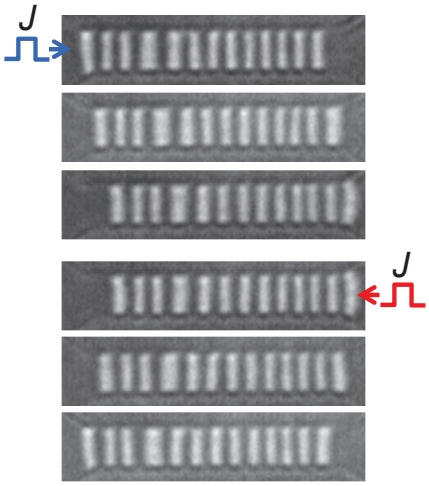

図 4.7.3: 多数の結合したカイラル磁壁の電流駆動を磁気光学顕微鏡で観察した様子。

ことがわかりました。結合したカイラル磁壁は、単独で存在するカイラル磁壁と異なり、外部磁場の作用を受けても速度を変えることなく電流で駆動できました。また、磁壁間の反発力の強さはジャロシンスキー・守谷相互作用の強さに比例することがわかりました [1]。

界面垂直磁気異方性の電界効果

強磁性体の磁気異方性や転移温度、磁化の大きさは電界を印加することで制御できることが近年の研究で明らかになっています。特に、大きなトンネル磁気抵抗比を有する CoFeB/MgO/CoFeB における磁気異方性の電界制御は、メモリ応用の観点から注目されています。

本研究では、CoFeB/MgO の界面磁気異方性には非線形成分があり、その成分を電界で変調できることを明らかにしました。従来の電界効果と逆の符号を持つため、膜厚が薄い強磁性で電界効果が小さくなることがわかりました [2]。

＜受賞＞

[1] 林　将光、若手科学者賞、文部科学省、平成 28 年 4 月。

＜報文＞

(原著論文)

[2] R. P. del Real, V. Raposo, E. Martinez, M. Hayashi, Current induced generation and synchronous motion of highly packed coupled chiral domain walls. Nano Lett. 17, 1814 (2017).

[3] Y.-C. Lau, P. Sheng, S. Mitani, D. Chiba, M. Hayashi, Electric field modulation of the non-linear areal magnetic anisotropy energy. Appl. Phys. Lett. 110, 022405 (2017).

[4] J. Torrejon, E. Martinez, M. Hayashi, Tunable inertia of chiral magnetic domain walls. Nature Comm. 7, 13533 (2016).

[5] J. Kwon, J. Yoon, P. Deorani, J. M. Lee, J. Sinha, K.-J. Lee, M. Hayashi, H. Yang, Giant nonreciprocal emission of spin waves in Ta/Py bilayers. Science Adv. 2, e1501892 (2016).

[6] J. Torrejon, J. Kim, J. Sinha, M. Hayashi, SpinOrbit Effects in CoFeB/MgO Heterostructures with Heavy Metal Underlayers. SPIN 06, 1640002 (2016).

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[7] M. Hayashi, Spin current and spin orbit interaction in metallic heterostructures. International Spintronics School, Tohoku Forum for Creativity, 8/31/2016, Tohoku University, Sendai, Japan.

(国内会議)

一般講演

[8] Z. Chi, G. Shibata, S. Sakamoto, Y. Nonaka, K. Ikeda, M. Sakamaki, K. Amemiya, M. Hayashi, A. Fujimori，Orbital moment anisotropy in Co-heavy metal heterostructures studied by x-ray magnetic circular dichroism，日本物理学会第 72 回年次大会，2017 年 3 月 18 日，大阪大学，大阪。

[9] 家元 章伍, 鷲見 聡, 粟野 博之, 林 将光，Pt/TbCo 薄膜の磁気光学特性，日本物理学会第 72 回年次大会，2017 年 3 月 14 日，パシフィコ横浜，横浜。

招待講演

[10] 林　将光，「スピン起動相互作用に起因するスピン流生成と磁化制御」，PASPS-21，2016 年 12 月 13 日，北海道大学，札幌。

(セミナー)

[11] M. Hayashi, Spin current, spin orbit torque and chiral magnetism in magnetic heterostructures with broken inversion symmetry. RIKEN seminar, 11/28/2016, RIKEN, Wako.

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、具体的な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る。我々は、ビッグバン宇宙国際研究センターやカブリ数物連携宇宙研究機構はもちろん、国内外の他研究機関とも積極的に共同研究を実行しており、常に開かれた研究室を目指している。現在我々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、第一世代の天体形成、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。
1916 年のアインシュタインによる一般相対論の構築によって始まった自然科学としての宇宙論は、ハッブルによる宇宙膨張の発見 (1929 年)、ガモフによるビッグバン理論の提案 (1946 年)、宇宙マイクロ波背景放射の発見 (1965 年) を通じて、理論と観測の双方からの進展を受け現在の標準宇宙論に至る。多くの観測データを組合わせることで、宇宙の全エネルギー密度の 3/4 がダークエネルギー、1/5 がダークマター、残りの約 4 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、さらにより広く 21 世紀科学に対して根源的な謎を突きつけている。　最近の大型望遠鏡や宇宙望遠鏡を用いた深宇宙探査により、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に存在した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。第一世代の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と考えられており、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第一世代天体の形成や宇宙進化の最初の段階が明らかになると期待されている。　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、太陽系外惑星はすでに 3000 個以上が発見されている。初期に検出された系外惑星のほとんどは木星型 (ガス) 惑星だったが、2009 年 3 月に打ち上げられたケプラー衛星を始めとする観測手段の進歩で、地球程度の質量を持つ惑星も検出されるようになった。とすればそれら遠方の地球型惑星に生命の兆候をいかにして見出すか。まさに「第 2 の地球は存在するか」 という問いに答える日が現実のものとなりつつある。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。我々はこのような状況を踏まえつつ、すばる望遠鏡による広視野深宇宙探査国際共同研究を牽引し、さらには太陽系外惑星探査の新たな地平を切り開く研究を展開しつつある。　具体的には、ダークマター分布の進化と重力レンズ統計、銀河のクラスタリング解析、ミッシングバリオンの起源と観測的検証、ロシター効果による主星と系外惑星の自転・公転軸のずれの検出、地球型惑星系の反射光を用いた表面分布の再構築とバイオマーカーの検出可能性、第一世代星やブラックホールの形成進化を研究しつつある。また、発展がめざましい全粒子時間軸天文学を意識し、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理解を目指した研究にも取り組んでいる。さらに既存の枠にとらわれない独創的なテーマの開拓も手がけており、重力波観測を用いた重力理論の検証や、超並列計算機を用いたボルツマンシミュレーションなど、次世代宇宙論を担う新たな研究テーマに取り組んでいる。

5.1.1　観測的宇宙論

強い重力レンズ探査

SDSS でみつかった重力レンズクエーサーをレーザーガイド AO で系統的に高分解能観測し詳細なモデル化を行った。[6] SDSS-III BOSS サーベイの分光データからライマンアルファ輝線をもつ星形成銀河をソースとする重力レンズ系を多数発見した。[14, 34, 38] またすばる望遠鏡 HSC サーベイから、珍しい二重ソース重力レンズ “Eye of Horus” を含め [21]、いくつか新しい重力レンズ系を発見した。[29, 32] 珍しい衝突銀河団を発見しその質量分布の重力レンズモデル化を行った。[25]

重力波分布と銀河分布の相互相関を用いた宇宙の絶対距離測定

2016 年に LIGO チームにより初の重力波信号検出の報告がなされたが、そこで発見されたようなブラックホールなどのコンパクト天体の合体信号からその天体までの光度距離を直接測定できる。この距離測定と赤方偏移の測定を組み合わせると宇宙の距離-赤方偏移関係がわかりハッブル定数が直接測定できるが、赤方偏移測定には通常電磁波対応天体の観測が必要でありそれが可能かは必ずしも自明ではない。我々は赤方偏移がわかっている銀河との空間分布の相関を用いて多数の重力波観測から宇宙の距離-赤方偏移関係を統計的に決定する新しい手法を提案した。[9]

CMB lensing と cosmic shear を用いた軽いグラビティーノ質量の制限

中性な超対称性粒子の一つである、軽いグラビティーノはダークマター粒子の有力の候補の一つである。仮に軽いグラビティーノが存在すると、自由流減衰により、小スケールのゆらぎが抑制される。我々はこの軽いグラビティーノ粒子の質量を制限するために、宇宙背景放射の重力レンズ効果 (CMB lensing) と遠方銀河を光源とする重力レンズ効果 (cosmic shear) を用いた。Planck 衛星による CMB lensing の測定結果と CFHTLenS サーベイによる cosmic shear の測定結果を用いて、これまでで最も良い軽いグラビティーノ質量の制限を得ることができた。[12] この結果から、軽いグラビティーノ粒子はダークマターとして存在するには極めて量が少なく、ダークマターの構成要素としては考えにくいことが明らかになった。

遠方銀河からの酸素輝線検出

赤方偏移 7.2 のライマンアルファ銀河 SXDF-NB1006-2 を ALMA でターゲット観測し、静止系波長 88 ミクロンの OIII 輝線を検出した。この天体はサブミリ連続光および炭素輝線は未検出であり、ライマンアルファ輝線との速度差が小さいことから、中性水素密度が小さく、コンパクトで、電離光脱出が大きく、宇宙再電離の電離源の一つであることを示唆した [16]。

銀河団の境界半径の検出

銀河団の半径の物理的な定義として、銀河団に降着した銀河が銀河団の重力で最初に引き返す半径を考えることができ、これは Splashback 半径と呼ばれる。この半径で動径密度分布の冪が極小となるが、多数の SDSS 銀河団周りの銀河の数密度分布をスタックすることによってこの Splashback 半径を強い有意度で検出することに成功した。得られた Splashback 半径は理論的に期待されていた値よりも小さく、その解釈の可能性として大きな衝突断面積をもつダークマターモデルなど様々な可能性を検討した。[17]

擬似スペクトル法を用いた銀河-銀河重力レンズのフーリエ空間測定

弱い重力レンズの相関関数の測定は伝統的には実空間で行われてきたが、サーベイ形状やマスクの効果を補正する手法の発展によりフーリエ空間での測定も行われるようになってきた。しかしながらこういったフーリエ空間解析はこれまではシアの自己相関に限られていた。我々は銀河周りの重力レンズ信号を測るいわゆる銀河-銀河重力レンズに擬似スペクトル法を適用し、銀河-銀河重力レンズのフーリエ空間での測定に初めて成功した。この手法では高速な測定が可能なため大規模サーベイの解析で特に重要になると期待される。[19]

宇宙の密度揺らぎの応答関数の定式化及び測定

現在の宇宙の密度揺らぎのパワースペクトルが初期条件のパワースペクトルの変化に対してどのように応答するかを示す応答関数を、2 つのパワースペクトルの間の汎関数微分として定式化した。そして、初期条件を少しずつ変えたシミュレーションセットを実行することで、この関数を初めて数値的に決定した。また、この結果を揺らぎの摂動展開に基づく解析的な予言と詳細に比較した。摂動計算では小さいスケールの初期揺らぎに対する大スケールの応答が時間とともに急激に大きくなる一方で、シミュレーションデータはむしろ逆にそのような応答が抑制されていくことを見出した。シミュレーションの結果は、物理がクリーンだと期待される大スケールの揺らぎを用いた将来の精密観測が、複雑な過程により予言が難しい小スケールの詳細にあまり依らないことを実証したものであり、このような観測実験の有効性を理論的に保証している。これはまた、揺らぎが大きくなるにつれ摂動展開がどのように破れていくのかを見たものとも言え、非摂動な効果を取り入れた計算法の開発の糸口を与える。[23, 62]

アルマ望遠鏡によるスニャーエフ・ゼルドビッチ効果の初検出

スニャーエフ・ゼルドビッチ (SZ) 効果は、宇宙マイクロ波背景放射の光子が銀河団内の高温電子とコンプトン散乱する現象である。我々は、1998 年にハワイの JCMT 望遠鏡を用いて銀河団 RXJ1347.5-1145 を観測し、サブミリ波で SZ 効果マップを初めて描くことに成功した。さらに 2001 年には野辺山の電波望遠鏡で、13 秒角の分解能のマッピングに成功し、銀河団衝突の痕跡と思しき構造を発見した。今回は、この銀河団を用いて、アルマ望遠鏡での SZ 効果の初検出を成功させるとともに、史上最高の分解能 5 秒角を達成し、アルマ望遠鏡が SZ 効果の観測に有効であることを示した。[24]

ダークマターハローの非球対称性の進化と統計

銀河団を宇宙論に応用する際、観測精度の限界から、その密度構造などに球対称の仮定を置くことが普通であった。しかし近年の重力レンズ効果の観測技術の向上により、銀河団を構成するダークマターハローの密度構造を球対称の仮定をせずに推定することが今後盛んになると期待される。それを見据えて我々は、宇宙論的シミュレーション中のダークマターハローの形状の統計的性質を調べた。その結果、ダークマターハローが内側ほど歪んでいることがわかった。これはハローが非自己相似的であり、三次元密度分布から天球面上に射影された密度分布を推定することが困難であることを示している。そこで我々は、射影密度分布の非球対称性の確率密度分布およびそのフィッティング公式を求めた。これによって将来的な観測結果とシミュレーションとの比較が正確かつ容易になった。[26]

機械学習を用いた時間変動天体検出

すばる HSC を用いて可視時間変動天体探索を行った。2015 年 5 月および 8 月の観測データから差分画像を作成し、機械学習分類器によって変動天体を検出した。機械学習アルゴリズムとして、ランダムフォレスト、AUC ブースト、Deep Neural Network の 3 種類を採用し、24000 個のトレーニングサンプルを用いて学習し、いずれの分類器も、22-25 等級の天体に対し偽陽性 1 パーセントで真陽性 90 パーセントの精度を達成した。2015 年 8 月のデータからは、3 つの分類器を総合して 8514 の変動天体を検出した [27]。

超新星重力レンズ iPTF16geu の解析

三例目の強い重力レンズ超新星となる iPTF16geu の発見が Goobar et al. によって報告された。我々は公開された観測データを解析し詳細な質量モデリングを行った結果、期待される複数像間の時間の遅れは 1 日以下で小さく測定は困難なこと、及び複数像間のフラックス比がおそらくマイクロレンジングのためモデルの予言と大きく異なっていること、iPTF サーベイでのこの強い重力レンズ超新星の発見は統計的に理論期待と無矛盾なことなどを指摘した。[29]

$f(R)$ 修正重力模型に対する弱い重力レンズ効果の様々な統計量の有効性

多数の遠方銀河の形状の統計解析から得られる弱い重力レンズ効果は、手前にある物質の密度揺らぎに関する情報を与える。宇宙の揺らぎの成長は大きなスケールではほとんど重力だけで決定されるため、この効果を測定することで重力法則の検証が可能となる。我々は Hu-Sawicki 型の $f(R)$ 重力模型に着目し、宇宙論的 N 体シミュレーション及びレイトレーシングシミュレーションを行うことで重力レンズ効果を再現し、一般相対性理論からのずれを調査した。これに加えて、一般相対性理論の枠内でも主要なパラメタを変化させ、重力模型の違いと見分けられるかテストを行った。その結果、最も基本的な統計量であるパワースペクトルだけではパラメタ間の縮退を解くことが難しいが、バイスペクトル、ピークカウント、ミンコフスキー汎関数を加えることでこれが劇的に改善することを数値的に示した [33]。

銀河団の X 線表面輝度の非球対称性の統計的性質

これまで非常に多くの銀河団について、ガスの X 線表面輝度が観測されてきたが、それらを宇宙論的・統計的に応用する際は、簡単のため球対称の仮定を課すことが多かった。また、過去の多くの理論モデルにおいては銀河団ガス分布を、ダークマター分布と静水圧平衡の仮定の下で求めており、これが必ずしも適切でないことがわかっている。我々は、宇宙論的シミュレーションを用いて銀河団の X 線表面輝度を模擬的に作成し、その非球対称性について確率密度関数を提供した。そして、従来の静水圧平衡の仮定などに頼るモデルに比べて、我々の方法論が観測結果との比較対象として信頼できるものであることを示した。[35]

宇宙の密度揺らぎの多点相関関数に対する整合性関係式の非ガウス初期条件への拡張

宇宙の密度揺らぎの異なる点数の多点相関関数の間にはある種の整合性関係式が成り立つことが調べられてきた。これは、揺らぎの成長を駆動する重力法則が持つ等価原理とガウス統計に従う初期条件のみから導かれるものであり、非摂動なレベルで成り立つべき厳密な関係式である。我々は、より一般に初期揺らぎが非ガウス性を有する場合に議論を拡張し、この場合に現れる関係式に対する補正項を導いた。さらに、物資の密度揺らぎだけではなく、銀河などの「トレーサー」や、宇宙の速度場と密度場の共相関量にも拡張できることを示し、ガウス初期条件の場合の結果に帰着するための条件を示した [36]。

矮小銀河における暗黒物質密度分布

単体の星に及ぼされる力学的摩擦は一般的なサイズの銀河では無視できるほど小さいが、銀河のサイズと質量が小さいほど有意になってくる。力学的摩擦は、暗黒物質ハローがカスプであると強くなり、コアだと弱くなる。本研究の結果、極小サイズの矮小銀河の暗黒物質カスプを持つ場合は、力学摩擦で多数の星が銀河中心に落ちて、「星カスプ」を形成する。一方でコアの場合はこうした現象は起こらない。この結果の解釈は「観測した矮小銀河で星カスプが観測されなかった場合、暗黒物質カスプが棄却される」ということになる。[44] さらに、私の個人研究として、M2M 法という N 体粒子モデリング法を MCMC 計算と組み合わせ、矮小銀河の暗黒物質分布の 3 次元的な決定を試みる研究も行っている。M2M 法は 3 軸不等系にも適用でき柔軟性に優れるが、観測不可能量に関しては仮定された値を用いて計算を行うしかなかった。本研究では、M2M 法を MCMC 計算の中で繰り返すことにより、最適解を与える暗黒物質密度のパラメータを探すアルゴリズムを構築している。

大規模 N 体シミュレーション群を用いたダークエミュレータ構築

宇宙論的 N 体シミュレーションは宇宙の大規模構造の時間発展を明らかにする上で有用なツールとして確立しつつある。我々は標準的な 6 次元宇宙論パラメタ空間をラテン超方格法により効率的に 100 点サンプリングし、これらに対して約 100 億体の質点を用いた大規模なシミュレーションアンサンブルを

約 200 ラン実行した。これらから、暗黒物質ハローの分布とその周りの物質密度のプロファイルを統計的に調査した。その結果を、機械学習の一種であるガウス過程によりモデリングし、宇宙論パラメタ空間において様々な統計量のスムーズな予言を与える枠組み “dark emulators” を開発した。交差検定の結果、銀河周りの弱重力レンズ効果プロファイルに対する dark emulators の予言は、銀河群・銀河団程度のハローについて 2-3%程度の高精度を実現した [69, 77, 81, 89, 111, 115, 116]。

ALMA によるサーベイ観測データを用いた遠方輝線銀河探査

100 億年以上前に存在した遠方銀河は, 従来, 検出感度の高い可視光や赤外線の連続光で観測されてきた。しかし近年, 可視光観測で見つかった遠方銀河の周囲に, 可視光や赤外線連続光では検出できないが, 赤外線の輝線では検出できる銀河が発見された。赤外線輝線で明るい遠方銀河の存在密度は未知であり, 多かった場合には, 今までの宇宙の星形成史の観測的・理論的な理解に新たな示唆を与えることになる。

そこで本研究では, 遠方輝線銀河のブラインド探査を行い, 宇宙の星形成史の観測的な見積もりのうち, 今まで認識されていなかった遠方輝線銀河の寄与を見積もった。探査の結果, 遠方輝線銀河の候補天体を 2 天体検出することに成功した。今回見積もられた約 120 億年前の星形成率密度の下限値は, 従来の可視光観測 (静止波長系では紫外線) による見積もりとすでに同程度となった。この結果は, 初期の星形成が考えられていたよりも活発であった可能性を示唆している。

渦状腕分裂の不安定性パラメータとその不安定条件

天の川銀河のような近傍の円盤銀河の多くには渦状腕が観測される。一方で高赤方偏移宇宙の円盤銀河には渦状腕ではなくクランプと呼ばれる大質量の星団が見られる。本研究は、力学的不安定性によって渦状腕が分裂することでクランプができるのではないかという可能性を考える。線形摂動理論を用いた解析計算によって不安定性パラメータと不安定条件を解析的に求め、それをガスと星からなる 2 成分の系に適応できるように拡張した。我々はその解析を孤立系円盤銀河シミュレーションのデータに適用し、解析計算の通りに現実の円盤銀河の渦状腕が振る舞っているかを確かめた。その結果、我々の線形解析理論は、期待以上に正確で、不安定条件を満たしたときのみに渦状腕の分裂が生じ、解析的なクランプ質量の予測値と実際のシミュレーションの結果も良い一致を見せた。また、解析計算から、形成したクランプのサイズと銀河円盤半径の比、クランプの速度分散と円盤回転速度の比の間のスケーリング関係を導出した。その結果、トゥームレ不安定の場合はこれらの比が比例関係になるのに対して、渦状腕不安定の場合は比例関係からの弱い逸脱が導かれた。過去の観測データではトゥームレ不安定の比例関係と良い一致を示していたが、我々の渦状腕不安定の場合も観測誤差の範囲でよく一致しており、渦状腕不安定によるクランプ形成シナリオでも観測と無矛盾であることがわかった。

超大質量ブラックホール形成とクェーサークラスタリング

高赤方偏移で発見された超大質量ブラックホールの形成メカニズムとしてスーパーエディントン降着によるブラックホール成長が提案されている。我々は、スーパーエディントン降着過程がクェーサーのクラスタリングにどのような痕跡を残すかを調べた。スーパーエディントン降着が起きる際には光子捕捉効果のためクェーサー光度がエディントン光度の数倍に抑えられることが予想される。我々は、この効果を考慮したシンプルな放射効率モデルを、銀河・クェーサー形成の準解析的モデルに加えた。その結果、放射効率モデルはクェーサー光度とダークマターハロー質量の関係に影響を与えることを明らかにした。スーパーエディントン降着の際にクェーサー光度がエディントン光度程度に抑えられるとき、クェーサーバイアスは顕著なクェーサー光度依存性を持つことが分かった。我々の結果は、クェーサークラスタリングの観測からブラックホールへの質量降着過程に制限を与えることができる可能性を示唆している。

5.1.2 系外惑星

ほぼ同一軌道面をなす階層的３体系の力学進化

系外惑星系において、主星のごく近くを公転する惑星の起源には、未だ定説がない。特に逆行惑星の起源の説明は極めて困難である。その一つの可能性として、ほぼ同一軌道面上を、大きな離心率を持って公転する 2 つの惑星間の永年摂動によって、内側の惑星の離心率がほぼ 1 に近くなるまで成長した結果、逆行するというモデルが提案されている。しかしながら、従来無視されていた一般相対論的補正と、惑星と主星の有限サイズ効果を考慮した数値シミュレーションの結果、逆行惑星を実現するパラメータ領域はほとんど存在し得ないことがわかった。一方、このモデルは、むしろ通常の順行近接惑星の形成に大きく寄与する可能性があることが示された。[42]

系外惑星リング探索の方法論の構築および候補天体の詳細な解析

太陽系外惑星リングを発見することを念頭において、系外惑星リングを探索するための方法論を構築し、それをケプラー衛星で発見された 95 の長周期惑星およびその候補に応用した。その結果、いくつかの系については惑星リングの存在があるパラメータ

領域で棄却されることを示し、また 1 つのリング付き惑星候補天体を発見した。その後、発見したリング付き惑星候補を詳細に解析した結果、データを説明するモデルとして、惑星リングによる食にくわえて、2 重惑星による食、星回りの星周円盤による食が可能性として残ることを明らかにした。そして最終的に、現時点のデータのみでは、この 3 つの可能性のうち有意に 1 つを選ぶことはできないと結論づけた。さらなる議論をするためには、追観測などを用いて主星のパラメータを正確に決める必要がある [45, 59, 68, 78, 105, 145]。

星震学を応用した系外トランジット惑星系のスピン軌道傾斜角の統計的解析

星震学とは太陽型星の対流層における乱流によって励起された恒星全体の固有音響震動を解析することで、その恒星について質量や半径といった物理量、及び自転周期や自転傾斜角といった物理状態を推定する学問である。これをトランジット (惑星による主星の食) を起こす系外惑星系に応用すると、主星の自転軸と惑星の公転軸のなす角を推定することが可能となる。この角度は太陽系外惑星の形成過程及びその後の軌道進化を反映するため、観測から惑星形成理論に制限を与える上で重要な指標となる。そこで我々はケプラー宇宙望遠鏡の長期間高精度測光観測データをもとに、トランジット惑星を持つことが知られている 37 個の恒星に対して星震解析を通じて自転傾斜角を求め、それらは 0°(pole-on) から 90°(equator-on) にかけてほぼ等方に近い分布を示すという結果を得た。これは、今回解析した系に多いスーパーアースなどの岩石型惑星は、惑星同士の重力散乱や伴星に励起された古在振動など、従来の惑星形成理論の枠組みを超えた力学的な軌道進化を経た可能性を示唆する。[79, 124]

5.1.3 星・ブラックホール形成

原始惑星系円盤光蒸発の金属量依存性

原始惑星系円盤は、有限の時間で消失してしまうことが知られており、この有限の時間のことを原始惑星系円盤の寿命と呼ぶ。太陽近傍星団の円盤寿命が 3-6 百万年であるのに対して、低金属量環境下 ([O/H]~ -0.7dex) の円盤寿命は平均的に百万年以下と、明らかに互いに異なる円盤寿命の振る舞いを示す。本研究では、円盤寿命の金属量依存性を明らかにすることを動機に、円盤光蒸発をシミュレーションし光蒸発率の金属量依存性を明らかにする。本研究の段階的過程として、EUV/FUV 光蒸発率の金属量依存性をシミュレーションにより見積もった。結果として、EUV+FUV 光蒸発率はある金属量でピークを持つことが示された。将来的には、X 線も加熱源として考慮した光蒸発の流体シミュレーション、及び円盤の大局進化シミュレーションが円盤寿命金属量依存性を明らかにする上で必要とされる。

光子捕獲とスリム円盤降着を考慮した光度モデルでの急速降着によるブラックホールの成長

宇宙が 10 億歳程度の初期宇宙に観測されているような 10 億太陽質量以上の超巨大ブラックホールを説明するための 1 モデルとして、種となるブラックホールが超臨界降着により成長するというものがある。ブラックホール降着による成長の際には多量の輻射が放出され降着が抑制される可能性があり、これに関する様々な研究がなされている。本研究ではスリム円盤降着で光子捕獲を考慮した光度モデル、すなわち最大光度がエディントン光度より大きくなるモデルで、超臨界降着が実現され維持されうるか明らかにする目的で、非平衡化学反応と輻射輸送込のブラックホール降着流 1 次元流体シミュレーションを行った。結果、ブラックホールの質量やガス密度によっては、最大光度がエディントン光度の 10-100 倍程度でも、輻射による降着の抑制は重要でなく超臨界降着が実現されうることを示した。また、輻射圧がラム圧より小さくなるという解析的な条件により、シミュレーション結果をよく説明できることを示した。

初期宇宙における超大質量星形成

現在、$z > 6$ において数多くの QSO が観測されている。これは宇宙が始まって 8 億年の間に 10^9 $M_\odot$ の質量の天体 (Black Hole, BH) が形成されたことを示す。この BH の形成機構として Direct Collapse モデルが考えられている。宇宙初期に 10^5 $M_\odot$ の持つ星 (SuperMassive Star, SMS) ができ、その残骸 BH への降着により観測された BH を作る機構である。我々はこのような SMS ができるか否かを宇宙論的初期条件より始まる数値計算を用いて調べた。これまでの計算では、宇宙論的に崩壊するガス雲を 2 つ同定した。雲の温度構造より中心に SMS が形成されると推測される。今回は流体計算によりこの雲において形成される星の最終質量を計算した。計算の結果、星の質量はガス雲の形状によることがわかった。具体的に、フィラメント状の雲では激しい分裂が見られ、個々の星の質量は $< 10^4 M_\odot$ と予想より小さくなった。一方で、球状の雲では分裂はあまり起こらず SMS 形成に至った。この結果は、宇宙において SMS が形成されることを初めて検証した例であるとともに、雲の周辺環境の重要性を示している。

5.1.4 高エネルギー天文現象

宇宙最初の潮汐破壊現象とその観測可能性

近年の遠方クエーサー探索によって、太陽の 10 億倍もの質量を持つ超巨大ブラックホールが赤方偏移 $z > 6$ の銀河にすでに存在していることが示唆されている。このようなブラックホールの種として、宇宙初期、始原ガス雲から形成される大質量星が注目されている。特に、強い紫外線の照射や衝撃波によっ

て H2 分子が乖離した始原ガスからは太陽の 100 万倍の質量を持つ超大質量星が形成される可能性がある。超大質量星は一般相対論的不安定性によって直接重力崩壊し、超大質量ブラックホールを作る。[20] では、生まれたての直接崩壊ブラックホールの成長の解析モデルを構築、ブラックホールの周囲に大質量星の星団が形成されることを示した。星団中の大質量星の一部は緩和過程により中心に落下し、直接崩壊ブラックホールによって潮汐破壊される。この時、Swift J1644+57 のような相対論的ジェットが発射されると eROSITA などにより赤方偏移 $z = 20$ まで観測可能であり、将来的に最遠方のブラックホールの形成、進化のユニークなプローブになり得る。

すばる望遠鏡 HSC を用いた遠方超新星探査

超光度超新星 (SLSN) は通常の超新星 (SN) よりも約 100 倍の明るさをもつ宇宙の中で最も明るい現象の一つであり、現在赤方偏移 $z = 3.90$ もの遠方で発生した SLSN が観測されている。SLSN は大質量星の最期の姿であり、遠方宇宙でその発生率を測定することは遠方の星形成を理解する上で重要になる。2014 年 3 月から 2 年に渡り、すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam 戦略枠観測として、COSMOS をターゲットとした観測がおよそ 3 ヶ月に一回の間隔で行われた。本研究では、まず変動天体の探査を行い、1021 個の変動天体候補の中から SN 候補を選別する手法を考案した。その結果、361 個の SN 候補と約 600 個の活動銀河核候補に分類した。更に、発見した SN の絶対光度を COSMOS の測光赤方偏移カタログを用いて求め、SLSN 候補を 6 個同定することができた。これらのサンプルから赤方偏移 $1 \leq z \leq 4$ の SLSN 発生率を算出すると、近傍 SLSN の観測と星形成率から推測される発生率に測定誤差の範囲内で一致することが明らかになった [60, 122]。

直接シミュレーションによる超新星爆発メカニズムの解明

重力崩壊型超新星爆発とは、$8\,M_\odot$ 以上の大質量星がその最期に爆発を起こす現象である。そのメカニズムの最有力候補は、中心の原始中性子星が放射するニュートリノが周囲を加熱することで爆発するニュートリノ加熱メカニズムである。このメカニズムには多次元の流体不安定性が重要であり、球対称では爆発しないことが一般相対論的重力・ボルツマン方程式によるニュートリノ輸送を扱う計算で確かめられた。二次元以上では実際に爆発する計算があるが、重力とニュートリノ輸送は近似的なものであり、研究者グループによって近似手法が違うため結果が違う問題がある。そこで、多次元においても一般相対論的重力とボルツマン-ニュートリノ輸送を扱う計算コードを開発している。現在は一般相対論部分を除いたコードは完成し、京コンピュータを用いた計算の途中経過 [117]、及びこれまでの近似法の問題点を定量的に指摘する解析結果を発表している。一般相対論部分もモジュールとしては完成しており [96]、今後本体に結合することでコードを完成させる予定である。

音響メカニズムによる重力崩壊型超新星爆発の系統的研究

重力崩壊型超新星メカニズムの非主流の仮説として、原始中性子星が放射する音波による加熱が爆発を起こす音響メカニズムという仮説も提唱されている。これは数値計算での再現が難しく、爆発に必要な音波強度や、実際に放射される音波強度はまだ議論が収束していない。これに関して、簡易モデルを用いて爆発に必要な音波強度を系統的に調べる研究を行っており、その結果を発表している [102]。

ブラックホールによる白色矮星の潮汐破壊現象

ブラックホール近傍を星が通過すると、ブラックホールの潮汐力が星の自己重力を上回り、星が破壊される場合がある。破壊された星の残骸は、一部はブラックホールの重力を振り切って脱出し、また一部はブラックホールに束縛され降着円盤、そしてフレアやジェットを形成する。この潮汐破壊現象は宇宙における非常に明るい突発的現象であり、これまでに約数十例の候補天体が見つかっている。破壊される星の種類としては様々なものが考えられるが、白色矮星が破壊される場合には、特筆すべき特徴がある。その一つとして、破壊・圧縮される白色矮星が核爆発を起こしうるという点がある。特に激しい核爆発を起こした場合には、Ia 型超新星爆発に似た現象として観測されうるということが示唆されている。我々は、白色矮星やブラックホールの質量、軌道の近点距離の多様性に由来する、この現象の核反応の多様性について、数値シミュレーションを用いて調べた。その結果、白色矮星の質量が大きくなるほど、また軌道の近点距離が小さくなるほど、核反応がより激しくなることが分かった。一方で、ブラックホールの質量には核反応はあまり依存していないという結果も得られた。

＜受賞＞

[1] 樽家篤史、“宇宙論的重力構造進化の高精度非線形摂動論の開拓” 第 10 回（2016 年度）湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞、2017 年 1 月 28 日

[2] 吉田直紀、“大規模数値シミュレーションに基づく初期宇宙での構造形成の研究” 第 13 回日本学術振興会賞 日本学術振興会 2017 年 2 月 8 日

[3] 吉田直紀、“大規模数値シミュレーションに基づく初期宇宙での構造形成の研究” 第 13 回日本学士院学術奨励賞 日本学士院 2017 年 2 月 8 日

[4] 増田賢人、“高精度測光観測によるトランジット系外惑星系の探究” 第 7 回日本学術振興会育志賞、2017 年 3 月 8 日

[5] 増田賢人、“高精度測光観測によるトランジット系外惑星系の探究” 平成 28 年度東京大学大学院理学系研究科研究奨励賞 (博士課程)、2017 年 3 月 24 日

＜報文＞

(原著論文)

[6] Cristian E. Rusu, Masamune Oguri, Yosuke Minowa, et al.: “Subaru Telescope Adaptive Optics Observations of Gravitationally Lensed Quasars in the Sloan Digital Sky Survey”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **458** (2016) 2-55

[7] Kento Masuda & Yasushi Suto: “Transiting planets as a precision clock to constrain the time variation of the gravitational constant”, Publications of the Astronomical Society of Japan, **68** (2016) L5

[8] G. Barro, et al. (including Shigeki Inoue):“Caught in the Act: Gas and Stellar Velocity Dispersions in a Fast Quenching Compact Star-Forming Galaxy at $z \sim 1.7$”; The Astrophysical Journal, **820** (2016) 120

[9] Masamune Oguri: “Measuring the Distance-Redshift Relation with the Cross-Correlation of Gravitational Wave Standard Sirens and Galaxies”, Physical Review D, **93** (2016) 083511

[10] Sho Uehara, Hajime Kawahara, Kento Masuda, Shin’ya Yamada, and Masataka Aizawa: “Transiting Planet Candidates Beyond the Snow Line Detected by Visual Inspection of 7557 Kepler Objects of Interest”, The Astrophysical Journal, **822** (2016) 2

[11] Kohta Murase, Kazumi Kashiyama, Peter Mészáros, Ian Shoemaker, and Nicholas Senno: “Ultrafast Outflows from Black Hole Mergers with a Minidisk”; The Astrophysical Journal, **822** (2016) L9

[12] Ken Osato, Toyokazu Sekiguchi, Masato Shirasaki, Ayuki Kamada, and Naoki Yoshida: “Cosmological Constraint on the Light Gravitino Mass from CMB Lensing and Cosmic Shear”, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, **06** (2016) 004

[13] Kohta Murase, Kazumi Kashiyama, and Peter Mészáros: “A burst in a wind bubble and the impact on baryonic ejecta: high-energy gamma-ray flashes and afterglows from fast radio bursts and pulsar-driven supernova remnants”; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **461** (2016) 1498-1511

[14] Yiping Shu, Adam S. Bolton, Christopher S. Kochanek, Masamune Oguri, et al.: “The BOSS Emission-Line Lens Survey. III. Strong Lensing of Lyα Emitters by Individual Galaxies”, The Astrophysical Journal, **824** (2016) 86

[15] Kohei Inayoshi, Kazumi Kashiyama, Eli Visbal, and Zoltán Haiman: “Gravitational wave background from Population III binary black holes consistent with cosmic reionization”; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **461** (2016) 2722-2727

[16] Akio K. Inoue, et al.(including Naoki Yoshida): “Detection of an oxygen emission line from a high-redshift galaxy in the reionization epoch”, Science, **352** (2016) 1559

[17] Surhud More, et al. (including Masamune Oguri): “Detection of the Splashback Radius and Halo Assembly Bias of Massive Galaxy Clusters”, The Astrophysical Journal, **825** (2016) 39

[18] Yuya Sakurai, Kohei Inayoshi, Zoltán Haiman: “Hyper-Eddington mass accretion on to a black hole with super-Eddington luminosity”; Monthly Notices of the Royal Astronomical society, **461** (2016) 4496-4504

[19] Chiaki Hikage and Masamune Oguri: “A Pseudo-Spectrum Analysis of Galaxy-Galaxy Lensing”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **462** (2016) 1359-1370

[20] Kazumi Kashiyama, Kohei Inayoshi: “Stellar Tidal Disruption Events by Direct-collapse Black Holes”; The Astrophisical Journal, **826** (2016) 80

[21] Masayuki Tanaka, et al. (including Masamune Oguri): “A Spectroscopically Confirmed Double Source Plane Lens System in the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program”, The Astrophysical Journal, **826** (2016) L19

[22] Masato Shirasaki, Oscar Macias, Shun Horiuchi, Satoshi Shirai, Naoki Yoshida: “Cosmological constraints on dark matter annihilation and decay: Cross-correlation analysis of the extragalactic gamma-ray and cosmic shear”, Physical Review D, **94** (2016) 3522

[23] Takahiro Nishimichi, Francis Bernardeau, and Atsushi Taruya: “Response function of the large-scale structure of the universe to the small scale inhomogeneities”, Physics Letters B, **762** (2016) 247

[24] T. Kitayama, S. Ueda, S. Takakuwa, T. Tsutsumi, E. Komatsu, T. Akahori, D. Iono, T. Izumi, R. Kawabe, K. Kohno, H. Matsuo, N. Ota, Y. Suto, M. Takizawa, and K. Yoshikawa: “The Sunyaev-Zel’dovich Effect at Five Arc-seconds: RXJ1347.5-1145 Imaged by ALMA”, Publication of the Astronomical Society of Japan, **68**(2016) 88

[25] Joseph E. Coleman, Lindsay J. King, Masamune Oguri, et al.: “The Mass Distribution of the Unusual Merging Cluster Abell 2146 from Strong Lensing”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **464** (2017) 2469-2480

[26] Daichi Suto, Tetsu Kitayama, Takahiro Nishimichi, Shin Sasaki, and Yasushi Suto: “Evolution and statistics of non-sphericity of dark matter halos from cosmological N-body simulation”, Publications of the Astronomical Society of Japan, **68** (2016) 97

[27] Mikio Morii, et al.(including Naoki Yoshida): "Machine-learning selection of optical transients in the Subaru/Hyper Suprime-Cam survey", Publication of the Astronomical Society of Japan, **68** (2016) 104

[28] Hyunbae Park, Paul R. Shapiro, Junhwan Choi, Naoki Yoshida, Shingo Hirano, Kyungjin Ahn:"The hydrodynamic feedback of cosmological reionization", Astrophysical Journal **831** (2016) 86

[29] Anupreeta More, Chien-Hsiu Lee, Masamune Oguri, et al.: "A New Quadruple Gravitational Lens from the Hyper Suprime-Cam Survey: the Puzzle of HSC J115252+004733", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **465** (2017) 2411-2419

[30] Tobias Binder, Laura Covi, Ayuki Kamada, Hitoshi Murayama, Tomo Takahashi, Naoki Yoshida: "The matter power spectrum in hidden neutrino interacting dark matter models", Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, **11** (2016) 043

[31] Sunmyon Chon, Shingo Hirano, Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida: "Cosmological Simulations of Early Black Hole Formation: Halo Mergers, Tidal Disruption, and the Conditions for Direct Collapse"; Astrophysical Journal, **832** (2016) 134

[32] James H. H. Chan, Sherry H. Suyu, Anupreeta More, Masamune Oguri, et al.: "Galaxy-Scale Gravitational Lens Candidates from the Hyper Suprime-Cam Imaging Survey and the Galaxy And Mass Assembly Spectroscopic Survey", The Astrophysical Journal, **832** (2016) 135

[33] Masato Shirasaki, Takahiro Nishimichi, Baojiu Li, and Yuichi Higuchi: "The imprint of f(R) gravity on weak gravitational lensing - II. Information content in cosmic shear statistics", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **466** (2017) 2402

[34] Yiping Shu, et al. (including Masamune Oguri): "The BOSS Emission-Line Lens Survey. IV. Smooth Lens Models for the BELLS GALLERY Sample", The Astrophysical Journal, **833** (2016) 264

[35] Daichi Suto, Sébastien Peirani, Yohan Dubois, Tetsu Kitayama, Takahiro Nishimichi, Shin Sasaki, Yasushi Suto: "Projected axis ratios of galaxy clusters in the Horizon-AGN simulation: Impact of baryon physics and comparison with observations", Publications of the Astronomical Society of Japan, **69** (2017) 1

[36] Patrick Valageas, Atsushi Taruya, and Takahiro Nishimichi: "Consistency relations for large-scale structures with primordial non-Gaussianities", Physical Review D, **95** (2017) 023504

[37] Ken-ichi Tadaki, et al. (including Shigeki Inoue):"Bulge-forming Galaxies with an Extended Rotating Disk at $z \sim 2$"; The Astrophysical Journal, **834** (2017) 135

[38] Rui Marques-Chaves, et al. (including Masamune Oguri): "Discovery of a Very Bright and Intrinsically Very Luminous, Strongly Lensed Lyα Emitting Galaxy at $z = 2.82$ in the BOSS Emission-Line Lens Survey", The Astrophysical Journal, **834** (2017) L18

[39] Yoshiki Toba, Tohru Nagao, Masaru Kajisawa, Taira Oogi, et al.: "Clustering of infrared-bright dust obscured galaxies revealed by the Hyper Suprime-Cam and Wise"; The Astrophysical Journal, **835** (2016) 36

[40] Kengo Tomida, Masahiro N. Machida, Takashi Hosokawa, Yuya Sakurai, and Chia Hui Lin: "Grand-design Spiral Arms in a Young Forming Circumstellar Disk"; The Astrophysical Journal, **835** (2017) L11

[41] Anupreeta More, Sherry H. Suyu, Masamune Oguri, Surhud More, and Chien-Hsiu Lee: "Interpreting the Strongly Lensed Supernova iPTF16geu: Time Delay Predictions, Microlensing, and Lensing Rates", The Astrophysical Journal, **835** (2017) L25

[42] Yuxin Xue, Kento Masuda, and Yasushi Suto: "Possible Outcomes of Coplanar High-eccentricity Migration: Hot Jupiters, Close-in Super-Earths, and Counter-orbiting Planets", The Astrophysical Journal, **835** (2017) 204

[43] Chon Sunmyon, Latif Muhammad: "The impact of ionizing radiation on the formation of a supermassive star in the early Universe"; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **467** (2017) 4293-4303

[44] Shigeki Inoue: "Emergence of a stellar cusp by a dark matter cusp in a low-mass compact ultrafaint dwarf galaxy"; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **467** (2017) 4491-4500

[45] Masataka Aizawa, Sho Uehara, Kento Masuda, Hajime Kawahara , and Yasushi Suto: "Towards Detection of Exoplanetary Rings Via Transit Photometry: Methodology and a Possible Candidate"; The Astronomical Journal, **153** (2017) 193

(会議抄録)

[46] Teruyuki Hirano, et al. (including Kento Masuda):"Search for Close-in Planets around Evolved Stars with Phase-curve variations and Radial Velocity Measurements," IAU XXIX General Assembly, 2015. Proceedings of the IAU, Volume 29A, 2016, pp. 63-64.

(国内雑誌)

[47] 須藤 靖: "サイエンス最前線" 週刊エコノミスト 連載 2016 年 4 月 5 日号, 5 月 3・10 日号, 6 月 7 日号, 7 月 5 日号, 10 月 4 日号, pp.44–45.

[48] 須藤 靖: "この空のかなた　１３８億年の旅"、高知新聞　朝刊連載 2016 年 4 月 9 日, 5 月 14 日, 6 月 11 日, 7 月 9 日, 8 月 13 日, 9 月 10 日, 10 月 8 日, 11 月 12 日, 12 月 10 日, 2017 年 1 月 14 日, 2 月 11 日

[49] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その三十四: ○○のバカヤロー”、東京大学出版会 UP **524**(2016)6 月号, pp.27–34.

[50] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その三十五: かに星雲と『明月記』の出会い”、東京大学出版会 UP **527**(2016)9 月号, pp.36–42.

[51] 須藤 靖: “もうひとつの地球での生命の探し方”、アドスリー BioPhilia 2016 年 10 月号 「アストロバイオロジー」.

[52] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その三十六: 韓国で結婚”、東京大学出版会 UP **530**(2016)12 月号, pp.12–19.

[53] 須藤 靖: “「わかる」という意味”、窮理社 窮理 第 5 号 (2017), pp.2–10.

[54] 須藤 靖: “「これからの高校理科教育のありかた」をめぐって”、学術の動向 **22**(2017)1 月号, 特集 2 序文 p.41

[55] 須藤 靖: “線引きの議論に没入する前に”、岩波 科学 **87**(2017)2 月号, 巻頭エッセイ p.93.

[56] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その三十七: ベンフォードの法則”、東京大学出版会 UP **533**(2017)3 月号, pp. 39 – 43.

(学位論文)

[57] Daichi Suto: “Evolution and Statistics of Nonsphericity of Galaxy Clusters from Cosmological Simulations” (博士論文)

[58] Kento Masuda: “Exploring the Architecture of Transiting Exoplanetary Systems with High-Precision Photometry”（博士論文）

[59] Masataka Aizawa: “Searching for Exoplanetary Rings via Transit Photometry: Methodology and its Application to the Kepler Data” (修士論文)

[60] 加藤貴弘: “すばる Hyper Suprime-Cam を用いた遠方超新星探査” (修士論文)

(著書)

[61] 須藤 靖: “宇宙には、だれかいますか？ ”、佐藤勝彦 編 : 河出書房新社 (2017 年 2 月刊行、pp.54–62 執筆)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[62] Takahiro Nishimichi: “On the nonlinear mode coupling in the gravitational growth of cosmic structures”; One-Day Workshop on New perspective on theory and observation of large-scale structure (Kyoto University, June 16, 2016)

[63] Ken Osato: “Cosmological Properties of Simulated Galaxies from Hydrodynamic N-body Simulations”; Cosmic dawn of galaxy formation: linking observations and theory with new-generation spectral models (Paris, France, June 20-24, 2016)

[64] Yuya Sakurai: “Episodic accretion in supermassive star formation and formation of SMBH seeds in the early universe”; European Week of Astronomy and Space Science 2016 (Greece, July 4-8, 2016)

[65] Yuya Sakurai: “Supermassive star formation by episodic accretion: a highly unstable protostellar disk and UV feedback”; First Stars V (Germany, August 1-5, 2016)

[66] Takahiro Kato: “Superluminous supernova search with HSC SSP”; HSC Collaboration Meeting (Kashiwa, Japan, August 22-26, 2016)

[67] Ryohei Nakatani: “Metallicity Dependence of Photoevaporation Rate in Protoplanetary Disks”; APCosPA-Planet^2 RESCEU Summer School (Gifu, Japan, August 24-28, 2016)

[68] Masataka Aizawa: “Searching for exoplanetory rings via transit photometry ”; APCosPA-Planet^2 RESCEU Summer School (Gifu, Japan, August 24-28, 2016)

[69] Takahiro Nishimichi: “A Galaxy(Cluster)-Galaxy Lensing Emulator from simulations”; HSC Collaboration Meeting (Kavli IPMU, The University of Tokyo, August 26, 2016)

[70] Taira Oogi: “AGN clustering in a semi-analytic model: current status”; HSC-AGN face-to-face meeting (Kavli IPMU, August 27, 2016)

[71] Yuya Sakurai: “Hyper-Eddington accretion onto a black hole with super-Eddington luminosity”; Breaking the Limits: Super-Eddington Accretion on Compact Objects (Italy, September 19-23, 2016)

[72] N. H. Hayatsu and ALMA Deep Field in SSA22 team: “A Search for z = 6 [CII] Emitters in ALMA Cycle 2 Deep Survey Data”; Half a Decade of ALMA: Cosmic Dawns Transformed (California, USA, September 20-23, 2016)

[73] Kojiro Kawana, Ataru Tanikawa, Naoki Yoshida: “A Variety of Nucleosynthesis in Tidal Disruptions of a White Dwarf by an Intermediate Mass Black Hole”; The 7th East Asian Numerical Astrophysics Meating (Beijing, China, October 24-27, 2016)

[74] Naoki Yoshida: “Statistical Computational Cosmology”; JST/NSF Joint Symposium on Big Data (Tokyo, Japan, November 28, 2016)

[75] Taira Oogi: “Quasar clustering in a semi-analytic model based on ultra high-resolution N-body simulation”; Panoramas of the Evolving Cosmos (Hiroshima, November 29, 2016)

[76] Naoki Yoshida: “Cosmology with Subaru HSC survey”; 2nd CREST Big Data Symposium (Tokyo, Japan, January 12, 2017)

[77] Takahiro Nishimichi: “Dark Emulator Status Report”; HSC Weak-Lensing Working Group face-to-face meeting (Princeton University, February 6, 2017)

[78] Masataka Aizawa: “Searching for exoplanetary rings via transit photometry”; JSPS Core-to-Core Program “Planet2” Symposium 2017 (Nice, France, February 20-23, 2017)

[79] Shoya Kamiaka, Othman Benomar, and Yasushi Suto: “Statistical analysis of spin-orbit angle in exoplanet systems applying asteroseismology”; JSPS Core-to-Core Program “Planet2” Symposium 2017 (Nice, France, February 20-23, 2017)

[80] Taira Oogi: “Quasar clustering in a semi-analytic model of galaxy formation”; Cosmology seminar (Max Planck Institute for Astrophysics, February 21, 2017)

[81] Takahiro Nishimichi: “Numerical cosmology with an ensemble of simulations”; RIKEN International Symposium on Data Assimilation 2017, The 7th Annual Japanese Data Assimilation Workshop (RIKEN, February 27 - March 2, 2017)

招待講演

[82] Masamune Oguri: “Cluster searches with HSC”; Follow-up of wide-area X-ray surveys: Science, Facilities, Programs (Ringberg Castle, Germany, April 2016)

[83] Masamune Oguri: “Gravitational wave standard sirens”; Astronomical Distance Determination in the Space Age (Beijing, China, May 2016)

[84] Shigeki Inoue: “Disk instability of high-z clumpy galaxies”’; invited talk at workshop“The secular evolution of self-gravitating systems over cosmic ages”, (the Institut d’Astrophysique de Paris, May 2016)

[85] Kazumi Kashiyama: “Pulsar Wind Nebula as Cosmic-Ray Electron/Positron Factories”; 5th Session of the Sant Cugat Forum on Astrophysics (Sant Cugat, Spain, June 2016)

[86] Kazumi Kashiyama: “Newborn Black Holes and Explosive Transients”; Multi-messenger Approaches to Cosmic Rays: Origins and Space Frontiers 2016 workshop (Pennsylvania, USA, June 2016)

[87] Naoki Yoshida: “Formation of Primordial Stars”; Metals and Dust as Fuels of Star Formation (Santa Barbara, USA, June 28, 2016)

[88] Yasushi Suto: “Colors of a second earth: from exoplanets to astrobiology”; invited lecture of Introductory Astronomy Class for undergraduates in Sejong University (Seoul, South Korea, September 2016)

[89] Takahiro Nishimichi: “Modeling issues using N-body simulations: a case for SUBARU HSC survey galaxy-galaxy lensing emulator”; CosKASI-ICG-NAOC-YITP Workshop 2016 (Korea Astronomy and Space Science Institute, September 6, 2016)

[90] Yasushi Suto: “Impact of baryon physics on non-sphericity of galaxy clusters”; invited talk at the 7th KIAS cosmology workshop (Seoul, South Korea, November 2016)

[91] Masamune Oguri: “Clusters of galaxies in Subaru Hyper Suprime-Cam survey”; The 7th KIAS workshop on Cosmology and Structure Formation (Seoul, South Korea, November 2016)

[92] Yasushi Suto: “Colors of a Second Earth: A Future Path Towards Astrobiology From Space”; invited talk at 2016 Inter-Academy Seoul Science Forum (Seoul, South Korea, November 2016)

[93] Naoki Yoshida: “Simulations of Cosmic Structure Formation”; The 1st Computer Alliance Symposium (Tokyo, Japan, November 20, 2016)

[94] Kazumi Kashiyama: “Electromagentic counterparts of massive stellar mass black hole formation”; International Molecule-type workshop (Kyoto, Japan, January 2017)

[95] N. H. Hayatsu and ALMA Deep Field in SSA22 team: “ALMA Deep Field in SSA22(ADF22): Cosmic Molecular Gas Mass Density at $z = 0.7$ and 6.2”; East-Asian ALMA Science Workshop 2016-Taiwan (Hsinchu, Taiwan, March 10-12, 2017)

[96] Akira Harada, Shoichi Yamada: “Toward general relativistic supernovae simulations”; The Third ALPS Symposium on Photon Science (Tokyo, Japan, March 24, 2017)

[97] N. H. Hayatsu and ALMA Deep Field in SSA22 team: “Search for mm/submm Line Emitting Galaxies in ALMA Deep Fields”; ALMA deep surveys and their synergies with HST and JWST (Tokyo, Japan, March 31 - April 1, 2017)

(国内会議)

一般講演

[98] 大木 平: “Quasar clustering in a semi-analytic model based on ultra high-resolution N-body simulations”; Protocluster workshop (国立天文台, 4/18, 2016)

[99] 大木 平: “準解析的銀河・AGN 形成モデルへのスリム円盤モデルの導入”; 第 29 回理論懇シンポジウム (東北大学, 12/20, 2016)

[100] 大栗 真宗: “Cosmology: From Subaru/HSC to space mission”; 2020 年代のすばる望遠鏡と衛星計画のシナジー検討研究会 (国立天文台, 4/22, 2016)

[101] 早津夏己, ALMA Deep Field in SSA22 team: “ALMA Cycle2 サーベデータを用いた $z = 6$ [CII] 輝線探査”; 銀河進化研究会 (東北大学, 6/1-6/3, 2016)

[102] Akira Harada, Wakana Iwakami, Shoichi Yamada: “Systematic study of the acoustic mechanism for core-collapse supernovae”; Many Riddles About Core-Collapse Supernovae: 1 Bethe and Beyond (Tokyo, Japan, 6/27-7/1, 2016)

[103] 西道 啓博: “大規模数値計算による宇宙大規模構造の情報伝播構造の定量的理解”; 日本天文学会 2016 年秋季年会 (愛媛大学, 9/14, 2016)

[104] 吉田 直紀: “統計計算宇宙物理学”; 日本天文学会 2016 年秋季年会 (愛媛大学, 9/14, 2016)

[105] 逢澤正嵩: “ケプラー測光データを用いた長周期惑星のリング探査 II”; 日本天文学会 2016 年秋季年会 (愛媛大学、9/15、2016)

[106] 櫻井祐也: “Super-Eddington 光度下でのブラックホール hyper-Eddington 降着流”; 日本天文学会 2016 年秋季年会 (愛媛大学, 9/15, 2016)

[107] 仲谷崚平: “原始惑星系円盤の光蒸発”; 日本天文学会 2016 年秋季年会 (愛媛大学, 9/15, 2016)

[108] 早津夏己, ALMA Deep Field in SSA22 team: “ALMA Cycle2 サーベイデータを用いた z = 6 [CII] 輝線銀河探査”; 日本天文学会 2016 年秋季年会 (愛媛大学, 9/15, 2016)

[109] 大木 平: “準解析的銀河・AGN 形成モデルへのスリム円盤モデルの導入”; 日本天文学会 2016 年秋季年会 (愛媛大学, 9/16, 2016)

[110] 大栗 真宗: “重力波源と銀河の相互相関を用いた宇宙の絶対距離測定”; 日本天文学会 2016 年秋季年会 (愛媛大学, 9/16, 2016)

[111] 西道 啓博: “大規模シミュレーション群を用いた宇宙大規模構造の理論予言”; 第 8 回「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム (筑波大学, 10/18, 2016)

[112] 早津夏己, “[CII] 輝線探査で探る遠方星形成史”; 銀河微細構造輝線研究会 (大阪産業大学, 11/4-11/5, 2016)

[113] 大栗 真宗: “HSC サーベイにおける銀河団探査”; 第 5 回観測的宇宙論ワークショップ (広島大学, 11/24, 2016)

[114] 大里 健 他:“Probing cosmology and cluster astrophysics with cross-correlation of thermal Sunyaev-Zel’dovich effect and weak lensing”; 第五回観測的宇宙論ワークショップ (広島大学, 11/24, 2016)

[115] 西道 啓博: “Cosmic Dark Emulator Project”; 第 5 回観測的宇宙論ワークショップ (広島大学, 11/25, 2016)

[116] 西道 啓博: “大規模シミュレーション群を用いたダークエミュレータの準備状況”; 平成 28 年度 CfCA ユーザーズミーティング (国立天文台, 11/29, 2016)

[117] 原田了、長倉洋樹、山田章一: “回転星の重力崩壊における ρ-Ye 関係”; 理論天文学宇宙物理学懇親会 (宮城, 12/20-22, 2016)

[118] 仲谷崚平: “原始惑星系円盤における光蒸発の金属量依存性”; 原始星と原始惑星系円盤の形成進化過程についてのワークショップ (博多, 12/27-12/28, 2016)

[119] 吉田 直紀: “シミュレーションデータベースと統計学”;「京からポスト京へむけて」シンポジウム (筑波大学, 2/16, 2017)

[120] 大栗 真宗: “DES 等と比べた WL 関連研究の進捗”; 新学術領域「なぜ宇宙は加速するのか？」2017 シンポジウム (高エネルギー加速器研究機構, 3/9, 2017)

[121] 井上 茂樹: “Emergence of a stellar cusp by a dark matter cusp in a low-mass compact ultra-faint dwarf galaxy”; 日本天文学会 2017 年春季年会 (九州大学, 3/15, 2017)

[122] 加藤貴弘: “すばる Hyper Suprime-Cam を用いた超光度超新星探査”; 日本天文学会 2017 年春季年会 (九州大学, 3/15, 2017)

[123] 大栗真宗: “HSC-SSP サーベイにおける可視銀河団サンプルの構築”; 日本天文学会 2017 年春季年会 (九州大学, 3/16, 2017)

[124] 上赤 翔也, Othman Benomar, 須藤 靖: “星震学を応用した系外トランジット惑星系のスピン軌道傾斜角の統計的解析”; 天文学会 2017 年春季年会 (九州大学, 3/16, 2017)

[125] 仲谷崚平: “原始惑星系円盤光蒸発の金属量依存性”; 日本天文学会 2017 年春季年会 (九州大学, 3/17, 2017)

[126] 樫山 和己: “重たい星質量ブラックホール形成と電磁波カウンターパートについて”; 物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学, 3/17, 2017)

招待講演

[127] 吉田 直紀: “Early Emission Line Galaxies”; Ultimate Subaru Workshop (国立天文台, 6/16, 2016)

[128] 吉田 直紀: “銀河形成とダークマター”; 天文宇宙若手夏の学校 (長野県戸倉, 7/28, 2016)

[129] 井上 茂樹: “遠方宇宙における銀河の形態獲得プロセスと銀河円盤の力学不安定性について”; 面分光研究会 2016(国立天文台, 9/5, 2016)

[130] 樫山和己: “近い将来、重たい連星進化について何が分かり得るのか？ ”; 宇宙線研究所共同利用小研究会「コンパクト天体における高エネルギー現象」(東京大学, 10/12, 2016)

[131] 樫山和己: “大質量星安定性や巨大星の潮汐破壊”; 初代星・初代銀河研究会 2016 (金沢, 10/26, 2016)

[132] 大栗 真宗: “銀河団の弱重力レンズ解析”; 秋の学校「理論と観測から迫るダークマターの正体とその分布」(国立天文台, 11/10, 2016)

[133] 樫山和己: “Fast Radio Bursts: A Summary of Observations and Theoretical Challenges”; 理論天文学研究会 2016 (富山大学, 11/15, 2016)

[134] 井上 茂樹: “Dynamics in disc and elliptical galaxies in the high-redshift Universe”; 近傍銀河の分子ガスの大規模撮像観測が拓く星間物質と星生成の研究に関する新展開 (国立天文台, 11/17, 2016)

[135] 樫山和己: “Multi-messenger tests for baby neutron stars”; 高エネルギー宇宙物理学研究会 2016 (青山学院大学, 12/2, 2016)

[136] 樫山和己: “高エネルギーニュートリノと突発天体”; マルチメッセンジャー天文学研究会 (千葉大学, 3/2, 2017)

[137] 樫山和己: “Progenitors of coalescing binary neutron stars and possible connection to fast radio bursts”; 研究会「連星中性子星・ブラックホールを含む重力波源の電磁波対応天体」(京都大学基礎物理学研究所, 3/7, 2017)

[138] 須藤 靖: “これ以上何を知りたい？ ”; 日本学術会議シンポジウム「天文学・宇宙物理学のさらなる地平を探る」(東京大学, 3/11, 2017)

[139] 樫山和己: “突発的天体現象と em, ν, UHECR”; 2016 年度 CRC 将来計画タウンミーティング (東京大学, 3/24, 2017)

(セミナー)

[140] Ryohei Nakatani: “Photo-Evaporation of a Protoplanetary Disk”; JPL journal club seminar (Jet Propulsion Laboratory, CA, USA, 4/14, 2016)

[141] 樫山和己: “Explosive transients and related topics”; 基礎物理学研究所 集中講義 (京都大学, 4/21, 2016)

[142] 増田賢人: “Exploring the Architecture of Transiting Exoplanetary Systems with High-precision Photometry”; Ta 研コロキウム (名古屋大学, 7/15, 2016)

[143] Yasushi Suto: “Non-sphericity of galay clusters and impact of baryon physics”; Cosmology seminar at Sejong University (Seoul, September 2016)

[144] 井上 茂樹: “宇宙論的銀河形成シミュレーションで探る遠方銀河の形態獲得プロセスと形成期銀河円盤の力学不安定性解析”; つくば宇宙フォーラム (筑波大学, 10/11, 2016)

[145] 逢澤正嵩: “トランジット法による系外惑星リングの探索:方法論とリング惑星候補の発見”; 系外惑星系セミナー (東京大学, 10/24, 2016)

[146] Naoki Yoshida: “The future of cosmological simulations”; Simons Center for Computational Astrophysics (New York, USA, November 9, 2016)

[147] 樫山和己: “Massive Binary Evolution, and Transient, High-Energy Phenomena”; 理論宇宙物理学研究室 セミナー (早稲田大学, 11/11, 2016)

[148] 仲谷崚平: “Metallicity Dependence of Photoevaporation Out of a Protoplanetary Disk”; 理論物理学研究室 セミナー (甲南大学, 11/29, 2016)

[149] 西道 啓博: “Dark Emulator: cosmic large-scale structures and parameter estimation”; データ同化セミナー (計算科学研究機構, 12/22, 2016)

[150] 井上 茂樹: “円盤銀河の力学不安定性”; 天文学教育研究センター・談話会 (国立天文台, 1/12, 2017)

[151] Naoki Yoshida: “Cosmological constraints on dark matter annihilation and decay”; KEK Theory Group Seminar (Tsukuba, January 24, 2017)

[152] 櫻井祐也: “Origin of SMBHs in the Early Universe: In the Case via Runaway Collision in Star Clusters”; AICS 宇宙物理学セミナー (計算科学研究機構, 2017 年 2 月 21 日)

[153] Naoki Yoshida: “Future of Numerical Cosmology”; HITS Computational Astrophysis Seminar (Heidelberg, 3/1, 2017)

[154] 吉田直紀: “機械学習と宇宙論”; 京都大学物理学教室発表会 (京都大学, 3/14, 2017)

[155] 大栗 真宗: “New gravitational lenses in time domain”; 基礎物理学研究所 セミナー (京都大学, 3/23, 2017)

[156] 西道 啓博: “宇宙論的構造形成を舞台としたビッグデータ数値計算の方法論”; 基礎物理学研究所 セミナー (京都大学, 3/30, 2017)

(講演)

[157] 須藤 靖: “日本学術会議提言「これからの高校理科教育のあり方」について”; 第 171 回　日本学術会議総会 (日本学術会議講堂, 2016 年 4 月 15 日)

[158] 須藤 靖: “一般相対論 100 年: 重力波の直接検出”; 高知工科大学　物理学概論 (高知工科大学, 2016 年 5 月 17 日)

[159] 須藤 靖: “この空のかなた：第二の地球、ダークエネルギー、重力波”; 日本学術会議 第 1 回全国縦断サイエンスカフェ (高知, 2016 年 5 月 18 日)

[160] 吉田 直紀: “宇宙の夜明け：ファーストスターと巨大ブラックホール”; 公開講演会「宇宙、重力波、ニュートリノ」(東邦大学, 7/30, 2016)

[161] 須藤 靖: “太陽系外惑星の世界”; 東京大学理学部オープンキャンパス (東京大学, 2016 年 8 月 4 日)

[162] 吉田 直紀: “ビッグデータ宇宙論”; ナガセ 大学学部研究会 (ガーデンシティ品川, 8/5, 2016)

[163] 須藤 靖: “ペイルブルードットを超えて”; 立教大学理論物理学コロキウム (立教大学, 2016 年 9 月 28 日)

[164] 吉田 直紀: “サイエンス温泉: 宇宙とアート”; 東京大学オープンキャンパス (東京大学, 10/22, 2016)

[165] 須藤 靖: “清水ヶ丘から夜空ノムコウを見る”; 清水ヶ丘中学校講演会 (高知, 2016 年 10 月 28 日)

[166] 須藤 靖: “一般相対論と天文学”; 日本物理学会　公開講座「一般相対性理論と宇宙-重力波研究の最前線-」(東京大学伊藤謝恩ホール, 2016 年 11 月 26 日)

[167] 吉田 直紀: “宇宙 138 億年解読”; 取手市民講座 (取手ウェルネスプラザ, 12/27, 2016)

[168] 吉田 直紀: “ダークマターを探せ”; コズミックフロントプラネタリウム版 座談会 (渋谷プラネタリウム, 1/13, 2017)

[169] 須藤 靖: “「学術研究のために」という視点”; 学術フォーラム「安全保障と学術の関係：日本学術会議の立場」(日本学術会議講堂, 2017 年 2 月 4 日)

5.2 村尾研究室

本研究室では、物理学の中でも最も新しい研究分野の一つである量子情報の理論的研究を行っている。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。量子情報を用いると古典情報とはクラスの違う情報処理が可能となるため、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注目を集めている。

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 Marco Túlio Coelho Quintino 博士 (2016 年 11 月より)、博士課程大学院生の加藤晃太郎氏、宮崎慈生氏、新保厚氏、坂井亮介氏、Matthias Strödtkotter 氏、山崎隼汰氏、また修士課程大学院生の董青秀雄氏のメンバーで、高階量子演算、多体量子状態の量子情報的解析、ハイブリッド量子系での量子情報処理、エンタングルメント理論、量子非局所性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

量子情報処理の実用化の観点からも、非可換代数に基づく情報処理の特性を理解することにより量子力学の基盤的理解を進めるという物理学基礎論および情報学基礎論の観点からも、「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演算を入力として、量子演算を出力とする関数である超写像を実装する高階量子演算 (higher order quantum operations) 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の解析を進めた。

ユニタリ変換の普遍的制御化

未知のユニタリ変換を実行するブラックボックスが与えられたときに、そのユニタリ変換の制御化の手法の開発、解析を行った。ユニタリ変換の制御化とは、古典の場合の条件分岐に対応する操作であり、1 量子ビットからなる制御系を加えて、与えられたユニタリ変換を組み合わせることによって、制御系の状態が 0 ならばユニタリ変換を作用せず、1 ならばユニタリ変換を作用させるという振る舞いをする新たなユニタリ変換を実行することである。これは量子演算から量子演算への変換であり、制御ユニタリ変換は因数分解を実行する Shor のアルゴリズム等でも用いられているために、実用上重要な高階量子演算の例である。しかしながら、ユニタリ変換の制御化は、量子力学の範囲内で厳密に実装することは一般には不可能であることが証明されている。本研究では d 次元のユニタリ変換について、その d 乗根を実行することができれば、もとのユニタリ変換に対応する制御ユニタリ変換を厳密に実行できることを示した。ユニタリ変換が時間依存しないハミルトニアンで与えられた場合、d 乗根は時間発展を短くすることで実装できるので、この結果はある特定のクラスの量子演算では制御化が可能であることを示している。また d 乗根を作る操作も高階量子演算であるので、この結果は 2 つの異なる高階量子演算の間の関係を与えている。本研究は NII の仲山将順博士との共同研究である。[担当: 董、添田、村尾]

ユニタリ変換の複素共役化

ブラックボックスとして与えられたユニタリ変換をサブルーチンとして用いることで、そのユニタリ変換の複素共役を実装する複素共役化アルゴリズムを考察した。ユニタリ変換や量子状態の複素共役化はエンタングルメントの計算に応用できることが知られていたが、これまでの複素共役化アルゴリズムにはユニタリ変換や量子状態の古典的表式が既知と仮定され使われていた。未知のブラックボックスとして与えられるユニタリ変換の複素共役化を考えることで、エンタングルメントの計算に必要なコストを削減できる可能性がある。ユニタリ変換を 1 回だけ用いることができる場合、2 次元ヒルベルト空間に作用するユニタリ変換の複素共役化は可能であるが、3 次元以上の空間に対しては不可能であることが知られていた。我々は d 次元空間上のユニタリ変換の複製 $d-1$ 個がブラックボックスとして与えられているときに、その複素共役化されたユニタリ変換を 1 回だけ実装するアルゴリズムを示した。また複製が与えられた未知の量子状態を確率的に複素共役化するためには無限個の複製が必要であることも示したため、量子状態とユニタリ変換に対する複素共役化が大きく異なる振る舞いをすることが明らかになった。我々のユニタリ変換複素共役化アルゴリズムは、フェルミ粒子系の粒子-空孔を入れ替える作用素によって物理的に理解することができる。[担当: 宮崎、添田、村尾]

高階量子演算を用いたエンタングルメント量の計算

複素共役化の結果を応用し、未知量子状態のエンタングルメント量を測定するためのエルミート演算子を導出した。エンタングルメントを定量化する関数は種々あり、その中にはコンカレンスなど複素共役を定義の中に含むものがある。我々は高階量子演算を用いることによって複素共役を含む関数を測定するためのエルミート演算子の一般的な構築方法を示した。コンカレンスなどこれまで知られている関数に対するエルミート演算子を与えただけでなく、複素共役化アルゴリズムを応用することにより G-コンカレンスと呼ばれる関数が複素共役を用いて再定義できることを示し、対応するエルミート演算子を求めた。これらエルミート演算子の期待値を測定することにより、量子状態を決定する全パラメータが与えられていなくてもエンタングルメント量を計算することができる。[担当: 宮崎、添田、村尾]

未知のユニタリ変換の識別問題

ユニタリ変換の識別問題は、未知ユニタリ変換がブラックボックス X として与えられたとき、候補となるユニタリ変換のどれと一致するかを識別する問題である。従来の研究では、候補のユニタリ変換の行列要素 (古典情報によるユニタリ変換の記述) が事前に与えられている場合を考えていた。一方、本研究では、候補のユニタリ変換もブラックボックス

$X_1, X_2, \cdots$ としてのみ与えられており、候補のブラックボックスはそれぞれ n 回だけ使用することができる場合に、ブラックボックス X が候補 $X_1, X_2, \cdots$ のどれと一致するかを識別する問題を考える。特に、$n = 1, 2$ で量子ビット系のユニタリ変換について考察した。識別の方法 には、全てのユニタリ変換を異なる空間へ同時に作用させる並列的方法と、各ユニタリ変換の間に量子演算を挿入することができる適応的方法によって識別する場合が考えらる。まず $n = 1$ の場合には、並列的方法と適応的方法で最適な成功確率が変わらないということを解析的に示した。またこの場合には、2 つの候補のユニタリ変換のうちの一つだけ使用しても最適な成功確率が実現できることがわかった。$n = 2$ の場合については、全てのユニタリ変換の配置方法に関して最適な成功確率を Semidefinite Programing の手法を用いで数値的に求めた。この場合は、適応的方法が並列的方法より高い成功確率を与え、適応的方法においては、各ユニタリ変換の使用順序によって最適な成功確率が異なるということがわかった。[担当: 新保、添田、村尾]

断熱量子計算と Grover 探索アルゴリズムの応用による高階量子演算

ユニタリ変換を変換するための高階量子演算の代表例である「量子学習」「転置行列化」「複素共役化」「逆行列化」について、我々は昨年度、断熱量子計算と Grover 探索アルゴリズムを適切に構成することで、これら高階量子演算を実装する量子アルゴリズムを発見した。本年度は、このアルゴリズムの性能評価にダイアモンドノルムを利用したより精密な評価手法を適用し、昨年度利用した量子断熱定理の適用法を再検討したところ、ユニタリ変換の次元 d にたいして使用する計算資源（ユニタリ変換の利用回数）が d^2 でスケールすることが分かった。これは現時点で知られている高階量子演算実装法において最良のスケーリングである。本研究は国立情報学研究所の仲山将順博士との共同研究である。[担当 : 添田、村尾]

5.2.2 多体量子状態の量子情報的解析

エネルギーギャップのある二次元系の基底状態には、トポロジカル秩序相と呼ばれる、局所的な秩序変数では特徴づけられない量子相が現れる。トポロジカル秩序相の特徴づけにはエンタングルメント・エントロピーを用いてトポロジカル・エンタングルメント・エントロピーと呼ばれる量が有用であることが知られている。秩序相に関するより詳細な情報を得るため、近年では縮約密度行列のスペクトラムである、エンタングルメント・スペクトラムに注目が集まっている。

トポロジカル・エンタングルメント・エントロピーとエンタングルメント・スペクトラム

本研究では、これまでに得たトポロジカル・エンタングルメント・エントロピーと幾何学的な相関の尺度の関係を用いて、二次元量子スピン系の半筒におけるエンタングルメント・スペクトラムとトポロジカル・エンタングルメント・エントロピーの関係を調べた。その結果、トポロジカル・エンタングルメント・エントロピーの値が零のときにはエンタングルメント・スペクトラムはある一次元短距離ハミルトニアンのスペクトラムとなるが、正のときにはそこに加えて大局的な射影項の影響が現れることがわかった。これは、トポロジカル・エンタングルメント・エントロピーとエンタングルメント・スペクトラムの関係の新規な定式化と言える。本結果はカリフォルニア工科大学の Fernando Brandao 教授との共同研究であり、国際会議 QIP2017 にて口頭発表として発表した。[担当: 加藤]

5.2.3 ハイブリッド量子系の量子情報処理

特徴が異なる複数の量子系をハイブリッド化することによって、目的に対するそれぞれの系の長所と短所が補完されることが期待される。本研究では、量子情報処理の観点からハイブリッド量子系について考察する。

低制御量子系への量子情報入出力アルゴリズム

与えられた一種類の固定ハミルトニアンのオンオフのみが許されるような制御性の低い量子系（低制御量子系）と、比較的小規模な量子計算機とを組み合わせたハイブリッド量子系における量子情報処理の方法を考察した。この固定ハミルトニアンが量子計算機の一部との相互作用となっている場合において、低制御量子系から量子計算機に状態を移す操作、およびその逆操作が実行可能となるかについて調べた。2 つの系の間で状態の入出力操作が実行可能となれば、量子計算機の操作性から、低制御量子系の状態に対して量子演算が可能となる。その結果、相互作用ハミルトニアンがある性質を満たしたときに、状態の入出力操作が任意の近似精度で実行可能となる量子アルゴリズムを 2 つ得た。一つ目は、量子計算機のメモリ大きさが、近似の精度に影響するアルゴリズムであり、精度の良い入出力操作を実行するためには大きな量子計算機が必要となる。他方は、量子計算機のメモリサイズに依存せず、小規模な計算機でも任意の近似精度で実行可能となることを示した。一つ目のアルゴリズムの利点は、相互作用ハミルトニアンがある性質を満たしていることがわかっていれば、そのハミルトニアンの行列表示によるパラメータに依存しない形で記述できる点である。つまり、相互作用ハミルトニアンに依存しない部分と、相互作用ハミルトニアンによる時間発展演算子を組

み合わせた形でアルゴリズムを記述することができる。[担当: 坂井、添田、村尾]

5.2.4 エンタングルメント理論

量子情報分野では、量子系を操作し量子状態を入出力するタスクを行う際に必要な計算資源の解析 (資源理論) を通じて、量子系の操作限界を定量的に示すことで、量子状態や状態変換の性質が操作論的視点から解析されてきた。こうしたタスクを実行するための計算資源のひとつがエンタングルメントであり、エンタングルメント理論が発展してきた。

出力分散型量子情報処理の資源理論

本研究では、多体状態の変換とエンタングルメントの関係を、「なるべく少ないエンタングルメントを資源として変換を実装するタスク」を通じて操作論的に解析した。解析手法として、量子系を持つ 3 者以上の多者間を、量子通信路に相当する複数のベル状態でつないだ量子ネットワークを考え、ベル状態を消費し量子通信することで、入力された量子状態に対して所定の変換を行う実装タスクを考えた。本研究では多者を量子通信路（に相当する複数のベル状態）で、ツリー形という特別な形につなぐ場合（多者を最少の量子通信路でつなぐ場合に相当）の実装タスクを解析した。特に、1 者の持つ量子系から入力された量子状態を変換し、多者に渡る量子系全体へと多体状態を分散して出力する変換操作 (出力分散型変換) を少ないベル状態で実装する方法を研究した。ツリー形のネットワークでは、2 体の結果の拡張によって、出力分散型変換の実装に必要なエンタングルメント量の下界を求められる。この下界を達成する最適な実装手順を求めることで、実装に必要なエンタングルメントコストを示した。この際、正確な実装方法に加え、同一な変換を複数回まとめて近似的に実装の際に、変換 1 回あたりのコストを削減する方法も求めた。この成果の意義は、多体状態の変換とエンタングルメントの関係を資源理論を用いて解明した先駆的事例となっている点にある。[担当: 山崎、添田、村尾]

5.2.5 量子非局所性

最大非共存な量子測定による頑強量子ステアリング検証法

量子基礎論的な観点から、与えられたエンタングル状態が Einstein-Podolsky-Rosen ステアリング性を示すかを判別すべく、多くの研究がなされてきた。一方で、実用的には、利用可能な量子測定に制限がある場合におけるステアリング実証性が重要となってくる。我々は N 種類の量子測定に対して、それぞれが k 個の測定結果しか返さない場合を考えた。ステアリングを実証する各実験者は、一般的量子測定（POVM）か特定の（例えば射影的ないし対称的）測定のみ許されているとした。複数の測定条件において、与えられた量子状態がホワイトノイズに対し持つ頑強性の上限と下限を評価する汎用的手法を提案した。また、我々の手法を用いれば、有限準位の量子系に対する量子測定が N 種類あるとき、この量子測定が持つの非共存性のノイズ耐性を評価できる。いくつかの相互無偏向基底、対称的情報完全測定、およびその他対称的な量子測定は、等方的な量子状態の集合のステアリング性を実証するのに最適でないことを示した。 なお、このタスクでは、非射影的な量子測定は射影的測定よりも必ずしも有用にならないことを示す数値的証拠を得た。本研究はオーストラリアの Quantum Optics and Quantum Information 在籍の Jessica Bavaresco 博士との共同研究である。[担当: Quintino]

量子測定の非共存性のデバイス非依存な検証法

量子状態や量子測定は、古典にはない性質を持っていることが知られている。たとえば二体の量子状態にはエンタングルメントが許されており、古典力学では記述できない相関を示す。また、複数の量子測定が「非共存」、すなわち同時測定が不可能になりうる。ベル非局所性と呼ばれる非古典的な相関を生成するうえで、エンタングルメントや量子測定の非共存性は重要な要素となる。ベル実験において、エンタングルメントや量子測定の非共存性は、実験結果の統計的なデータだけから証明することができる。このとき、用いた量子状態や量子測定、またその他の物理的実装法に依存しないため、このような手法はデバイス非依存と呼ばれる。本研究では量子力学で許される、あらゆる測定設定における量子測定の非共存性をデバイス非依存に検証する方法を開発した。本研究は ICFO-Institut de Ciencies Fotoniques の Daniel 博士との共同研究である。[担当: Quintino]

＜受賞＞

[1] 山崎隼汰, Best Student Poster Award, The 16th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2016), Taipei, Taiwan, September 2016

＜報文＞

(原著論文)

[2] Jayne Thompson, Paweł Kurzynski, Su-Yong Lee, Akihito Soeda, and Dagomir Kaszlikowski, “Recent Advances in Contextuality Tests”, *Open Syst. Inf. Dyn.* **23**, 1650009 (2016)

[3] S. Akibue and M. Murao, “Network coding for distributed quantum computation over cluster and butterfly networks”, *IEEE Trans. Inf. Theory* **62**, 6620 - 6637 (2016)

[4] Eyuri Wakakuwa, Akihito Soeda, Mio Murao, “Markovianizing Cost of Tripartite Quantum States”, *IEEE Trans. Inf. Theory* **63**, 1280 - 1298 (2017)

(学位論文)

[5] 加藤晃太郎, “Correlations in quantum many-body systems and quantum information theoretic measures”, 博士論文

＜特許＞

[6] 国内特許（取得）, 特許番号 5936073, 発明等の名称（マルチキャスト量子ネットワーク符号化方法）, 発明者 (尾張正樹、加藤豪、村尾美緒), 出願日（2013 年 3 月 28 日）, 特許出願人 (日本電信電話株式会社, 国立大学法人東京大学), 特許登録（2016 年 5 月 20 日）

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[7] K. Kato, F. Furrer, M. Murao, “Information-theoretical analysis of topological entanglement entropy and multipartite correlations”, The 3rd Seefeld Workshop on Quantum Information, Seefeld, Austria, June 2016 (poster)

[8] S. Akibue, M. Owari, G. Kato and M. Murao, “Entanglement assisted classical communication simulates ’classical communication’ without causal order’”, The International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2016), Singapore, Singapore, July 2016 (poster)

[9] K. Kato, F. Furrer, M. Murao, “Information-theoretical analysis of topological entanglement entropy and multipartite correlations”, The 16th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2016), Taipei, Taiwan, August 2016 (oral)

[10] E. Wakakuwa, A. Soeda and M. Murao, “A Four-Round LOCC Protocol Outperforms All Two-Round Protocols in Reducing the Entanglement Cost for A Distributed Quantum Information Processing”, The 16th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2016), August 2016 (oral)

[11] R. Sakai, A. Soeda, M. Murao,“Quantum input-output algorithms for quantum systems with limited controllability”, The 16th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2016), Taipei, Taiwan, August 2016 (poster)

[12] H. Yamasaki, A. Soeda, M. Murao, “Graph-Associated Entanglement Cost of Multipartite State in Exact and Finite-Block-Length Approximate Construction”, The 16th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2016), Taipei, Taiwan, August 2016 (poster)

[13] R. Sakai, A. Soeda, M. Murao, “Quantum input-output algorithms for quantum systems with limited controllability”, The 20th Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2017), Seattle, USA, January 2017 (poster)

[14] K. Kato F. G. S. L. Brandao, “The Thermality of Quantum Approximate Markov Chains, with implications to the Locality of Edge States and Entanglement Spectrum”, The 20th Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2017), Seattle, USA, January 2017 (oral)

[15] H. Yamasaki, A. Soeda, M. Murao, “Graph-Associated Entanglement Cost of Multipartite State in Exact and Finite-Block-Length Approximate Construction”, The 20th Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2017), Seattle, USA, January 2017 (poster)

[16] Q. Dong, S. Nakayama, A.Soeda, M. Murao, “Exact controllization of unitary operation with fractional queries”, The 20th Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2017), Seattle, USA, January 2017 (poster)

[17] S. Nakayama, A. Soeda, M. Murao, “Adiabatic quantum computation and Grover search applied to higher-order quantum operations”, The 20th Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2017), Seattle, USA, January 2017 (poster)

招待講演

[18] Mio Murao, “Entanglement assisted classical communication simulates ’classical communication’ without causal order,” Hong Kong workshop on quantum information and foundation, Hong Kong, China, May 2016

[19] Mio Murao, “Entanglement assisted classical communication simulates ’classical communication’ without causal order”, The 3rd Seefeld workshop on Quantum Information, Seefeld, Austria, July 2016

[20] Akihito Soeda, “Universal controllization–its no-go and remedy for projective measurement of energy”, Quantum Information Science Workshop, Busan, Republic of Korea, November 2016

(国内会議)

一般講演

[21] 坂井亮介, 添田彬仁, 村尾美緒, “Quantum input-output algorithms for quantum systems with limited controllability”, 新学術領域ハイブリッド量子科学 第 3 回領域会議, 東京都千代田区, 2016 年 8 月

[22] 仲山将順, 添田彬仁, 村尾美緒,「量子演算間の相互変換アルゴリズムと量子学習プロセスへの応用」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 石川県金沢市, 2016 年 9 月

[23] H. Yamasaki, A. Soeda, M. Murao, “Graph-Associated Entanglement Cost of Multipartite State in Exact and Finite-Block-Length Approximate Construction”, 第 24 回 量子情報関東 Student Chapter 研究会, 東京, 2016 年 10 月

[24] 宮崎慈生,「量子状態のモノガミーから示唆されるトポス量子力学の不可能定理」, 第 6 回 Quantum Theory & Technology Un-Official Meeting, 高知県高知市, 2017 年 1 月

[25] R. Sakai, A. Soeda, M. Murao, “Hamiltonian and Energy in controllable quantum systems’, 新学術領域ハイブリッド量子科学 第 4 回領域会議, 埼玉県和光市, 2017 年 2 月

[26] S. Nakayama, A. Soeda, M. Murao, “Manipulation of quantum dynamics: time-reversal, inversion etc.”, 新学術領域ハイブリッド量子科学第 4 回領域会議, 埼玉県和光市, 2017 年 2 月

[27] H. Yamasaki, A. Soeda, M. Murao, “Graph-Associated Entanglement Cost of Multipartite State in Exact and Finite-Block-Length Approximate Construction”, The JSAP workshop on quantum information and related fields, 東京都千代田区, 2017 年 3 月

招待講演

[28] Mio Murao,「未知ハミルトニアンのエネルギー射影測定アルゴリズム」, 量子情報と有限長理論の新展開, 愛知県名古屋市, 2016 年 8 月

[29] 村尾美緒,「未知ハミルトニアンのエネルギー射影測定アルゴリズム」, 新学術領域ハイブリッド量子科学・第 3 回領域会議, 東京都千代田区, 2016 年 8 月

[30] Mio Murao, “Higher order quantum operations and hybrid quantum information processing”, 新学術領域ハイブリッド量子科学 第 4 回領域会議, 埼玉県和光市, 2017 年 2 月

[31] Akihito Soeda, “Manipulation of quantum dynamics and higher-order quantum operations”, The JSAP workshop on quantum information and related fields, Chiyoda-ku, Tokyo, March 2017.

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、冷却原子気体の研究、および、量子論・統計力学と情報論の融合である。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。近年の実験技術と（固体物理、統計力学も含む）理論概念の進展を背景に、私たちは、スピノル BEC におけるトポロジカル励起や相関効果、原子間相互作用の強さを制御するもとでの BCS-BEC クロスオーバーや Efimov 状態、人工ゲージ場中での量子ホール状態、孤立量子系の熱平衡化などについて研究を行っている。同時に私たちは、情報をキーワードとして量子論や統計力学の基礎概念を捉え直し、物理と情報を融合させた新分野の構築を目指す研究にも取り組んでいる。特に測定やフィードバック制御を行うもとでの情報の流れに着目し、熱力学の第二法則や揺らぎの定理の一般化、波束収縮のダイナミクスなどの研究を行っている。

5.3.1 冷却原子気体

連続的対称性の自発的破れへの群論的アプローチ

対称性の破れは自然界に普遍的に現れる現象であり、強磁性体や超伝導体を含む多くの物質が対称性の破れによって理解できる。従って、対称性の破れた相、及び代表的な励起である南部・ゴールドストーンモードやトポロジカル励起を分類し、系統的に理解することは重要である。我々は、リー代数とその表現を用いた対称性の破れた相の分類について研究を行った。特に、これまで知られている多くの相では、基底状態が同時対角化できる部分リー代数 (カルタン部分代数) の固有状態になっていることを発見し、これらの相を μ-symmetry breaking と名付けた。さらに、このクラスの相に対しては、カルタン部分代数の固有値によって系統的な分類が可能であり、南部・ゴールドストーンモードやトポロジカル励起も簡便な線形代数的手法により計算できることを示した。例えば、南部・ゴールドストーンモードの分散関係を記述する有効ラグランジアンが、カルタン標準形と呼ばれるリー代数の標準的な基底により対角化される。[6]

共鳴 p 波 Fermi 気体における普遍的関係式と異方性

冷却原子気体において、Feshbach 共鳴を利用した強相関気体が実現している。このような系では物理量を精密に計算することが困難であるため、計算手法の開発とともに近似に依らず成り立つ厳密な結果を得ることが重要である。我々は、強く p 波相互作用するフェルミ気体において、強い 2 体相互作用のために短距離相関に特異性が生じ、それを特徴づける指数が相互作用の詳細に依存しない普遍的な値を取ることを示した。また、短距離相関と熱力学量の間に成り立つ厳密な関係式を導出した。両者は共に p 波コンタクトと呼ばれる物理量で特徴づけられるが、特に p 波相互作用が異方性を持つ場合には、p 波コンタクトがテンソル量になることを明らかにした。これらは相互作用の詳細やトラップ形状、超流動相か常流動相か等に依らず成り立つ一般的な結果である。[7]

測定反作用下の量子ダイナミクスと量子臨界現象

量子系を連続的に観測すると測定の反作用がダイナミクスに本質的な影響を及ぼす。従来このような振る舞いは少数自由度の量子系において研究が行われてきたが、近年の冷却原子気体の実験技術の発展により、測定の反作用が量子多体系においても重要となる状況が実現しつつある。特に、量子気体顕微鏡と呼ばれる技術により 1 原子レベルで多粒子系を観測することが可能となっている。我々は、連続観測下にある量子多体系において測定の反作用が量子ダイナミクス・量子臨界現象に与える影響について研究を行った。特に測定のレートが高く分解能が低い極限において、多粒子系の時間発展を記述する確率微分方程式を導出し、粒子の識別可能性に応じてダイナミクスが定性的に変化することを示した。また、実効的な非エルミートハミルトニアンを解析することで、測定の反作用により (i) 超流動-モット絶縁体転移の転移点がシフトすること、(ii) 朝永-ラッティンジャー流体において 1 粒子相関と密度相関の臨界指数の振る舞いが異なる新しい普遍クラスが生じることを明らかにした。[10, 21]

4 体 Efimov 物理における繰り込み群リミット・サイクル

強相関の 3 粒子系には、ミクロなハミルトニアンに依らない普遍的な束縛状態構造、すなわち無数の Efimov 状態が現れることが知られている。この無数の Efimov 状態は互いに自己相似であり、繰り込み群においてリミットサイクルと呼ばれる周期構造で特徴づけられるという点で、ユニークな現象である。近年の冷却原子気体の実験技術により、この Efimov 状態が多様な原子種で観測され、1970 年代初頭の Efimov による予言から 40 年近く経って新たなリバイバルを起こしている。中でも、粒子数を 4 粒子へと拡張したときの物理がひとつの基礎的な問題として近年盛んに研究されている。我々は、4 粒子の普遍的な物理と繰り込み群のリミットサイクルがどのように関係しているかという問題に、汎関数繰り込み群を用いて取り組み、4 粒子のセクターにおいても繰り込み群が周期的な構造を持つことを示し、なおかつその周期を束縛状態数と結びつけることに初めて成功した。またこの結果を元に、4 粒子の束縛状態数と理論空間のトポロジカル不変量とが関係するという新しい解釈を行った。[12]

5.3.2 量子論・統計力学と情報理論の融合

フィードバック制御下の量子開放系における揺らぎの定理

近年、ナノサイエンスの実験的技術の進展により、測定やフィードバック制御のある非平衡微小系の熱力学が注目を集めてきた。古典系または孤立量子系に対して、仕事やエントロピー生成などの熱力学量と測定で得た情報を統一的に扱う「情報熱力学」と呼ばれる理論が発展し、測定やフィードバック制御の効果を含む揺らぎの定理が導かれいてる。一方、実際の実験系は量子性と散逸の両方を無視できない開放量子系である場合も多いが、それに対応して情報熱力学を議論することができていなかった。我々は量子軌道のテクニックを使い、情報熱力学を開放量子系に適用するように拡張し、量子と熱揺らぎ、測定反作用及びフィードバック制御の効果を全て取り込んだ揺らぎの定理を導いた。また、本研究の理論を超伝導量子ビット系で検証する方法を提案した。[4]

量子 Fisher 情報量と線形応答理論

量子 Fisher 情報量は、量子状態の推定精度の限界を与える量として知られているが、近年、多体エンタングルメントの検出や量子相転移の特徴付けなど、物理の様々な分野に応用されている。量子 Fisher 情報量には無数の種類があることが知られ、それらは量子状態空間上の計量であってどのような操作に対しても単調に減少するという単調性で特徴付けられる。この無数の量子 Fisher 情報量が単調性を超えてどのような操作的意義を持つのか、あるいはそもそも測定可能量とどのような関係にあるのかについて統一的な理解はこれまで無かった。我々は、統計力学における揺動散逸定理を一般化し、量子 Fisher 情報量と等価な情報を持つ一般化共分散という量と線形応答関数との間に定量的な関係があることを見出した。これをもとに、熱平衡状態の周期的な外場に対する応答である複素アドミッタンスを測定することにより、一般化共分散や量子 Fisher 情報量を実験的に決定する方法を提案した。[14]

Gibbs パラドックスと絶対不可逆性

19 世紀後半に提唱された Gibbs パラドックスは、気体の混合エントロピーに関する問題であり、熱力学や統計力学の基礎に関わる様々な側面を持つ。その中に、熱力学エントロピーと古典統計力学エントロピーの差をどのように決定すべきかという問題がある。マクロな理想気体においては熱力学的エントロピーに示量性を要請することによってこの差は決定される。しかし、ミクロな非理想気体に対しては、一般的に示量性が成り立たないためにこの方法は使えない。そこで我々はミクロな相互作用系においても成立するゆらぎの定理を用いることにした。気体混合は、エントロピー生成が軌道レベルで発散する絶対不可逆な過程を含むので、従来のゆらぎの定理を適用することはできず、絶対不可逆過程に拡張されたゆらぎの定理が必要になる。我々は、熱力学量が絶対不可逆なゆらぎの定理を満たすことを課すことによって、エントロピーの粒子数依存性が同種気体混合と異種気体混合の絶対不可逆性の程度の違いにより記述されることを示した (図 5.3.1)。そして、絶対不可逆性の程度を定量的に比較することによって熱力学エントロピーと古典統計力学エントロピー

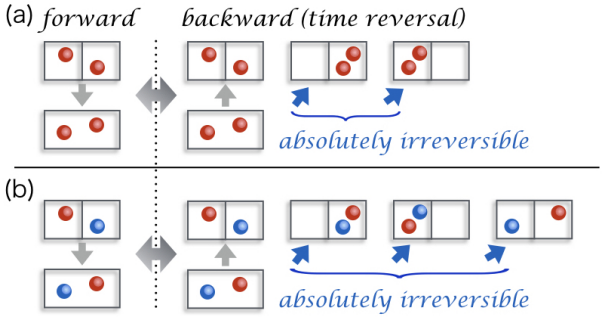

図 5.3.1: (a) 同種気体混合と (b) 異種気体混合における順過程（左）と時間反転過程（右）。順過程に対応する事象を持たないような時間反転過程の事象が絶対不可逆性に寄与する（青矢印）。異種気体混合では異種粒子の配分の組み合わせ数に応じて絶対不可逆性が増加する（(b) の右端の事象）。ここでの絶対不可逆性の程度の差が、エントロピーの粒子数依存性を決定する際に本質的な役割を果たす。[19]

の差を導いた。この結果は古典的問題である Gibbs パラドックスの理解を一歩進展させるものである。[19]

＜受賞＞

[1] 濱崎立資: 分科会優秀発表賞 (第 61 回物性若手夏の学校、2016 年 7 月).

[2] 東川翔: ベストプレビュー賞 、ポスター賞 (銀賞) (第 2 回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会、2016 年 12 月).

[3] 中島秀太: 第 11 回日本物理学会若手奨励賞 (領域 1) (日本物理学会、2017 年 3 月).

＜報文＞

(原著論文)

[4] Z. Gong, Y. Ashida, and M. Ueda: Quantum-trajectory thermodynamics with discrete feedback control, Phys. Rev. A **94**, 012107 (2016).

[5] O. Janson, S. Furukawa, T. Momoi, P. Sindzingre, J. Richter, and K. Held: Magnetic behavior of volborthite $Cu_3V_2O_7(OH)_2(H_2O)_2$ determined by coupled trimers rather than frustrated chains, Phys. Rev. Lett. **117**, 037206 (2016).

[6] S. Higashikawa and M. Ueda: μ-symmetry breaking: An algebraic approach to finding mean fields of quantum many-body systems, Phys. Rev. A **94**, 013613 (2016).

[7] S. M. Yoshida and M. Ueda: p-wave contact tensor: Universal properties of axisymmetry-broken p-wave Fermi gases, Phys. Rev. A **94**, 033611 (2016).

[8] H. Fujita, Y. O. Nakagawa, Y. Ashida, and S. Furukawa: Fractional quantum Hall states of dipolar fermions in a strained optical lattice, Phys. Rev. A, **94**, 043641 (2016).

[9] Z. Gong, Y. Lan, and H. T. Quan: Stochastic Thermodynamics of a Particle in a Box, Phys. Rev. Lett. **117**, 180603 (2016).

[10] Y. Ashida, S. Furukawa, and M. Ueda: Quantum critical behavior influenced by measurement backaction in ultracold gases, Phys. Rev. A **94**, 053615 (2016).

[11] K. Tiurev, P. Kuopanportti, A. Márton Gunyhó, M. Ueda, and M. Möttönen: Evolution of an isolated monopole in a spin-1 Bose-Einstein condensate, Phys. Rev. A **94**, 053616 (2016).

[12] Y. Horinouchi and M. Ueda: Topological origin of universal few-body clusters in Efimov physics, Phys. Rev. A **94**, 050702(R) (2016).

[13] K. Funo, T. Shitara, and M. Ueda: Work fluctuation and total entropy production in nonequilibrium processes, Phys. Rev. E **94**, 062112 (2016).

[14] T. Shitara and M. Ueda: Determining the continuous family of quantum Fisher information from linear-response theory, Phys. Rev. A **94**, 062316 (2016).

[15] Y. Murashita and M. Esposito: Overdamped stochastic thermodynamics with multiple reservoirs, Phys. Rev. E **94**, 062148 (2016). Editors' suggestion.

[16] H. Ishizuka, T. Hayata, M. Ueda, and N. Nagaosa: Emergent Electromagnetic Induction and Adiabatic Charge Pumping in Noncentrosymmetric Weyl Semimetals, Phys. Rev. Lett. **117**, 216601 (2016).

[17] N. Tsuji, P. Werner, and M. Ueda: Exact out-of-time-ordered correlation functions for an interacting lattice fermion model, Phys. Rev. A **95**, 011601(R) (2017).

[18] N. T. Phuc, T. Momoi, S. Furukawa, Y. Kawaguchi, T. Fukuhara, and M. Ueda: Geometrically frustrated coarsening dynamics in spinor Bose-Fermi mixtures, Phys. Rev. A **95**, 013620 (2017).

[19] Y. Murashita and M. Ueda: Gibbs Paradox Revisited from the Fluctuation Theorem with Absolute Irreversibility, Phys. Rev. Lett. **118**, 060601 (2017).

[20] T. N. Ikeda, T. Mori, E. Kaminishi, and M. Ueda: Entanglement prethermalization in an interaction quench between two harmonic oscillators, Phys. Rev. E **95**, 022129 (2017).

[21] Y. Ashida and M. Ueda: Multiparticle quantum dynamics under real-time observation, Phys. Rev. A **95**, 022124 (2017).

[22] K. Funo, J.-N. Zhang, C. Chatou, K. Kim, M. Ueda, and A. del Campo: Universal Work Fluctuations During Shortcuts to Adiabaticity by Counterdiabatic Driving, Phys. Rev. Lett. **118**, 100602 (2017).

[23] S. Uchino and M. Ueda: Anomalous Transport in the Superfluid Fluctuation Regime, Phys. Rev. Lett. **118**, 105303 (2017).

(解説)

[24] M. Ueda: Fermi gases: Anisotropic universality, Nat. Phys. **12**, 530 (2016).

(学位論文)

[25] Ken Funo: Theoretical Study of Controlling Nonequilibrium Systems using Fluctuation Theorems and Trade-off Relations (博士論文).

[26] Yusuke Horinouchi: Theoretical Study on a Renormalization Group Limit Cycle in Efimov Physics (博士論文).

[27] Kohaku H. Z. So (Hongbo Zeng): Theoretical study on phases and phase transitions of ferromagnetic spin-1 bosons in optical lattices (博士論文).

[28] Ryusuke Hamazaki: Theoretical study on thermalization in isolated systems (修士論文).

[29] Naoto Kura: Geometrical analysis of multiparameter Hamiltonian estimation problems and their time complexity (修士論文).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[30] Y. Horinouchi and M. Ueda: Topological property of a limit cycle and universal four-body bound states in Efimov physics, Few-Body Physics in Cold Atomic Gases, The Institute of Physics, Beijing, China, 2016.4.14-16.

[31] S. M. Yoshida and M. Ueda: Universality and Anisotropy in a Resonant p-Wave Fermi Gas, Few-Body Physics in Cold Atomic Gases, The Institute of Physics, Beijing, China, 2016.4.14-16.

[32] Z. Gong, Y. Ashida and M. Ueda: Quantum Trajectory Thermodynamics with Discrete Feedback Control, C3QS2016: Coherent Control of Complex Quantum Systems, OIST, 2016.4.18-21.

[33] S. M. Yoshida and M. Ueda: Universality and Anisotropy in a Resonant p-Wave Fermi Gas, CIFAR Quantum Materials Summer School & Main Meeting, Marriott Bloor Yorkville Hotel, Toronto, Canada, 2016.4.25-30.

[34] U. Ebling and M. Ueda: Dynamics of nematic order in ultracold dipolar gases, 47th Regular DAMOP Meeting, Rhode Island Convention Center, Providence, USA, 2016.5.23-27.

[35] S. M. Yoshida and M. Ueda: Contact Tensor in a p-Wave Fermi Gas with Anisotropic Feshbach Resonances, 47th Regular DAMOP Meeting, Rhode Island Convention Center, Providence, USA, 2016.5.23-27.

[36] Y. Ashida, S. Furukawa, and M. Ueda: Quantum critical behavior influenced by measurement backaction, CEMS Topical Meeting on Cold Atoms, RIKEN, 2016.6.10-11.

[37] U. Ebling and M. Ueda: Spinor and spatial dynamics of trapped dipolar Fermions, CEMS Topical Meeting on Cold Atoms, RIKEN, 2016.6.10-11.

[38] R. Hamazaki, T. N. Ikeda and M. Ueda: Generalized Gibbs Ensemble in Nonintegrable Systems with an Extensive Number of Local Symmetries, CEMS Topical Meeting on Cold Atoms, RIKEN, 2016.6.10-11.

[39] S. Higashikawa and M. Ueda: Homotopy-formula approach to topological excitation and topological influence, CEMS Topical Meeting on Cold Atoms, RIKEN, 2016.6.10-11.

[40] K. H. Z. So and M. Ueda: Phase diagram of ferromagnetic spinor bosons in an optical lattice under an external magnetic field, CEMS Topical Meeting on Cold Atoms, RIKEN, 2016.6.10-11.

[41] S. M. Yoshida and M. Ueda: Universality and Anisotropy in a Resonant p-Wave Fermi Gas, CEMS Topical Meeting on Cold Atoms, RIKEN, 2016.6.10-11.

[42] Y. Murashita and M. Ueda: Resolving the Gibbs paradox in small thermodynamic systems, Quantum Matter, Spacetime and Information, YITP, 2016.6.12-17.

[43] Y. Murashita and M. Ueda: Resolving the Gibbs paradox in small thermodynamic systems, The Seventh KIAS Conference on Statistical Physics: Nonequilibrium Statistical Physics of Complex Systems, Seoul, Korea, 2016.7.4-7.

[44] T. Shitara and M. Ueda: Determining the quantum Fisher information from linear response theory, The International Conference on Quantum Communication, Measurement, and Computing, National University of Singapore, Singapore, 2016.7.4-8.

[45] Y. Murashita and M. Ueda: The Gibbs paradox revisited from the fluctuation theorem with absolute irreversibility, Statphys26, Lyon, France, 2016.7.16-24.

[46] Y. Ashida, S. Furukawa, and M. Ueda: Quantum critical behavior influenced by measurement backaction, The 25-th international conference on atomic physics (ICAP 2016), Seoul, Korea, 2016.7.24-29.

[47] U. Ebling and M. Ueda: Spinor and spatial dynamics of trapped dipolar Fermions, The 25-th international conference on atomic physics (ICAP 2016), Seoul, Korea, 2016.7.24-29.

[48] K. Fujimoto and M. Tsubota: Weak wave turbulence in spin-1 spinor Bose-Einstein condensates, The 25-th international conference on atomic physics (ICAP 2016), Seoul, Korea, 2016.7.24-29.

[49] S. Higashikawa and M. Ueda: Homotopy-formula approach to topological excitation and topological influence, Synthetic Topological Quantum Matter, Peking, China, 2016.8.1-5.

[50] R. Hamazaki, T. N. Ikeda and M. Ueda: Generalized Gibbs Ensemble in Nonintegrable Systems with an Extensive Number of Local Symmetries, DOQS 2016 - Workshop on Many-body Dynamics and Open Quantum Systems, Glasgow, Scotland, 2016. 8.30-9.2

[51] S. Higashikawa and M. Ueda: Analysis of topological excitations and topological influence based on formulas of homotopy group, Physics of bulk-edge correspondence and its universality: From solid state physics to cold atoms, Kyoto University, 2016.9.27-30.

[52] T. Shitara and M. Ueda: How to Determine the quantum Fisher information from linear response theory, The international annual Quantum Information Processing, Seattle, America, 2017.1.16-20.

[53] Z. Gong, S. Higashikawa and M. Ueda: Zeno Hall Effect, International School on Topological Science and Topological Matters, Kyoto University, 2017.2.13-18.

[54] S. Higashikawa and M. Ueda: Non-conservation of topological charges in multiple topological excitations, International School on Topological Science and Topological Matters, Kyoto University, 2017.2.13-18.

[55] R. Hamazaki and M. Ueda: Observable-dependence of how random matrix theories can predict ETH corrections, Quantum-Classical Transition in Many-Body Systems: Indistinguishability, Interference and Interactions, Dresden, Germany, 2017.2.13-17.

[56] Z. Gong, S. Higashikawa and M. Ueda: Zeno Hall Effect, APS March Meeting 2017, New Orleans, Louisiana, 2017.3.13-17.

招待講演

[57] S. Furukawa: Devil's staircases in synthetic dimensions and gauge fields, Beijing-Tokyo Joint Workshop on Ultracold Atoms, Beijing, China, 2016.4.12-13.

[58] Y. Horinouchi: Topological property of a limit cycle and universal four-body bound states in Efimov physics, Beijing-Tokyo Joint Workshop on Ultracold Atoms, Beijing, China, 2016.4.12-13.

[59] S. M. Yoshida: Universal Properties and Contact Tensor in a p-Wave Fermi Gas, Beijing-Tokyo Joint Workshop on Ultracold Atoms, Beijing, China, 2016.4.12-13.

[60] S. Furukawa: Magnetic properties of volborthite determined by a coupled-trimer model, Trends in Theory of Correlated Materials (Swiss-Japan Workshop 2016), Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland, 2016.5.23-25.

[61] M. Ueda: Entanglement Prethermalization in a Bose Gas, International Conference on the Frontiers in Atomic, Molecular, and Optical Physics, NYU Shanghai, Shanghai, China, 2016.5.23-26.

[62] S. Furukawa: Mutual information of two disjoint intervals in Tomonaga-Luttinger liquids: bosons versus fermions, YITP long term workshop 2016 "Quantum Information in String Theory and Many-Body Systems" (4-day conference "Holography and Quantum Information"), Kyoto, 2016.5.31-6.3.

[63] M. Ueda: Gibbs paradox and entanglement prethermalization in a Bose gas, Quantum Non-Equilibrium Phenomena, International Institute of Physics, Natal, Brazil, 2016.6.6-18

[64] S. Furukawa: Excitation band topology and edge matter waves in Bose-Einstein condensates in optical lattices, CEMS Topical Meeting on Cold Atoms, RIKEN, Wako, 2016.6.10-11.

[65] S. Furukawa: Magnetic properties of volborthite determined by a coupled-trimer model, Current Frontiers in Condensed Matter Physics, International Center for Theoretical Sciences (ICTS), Bangalore, India, 2016.6.20-29.

[66] M. Ueda: Entanglement pre-thermalization in a Bose gas, Information Engines at the Frontiers of Nanoscale Thermodynamics, Telluride Elementary School, Telluride, USA., 2016.6.23-28.

[67] S. M. Yoshida: Universal Relations and Contact Tensor in a Resonant p-Wave Fermi Gas, The 25th Annual International Laser Physics Workshop, Elite Plaza Business Center, Yerevan, Armenia, 2016.7.11-15.

[68] M. Ueda: P-wave contact tensor, KITPC/PKU Conference on the Synthetic Topological Quantum Matter, Kavli Institute for Theoretical Physics China at the Chinese Academy of Science, Beijing, China, 2016.8.1-19.

[69] M. Ueda: Topological quantum phenomena in spinor Bose-Einstein condensates (keynote talk), Multicomponent Atomic Condensates and Rotational Dynamics (MACRO) Conference and JQC Symposium, New Castle University, New Castle, UK., 2016.9.13-16.

[70] M. Ueda: Topological Phenomena in Ultracold Atoms, Solid State Devices and Materials (SSDM2016), Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, 2016, 9.26-29.

[71] M. Ueda: Quantum many-body dynamics under continuous observation, Workshop University of Tokyo/ENS, ENS Paris, France, 2016.11.16-18.

[72] M. Ueda: Topological Quantum Phenomena in Spinor Bose-Einstein Condensates (keynote talk), The 13th Joint Asia Pacific Physics Conference, Brisbane Convention and Exhibition Centre (APPC), Brisbane, Australia, 2016.12.4-8.

[73] M. Ueda: Quantum many-body dynamics and critical phenomena under continuous observation, Quantum Dynamics: from Models to Materials, Aspen Center for Physics, Aspen, Colorado, USA, 2017.1.15-21.

[74] M. Ueda: Quantum many-body dynamics and critical phenomena under continuous observation, スウェーデン・日本量子ナノ物理・エレクトロニクスワークショップ, パシフィコ横浜国際会議場 4 階 423, Yokohama, Japan, 2017.3.23-24.

[75] M. Ueda: Gibbs paradox in mesoscopic systems, Fundamental Aspects of Statistical Physics and Thermodynamics, Bielefeld University, Bielefeld, Germany, 2017.3.26-30.

(国内会議)

一般講演

[76] 久良尚任、上田正仁: ハミルトニアン推定における精度限界の幾何学的な解析、日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016.9.13-16.

[77] Zongping Gong、Yueheng Lan、H. T. Quan: Stochastic thermodynamics of the piston system、日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016.9.13-16.

[78] 濱崎立資、上田正仁: 小さな孤立量子系における行列要素の揺らぎの普遍的な比、日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016.9.13-16.

[79] 東川翔、上田正仁: ホモトピー群 $\pi_m(G/H)$ の計算公式とそのトポロジカル励起への応用、日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016.9.13-16.

[80] 村下湧音、Massimiliano Esposito: 複数熱浴と結合した一粒子系の overdamped 極限、日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016.9.13-16.

[81] 久良尚任、上田正仁: ハミルトニアンの複雑性に対する推定時間限界のスケーリング、京大 RIMS 研究集会「量子システム推定の数理」、京都大学、2016.10.26-28.

[82] 設楽智洋、上田正仁: 線形応答理論を用いた量子 Fisher 情報量及び skew 情報量の決定法、第 35 回量子情報技術研究会、高エネルギー加速器機構、2016.11.24-25.

[83] 東川翔、上田正仁: Non-conservation of topological charges in multiple topological excitations、第 2 回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会、東北大学、2016.12.16-18.

[84] 古川俊輔、上田正仁: 二成分ボース気体の量子ホール相図、第 2 回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会、東北大学、2016.12.16-18.

[85] 蘆田祐人, Richard Schmidt, Leticia Tarruell, Eugene Demler: 多体 Ramsey 干渉を用いた磁気ポーラロンの量子ダイナミクス、日本物理学会第 72 回年次大会、大阪大学、2017.3.17-20.

[86] 久良尚任、上田正仁:ハミルトニアン推定における複素構造の影響、日本物理学会第 72 回年次大会、大阪大学、2017.3.17-20.

[87] 東川翔、上田正仁: 渦とスカーミオンの共存系におけるスカーミオンチャージの非保存、日本物理学会第 72 回年次大会、大阪大学、2017.3.17-20.

[88] 藤本和也、上田正仁: 1 次元スピノール Bose-Hubbard 模型におけるスピンドメインの緩和ダイナミクス、日本物理学会第 72 回年次大会、大阪大学、2017.3.17-20.

[89] 古川俊輔、上田正仁: 二成分ボース気体の量子ホール相図、日本物理学会第 72 回年次大会、大阪大学、2017.3.17-20.

[90] 村下湧音、Zongping Gong、蘆田祐人、上田正仁: フィードバック制御下の量子開放系のゆらぎの定理における絶対不可逆性と量子コヒーレンスの関連性、日本物理学会第 72 回年次大会、大阪大学、2017.3.17-20.

招待講演

[91] 古川俊輔: 結合トライマー模型によるボルボサイトの理論（シンポジウム講演)、日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016.9.13-16.

[92] 東川翔: Non-conservation of topological charges in multiple topological excitations、第 8 回トポロジー連携研究会、慶應義塾大学、2016.11.17-18.

[93] 藤本和也: 1 成分ボース・アインシュタイン凝縮体における Bogoliubov 波動乱流、「揺らぎと構造の協奏」第 2 回冷却原子研究会、大阪市立大学、2017.3.16.

(セミナー)

[94] 堀之内裕理: Renormalization-group limit cycle in Efimov physics、西田研セミナー、東京工業大学、2016.5.24.

[95] 吉田周平: 共鳴的に p 波相互作用するフェルミ気体の普遍的な性質、西田研セミナー、東京工業大学、2016.6.14.

[96] Y. shida: Many-body interferometry of magnetic polaron dynamics, Demler's group seminar, Harvard University, 2016.10.5.

[97] 古川俊輔: トポロジカル秩序と量子エンタングルメント、第 21 回トポロジカル物質科学セミナー、東京工業大学、2016.11.1.

[98] 蘆田祐人: Quantum critical behavior influenced by measurement backaction、統計力学セミナー、東京大学、2016.11.29.

[99] 蘆田祐人: Quantum dynamics of multiple particles under measurement backaction、矢上統計物理セミナー、慶應義塾大学、2016.12.16.

[100] 蘆田祐人: Super-resolved imaging of ultracold atoms and fluorescent molecules、駒場物性セミナー、東京大学、2016.1.27.

[101] 藤本和也: 極低温冷却原子気体における非平衡ダイナミクス 乱流と秩序化過程について 、松居-笠松研究室セミナー、近畿大学、2017.2.15-16.

[102] Zongping Gong: Nonequilibrium quantum dynamics – from real to imaginary、第 34 回トポロジカル物質科学セミナー、京都大学、2017.2.24.

[103] 東川翔: Topological catalysis: adiabatic generation of topological solitons assisted by topological defects、第 35 回トポロジカル物質科学セミナー、京都大学基礎物理学研究所、2017.2.27.

[104] T. Shitara: Geometrical Expression of Excess Work in Nonequilibrium Process, Sivak's group seminar, Simon Fraser University, 2017.3.23.

(その他)

[105] 濱崎立資: 小さな孤立量子系における ETH 揺らぎの普遍的な比、第 61 回物性若手夏の学校、ホテルシャレードイン志賀、長野県、2016.7.29-8.2.

[106] 濱崎立資: Generalized Gibbs Ensemble in Nonintegrable Systems with an Extensive Number of Local Symmetries、第 61 回物性若手夏の学校、ホテルシャレードイン志賀、長野県、2016.7.29-8.2.

[107] Zongping Gong: ピストン系のストキャスティック熱力学、第 61 回物性若手夏の学校、ホテルシャレードイン志賀、長野県、2016.7.29-8.2.

[108] U. Ebling: Quantum Gases, the coldest matter in the universe, Yashiro High School, Chikuma, Nagano, 2017.2.6.

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 の稼働を控え、近年重力波データ解析の研究と人材育成にも乗り出していますが、こちらは昨年度にビッグバン宇宙国際研究センターに発足した Cannon 研究室に引き継がれ、今日に至っています。

5.4.1 初期宇宙論

G インフレーションの再加熱

初期特異点無き宇宙創生論を可能とする上で、エネルギー条件を安定的に破れる G インフレーションは有力な仮説であるが、その再加熱機構は場の振動を伴わないため、これまでもっぱら重力的粒子生成によるもののみ考えられてきた。その結果、再加熱温度がかなり低くなってしまうという問題点があった。本研究ではインフレーションを起こす場と他の場の間の微分相互作用を考慮することによって、インフレーション終了時の粒子生成をボゴリューボフ変換の方法で求めた。その結果、微分相互作用のスケールがプランクスケールより低ければ、このチャンネルが再加熱を支配することが示された。[1, 50]

インフレーション起源の超巨大ブラックホール

高赤方偏移 ($z \sim 7$) で、太陽質量の百億倍を超える超巨大ブラックホールが見つかっている。なぜそのような初期宇宙の時代ですでにそんなに重いブラックホールが存在し得るのか、その説明はまだついていない。原始ブラックホールであれば、 $z \sim 7$ より遥か昔に一瞬にして大質量のブラックホール形成が可能であるが、このシナリオは宇宙マイクロ波背景放射のスペクトル歪みに対する制限と矛盾することも知られていた。原始ブラックホールを作り出すに十分なほどの密度ゆらぎがあると、観測と矛盾するほどのスペクトル歪みが作られてしまうからである。本研究では、この帰結は揺らぎがガウス分布に従う場合は正しいが、揺らぎが強い非ガウス性を有すれば、大質量の原始ブラックホールができたとしても、スペクトル歪みの生成は必ずしも起こるものではないことを示すとともに、そのような強い非ガウス性を持つ原始揺らぎを作り出す具体的なインフレーション模型を提案した。[2]

Hawking-Moss 転移の解釈

Hawking-Moss(HM) インスタントンは、あるエネルギー密度で一様に満たされた宇宙が、より大きなエネルギー密度を持つ宇宙へと転移する解として知られており、宇宙創生のシナリオのみならず、ゼロでない一様なエネルギー密度を持つ宇宙の未来について論じる上でも、本質的に重要であると考えられている。われわれは、HM 転移率は重力効果 (宇宙膨張) で現れる地平面が持つ Bekenstein エントロピーの変化分として導出できることを指摘した。HM 転移は指数関数的に強く抑制されていることが知られているが、これは HM 転移が宇宙のエントロピーを減少させるような転移であるためであると理解できる。このように以前から考えられていた重力の熱力学的な解釈は、宇宙の進化においても重要な知見をもたらすことを明らかにした。[3]

de Sitter 時空中の Schwinger 効果

de Sitter 時空中における電磁場と荷電粒子の理論（QED）の振る舞いについて研究を行い、de Sitter 時空中での Schwinger 効果が誘起する電流の振る舞いが、電荷の持つスピンや電荷の質量によって異なることを見出した [18, 17]。特に、外部電場が弱い場合に、フェルミオンが誘起する電流が負になる（＝電気伝導率の値が負になる）という結果を得た。引き続き、上記結果の物理的解釈を与えることを当面の目標に、以下の研究を行った。(i) 物性系との関わり: 当該研究において示唆される負の電気伝導（微分電気伝導度ではなく電気伝導率自体が負の値をとる）は、現実の特別な強誘電体の内部で実現することが知られている。本研究で取り扱っているような重力場と電場から作用を受ける荷電粒子対も、分極が自発的に大きくなっていくような系であり、強誘電体との類似性が見受けられる。(ii) 一般の背景場に

おける有効作用の振る舞い: 強誘電体に見られるような自発的対称性の破れを記述するための基本的な道具立ての一つに、場の有効作用を調べることが挙げられる。特に、一般の（弱い）電磁場中での有効作用を計算することで、荷電粒子の場の運動を決めるポテンシャルが電磁場によってどのように変形するかが分かる。これまでに、ゲージ不変な有効作用が従う非摂動的繰り込み群方程式の導出を行った。

5.4.2 観測的宇宙論

CMB における原始重力波の非ガウス性の観測可能性

2 階の運動方程式をもつ最も一般的な単一スカラー場インフレーションにおいて、原始重力波の 3 点相関は 2 つの形状関数のみで表せることが明らかになっている。ひとつは一般相対論においても現れるような、重力に本来から備わっている 3 点相関であり、もうひとつはアインシュタインテンソルにインフラトンが結合するときにはじめて現れる 3 点相関である。この原始重力波の 3 点相関は宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の 3 点相関をつくるため、ここでは将来的な観測によって検出できる条件を求めた。結果として、前者の 3 点相関は常に小さすぎて検出できないが、後者は結合の仕方によっては検出可能であることが明らかになった。[22, 52]

銀河内 γ 線放射による原始ブラックホールの制限

質量 5×10^{14}g より軽い原始ブラックホールはホーキング放射によって今日までに蒸発する。この臨界値付近の質量を持った原始ブラックホールは、高エネルギーガンマ線を放出しながら蒸発するので、銀河内外のガンマ線放射に関する観測的制限によって、その存在量が制限される。とくに銀河内のガンマ線については、現在蒸発し終わるブラックホールが主要な寄与をなすため、原始ブラックホールの質量関数依存性を正しく明らかにすることが重要である。本研究ではこれまで対数質量依存性しか考えられていなかった質量関数を、現実的なものに置き換え、銀河内のガンマ線による原始ブラックホールの存在可能量に対する正しい制限をはじめて求めた。[4]

5.4.3 重力理論

高階微分項を含む無ゴースト理論の構築

ラグランジアンが、非縮退な形で力学変数の時間二階微分を含むと、ゴーストと呼ばれる負のエネルギーを持つ自由度が必ず現れ、理論の安定性が保証されなくなることが知られている (オストログラドスキーの定理)。一方、縮退な形であれば、ゴーストを除去することが可能であることも知られていたが、その理解はある単純なクラスのラグランジアンに限定されていた。本研究では、その限定を取り外し、任意のラグランジアンに対し、高階微分に起因するゴーストを除去するためにラグランジアンが満たすべき必要十分条件を導出した。[5]

重力子が質量を持つ理論におけるインフレーション

Bigravity 理論は、重力子が質量を持つという性質があり、長スケールで重力が変更を受けるため、ダークエネルギー候補の一つと考えられている。この理論が実際の宇宙観測と無矛盾に成立し得るかについて、特に初期宇宙インフレーションに着目して議論した。我々は、bigravity のもとでテンソル型、スカラー型のゆらぎの性質がどのように変わるのかを解析的に議論し、どのような bigravity モデルを取っても、テンソルスカラー比が大きくなることを示した。このことは、インフレーションモデルに対する観測からの制限に対し、bigravity のモデルの不定性が影響を与えないことを意味している。[6]

作用段階でのゲージ固定の正当性

スカラーテンソル理論の自由度解析をする際、作用の段階でゲージ固定を行うことにより、解析が単純化されることがある。一方で、作用の段階でゲージを固定すると、ゲージ固定された変数の運動方程式が失われてしまうため、そのような解析の正当性は自明でない。そこで我々は、ゲージ固定が完全ならば、元の作用から導かれる Euler-Lagrange 方程式がゲージ固定された作用から得られるものと等価になることを示し、作用段階での完全ゲージ固定の正当性を明らかにした。[7]

シフト対称性を持つ Horndeski 理論におけるブラックホール摂動論

Horndeski 理論は、場の方程式が高々 2 階となるような最も一般的なスカラーテンソル理論である。この理論の内、スカラー場に関するシフト対称性を持つようなサブクラスでは、スカラー場が時間に線型に依存しつつ計量が静的球対称となる解が許される。我々はこのようなブラックホール解の奇パリティ摂動のモード解析を行い、多くの場合にホライズン近傍でゴーストか勾配不安定性のどちらかが必ず現れることを明らかにした。一方、特殊な場合として、一般相対論に非正準スカラー場を含んだような理論では、奇パリティのモード解析の段階では解が安定となることを示した。[8]

ブラックホールの無矛盾な蒸発過程

2012 年に Almheiri, Marolf, Polchinski, Sully らは、BH の終状態が始状態の情報を含んでいるため

には、Hawking 粒子対の持つ量子もつれが切れる必要があることを指摘した。しかし、その量子もつれが切れる無矛盾な機構は従来まで知られていなかった (AMPS パラドックス)。本研究では BH 内側に向かって落ちていく量子揺らぎは、量子論的な性質を失いやすくなる傾向にあることを示した。これは、de Sitter 時空上の量子揺らぎの振る舞いとよく対応しており、宇宙論の分野で十分に研究されている機構である。このように、宇宙論の分野で得られた知見を応用することで、BH の情報問題 (AMPS パラドックス) という、より基礎的な問題に寄与した。[25, 72, 73]

加速度運動する荷電粒子による量子論的放射

電子が加速度運動した場合には、電磁場が熱的に励起され、電子と電磁場の相互作用が電子の軌道に熱的な摂動を与える。したがって電子は、加速度運動による制動放射とは別に、Unruh 効果を起源とする量子的放射を出すことが予想される。点粒子 (電荷を持った質点) が電磁場と相互作用している系において、電子がどのようなエネルギーフラックスで放射するのかを理論的に調べ、Unruh 効果由来の放射は主に負のエネルギーを持つことを明らかにした。場の量子論では、負のエネルギー密度が局所的に生じ得ることは既に知られており、カシミール効果として実際に観測されている。Unruh 効果を起源とする電子の量子的放射が理論通りに観測されれば、Unruh 効果の初の観測となり得る。　一方この量子的な放射においては、電子の局所的な摂動だけでなく、Minkowski 真空の非局所的な相関も本質的な役割を果たしている可能性があることを指摘した。[9, 20]

スカラー・テンソル理論における中性子星

太陽の約二倍の質量を持つ中性子星が存在することが観測的に知られているが、一般相対性理論の枠内では、中性子星内部でストレンジクォークを含む物質が出現する場合、この重い中性子星の存在を説明することは難しい。そこで、中性子星内部で自発的スカラー化という現象を起こすスカラーテンソル理論において、中性子星の最大質量が増加し得るかを調べた。まず、スカラー場のコンプトン波長が 2km 以上の場合における中性子星の構造を数値計算により求めた。その結果、この理論において中性子星の最大質量が増加し、二太陽質量の中性子星の存在を容易に説明できることを明らかにした。また、コンプトン波長がより短い場合は数値的に運動方程式を解くことが困難になるが、この問題を解決する準解析的手法を開発し、コンプトン波長が短い極限での中性子星の構造を求めることに成功した。[21, 53, 54, 55]

5.4.4 重力波

LIGO と原始ブラックホール

LIGO が検出した重力波イベント GW150914 は、原始ブラックホール連星の合体で生じたものであるというシナリオを提唱した。９０年代に中村らによって指摘された連星形成のメカニズムに基づき、３０太陽質量の原始ブラックホールの連星形成率及び宇宙年齢で連星が合体するイベント率を評価した。その結果、原始ブラックホールの存在量がダークマターの 0.1 %程度であれば、LIGO によって見積もられたイベント率を説明できることが示された。この研究によって、同時に全ダークマターとしての３０倍太陽質量の原始ブラックホールの可能性が、重力波の観測だけから初めて棄却された。[10]

原始ブラックホール非検出から帰結される原始重力波への制限

大振幅の原始重力波は、ホライズン再突入時に二次摂動の効果により原始ブラックホールを生成する。一方、原始ブラックホールにはその存在量に上限が課されているので、このことを用いて原始重力波の振幅に上限を課すことができる。この簡単なアイデアに基づき、宇宙論的二次摂動論を展開し、広域な周波数域の原始重力波の振幅に対して、定量的な上限を与えた。得られた制限は、従来のビッグバン元素合成や宇宙マイクロ波背景放射の制限とは独立であり、また初期宇宙には超ホライズンスケールに存在した原始重力波に対しては、既存の制限よりも厳しい制限与えることが分かった。[11]

Pre-DECIGO の地球周回軌道における波形パラメータの決定精度

Pre-DECIGO は、基線長 100km の衛星型重力波望遠鏡であり、互いに 100km 離れた三機の人工衛星から構成されている。DECIGO の技術検証用の小型望遠鏡であり、大質量ブラックホール連星からの重力波を主なターゲットとしている。これまで、Pre-DECIGO の軌道候補としては太陽周回軌道が考えられてきた。本研究では、Pre-DECIGO を、高度 2000km・地球一周約二時間の地球周回軌道に投入した場合、太陽周回軌道と比較してどのような優位点があるのかを調査した。重力波源として昨年発見された GW150914 と同様の 30 太陽質量同士のブラックホール連星からのインスパイラル重力波を仮定し、フィッシャー解析を用いてパラメータ決定精度を評価した。この際、波源方向や軌道傾斜角等の角度パラメータはモンテカルロ・シミュレーションを用いて平均化した。結果として方向決定精度は、基本的には公転軌道で決定するため、両者にほぼ差異がないことが判明した。一方、光度距離の決定精度は、地球周回軌道にした場合、1 桁以上向上することが判明した。これは、地球周回軌道では Pre-DECIGO の

重力波への応答が激しく時間変化し、重力波の持つ2つの偏光モードの縮退が解けるためであった。また、信号対雑音比に関しても、不感な方向が減り平均値がわずかに向上することを明らかにした。[12]

全天連続重力波探査におけるライン雑音除去の新手法

カイ二乗識別子を用いた全天連続波探査におけるライン雑音除去法を新たに提案した。本研究では、雑音と信号の振幅の時間変化が異なることに着目することで、新たなライン雑音除去法を開発した。全天探査では、計算量削減のため、約1日ごとに $\mathcal{F}$-statistic を計算し、それらをスタックした量を検出統計量として扱う。そこで、1日ごとに測定される $\mathcal{F}$-statistic の値が、真の信号の場合に期待される $\mathcal{F}$-statistic の値とどの程度適合しているかを基準とし、信号と雑音を識別した。この際、カイ二乗識別子を導入し、LIGO S5 データを用いてその性能を検証した。その結果、ライン雑音で汚れた周波数帯において効率よく誤検出率を抑えられることを確認した。さらに、観測データに疑似的に重力波信号を注入することで、信号検出率が向上することを明らかにした。[23, 26, 27, 28]

Phase-II TOBA を用いた背景重力波探査

ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA は地上低周波数帯重力波検出器であり、二本の直交する棒状のテストマスから構成され、検出器平面上の二本のマスの角度変動から重力波が読み取られる。TOBA は KAGRA や LIGO などの大型レーザー干渉計では探索できない低周波数領域に強みを持つ検出器である。今回新たに作製された Phase-II TOBA を用いて、未探査の周波数領域 1Hz から 5Hz の 4Hz バンドにわたって、データ長約1日の背景重力波探査を行った。結果として、統計的に有意な重力波信号は発見されず、2.58Hz において最も厳しい頻度主義者的な振幅上限値 $\Omega_{\rm gw}h_0^2 \leq 6.0\times10^{18}$ を信頼度 95% で課した。[13, 14]

iKAGRA データを用いた既知パルサーからの連続重力波探査

2016年3月から4月の約3週間にわたり、iKAGRA が常温で試験稼働した。そこから得たデータを用いて、電磁波観測で既知の孤立したパルサーから放射される連続重力波を探査した。パルサーに関するパラメータは既に電磁波観測により測定されており、必要なテンプレートはただ一つである。この場合、全天探査とは異なり、頻度主義者的に最適な探索手法である $\mathcal{F}$-statistic 法による探査が計算コストの面で可能である。本研究では、KAGRA 解析パイプラインの実装とその動作確認を、iKAGRA データを用いて行った。その結果、連続重力波の典型的な振幅上限値として $\sim 10^{-18}$ を得た。また、最も厳しい振幅上限値はパルサー J0024-7204L に対応する周波数 460.17Hz で 7.5×10^{-19} であった。これは期待通りの値であり雑音のみの場合の解析パイプラインが正しく作動していることが確かめられた。さらに、信号注入による試験を行い、人工的に生成した重力波信号を正しく検出できることも確認した。[23, 29, 30, 56]

独立成分分析を用いた非ガウス雑音の除去

重力波データ解析の多くの手法は雑音の定常ガウス性を仮定しているが、実際のデータにはグリッチ雑音をはじめとした多くの非ガウス雑音が存在し、解析の妨げとなる。本研究では地面振動計などの重力波チャンネル以外の環境チャンネルの出力を使い、そこに独立成分分析という解析手法を用いることで、重力波チャンネルに含まれる非ガウス雑音を除去する方法を提案した。さらに数値シミュレーションにより、この手法を用いることで重力波信号の信号対雑音比が増加することを明らかにした。[15, 31, 32, 33, 57]

＜受賞＞

鎌田耕平　日本物理学会第 11 回若手奨励賞 (2011 年博士課程修了)

＜報文＞

(原著論文)

[1] H. Bazrafshan Moghaddam, R. Brandenberger and J. Yokoyama, “Note on Reheating in G-inflation,” Phys. Rev. D **95** (2017) 063529

[2] T. Nakama, T. Suyama and J. Yokoyama, “Supermassive black holes formed by direct collapse of inflationary perturbations,” Phys. Rev. D **94**, 103522(2016)

[3] N. Oshita, J. Yokoyama, “Entropic interpretation of the Hawking-Moss bounce”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2016, 051E02

[4] B. J. Carr, K. Kohri, Y. Sendouda and J. Yokoyama, “Constraints on primordial black holes from the Galactic gamma-ray background,” Phys. Rev. D **94** (2016) no.4, 044029

[5] H. Motohashi, K. Noui, T. Suyama, M. Yamaguchi and D. Langlois, “Healthy degenerate theories with higher derivatives,” JCAP **1607**, 033(2016)

[6] Y. Sakakihara and T. Tanaka, “Primordial fluctuations from inflation in dRGT bimetric theory of gravity,” JCAP **1609** (2016) no. 09, 033

[7] H. Motohashi, T. Suyama and K. Takahashi “Fundamental theorem on gauge fixing at the action level”, Phys. Rev. D **94**, 124021 (2016)

[8] K. Takahashi and T. Suyama, “Linear perturbation analysis of hairy black holes in shift-symmetric Horndeski theories: Odd-parity perturbations”, Phys. Rev. D **95**, 024034 (2016)

[9] S. Iso, N. Oshita, R. Tatsukawa, K. Yamamoto, S. Zhang, “Quantum radiateon produced by the entanglement of quantum fields”, Phys. Rev. D **95**, 023512 (2017)

[10] M. Sasaki, T. Suyama, T. Tanaka and S. Yokoyama, “Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914,” Phys. Rev. Lett. **117**, 061101(2016)

[11] T. Nakama and T. Suyama, “Primordial black holes as a novel probe of primordial gravitational waves. II: Detailed analysis,” Phys. Rev. D **94**, 043507(2016)

[12] T. Nakamura, M. Ando, T. Kinugawa, H. Nakano, K. Eda, S. Sato, M. Musha, T. Akutsu, T. Tanaka, N. Seto, N. Kanda, and Y. Itoh “Pre-DECIGO can get the smoking gun to decide the astrophysical or cosmological origin of GW150914-like binary black holes,” PTEP **2016**, no. 9, 093E01 (2016)

[13] Y. Kuwahara, A. Shoda, K. Eda and M. Ando, “Search for a stochastic gravitational wave background at 1-5 Hz with a torsion-bar antenna,” Phys. Rev. D **94**, no. 4, 042003 (2016)

[14] A. Shoda, Y. Kuwahara, M. Ando, K. Eda, K. Tejima, Y. Aso and Y. Itoh, “Ground Based Low-Frequency Gravitational-wave Detector With Multiple Outputs,” Phys. Rev. **D95**, 082004 (2016)

[15] S. Morisaki, J. Yokoyama, K. Eda and Y. Itoh, “Toward the detection of gravitational waves under non-Gaussian noises II. Independent Component Analysis,” Proceedings of the Japan Academy ser B **92** (2016) 336-345

[16] J. Yokoyama, “Birth of the inflationary Universe and tensor fluctuations,” Int. J. Mod. Phys. D **25** (2016) no.13, 1645009

[17] T. Hayashinaka, T. Fujita, J. Yokoyama, “Fermionic Schwinger effect and induced current in de Sitter space,” JCAP **1607** (2016) no. 07, 010

[18] T. Hayashinaka, J. Yokoyama, “Point splitting renormalization of Schwinger induced current in de Sitter spacetime,” JCAP **1607** (2016) no. 07, 012

(会議抄録)

[19] T. Hayashinaka, T. Suyama, “QED Correction to Magnetic Dipole Radiation”, Second LeCosPA International Symposium. Everything about Gravity (2017), 332-338

[20] N. Oshita, K. Yamamoto, S. Zhang, “Unruh radiation produced by a uniformly accelerating charged particle in thermal random motions”, Second LeCosPA International Symposium. Everything about Gravity (2017), 584-589

(学位論文)

[21] 森崎宗一郎:「スカラー・テンソル理論における中性子星の質量-半径関係」 (修士論文)

[22] 田原弘章:「重力の非線型性に由来する宇宙背景放射の 3 点相関」 (修士論文)

[23] 枝和成: “Toward the Direct Detection of Continuous Gravitational Waves from Compact Stars”（博士論文）

(国内解説記事)

[24] 横山順一 「重力波発見のインパクト」 パリティ **32**(2017)46–47

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[25] N. Oshita, “Correspondence between the decoherence of infalling Hawking particles and quantum fluctuations during inflation”, APCosPA-Planet2 RESCEU Summer School, Takayama, Gifu, 2016/8/27

[26] Kazunari Eda and Yousuke Itoh, “A chi-squared veto for semi-coherent $\mathcal{F}$-statistic search in continuous gravitational waves,” Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop (GWPAW) 2016, Hyannis, Massachusetts, USA, 2016/6/15-18

[27] Kazunari Eda and Yousuke Itoh, “A chi-squared discriminator for continuous gravitational wave detection in all-sky search,” The First International Meeting on KAGRA, KAIST, Daejeon, Korea, 2016/6/24-25

[28] Kazunari Eda and Yousuke Itoh, “A chi-squared veto in semi-coherent $\mathcal{F}$-statistic search for continuous gravitational wave,” APCosPA-Planet2 RESCEU Summer School, Takayama, Gifu, 2016/8/28

[29] Kazunari Eda, “Searches for continuous GWs from known pulsars with iKAGRA data,” 14th KAGRA Face to Face Meeting, University of Toyama, Toyama, 2016/8/25-27

[30] Kazunari Eda, “Known pulsar search using the iKAGRAdata,” 15th KAGRA Face to Face Meeting, The University of Tokyo, 2016/12/7-8

[31] S. Morisaki, “Removing Non-Gaussian Noise Using Independent Component Analysis,” GWPAW, Hyannis, Massachusetts, USA, 2016/6/15-18

[32] S. Morisaki, “Removing Non-Gaussian Noise Using Independent Component Analysis,” The First International Meeting on KAGRA, KISTI and KAIST, Daejeon, Korea, 2016/6/23-25

[33] S. Morisaki, “Gravitational-wave data analysis using independent component analysis,” APCosPA-Planet RESCEU Summer School, Gifu, Japan, 2016/8/24-28

[34] J. Yokoyama, “Tensor perturbations in spatially covariant gravity,” CosPA 2016, University of Sydney, 2016/11/28

[35] T. Suyama, “Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914,” Spanish-Portuguese relativity meeting, Lisbon, 2016/9/12-15

[36] T. Suyama, “Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914,” Symposium on New development in astrophysics through multimessenger observations of gravitational wave sources, Kyoto, 2016/12/26-28

[37] Yuki Sakakihara, Takahiro Tanaka, “Primordial fluctuations in bimetric gravity,” APCosPA-Planet2 RESCEU Summer School, Takayama, Gifu , 2016/8/27

[38] Yuki Sakakihara, Takahiro Tanaka, “Production of gravitons and cosmology in bimetric gravity,” The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, Osaka City University, 2016/10/26

[39] Yuki Sakakihara, Takahiro Tanaka, “Cosmic evolution with bigravity,” Symposium on New development in astrophysics through multimessenger observations of gravitational wave sources, Yukawa Institute for Theoretical Physics, 2016/12/27

[40] Yuki Sakakihara, Takahiro Tanaka, “Cosmology with bigravity theory,” Testing Gravity 2017, Simon Fraser University, Vancouver, Canada, 2017/1/26

[41] K. Takahashi, “Relation between gauge fixing and DOFs in scalar-tensor theories”, APCosPA-Planet^2 RESCEU Summer School, Takayama, Gifu, 2016/8/27

[42] K. Takahashi, “Relation between gauge fixing and DOFs in scalar-tensor theories”, JGRG26, Osaka City University, Osaka, 2016/10/26

[43] K. Takahashi, “Relation between gauge fixing and DOFs in scalar-tensor theories”, CosPA 2016, the University of Sydney, Australia, 2016/12/1

[44] T.Hayashinaka, “Fermionic Schwinger Effect and Induced Current in de Sitter spacetime”, COSMO16, Michigan, USA, 2016/8/10

[45] T.Hayashinaka, “Quantum Anomalous Transportation of QED in Inflationary Universe”, APCosPA-Planet2 RESCEU Summer School, Takayama, Gifu, 2016/8/27

[46] N. Oshita, “A baby universe from a black hole”, COSMO16, Michigan, USA, 2016/8/12

[47] N. Oshita, “Firewall paradox and decoherence inside a black hole”, JGRG26, Osaka City University, Osaka, 2016/10/27

招待講演

[48] J. Yokoyama, “SUSY inflation? What else?” SUSY 2016, University of Melbourne, 2016/7/6

[49] T. Suyama, “Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914,” Workshop on primordial black hole, Taipei, 2017/1/6

(国内会議)

一般講演

[50] 横山順一, R. Brandenberger, and H. Bazrafshan Moghaddman “G インフレーションの再加熱” 日本物理学会年次大会　大阪大学 2017/3/18

[51] 大下翔誉, “Hawking-Moss インスタントンのエントロピー的解釈”, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎県、宮崎大学, 2016/9/22

[52] 田原弘章、 横山順一、日本物理学会、「重力の非線型性に由来する CMB 偏光のバイスペクトル」、大阪大学、2017/3/18

[53] 森崎宗一郎, “スカラー・テンソル理論における中性子星の内部構造,” 第 5 回ウィンタースクール・研究会「中性子星の核物質」, 福島, 2017/2/16-18

[54] 森崎宗一郎, “スカラー・テンソル理論における中性子星の質量-半径関係,” 京都大学, 2017/3/1-3

[55] 森崎宗一郎, “スカラー・テンソル理論における中性子星の質量-半径関係,” 大阪大学, 2017/3/17-20

[56] 枝和成、KAGRA Collaboration、「iKAGRA データを用いた既知パルサーからの連続重力波探査」、日本物理学会 2016 年秋季大会、宮崎県、宮崎大学、2016/9/21-24

[57] 森崎宗一郎,“独立成分分析を用いた重力波実験における非ガウス雑音の除去,” 日本物理学会 2016 秋季大会, 宮崎大学, 2016/9/13/16

[58] 須山輝明、“LIGO と原始ブラックホールからの重力波,” 日本物理学会第７２回年次大会, 大阪, 2017/3/17 - 20

[59] 高橋 一史、「スカラーテンソル理論におけるゲージ固定と自由度との関係」、日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 2016/9/21

[60] 高橋 一史、「スカラーテンソル理論における可逆変換と自由度との関係 」、若手による重力・宇宙論研究会, 京都大学, 2017/3/1-3

[61] 高橋 一史、「シフト対称性を持つ Horndeski 理論におけるブラックホール摂動論」、日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学, 2017/3/17

[62] 大下翔誉, “インフレーション機構によるブラックホールの情報喪失問題の解決”, 第 46 回天文・天体物理若手夏の学校, 長野県, 2016/7/27

[63] 林中貴宏、「インフレーション中の QED における量子異常輸送」、天文若手夏の学校 2016, 2016/7/26

[64] 林中貴宏、「インフレーション中の QED における量子異常輸送」、日本物理学会 2016 年秋季大会、宮崎県、宮崎大学, 2016/9/22

招待講演

[65] 横山順一 “重力波発見の学問的意義”　加速器奨励会　第 6 回特別講演会　アルカディア市ヶ谷 2016/10/21

[66] 須山輝明、“原始ブラックホールと重力波,” 秋の学校「理論と観測から迫るダークマターの正体とその分布」, 国立天文台, Nov. 9

[67] 横山順一 “初期宇宙と重力”　理論懇シンポジウム　東北大学　2016/12/21

(セミナー)

[68] 横山順一 ”重力波で見た宇宙” 岡山大学談話会 2016/6/8

[69] J. Yokoyama, “Approaches to inflationary cosmology,” KITPC, Beijing, 2016/11/4

[70] J. Yokoyama, “Approaches to inflationary cosmology,” McGill University, Montreal, 2017/3/11

[71] T. Suyama, “Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914,” SISSA, Trieste, 2016/9/22

[72] 大下翔誉 “The black hole information paradox and decoherence inside a black hole” 中央大学 2016/11/28

[73] N. Oshita, “The firewall paradox from the aspect of decoherence during inflation”, Tufts university, Medford, USA, 2017/3/9

[74] 林中貴宏、”Fermionic Schwinger effect in 1+3 dimensional de Sitter spacetime”、Cosmophysics Seminar、KEK、2017/1/26

(集中講義)

[75] 横山順一 「一般相対性理論の基礎」岡山大学 2016/6/7-9

(アウトリーチ)

[76] 横山順一 「重力波で探る宇宙のはじまり」東京大学理学部オープンキャンパス講演会 2016/8/3

[77] Stefano Ansoldi, 榊原由貴、「福井県立若狭高校 サイエンス・ダイアログ」、2016/6/24

6　一般物理実験

6.1　高瀬研究室

高瀬研究室では、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で建設中の 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、プラズマの大半径、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、25 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) を用いた電流立ち上げ維持研究を行っている。2016 年度は、新たに上側に設置した静電結合型コムライン (Capacitively-Coupled Combline, CCC) アンテナを用いた本格的な実験を開始した。また、電子密度分布等の計測を充実させ、波動コードとの比較を行い波動物理の理解を進めた。当研究室で開発された交流オーミック加熱は、小規模軽量オーミックコイルの有効な活用法として期待されている。本年度は、予備電離過程の実験的理論的研究を進めた。

6.1.2　高周波プラズマ立ち上げ実験

CCC アンテナ実験

TST-2 では米国 General Atomics 社と共同開発した CCC アンテナを用いて 200 MHz の LHW の入射によるプラズマ電流駆動実験を行ってきた。LHW は一般的な低磁場赤道面から入射するアンテナ (外側入射アンテナ) に加えて、2015 年度末に新たに設置された上側入射アンテナを用いて励起している。TST-2 の LHW 立ち上げプラズマにおいては、プラズマ電流は密度とともに増加することが観測されている。LHW が伝搬可能な最大密度は磁場とともに増加するため、外側アンテナで駆動可能な最大電流 (25 kA) は現在の電源で生成可能な磁場の最大値 (0.16 T) で制限されている。

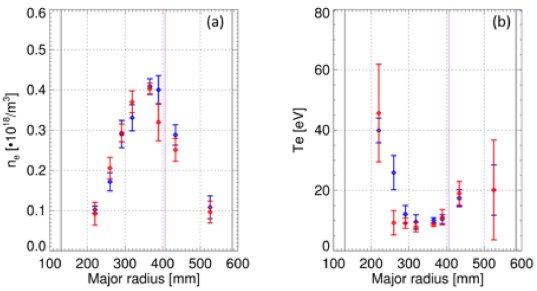

図 6.1.1: LHW 駆動プラズマにおいてトムソン散乱計測により観測された (a) 電子密度と (b) 電子温度。赤: 外側入射のみ。青: 外側及び上側入射。

2016 年度には、上側入射アンテナによる本格的な電流駆動実験を開始した。上側から LHW を入射した場合、磁場方向の屈折率 $n_{\parallel}$ の上昇により、高密度のプラズマ中心部までアクセスできることが期待された。しかし、上側入射と外側入射で、駆動電流の最大値に大きな違いは見られなかった。また、外側入射のみの場合と外側・上側入射を併用した場合で、トムソン散乱計測から得られた電子密度・温度を比較した (図 6.1.1)。赤は外側から 45 kW、青は外側・上側からそれぞれ 20 kW、25 kW を入射した場合である。密度は誤差の範囲内で変わらず、温度は両方のアンテナを使用した方が高くなる可能性があるが、大きな違いは見られなかった。

これまでは単一の RF 電源により LHW を上側と外側アンテナから同時に入射していたが、もう一台の独立な電源を整備した。これにより 2 台の CCC アンテナの独立制御が可能となり、オペレーションの幅が広がった。

イオン温度・フロー計測

球状トカマクの LHW 駆動プラズマでは高速電子の軌道損失によりプラズマが正に帯電し、大きなプラズマフローを生成する可能性がある。これを実験的に確かめるため、可視分光器システムを用いているが、このチャンネル数を 11ch から最大である 16ch に増やすことで一度に計測できる波長幅を 0.22 nm から 0.32 nm に拡張した。また、TST-2 装置の CIII の発光（C^{2+}）に対して温度計測及びフロー計測を行った。2014 年度にはイオン温度は約 4 eV であったが今年度の計測では約 18 eV と高い温度が計測された。今までは発光強度が弱くポロイダル方向のフロー計測が困難であったが、電子温度の増加に伴い発光強度が強くなり、プラズマ電流 15 kA のプラズマでは約 0.5 km/s のポロイダルフローが計測され、プラズマが正に帯電している可能性を実験的に確かめることができた。今後は、電子温度増加により計測可能なイオン種が増えていると考えられるため、OV

の発光に対して温度計測及びフロー計測を行い、また LHW の上側入射と外側入射によるプラズマの計測を行う予定である。

電流駆動の数値計算による解析

一般に LHW 電流駆動においては、密度が増加すると駆動電流が減少するが、TST-2 においては逆に密度が高い方が駆動電流が多い。TST-2 のパラメータに対して駆動電流の密度依存性を数値計算により調べたところ、非常に低い密度では電流キャリア (電子) 不足で、駆動電流が飽和状態になっていることが分かった。高い密度では、よく知られているように、回折によりプラズマ内部に LHW が到達できなくなるため、駆動電流が減少する。この 2 つの効果が釣り合う密度で駆動電流は最大となるが、この最適密度は、理論的には磁場とともに増加することが示された。これは実際の TST-2 実験で得られている結果と矛盾しない。現在設置されている外側入射アンテナを使う場合、密度制御の最適化により電流を増やすことは難しいと考えられる。

上側入射実験において、現在のところ駆動電流の増加は確認されていないが、$n_{\parallel}$ アップシフトの効果を調べるため、磁場スキャンを行った。その結果、上側入射アンテナを用いることで、より低磁場で電流駆動ができることが確認された。これは、数値計算による予測とも定性的に一致した。

MEGA による平衡解析

TST-2 の LHW 駆動プラズマの平衡に対して、高速電子は支配的な役割を果たしていると考えられている。高速電子がプラズマの平衡に与える影響を調べるため、粒子と流体のハイブリッドシミュレーションコード MEGA を用いた解析を行ってきた。2016 年度は、中空状を含む様々な形状を取る電流密度分布に対して自己無撞着な平衡解を安定して得られるようになった。任意の高速電子の速度分布関数について調べるため、ファラデーの法則と高周波成分を考えたアンペアの法則を計算する簡易版 MEGA コードを開発し、自己無撞着な磁場分布と電子分布関数を計算できるようにした。得られた解を初期条件として、完全版 MEGA コードにより粒子や電磁場の計算を時間平均量が収束するまで行った。速度分布関数は 2 成分 Maxwell 分布や経験則的な速度分布関数、CQL3D から得られた速度分布関数などに変えて収束の安定性を調べた。現状、中空状の電流分布を与えた時、形状が緩和して高速電子がプラズマ中心に移動する結果が得られている。初期の電流密度分布や速度分布関数を変えたときに、計算結果がどう変わるかは今後詳細に調べることが必要である。

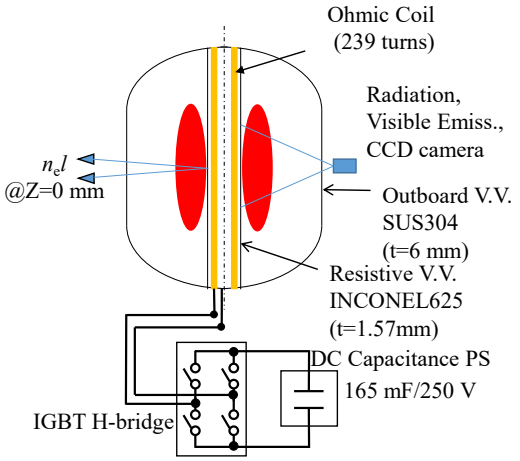

図 6.1.2: 交流オーミック加熱実験における装置の模式図。

6.1.3 オーミックプラズマ実験

フロー計測

プラズマ電流 100 kA 以下の放電に対して、内部再結合現象 (IRE) 時のトロイダルフロー速度およびポロイダルフロー速度と磁場揺動の比較を行い、トロイダルフローの回転方向の反転、ポロイダルフロー速度の低下、イオン温度の上昇を観測した。トロイダルフローの反転時の変化量は最大で約 30 km/s であった。IRE 前は磁場揺動のトロイダル・ポロイダル伝搬方向は両方ともフローと一致したが、IRE 時に磁場揺動の反転は確認されなかった。

交流オーミック加熱

交流オーミック加熱とは、オーミックコイルに 1 kHz 前後の交流電場を印可することで、プラズマ中に交流周回電圧を発生させ、これによる予備電離、加熱、電流駆動を行う手法である。図 6.1.2 に TST-2 での実験配位を示す。これまでの実験で、信頼性の高い予備電離が可能であること、交流プラズマ電流を駆動できること、垂直磁場を重畳することでプラズマ電流に直流成分が生じることが見いだされた。この手法では、磁束変化が微小であり、従来のオーミックコイルに比べてはるかに小型軽量なオーミックコイルで十分であるという利点がある。本年度は、主として予備電離過程の理解を実験的、理論的に進めた。

複数の可視発光測定器を用いて 6 桁程度のダイナミックレンジを持つシステムを構成することで、予備電離中のプラズマ (密度) の成長の詳細を調べることを可能とした。得られた成長率等が印可電圧、充填ガス圧力、周波数、トロイダル磁場、垂直磁場にどのように依存するかを測定し、タウンゼントの α

過程に基づく無電極プラズマ生成モデルで説明できるかを調べた。その結果、定性的な振る舞いの多くが説明できること、定量的には数倍の差があることが分かった。一方、ポロイダル磁場が 0 に近い場合に、成長率は大きくなるものの、可視発光の現れる時刻が遅れることがわかり、上記のモデルと明らかに矛盾することが示された。また、本モデルは両極性拡散と矛盾するという問題を内在している。電極効果は、これらの矛盾を解決できる可能性がある。

6.1.4 計測器開発

ターゲット発光による磁場のピッチ角計測

トカマク内部の磁場構造は通常プラズマ周辺部に設置された磁気計測から推定するが、電流分布、すなわち磁場のピッチ角の推定精度は高くない。TST-2 では、局所的に不純物を導入し、その発光を観測することで、磁場方向を推定する装置を開発している。

炭素不純物の発生源として f アクリル棒を弱磁場側からプラズマに挿入し、発光を確認した。その発光を民生品のカメラで RGB それぞれの二次元分布を計測することで、530±50 nm の波長範囲の発光に指向性があることを発見した。この発光は磁気計測から推定される磁場の方向と 5 度程度の不確かさの範囲で一致した。発光が磁力線方向に指向性を持つ理由は、アクリル棒由来の炭素がイオン化して、磁力線に巻き付きながら拡散し、ライン光を放つためと考えられる。精度悪化の要因としては、無指向性の強い発光が入ってしまっていること、アクリル棒の近傍で細かな構造ができてしまい発光中心が不明瞭であることがある。不純物源の元素や導入方法、波長の再選定が必要である。

マイクロ波散乱計

TST-2 の LHW 駆動プラズマにおける駆動電流は、数値計算から予想されるよりも一桁近く小さい。この原因を究明するため、非接触で微小な密度揺動を検出することのできるマイクロ波散乱計を開発している。TST-2 の典型的なパラメータにおいては、12–40 GHz のマイクロ波は LH 波と同程度の波数を持つため、最も感度が高い。マイクロ波の周波数、入射方向を掃引し、多点で散乱光を計測することで、プラズマ内部の LH 波の波数を含めた空間分布を調べることができる。2016 年度は、Ka バンド (26.5–40 GHz) のシステムを設置し、計測を開始した。装置の感度は高周波のノイズレベルで制限されることがわかった。ノイズ対策を行うことにより-95 dB までの散乱光を検出できる感度を実現したが、未だ LHW による散乱光は観測できていない。

平衡解析、波動計算等を見直したところ、LHW の電場分布は当初想定していたものとは大きく異なる可能性が示唆された。2017 年度は 12-20 GHz の散乱計を後方散乱に近い角度で設置する予定である。この構成では、理論的に予想されるパラメータを中心として、広いパラメータ領域に対して計測が可能である。

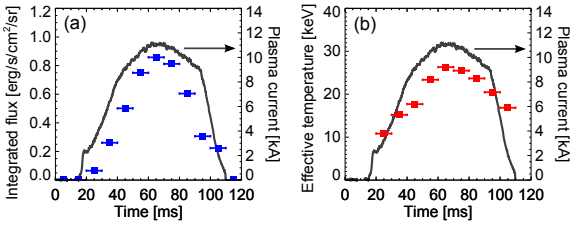

図 6.1.3: 硬 X 線計測によって得られた、(a) 20 keV 以上のエネルギーを持つ硬 X 線の総エネルギー流束の時間発展および、(b) スペクトルから求めた高速電子の実効温度の時間発展。曲線はプラズマ電流を示す。

硬 X 線計測

TST-2 の LHW 駆動プラズマにおいては、LHW が生成する高速電子の圧力がプラズマ平衡において支配的であることが示唆されており、電流密度分布や LHW の吸収分布を反映する高速電子の制動 X 線を計測することがプラズマを評価する上で重要である。そこで本研究では、硬 X 線分布計測のためのシステムを開発した。低いところで数十 keV のエネルギー帯から計測できるようにするため、計測窓には約 3 mm 厚のホウケイ酸ガラスを採用した。強度を保つため計測窓の有効径は小さく、赤道面上の視線の多くの部分が TF コイルによって遮られてしまうため、分布計測を行うには検出器を TF コイル内側に設置する必要がある。この点および TST-2 における先行研究を踏まえ、本システムでは、NaI シンチレータ、光電子増倍管（PMT）、曲率を持ったアクリルライトガイド、鉛製のコリメータ、直線および回転ステージの組み合わせを採用した。これにより、赤道面上の数十 keV から 1 MeV 近くまでのエネルギー帯の硬 X 線のエネルギー流束を、±10 %程度のエネルギー分解能で計測することが可能である。

TST-2 のコイル通電による PMT のゲインの変動が見られないこと、ライトガイドを用いた際のシンチレーション光の大幅な損失がないことを確認した後、プラズマ電流が最大 11 kA の LHW 駆動プラズマに対してこのシステムを用いた硬 X 線計測を行った。結果として、エネルギースペクトルの時間発展の計測に成功し、プラズマ電流と相関をもつ硬 X 線のエネルギー流束および実効温度の変化が観測された（図 6.1.3）。また、装置中心に近い視線ほどエネルギー流束が大きくなることが示された。

6.1.5 共同研究

QUEST におけるトムソン散乱

九州大学の QUEST 球状トカマク装置では、電子バーンスタイン波（EBW）電流駆動による定常高性能プラズマの生成を目標としており、これまでに約 70 kA の非誘導プラズマ電流が達成されている。低密度高周波維持プラズマの基本的な性質や電流駆動の物理機構を解明し、さらなる高性能化を図るためには、プラズマの基礎データである電子温度・密度分布を測定する必要がある。本共同研究では、それらの分布計測を目的としたトムソン散乱（TS）計測システムの開発を行っている。これまで種々のプラズマに対する分布計測を行うとともに、測定可能な空間点を 12 点へ拡充、レーザー入射タイミング制御回路による QUEST の放電やコンパクトトーラス（CT）入射タイミングと TS 計測タイミングの同期システムの開発といった TS システムの開発・整備・改善を行ってきた。

2016 年度も引き続きプラズマ計測を行い、8.2 GHz と 28 GHz の電子サイクロトロン波（ECW）で維持されたプラズマおよび OH プラズマに CT 入射を行った際の分布の時間発展計測に成功した。また、オーミック放電への CT 入射、ECH (8.2 GHz、28 GHz) 電流立ち上げ維持プラズマを対象に測定を行ない、CT による粒子補給の様子、28 GHz の方が 8.2 GHz よりもバルクの電子温度が低いこと等を明らかにした。さらに、QUEST における ECW 駆動のプラズマは一般のトカマクプラズマに対して密度が低いため、高効率での計測が必須である。従来の APD よりも高感度の APD S11519-30（Hamamatsu Photonics）が開発されたので、検出器をこれに交換し、校正等を行い、プラズマ測定の準備を完了した。

LATE におけるイオン温度・フロー計測

京都大学の LATE では、新たに、計測視線 $R_{\tan} =$ 60 mm、110 mm を計測可能なファイバー固定具を作成し、トロイダルおよびポロイダル視線での測定を C^{2+} (464.7 nm)、O^{4+} (278.1 nm)、C^{4+} (227.1 nm) のラインについて行った。5.0 GHz の電子サイクロトロン共鳴加熱によって電流駆動されたプラズマを対象に計測を行った。計測したプラズマのプラズマ電流は最大 8 kA、トロイダル磁場 $B_t \sim 0.18$ T、電子密度 $n_e \sim 6 \times 10^{17}$ m^{-3} であった。

計測したどのイオンにおいても、電子サイクロトロン共鳴加熱パワーが最大となる時間で、トロイダルフロー速度は最大となった。ポロイダルフロー速度は、~4 km/s であった。これは TST-2 RF プラズマのポロイダルフロー速度と同程度かそれより遅い速度である。また、視線 $R_{\tan} = 260$ mm において、プラズマ電流が最大となる時間において C^{4+} のイオン温度が 100 eV 程度であることを発見した (図 6.1.4)。TST-2 RF プラズマでは、C^{4+}, O^{4+} は十分な発光を確認できていないうえに、C^{2+} のイオン温度が最大 10 eV 程度であり、LATE プラズマでのイオン温度 100 eV は非常に高いことがわかる。

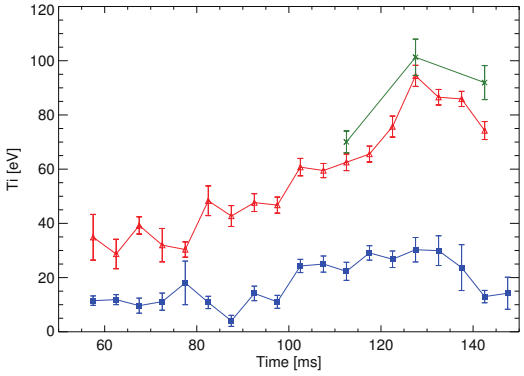

図 6.1.4: LALTE における C^{2+} (青)、O^{4+} (赤)、C^{4+} (緑) のイオン温度の時間変化。

UTST 合体実験における電流分布計測

プラズマ合体実験における磁気リコネクション時の電流シートを測定するため、小型多層巻きのロゴスキーコイル 5 個を径方向に並べたプローブを用いた電流分布計測を行った。分布計測の結果、X 点付近に非常に大きな電流が確認でき、電流シートの径方向分布が測定できた。また、電流密度の値とプラズマ電流の間には弱い相関が見られ、大きい電流密度はプラズマ電流が高い放電でのみ計測される傾向があった。

得られた電流密度の最大値は、ピックアップコイルから求めた値が ~0.3 MA/m^2 であったのに対し、ロゴスキーコイルで測定した最大値は ~2.0 MA/m^2 となり（図 6.1.5(a)、(b)）、従来のピックアップコイルの計測から推測された分布（図 6.1.5(c)–(e)）よりも急峻な分布となっていることがわかった。電流シートの R 方向幅は、測定したほとんどの放電で 20–40 mm となり、その平均値は 32 mm だった。また、Z 方向の幅についてはプローブ位置が $Z = 0$ m で固定されているため、放電ごとの X 点の位置と電流密度の測定値を比較した結果、電流密度の値は、X 点の位置とプローブ位置が一致した場合にもっとも高くなったほか、X 点の位置が 10 mm 程度ずれると、ロゴスキーコイルで測定される電流密度が小さくなることがわかった。このことから、X 点の位置と電流の位置は概ね一致すること、電流シートの Z 方向幅がおよそ 20 mm であることが見積もられた。見積もられた電流シートの大きさは、R 方向、Z 方向いずれも既設のピックアップコイルアレイの空間分解能 ~5 cm よりも小さく、電流シートは局在した領域に生成されることがわかった。

＜報文＞

(原著論文)

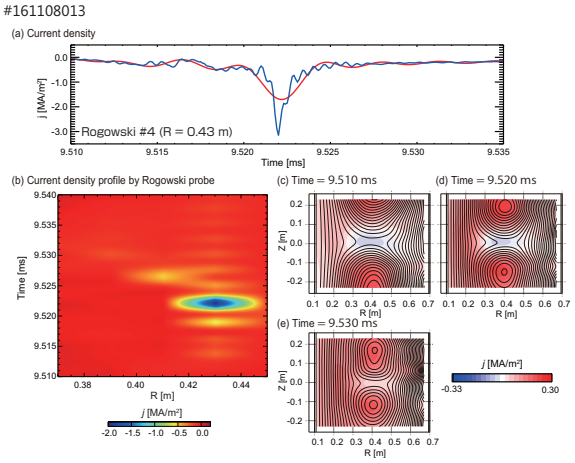

図 6.1.5: UTST における電流密度分布計測結果。

[1] H. Furui, A. Ejiri, Y. Nagashima, Y. Takase, M. Sonehara, N. Tsujii, T. Yamaguchi, T. Shinya, H. Togashi, H. Homma, K. Nakamura, T. Takeuchi, S. Yajima, Y. Yoshida, K. Toida, W. Takahashi and H. Yamazaki: A model of plasma current through a hole of Rogowski probe including sheath effects, Rev. Sci. Instrum. **87**, 043503 (2016).

[2] S. Banerjee, H. Zushi, N. Nishino, K. Mishra, Y. Mahira, S. Tashima, A. Ejiri, T. Yamaguchi, T. Onchi, Y. Nagashima, K. Hanada, K. Nakamura, H. Idei, M. Hasegawa, A. Fujisawa, A. Kuzmin and K. Matsuoka: Observation of an edge coherent mode and poloidal flow in the electron cyclotron wave induced high βp plasma in QUEST, Phys. Plasmas **23**, 082507 (2016).

[3] H. Tojo, I. Yamada, R. Yasuhara, A. Ejiri, J. Hiratsuka, H. Togashi, E. Yatsuka, T. Hatae, H. Funaba, H. Hayashi, Y. Takase and K. Itami: Validations of calibration-free measurements of electron temperature using double-pass Thomson scattering diagnostics from theoretical and experimental aspects, Rev. Sci. Instrum. **87**, 093502 (2016).

[4] T. Shinya, S. G. Baek, G. M. Wallace, S. Shiraiwa, Y. Takase, R. R. Parker, P. T. Bonoli, D. Brunner, I. Faust, B. L. LaBombard and S. Wukitch: Identification of waves in the lower-hybrid frequency range in the scrape-off layer plasma of Alcator C-Mod, Nucl. Fusion **57**, 036005 (2016).

[5] T. Shinya, Y. Takase, S. Yajima, C. Moeller, H. Yamazaki, N. Tsujii, Y. Yoshida, A. Ejiri, H. Togashi, K. Toida, H. Furui, H. Homma, K. Nakamura, B. Roidl, M. Sonehara, W. Takahashi and T. Takeuchi: Plasma current start-up experiments using outboard- and top-launch lower hybrid wave on the TST-2 spherical tokamak, Nucl. Fusion **57** 036006 (2016).

(学位論文)

[6] 曽根原正晃: A study of temporal and spatial structure of edge turbulence in the TST-2 spherical tokamak (博士論文).

[7] 冨樫央: Electron temperature and density profile measurement in spherical tokamaks started-up by radio frequency waves (博士論文).

[8] 高橋航: 球状トカマク TST-2 及び LATE におけるイオン温度及びイオン流速の計測 (修士論文).

[9] 戸井田和弥: TST-2 球状トカマクにおける低域混成波で生成されたプラズマの電子温度・密度分布計測 (修士論文).

[10] 山崎響: A Study of Start-Up Process of Spherical Tokamak Configurations Using Lower Hybrid WaveCurrent Drive and Plasma Merging (修士論文).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[11] Y. Takase for the TST-2 Group: Plasma Current Start-Up Using Capacitively-Coupled Combline Antennas on TST-2, US-Japan Workshop on RF Heating Physics, Toyama, Japan, May 18–20, 2016.

[12] N. Tsujii, A. Ejiri, Y. Takase, P. T. Bonoli, J. Lee, J. C. Wright, R. W. Harvey, H. Kasahara and E. F. Jaeger: Modeling of self-consistent velocity distribution functions with low-hybrid and ICRF waves in 2D and 3D, US-Japan Workshop on RF Heating Physics, Toyama, Japan, May 18–20, 2016.

[13] Y. Takase for the TST-2 Group: Study of Plasma Current Ramp-Up by the Lower Hybrid Wave in the TST-2 Spherical Tokamak, 18th International Congress on Plasma Physics, Kaohsiung, Taiwan, Jun. 27–Jul. 1, 2016.

[14] B. Roidl, Y. Todo, Y. Takase, N. Tsujii, Y. Yoshida, A. Ejiri, T. Shinya, S. Yajima, H. Togashi, H. Furui, H. Homma, K. Nakamura, M. Sonehara, W. Takahashi, T. Takeuchi, K. Toida, H. Yamazaki: Numerical Investigation of the role of energetic electrons in the TST2-spherical Tokamak plasma, 18th International Congress on Plasma Physics, Kaohsiung, Taiwan, Jun. 27–Jul. 1, 2016.

[15] H. Togashi, A. Ejiri, H. Homma, T. Shinya, Y. Takase, K. Toida, N. Tsujii, H. Furui, K. Nakamura, B. Roidl, M. Sonehara, W. Takahashi, T. Takeuchi, S. Yajima, H. Yamazaki, Y. Yoshida, M. Hasegawa and Y. Nagashima: Electron temperature and density profile measurements for spherical tokamak plasmas sustained by lower hybrid wave on TST-2, 18th International Congress on Plasma Physics, Kaohsiung, Taiwan, Jun. 27–Jul. 1, 2016.

[16] S. Yajima, Y. Takase, C. P. Moeller, T. Shinya, H. Yamazaki, N. Tsujii, A. Ejiri, M. Sonehara, H. Furui, H. Togashi, Y. Yoshida, T. Takeuchi, H. Homma, K. Nakamura, B. Roidl, K. Toida, W. Takahashi: Non-inductive Current Drive Experiment Using Top-Launch Antenna on TST-2 Spherical Tokamak, 18th International Congress on Plasma Physics, Kaohsiung, Taiwan, Jun. 27–Jul. 1, 2016.

[17] Y. Takase, A. Ejiri, T. Fujita, K. Hanada, H. Idei, M. Nagata, Y. Ono, H. Tanaka, A. Fukuyama, Y. Kamada, N. Fukumoto, R. Horiuchi, Y. Nagayama, Y. Takeiri, and S. Tsuji-Iio: Overview of Spherical Tokamak Research in Japan, 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan, Oct. 17–22, 2016.

[18] A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, S. Yajima, T. Shinya, H. Yamazaki, C. P. Moeller, H. Togashi, K. Toida, H. Homma, A. Ishida, H. Furui, H. Kasahara, T. Mutoh, K. Nakamura, B. Roidl, K. Saito, T. Seki, M. Sonehara, W. Takahashi, T. Takeuchi, Y. Yoshida and O. Mitarai: Plasma Start-up Experiments on the TST-2 Spherical Tokamak, 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan, Oct. 17–22, 2016.

[19] H. Idei, T. Onchi, T. Kariya, K. Hanada, T. Imai, A. Ejiri, O. Watanabe, K. Mishra, K. Nakamura, M. Hasegawa, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, H. Zushi, Y. Takase and A. Fukuyama: Noninductive Electron Cyclotron Heating and Current Drive with Dual Frequency (8:2/28 GHz) Waves in QUEST, 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan, Oct. 17–22, 2016.

[20] K. Hanada, N. Yoshida, T. Honda, Z. Wang, A. Kuzmin, I. Takagi, T. Hirata, Y. Oya, M. Miyamoto, H. Zushi, M. Hasegawa, K. Nakamura, A. Fujisawa, H. Idei, Y. Nagashima, O. Watanabe, T. Onchi, H. Watanabe, K. Tokunaga, A. Higashijima, S. Kawasaki, H. Nakashima, T. Nagata, Y. Takase, A. Fukuyama and O. Mitarai: Investigation of Hydrogen Recycling Property and its Control with Hot Wall in Long Duration Discharges on QUEST, 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan, Oct. 17–22, 2016.

[21] N. Fukumoto, K. Awajitani, K. Hanada, H. Togashi, K. Toida, M. Nagata, T. Onchi, H. Idei, M. Hasegawa, A. Fujisawa, K. Nakamura, H. Zushi, A. Kuzmin, A. Ejiri, Y. Takase, Y. Nagashima, O. Mitarai, A. Higashijima, T. Nagata, S. Kawasaki: Advanced Fueling in Spherical Tokamak by Compact Toroid Injection on QUEST, 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan, Oct. 17–22, 2016.

招待講演

[22] Y. Takase: RF Heating and Current Drive, 4th A3 Foresight Summer School and Workshop on Spherical Torus, Kyushu University Chikushi Campus, Kasuga, Japan, Aug. 2–5, 2016.

[23] A. Ejiri and TST-2 team: Internal reconnection events in the TST-2 spherical tokamak, The US-Japan Workshop and School on Magnetic Reconnection, Hiroshima, Japan, Mar. 19–23, 2017.

(国内会議)

一般講演

[24] 江尻晶: 原型炉における計装制御とその開発戦略 15S51、第 11 回核融合エネルギー連合講演会、九州大学伊都キャンパス、2016 年 7 月 14 日–15 日.

[25] 江尻晶、辻井直人、冨樫央、戸井田和弥、矢嶋悟、吉田裕亮、高瀬雄一、曽根原正晃、高橋航、山響、北山明親、佐藤暁斗、武井悠稀、田尻芳之、松本直希、御手洗修: TST-2 球状トカマクにおける電流立ち上げ実験 15P017、第 11 回核融合エネルギー連合講演会、九州大学伊都キャンパス、2016 年 7 月 14 日–15 日.

[26] 辻井直人、高瀬雄一、江尻晶、高橋航、戸井田和弥、冨樫央、曽根原正晃、矢嶋悟、山響、吉田裕亮, Benedikt Roidl: TST-2 における低域混成波計測用マイクロ波散乱計の設計、第 11 回核融合エネルギー連合講演会、九州大学伊都キャンパス、2016 年 7 月 14 日–15 日.

[27] Y. Takase, A. Ejiri, N. Tsujii, C. P. Moeller, B. Roidl, T. Shinya, S. Yajima, H. Yamazaki, M. Sonehara, H. Togashi, Y. Yoshida, W. Takahashi, K. Toida, A. Kitayama, A. Sato, Y. Takei, Y. Tajiri and N. Matsumoto: Plasma current ramp-up experiments using capacitively-coupled lower-hybrid-wave antenna on the TST-2 spherical tokamak, 第 33 回プラズマ・核融合学会年会、東北大学青葉山キャンパス、2016 年 11 月 29 日-12 月 2 日.

[28] 江尻晶、辻井直人、冨樫央、戸井田和弥、矢嶋悟、吉田裕亮、高瀬雄一、曽根原正晃、高橋航、山崎響、北山明親、佐藤暁斗、武井悠稀、田尻芳之、松本直希、Roidl Benedikt、御手洗修: TST-2 球状トカマクにおける AC オーミックコイル運転、第 33 回プラズマ・核融合学会年会、東北大学青葉山キャンパス, 2016 年 11 月 29 日–12 月 2 日.

[29] 冨樫央、江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、曽根原正晃、矢嶋悟、吉田裕亮、高橋航、戸井田和弥、山響、北山明親、佐藤暁斗、武井悠稀、田尻芳之、松本直希、Roidl Benedikt: TST-2 球状トカマクにおける硬 X 線計測システムの開発、第 33 回プラズマ・核融合学会年会、東北大学青葉山キャンパス、2016 年 11 月 29 日–12 月 2 日.

[30] 高橋航、高瀬雄一、江尻晶、辻井直人、冨樫央、矢嶋悟、吉田裕亮、戸井田和弥、山響、北山明親、佐藤暁斗、武井悠稀、田尻芳之、松本直希、Benedikt Roidl: TST-2 オーミックプラズマにおける可視分光器を用いたイオンフローの測定、第 33 回プラズマ・核融合学会年会、東北大学青葉山キャンパス、2016 年 11 月 29 日–12 月 2 日.

[31] 山崎響、古井宏和、山崎広太郎、牛木知彦、高瀬雄一、井通暁、小野靖、江尻晶、辻井直人、UTST グルー

プ、TST-2 グループ: UTST におけるロゴスキーコイルを用いた局所電流測定、第 33 回プラズマ・核融合学会年会、東北大学青葉山キャンパス、2016 年 11 月 29 日–12 月 2 日.

[32] 辻井直人、高瀬雄一、江尻晶、曽根原正晃、冨樫央、矢嶋悟、吉田裕亮、高橋航、戸井田和弥、山崎響、北山明親、佐藤暁斗、武井悠稀、田尻芳之、松本直希、Benedikt Roidl: TST-2 における低域混成波計測用マイクロ波散乱計の開発、第 33 回プラズマ・核融合学会年会、東北大学青葉山キャンパス、2016 年 11 月 29 日–12 月 2 日.

6.2 佐野研究室

佐野研究室では、熱平衡から遠く離れた系における法則を探索・解明することを目指し、実験・理論両面から研究を行っている。研究対象は大きく分けて、大自由度で熱ゆらぎが無視できるマクロな非平衡系、熱ゆらぎと非平衡ゆらぎが競合するミクロな非平衡系、そして非平衡性が本質的役割を果たす実例として、生命現象を取り扱う。

非平衡系では、外部からエネルギーや物質が絶えず流入・流出することにより、自発的な秩序やマクロな乱れが生じることが知られている。これらは一般に自己組織化現象と呼ばれ、流体現象などにおいてその存在が知られていたが、力学系の分岐理論やアトラクターの概念、カオスなどの理解の進展により、流体系に限らず、より広範な物理現象を含む大きなクラスとしての非線形力学系が持つ一般的性質として学問体系が再編成されつつある。そのような観点からは、流体力学、液晶やコロイドなどのソフトマター、化学反応系、生命システムまで含めて、パターン形成や非線形振動、カオスや乱流といった自己組織現象の動力学は共通した特徴を持っており、系の詳細によらず統一的に記述し扱うことが可能である。以上に加えて最近では，微小な系におけるゆらぎの法則や、系の記憶と制御に伴う情報量の寄与を含めた非平衡熱統計力学に関しても著しい進展が見られ、1 分子計測技術やナノテクノロジーの発展とも相まって、非平衡系におけるゆらぎの理解が飛躍的に進みつつある。さらに近年、細胞や分子モーター、異方性を利用して自己推進する粒子など、エネルギーを消費して自発的運動を示す物体、いわゆるアクティブマターが非平衡特有の物理現象として大いに注目を集めており、当研究室では実験・理論の両面からアクティブマター特有の物理法則の探索とより広範な非平衡系の枠組みとの融合に取り組んでいる。

以上の研究を通して我々は、広い範囲の非平衡系に適用可能で、一般的な熱統計力学的枠組みの構築を模索している。一方で、非平衡現象は多彩であり、系の対称性や境界条件、初期条件、有効自由度の数などにより多様な運動形態が生じ、普遍性だけではくくりきれない多様性と新奇な現象が発見される自然現象の宝庫でもある。こうした非平衡系の個性と普遍性の理解に向け、我々は典型的な非平衡系と思われる実験系を選び、非平衡度を制御して観測される新現象を詳細に観測するアプローチを取っている。また、実験結果と理論との緊密なフィードバックにより、新たな手法開発と概念構築を目指して研究を行っている。

スタッフの構成としては、助教の平岩徹也と客員共同研究員の太田隆夫（京大名誉教授）が在籍している。

6.2.1 非平衡系の動力学・統計力学

吸収状態転移の普遍性の探求

Directed percolation (DP) 普遍クラスは、吸収状態という、一度入ると二度と出ていけない状態への転移を記述する最も基本的な普遍クラスとして理論的な関心を集めている。実験的にも、我々とオーストリアのグループがニュートン流体の乱流への遷移が DP 普遍クラスに属すること報告しており [16, 26, 27, 77, 81, 82]。DP 普遍クラスは現在活発に研究が進められている普遍クラスである。我々は、DP に移流と活性壁を加えた場合に、実験で測れる物理量がどのような影響を受けるかに関して、平均場理論と数値計算を併用して研究を行った。具体的には、通常の directed bond percolation モデルに、活性壁と、移流に対応する非対称性を加えた数値計算によって、移流のある条件下では、実験で比較的容易に測定できる秩序変数や非活性状態の間隔分布の特徴的な長さに関して、相関長の発散に対応する臨界指数での冪乗則と相関時間の発散に対応する臨界指数での冪乗則の両方がクロスオーバーの形で現れることを明らかにした [71]。さらに、2 つの状態が交互に繰り返される交代再生過程というモデルの数値計算によって、観測窓 (時間) が有限の場合に、測定データから構築されたヒストグラムがどの程度真の分布から外れるかを明らかにし、このことが理論モデルでは非常にロバストに現れる DP 普遍クラスが実験ではごく限られた場合にしか見られてこなかった中心的な原因になっている可能性を指摘した [50, 26, 71]。

移流と活性壁のある液晶電気乱流系の統計的解析

ある種のネマチック液晶に高電圧の交流電場を印加して観察される液晶乱流系における二種類の乱流相間の相転移は、最も単純な吸収状態転移を示す系の属する Directed Percolation（DP）普遍クラスに属するということが知られている。我々は、この液晶電気乱流系に液晶の移流および移流に垂直で観察領域に対し上流に位置する活性壁（常に活性状態に保たれている 1 次元領域）を持つ実験系を考案し、定常状態における臨界点近傍での統計的解析を行った。その結果、定常状態の秩序変数、相関時間および相関長に関する臨界指数がそれぞれ DP 普遍クラスのものと誤差の範囲内で一致することが確認され、本系も DP 普遍クラスに属することが強く示唆された [13, 70]。

初期条件に依存する普遍界面ゆらぎの解析

Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 普遍クラスは、成長する界面や交通流、非調和振動子鎖のゆらぎ、量子系のエントロピーの時間発展など様々な現象に関わっていることが明らかになっている。我々はKPZクラスの持つ、系の初期条件に依存する普遍ゆらぎの性質を調べるため、レーザーホログラム技術を用い、液晶電気乱流において任意にコントロールした初期条件からの乱流クラスターの成長を観察できる実験系を構築した。この実験系とKPZクラスに属する数値モデルを用いて、リング状の初期条件から内向き・外向きに成長する界面を調べた。内向き成長界面は、界面が潰れるよりも十分早い時刻では平面界面の性質を示し、その後平面界面の性質から外れる、というふるまいを示すことを発見した。外向き成長界面では、今までに発見していた平面界面から円形界面の性質へのクロスオーバーにおけるゆらぎの性質を、より精密な数値計算によって調べた。[15, 23, 37, 68, 85]

6.2.2 アクティブマターの動力学

カイラルな液晶液滴のらせん運動

油滴を界面活性剤水溶液の中に分散させると自発的にマランゴニ対流が発生し、油滴が自発運動をおこなうことが知られる。一方、カイラルな液晶は空間反転対称性の破れにより、場に応答し回転することができる。我々はカイラルな液晶を界面活性剤水溶液中に分散させることで液晶液滴が自発的にらせん運動をおこなうことを発見した [11, 17, 25, 51]。さらに、液滴の運動の3次元トラッキングをおこない運動モードと配向場の関係を調べることで、液晶液滴がらせん配向場を示すときに自発らせん運動が出現していることを明らかにした。この実験結果は液晶液滴の配向場と運動が強く相関していることを示唆しており、自発らせん運動の発生メカニズムの理解へとつながると考えている [11, 43, 54, 65, 69]。

往復的に自己駆動するコロイド粒子の正味の運動

直流電場下で誘電体コロイドが回転する効果により粒子を電極上を転がり運動する粒子は自己駆動粒子とみなせる系をもちいる。我々は、1粒子が適切な周波数の交流電場下では往復運動することや正味の運動が生じることを発見した。正味の運動は、多粒子系では集団的に渦をつくるなど特徴的な相がみられた。まず、その正味の運動が生じるのは時間反転対称性のない粒子配置の変化をするためであるので、一粒子系ではおこりえない。そこで、何粒子あってはじめて正味の運動が現れるかが重要だとわかった。希薄溶液や光ピンセットによる数粒子孤立系の作製により実験的に検証予定である [30, 38, 53, 19]。

自己駆動コロイド粒子 (ヤヌス粒子) の集団運動及び最適制御

シリカやポリスチレンなどのコロイド粒子の半球を金属で蒸着した非対称粒子（ヤヌス粒子）は、水中で交流電場をかけると電場に垂直な2次元面内を自己駆動することが知られている。そこで交流電場の周波数を調整することでヤヌス粒子の向きが揃う大域的秩序相を実現した [66, 29, 21, 58, 64]。またカイラルなヤヌス粒子を作製し、回転運動と直進運動を切り替えることで目的の場所に移動させる方法を新しく開発した [8, 91]。

フィラメントのパターン形成

フィラメントの作る集団運動は点要素が作るものと異なるパターンを形成する。生体内タンパク質である「キネシン・微小管」を用いて、平面上を運動するフィラメントが作る集団運動を観察した。局所相互作用を制御できるように設計し大局的なパターンを比較したところ、低密度条件下では配向秩序が生じ、高密度条件下ではクラスター化した。これらのパターンを説明するために低密度において相互作用を観察したところ、排除体積効果が重要であることが分かった。[28, 57, 60, 44]

遊泳バクテリア集団運動における秩序とゆらぎ

アクティブマターの集団運動における普遍的性質の追究のため、遊泳バクテリア懸濁液をモデル系として採用し、集団運動の2つのクラスについて実験をおこなった。

通常の大腸菌の 10〜20 倍の長さまで伸長させたフィラメント状大腸菌を作成し、この大腸菌を擬2次元面内で高密度で泳がせることで、バクテリアの集団運動の長距離ネマチック秩序相を実現した。この長距離秩序相において、「巨大粒子数ゆらぎ」や「冪的な相関関数」が観測された。これは、集団運動の理論研究・数値計算で普遍性が予言されながらも、他の実験系では観測されていなかったVicsek classに属する集団運動の初めての実現となった [1, 7, 10, 24, 42, 52, 20, 55]。

また、3次元的な高密度懸濁液中で見られるバクテリア乱流についても、枯草菌を用いて実験をおこなった。バクテリア乱流は長距離秩序を持たず、時空間的にカオス的な変動を示す。しかし、周期的な構造物をわずかに配置するだけで、安定な反強磁性渦格子へと自己組織的に秩序形成させられることを発見した [1, 10, 67, 72]。

6.2.3 非平衡系としての生命現象

細胞と組織の動力学に関する理論的研究

細胞運動や多細胞組織形成を実現している力学について非平衡物理の観点から理論的研究を行ってい

る。特に、アクティブマターの理論を基に真核細胞の個体および集団での走化性遊走の理論モデルを提案・解析している [18, 73]。多細胞運動の理論を基にしてショウジョウバエの蛹に見られる組織運動の特徴を数値的に調べている [18, 73]。分子モーターに由来する細胞骨格の応力を計算する力学的モデルを提案し、流動的細胞骨格において収縮応力が誘起される条件を調べている [3, 18, 80, 14, 83, 46, 61, 73]。また、細胞骨格の粘弾性を計算するための粗視化手法に関する研究の発表も行った [79, 86]。

細胞遊走モデルの造血幹細胞運動への応用

変形によって培地上を這う細胞モデルを人の造血幹細胞のダイナミクスに適用した。変形と並進の相互作用を変えた理論結果と実験における走化性化学物質濃度を変えたときの運動変化（ハイデルベルグ大学 田中求氏ら）とを対応・比較した。この成果は、現在、投稿中である。[4]

神経幹細胞の集団運動における力場計測

紡錘状の細胞であるマウス神経幹細胞は、2 次元集団培養下においてネマチックに向きを揃えた集団運動を行うことにより、高密度下でも運動を継続する。前年度までの研究で、個々の細胞が基質に及ぼす応力場を測定し、その主方向と細胞の向きの関係が示唆されていた。今年度は応力場の測定方法をより精度の良いものに改良し、結果の再検証を行った [12, 62]。また応力場の測定には基質として用いる柔らかいシリコンゲルの観察結果から推定を行う必要があるが、細胞集団に対してこの推定を行う妥当性を数値シミュレーションによって検証した [12]。

＜受賞＞

[1] 西口大貴，理学系研究科研究奨励賞，2017 年 3 月 23 日.

[2] 伊藤創祐（OB），日本物理学会第 11 回領域 11 若手奨励賞，2017 年 3 月 19 日.

＜報文＞

(原著論文)

[3] T. Hiraiwa and G. Salbreux: Role of turnover in active stress generation in a filament network, Phys. Rev. Lett. **116**, 188101 (2016).

[4] M. Tarama and T. Ohta: Reciprocating motion of active deformable particle, Europhysics Letters, **114**, 30002 (2016).

[5] J. J. Molina, K. Otomura, H. Shiba, H. Kobayashi, M. Sano and R. Yamamoto: Rheological evaluation of colloidal dispersions using the smoothed profile method: formulation and applications, J. Fluid Mech., **792**, 590-619 (2016).

[6] J.-B. Delfau, J. Molina and M. Sano: Collective behavior of strongly confined suspensions of squirmers, Europhys. Lett., **114**, 24001, 1-5 (2016).

[7] D. Nishiguchi, K.H. Nagai, H. Chaté and M. Sano: Long-range nematic order and anomalous fluctuations in suspensions of swimming filamentous bacteria, Phys. Rev. E, **95**, 020601(R) (2017).

[8] T. Mano, J.-B. Delfau, J. Iwasawa and M. Sano: Optimal run-and-tumblebased transportation of a Janus particle with active steering, PNAS **114** (13), E2580-E2589 (2017).

[9] K. Kawaguchi, R. Kageyama and M. Sano: Topological defects control collective dynamics in neural progenitor cell cultures, Nature, accepted for publication (2017), doi:10.1038/nature22321

(国内雑誌)

(学位論文)

[10] 西口大貴: Order and fluctuations in collective dynamics of swimming bacteria，博士論文，2017 年 3 月.

[11] 山本尚貴: Non-equilibrium dynamics of chiral liquid crystal，博士論文， 2017 年 3 月.

[12] 上道雅仁: 細胞力学による神経幹細胞のネマチックな集団運動の研究, 修士論文, 2017 年 3 月.

[13] 大沼尚徳: 移流と活性壁のある液晶欠陥乱流相転移の統計的解析, 修士論文, 2017 年 3 月.

(著書)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[14] T. Hiraiwa and G. Salbreux: Theory on active stress generation in a cytoskeletal network, Cell Physics 2016, Jun. 22-24, 2016, Saarbrücken, Germany.

[15] Y. Fukai and K. A. Takeuchi: Crossover between Kardar-Parisi-Zhang Subclasses in Interfaces with Curved Initial Conditions, Non-equilibrium dynamics in classical and quantum systems: From quenches to slow relaxations, Jul. 13-15, 2016, Pont-à-Mousson, France.

[16] K. Tamai: Experimental Study on the Universal Route to Turbulence, OIST-iTHES-CTSR 2016 International Workshop, Jul. 9-11, 2016, Okinawa, Japan.

[17] T. Yamamoto and M. Sano: Chirality-induced helical self-propulsion of chiral liquid crystal droplets, OIST-iTHES-CTSR 2016 International Workshop, Jul. 9-11, 2016, Okinawa, Japan.

[18] T. Hiraiwa: Active mechanics of cells, OIST-iTHES-CTSR 2016 International Workshop, Jul. 9-11, 2016, Okinawa, Japan.

[19] A. N. Kato and M. Sano: Collective motion of reciprocating self-propelled colloidal particles, OIST-iTHES-CTSR 2016 International Workshop, Jul. 9-11, 2016, Okinawa, Japan.

[20] D. Nishiguchi, K.H. Nagai, H. Chaté and M. Sano: Long-range nematic order and anomalous fluctuations in collective motion of filamentous bacteria, OIST-iTHES-CTSR 2016 International Workshop, Jul. 9-11, 2016, Okinawa, Japan.

[21] J. Iwasawa, D. Nishiguchi and M. Sano: Properties of the Collective Motion of Asymmetric Self-Propelling Particles, OIST-iTHES-CTSR 2016 International Workshop, Jul. 9-11, 2016, Okinawa, Japan.

[22] M. Sano: Criticalities at the Transition to Turbulence in Shear Flow, STATPHYS26 (the 26th IUPAP International conference on Statistical Physics), Jul. 18-22, 2016, Lyon, France.

[23] Y. Fukai and K. A. Takeuchi: Between universality subclasses: numerical and experimental results for KPZ interfaces with curved initial conditions, STATPHYS26 (the 26th IUPAP International conference on Statistical Physics), Jul. 18-22, 2016, Lyon, France.

[24] D. Nishiguchi, K.H. Nagai, H. Chaté and M. Sano: Long-range nematic order and anomalous fluctuations in 2D suspension of swimming filamentous bacteria, STATPHYS26 (the 26th IUPAP International conference on Statistical Physics), Jul. 18-22, 2016, Lyon, France.

[25] T. Yamamoto and M. Sano: Chirality-induced helical self-propulsion of cholesteric liquid crystal droplets, STATPHYS26 (the 26th IUPAP International conference on Statistical Physics), Jul. 18-22, 2016, Lyon, France.

[26] K. Tamai and M. Sano: Use of Laminar Interval Distribution in Characterization of Spatiotemporal Intermittency, STATPHYS26 (the 26th IUPAP International conference on Statistical Physics), Jul. 18-22, 2016, Lyon, France.

[27] K. Tamai and M. Sano: Transition to turbulence in shear flow as non-equilibrium phase transition, RIMS camp-style seminar, Aug. 31 - Sep. 2, 2016, Kyoto, Japan.

[28] S. Tanida, K. Furuta, K. Nishikawa, H. Kojima and M. Sano: Pattern Formation of Microtubules Driven by Kinesins, International Conference: Microswimmers- From Single Particle Motion to Collective Behavior, Oct. 4-7. 2016, Bonn, Germany.

[29] J. Iwasawa, D. Nishiguchi and M. Sano: Properties of Directed Collective Motion of Asymmetric Self-Propelling Particles, Current and Future Perspectives in Active Matter, Oct. 28-29, 2016, Tokyo, Japan.

[30] A. N. Kato and M. Sano: Back-and-forth motion of a self-propelled colloid and net locomotion in collective motion, Current and Future Perspectives in Active Matter, Oct. 28-29, 2016, Tokyo, Japan.

[31] M. Sano: On the Role of Topological Defects in Active Matter, International Symposium on Universal Biology 2016, Nov. 28-29, 2016, Tokyo, Japan.

招待講演

[32] M. Sano: Experiments on Active Matter, IASBS-ICTP School on Active Matter and Chemotaxis, May 14-25, 2016, Zanjan, Iran.

[33] M. Sano: Thermophoresis, Self-Propulsion, and Collective Behavior of Janus Particles, (Plenary) 12th International Meeting on Thermodiffusion, May 30-Jun. 3, 2016, Madrid, Spain.

[34] M. Sano: Does the Transition to Turbulence in Shear Flow belong to the Directed Percolation Universality Class?, 7th KIAS Conference on Statistical Mechanics, Jul. 4-7, 2016, Seoul, Korea.

[35] M. Sano: Research Overview on Soft Active Matter, OIST-iTHES-CTSR 2016 International Workshop, Jul. 9-11, 2016, Okinawa, Japan.

[36] T. Ohta: Collective waves in deformable self-propelled particles, International Conference “Patterns and Waves 2016”, Aug. 2-5, 2016, Sapporo, Japan.

[37] Y. Fukai and K. A. Takeuchi: Kardar-Parisi-Zhang interfaces with curved initial conditions – what exists “between” the universality subclasses?, International Workshop on Stochastic Thermodynamics and Active Matters, Aug. 15 - 16, 2016, Beijing, China.

[38] A. N. Kato and M. Sano: Collective motion of reciprocating self-propelled colloidal rollers, International Workshop on Stochastic Thermodynamics and Active Matters, Aug. 15-16, 2016, Beijing, China.

[39] M. Sano: Universal critical behavior of the transition to turbulence in channel flow, International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2016), Aug. 21-26, 2016, Montreal, Canada.

[40] M. Sano: Universal Transition to Turbulence in Shear Flow of Simple and Complex Fluids, StatPhys Taiwan 2016, Sep. 6-8, 2016, Taipei, Taiwan.

[41] M. Sano: Dynamical Order and Topological Defects in Active Matter: from Molecule to Cell Sheet, 16th KIAS Conference on Protein Structure and Function, Sep. 22-24, 2016, Seoul, Korea.

[42] D. Nishiguchi, K.H. Nagai, H. Chaté and M. Sano: Long-range nematic order and anomalous fluctuations in suspension of swimming filamentous bacteria, Current and Future Perspectives in Active Matter, Oct. 28-29, 2016, Tokyo, Japan.

[43] T. Yamamoto and M. Sano: Chirality-induced helical self-propulsion of cholesteric liquid crystal droplets, Current and Future Perspectives in Active Matter, Oct. 28-29, 2016, Tokyo, Japan.

[44] S. Tanida, K. Furuta, K. Nishikawa, H. Kojima and M. Sano: Configuring Dynamic Patterns of Microtubules Driven by Kinesins, Current and Future Perspectives in Active Matter, Oct. 28-29, 2016, Tokyo, Japan.

[45] T. Ohta: Simple physical model for cell crawling, Current and Future Perspectives in Active Matter, Oct. 28-29, 2016, Tokyo, Japan.

[46] T. Hiraiwa: Theory on active stress generation in an actomyosin network, Current and Future Perspectives in Active Matter, Oct. 28-29, 2016, Tokyo, Japan.

[47] T. Ohta: Simple model for cell crawling, Interdisciplinary Applications of Nonlinear Science, Nov. 3-6, 2016, Kagoshima, Japan.

[48] M. Sano: On the Role of Topological Defects in Active Matter, Interdisciplinary Applications of Nonlinear Science, Nov. 3-6, 2016, Kagoshima, Japan.

[49] M. Sano: On the Role of Topological Defects in Active Soft Matter, ENS-UT Joint workshop, Nov. 15-17, 2016, Paris, France.

(国内会議)

一般講演

[50] 玉井敬一, 佐野雅己: Characterizing transitions to turbulence as non-equilibrium phase transitions. 新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」第 3 回領域研究会, 2016 年 6 月 17-19 日, 福岡

[51] 山本尚貴, 佐野雅己: Chirality-induced helical self-propulsion of chiral liquid crystal droplets, 新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」第 3 回領域研究会, 2016 年 6 月 17-19 日, 福岡.

[52] 西口大貴, 永井健, H. Chaté, 佐野雅己: Long-range nematic order and anomalous flucutations in suspensions of swimming filamentous bacteria, 新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」第 3 回領域研究会, 2016 年 6 月 17-19 日，福岡.

[53] 加藤愛理, 佐野雅己: Spontaneous and Steady Vortex formation of Self-Propelled Reciprocating Colloids, 新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」第 3 回領域研究会, 2016 年 6 月 17-19 日，福岡.

[54] 山本尚貴, 佐野雅己: キラルな液晶液滴のらせん運動, 日本物理学会 2016 年秋季大会，2016 年 9 月 13-16 日, 石川.

[55] 西口大貴, 永井健, Hugues Chatè, 佐野雅己: フィラメント状バクテリアの集団運動の示す長距離ネマチック秩序と巨大粒子数ゆらぎ，日本物理学会 2016 年秋季大会，2016 年 9 月 13-16 日，石川.

[56] 西口大貴，庄司佳祐，山岡馨，岡島悟，末石智大，廣井卓思: 大学祭を活用した大学院生・若手研究者による「10 分で伝えます！ 東大研究最前線」の実施報告，日本物理学会 2016 年秋季大会，2016 年 9 月 13-16 日，石川.

[57] 谷田桜子, 古田健也, 西川香里, 小嶋寛明, 佐野雅己: 微小管運動アッセイ系の集団運動と相互作用, 第 67 回コロイドおよび界面化学討論会, 2016 年 9 月 22-24 日, 北海道.

[58] 岩澤諄一郎, 西口大貴, 佐野雅己: 非対称自己駆動粒子による集団運動の統計的性質の探索, 第 56 回生物物理若手の会 夏の学校, 2016 年 9 月 2-5 日, 北海道.

[59] 佐野雅己: 生命現象における普遍性とは何か？，第 56 回生物物理若手の会 夏の学校, 2016 年 9 月 2-5 日, 北海道.

[60] 谷田桜子, 古田健也, 西川香里, 小嶋寛明, 佐野雅己: Configuring Dynamic Patterns of Microtubules Driven by Kinesins, 第 54 回日本生物物理学会年会, 2016 年 11 月 24-26 日, 茨城.

[61] 平岩徹也: Theory on motor-induced stress in an isotropic actomyosin cytoskeleton, 第 54 回日本生物物理学会年会, 2016 年 11 月 24-26 日, 茨城.

[62] 上道雅仁, 佐野雅己: Measuring the Forces in Neural Stem Cell Monolayer, 第 54 回日本生物物理学会年会, 2016 年 11 月 24-26 日, 茨城.

[63] 佐野雅己: 「ゆらぎと構造の協奏：平衡系における普遍法則の確立」領域レビュー，第 10 回物性科学領域横断研究会，2016 年 12 月 9-10 日，兵庫.

[64] 岩澤諄一郎, 西口大貴, 佐野雅己: 非対称自己駆動粒子による集団運動の統計的性質の探索, 定量生物学の会　第八回年会, 2017 年 1 月 8-9 日, 福岡.

[65] 山本尚貴、佐野雅己:キラルな液晶液滴のらせん運動・自転運動・乱れた運動, アクティブマター研究会 2017, 2017 年 1 月 20-21 日, 福岡.

[66] 岩澤諄一郎, 西口大貴, 佐野雅己: 非対称自己駆動粒子による集団運動の統計的性質の解析, アクティブマター研究会 2017, 2017 年 1 月 20-21 日, 福岡.

[67] 西口大貴，Andrey Sokolov，Igor S. Aranson: 周期構造に出会ったバクテリア乱流の反強磁性渦格子形成，アクティブマター研究会 2017，2017 年 1 月 20-21 日，福岡.

[68] 深井洋佑：Experimental and numerical investigations on curved Kardar-Parisi-Zhang interfaces – Tracy-Widom distributions and more，Kick off Meeting for Stochastic Analysis on Infinite Particle Systems (無限粒子系の確率解析学)，2017 年 1 月 25 日，福岡.

[69] 山本尚貴, 佐野雅己: カイラルな液晶液滴の自発らせん運動と重力下での回転運動, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 20 日, 大阪.

[70] 黒田真史，大沼尚徳, 佐野雅己: 移流と活性壁のある液晶欠陥乱流相転移の統計的解析，日本物理学会第 72 回年次大会，2017 年 3 月 17-20 日，大阪.

[71] 玉井敬一，佐野雅己: 境界で駆動された非対称な Directed Percolation における臨界指数の測定方法，日本物理学会第 72 回年次大会，2017 年 3 月 17-20 日，大阪.

[72] 西口大貴，Andrey Sokolov，Igor S. Aranson : 周期構造とバクテリア乱流の共鳴による渦格子形成と反強磁性秩序，日本物理学会第 72 回年次大会，2017 年 3 月 16-20 日，大阪.

招待講演

[73] 平岩徹也: Active mechanics of eukaryotic cells, アクティブマター研究会 2017，2017 年 1 月 20-21 日，福岡.

[74] 佐野 雅己: ソフトマター物理からアクティブマター物理へ，日本学術振興会，分子系の複合電子機能第 181 委員会第 2 5回研究会，2016 年 12 月 2-3 日，東京.

[75] 佐野 雅己: シア流と非平衡相転移, 統計物理学懇談会, 口頭発表, 2017 年 3 月 6-7 日，東京.

(セミナー)

[76] 太田隆夫: 非平衡統計物理学研究の現状と将来, 関東非線形非平衡バイオソフトマターセミナー, 2016 年 5 月 14 日, 東京.

[77] 玉井敬一 : 非平衡相転移として捉える乱流遷移の普遍性，慶應義塾大学齊藤研究室　矢上統計物理学セミナー, 2016 年 5 月 26 日, 東京.

[78] 加藤愛理: クインケ効果で往復的自己駆動するコロイド粒子の集団運動，千葉大学大学院　櫻井・北畑研セミナー，2016 年 6 月 6 日, 千葉.

[79] T. Hiraiwa: Theory on linear viscoelasticity of a cytoskeletal network, Seminar at Freie Universität Berlin (AG Netz), Jun. 16, 2016, Berlin, Germany.

[80] T. Hiraiwa: Active stress generation in an isotropic actomyosin network, Seminar at The Laboratory of Theoretical Physics and Statistical Models (Soft Biophysics Group), Jun. 21, 2016, Paris, France.

[81] 玉井敬一 : Transition to Turbulence in Shear Flow - Experimental Approach toward its Universality -, 非線形現象セミナー，2016 年 6 月 28 日，東京.

[82] K. Tamai : Directed percolation unviersality in transition to turbulence, QHP seminar, Quantum Hadron Physics Laboratory (RIKEN), Jul. 5, 2016, Saitama, Japan.

[83] 平岩徹也: アクチン細胞骨格におけるモーター誘起応力の理論, 東京理科大学 住野研セミナー, 2016 年 9 月 20 日, 東京.

[84] M. Sano: On the Role of Topological Defects in Active Matter, Seminar at the Department of Physics at University of Bayreuth, Nov. 11, 2016, Bayreuth, Germany.

[85] 深井洋佑 : Kardar-Parisi-Zhang 普遍サブクラスと「内向き成長」界面，中大物理 香取研・脇田研合同セミナー，2016 年 12 月 6 日, 東京.

[86] T. Hiraiwa: Theory on linear viscoelasticity of a cytoskeletal network, Seminar at Max-Planck-Institute für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Dec. 9, 2016, Potsdam, Germany.

[87] 加藤愛理: 往復的に自己駆動するコロイド粒子の定常的な集団運動とそれをもたらす非対称性, 立命館大学生物物理学研究室, 2017 年 1 月 23 日, 滋賀.

＜その他＞

(講義)

[88] 佐野雅己 :「自己組織化とは何か？ -ゆらぎと秩序の法則-」，東大 エグゼクティブ・マネジメント・プログラム「東大 EMP」第 15 期，2016 年 7 月 2 日 東京大学.

[89] 佐野雅己 :「自己組織化とは何か？ -ゆらぎと秩序の法則-」，東大 エグゼクティブ・マネジメント・プログラム「東大 EMP」第 16 期，2016 年 11 月 25 日 東京大学.

[90] 佐野雅己： 電磁気学 A，1 年生 A ターム，駒場キャンパス.

(プレスリリース)

[91] 佐野雅己: ミクロ粒子を遠隔操作：最適な制御から見えてきた微生物の遊泳戦略, http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2017/5290/ .

(アウトリーチ活動)

[92] 玉井敬一，佐野雅己: 乱流の発生で見えた相転移の普遍法則, 東京大学理学部ニュース，2016 年 5 月号，p. 5.

[93] 佐野雅己: 物理学とはなんだろうか？，東京大学理学部オープンキャンパス講演会「物理学とは何だろうか」，2016 年 8 月 3 日.

[94] 平岩徹也: 生き物の物理 - 細胞の動き -，東京大学理学部オープンキャンパス講演会「物理学とは何だろうか」，2016 年 8 月 3 日.

[95] 西口大貴: ミクロな世界の泳ぎの物理 - ホタテ貝定理から鞭毛の同期現象まで -, 東京大学理学部オープンキャンパス講演会「物理学とは何だろうか」，2016 年 8 月 3 日.

[96] 谷田桜子: シンクロするメトロノーム, 東京大学理学部オープンキャンパス講演会「物理学とは何だろうか」，2016 年 8 月 3 日.

[97] 玉井敬一: カオス、そしてその先へ - 「乱雑さ」に潜む普遍法則 -, 東京大学理学部オープンキャンパス講演会「物理学とは何だろうか」，2016 年 8 月 3 日.

[98] 深井洋佑: 成長するデコボコ, 東京大学理学部オープンキャンパス講演会「物理学とは何だろうか」，2016 年 8 月 3 日.

[99] 山本尚貴: 物理で眺める右手と左手 -カイラルな現象を理解する-, 東京大学理学部オープンキャンパス講演会「物理学とは何だろうか」，2016 年 8 月 3 日.

[100] 佐野雅己 : 物理学とはなんだろうか？ -高校生に理系をすすめる 7 つの理由-（講義），東大理学部 高校生のための冬休み講座 2016，2016 年 12 月 27 日，東京大学.

6.3 山本研究室

【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 つであり、観測・理論両面から活発な研究が行われている。また、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。本研究室では、銀河系および系外銀河における星・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、このような独創的視点を軸に、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」のみを放射する。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）の本格的稼働**】
ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)A 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。2011 年 10 月から運用が始まっており、我々のグループでも以下に述べるように成果が出つつある。ALMA は既存装置よりも 2 桁高い感度と解像度を実現し、星・惑星系形成の理解を一挙に進展させつつある。

【テラヘルツ帯観測の開拓】
テラヘルツ帯は電波と赤外線との中間にあたり、観測的研究がまだ十分に進んでいない波長域である。そこには C^+, N^+ などの原子スペクトル線の他、CH, H_2D^+, HD_2^+ などの基本的分子のスペクトル線がある。それらの観測により、星・惑星系形成における物質進化の根幹を捉えることができる。世界的には 2009 年に打ち上げられた Herschel 衛星によりテラヘルツ帯観測が進められた。本研究室では、それとは相補的に、チリに設置されている ASTE 10 m 望遠鏡による高分解能観測を目指しており、2013 年度には、これまでに開発してきたテラヘルツ帯受信機を搭載して試験観測を行った。本研究室は、1998 年から 2005 年まで、富士山頂に口径 1.2 m のサブミリ波望遠鏡を設置、運用した実績がある。この経験を発展させて、テラヘルツ分子観測を進めている。

6.3.1 星形成の観測研究

原始星円盤から原始惑星系円盤への物質進化の理解は、近年急速に進みつつある。その重要な結果の一つは、低質量星近傍の分子組成が天体ごとに顕著に違うことがわかった点である。その一つの典型は、$HCOOCH_3$ などの大型飽和有機分子が原始星近傍の 100 AU 程度の領域に豊富に見られる天体で、ホットコリノ天体と呼ばれる（へびつかい座の IRAS16293-2422 など）。もう一つの典型は、炭素鎖分子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。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 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る。本研究室では、これらの点を中心に、星・惑星系形成に関する幅広い研究を展開している。

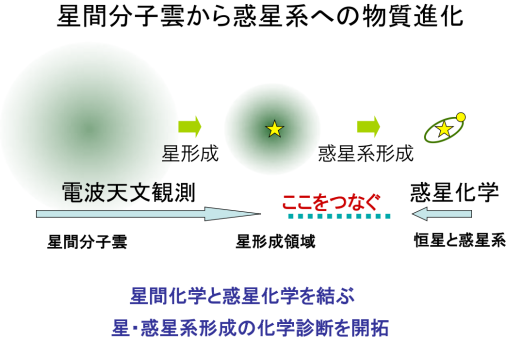

図 6.3.1: A schematic illustration of our goal

【低質量原始星 **IRAS 16293-2422**】
IRAS 16293–2422 は、へびつかい座にある Class 0 原始星の連星系 (Source A, B) であり、複雑な飽和有機分子を多く含む hot corino 天体の代表例として活発な研究対象となっている。ALMA のアーカイブデータの解析の結果、Source A において、エンベロープガスの回転落下運動が明瞭に捉えられた。その速度構造は回転しながら落下するガス円盤のモデルで再現された。Source A に比べて運動が明らかでないものの、Source B での速度構造も同様のモデルで説明された。また Source A, B どちらにおいても、分子種によって捉えられる成分が異なり、エンベロー

プからその内側の原始星円盤にかけて劇的な分子組成の変化が見られた (図 6.3.2)。特に、遠心力バリア付近に CH_3OH や $HCOOCH_3$ などの有機分子が局在していることがわかった。

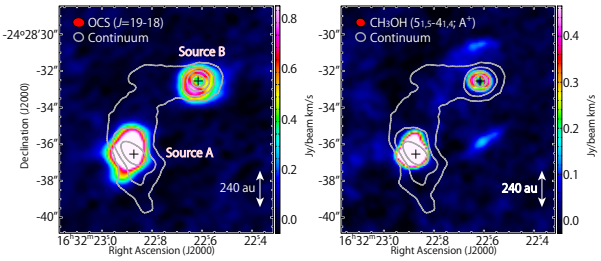

図 6.3.2: Integrated intensity maps of OCS (J=19–18; the left panel) and CH_3OH ($5_{1,5}-4_{1,4}$; A^+; the right panel). The contours represent the 1.3 mm continuum map.

【ホットコアを擁する WCCC 天体：L483】
L483 は低質量 Class 0 原始星を擁する原始星コアである。この天体の数 1000 AU スケールでの分子組成は、炭素鎖分子を豊富に含む WCCC 天体の特徴を示すことが知られている。ALMA を用いて 0.5″ (100 AU) の分解能で観測した結果、炭素鎖分子の一種である CCH や c-C_3H_2 の分布が数 100 AU スケールでも見られ、WCCC 天体の特徴が確認された。一方で、原始星近傍の数 10 AU スケールの領域には、$HCOOCH_3$ や NH_2CHO などの大型飽和有機分子が検出された。これらの分子は hot corino 天体に特有のものであることから、この天体は hot corino の性質を内部に併せ持つ WCCC 天体と言える。このような中間的な分子組成を持つ天体の存在は数 1000 AU スケールでは示唆されていたが、本研究により高分解能観測で初めて捉えられた。

【低質量星形成領域における硫黄を含む分子】
Hot corino 天体を中心とした 12 の天体に対して、硫黄原子 (S) を含む分子輝線のサーベイ観測を実施した。この結果、CS, SO, SO_2, H_2CS, OCS といった様々な S 関連分子の輝線が検出された。とくに、ペルセウス座にある Class 0 原始星 IRAS 2A、へび座にある Class 0 原始星 SMM1 などで、H_2CS や OCS などの S 関連分子が豊富であることがわかった。これまで CS や SO の輝線が多くの天体で強く検出されることが知られていたが、その他の S 関連分子の振る舞いは系統的に調べられてこなかった。これらの分子輝線を、これほど多くの天体に対して観測したのは初めてであり、星形成領域の S 関連化学過程の理解において重要な成果である。

【孤立した星形成形成領域：B335】
B335 は、孤立した星形成領域 Bok globule にある低質量 Class 0 天体として知られている。本研究では、この天体に対して、ALMA による高分解能観測 (0.5”) を行った。その結果、$HCOOCH_3$ や CH_3CHO などの多くの大型飽和有機分子を検出し、さらにその存在量を他の天体と比較したところ B335 が hot corino 天体を有することを初めて発見した。B335 ではエンベロープに明瞭な回転運動はみられないが、原始星近傍の数 10 AU 程度のコンパクトな領域に存在する大型飽和有機分子は広い速度幅をもつ。これは、これらの分子が原始星近傍まで落下運動を続けている可能性を示唆する。

【ペルセウス座分子雲における D 化物分子サーベイ】
「星なしコア」時代の時間の長短を反映すると考えられてきた重水素濃縮度 (DNC/HNC) を、ペルセウス座分子雲の Class 0/I 段階の低質量原始星 34 天体で統計的に比較した。その結果、原始星誕生後の重水素濃縮度は「星なしコア」時代の長短よりも、むしろ、原始星誕生後の進化段階を反映すると考えられている星の bolometric temperature に対し強い負の相関をもつことがわかった。また、DNC や HNC の存在量は水素分子密度が高い天体で低くなっており、これらの分子が星の進化によって、原始星近傍で破壊されている可能性が考えられる。

【原始星 L1527 における H_2CO および D_2CO】
おうし座分子雲にある原始星 L1527 に対して H_2CO および D_2CO 分子を ALMA を用いて観測した。その結果、H_2CO が原始星近傍に集中して存在するのに対し、D_2CO は高速度成分を持たず、原始星近傍には存在しないことがわかった。D_2CO は主に星間塵上で生成され気相中に蒸発すると考えられている。D_2CO が存在する領域は原始星から遠く温度が低いため、D_2CO は非熱的プロセスで蒸発していると考えられる。このように、H_2CO の重水素化物の分布を調べることで、原始星コア内部における分子生成の起源を探ることができることを示した。

【H_2CO の ^{13}C 同位体存在量比】
IRAM 30 m 望遠鏡を用い、星なしコア L1544 と原始星 L1527 に対して H_2CO の ^{13}C 同位体と ^{18}O 同位体種の観測を行い、H_2CO の ^{13}C 同位体存在量比を詳細に調べた (図 6.3.3)。その結果、どちらの天体においても、H_2CO の $^{12}C/^{13}C$ 比が元素の同位体比 (60-70) と同程度であることがわかった。H_2CO の $^{12}C/^{13}C$ 比が高ければこの分子が気相中で生成されると予想されるが、今回の結果は、H_2CO が星間塵上で CO から作られていることを示唆する。

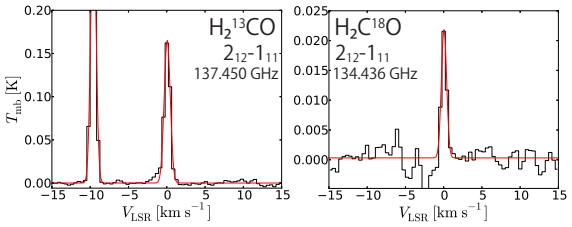

図 6.3.3: The detected spectral lines of $H_2^{13}CO$ and $H_2C^{18}O$ in L1527.

【分子雲における OH 18 cm 線の強度異常】
おうし座分子雲の HCL2 領域は北部に特徴的な直線構造を形成している。ここで OH 18 cm 線の観測を行った。この遷移は 4 本の超微細構造遷移線 (1612, 1665, 1667, 1720 MHz) に分かれており、最近我々はこの 4 本の強度からガスの温度を決定できることを示した。直線構造において、線幅の細い成分と広い成分の 2 つの速度成分が検出され、線幅の細い成分では、1720 MHz 線が吸収線として検出された。この吸収線はこれまで用いてきた LVG 計算では再現す

ることができなかったが、星間塵の遠赤外線放射を考慮することである程度再現することができた。また、計算の結果、1720 MHz の吸収線は温かい (>50 K) ガスに囲まれた高柱密度 ($> 10^{15}$ cm^{-2}) かつ低温 (< 30 K) のガスをトレースすることがわかった。これは、HCL2 領域の直線構造では分子雲形成が起きている可能性を示唆している。

【おうし座分子雲における [C I] 観測】
OH 18 cm 線の 1720 MHz 線が吸収線として検出された HCL2 領域北部の直線構造において、炭素原子の微細構造遷移線 ([C I]) の観測を行った。[C I] のスペクトルは OH 18 cm 線と同様に線幅の広い成分と細い成分の 2 成分が検出された。特に、線幅の広い速度成分のスペクトルは OH とよく似ていた。星間紫外線の影響をうける雲の密度の薄い領域では、CO の光解離によって [C I] が強くなることが知られている。このように光が当たる領域は温度も高いと考えられるため、[C I] と OH のスペクトルが似ていることは、OH が希薄で温かいガスをトレースするという、これまでの我々の研究結果と矛盾しない。

【NGC 2264 CMM3】
NGC 2264 CMM3 は太陽系近傍の若い大質量星原始星候補天体である。我々は、CMM3 に対して ALMA を用いてラインサーベイ観測を実施した。観測の結果、CMM3 には新たに 2 つの連続波ピークが検出され、連星系であることがわかった。さらに、それぞれの原始星の位置のスペクトルパターンは大きく異なることが示された (図 6.3.4)。この違いの原因としては、原始星の進化段階、質量、さらにダストの光学的厚さの違いが考えられる。

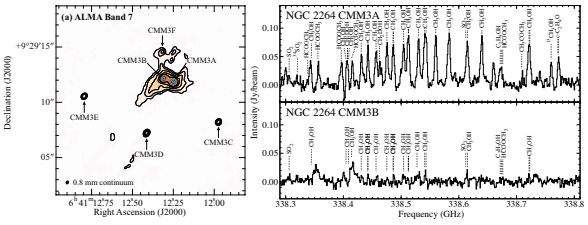

図 6.3.4: (Top) 0.8 mm continuum image of NGC 2264 CMM3 observed with ALMA. (Bottom) Spectra of CMM3A and CMM3B.

6.3.2 系外銀河の分子組成

系外銀河における分子組成は主に活動銀河核や爆発的星形成領域をもつ中心核を観測対象として、中心核活動性と分子組成の関連がこれまで議論されてきた。ALMA 時代に突入した現在、系外銀河の円盤部分に存在する通常の分子雲においても様々な分子の検出が可能になりつつある。一方で、ALMA の空間分解能であっても、多くの系外銀河では数 pc を切る空間分解能で観測することは不可能である。1 pc 程度を超える系の分子組成を議論する場合、系内の分子雲コアの観測から得られた概念をそのまま適用することはできない。そのため、活動銀河核などを伴わない通常の分子雲の大きなスケールで観測される化学組成の持つ意味と起源を明らかにすることが、系外銀河における化学組成を議論する上で求められている。このような現状を踏まえ、本研究室では以下の研究を推進している。

【M83】
近傍の棒渦巻銀河 M83 の渦状腕領域とバー領域を ALMA で観測した。観測の結果、^{13}CO, C^{18}O, CCH, HCN, HNC, HCO$^+$, CS, CH_3OH などの分子輝線を検出した。渦状腕とバーの化学組成を比較したところ、CH_3OH の水素に対する存在量がバーで高いことを見出した。バーでは渦状腕と比較して分子輝線の線幅が広いため、この違いの原因として分子雲スケールのガスダイナミクスの違いが考えられる。

【NGC6822】
低重元素量環境にある分子雲では、星間塵の量や星間輻射場の違いから、太陽系近傍とは質的に異なる化学組成が見られる。低重元素量の矮小銀河 NGC6822 に対して行った 3 mm 帯ラインサーベイ観測では、CCH, HCO$^+$, HCN, CS の輝線を検出するとともに、他の矮小銀河で見られる輝線強度パターンと比べ ^{13}CO($J = 1 - 0$) が特徴的に弱い可能性を見出した。この化学組成の背景にある物理状態を調べるため、ASTE 10 m 望遠鏡で ^{12}CO($J = 3 - 2$), ^{13}CO($J = 3 - 2$) を、野辺山 45 m 望遠鏡で $H_2CO(1_{01} - 0_{00})$ を観測した。^{13}CO($J = 1 - 0$) の輝線強度の異常は、^{13}CO の分布が ^{12}CO とは異なることに起因する可能性があり、今後さらに調査したい。

【W51】
銀河系内の分子雲スケールの化学組成を調べるために、W51 を Mopra 望遠鏡を用いてマッピング観測 (40 pc × 50 pc) を行なった。観測領域全体を平均したスペクトルには、W51 内のホットコアに見られる高励起輝線や複雑な有機分子は見られない。一方で、M51 の渦状腕のスペクトルは W51 の平均したスペクトルと良く似ている。これは、系外銀河で観測されるスペクトルは、分子雲全体に広がった成分の寄与が卓越していると考えられる。

【W3(OH)】
銀河系内の巨大分子雲 W3(OH) をターゲットに、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて 9.0 pc×9.0 pc の広域マッピングラインサーベイ観測を行った。9.0 pc 四方で空間平均したスペクトルでは、ホットコアのスペクトルと比べ、コアとその近傍に存在する分子種 (HC_3N, CH_3CCH など) の輝線強度が相対的に弱くなる一方、希薄ではあるものの分子雲全体に渡って存在する分子種 (CCH) の相対強度が強くなるという特徴が見られた。このことは、分子雲スケール (∼ 10 pc) の観測では空間的に広がったガス成分がスペクトルに強く反映されることを示唆している。また、系外銀河で観測されるスペクトルも大局的にはこの空間平均スペクトルと類似しており、系外銀河のスペクトルでも空間的に広がったガス成分の寄与が大きいと考えられる。

6.3.3 テラヘルツ帯観測技術の開拓

テラヘルツ帯における観測を行うためには、そこで動作する低雑音の周波数混合器（ヘテロダインミ

クサ）の開発が不可欠である。そのための最も有力はデバイスが超伝導ホットエレクトロン・ボロメータ（HEB）ミクサ素子である。HEB ミクサ素子は電磁波吸収による超伝導状態の破壊を利用し、受信信号と局部発振信号の「うなり」〈中間周波信号〉に伴う電力変化をバイアス電流の変化として検知するものである。そのためには、超伝導体をサブミクロンサイズにすること、そして、素子内に生じた熱電子を「うなり」の周期よりも早く冷却し、超伝導状態を回復させる必要がある。この冷却メカニズムには、(1) 熱電子の拡散によって電極に逃がす方法（拡散冷却）と、(2) フォノンとの相互作用を介して基板に逃がす方法（格子冷却）がある。本研究室では、主に NbTiN や NbN を用いた「格子冷却型」HEB ミクサ素子の開発研究を進めている。

【1.9 THz HEB ミクサの開発】

惑星・地球大気のテラヘルツセンシングを見据え、ホーン/導波路型の 1.9THz 超伝導 NbTiN-HEB ミクサ素子を開発した。水晶基板に集積した素子は、厚み 18 μ m まで研磨した後、ダイシング装置を用いて幅 36 μ m に細断した。このチップ化後も、素子は設計通り、良好な非線形 IV 特性を保持することを確認した。研磨の厚みの制御とダイシング時の歩留り向上が今後の課題である。本研究は大阪府立大学の前澤裕之准教授との共同研究である。

【THz 帯実験室分子分光計の開発】

本研究室で開発した THz 受信機を応用した分子分光実験を行うための実験室分子分光システムの開発を理化学研究所で開始している。これは、長さ 2m のガラスセルに低圧で充填した試料気体分子からの放射を受信機で観測することで、回転スペクトル線の静止周波数を精度よく測定し、天文観測データの解析における分子種の同定や速度構造の議論に供することを目的としている。現在、実験装置全体の組み立てが完了し、最初の測定を開始する直前の段階である。

＜報文＞

(原著論文)

[1] López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Sakai, N., Furuya, R., Saruwatari, O., & Yamamoto, S., “The Role of SiO As a Tracer of Past Star Formation Events: The Case of the High-Mass Protocluster NGC2264-C”, Astrophysical Journal, 822, 85 (2016)

[2] Oya, Y., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Favre, C., & Yamamoto, S., “Infalling-Rotating Motion and Associated Chemical Change in the Envelope of IRAS 16293-2422 Source A Studied with ALMA”, ApJ, 824, 88 (2016)

[3] Nishimura, Y., Shimonishi, T., Watanabe, Y., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., & Yamamoto, S., “Spectral Line Survey toward a Molecular Cloud in IC10”, ApJ, 829, 94 (2016).

[4] Imai, M., Sakai, N., Oya, Y., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., Sakai, T., Hirota, T., & Yamamoto, S., “Discovery of a Hot Corino in the Bok Globule B335”, ApJL, 830, L37 (2016)

[5] Sakai, N., Oya, Y., Higuchi, A.E., Aikawa, Y., Hanawa, T., Ceccarelli, C., Lefloch, B., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Sakai, T., Hirota, T., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., & Yamamoto, S., “Vertical Structure of the Transition Zone from Infalling Rotating Envelope to Disc in the Class 0 Protostar, IRAS 04368+2557”, MNRAS, 467, L76-L80 (2017)

[6] Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Higuchi, A.E., Hirota, T., López-Sepulcre, A., Sakai, T., Aikawa, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., & Yamamoto, S., “L483: Warm Carbon-chain Chemistry Source Harboring Hot Corino Activity”, ApJ, 837, 174 (2017)

(学位論文)

[7] 西村優里、“Effect of Low-Metallicity on Molecular-Cloud Chemical Composition: the Case of Local Dwarf Galaxies”（博士論文）

[8] 今井宗明、「低質量原始星天体の化学的多様性を生み出す環境要因の探究」(修士論文)

(著書)

[9] Yamamoto, S., “Introduction to Astrochemistry”, Springer, 2017

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[10] Oya, Y., “Infalling-Rotating Envelopes and Disks around Low-Mass Protostars”, The Early Phase of Star Formation 2016, Ringberg Castle, 2016 年 6 月 26 日–7 月 1 日（口頭）

[11] Yoshida, K., Sakai, N., Watanabe, Y., Lefloch, B., Ceccarelli, C., & Yamamoto, S., “Molecular isotopic ratios in the low-mass protostar L1527” Fractionation of isotopes in space: from the solar system to galaxies, Arcetri Astrophysical Observatory, 2016 年 10 月 10 日–10 月 13 日 （口頭）.

[12] Ebisawa, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Menten, K., & Yamamoto, S., ”Exploring Molecular-Cloud formation with OH 18 cm transition”, The Hydride Toolbox 2016, UPMC, Pari, 2016 年 12 月 12-15 日

【Star Formation in Different Environments 2016, Quy Nhon, Viet-nam, 2016 年 7 月 25-29 日】

[13] Ebisawa, Y., Sakai, N., Menten, K., & Yamamoto, S., “Exploring Molecular-Cloud formation with OH 18 cm transition”,

[14] Nishimura, Y., Shimonishi, T., Watanabe, Y., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., & Yamamoto, S., “Spectral Line Survey toward Molecular Clouds in the Large Magellanic Cloud”（口頭）,

【Half a Decade of ALMA: Cosmic Dawns Transformed, Renaissance Indian Wells Resort & Spa Indian Wells, CA, USA, 2016 年 9 月 20 日–23 日】

[15] Nishimura, Y., Shimonishi, T., Watanabe, Y., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., & Yamamoto, S., "Chemical Composition in Low-Metallicity Dwarfs: Spectral Line Survey Observations toward the Large Magellanic Cloud and IC10"（口頭）

[16] Watanabe, Y., Nishimura, Y., Sakai, N., Sorai, K., Harada, N., & Yamamoto, S., "CH_3OH Enhancement in the Bar of M83 Observed with ALMA",

【Workshop on Interstellar Matter 2016, Sapporo, Japan, 2016 年 10 月 19 日–21 日】

[17] Ebisawa, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Menten, K., & Yamamoto, S., "Exploring Molecular-Cloud formation with OH 18 cm transition"

[18] Chiba, Y., Sakai, N., Ebisawa, Y., Yoshida, K., Sakai, T., Watanabe, Y., & Yamamoto, S. "A new terahertz emission spectrometer at RIKEN"

[19] Nishimura, Y. , Watanabe, Y., Harada, N., Shimonishi, T., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., & Yamamoto, S., "Molecular-Cloud-Scale Chemical Composition: Mapping Spectral Line Survey toward W3(OH)"

[20] Yoshida, K., Tokudome, T., Sakai, N., Watanabe, Y., Takano, S., & Yamamoto, S., "Spectral Line Survey Observation toward Low-mass Star-forming Region L1527 with Nobeyama 45-m Telescope"

[21] Watanabe, Y., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Sakai, T., Hirota, T., Liu, S.-Y., Su, Y.-N., & Yamamoto, S., "Spectral Line Survey toward NGC 2264 CMM3 with ALMA"

[22] Oya, Y., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Favre, C., & Yamamoto, S., "Infalling-Rotaing Motion and Associated Chemical Change in the Envelope of IRAS 16293-2422 Source A Studied with ALMA"

[23] Imai,M., Sakai, N., Oya, Y., López-Sepulcre, A.,Watanabe, Y., & Yamamoto, S., "Discovery of a Hot Corino in the Bok Globule B335"

【IAU Symposium 332 Astrochemistry VII, Puerto Varas, 2017 年 3 月 20 日–24 日】

[24] Oya,Y., "Chemical Change in the Disk Forming Region of IRAS 16293–2422 Studied with ALMA", T8（口頭）

[25] Ebisawa,Y., Watanabe, Y., Sakai, N., Menten, K., & Yamamoto, S., "OH 18 cm Transition as a Thermometer of Molecular Cloud", P27

[26] Imai, M., Sakai, N., Oya, Y., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., Sakai, T., Hirota, T., & Yamamoto, S., "Discovery of a Hot Corino in the Bok Globule B335", P44

[27] Watanabe,Y., Nishimura,Y., Sakai, N., Sorai,K., Harada, N., & Yamamoto, S., "Molecular-Cloud-Scale Chemical Compositions in W51", P101

[28] Yoshida, K., Sakai, N., Watanabe, Y., López-Sepulcre A., Lefloch, B., Takano, S., & Yamamoto, S., "The molecular isotopic ratios in the low-mass protostar L1527", P105

招待講演

[29] Yamamoto, S., "Chemical Tracers of Dynamics in Low-Mass Protostellar Objects", IAU Symposium 332 Astrochemistry VII, Puerto Varas, 2017 年 3 月 20 日–24 日

(国内会議)

一般講演

【天文学会 2016 年秋季年会、愛媛大学、2016 年 9 月 14-16 日】

[30] 海老澤勇治、前澤裕之、坂井南美、Karl Menten、山本智、「OH 18 cm 線の吸収線で探る HCL2 領域における構造形成 (2)」、P103a

[31] 渡邉祥正、坂井南美、酒井剛、廣田朋也、山本智、「NGC 2264 CMM3 における ALMA を用いた高空間分解能観測」、P111a

[32] 今井宗明、坂井南美、Ana López-Seplucre、大屋瑶子、渡辺祥正、山本智、「ALMA による低質量原始星天体 B335 の化学組成の研究 2」、P117a

[33] 吉田健人、坂井南美、渡邉祥正、山本智、「星形成領域 L1527 における H_2CO の重水素化物の観測」、P118a

[34] 大屋瑶子、渡邉祥正、山本智、坂井南美、Ana López-Sepulcre、Cecilia Ceccarelli、Bertrand Lefloch、「Class 0 原始星コア L483 の円盤形成領域における複雑な有機分子の検出」、P119a

[35] 大屋瑶子、大西崇介、森脇可奈、渡邉祥正、山本智、坂井南美、「Class 0 原始星天体 IRAS 16293–2422 Source B の回転構造の解析」、P120c

【天文学会 2017 年春季年会、九州大学、2017 年 3 月 15–18 日】

[36] 西村優里、渡邉祥正、原田ななせ、下西隆、坂井南美、相川祐理、 河村晶子、山本智、「W3(OH) 領域の巨大分子雲スケールの化学組成」、Q02a

[37] 千葉雄太郎、坂井南美、海老澤勇治、吉田健人、酒井剛、渡辺祥正、山本智、「テラヘルツ帯実験室分子分光計の開発」、V109b

招待講演

[38] 大屋瑶子、「IRAS 16293–2422A のエンベロープ/ディスクシステム」、新学術領域「宇宙分子進化」全体集会、北海道大学、2016 年 7 月 11 日–12 日

[39] 渡邉祥正、西村優里、山本智、「Chemical Composition and Chemical Age of Giant Molecular Cloud」、近傍銀河の分子ガスの大規模撮像観測が拓く星間物質と星生成の研究に関する新展開, 国立天文台, 2016 年 11 月 17 日–18 日

6.4 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。特に項目 6.4.1 の研究内容の経緯は、昨年度と重複するが、研究の進展を概観するためのものであり、ご容赦いただきたい。

6.4.1 レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展

本研究室では、レーザー光を用いた気体分子の配向制御技術の開発と配列あるいは配向した分子試料を用いた応用実験を進めている。分子の向きが揃った試料を用いることが出来れば、従来、空間平均を取って議論しなければならなかった多くの実験を格段に明瞭な形で行うことが出来る。そればかりでなく、化学反応における配置効果を直接的に調べることができるのを始めとし、物理現象における分子軸や分子面とレーザー光の偏光方向との相関や分子軌道の対称性や非対称性の効果を直接調べることができるなど、全く新しい実験手法を提供できる。実際、配列した分子試料の有効性は、I_2 分子中の多光子イオン化過程を、時間依存偏光パルスを用いて最適制御することに成功したり (T. Suzuki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 133005 (2004))、配列した分子中からの高次高調波発生実験において、電子のド・ブロイ波の打ち消しあいの干渉効果を観測することに成功したり (T. Kanai *et al.*, Nature (London) **435**, 470 (2005)) するなどの、本研究室の成果でも実証されている。

分子の配向制御については、静電場とレーザー電場の併用により、先に 1 次元的および 3 次元的な分子の配向が可能であることの原理実証実験に成功した。これらの実験は、分子の回転周期に比べてレーザー光のパルス幅が十分長い、いわゆる断熱領域で行われたものである。この場合、分子の配向度は、レーザー強度に追随して高くなり、レーザー強度が最大のときに配向度も最大となる。一方、光電子の観測や高精度の分光実験では、高強度レーザー電場が存在しない状況で試料分子の配向を実現することが望まれる。本研究室では、静電場とレーザー電場の併用による手法が断熱領域で有効なことに着目し、分子の回転周期 $T_{\rm rot}$ に比べて立ち上がりのゆっくりしたパルスをピーク強度付近で急峻に遮断することにより、断熱領域での配向度と同等の配向度を高強度レーザー電場が存在しない状況下で実現する全く新しい手法を提案した (Y. Sugawara *et al.*, Phys. Rev. A **77**, 031403(R) (2008))。この手法を実現すべく、ピーク強度付近で急峻に遮断されるパルスをプラズマシャッターと呼ばれる手法を用いて整形する技術を開発し、レーザー電場の存在しない条件下で分子配向を実現することに初めて成功した (A. Goban *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 013001 (2008))。

一方、本研究室では先に、分子の回転周期よりも十分長いパルス幅をもつ高強度非共鳴 2 波長レーザー電場を用いて断熱的に分子配向を実現する手法を提案していた (T. Kanai and H. Sakai, J. Chem. Phys. **115**, 5492 (2001))。この手法では、使用するレーザーの周波数がパルス幅の逆数よりも十分大きな場合には、分子の永久双極子モーメントとレーザー電場との相互作用はパルス幅にわたって平均するとゼロとなる。したがって、分子の配向に寄与するのは分子の超分極率の異方性とレーザー電場の 3 乗の積に比例する相互作用、すなわち、それによって形成されるポテンシャルの非対称性である点に注意する必要がある。

この手法に基づいて、2 波長レーザー電場を用いて OCS 分子を配向制御することにも初めて成功した (K. Oda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 213901 (2010))。さらに、C_6H_5I 分子を用い、本手法の汎用性の実証も行った。一方、Even-Lavie valve を用いても、OCS や C_6H_5I 分子の配向度は、0.01 のオーダーであり、劇的な配向度の増大を図ることは困難であることが明らかになった。この困難は、回転量子状態が Boltzmann 分布している thermal ensemble では、いわゆる right way に向く状態と wrong way に向く状態が混在していることに起因している。本研究室では、配向した分子試料を用いた「分子内電子の立体ダイナミクス (electronic stereodynamics in molecules)」に関する研究の推進を目指しており、配向度の高い分子試料の生成が不可欠である。そこで、初期回転量子状態を選別した試料に対し、静電場とレーザー電場を併用する手法や非共鳴 2 波長レーザー電場を用いる手法により高い配向度の実現を目指すこととした。そして、主として対称コマ分子の状態選別に適した六極集束器 (hexapole focuser) と主として非対称コマ分子の状態選別に適した分子偏向器 (molecular deflector) を組み込んだ実験装置の立ち上げを行った。今後は、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」研究の確立を目指す。

既に、初期回転量子状態を選別した非対称コマ分子 (C_6H_5I) を試料とし、静電場とレーザー電場を併用する手法を用いて世界最高水準の高い配向度を達成することに成功した。さらに、プラズマシャッター

技術を導入し、初期回転量子状態を選別した分子のレーザー電場のない条件下での 1 次元的配向制御に世界で初めて成功した (J. H. Mun *et al.*, Phys. Rev. A **89**, 051402(R) (2014))。プラズマシャッターで整形したナノ秒パルスの立ち下がりは、約 150 fs であった。分子が配列・配向している様子は、フェムト秒プローブパルスで生成された多価イオンからクーロン爆裂で生成されたフラグメントイオンを 2 次元イオン画像化法で観測した。配列度を $\langle\cos^2\theta_{2D}\rangle$ (θ_{2D} はレーザー光の偏光方向と分子軸 (ここでは C-I 軸) のなす角 θ の 2 次元検出器面への射影) で評価すると、レーザー電場を遮断後に、5–10 ps 程度高い配列度を維持できることが明らかとなった。一方、観測されるフラグメントイオンのうち、検出器面の上側に観測されるものの割合 $N_{\rm up}/N_{\rm total}$ を配向度の指標とした場合には、レーザー電場を遮断後に、20 ps 程度高い配向度を維持できることが明らかとなった。配列度 $\langle\cos^2\theta_{2D}\rangle$ の dephasing 時間と総合すると実質的に高い配向度を維持できるのは 5–10 ps と考えるのが妥当である。この 5–10 ps という時間スケールは、フェムト秒レーザーパルスを用いた分子内電子の立体ダイナミクス研究への応用を考慮すると十分に長い時間スケールと言える。

さらに、静電場と楕円偏光したレーザー電場の併用により、レーザー電場の遮断直後にレーザー電場の存在しない条件下での 3 次元的な配向制御の実現に世界で初めて成功した (D. Takei *et al.*, Phys. Rev. A **94**, 013401 (2016))。実験試料として分子偏向器で初期回転量子状態を選別した 3,4-ジブロモチオフェン分子 ($C_4H_2Br_2S$) を用いた。楕円偏光を用いると Br^+ フラグメントの角度分布が楕円偏光面によく沿う様子を観測でき、フラグメントイオンの上下の非対称性と併せて 3 次元配向が実現している様子を確認することができた。先の 3 次元配向制御の原理実証実験のときに、2 次元イオン画像の観測により 3 次元配列の確認をし、TOF スペクトルの forward イオンと backward イオンの非対称性の観測により分子が配向していることを確認し、両者の組み合わせにより 3 次元配向の証拠としたのに対し、今回は配向度が十分高いため、2 次元イオン画像だけで 3 次元配向制御の様子を直接的に観測することができた。この 3 次元配向制御の直接的観測自体も世界初の成果である。さらに、プラズマシャッター技術でナノ秒パルスを急峻に遮断すると、1 次元配向制御に用いたヨードベンゼン分子のときの dephasing ダイナミクスよりは若干速いものの、~5 ps 程度は十分高い配向度を維持できることを確認した。また、ナノ秒パルス内で、プラズマシャッターを掛けるタイミングを変えると、パルスの遮断後の dephasing ダイナミクスが異なることを確認することができた。特にナノ秒パルスのピーク強度の前後の瞬時強度がほぼ等しいタイミングでパルスを遮断した後の dephasing ダイナミクスが異なることは、1 次元配向制御に用いたヨードベンゼン分子のときと同様に、3,4-ジブロモチオフェン分子に対しても、ナノ秒パルスの立ち上がり時間 8 ns が分子とレーザー電場の純粋に断熱的な相互作用を保証するほど十分に長くはないことを示唆している。

その後、上述したナノ秒非共鳴 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。直線偏光した 2 波長レーザー電場の偏光方向を平行にすれば 1 次元的な配向制御が可能であり、偏光方向を交差させることにより 3 次元的な配向制御が可能である。さらに、2 波長レーザーパルスにプラズマシャッター技術を適用すれば、静電場も存在しない完全にフィールドフリーな条件下での配向制御が可能となる。2 波長レーザー電場を用いた全光学的な配向制御の実験は、静電場とレーザー電場を併用する手法と比べると、光学系の構成は複雑となる。2 波長レーザー電場としては、ナノ秒 Nd:YAG レーザーの基本波 (波長 $\lambda = 1064$ nm) とその第 2 高調波 ($\lambda = 532$ nm) を使用する。2 波長レーザーパルスとプローブパルスの空間的重なりをよくするための調整などを地道に行った結果、当初の目標であった配向度 $\langle\cos\theta\rangle > 0.1$ を達成できる目処をつけることに成功した。一方、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根本原因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生かすことができないためである。この困難を克服し、理想的な条件で全光学的な配向制御法を開発するために、干渉計型の光路を導入して 2 波長間の立ち上がりのタイミングを合わせることにした。

本年度は、実際に干渉計型の光路を導入し、まず 2 波長パルスのアライメントを進めた。干渉計型の光路の導入により、一般に 2 波長間の相対位相が揺らぐことは避けられない。そこで、BBO 結晶を用いて Nd:YAG レーザーの基本波の第 2 高調波を発生させ、元から発生している第 2 高調波との干渉信号を観測し、PID 制御の手法を用いて安定化する技術の開発を進めた。その結果、2 波長間の相対位相を長時間にわたって一定に保つことは現実的には困難なため、干渉信号の計測結果を保存して分子配向度の観測後に相対位相が一定範囲に保たれているデータを採用する事後解析で対応することにした。また、PID 制御による 2 波長間の相対位相の安定化は、相対位相を制御するための溶融石英板の微小回転で行うことにした。2 波長間の相対位相を干渉信号で検出するとき、ビームスプリッターを用いてポンプ光の一部を利用して行うのは困難であり、より高いパルスエネルギーが必要である。このため、試料分子と相互作用して真空チェンバーから抜けて来たポンプ光をそのまま 2 波長間の相対位相の観測に利用できるようにさらに光学系を修正した。クーロン爆裂の手法を用いて分子配向度を測定する場合、プローブ光で試料分子がイオン化した領域を通過したポンプ光の相対位相をきちんと測定できるかどうかは自明ではない。試料分子がイオン化した領域を通過したポンプ光の相対位相をきちんと測定できない場合には、

分子配向度を測定する時間帯とシャッターでプローブ光を遮断して、ポンプ光の相対位相の確認と PID 制御による安定化を行う時間帯を交互的に設ける方法を採用する。

6.4.2 面配列したベンゼン分子中から発生する高次高調波

フェムト秒高強度レーザーパルスを気相の原子や分子に集光照射することにより発生する高次高調波は、極端紫外線–軟X線領域の (波長可変) コヒーレント光源としての有用性から過去 30 年近くにわたり精力的な研究が行われている。近年では、アト秒パルス発生とその応用や配列・配向した分子中から発生する高次高調波の観測に基づく分子イメージングへの応用が注目されている。本研究ではベンゼンに代表される回転対称性のよい分子を面配列した分子集団を試料とし、円偏光パルスの照射により発生すると期待される高次高調波を実験的に初めて観測し、その発生特性を詳細に調べることにより、基礎物理過程を解明するとともに、分子構造とその超高速ダイナミクスに関する知見を得ることを目的に研究を進めている。

一般に、円偏光パルスを基本波とする場合、光の角運動量保存則により高調波の発生は禁制となる。しかし、第一原理計算に基づく理論研究 (E. Alon *et al.*, Phys. Rev. Lett. **80**, 3743 (1998)、及び、R. Baer *et al.*, Phys. Rev. A **68**, 043406 (2003)) は、面配列した N 回対称性をもつ分子に円偏光パルスを照射すると $(nN \pm 1)$ 次の高調波が選択的に発生することを予言している。したがって、6 回対称性をもつベンゼン分子の場合、5 次と 7 次、11 次と 13 次、... が選択的に発生すると期待される。この様な対称性の物理は基礎物理学的観点からも極めて興味深い。さらに、最近発表された核のダイナミクスの効果を取り入れた理論計算 (A. Wardlow and D. Dundas, Phys. Rev. A **93**, 023428 (2016)) は、上記の選択則がより強く表れることを示しており、実験での検証を目指す立場からは心強い。

さて、ベンゼンは室温で液体であり、ヘリウムをキャリアガスとして蒸気圧で決まる密度で高次高調波発生のための媒質として使用することは本研究室でも初めての経験であり、まずそのための技術開発を行った。パルス分子線バルブとして使用する Even-Lavie バルブに用意されているサンプルホルダーの容量は非常に小さく、先に行った予備実験で、数時間でベンゼンが枯渇してしまうことが明らかになっていた。そこで、Even-Lavie バルブのノズルを下向きにして縦方向に高調波発生用チェンバーに設置し、その上部にベンゼン用のリザーバーを設置した。室温で液体のベンゼンが直接ノズルに落下しない様にガラス繊維フィルターを入れ、それにベンゼンを染み込ませて使用する。ガラス繊維フィルターの挿入量や挿入位置、また、リザーバーや Even-Lavie バルブをヒーターで加熱する必要性の有無などについて、度重なる試行錯誤を経て安定に高調波を発生させ、定量的なデータを取得するためのノウハウを確立した。ただし、ベンゼンを試料として一定期間 (2 週間程度) 実験を続けると Even-Lavie バルブ内に白色結晶 (ビフェニルと考えられる) が析出し、ベンゼン分子の適切な供給が妨げられる現象が見られた。この現象は同条件でベンゼンを供給しているにもかかわらず、実際にはベンゼンが適切に供給されていないため、真空チェンバー内の真空度がよくなり高調波信号が著しく弱くなることで判断できる。この様な現象が見られた場合には、Even-Lavie バルブ内のクリーニングが必要となる。

一方、ベンゼン分子を面配列させるためには、ナノ秒 Nd:YAG レーザーの基本波を使用する。高調波発生用のフェムト秒 Ti:sapphire パルスと YAG パルスの空間的な重なりは、同時照射で発生する和周波と差周波を観測することで確認できる。この様なフェムト秒 Ti:sapphire パルスと YAG パルスを始めとする主として長波長パルスを併用した際の和周波と差周波の発生特性は本研究室で研究済みである (Y. Nomura *et al.*, Phys. Rev. A, **75**, 041801(R) (2007), Y. Oguchi *et al.*, Phys. Rev. A **80**, 021804(R) (2009), Y. Oguchi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 014301 (2011))。既にフェムト秒 Ti:sapphire パルスのみを使用した場合の高調波の楕円率依存性は取得できており、今後ナノ秒 Nd:YAG レーザーパルスを併用し、ベンゼン分子を面配列させて高調波の楕円率依存性を測定するなど理論計算の予言の検証を目指す。

6.4.3 フェムト秒 EUV 自由電子レーザーパルスと近赤外パルスによる 2 色超閾イオン化過程の観測

近年、高強度電子線源と加速器関連技術の進歩を背景としてX線自由電子レーザーの開発とその応用研究が世界的に注目されている。日本では、理化学研究所のX線自由電子レーザー施設 SACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) が 2011 年 6 月 7 日 16 時 10 分に 1.2 Å のX線レーザーの発振に成功し、現在では X 線レーザーパルスを利用した様々な応用研究に供されている。本研究室では、高エネルギー加速器研究機構の柳下明名誉教授らのグループと協力してフェムト秒X線自由電子レーザーパルスを用いた配列した分子中からの光電子回折像の観測に基づく「超高速光電子回折法」の開発を進めている。この手法は、X線自由電子レーザーパルスの照射により分子を構成する原子の内殻から生成された光電子の波と、その一部が同一分子内の近傍の原子で弾性散乱した波の干渉効果を光電子回折像として観測し、理論モデルとの比較により核間距離や 3 原子分子の場合には屈曲角をも決定するものである (M. Kazama *et al.*, Phys. Rev. A **87**, 063417 (2013))。特に気体分子の構造決定を目的とする場合には、本研究室が世界をリードする気体分子の配列・配向制御技術が不可欠となる。

これまでに、ナノ秒 Nd:YAG レーザーの基本波パルスで配列した I_2 分子を試料とし、光子エネルギー 4.7 keV のX線自由電子レーザーパルスの照射

により生成される運動エネルギー ∼140 eV をもつ I 2p 光電子の回折像を観測した。この「超高速光電子回折法」の原理実証実験 (K. Nakajima *et al.*, Sci. Rep. **5**, 14065 (2015)) を踏まえ、I_2 分子の配列度を $\langle\cos^2\theta\rangle = 0.734$ まで高めることにより顕著な光電子回折像を得ることに成功した。理論計算と比較した結果、I_2 分子配列用のナノ秒 Nd:YAG レーザー電場中 (6×10^{11} W/cm^2) で、I_2 分子の核間距離は、平衡核間距離 (2.666 Å) よりもアンサンブル平均で 0.18–0.30 Å 伸長していることを初めて明らかにした (S. Minemoto *et al.*, Sci. Rep. **6**, 38654 (2016))。

光子エネルギーが数 keV の X 線領域では光電子生成の断面積が極めて小さく、精度よく光電子回折像を得るためには長時間の測定が不可欠である。一方、SACLA では、本年度から数 10 から 100 eV 程度の光子エネルギーで自由電子レーザーパルスの提供を始めた。この極端紫外 (EUV) 領域ではイオン化断面積が X 線領域に比べて 100–1000 倍ほども大きく、短時間で精度よく光電子回折像を測定できると考えられる。本年度は、この EUV-FEL パルスを使い、まず超短パルス Ti:sapphire パルスとの同期実験を行った。Ar や Xe などの原子を試料として用い、生成する光電子の速度分布のイメージを観測したところ、FEL と Ti:sapphire パルスが時間的に重なったときに、それぞれのパルスの光子が同時に関与するイオン化過程 (超閾イオン化過程) に相当するピークの観測に成功した。また、超閾イオン化に関与する Ti:sapphire パルスの光子の数ごとに角度分布にも変化が現れており、現在、理論計算との比較検討を進めている。

なお、本研究は、高エネルギー加速器研究機構の柳下明名誉教授を始めとし、島田紘行氏 (実験時: 東京農工大学、現在: 高エネルギー加速器研究機構)、水野智也氏 (東京大学物性研究所)、間嶋拓也氏 (京都大学)、吉田慎太郎氏 (京都大学) との共同研究である。

6.4.4 その他

ここで報告した研究成果は、研究室のメンバー全員と学部 4 年生の特別実験で本研究室に配属された小松和真君、田口勉君 (Sセメスター)、及び、高野哲君、三宅聡一朗君 (Aセメスター) の活躍によるものである。また、今年度は、平成 28 年 6 月 10 日–7 月 21 日の 6 週間にわたり、UTRIP (University of Tokyo Research Internship Program) 生として、Ms. Holly Herbert (Trinity College Dublin, Dublin, Ireland) と Mr. Niccolò Bigagli (Bates College, Lewiston, ME, USA) の 2 名を受け入れた。

なお、今年度の研究活動のうち項目 6.4.1 と 6.4.2 は、科学研究費補助金の基盤研究 (A)「配向した分子中から発生する高次高調波の物理過程の解明」(課題番号 26247065、研究代表者：酒井広文) に加え、文部科学省「光・量子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発　最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」、「最先端研究基盤事業　コヒーレント光科学研究基盤の整備」、及び、理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構の特定事業費からの支援も受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Daisuke Takei, Je Hoi Mun, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Laser-field-free three-dimensional molecular orientation," Phys. Rev. A **94**, 013401 (2016).

[2] Shinichirou Minemoto, Takahiro Teramoto, Hiroshi Akagi, Takashi Fujikawa, Takuya Majima, Kyo Nakajima, Kaori Niki, Shigeki Owada, Hirofumi Sakai, Tadashi Togashi, Kensuke Tono, Shota Tsuru, Ken Wada, Makina Yabashi, Shintaro Yoshida, and Akira Yagishita, "Structure determination of molecules in an alignment laser field by femtosecond photoelectron diffraction using an X-ray free-electron laser," Sci. Rep. **6**, 38654; doi: 10.1038/srep38654 (2016).

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[3] Hirofumi Sakai, "Orientation dependence in multi-channel dissociative ionization of carbonyl sulfide (OCS) molecules," EMN Meeting on Ultrafast 2016, Melbourne, Australia, October 11, 2016.

[4] Shinichirou Minemoto, "Photoelectron diffraction from laser-aligned molecules using an x-ray free-electron laser," to present at the 2017 ICPEAC satellite: (e,2e), Double Photo-ionization & Related Topics and Polarization and Correlation in Electronic & Atomic Collisions, Palm Cove, Australia, August 2–4, 2017.

一般講演

[5] S. Minemoto, T. Teramoto, H. Akagi, T. Fujikawa, T. Majima, K. Nakajima, K. Ogawa, H. Sakai, T. Togashi, K. Tono, S. Tsuru, S. Yoshida, K. Wada, M. Yabashi, and A. Yagishita, "Femtosecond structure determination of molecules in an alignment laser by photoelectron diffraction with an XFEL," The 16th International Conference on X-Ray Lasers, Nara, Japan, May 24, 2016.

[6] S. Minemoto, T. Teramoto, H. Akagi, T. Fujikawa, T. Majima, K. Nakajima, K. Ogawa, H. Sakai, T. Togashi, K. Tono, S. Tsuru, S. Yoshida, K. Wada, M. Yabashi, and A. Yagishita, "Femtosecond structure determination of aligned molecules in an intense laser field studied by X-ray photoelectron diffraction with an XFEL," 39th International Conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics, Zürich, Switzerland, July 5, 2016.

[7] Shinichirou Minemoto, Wataru Komatsubara, and Hirofumi Sakai, “Verification of nonadiabatic orientation of CO molecules with a femtosecond two-color laser pulse studied by high-order harmonic generation and Coulomb explosion imaging,” International Conference on Ultrafast Phenomena 2016, Santa Fe, New Mexico, USA, July 21, 2016.

[8] Shinichirou Minemoto, Hiroyuki Shimada, Kazuma Komatsu, Wataru Komatsubara, Takuya Majima, Soichiro Miyake, Tomoya Mizuno, Satoru Takano, Hirofumi Sakai, Shintaro Yoshida, and Akira Yagishita, “Electron spectra in short-pulse two-color (EUV+NIR) photoionization of atoms and molecules,” to present at 33rd Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Nagoya, Japan, June 7–9, 2017.

[9] Wataru Komatsubara, Shinichirou Minemoto, Kazuma Komatsu, Soichiro Miyake, Satoru Takano, Tsutomu Taguchi, and Hirofumi Sakai, “High-order harmonic generation from benzene molecules,” to present at 33rd Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Nagoya, Japan, June 7–9, 2017.

[10] Md. Maruf Hossain, Xiang Zhang, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “All-optical molecular orientation of state-selected OCS molecules,” to present at 33rd Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Nagoya, Japan, June 7–9, 2017.

(国内会議)

招待講演

[11] 峰本紳一郎、「SACLA を用いた光電子回折による配向分子の構造可視化 : 超高速化学反応の時間発展可視化に向けて」、第 3 回放射光連携ワークショップ、ステーションカンファレンス東京、2017 年 1 月 31 日.

一般講演

[12] 峰本紳一郎、小松原航、酒井広文、「フェムト秒 2 波長レーザーパルスで励起された CO 分子の回転波束からの偶数次高調波の発生機序」、日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学角間キャンパス (石川県金沢市角間町)、2016 年 9 月 15 日 (木).

6.5 五神-湯本-井手口研究室

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、反強磁性体といった幅広い物質系を対象として、光によっ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気体の温度を下げることに成功した。この領域で、BEC の直接的観測法を開発した。一方、従来の光物性研究の手法では捉えることが困難な、光励起された固体の電子励起状態を直接かつ精緻に観測するため、狭線幅レーザーを光源とする角度分解レーザー光電子分光法の開発を進めている。また、微細加工技術を駆使して物質系の対称性を制御し、新たな光をコントロールする手法を開拓している。具体的には、キラル対称性を持つ人工ナノ構造、3 回対称性を持つ系における角運動量保存則、ベクトル光波制御などに着目した研究を進めている。また、可視光およびテラヘルツ光を用いた新規磁性材料の超高速制御に関する研究を行っている。本研究室では、物理学教室における活動と、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させており、この連携のもとで、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や、フェルミオン冷却原子系における量子縮退領域での熱力学関数の精密測定を進めている。また、文部科学省、最先端研究基盤事業「コヒーレント光科学研究基盤の整備」プログラムのもとで整備された、高輝度高繰り返しの新型コヒーレント光源（”フォトンリング”施設）の開発に理化学研究所との共同で取り組んでいる。さらに、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」において、レーザー加工の原理探索およびその応用に関する研究を進めている。本年度に進めた研究を以下に紹介する。

6.5.1 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、低温高密度領域において BEC 相を形成することが期待されてきた。励起子が格子と熱平衡になり十分に低温状態となるためには、寿命が非常に長いことが要求されるため、我々はスピン禁制励起子である亜酸化銅 (Cu_2O) における 1s パラ励起子に着目してきた。しかし寿命が長いことの代償として、従来の実験手法である発光スペクトル観測による励起子の温度や密度の評価が難しい。そこで我々は、水素原子様の Lyman 遷移を励起子について観測することで、パラ励起子の密度や温度を正確に評価する手法を独自に開拓してきた。

世界各地での長年の研究にもかかわらず、BEC の確証は得られなかった。その原因は、光励起強度を

増して高い励起子密度を生成する時に、十分な励起子寿命を維持できるか不明であったことによる。そこで上記の分光法（励起子 Lyman 分光法）を用いた結果、励起子間の 2 体衝突による励起子消失の頻度が極めて高く、超流動ヘリウム温度 (2 K) において BEC 転移が期待される励起子密度 (10^{17} cm^{-3}) に到達するのは困難であることが判明した。従って BEC を実現するためには励起子間の散乱頻度を下げるべく、より低密度な領域で BEC の条件を実現する必要がある。そこで我々はヘリウム 3 冷凍機を使用し、励起子をサブケルビンの温度領域まで冷却することで、10^{16} cm^{-3} 程度の転移密度を実現し、BEC 転移の観測を試みた。歪誘起トラップしたパラ励起子は 0.8 K という低温に到達していることを空間分解発光スペクトルから確認し、この温度で BEC 転移に必要である 10^9 個程度のパラ励起子を蓄積した。その結果、BEC 転移条件を満たすときに励起子ガスの高温成分が閾値的に増大することを見出した。数値計算との比較の結果、上記のような非弾性散乱が強く起こる系においては、BEC 転移が生じたと仮定すると、基底状態を多数の粒子が占有して局所的に密度が上昇し、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きた。またこの超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。また時間分解発光測定により、極低温でパラ励起子がトラップ中で蓄積される様子を詳細に観測し、寿命や拡散係数、移動度といったダイナミクスを決定する重要なパラメータの抽出に必要な情報を取得した。

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スペクトル測定法を用いてトラップした励起子の誘導吸収イメージを捉える実験を構築し、液体ヘリウム温度において成功した。また、このとき得られる誘導吸収スペクトルが印加応力に依存して変化することを見出し、これを理論的に取り扱うため 1s 準位だけでなく 2p 準位の印加応力依存性の導出を進めた。さらに 100 mK の極低温領域で実現する実験系の構築を進め、特に温度上昇の原因となる希釈冷凍機内への室温の熱輻射の侵入を最小限にするため、中赤外域において必要な波長だけを透過する特殊なフィルタを窓に採用し、また窓の開口も制限することで、励起子温度を 100 mK 台に保ちつつ (図 6.5.1 左) 誘導吸収イメージを取得することに成功した (図 6.5.1 右)。現在本手法を用いて BEC 転移特有のイメージ変化が得られるかどうか慎重に調べている [20, 28, 60]。

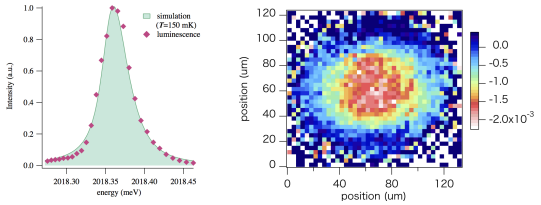

図 6.5.1: 左)Lyman イメージング中の励起子発光スペクトル 右)Lyman イメージングの結果

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査

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、それらの物性を探査することにより、相互に物理の理解を深めることは勿論、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、これまで研究出来なかった新規の臨界現象に挑むことが可能である [7]。以上の背景により、今年度は以下の四つの成果に至った。

a) スピン不均衡フェルミ系による一次相転移現象の観測 [75] : クーパー対を形成し超流動相と常流動相に相分離する一次相転移時に、一般的な一次相転移同様の物理が存在するかは非自明な問題である。我々はこの物理を調べるためスピン不均衡フェルミ系による一次相転移現象の観測に挑戦し成功した。今後、時間的な核形成ダイナミクスの観測や、スピン不均衡フェルミ系での輸送係数の決定に向けて発展する。

b) 引力相互作用しているボース粒子の二次相転移と臨界現象の観測 [59] : 半導体中の電子・正孔対（励起子）のボース凝縮は、結晶フォノンによって励起子が冷やされボース凝縮に至る事が期待されている。この時励起子間の相互作用は弱いと想定されている。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。一般的に二次相転移時の秩序パラメータの成長ダイナミクスやそのサイズは 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。我々はボース・フェルミ混合系を有しており、さらに粒子間の相互作用を Feshbach 共鳴により制御できるため、励起子と近い量子系を再現することが可能である。実際我々は熱浴によってボース粒子が冷やされ、ボース凝縮に相転移する現象を観測した。さら

に、ボース粒子の冷却速度により生成される BEC の等位相領域のサイズが変化することを観測した。実験結果から臨界指数を見積もると、3D-XY ユニバーサリティークラスの臨界指数と異なる値が得られたが、これが熱浴の影響かどうか今後検証する必要がある。

c)BCS-BEC クロスオーバー領域のゼロ温度における熱力学量と超流動ギャップの関係 [43]：弱く s 波相互作用している二成分フェルミ粒子系の対形成は BCS の平均場理論によって定性的に説明できる。しかし、BCS-BEC クロスオーバー領域の強く相互作用しているフェルミ粒子系に対しては、この理論的な枠組みでは実験結果を説明できず、基底状態が如何なる状態を取るのか未解決であった。この問題は、電子間の相互作用を大きくするとどれだけ超電導温度が上昇するかという問題にも直結している。我々はこれまで、BCS-BEC クロスオーバー領域のゼロ温度における熱力学量を実験的に決定してきた [6, 13, 35, 21, 65]。そして熱力学量をギャップ方程式に代入することにより、超流動ギャップが得られることを発見した。これは物理的には、フェルミ粒子系が強く相互作用していても、基底状態の波動関数は BCS の平均場とほぼ等しい状態を持っていることを意味する。加えて超流動相に入れない超流動揺らぎが存在し、これが相互作用を大きくしても単純に転移温度が上昇しない原因であることが理解できた。近年注目を集めている FeSe 系の超伝導体でも、超電導揺らぎが超電導状態に影響を及ぼしていることが明らかになっている。今後電子系とさらなる比較をすることにより、普遍的な物理と、電子系の個性に由来する物性の分離が進むものと期待できる。

d)BCS-BEC クロスオーバー領域の有限温度の状態方程式の決定手法の確立 [58]：クロスオーバー領域の有限温度の物性の実験的な研究は、フェルミ対生成の物理を完全理解するために必須課題である。これまで散乱長が発散しているユニタリー極限における熱力学特性が研究されてきたが、幅広い相互作用領域で研究することにより新たな知見が生まれる。特に BCS 領域の有限温度の熱力学特性は、超新星爆発から中性子星誕生の過程を説明する上で必要な情報であり、また高温領域のビリアル係数は少数系と多体系を繋げる重要な物理を含んでいる。これまでユニタリー極限以外の相互作用領域で実験されてこなかった理由として、熱力学量の決定手法が確立していなかった事が主な要因であった。我々は、任意の相互作用領域で熱力学量を高精度に決定する手法を確立した。理論計算で描かれていた様々な相図を、ついに実験で確認できる準備が整ったのである。

6.5.2 非自明な光学現象の探索とその応用

ワイドバンドギャップ誘電体の光破壊メカニズムの探索

超短パルスレーザーによる光破壊プロセスを活用したレーザー加工は、非接触・高精細等の、他の加工技術にない特徴を備えており、次世代の自由形状加工技術を実現する重要なツールとして応用の観点から近年注目を集めている。一方でパルスレーザーによる透明物質の光破壊は、高強度コヒーレント光によって誘起される極限領域での非線形現象であり、その物理的メカニズムには未解明な点が多く、光科学における重要な研究課題の一つとなっている。今回我々は、複数パルスの照射によって生じる光破壊プロセスにおける、パルス毎のダメージ蓄積の影響を考慮した新たな物理モデルを構築し、実験との比較を行った。破壊によって生じる穴の深さと照射エネルギー密度の関係性を再考した結果、モデルから予想される新たなスケーリングに従ってプロットすることによって、入射パワーの異なる実験データを統一的に理解することができることを明らかにした。本研究は、独国フラウンホーファーレーザー研究所との共同研究によるもものである。

波形整形された高強度超短光パルスによるモード選択的フォノン励起

光による物質の相転移の誘起や固体の破壊現象といった、物質の変形・変質を伴うような強励起によって生じる現象においては、物質を構成する原子の運動、すなわちフォノンが現象の大きな担い手の一つであると考えられる。近年、超短光パルスを用いて、固体中のフォノンを励起し、そのダイナミクスを観測、制御する研究が精力的に進められている。我々は、超短光パルスの時間波形を偏光状態も含めて制御可能な波形整形パルスによるフォノンの選択励起を高強度化し、上記のような強励起現象におけるそれぞれのフォノンモードの寄与の解明と、新たな物質制御手法の開拓を試みている。本研究では、高強度光パルスに対する偏光も含めた波形整形が可能な光学系の開発を行い、最大 270 μJ のパルスエネルギーを有するねじれ偏光パルスを生成することに成功した。さらにそのパルスを用いて、水晶のフォノンモードを選択的に強励起することが可能であることを実証した [16, 57]。本手法はモード選択的フォノン強励起実験のための非常に強力なツールとなる。

固体からの高次高調波発生の理論的考察

これまで高強度レーザー場と物質との非摂動領域の相互作用は主に原子分子に対して研究されてきたが、近年高強度レーザー場のもとでの固体中電子状態ダイナミクスが盛んに研究されている。特に高強度レーザー場を照射した時に固体から高次高調波が発生することが実験的に報告され、全光学的に物質の電子状態を調べる手段や新たな紫外光源への応用が期待されている。今回我々は、独立粒子近似のもとで時間依存シュレーディンガー方程式を数値的に解き、固体からの高次高調波発生を調べた。気体からの高次高調波と比較して、特徴的な多段カットオフが出ることが再現された。実際このような多段カットオフは、実験的に観測されている。電子の垂直遷移、バンド内遷移の組み合わせからなる準古典

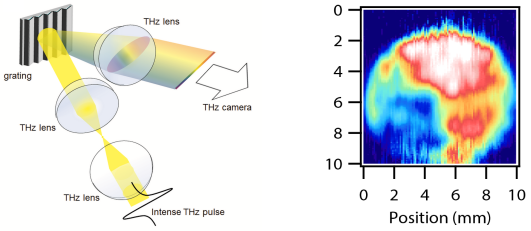

図 6.5.2: 左) リアルタイムテラヘルツ分光イメージング測定系の模式図 右) 分子 (D-フルクトース) の空間分布イメージング結果

モデルに基づいて電子のトラジェクトリーを描くことによって、この電子ダイナミクスが理解できることを示した。このトラジェクトリー解析によって、固体高調波のカットオフは照射するレーザーパルスのパルス幅に依存して変化することを提唱した [11]。

高感度テラヘルツカメラを用いたリアルタイム分光イメージング

テラヘルツ周波数領域の電磁波は、さまざまな分子の特徴的な指紋スペクトルが観測され、なおかつ可視光が透過しない多くの物質を透過するため、セキュリティー応用等に向けたテラヘルツイメージング技術の開発が進められている。我々は、非冷却ボロメーター二次元アレイ型のテラヘルツカメラの素子構造を改良することによって、1 THz 近傍の感度を大きく向上させることに成功している。本研究では、回折格子によって反射されたテラヘルツ光をテラヘルツカメラに入射させることによって、二次元アレイの一軸を、周波数情報の取得に用いることによって、テラヘルツ領域におけるリアルタイム分光イメージング技術を開発した [9, 39](図 6.5.2 左)。この手法を用いることによって、テラヘルツ領域における分子の指紋スペクトルを活用して、異なる分子の二次元分布を可視化することに成功した (図 6.5.2 右)。

6.5.3 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

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希ガスに絞り込むことで約 30 eV から 130 eV までの高次高調波を発生することができる。この高調波を利用した真空紫外領域の固体の精密分光を進めている。これまでにヤングの干渉縞を応用し、干渉像の位相と明暗度から試料の屈折率分散を計測できる位相敏感な干渉計を開発した。本年度は、ビームポインティングのドリフトに起因する位相変化が干渉計の位相決定精度を悪くすることを突き止め、ポインティングの能動制御を実現した [15]。さらにモデル計算を高調波の波面情報を考慮したモデルに改良することで、屈折率実部の分散関係の決定精度は 5×10^{-4} rad 以下に向上している。また、金属表面に生成した酸化膜は有効屈折率を変化させるため、精密分光においては酸化膜厚の正確な評価と除去が必要である。そこで、本実験で使用しているアルミニウムに 10 nm 以上存在した酸化膜をアルゴンスパッタリングにより除去し、本実験の干渉計を用いて酸化膜が裏表合わせて 6 nm であると評価した。この値は XPS 測定で得られた膜厚と一致し、XPS と両立する膜厚評価の手法を確立できることになった。

レーザー励起角度分解光電子分光の開発

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開発し、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。そのため角度分解光電子分光装置の分解能を改善する試みを進めている。残留磁場の低減や電極電位の微調整を進め、更に本年度は試料周りの異種金属接合による電場分布に注意することで、定常状態の電子系の観察でエネルギー分解能 2.4 meV、角度分解能 0.33° を達成した。これは類似の装置と比べ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固体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。その結果、固体の表面に形成される金属状態において、光励起することで初めて形成される過渡的な励起電子状態の角度分解光電子分光を行うことに成功し、その分散関係を観測できることを実証した。また本手法においても上記の分解能を実現していることを確認した。更に帯電抑制用の光を試料に照射する手法により、測定可能な試料の範囲を絶縁性物質にまで拡張することに成功した。現在試料に光電流励起用の連続光を照射した上でポンププローブ角度分解光電子分光を行なうことで半導体 GaSe のバンド間励起後における伝導帯の電子分布の観察を行なっている。

また半球型光電子分析器を用いたレーザー励起角度分解光電子分光において、高分解能かつ高効率測定を両立するべく光源開発を行っている。具体的にはピコ秒モード同期チタンサファイア発振器の基本波の四倍波 5.9 eV を深紫外ファブリーペロー (FP) 共振器に通し、光源の繰り返し周波数の逓倍化を実現した。FP 共振器出力の強度変調を抑えるためには、高フィネス FP 共振器の縦モードとレーザーの四倍波の縦モードを完全に合わせる必要があり、ピコ秒レーザーの縦モード揺らぎの能動制御を実現した [26, 38, 74]。

コヒーレント光科学研究基盤の整備

文部科学省による「最先端研究基盤事業」の一つとして実施されていた”コヒーレント光科学研究基盤の整備 (H22 年度 ∼H25 年度)”をベースとして、最先端のレーザー技術を活用した強力かつ高安定なコヒーレント光を発生する光源装置の開発整備を進めている。本事業は東京大学と理化学研究所との連携の下に、高強度高安定高繰り返し極超短パルス光源およびテラヘルツから軟 X 線までの幅広い領域において高精度同期可能な高強度高繰り返し光源（”フォトンリング”施設）の開発を進めることを目的とするものである。同時に、軟 X 線領域顕微画像計測装置、次世代レーザー光電子分光装置、テラヘルツイメージング装置等の、新規光源の特性を引き出す計測装置を整備する。現在、繰り返し周波数 2.85 MHz, 共振器内パルスエネルギー 1 mJ での超短パルス光源 (中心波長 1032 nm、パルス幅 520 fs) のモードロック動作の確認に成功し、それを用いた高次高調波発生の実験を進めている。また、テラヘルツイメージングの応用技術や、電子励起過程の直接観察による界面プロセスの解明など、新規光源の高度利用のための基盤技術の開拓も進めている。本事業は、工学系研究科附属光量子科学研究センターが中心になっているが、理学系研究科、工学系研究科、物性研究所に所属する本学の多数の教員の参加協力のもとで現在も進められている。

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 月より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。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く。

この活動を進めるため、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。この事業では「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を創っていく。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いる。

また、学内他部局の光科学研究組織間での連携を強化するために、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を発足させ、学内のみならず、産業界との連携の一層の強化を進める。また、平成 28 年度に、「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」が NEDO プロジェクトとして採択され、活動を開始した。

＜**受賞**＞

[1] 池町拓也, 篠原康, 佐藤健, 石川顕一, 湯本潤司, 五神真: 高強度レーザー場によって駆動される固体中多電子状態ダイナミクスの波動関数論的アプローチ, 応用物理学会秋季学術講演会, 14a-C32-8, 朱鷺メッセ, 新潟県 (2016/9/14) 奨励賞

＜**報文**＞

(原著論文)

[2] B. Kuyken, F. Leo, S. Clemmen, U. Dave, R. Van Laer, T. Ideguchi, H. Zhao, X. Liu, J. Safioui, S. Coen, S.P. Gorza, S. K. Selvaraja, S. Massar, R. M. Osgood Jr., P. Verheyen, J. Van Campenhout, R. Baets, W.M. J. Green, and G. Roelkens: Nonlinear optical interactions in silicon waveguides, Nanophotonics **5**, 1-16 (2016).

[3] K. Shu, X. Fan, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, K. Yoshioka, and M. Kuwata-Gonokami: Study on cooling of positronium for Bose - Einstein condensation, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics **49**, (10) 104001 (2016).

[4] Takuro Ideguchi, Tasuku Nakamura, Yohei Kobayashi, and Keisuke Goda: Kerr-lens mode-locked bidirectional dual-comb ring laser for broadband dual-comb spectroscopy, Optica **3**, 748-753 (2016).

[5] Miu Tamamitsu, Yusuke Sakaki, Tasuku Nakamura, G. Krishna Podagatlapalli,Takuro Ideguchi, and Keisuke Goda: Ultrafast broadband Fourier-transform CARS spectroscopy at 50,000 spectra/s enabled by a scanning Fourier-domain delay line, Vibrational Spectroscopy (2016)

[6] H. Tajima, P. van Wyk, R. Hanai, D. Kagamihara, D. Inotani, M. Horikoshi, Y. Ohashi: Zero-Temperature Properties of a Strongly Interacting Superfluid Fermi Gas in the BCS-BEC Crossover Region, Journal of Low Temperature Physics 1-8 (2016).

[7] T. Ikemachi, A. Ito, Y. Aratake, Y. Chen, M. Koashi, M. Kuwata-Gonokami, and M. Horikoshi: All-optical production of dual Bose-Einstein condensates of paired fermions and bosons with 6Li and 7Li, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **50**, 01LT01 (2016).

[8] Stepan Lucyszyn, Makoto Kuwata-Gonokami, and Kuniaki Konishi: The 2017 terahertz science and technology roadmap; 7. Passive THz components, Journal of Physics D: Applied Physics **50**, 043001 (2017).

[9] N. Kanda, K. Konishi, N. Nemoto, K. Midorikawa and M. Kuwata-Gonokami: Real-time broadband

terahertz spectroscopic imaging by using a high-sensitivity terahertz camera, Scientific Reports **7**, 42540 (2017).

[10] W.J. Otter, N.M. Ridler, H. Yasukochi, K. Soeda, K. Konishi, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami, S. Lucyszyn: 3D printed 1.1 THz waveguides,Electronics Letters **53**, 471 (2017).

[11] Takuya Ikemachi, Yasushi Shinohara, Takeshi Sato, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami, Kenichi L. Ishikawa: Trajectory analysis of high-order-harmonic generation from periodic crystals, Physical Review A, **95**, 043416 (2017)

(会議抄録)

[12] K Shu, T Murayoshi, X Fan, A Ishida, T Yamazaki, T Namba, S Asai, K Yoshioka, M Kuwata-Gonokami, N Oshima, B E O'Rourke and R Suzuki: Study on Bose-Einstein condensation of positronium, Journal of Physics: Conference Series, **791** (1) 012007 (2017-1).

(国内雑誌)

[13] 堀越宗一: 冷却原子実験から希薄中性子物質へ, 原子核研究 第 61 巻 1 号 (2016)

[14] 小西邦昭: テラヘルツ円偏光スイッチング素子, 五神真 応用物理 第 85 巻, p880-884 (2016 年 10 月号)

(博士論文)

[15] 永久保 祐紀: 高次高調波を用いた時間分解位相敏感屈折率計測法の開発, (2017 年 3 月, 東京大学大学院理学系研究科)

(修士論文)

[16] 飯田 修: 波形整形された高強度超短光パルスによる誘電体光励起ダイナミクスの観測と制御, (2017 年 3 月, 東京大学大学院理学系研究科)

[17] 夏 沛宇: 可視・近赤外領域における超精密分光用超高繰り返しチタンサファイア光周波数コムの開発, (2017 年 3 月, 東京大学大学院理学系研究科)

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[18] Junji Yumoto: Coherent photon technology-science, technology and innovation, LPM2016 - The 17th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, Wyndham Grand Xi' an South, Xi'an, China (2016/5/26)

[19] Kuniaki Konishi: Circular Polarization Effects in Artificial Nanostructure, Ultrafast Dynamics at the Nanoscale 2016, OIST Main Campus, Okinawa (2016/7/16)

[20] Kosuke Yoshioka: Mid-infrared absorption imaging of a quantum degenerate exciton gas in cupurous oxide at 100 mK, The 19th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC'16) Paris, France (2016/7/22)

[21] Munekazu Horikoshi: From cold atoms to dilute neutron matter, 12th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, Changchun, China (2016/9/7).

[22] Junji Yumoto: Exploring ultimate coherent photon technology for additive manufacturing and,laser material processing ADD+it2016 (Additive Manufacturing and Innovative Technologies), Museum Arbeitswelt, Steyr, Austria (2016/9/30)

[23] Natsuki Kanda, Kuniaki Konishi, and Makoto Kuwata-Gonokami: Spatio-temporal control of terahertz polarization, Optics & Photonics Japan 2016 OSJ-OSK-TPS Joint Symposium, Tokyo Campus, University of Tsukuba, Tokyo (2016/11/1)

[24] Junji Yumoto: Exploring Ultimate Coherent Technology for Medical Science and Bio-Science, Chitose International Forum on Photonics Science & Technology, Hokkaido (2016/11/15)

[25] Kuniaki Konishi: Circular polarization control with metallic artificial structures, Nanocarbon Photonics and Optoelectronics (NPO2017), Krasnaya Polyana, Sochi, Russia (2017/03/21)

一般講演

[26] J. Omachi, K. Yoshioka, and M. Kuwata-Gonokami: GHz repetition rate, 210nm light source for ultrahigh resolution photoelectron spectroscopy, The 1st International Symposium on Advanced Photonics, Hotel Kokonoe, Hamana-ko, Hamamatsu (2016/4/13)(poster)

[27] Haruyuki Sakurai: Wavelength dependence of the laser-induced damage threshold of sapphire, The 1st International Symposium on Advanced Photonics, Hotel Kokonoe, Hamana-ko, Hamamatsu (2016/4/13)(poster)

[28] Yusuke Morita, Hirosule Suzuki, Kosuke Yoshioka, and Makoto Kuwata-Gonokami: Lyman induced absorption imaging of very cold excitons in cuprous oxide using a dilution refrigerator, ICSCE8 (8th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems), Edinburgh (2016/4/25)

[29] Kuniaki Konishi: Polarization-controlled circular second-harmonic generation in plasomonic nanostructures, Les Houches-WE-Heraeus Workshop, Ultrafast Phenomena at Nanostructures, Les Houches, France (2016/5/8-13)

[30] K. Shu, T. Murayoshi, X. Fan, A. Ishida, T. Yamasaki, T. Namba, S. Asai, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, N. Oshima, B. E. O'Rourke,

R. Suzuki: Study on Bose-Einstein Condensation of Positronium, 14th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques & Applications, Kunibiki Messe, Matsue (2016/5/24)

[31] Takuro Ideguchi, Kazuki Hashimoto, Megumi Takahashi, Keisuke Goda: High-throughput broadband Fourier-transform CARS, CLEO 2016, San Jose, California United States (2016/6/7)

[32] Takuro Ideguchi, Tasuku Nakamura, Yohei Kobayashi, Keisuke Goda: Bidirectional Kerr-lens mode-locked dual-comb ring laser, CLEO 2016, San Jose, California United States (2016/6/8)

[33] Haruyuki Sakurai, Yo Iida, Akira MIzutani, Kuniaki Konishi, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami: Wavelength Dependence of the Laser-Induced Damage Threshold of α-Al_2O_3, CLEO 2016, San Jose, California United States (2016/6/9) (poster)

[34] Tetsuo Kan, Akihiro Isozaki, Natsuki Kanda, Natsuki Nemoto, Kuniaki Konishi, Hidetoshi Takahashi, Makoto Kuwata-Gonokami, Kiyoshi Matsumoto, Isao Shimoyama: Chiral Switchable THz Metamaterial with MEMS Reconfigurable Spirals, CLEO2016, San Jose, California United States (2016/6/9)

[35] Munekazu Horikoshi: Dilute pure neutron matter investigated by cold atom experiments, Neutron Star Matter 2016, Tohoku Gakuin University, Sendai (2016/11/23)

[36] S. Kamioka, X. Fan, T. Inada, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, J. Omachi, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, A. Matsuo, K. Kindo, H. Nojiri:
Search for Vacuum Magnetic Birefringence with Pulsed Magnets, 9th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA), Kyoto Univ. (2017/1/10)

[37] Miu Tamamitsu, Yusuke Sakaki, Tasuku Nakamura, G. Krishna Podagatlapalli, Takuro Ideguchi, Keisuke Goda: Ultrafast broadband Fourier-transform CARS spectroscopy operating at 50,000 spectra/second, Photonics West 2017, San Francisco, US (2017/1/28)

[38] Junko Omachi: Ultraviolet light source for high-resolution photoelectron spectroscopy, CIAiS International Symposium 2017, Fukutake Hall, The University of Tokyo Tokyo (2017/02/27)

(国内会議)

招待講演

[39] 神田夏輝: 高感度テラヘルツカメラによるテラヘルツ分光イメージング, 第 8 回テラテクビジネスセミナー, パシフィコ横浜 (2016/9/14)

[40] 井手口拓郎: デュアルコム分光, レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会 シンポジウム・光コムが切り開く知的光計測, 徳島大学 (2017/1/8)

一般講演

[41] 池町拓也, 篠原康, 佐藤健, 石川顕一, 湯本潤司, 五神真: 高強度レーザー場によって駆動される固体中多電子状態ダイナミクスの波動関数論的アプローチ, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ, 新潟県 (2016/9/14)

[42] 長沼和則, 豊田誠治, 阪本匡, 湯本潤司: KTN 光偏向器内蔵波長掃引光源へのベッセル光線の適用, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ, 新潟県 (2016/9/14)

[43] 堀越宗一, 五神真: BCS 領域からユニタリー極限におけるペアリングギャップ, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学 (2016/9/15)

[44] 石田明, 周健治, 村吉諄之, 樊星, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 五神真, 大島永康, オローク・ブライアン, 鈴木良一: ポジトロニウムのボース・アインシュタイン凝縮に向けたレーザー冷却, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学 (2016/9/15)

[45] 夏沛宇, 大間知潤子, 吉岡孝高, 五神真: 3GHz 以上の超高繰り返しチタンサファイア光周波数コムの開発, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学 (2016/9/16)

[46] 樊星, 上岡修星, 稲田聡明, 山崎高幸, 難波俊雄, 浅井祥仁, 大間知潤子, 吉岡孝高, 五神真, 松尾晶, 金道浩一, 野尻浩之: パルス磁石を用いた真空複屈折の探索 I, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学 (2016/9/22)

[47] 上岡修星, 樊星, 稲田聡明, 山崎高幸, 難波俊雄, 浅井祥仁, 大間知潤子, 吉岡孝高, 五神真, 松尾晶, 金道浩一, 野尻浩之: パルス磁石を用いた真空複屈折の探索 II, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学 (2016/9/22)

[48] 周健治, 村吉諄之, 樊星, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 五神真, 大島永康, オローク・ブライアン, 鈴木良一: 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 I, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学 (2016/9/24)

[49] 村吉諄之, 周健治, 樊星, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 五神真: 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 II, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学 (2016/9/24)

[50] 池町拓也, 篠原康, 佐藤健, 湯本潤司, 五神真, 石川顕一: Extended three-step model for high-harmonic generation from periodic crystals, 第 9 回 文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」 シンポジウム, 弘済会館, 東京都千代田区 (2016/1/24)

[51] 櫻井治之: UV to NIR Wavelength Dependence of the Laser-Induced Damage Threshold of Sapphire, 第 9 回 文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」 シンポジウム, 弘済会館, 東京都千代田区 (2016/1/24)

[52] Yizhi Luo, Kotaro Hiramatsu, Takuro Ideguchi, Keisuke Goda: Rapid-Scan Fourier-Transform Coherent Anti-Stokes Raman Scattering Spectroscopy with Heterodyne Detection, 日本化学会第 97 春季年会 2017, 慶應大学日吉キャンパス (2017/3/16)

[53] 樊星, 上岡修星, 稲田聡明, 山崎高幸, 難波俊雄, 浅井祥仁, 大間知潤子, 吉岡孝高, 五神真, 松尾晶, 金道浩一, 野尻浩之: パルス磁石と高フィネス共振器を用いた真空複屈折の探索 I, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 (2017/3/17)

[54] 石田明, 周健治, 村吉諄之, 樊星, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 五神真, 大島永康, オロークブライアン, 鈴木良一, 石坂直之, 秋山悟, 藤野茂: 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 I, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 (2017/3/17)

[55] 上岡修星, 樊星, 稲田聡明, 山崎高幸, 難波俊雄, 浅井祥仁, 大間知潤子, 吉岡孝高, 五神真, 松尾晶, 金道浩一, 野尻浩之: パルス磁石と高フィネス共振器を用いた真空複屈折の探索 II, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 (2017/3/17)

[56] 周健治, 村吉諄之, 樊星, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 五神真, 大島永康, オロークブライアン, 鈴木良一, 石坂直之, 秋山悟, 藤野茂: 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 II, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 (2017/3/17)

[57] 飯田耀, 伊藤宙陛, 小西邦昭, 湯本潤司, 三沢和彦, 五神真: 波形整形された高強度超短光パルスによるモード選択的フォノン励起, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 (2017/3/18)

[58] 米澤明秀, Chen Yiping, 堀越宗一, 小芦雅斗: 有限温度における s 波相互作用しているフェルミ粒子系の熱力学量測定, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学, 大阪府 (2017/3/19)

[59] Chen Yiping, Munekazu Horikoshi, Kosuke Yoshioka, Makoto Kuwata-Gonokami: Formation and critical behaviors of sympathetically cooled attractive Bose-Einstein condensation, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学, 大阪府 (2017/3/19)

[60] 森田悠介, 吉岡孝高, 五神真: 亜酸化銅中におけるサブケルビン 1s パラ励起子の中赤外誘導吸収イメージング, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 (2017/3/20)

(セミナー)

[61] 神田夏輝, 小西邦昭, 五神真: カイラルメタマテリアルによる THz 波偏光制御, 第 3 回超高速光エレクトロニクス研究会「超短パルス長波長光源の進展とその応用」, 理化学研究所, 和光市 (2016/4/26)

[62] 大間知潤子: 光科学への扉, 埼玉県立浦和第一女子高校 (2016/06/18)（招待）

[63] 周健治, 村吉諄之, 樊星, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 五神真: 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 1, 第 53 回アイソトープ・放射線研究発表会, 2p-2-03, 東京大学弥生講堂 (2016/7/7)

[64] 村吉諄之, 周健治, 樊星, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 五神真: 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 2, 第 53 回アイソトープ・放射線研究発表会, 2p-2-04, 東京大学弥生講堂 (2016/7/7)

[65] 堀越宗一: 冷却原子から探るフェルミ多体系の状態方程式, 理研シンポジウム・iTHES 研究会 「熱場の量子論とその応用」, 理化学研究所, 和光市, 埼玉県 (2016/8/24)（招待）

[66] 湯本潤司: コヒーレントフォトンテクノロジーによるイノベーション創出, マイクロプロセス最前線シリーズ マイクロ／フロー化学の普及と汎用化に向けて, 大阪科学技術センター (2016/10/20)（招待）

[67] 井手口拓郎: 光周波数コムによる分子分光, 第 40 回極限コヒーレント光科学セミナー, 東京大学物性研究所 (2016/11/7)（招待）

[68] 小西邦昭: 人工キラル構造による円偏光制御, 第 4 回豊田理研ワークショップ「キラル対称系の電磁応答」, 豊田産業記念館, 名古屋市 (2016/11/20) （招待）

[69] 小西邦昭: サブ波長人工構造を用いた円偏光制御とその応用, 第 43 回極限コヒーレント光科学セミナー, 東京大学物性研究所 (2016/11/21)（招待）

[70] 井手口拓郎: 光周波数コムを用いた分子分光, 日本学術振興会 光エレクトロニクス第 130 委員会 第 305 回研究会, 東京理科大学森戸記念館 (2016/12/14)（招待）

[71] 小西邦昭: 人工微細構造を用いた円偏光制御, 光電相互変換第 125 委員会第 234 回研究会, 明治大学駿河台キャンパス (2016/12/19)（招待）

[72] 周 健治, 村吉 諄之, 樊 星, 石田 明, 難波 俊雄, 浅井祥仁, 吉岡 孝高, 五神 真, 大島 永康, オローク ブライアン, 鈴木 良一: 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, 京都大学原子炉実験所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」, 京都大学原子炉実験所 (2016/12/9) （口頭）

[73] 井手口拓郎: デュアルコム分子分光, 第 33 回先端光量子科学アライアンスセミナー, 慶應大学日吉キャンパス (2017/3/3)（招待）

[74] 大間知潤子: 紫外光源開発と紫外分光：固体から分子まで, 4 大学ナノ・マイクロファブリケーションコンソーシアム・シンポジウム「ナノ・マイクロ研究拠点における産学連携と科学技術人材育成」, 慶應義塾大学 K2 タウンキャンパス 大会議室 (2017/3/13)

[75] 堀越宗一: 極低温原子気体で探るクォーク系・核子系の量子多体現象, 研究会「クラスターがつなぐクォーク、ハドロン、原子核そして原子」、大阪大学、大阪府 （2017/3/16）

6.6 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天文学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 2010 年にスタートした大型低温重力波検出器 KAGRA の建設は順調に進んでいる．トンネルの掘削，全長 6 km におよぶ真空パイプの建造，低温ミラーを収納するクライオスタットの製作が完了し，2014 年度からは本格的なインストール

が開始されている．また，2016 年には iKAGRA と呼ばれる比較的単純な干渉計構成で，システム全体を用いた試験運転も行われ，2018 年頃からの本格的重力波観測開始への期待が高まっている．宇宙空間重力波アンテナ B-DECIGO の実現へ向けた検討や基礎開発も行われている．独自の方式のねじれ型重力波検出器 TOBA に関しては，プロトタイプ機の開発が進められ，それを用いた観測運転と重力波信号探査も行われた．それらと並行して，われわれは重力波研究で必要とされる技術を用いた関連研究も進めている．片道光速の異方性検出や微小距離における重力法則の検証は基礎物理として重要である．また，量子光学の手法を用いた光学実験は重力波検出器の高感度化を実現する可能性を秘めている．

6.6.1 大型重力波検出器 KAGRA

大型低温重力波望遠鏡 KAGRA(かぐら) は岐阜県神岡の地下に建設が進められている，一辺 3 km のレーザー干渉計型重力波望遠鏡である．地面振動や重力勾配雑音の影響を低減するために静寂な地下環境に建設されている，世界初の km 級の本格的な重力波望遠鏡となっている．また，km 級の重力波望遠鏡としては初めて，鏡を低温に冷やすことで熱雑音の低減を目指している．

KAGRA 計画は 2010 年にスタートし，トンネルや真空システムなどの基本的な施設は 2015 年に完成した．そして 2016 年の 3 月から 4 月にかけて，常温マイケルソン干渉計というシンプルな構成ながら，初めての試験運転を行った．2018 年には低温運転を行う予定であり，現在はこれに向けたインストール作業や調整作業が進められている．

2016 年 2 月にアメリカの LIGO グループにより重力波の初観測が発表されたが，重力波源の位置特定には複数台による観測が必須である．そのため，KAGRA が重力波の国際観測ネットワークに一刻も早く参加することが期待されている．当研究室では KAGRA の根幹部分となる，主干渉計光学系や制御系の設計開発を行っている．また，冷凍機からの振動を抑えつつ鏡を冷やすために重要な役割を担う低温懸架系の開発に携わっている．

iKAGRA 試験運転

KAGRA は 2016 年 3 月から 4 月に渡って Initial KAGRA (iKAGRA) と呼ばれるフェーズでの試験運転を行った．iKAGRA は常温懸架鏡を用いた一辺 3 km のマイケルソン干渉計となっており，簡易な干渉計構成であるため重力波の検出は難しい．全長 6 km に及ぶ真空槽・真空ダクトのレイアウト確認や計算機やそのネットワーク系の動作確認，データ取得系の動作確認，観測シフト体制の確認を目的とした試験運転である．当研究室は，この iKAGRA 主干渉計の制御で用いる電気回路や配線の取りまとめ，3 km 光を往復させるための鏡の初期アラインメント，干渉計の制御と重力波信号の較正などにおいて，主要な役割を担った．また，3 月の試験運転と 4 月の試験運転の間の 10 日ほどのコミッショニング期間に雑音の低減と干渉計動作の安定化を行った．

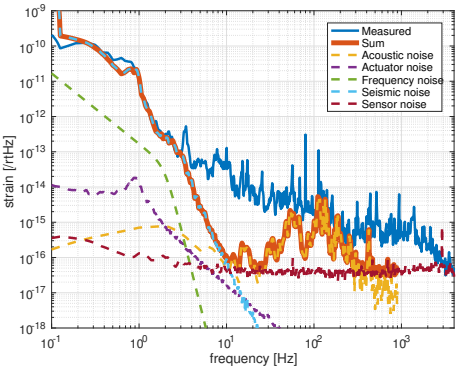

図 6.6.1: iKAGRA の感度曲線と各種雑音の寄与

3 月の試験運転では干渉縞の DC 信号を用いた制御であったが，4 月の試験運転では変調復調法を用いた制御を実現した．また，鏡の懸架系のセンサ・アクチュエータの再調整を行うことなどにより，制御帯域を 8 Hz から 94 Hz まで向上させた．さらに，インプットモードクリーナーにディザー・アラインメントと呼ばれる手法で鏡の姿勢制御を導入した．これらにより感度を 1 桁程度改善すると共に，干渉計動作の安定化ができた．稼働率は 3 月期の 85.2 %から 4 月期は 90.4 %に向上し，最長ロックも 3.6 時間から 21.3 時間へと大幅に向上させた．

図 6.6.1 は 4 月期の典型的な感度スペクトルである．各種雑音の評価により，4 Hz 以下は地面振動雑音，3 kHz 以上はアナログ・デジタル変換の量子化雑音に制限されていることがわかった．また，試験運転後にクリーンブースのファンを停止させると感度が向上したことから，中間周波数帯では音響雑音などが感度を制限していることがわかった．図 6.6.1 にプロットされている音響雑音は特に，ビームスプリッタ真空槽から混入した音響雑音を評価したものである．音響雑音がほとんどの帯域で感度を制限しているのは，iKAGRA 試験運転では真空槽の真空引きをしていなかったからである．今後の運転ではより本格的な鏡の懸架系を使い，真空引きを行うことで飛躍的な感度向上が期待できる．

主干渉計制御設計

iKAGRA の試験運転後は，Baseline KAGRA (bKAGRA) と呼ばれる低温での運転を行うフェーズに移行する．当研究室では bKAGRA に向けた入射光学系や主干渉計の制御設計も進めている．

2016 年度は，2018 年 3 月の低温運転に向けた鏡とビームの初期アラインメント計画を立て，干渉計制御のシミュレーションを行った．また，インプットモードクリーナーの制御や腕共振器の 2 倍波光を用いた補助的制御で用いる変調周波数を決定した．さ

らに，干渉計制御に用いる鏡のアクチュエータについても，設計を進めた．特に低温懸架系が導入される低温真空槽内での磁場測定結果を用いて，多段懸架系の各段での磁場雑音やアクチュエータレンジを評価した．

KAGRA 坑内での作業としては，インプットモードクリーナーの変調復調法を用いた鏡の姿勢制御系の導入を行った．また，インプットモードクリーナーと主干渉計の間の光学系の再調整と，ビームプロファイルの測定を行った．その結果，設計と無矛盾な結果が得られた．今後より精密な測定を行い，2017 年度後半からビームの初期アラインメント作業を開始する予定である．

低温懸架装置

日本の重力波検出器 KAGRA の大きな特徴は米国の aLIGO や欧州の Advanced VIRGO とは異なり地下に建設することと鏡を極低温 (20 K) まで冷却することとが挙げられる．安東研ではこのうち低温化した懸架装置 (低温懸架系) を構築するための研究・開発を行っている．

今年度は KAGRA の鏡を懸架する準備として Hydro-Catalysis bonding (HCB) と呼ばれる接合手法の手順の検討を行った．KAGRA の鏡には懸架線を引っ掛けるための構造 (耳) が HCB によって鏡に取り付けられる．HCB の利点は接合強度が非常に強く低温でも使用可能であることや接合層を薄くすることが可能なため接合による機械的散逸が小さくできる点があげられるが，一方で一度取り付けた後に取り外しができないため，接合のやり直しがきかず一度で成功させる必要がある．そのため，接合時には接合のための治具と鏡の保護機能の両方を併せ持った箱 (HCB box) を使用する．HCB box は鏡の位置を機械加工精度で決定し，耳を取り付ける目標位置に 0.1 mm 程度の高い精度で接合することが可能である．

また，アルミ製のダミー鏡を使用した接合実験を多数繰り返し，HCB box のパフォーマンスの試験を行い，デザイン値から 0.1 mm の精度で耳を取り付けることが可能であることを確認した．

6.6.2 宇宙空間レーザー干渉計

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．これは，主に 10 Hz 以上で感度のある地上レーザー干渉計と，0.1 Hz 以下で感度のある NGO (LISA の後継計画) のような大型宇宙レーザー干渉計の中間にある周波数帯をターゲットとする検出器である．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．DECIGO は極めて技術的要求が高い計画であるため，数段階の技術実証実験を経てその実現を目指す．本研究室ではこれまでに世界初の宇宙空間重力波検出器である SWIM$_{\mu\nu}$ を打ち上げ，そのデータを用いた重力波探査解析を行っている．2015 年度は，DECIGO の前段階となる宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO の検討を進めた．LIGO が観測したような 30 $M_{\odot}$ の質量をもつブラックホールの連星であれば，赤方偏移 30 の遠方まで観測可能であること，長時間の観測によって位置の特定も可能であることなどが示され，その科学的な意義の検討を進めた．また，中性子星連星や中間質量ブラックホールの合体といった観測の可能性で得られる科学的成果の検討や，その観測を行うためのミッション検討も進めた．

6.6.3 ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA

Torsion-bar Antenna (TOBA) とは，ねじれ振り子を用いた新しい重力波検出器である．TOBA は 2 本の棒状のテストマスを持ち，これらが重力波による潮汐力を受けて差動回転するのを読み取ることで，重力波を検出する．TOBA の大きな特徴は，回転方向の共振周波数が小さいことから，地上においても 1 Hz 付近の低周波数帯に良い感度を持つことである．これによって，地上の干渉計型重力波検出器では捉える事が難しい，中間質量ブラックホール連星合体や背景重力波などといった低周波重力波源の探査を行う事を目標とする．

光学系の検討・開発

これまでの TOBA では試験マスの変位センサとしてファイバー干渉計を用いていたが，ファイバー干渉計を用いたことによる位相雑音によって感度が制限されていた．そこで我々は空間光を用いた光学系，特にモノリシック光学系を用いた変位センサの開発を進めている．

今年度は，アルミニウムの光学系土台上で紫外線硬化樹脂を用いたモノリシックパワーリサイクリングマイケルソン干渉計を構築し，干渉計の動作，および先行研究を超える変位感度を達成した．

今後は，モノリシック光学系を組み上げるための治具などの改良，光学系土台を熱膨張率の小さい合成石英のものに変更，強度雑音や周波数雑音などの雑音を低減することによって，要求値到達を目指す．

アクチュエータの検討・開発

これまでの TOBA では試験マスの制御にコイルマグネットアクチュエータを用いていたが，アクチュエータ磁石と環境磁場とのカップリング雑音が問題になっていた．そこで我々は磁石を用いず，かつ駆動力の大きい，コイルコイルアクチュエータという新型のアクチュエータの開発を進めている．

今年度はコイルコイルアクチュエータによってねじれ振り子を制御した上で，ヘルムホルツコイルによって一様な磁場をねじれ振り子に取り付けられたコイルにかけることで，コイルコイルアクチュエー

タの磁場カップリングを測定し，コイルコイルアクチュエータにおける磁場雑音のダウンコンバージョンを初めて実証した．

以上の実験ではコイルコイルアクチュエータを 1 kHz の電流で駆動していたが，さらなる磁場雑音の低減のために，さらに高周波の 100 kHz で駆動する実験も並行して行った．しかし，回路の問題で 100 kHz での制御には成功しておらず，高周波用の回路に改良する必要があることが分かった．

今後はコイルコイルアクチュエータの原理的な雑音である熱雑音の評価を進め，TOBA のアクチュエータとして十分な性能があることを確認する．

地面振動雑音低減手法の検討・開発

TOBA の主要な雑音の一つが地面振動雑音である．地面の回転が伝達され振り子が回転する回転地面振動雑音と，地面の並進が何らかの非対称性を介して振り子の回転信号に伝達される並進地面振動カップリング雑音，に大きく分けることが出来る．特に後者のカップリング雑音が支配的となることが前年度の計算により明らかになっており，雑音低減のためには非対称性の適切な低減手法を懸架系に組み込む必要がある．今年度は具体的な低減手法の考案を行い，やや簡易なセットアップを用いて低減実証実験を行った．

TOBA では懸架した試験マスの両端を鏡面として干渉計を構成し，干渉信号によって両端の差動（＝回転）を読み取る構成となっている．このような構成でのカップリングの経路には，(1) 重心位置や質量分布のズレによるマスの傾き，(2) 試験マス上の干渉計用の鏡面の傾き，(3) 干渉計のビームスポットの高さズレ，などがある [24][46]．(1) の経路に関して，現在開発を進めている Phase-III TOBA ではマスの傾きを 2.5 nrad の精度で調整する必要があり，これを実現するため懸架系に質量分布調整機構と傾き微調整用のアクチュエータを導入した．(2) の低減のためには試験マス両端の鏡面が約 1 μrad の精度で平行である必要があり，このため側面を一体研磨・コーティングした試験マスを製作した．(3) に関してはビームスポットの傾きを約 1 μrad の精度で調整する必要があり，ピコモーターによるビームスポット調整機構を導入した．

これらの要素を組み込んだ懸架系を構成してカップリング伝達関数の計測・低減実験を行った．計測結果は (1) (3) から計算される伝達関数と概ね一致しており，上記の経路でカップリングが説明できることが確認された．また，質量分布調整とアクチュエートによってマスの傾きを調整することでカップリングが低減できることもそれぞれ実証された．調整量から計算されるカップリングの変化量も計測結果と一致しており，低減手法に関しても理論通りであることが確認された [10][36]．これらによって雑音低減の流れが実証されたため，今後は調整精度を上げることでさらなる低減を進めていく予定である．

6.6.4 相対論 · 量子光学精密実験

三角光共振器を用いたオプトメカニクス研究

熱浴から十分に孤立した質量の大きな振動子は，質量依存性のある未知の量子デコヒーレンス (重力デコヒーレンス) の検証や，空間の最小単位の高精度な検証など，様々な基礎物理に実験的な知見を与える可能性を秘めている．これらの検証のため，我々は重力波検出器で用いられているような細線で懸架された鏡に着目し，レーザー光を利用して mg 程度の懸架鏡の機械振動モードを基底状態まで冷却することを目指している．

まず，懸架鏡の振り子モードを基底状態まで冷却する手法の原理検証を行った．共振周波数の低い懸架鏡においては，基底状態まで冷却するにはフィードバック冷却が必要となるが，mg スケールの鏡にアクチュエータを取り付けることは困難である．そこで，三角光共振器を構成する別の大きな鏡にアクチュエータを取り付け，この大きな鏡と mg 鏡を光ばねで束縛することで，光ばねを介し遠隔的に mg 鏡を冷却する手法を用いた．これにより，振り子モードの実効温度を 15 ± 3 mK まで冷却することに成功した．また，基底状態まで冷却された場合にその基底状態を保つ周期数を実測し，懸架鏡の共振周波数 2.14 Hz を光ばねで 1.06 kHz まで上昇させた効果で，周期数を 10^{-11} 程度から 10^{-7} 程度と 4 桁改善することにも成功した [4]．

続いて，懸架鏡の振り子モードよりもねじれモードの方が，その共振周波数の低さゆえに熱雑音が小さく，基底状態冷却に有利であることを見出した．様々な共振周波数をもつねじれ振り子の Q 値を実測し，その Q 値が一定であることから，高周波で熱雑音が小さくなる structure damping model に従っていることを確認した．そして，基底状態冷却の必要条件であるレーザー光の量子輻射圧揺らぎ観測に向けて，ねじれ振り子の両端で三角共振器を構築するセットアップを考案し，様々な雑音の見積もりを行った．ねじれモードを読み出すため両腕で光共振器を組みその差動信号を得るが，この構成はレーザー光の古典的な雑音が同相雑音除去される点でも優れている．結果として，すでに達成されているパラメータを用いて，1 桁以上の広い周波数帯で量子輻射圧揺らぎが支配的になるような設計に成功した [43]．

一方で，同相雑音除去の効果で要求値が緩和されるとはいえ，レーザー光の周波数および強度の安定化は必要である．そこで周波数安定化のための参照共振器や強度安定化用のフォトディテクターを乗せたプラットフォームを組み上げ，真空装置内で懸架し，周波数雑音，古典強度雑音の評価を行った．結果として，それぞれ要求値を満たす安定度を実現した [33]．今後は，ねじれ振り子共振器の組み立てに取り組み，両腕の共振器ロック，量子輻射圧揺らぎ観測に挑戦する予定である．

光学浮上鏡の開発

熱浴から十分に孤立した巨視的な振動子の実現を目指し, 振り子とは別の手法として，鏡を光輻射圧で浮上させる方法の開発を行っている．基底状態への到達を目指すにあたって，振り子の場合には鏡の懸架に伴う熱雑音が問題となりうることが分かっていた．そこでそのような熱雑音を導入しない鏡の支持方法として，光輻射圧で鏡を浮上させることが考えられる．光学浮上鏡が実現されれば，その他の雑音を十分に低減することで基底状態への到達が見込まれている．この光学浮上が可能となるためには，浮上した鏡が安定となる必要がある．安定な構成として，私たちは鏡の上下から光を当てるサンドイッチ構成を提案し，その実現に向けてこれまでに 1.6 mg の浮上鏡の製作とねじれ振り子を用いた基礎実験を行ってきた．浮上鏡は mg 程度以下かつ曲率つきという条件があり，このような鏡の製作は容易ではない．そこでねじれ振り子の端に鏡をつけることで微小な力を感じうる系を作り，この鏡を用いてファブリ・ペロー共振器を作ることで光学浮上に向けた技術開発を行ってきた．また基礎実験を超えて実際にねじれ振り子を用いてサンドイッチ構成の安定性の検証を行うべく，装置を設計し直して組み上げた．その上で装置の特性評価を行い，要求値を満たす仕様であることを確認した．本年度はサンドイッチ構成の安定性検証のためにねじれ振り子の制御と共振周波数の測定のための改良を行った．今後はこの装置を用いてサンドイッチ構成の検証を行い，光学浮上鏡の実現を目指していく．

光リング共振器を用いた光速の異方性検証

アインシュタインの特殊相対性理論によるとローレンツ不変性は宇宙の基本的な対称性である．しかし，量子重力理論の研究や宇宙マイクロ波背景放射の観測から，あるエネルギースケールではローレンツ不変性が破れている可能性が示唆されている．したがってローレンツ不変性を高い精度で検証することが重要である．

ローレンツ不変性の検証実験の中で，古くから行われているものに光速の異方性探査実験がある．特に，マイケルソン-モーレー型の干渉計を用いた実験は数多く行われており，直交する方向で往復する光速の差を測定することができる．ところが，このタイプの実験では光速の行きと帰りの差，つまり片道光速の異方性を測定することはできない．そこで我々はこの片道光速の異方性に着目し，その探査実験を行っている．

光速の行きと帰りの差は，非対称な光リング共振器を用いて測定することができる．非対称性は光リング共振器の中にシリコンを入れ，光路の一部の屈折率を変えることで導入している．この非対称性により，片道光速の異方性が存在すると，この光リング共振器の時計回りの共振周波数と反時計回りの共振周波数に差が生じる．この差をダブルパスという光学系構成により測定し，異方性の null 測定が可能となる．また，この測定を光リング共振器を回転させながら行うことで，異方性信号の変調を行う．

我々はこれまでに一年間に渡る異方性探査を行い，片道光速の異方性に世界最高精度となる 10^{-15} レベルの上限値をつけた．さらに拡張標準理論と呼ばれる検証理論の枠組みでデータ解析を行い，光子における高次のローレンツ不変性の破れを表すカモフラージュ係数のうち，奇パリティ成分へ世界最高精度の，または世界初の上限値をつけた．

これまでの感度は装置の回転に伴う雑音によって制限されていた．今年度はさらなる高い精度での検証を目指し，以下の二つの装置改良を進めた．まず初めに，これまで電気配線上の問題で右回りと左回りを交互に回転させていたが，より安定的に回転させるために連続回転を実現するための改良を行なった．次に，振動感度の低いセミモノリック光学系を用いた光リング共振器制御系の開発を行なった．また，装置の回転に伴う雑音源の一つとして環境磁場が問題になることがわかったため，磁場の影響をキャンセルする解析手法を確立した．

今後はこれまで独立に開発してきた回転機構と光学系を組み合わせて雑音レベルを評価し，感度向上を目指す．

打撃中心を用いた感度向上の実証

ねじれ振り子を用いた精密測定を行う際，装置の非対称性などに起因して並進方向の地面振動から回転方向へのカップリングが生じる．通常はカップリングを抑えることを目指すが，逆にカップリングを利用して並進と回転の運動を打ち消すことで雑音レベルを下げる手法が提唱されている．

物体が並進運動と回転運動の両方をしているとき，並進と回転がちょうど打ち消しあうような点が存在する．これを打撃中心 (Center of percussion, COP) という．COP 付近で並進方向の運動を測定すると，地面振動による雑音を大きく抑えることができる．しかし現実的な精度で測定点を COP に合わせるには，懸架点を重心から大きくずらすなど，大きな非対称性が必要なことがわかっている．

本年度は，準備実験として強い非対称性を持つねじれ振り子を磁気浮上させて水平に制御する実験が進められた．その結果浮上には成功したが，検証実験ができるほどの安定性を確保することはできなかった．今後は制御をより安定化し，実際に検証実験を行うことを目指していく．

＜受賞＞

[1] Yuta Michimura: Tests of Lorentz Invariance with an Optical Ring Cavity, Springer Thesis Prize (May 2016).

[2] 榎本雄太郎: 東京大学 理学部学修奨励賞 (2016 年度).

＜報文＞

(原著論文)

[3] K. Eda, A. Shoda, Y. Kuwahara et al.: All-sky coherent search for continuous gravitational waves in 6-7 Hz band with a torsion-bar antenna, PTEP 1, 011F01 (2016).

[4] T. Nakamura, M. Ando, T. Kinugawa, et al.: Pre-DECIGO can get the smoking gun to decide the astrophysical or cosmological origin of GW150914-like binary black holes, PTEP 9, 930 (2016).

[5] Y. Kuwahara, A. Shoda, K. Eda, et al.: Search for a stochastic gravitational wave background at 1-5 Hz with a torsion-bar antenna, Phys. Rev. D 94, 92003 (2016).

[6] N. Matsumoto, K. Komori, S. Ito, Y. Michimura, Y. Aso: Direct measurement of optical-trap-induced decoherence, Phys. Rev. A, 94, 033822 (2016).

(国内雑誌)

[7] 安東正樹: 重力波望遠鏡を用いた地震速報, 日本物理学会誌 71 636 (2016).

[8] 安東正樹: ついに初観測! 重力波とはなにか, 本 10 月号 p.38 (講談社, 2016).

(学位論文)

[9] 有冨尚紀: ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA のためのモノリシック干渉計の開発, 修士論文 (2017 年 3 月).

[10] 下田智文: ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA のための 地面振動雑音低減法の研究, 修士論文 (2017 年 3 月).

(著書)

[11] 安東正樹: 重力波とはなにか, 講談社ブルーバックス (2016).

[12] 安東正樹: 重力波の初観測と重力波天文学の幕開け, 理科年表 (丸善出版, 2016).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[13] Yuta Michimura: KAGRA MIF Status Report, 16th KAGRA Face to Face Meeting (Mar 2017, Niigata).

[14] Yuta Michimura: KAGRA+ planning, 16th KAGRA Face to Face Meeting (Mar 2017, Niigata).

[15] Takafumi Ushiba, Development of cryogenic system in KAGRA, Workshop on Gravitational Wave activities in Taiwan (Jan. 2017, Academia Sinica, Taipei, Taiwan).

[16] Yuta Michimura for the KAGRA Collaboration: Status of KAGRA, ELiTES 5th general meeting (Feb 2017, Tokyo).

[17] Takafumi Ushiba , Status on Cryogenic payload of KAGRA, The 5th ELiTES general meeting (Feb. 2017, Toyama Univ., Toyama, Japan).

[18] Yuta Michimura: KAGRA MIF Status Report, 15th KAGRA Face to Face Meeting (Dec 2016, Tokyo).

[19] Tomofumi Shimoda, Naoki Aritomi, Masaki Ando: Current Status of TOBA experiment at Univ. of Tokyo, E-GRAAL (Earthquake GRAvity ALerts) 2nd meeting (Oct. 2016, Institut de physique du globe de Paris).

[20] Yuta Michimura: KAGRA MIF Status Report, 14th KAGRA Face to Face Meeting (Aug 2016, Toyama).

[21] Yuta Michimura: Summary of iKAGRA Run, 14th KAGRA Face to Face Meeting (Aug 2016, Toyama).

[22] Takafumi Ushiba, Mechanical loss measurement for KAGRA sapphire suspension system, The 1st international meeting on KAGRA (Jun. 2016, KISTI, Daejeon, Korea).

[23] N. Aritomi, T. Shimoda, K. Komori, Y. Kuwahara, Y. Michimura, A. Shoda, Y. Aso, R. Takahashi, K. Kazuhiro, M. Ando: Coil-Coil Actuator for reduction of magnetic noise, GWADW2016 (May 24th, 2016, Elba, Italy).

[24] Tomofumi Shimoda, Naoki Aritomi, Yuya Kuwahara, Yuta Michimura, Ayaka Shoda, Yoichi Aso, Ryutaro Takahashi, Kazuhiro Yamamoto, Masaki Ando: Reduction of Seismic Coupling Noise for TOBA, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop (May 24th, 2016, Elba, Italy).

招待講演

[25] Masaki Ando: Observation of Gravitational Waves, Physics in LHC and the Early Universe (Jan. 10th, 2017, The University of Tokyo, Tokyo).

[26] Masaki Ando: KAGRA : a Cryogenic Interferometric Gravitational-Wave Antenna Gravitational Wave Astronomy with Present and Future Detectors (Aug. 22nd, 2016, Yangpyeong, Korea).

[27] Yuta Michimura for the KAGRA Collaboration: Recent news and status of the KAGRA gravitational wave telescope, Optical Society of Korea Summer Meeting 2016 (Jul 2016, Busan).

[28] Masaki Ando: Space Gravitational-Wave Antenna: DECIGO and Pre-DECIGO, GWPAW2016 (June 15th, 2016, Cape Cod, Massachusetts, USA).

[29] Masaki Ando: 重力波天文学の幕開けと将来 The First Direct Detection of Gravitational Wave, Space Science Colloquium (April 27th 2016, ISAS-JAXA, Sagamihara).

[30] Masaki Ando: KAGRA : a Gravitational-Wave Antenna in Japan, Korean Physical Society Spring Meeting (April 21st 2016, Daejon Convention Center, Daejon, Korea).

(国内会議)

一般講演

[31] 道村唯太, 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 苔山圭以子, 廣瀬榮一, 阿久津智忠, 榎本雄太郎, 小森健太郎, 有冨尚紀, 下田智文, 新井宏二, 山本博章: 重力波望遠鏡 KAGRA の低温動作に向けた主干渉計開発, 日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月, 大阪大学).

[32] 牛場崇文, 宮本昂拓, 山元一広, 上田綾子, 都丸隆行, The KAGRA cryogenic group, KAGRA 低温懸架系のための低温変位センサーの開発, 日本物理学会 2017 年春季大会 (2017 年 3 月, 大阪大学, 大阪).

[33] 小森健太郎, 松本伸之, Ooi Ching Pin, 道村唯太, 安東正樹: ねじれ振り子での量子輻射圧揺らぎ観測に向けたレーザー光の周波数，強度安定化, 日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 19 日, 大阪大学).

[34] 和田祥太郎, 道村唯太, 桑原祐也, 牛場崇文, 松本伸之, 安東正樹: ねじれ振り子を用いた光学浮上の安定性検証 (2) 日本物理学会 第 72 回年次大会 (2017 年 3 月, 大阪大学).

[35] 有冨尚紀, Donatella Fiorucci, 下田智文, 桑原祐也, 道村唯太, 正田亜八香, 麻生洋一, 高橋竜太郎, 山元一広, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (6) : 変位センサ雑音および磁場雑音の低減, 日本物理学会 第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 19 日, 大阪大学).

[36] 下田智文, 有冨尚紀, 桑原祐也, 道村唯太, 正田亜八香, 麻生洋一, 高橋竜太郎, 山元一広, 安東正樹: ”ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (5) : 地面振動カップリング雑音の低減”, 日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 19 日, 大阪大学).

[37] 酒井譲, 武田紘樹, 道村唯太, 安東正樹: Lorentz 不変性検証のための連続回転機構の開発, 日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 19 日, 大阪大学).

[38] 武田紘樹, 酒井譲, 道村唯太, 松本伸之, 安東正樹: Lorentz 不変性検証のための光リング共振器制御系の開発, 日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 19 日, 大阪大学).

[39] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO 第 17 回宇宙科学シンポジウム (2017 年 1 月 6 日, 宇宙科学研究所, 相模原).

[40] 安東 正樹: DECIGO/B-DECIGO の概要第 15 回 DECIGO ワークショップ (2016 年 11 月 5 日, 東京大学, 東京).

[41] 道村唯太: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA プロジェクトの現状, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月, 宮崎大学).

[42] 牛場崇文, 田中宏樹, Kieran Craig, 山元一広, Rahul Kumar, 都丸隆行: KAGRA サファイア懸架系の機械的散逸測定, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月, 宮崎大学, 宮崎).

[43] 小森健太郎, 松本伸之, 道村唯太, 安東正樹: 量子輻射圧揺らぎ観測に向けた低熱雑音ねじれ振り子の開発, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 24 日, 宮崎大学).

[44] 和田祥太郎, 道村唯太, 桑原祐也, 牛場崇文, 松本伸之, 安東正樹: ねじれ振り子を用いた光学浮上の安定性検証, 日本物理学会 秋季大会 (2016 年 9 月, 宮崎大学).

[45] 有冨尚紀, 下田智文, 桑原祐也, 道村唯太, 正田亜八香, 麻生洋一, 高橋竜太郎, 山元一広, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (4) : 変位センサ雑音および磁場雑音の低減, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 24 日, 宮崎大学).

[46] 下田智文, 有冨尚紀, 桑原祐也, 道村唯太, 正田亜八香, 麻生洋一, 高橋竜太郎, 山元一広, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (3) : 地面振動カップリング雑音の低減, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 24 日, 宮崎大学).

[47] 武田紘樹, 道村唯太, 松本伸之, 安東正樹: 光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証の信号取得無線化による感度向上, 日本物理学会 2016 秋季大会 (2016 年 9 月 24 日, 宮崎大学).

招待講演

[48] 安東 正樹: 重力波天文学入門, 第 23 回 ICEPP シンポジウム (2017 年 2 月 19-20 日, 岳見山荘, 白馬, 長野).

(セミナー・アウトリーチ講演)

[49] 道村唯太: 重力波の初検出とこれから, 日本大学素粒子論研究室セミナー (2016 年 9 月, 日本大学).

[50] 安東 正樹: 重力波で探るブラックホールと宇宙－アインシュタインの相対論と新しい天文学－, 富山県教育フォーラム (2016 年 12 月 10 日, 富山国際会議場, 富山).

[51] 安東 正樹: 重力波で知る宇宙の不思議, サイエンスアゴラ 2016 「限界に挑戦する光科学」 (2016 年 11 月 06 日, 日本科学未来館, お台場).

[52] 安東 正樹: 重力波で宇宙を探る－アインシュタインの相対論と新しい天文学－, 高尾記念市民公開講座 (2016 年 10 月 30 日, ワテラスコモン ホール, 神田淡路町, 東京).

[53] 道村唯太: 重力波望遠鏡 KAGRA で聞く！ ブラックホール誕生の声, 朝日カルチャーセンター新宿教室「ブラックホール研究の最前線」 (2016 年 6 月, 東京).

[54] 安東 正樹: 重力波でみるブラックホールと宇宙, いわて銀河フェスタ 2016 (2016 年 8 月 20 日, 国立天文台水沢, 岩手).

[55] 安東 正樹: 重力波とブラックホール，そして宇宙, 2016 年七夕公開講演会「七夕の夜は宇宙を見上げて」 (2016 年 8 月 7 日, 法政大学 小金井キャンパス).

[56] 安東 正樹: 重力波でさぐる宇宙, 朝日カルチャーセンター講演 (2016 年 7 月 23 日, ルミネ横浜, 横浜).

[57] 安東 正樹: 重力波でさぐる宇宙, 第 28 回 東京大学理学部 公開講演会 (2016 年 4 月 24 日, 東京大学 安田講堂).

6.7 馬場・中澤研究室

6.7.1 はじめに

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、宇宙や大気圏内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、これら高エネルギー現象からくる 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。具体的には、「すざく」「Chandra」「XMM-Newton」「NuSTAR」などといった宇宙 X 線衛星の天体観測データを解析することで下記のような具体的な成果をあげた。また、将来の X 線天文衛星実現に向けて、開発を続けている。なお、本研究室は馬場研究室と中澤研究室が大講座制をしくことで本年度始まった。

6.7.2 「ひとみ」衛星とそのリカバリー

JAXA 宇宙科学研究所とともに我々が開発に取り組んできた ASTRO-H 衛星は、2016 年 2 月 17 日に種子島から打ち上げられ、「ひとみ」と命名された。打ち上げ後一ヶ月は立ち上げとともに試験運用が行なわれ、極めて重要なデータが得られた (各々の観測結果については、各項目参照)。しかし、同 3 月 26 日にトラブルで通信が途絶、そのまま運用終了となった。その後、失敗の原因を真摯に究明し、lessons learned の抽出・整理を行なった上で、「ひとみ」衛星はプロジェクトとして 2017 年 3 月末に終了した。現在は代替機打ち上げに向けた準備チームが立ち上がり、2021 年度の打ち上げを目指してミッション検討を進めている。

6.7.3 高密度天体の X 線研究

中性子星パルサーの系統的研究

中性子星は、太陽の 1.4 倍程度の質量が半径 10 km の中に閉じ込められている高密度天体で、形成時に親星の磁束を抱え込むことで、ときには 10^{15} G(= 10^{11} T) もの超強磁場を持つことが知られている。磁場の強い中性子星が自転すると、その磁場の影響で spin-down エネルギーの一部を解放し X 線を放出する。こうした天体を、中性子星パルサーと呼ぶ。しかし X 線放射に消費されるエネルギーの割合は天体によって、二桁程度ものばらつきがある。そこで我々は観測限界や距離の統計誤差をきちんと含んだ系統探査を行い、パルサーの spin-down エネルギーと X 線光度の関係を導いた (業績 [9])。また、spin-down エネルギーと同等の X 線光度、すなわち変換効率が ~ 1 の天体を複数発見した。これらは後述の極強磁場中性子星（マグネター）の年取ったなれの果てである可能性がある。

弱磁場中性子星への質量降着

表面磁場 10^9 G の弱磁場中性子星と太陽質量程度の小質量星が連星系をなし、後者から前者へ質量が降着している系を、中性子星 Low Mass X-ray Binary (NS-LMXB) という。一般に磁気圧よりガス圧の方が高いため自転周期はあまり見えず、中性子星表面の黒体放射、降着円盤、そしてコロナ（なんらかの高温電子雲）が周辺に発達すると考えられる。我々はこの 3 者で構成される統一的な物理描像で、暗くてハードなべきを持つ状態（low-hard state）から、明るくてソフトなスペクトルになる状態（high-soft state）まで、すべてのスペクトル状態が説明できると考え、研究を進めている。小野らは Aql X-1 という明るい NS-LMXB が low-hard state から high-soft state へまさ遷移する様子をとらえた「すざく」衛星の広帯域データを解析し、遷移時にコロナが衰退し、降着円盤と中性子星表面の黒体輻射が卓越してゆく様子を確認した。各成分のパラメータも物理的な条件を満たしつつ連続的に変化しており、我々の描像がさらに強化された [18]。

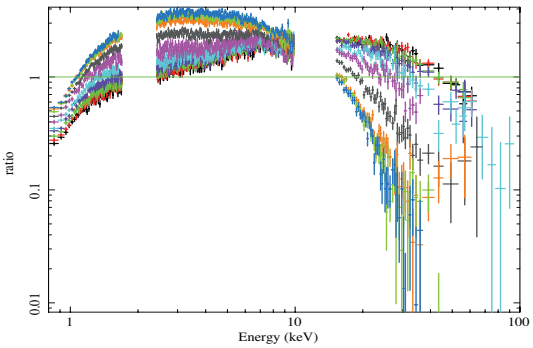

図 6.7.1: Aql X-1 の状態遷移時の X 線スペクトル。ベキ 2.0 のスペクトルと比をとって $\nu F\nu$ にしたもの。ハードなスペクトルから、ソフトなスペクトルに遷移している時間変動 [18]。

極強磁場中性子星の自由歳差運動

表面磁場が 10^{15} G に達する極端に磁場の強い中性子星をマグネターと呼ぶ。すでに報告したように、牧島、村上らは、京都大学の榎戸とともに (2014)、マグネター 4U 0142+61 の「すざく」データから、中性子星の自転周期 $P \sim 8.7$ sec に伴うパルス放射のうち、硬 X 線成分のみが、周期 $T_{prec} = 55$ ks で位相変調される現象を発見した。中性子星が、内部の強いトロイダル磁場によってレモン型に変形しており、自由歳差運動を起こしているとすれば、このような変調を説明できる。村上らはの自由歳差運動に伴う放射の時間変化を解析的に解き、変調のプロファイルが、変形度や放射領域の自転軸からのずれによって変化することを発見した。現在そのモデルを既存のマグネターデータに適用して、星の物理状態を探っているところである。

活動銀河中心核からの X 線放射

ブラックホールには、太陽質量 ($M_\odot$) の 10 倍程度の “恒星質量ブラックホール” と、ほぼすべての銀河の中心にあるとされ 10^5–10^{11} $M_\odot$ もの質量を持つ “巨大ブラックホール” が知られている。後者に周囲のガスが降着して明るく輝いているものは、活動銀河核 (active galactic nucleus : AGN) と呼ばれ、周囲に降着円盤やコロナ、少し離れて分子雲トーラス

があり、さらに周囲を囲む電離した吸収体やアウトフローと呼ばれる吹き出しに由来する様々な放射成分が見られる。あまりにも多種の成分が混在するため、これを正確に解釈して物理量を導出するのは容易ではない。三宅、清野は、東北大の野田らとともに、スペクトルの時間変動に着目し、これを詳しく調べることで各々の成分の寄与を分離することで、この謎を紐解く研究を進めている。

清野らは NGC 4051 という比較的軽くて変動が大きく、明るい AGN に着目し、数百秒で激しく変動するべき型スペクトルと、トーラスからと思われる変動のほとんど見られない反射成分に加え、数週間で変動するハードな成分をとらえた [59, 70]。さらに、より低いエネルギー帯域に見られるソフトエクセスと呼ばれる成分が、一つめのべき型スペクトルとともに変動していることを発見した [80]。三宅らは、SWIFT J2127.4+5654 という同様の AGN に着目し、ここでも数千秒で激しく変動するべき型スペクトル、数日間で変動する別のハード成分、そして反射成分を初めて分離した [41, 58, 83, 73]。このように、我々の手法は強力であり、今後も多くの天体に適用してゆく。

Ultra-Luminous X-ray sources (ULX)

ULX は、10 $M_\odot$ のブラックホールのエディントン限界 $L_{\rm Edd} = 1.5 \times 10^{39}$ erg/s を超える光度を持つ点源のことで、星形成の活発な銀河で時折見られる。その光度から、恒星質量ブラックホールと巨大ブラックホールの中間に位置する “中間質量ブラックホール” である可能性と、中性子星や恒星質量ブラックホールに大量の物質が降着し、エディントン限界を大きく超えて光っている天体である可能性がある。小林らは、10 個の ULX について、NuSTAR、XMM-Newton、「すざく」衛星のスペクトルを解析し、ULX が 3 種の X 線スペクトル状態をもつことを確認した。各々の天体で一定の光度でこのスペクトル状態を遷移すること、そしてその臨界光度が天体によって 30 倍ほど異なる兆候を得た。これは ULX の質量分布も同様に ∼30 倍の多様性を持ち、その中には中間質量ブラックホールも含まれることを示唆する [16, 45, 62]。

6.7.4 超新星残骸

超新星残骸は、星が死ぬ際に起こす大爆発の残骸であり、秒速数千 km の衝撃波が数万年にわたって広がってゆく激しい現象である。また、宇宙の熱的進化、化学進化、及び銀河宇宙線加速源として重要な役割を果たし、いわば「宇宙の多様性」の源と言ってよい。

衝撃波は星間物質や星からの ejecta を数百万度に温め、これらは X 線帯域で特性 X 線と熱的制動放射で激しく輝く。また、衝撃波で加速された電子はシンクロトロン放射を X 線帯域で出す。したがって、超新星残骸の加熱現象、加速現象ともに、X 線観測を用いた研究は非常に有効である。

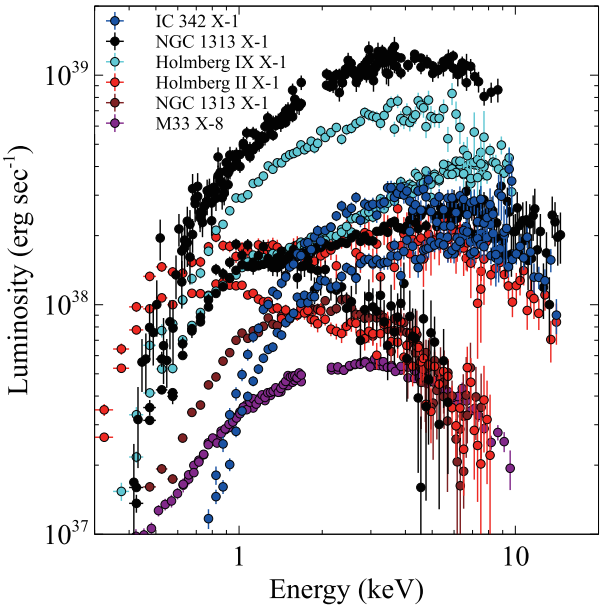

図 6.7.2: 複数の ULX のスペクトルを光度で比較したもの [45]。

宇宙線加速に関する大きな未解決問題の一つに、「どのような環境でより加速が起こるのか」という問題がある。衝撃波の速度が速いほど最大加速エネルギーは大きくなるため、周辺密度が薄い方がよいという説と、磁場増幅を助けるために周辺密度が高い方がよいという説があった。そこで我々は、RCW 86 という超新星残骸に着目した。この天体は熱的 X 線と非熱的 X 線の空間分布が異なるため、どのような環境で宇宙線加速が起こるのか調べるのに最適である。我々はスペクトル分解能にすぐれた「すざく」衛星のマッピングデータを用い、周辺密度の薄いところで加速電子からのシンクロトロン放射のカットオフエネルギーが高くなることを発見した (業績 [10])。これは、衝撃波の速度が減速しない密度の薄いところ、特に cavity などで最高エネルギーが大きくなりやすいことを示した初めての成果である。また、周辺密度とシンクロトロン放射強度に相関はなく、周辺密度は加速効率には大きな影響を与えていないことも示した。関連した成果として、非熱的 X 線のみで輝く超新星残骸 Vela Jr. からの硬 X 線の発見 (業績 [6])、最も若い超新星残骸カシオペア A の熱的 X 線減光の発見 (業績 [12]) もあげられる。

また、シンクロトロン X 線は若い超新星残骸にしか付随しておらず、典型的に 2000 年を超えた超新星残骸に存在する宇宙線については研究が遅れていた。近年 Fermi 衛星により比較的年老いた超新星残骸から GeV ガンマ線が見つかってきており、加速粒子の逃亡の現場ではないかと注目されている。このような逃亡の現場では、なぜか電子温度に対してイオンが電離されすぎた「過電離プラズマ」が見つかることが多い。これら二つに関連があるのか、関連があるとすればどのような物理があるのか、研究を始めている。いくつかの候補天体を新たに観測し (業績 [4, 11])、今後は系統的な研究につなげる予定である。

6.7.5 銀河団とその衝突・合体

「ひとみ」のペルセウス座銀河団観測

銀河団は数千に達する銀河が、Mpc のスケールに集まっている、宇宙最大の自己重力系である。その重力ポテンシャルには、大量のプラズマが閉じ込められており、総重量はメンバー銀河の総和の数倍もある。銀河団プラズマは断熱圧縮などで数千万度の高温になっており、制動放射 X 線で輝き、宇宙で最も明るい天体の一つである。あまりに明るいので、その中心付近では放射冷却の時間が宇宙年齢よりも 1 桁以上短い。冷たいプラズマは圧縮され、ますます X 線で明るくなるため、このままだと銀河団プラズマは暴走的に冷却してしまう。しかし、現実には銀河団でそのような暴走は見られず、なんらかの加熱がその冷却を支えていることがわかっている。そのエネルギーは膨大で大変興味深い現象であるが、その正体は未だ明らかでない。

銀河団中心部では活動銀河核がしばしば活発であり、エネルギー源の候補とされる。「ひとみ」衛星は、6.7 keV で 5 eV 程度と、エネルギー分解能 1000 を超える超精密 X 線分光ができ、この装置でペルセウス座銀河団中心部を 4 回観測した。このうち中心部のデータを迅速に解析したところ、そこで確認されたプラズマの速度分散が 164 ± 10 km/s と求まった [7]。プラズマ乱流が持つエネルギーは小さく、中心部の X 線光度と比較して 6000 万年分にしかならないことから、エネルギー源が何であれ、乱流を経由してエネルギーを注入しているのではないことが強く示唆された。

この観測で得られた超精密 X 線スペクトルは精度が高すぎたため、既存の放射モデルに多くのバグが発見された。あるべきはずの輝線が見えなかったり、存在を見落とされた輝線が確認されて、いずれも放射モデルの物理的解釈にバグ（近似の誤り）が見つかり、修正された。これとは別に XMM-Newton 衛星のデータで示唆され、ダークマターの対消滅線候補ともされた 3.5 keV の「謎の輝線」は、(細い輝線としては) 存在しないことが確認された [13]。これらのことは、「ひとみ」の超精密 X 線分光が根本的に異なる質のデータをもたらしたことを示している。

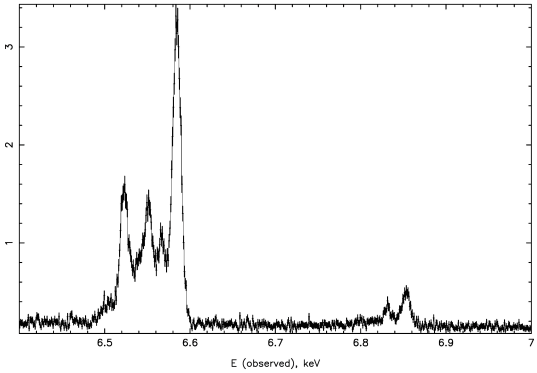

図 6.7.3: 「ひとみ」衛星で観測されたペルセウス座銀河団 ($z = 0.01756$) 中心部の超精密 X 線スペクトル。電離した Fe からの K 殻蛍光輝線が見えており、その幅からプラズマの乱流が求まる。6.7 keV (赤方偏移して 6.58 keV に見えている) の He-様共鳴線に加えて、初めて禁制線も綺麗に分離できている [7]。

衝突初期の銀河団の物理

加藤、中澤、Gu らは、銀河系から $z = 0.07$、距離 300 Mpc という近傍にある銀河団 CIZA J1358.9 − 4750 を「すざく」、XMM-Newton、Chandra 衛星で観測し、これが衝突の初期段階にある近傍の銀河団であることを発見し、その研究を進めてきた [48, 53]。中央に見られる衝撃波は誕生してから 7000 万年と非常に若く、その輝度のジャンプは非常にシャープであった。近傍宇宙で衝突初期の銀河団は 3 つしか知られておらず、しかも衝撃波を真横から見ているのはこの天体だけである [65]。Chandra のデータを詳細に解析したところ、エッジの幅は 10 kpc 未満でありクーロン相互作用の平均自由行程 25 kpc より有意に小さいことを発見した。これは無衝突衝撃波と呼ばれ、クーロン散乱ではなく、電磁相互作用が系を支配している系である。

衝撃波では速度差 ΔV を温度に変換するため、衝撃波直下では、質量の軽い電子と重いイオンでは後者の方が数千倍温度が高い。後者から前者へ熱を輸送するタイムスケールは、クーロン散乱だけを考えると、この衝撃波の年齢 7000 万年より数倍長いため、X 線で測られた電子温度が明確に上昇していることは、クーロン相互作用以外の熱輸送プロセスが効いている証拠である [75]。他の無衝突衝撃波での電子加熱を探るために、SN1006 の北西の衝撃波のデータを用いて衝撃波後方での電子温度の上昇を計測したところ、これがクーロン散乱の予言とよく一致することを見出した [78]。銀河団と SN1006 で衝撃波速度 ΔV は大きくは変わらない一方で、プレショックガスの温度の違いから、銀河団ではマッハ 1.3、SN1006 ではマッハ数百と考えらており、マッハ数の違いが電子加熱の違いに寄与している可能性がある。

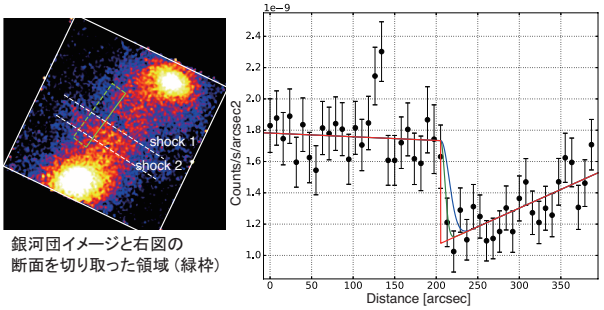

図 6.7.4: 初期衝突銀河団 CIZA J1358.9 − 4750 の衝撃波面の鋭さのスケール。7 kpc と 14 kpc の補助線と比較しても、クーロン散乱の平均自由行程 ∼ 25 kpc と比べて有意に鋭い [75]。

6.7.6 その他の宇宙 X 線観測研究

鉄までの重元素は、星が生きている間に核融合によって作られ、超新星爆発とともに宇宙空間にばらまかれる。一方それ以上の重元素に関しては、未だにその起源が明らかになっておらず、超新星爆発や中性子星同士の合体などが候補として研究されているのみである。現在考えられている機構は、まず中性子過剰核を形成し、ベータ崩壊させることでより元素番号の大きな元素を作る r-process である。r-process 現場の観測には、ベータ崩壊の際に放射される核ガンマ線の検出が最も効果的である。しかし、核ガンマ線は多くが数十 keV 以上に位置し、強度も弱いことから、今まであまり検討が進んでこなかった。

そこで我々は、まず近傍で起きた超新星爆発 SN2014J からの核ガンマ線を硬 X 線・軟ガンマ線帯域で非常に感度のよい「すざく」衛星で探索した。その結果、低いレベルの信号を受けることが出来、この手法が有効であることを突き止めた (業績 [2])。また、中性子星同士の合体でどの程度の核ガンマ線が放射されるか、将来の衛星計画で補足可能かどうかの検証を行い、非常に近傍で中性子星合体が起これば補足可能であることを示した (業績 [3])。中性子星合体は重力波源として最も注目される天体の一つであり、今後の連携が楽しみである。

6.7.7 雷雲ガンマ線の研究

雷雲から時に、数十 MeV に達するガンマ線が放射される。雷雲中で 200 kV/m 以上の電場が生じると、電離損失が最も少ないエネルギー (∼ 100 keV) では、電子は減速せずむしろ加速される。つまり、100 keV 程度の種電子があれば、それは放射損失が卓越する 20–30 MeV まで一気に加速される。これを逃走電子加速と呼ぶ。さらに、加速された電子は雪崩増幅され、明るい制動放射を生む。雷雲加速器は、人類に知られている唯一の「磁場に依存しない天然の静電場加速器」であり、非常に興味深い。しかし、上記で述べた加速のモデルは決して確定したものではなく、加速の起きる場所、大きさ、増幅率、そして安定性など、多くの基礎的な性質がまだまだわかっていない。そこで、我々は、京都大学の榎戸氏や理研のグループなどとともに 2006 年から雷雲ガンマ線の観測実験 GROWTH (Gamma-Ray Observation of Winter THunder-clouds) を続けている。

過去 10 年間の雷雲ガンマ線の統合解析

楳本、中澤らはこれまでの 10 年分の観測データを用いて、数十秒継続するロングバースト 14 個の性質を調べた。最も明るい 2 つのイベントから、ガンマ線照射域の中心に近づくほど、スペクトルがハードになることを発見した。また風速から東西方向サイズを、断面を見たモニタリングポストのレートから南北サイズを導出し、照射域のサイズが概ね 1 km であることを示した。さらに、残る 12 個を含めて東西方向サイズと最大輝度を比較すると、暗いイベントほどサイズが大きいことを発見した [44, 85]。古田らはこの現象の Geant4 を用いた検証を進め、これらの観測的性質は、高度数百メートルにある電場加速器から電子が地上へ向けて照射している描像で概ね説明できることを確認した [86]。

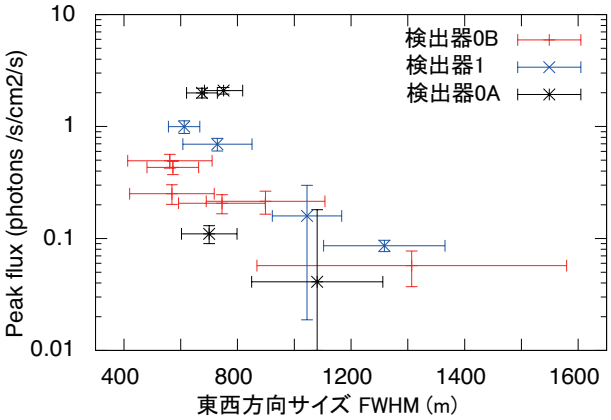

図 6.7.5: 雷雲ガンマ線ロングバーストのピーク光度と空間広がりの比較。

2016–17 年シーズンの観測

楳本らの結果を受けて、2016–17 年シーズンは京都大学の榎戸氏、OB の湯浅氏、原研の土屋氏らとともに、奥田、和田、古田、中澤がこれまでにない工夫を凝らした実験を行った。まず夏季に、乗鞍および富士山頂で予備実験を行った。次に、奥田らは、櫻井研究室からお借りした大型 BGO シンチレータ検出器を 8 台用いて、柏崎刈羽原発敷地内に、角度感度をもちガンマ線の照射方向を確認できる装置を立ち上げた [47, 87]。和田らは同じ BGO と既存のシンチレータを用いて、8 個の検出器を、金沢市、小松市、そして能登半島先端に新たに配置し、さらに 2 こを柏崎に設置した。この結果、ロングバーストを新たに 3 こ、数百ミリ秒の継続時間を持つショートバーストを 2 こ捉えた。ロングバーストの一つは雷放電とともに止まる瞬間途絶バーストである [46, 84]。また、柏崎で捉えた 1 月 16 日と 2 月 6 日のショートバーストは、非常に明るい上に 4 つの検出器で同時に捉えられた初めてのケースであり、ショートバーストについてこれまでにない多くの知見をもたらしている。現在も解析中である。

6.7.8 将来計画

X 線天文衛星代替機計画と、広帯域 X 線撮像観測 FORCE 衛星計画

X 線天文衛星代替機は、「ひとみ」の高精度分光装置を引き継ぎ、2021 年ごろの打ち上げを目指して開発が始まった衛星である。現在、プロジェクト立ち上げおよび企業との交渉へ向けた審査を精力的に進

図 6.7.6: 雷雲ガンマ線観測装置の設置 (2016/11)。

めているところである。馬場および中澤がチームに参加しており、今後急速に開発が進む。

代替機でカバーできない硬 X 線帯域を、「ひとみ」HXI の 1 桁良い角分解能と感度で実現することを目指しているのが、FORCE 計画である。NASA のゴダード宇宙センターで Zhang 博士を中心に開発されている新種の Si ミラーに、名古屋大で開発され「ひとみ」HXT で高性能を示した多層膜スーパーミラー技術、そして「ひとみ」HXI が示した世界最高のバックグラウンド除去技術を組み合わせることで、圧倒的な高性能の実現を目指す。中澤はこの衛星の開発活動をリードしており、2020 年代中頃の打ち上げを目指して、現在、技術レベルとサイエンスの検討を進めている。

MeV の将来計画

宇宙観測において真に未踏の波長帯域として、MeV がある。これまでに行われた最高感度の全天観測で検出された天体は 30 に過ぎず、GeV 衛星 Fermi と、硬 X 線全天探査を行った Swift/BAT が両方とも数千の天体を検出したことと比較して、圧倒的に遅れている。我々は「ひとみ」SGD で実用化した半導体コンプトンカメラを発展させて、MeV の感度向上の実現を目指している。現在 ESA へ提案されている eASTROGAM 衛星計画には、中澤が参加している [63]。2029 年打ち上げを目指した衛星であり、「ひとみ」HXI でも用いた日本の両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) 技術を大々的に採用することが検討されている。現在、ESA 内で審査中である。これとは別に、2017 年 2 月には日本の MeV コミュニティーの会合を主催し、日本として MeV 天体物理をどのように進めるかを議論した。数年後に立ち上げる気球実験、10 年後に立ち上げる衛星（あるいは長期気球実験）への技術およびサイエンスの見通しについて認識をそろえ、情報共有を進めた [92]。

＜受賞＞

[1] 石村康生、中澤知洋ほか、計 42 名、「ASTRO-H (ひとみ) 搭載機器のアラインメント性能」、日本機械学会宇宙工学部門一般表彰「スペースフロンティア」、2017 年 3 月 31 日。

＜報文＞

(原著論文)

[2] Y. Terada, K. Maeda, Y. Fukazawa, A. Bamba, Y. Ueda, S. Katsuda, T. Enoto, T.Takahashi, T. Tamagawa, F. K. R ¨ opke, A. Summa, R. Diehl, “Measurements of the Soft Gamma-ray Emission from SN2014J with Suzaku”, ApJ, 823, 43 (2016)

[3] K. Hotokezaka, S. Wanajo, M. Tanaka, A. Bamba, Y. Terada, and T. Piran, “Gamma-ray line emission from neutron star merger ejecta and its effects on the heating rate”, MNRAS, 459, 35-43 (2016)

[4] A. Bamba, M. Sawada, Y. Nakano, Y. Terada, J. Hewitt, R. Petre, L. Angelini, “New Identification of the Mixed-Morphology Supernova Remnant G298.6 − 0.0 with Suzaku”, PASJ, 68, S5 (2016)

[5] S. Yamauchi, M. Sumita, A. Bamba “Suzaku observations of two diffuse hard X-ray sources G22.0+0.0 and G23.5+0.1”, PASJ, 68, S6 (2016)

[6] S. Takeda, A. Bamba, Y. Terada, M.S. Tashiro, S. Katsuda, R. Yamazaki, Y. Ohira, W.B. Iwakiri, “Suzaku observations of the hard X-ray spectrum of Vela Jr.”, PASJ, 68, S10 (2016)

[7] Hitomi collaboration, Bamba, A., Nakazawa, K. et al.“The Quiet Intracluster Medium in the Core of the Perseus Cluster”, Nature, 535, 117–121 (2016)

[8] S. Katsuda, K. Maeda, A. Bamba, Y. Terada, Y. Fukazawa, K. Kawabata, M. Ohno, Y. Sugawara, Y. Tsuboi, “Soft and Hard X-Ray Components from Type IIn Supernovae: Evidence for Asphericity in the Circumstellar Medium”, ApJ, 832, 194 (2016)

[9] S. Shibata, E. Watanabe, Y. Yatsu, T. Enoto, A. Bamba,“X-ray and Rotational Luminosity Correlation and Magnetic Heating of the Radio Pulsars”, ApJ, 833, 59 (2016)

[10] Y. Tsubone, M. Sawada, A. Bamba, S. Katsuda, J. Vink,“A Systematic Study of the Thermal and Nonthermal Emission in the Supernova Remnant RCW 86 with Suzaku”, ApJ, 835, 34 (2017)

[11] M. Miceli, A. Bamba, S. Orlando, F. Bocchino, P. Zhou, S. Safi-Harb, Y. Chen, “XMM-Newton observation of the supernova remnant Kes 78 (G32.8-0.1): Evidence for shock-cloud interaction”, A&A, 599, 45 (2017)

[12] T. Sato, Y. Maeda, A. Bamba, S. Katsuda, Y. Ohira, R. Yamazaki, K. Masai, H. Matsumoto, M. Sawada, Y. Terada, J. P. Hughes, M. Ishida, “Muti-year X-Ray Variations of Iron-K and Continuum Emissions in the Young Supernova Remant Cassiopeia A”, ApJ, 836, 225 (2017)

[13] Hitomi Collaboration, Bamba, A., Nakazawa, K. et al.,“Hitomi Constraints on the 3.5 keV Line in Perseus”, ApJL, 837, L15 (2017)

[14] M. Ohno, et al. (incl, K. Nakazawa), "Development and verification of signal processing system of avalanche photo diode for the active shields onboard ASTRO-H" , *NUCL. INSTRUM. METHODS PHYS. RES. A* **831**, 410–414 (2016)

[15] G. Sato, et al. (incl K Nakazawa), "The Si/CdTe semiconductor camera of the ASTRO-H Hard X-ray Imager (HXI)" *NUCL. INSTRUM. METHODS PHYS. RES. A* **831**, 235–241 (2016)

[16] Kobayashi, S. B., Nakazawa, K., & Makishima, K.: "*Suzaku* Observations of Spectra Variations of the Ultra-Luminous X-ray Source Holmberg IX X-1" , PASJ, 69, 4 (2017)

[17] Inoue, Y., Lee, S., Tanaka, Y. T., & Kobayashi, S. B. : "High energy gamma rays from nebulae associated with extragalactic microquasars and ultra-luminous X-ray sources" , ELSEVIER, 90, 14 (2017)

[18] Ono, K., Makishima, K., Sakurai, S., Zhang, Z., Yamaoka, K., Nakazawa, K.: "A Hard-to-Soft State Transition of Aquila X-1 Observed with Suzaku", PASJ, in press (2017)

[19] Miyake, K., Noda, H., Yamada, S., Makishima, K., & Nakazawa, K.: "The new primary X-ray component confirmed in the Seyfert I galaxy IC 4329A" , PASJ, 68, S28 (2016)

[20] Mori, H., Maeda, Y., Ueda, Y., Nakazawa, K., Tawara, Y., "Suzaku and Chandra observations of CIZA J1700.8-3144, a cluster of galaxies in the Zone of Avoidance", PASJ, 69, 3 (2017)

[21] Noda, H., Minezaki, T., Watanabe, M., Kokubo, M., Kawaguchi, K., Itoh, R., Morihana, K., Saito, Y., Nakao, H., Imai, M., Moritani, Y., Takaki, K., Kawabata, M., Nakaoka, T., Uemura, M., Kawabata, K., Yoshida, M., Arai, A., Takagi, Y., Morokuma, T., Doi, M., Itoh, Y., Yamada, S., Nakazawa, K., Fukazawa, Y., Makishima, K., "X-Ray and Optical Correlation of Type I Seyfert NGC 3516 Studied with Suzaku and Japanese Ground-based Telescopes", ApJ, 828, 78, (2016)

[22] Gu, L., Wen, Z., Gandhi, P., Inada, N., Kawaharada, M., Kodama, T., Konami, S., Nakazawa, K., Xu, H., Makishima, K., "Galaxy Infall by Interacting with Its Environment: A Comprehensive Study of 340 Galaxy Clusters", ApJ, 826, 72 (2016).

[23] Ohmori, N., Yamaoka, K., Ohno, M., et al. (incl. K. Nakazawa), "Suzaku Wide-band All-sky Monitor measurements of duration distributions of gamma-ray bursts", PASJ, 68, S30 (2016)

[24] Nakazawa, K., Kato, Y., Gu, L., Kawaharada, M., Takizawa, M., Fujita, Y., Makishima, K., "Suzaku observation of a high-entropy cluster Abell 548W" , PASJ, 68, S21 (2016)

[25] Ono, K., Sakurai, S., Zhang, Z., Nakazawa, K., Makishima, K., "A Suzaku observation of the low-mass X-ray binary GS 1826-238 in the hard state", PASJ, 68, S14 (2016)

[26] Zhang, Z., Sakurai, S., Makishima, K., Nakazawa, K., Ono, K., Yamada, S., Xu, H., "Suzaku Observation of the High-inclination Binary EXO 0748-676 in the Hard State", ApJ, 823, 131, (2016)

[27] Makishima, K., Enoto, T., Murakami, H., Furuta, Y., Nakano, T., Sasano, M., Nakazawa, K., "Evidence for a 36 ks phase modulation in the hard X-ray pulses from the magnetar 1E 1547.0-5408", PASJ, 68, S12 (2016)

(会議抄録)

[28] A. Sezer, R. Yamazaki, X. Cui, A. Bamba, Y. Ohira, "Searching for the time variation in supernova remnant RX J1713.7−3946", Proceeding of "Supernova Remnants: An Odyssey in Space after Stellar Death", 30 (2016)

[29] A. Sezer, K. Auchettl, K., R. Yamazaki, A. Bamba, "Searching for evidence of non-thermal X-ray emission from supernova remnant W49B", Proceeding of "Supernova Remnants: An Odyssey in Space after Stellar Death" 31 (2016)

[30] J. Shimoda, T. Inoue, Y. Ohira, R. Yamazaki, A. Bamba, J. Vink, "Importance of Richtmyer-Meshkov Instability on Measurements of Cosmic-Ray Acceleration Efficiency at Supernova Remnants", Proceeding of "Supernova Remnants: An Odyssey in Space after Stellar Death" 103 (2016)

[31] M. Miceli, A. Bamba, S. Orlando, F. Bocchino, "Investigating the galactic Supernova Remnant Kes 78 with XMM-Newton", Proceeding of "Supernova Remnants: An Odyssey in Space after Stellar Death" 142 (2016)

[32] M. Miceli, A. Bamba, S. Orlando, F. Bocchino, "Investigating the galactic Supernova Remnant Kes 78 with XMM-Newton", Proceeding of "XMM-Newton: The Next Decade" 54 (2016)

[33] Hitomi collaboration, Bamba, A., Nakazawa, K., et al., "The ASTRO-H (Hitomi) x-ray astronomy satellite", Proceedings of the SPIE, 9905, 99050U (2016)

[34] Nakazawa, K., Sato, G., Kokubun, M., et al., "The hard x-ray imager (HXI) onboard ASTRO-H", Proceedings of the SPIE, 9905, 990511, (2016)

[35] Watanabe, S., Tajima, H., Fukazawa, et al. (incl. K. Nakazawa), "The soft gamma-ray detector (SGD) onboard ASTRO-H", Proceedings of the SPIE, 9905, 990513 (2016)

[36] Tatischeff, V., Tavani, M., von Ballmoos, P., Hanlon, L., Oberlack, U., et al. (incl. K. Nakazawa) "The e-ASTROGAM gamma-ray space mission", Proceedings of the SPIE, 9905, 99052N (2016)

[37] Mori, K., Tsuru, T. G., Nakazawa, K., Ueda, Y., Okajima, T., Murakami, H., Awaki, H., Matsumoto, H., Fukazawa, Y., Tsunemi, H., Takahashi, T., Zhang, W. W., "A broadband x-ray

imaging spectroscopy with high-angular resolution: the FORCE mission", Proceedings of the SPIE, 9905, 99051 (2016)

[38] Miyake, K., Saito, S., Nakano, T., Hagino, K., Kobayashi, B., S., Okuda, K., Mimura, Sato, G., Watanabe, S., Kokubun, M., Nakazawa, K., Takeda, S., Tajima, H., Fukazawa, Y., & Takahashi, T.: "Effects on hard x-ray response of a double-sided Si strip detector caused by interstrip surface charge", Proceedings of the SPIE, 9968, 99680D (2016)

[39] H. Tsunemi, K. Hayashida, T.G. Tsuru, T. Dotani, H. Nakajima, N. Anabuki, R. Nagino, T. Tanaka, H. Uchida, M. Ozaki, C. Natsukari, H. Tomida, S. Ueda, M. Iwai, M. Nobukawa, J.S. Hiraga, T. Kohmura, H. Murakami, K. Mori,, M. Yamauchi, I. Hatsukade, Y. Nishioka, A. Bamba, K.K. Nobukawa, J. Doty, "Soft x-ray imager (SXI) onboard ASTRO-H", Proceedings of the SPIE, 9905, 990510 (2016)

[40] Y. Terada, K. Maeda, Y. Fukazawa, A. Bamba, Y. Ueda, S. Katsuda, T. Enoto, T. Takahashi, T. Tamagawa, F.K. Röpke, A. Summa, R. Diehl, "Soft Gamma-ray Observation of SN2014J with Suzaku", Proceedings of the 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC2016), 010306 (2016)

[41] Miyake, K., Noda, H., Yamada, S., Makishima, K., & Nakazawa, K.: "The new primary X-ray spectral component of IC4329A confirmed with *Suzaku* and *NuSTAR*", 7 years of MAXI, in press, (2016)

[42] Ono, K., Makishima, K., Sakurai, S., Zhang, Z., Yamaoka, K., Nakazawa, K.: "Unveiling the spectral transition of Aql X-1 from the hard to soft state", 7 years of MAXI, in press, (2016)

[43] Wada, Y., Yuasa, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Hayashi T., & Ishida, M.: "NuSTAR observations of the Dwarf Nova GK Persei in 2015: comparison between outburst and quiescent phases", "20th European White Dwarf Workshop" conference proceedings, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, in press (2016)

(国内雑誌)

(学位論文)

[44] 楳本大悟:「10 年間の継続観測に基づく冬季雷雲由来ガンマ線の研究」、博士学位論文

[45] Kobayashi, S., "Studies of astro-physical properties of Ultra Luminous X-ray sources" (超高光度 X 線源の X 線スペクトルの研究)、博士学位論文

[46] 和田　有希 :「雷雲ガンマ線の多地点検出に向けた観測網の構築」、修士学位論文

[47] 奥田　和史: 「雷雲内で加速される電子による制動放射ガンマ線の角度分布の測定」、修士学位論文

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[48] Y. Kato, K. Nakazawa, L. Gu, T. Akahori, M. Takizawa, Y. Fujita, A. Simionescu, and K. Makishima, "Observation of a nearby early merging cluster of galaxies, CIZA J1358.9-4750: new born shocks in the ICM", 15th HEAD meeting of the American Astrophysics Society, 3–7 April 2016, Naples, Florida, USA

[49] H. Murakami, K. Makishima, T. Enoto, U. Furuta, T. Nakano, K. Nakazawa "A new approach to observe toroidal magnetic fields of magnetars" "XMM-Newton Science Workshop: The Next Decade", 9–11 May 2016, ESAC, Madrid, Spain

[50] Ono, K., Sakurai, S., Zhang, Z., Nakazawa K., Makishima K.: "Hard-to-soft state trainsition of the Neutron Star LMXB Aquila X-1" , "XMM-Newton: The Next Decade", 9-11 May 2016, Madrid, Spain (Poster)

[51] Kobayashi, S., Nakazawa, K., Makishima, K.: "A New Characterization of the ULX Spectra via Comptonization", "ULXs and their environments", 13–16 June 2016, Observatoire de Strasbourg, Strasbourg, France, talk

[52] Ono, K., Sakurai, S., Zhang, Z., Nakazawa K., Makishima K.: "Estimation of the magnetic field and accretion flow geometry of Low Mass X-ray Binaries", "European Week of Astronomy and Space Science" 4-8 July 2016, athen, Greece, (poster)

[53] Kato, Y., "X-ray observation of shocks within the plasma in clusters of galaxies", "6th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasma", 11-16 July 2016, Tsukuba, Japan

[54] Wada, Y., Yuasa, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Hayashi T., & Ishida, M.: "NuSTAR observations of the Dwarf Nova GK Persei in 2015: comparison between outburst and quiescent phases", "20th European White Dwarf Workshop", 25–29 July 2016, the University of Warwick, Coventry, UK (talk)

[55] Miyake, K., Saito, S., Nakano, T., Hagino, K., Kobayashi, B., S., Okuda, K., Mimura, Sato, G., Watanabe, S., Kokubun, M., Nakazawa, K., Takeda, S., Tajima, H., Fukazawa, Y., & Takahashi, T.: "Effects on hard x-ray response of a double-sided Si strip detector caused by interstrip surface charge", "SPIE Conferences + Exhibitions, Hard X-Ray, Gamma-Ray, and Neutron Detector Physics XVIII", 2016 August 28–September 1, San Diego, California United States (talk)

[56] Kobayashi, S., Nakazawa, K., Done, C.: "Comparing ULXs with the other High-Eddington Sources", "Breaking the Limits", 19–23 September 2016, Arbtax Park, Sardegna, Italy (talk)

[57] Ono, K., Makishima, K., Sakurai, S., Zhang, Z., Yamaoka, K., Nakazawa, K.: “Unveiling the spectral transition of Aql X-1 from the hard to soft state”, “7 years of MAXI: Monitoring X-ray Transients, 5-7 December 2016, Wako, Japan”, 5-7 December 2016, Wako, Japan (talk)

[58] Miyake, K., Noda, H., Yamada, S., Makishima, K., & Nakazawa, K.: “The new primary X-ray spectral component of IC4329A confirmed with *Suzaku* and *NuSTAR*”, 7 years of MAXI, id P-32, 2016 December 5–7, RIKEN, Wako, Japan (poster)

[59] Seino, M., Noda, H., Miyake, K., Nakazawa, K., Makishima, K. ”X-Ray Spectral Variability of the Narrow-Line Seyfert 1 Galaxy NGC 4051 Observed with Suzaku”, “7 years of MAXI: Monitoring X-ray Transients, 5-7 December 2016, Wako, Japan”, 5-7 December 2016, Wako, Japan (poster)

[60] Kazuhiro N., et al. “The Hard X-ray Imager onboard Hitomi (ASTRO-H)”, “7 years of MAXI: Monitoring X-ray Transients, 5-7 December 2016, Wako, Japan”, 5-7 December 2016, Wako, Japan (poster)

招待講演

[61] A. Bamba, “X-ray observations of supernova remnants - environment study of acceleration sites -”, “Cosmic Ray Origin - beyond the standard models - “, 19–23 September 2016, San Vito di Cadore, Italy

[62] Kobayashi, S. B., “Ultra Luminous X-ray sources: one of the most curious objects in the universe”, “Ultra Luminous X-ray sources workshop”, 6–7 March 2017, ISAS, Kanagawa, Japan

[63] K. Nakazawa, “Filling the gap between MeV and GeV – eASTROGAM and CAST –”, “The extreme Universe viewed in very-high-energy gamma rays 2016”, December 15–16, 2016, in Kashiwa, Japan

[64] K. Nakazawa, “In orbit performance of Hitomi X-ray observatory and beyond”, “INTEGRAL work shop 2016”, 10–14 October, 2016, Amsterdam, Netherland

[65] Y. Kato, “CIZA J1358.9-4750: an early-phase merger clusters of galaxies exhibiting a twin shocks”, “the workshop on the early-phase merging clusters”, February 8 2017, SRON, Netherlands

(国内会議)

一般講演

[66] 鈴木寛大、「超新星残骸 HB21 の X 線観測: 分子雲衝突、 過電離および粒子加速の関係」、天文・天体物理若手夏の学校、長野 (2016)

[67] 清野愛海、「狭輝線 1 型セイファート銀河 NGC 4051 の X 線スペクトル解析」、天文・天体物理若手夏の学校、長野 (2016)

[68] 鈴木寛大、:「「すざく」による GeV ガンマ線超新星残骸 HB 21 の X 線観測」、日本天文学会秋季年会、愛媛大学 (2016)

[69] 馬場 彩、「「すざく」によるガンマ線超新星残骸 G298.6-0.0 および G32.8-0.1 の観測」、日本天文学会秋季年会、愛媛大学 (2016)

[70] 清野愛海、「狭輝線 1 型セイファート銀河 NGC 4051 の X 線スペクトル時間変動解析」、日本天文学会秋季年会、愛媛大学 (2016)

[71] 小林翔梧、「X 線スペクトル構造から探る ULX 天体における降着描像への制限」、日本天文学会秋季年会、愛媛大学 (2016)

[72] 小野光、「「すざく」を用いた LMXB のスペクトル状態遷移の研究」、日本天文学会秋季年会、愛媛大学 (2016)

[73] 三宅克馬、「IC4329A における時間変動を用いたモデル依存しない成分分解 (3)」、日本天文学会秋季年会、愛媛大学 (2016)

[74] 和田有希, :「NuSTAR による矮新星 GK Persei の観測 : 2015 年の増光時と静穏期の比較解析」、日本物理学会 2016 年秋季年会 (2016)

[75] 加藤佑一、「衝突銀河団 CIZA J1358.9-4750 における低マッハ数衝撃波によるプラズマ加熱」、日本物理学会 2016 年秋季年会 (2016)

[76] 中澤知洋、「X 線衛星「ひとみ (ASTRO-H)」搭載の硬 X 線撮像検出器 (HXI) の軌道上動作」、日本物理学会 2016 年秋季年会 (2016)

[77] 鈴木寛大、「X-ray analysis on HB 21:A dark GeV SNR with molecular clouds」、SNR workshop 2016 winter (2016 年 11 月 11-12 日、名古屋大学)

[78] 加藤佑一, 「超新星残骸プラズマにおける衝撃波直下での電子加熱」、高エネルギー宇宙物理学研究会 2016「(2016 年 11 月 30-12 月 2 日, 青山大学相模原キャンパス)

[79] 馬場 彩、「NuSTAR/Suzaku による最も明るいガンマ線超新星残骸 N132D の観測」、日本天文学会春季年会、九州大学 (2017)

[80] 清野愛海、「狭輝線 1 型セイファート銀河 NGC 4051 の X 線スペクトル時間変動解析 II」、日本天文学会春季年会、九州大学 (2017)

[81] 鈴木寛大、「GeV ガンマ線超新星残骸 HB 21 の X 線観測による過電離プラズマの発見」、日本天文学会春季年会、九州大学、(2017)

[82] 小野光、「「すざく」を用いた LMXB のスペクトル状態遷移の研究 II」、日本天文学会春季年会、九州大学 (2017)

[83] 三宅克馬、「SWIFT J2127.4+5654 における時間変動を用いたモデル依存しない成分分解」、日本天文学会春季年会、九州大学 (2017)

[84] 和田有希, :「雷雲電場による電子加速のガンマ線観測プロジェクト : 小型読み出し系の開発と北陸地方における多地点運用」、日本物理学会第 72 回年次大会 (2017)

[85] 楳本大悟、「GROWTH 実験：10 年間の継続観測に基づく冬季雷雲由来ガンマ線の研究」、日本物理学会第 72 回年次大会　(2017)

[86] 古田禄大、「GROWTH 実験 : モンテカルロシミュレーションを用いた, 雷雲ガンマ線放射の広がりの解釈」、日本物理学会第 72 回年次大会　(2017)

[87] 奥田和史、「GROWTH 実験 : コリメーターを用いた、雷雲由来ガンマ線の角度分布の測定」、日本物理学会第 72 回年次大会　(2017)

[88] 中澤知洋、「1-80 keV の広帯域 X 線を高感度で撮像分光する次世代の小型科学衛星計画 FORCE：2017 年のステータス」、日本物理学会第 72 回年次大会 (2017)

招待講演

[89] 馬場 彩、「「すざく」で見た RCW86 - 環境と加速の関係」、「SNR workshop 2016」、名古屋、日本、(2016)

[90] 馬場 彩、「変なコンパクト星を持つ超新星残骸と X 線観測を用いた progenitor 推定あれこれ」、「中性子星勉強会」、山形、日本 (2016)

[91] 馬場 彩、「宇宙の多様性の源: 超新星残骸」、「星間現象ワークショップ」、名古屋、日本 (2017)

[92] 中澤 知洋、「e-ASTROGAM & CAST」、「第 1 回 MeV ガンマ線天文学研究会」、京都、日本 (2017)

(セミナー)

[93] 「熱く激しい宇宙を観る - 高エネルギー宇宙物理学への招待 -」、国立科学博物館天文学普及講演会 (2016)

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、ショウジョウバエの神経系をモデルとし、これらの問題に迫っている。

これまでに、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てきた．現在、こ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、機能するのかを調べる研究を進めている。特に、近年急速に発達した光技術と遺伝子工学とを組み合わせた手法を用いて、神経細胞の活動を可視化・操作する実験を行なっている。また，このような実験に理論的考察を加えることにより、神経回路の動作原理を探る研究も開始した。配線パターンの分かっているモデル神経回路において，個々の神経細胞の活動をリアルタイムに追跡することにより，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夢である。

7.1.1　神経回路の活動ダイナミクス

神経回路は時空間的な活動パターンを生成することで機能を生みだす。その活動ダイナミクスを解析する上で、膜電位を直接測定する電気生理学は強力な方法である。それに加えて、近年の光計測技術の発達により、多数の神経細胞の活動の様子を同時にとらえることができるようになった。また、光遺伝学（オプトジェネティクス）の発展により、神経細胞の活動を光照射によって局所的・一過的に制御できるようになった。我々はこれらの技術をショウジョウバエ幼虫の中枢神経系に適用することによって、神経回路の動的特性の解明を目指している。

ショウジョウバエ幼虫のパターンのある運動の発生における、感覚フィードバックとＧＡＰ結合の役割について（川崎達平、曽祥孫澤、能瀬聡直）

我々の中枢神経系（CNS）は複数の神経細胞による機能的な神経回路が多数集まることによって階層的に構成されている。神経回路の発達機構を調べることで神経回路の動作機構の解明に繋がることが期待できる。今年度、我々は、胚発達後期において筋肉・神経活動のダイナミクスがどのように変化していくのかを調べた。まず筋肉活動を観察した。その結果、産卵後 16 時間後ごろから隣り合う数体節の接触していない同種の筋肉の間を筋収縮が伝播する様子を観察することができた。先行研究ではこの時期の筋肉の活動は全て接触する筋肉間を体液によって伝わる筋原性のものだとされていたが、物理的に接触していない筋肉間の活動の伝播が観察できたことから、これは神経原性の運動であると考えられる。さらに、運動神経細胞群と神経系全体において神経活動を観察した。その結果、運動神経細胞群でパターンのある活動が開始する（産卵後 17 時間後ごろ）よりも 30 分早く、CNS 全体でパターンのある活動が開始する（産卵後 16.5 時間後ごろ）様子を観察することができた。以上の結果から、先行研究で考えられていたよりも早い時期から一部の筋肉とそれを支配する介在神経細胞群、運動神経細胞群でパターンのある活動が始まっていることが示された。次に、我々は、CNS に内在的なパターン生成回路の発達に電気シナプスを介した神経活動と筋肉からの感覚フィードバックの二つがどう関わっているのかを調べた。具体的には、胚期～孵化直後のショウジョウバエ幼虫において、これらを遺伝学的ツールにより慢性的に阻害、もしくは薬剤や解剖により一過的に阻害して、パターン生成に対する影響を調べた。その結果、これら両方を阻害すると、内在的なパターン生成は観察できなかった。変異体を用いて筋肉からの感覚フィードバックを慢性的に阻害すると、電気シナプスを阻害していないにも関わらず内在的なパターン生成は観察できなかった。三齢幼虫ではこれらの二つを阻害しても内在的なパターン生成を観察することができた。以上の結果から、発達期の CNS における内在的なパターン生成には電気シナプスを介した神経回路が必要であり、また、この電気シナプス依存的なパターン生成回路の発達には筋肉からの感覚フィードバックが必要であるということが示された。今後は、電気シナプスと感覚フィードバックが運動パターンを生成する回路を形成するメカニズムについて探っていく予定である。

ショウジョウバエ近縁種比較による運動制御神経回路の解析（松尾悠司、能瀬聡直、高坂洋史）

動物は種ごとに異なる行動を生み出すが、その特性を決めている遺伝子は明らかになっていない。動物の行動の中で、採餌や逃避は、適切な方向転換によって生存の確率を上げるもので、重要な行動の 1 つと考えられる。本研究では、ショウジョウバエ近

縁種の幼虫をモデルとして、種間で方向転換に関する行動特性がどのように異なるのか、その遺伝学的基盤を明らかにすることを目指す。本年度、複数個体のショウジョウバエ幼虫の自由行動を同時に時系列画像として取得し定量化する方法を開発した。解析には、ゲノム上の塩基配列が解読されているキイロショウジョウバエの近縁種 11 種に用いた。その結果、いくつかの種において首振りなどの方向転換を行わないことを見出した。このことは、方向転換行動が遺伝学的に規定されており、種分化に伴って異なる運動特性を有する種が現れたことが示唆される。またこの差異は、生息環境に適応した進化による行動戦略の違いの現れであると期待される。今後は、ゲノム比較や神経構造の形態解析により、方向転換に関わる遺伝子や回路の実体を探索する。さらに、異なる 2 種を同時に自由行動させ、時系列画像を取得することで、異種間の相互作用による運動パターンの変化についても探索する予定である。

7.1.2 運動神経回路を構成する神経細胞の同定

神経ネットワーク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。しかし、介在神経細胞に関する知見は、運動神経細胞や感覚神経細胞に比して著しく少ない。我々は、回路内で生起するこの神経活動の集団現象を構成的に理解するために、遺伝学的手法、及びコネクトミクスを効果的に用いることで、運動パターン生成に関与する介在神経細胞群の同定を進めている。

前進ぜん動運動トリガーニューロンの探索（宮本道人、二木佐和子、高木優、松永光幸、高坂洋史、能瀬聡直）

ショウジョウバエ幼虫の前進ぜん動運動を引き起こすニューロンの同定を目標とした研究を行った。これまでの研究では、光遺伝学を用いた非侵襲行動実験、介在ニューロン局所活動操作・運動ニューロン活動変化観察等の手法を用いて、Gal4 細胞活動亢進により前進頻度が上がる系統を複数発見した。前進をトリガーするニューロンを含む Gal4 系統の探索では、Gal4-UAS システムを用いて、少数のニューロンにおいて光感受性陽イオンチャネル Channelrhodopsin2 (ChR2) を発現させ、幼虫の自由行動中に、490nm 付近の波長の光照射によって ChR2 発現ニューロン群の一過的な活動亢進を行った（幼虫の皮は半透明であり、中枢神経系まで光が透過する）。これを複数の Gal4 系統に対し行い、前進ぜん動運動が誘発される Gal4 系統を 3 系統発見した（野生型の幼虫は当該波長の光を忌避するため、光照射は逃避行動により前進の回数は減少する）。また、モザイク解析、一部のニューロンにおける Gal4 発現を抑制する Tsh-Gal80、Cha-Gal80 といった遺伝学的ツールを用い、特に 3 つの Gal4 系統において、それぞれ前進トリガーニューロンの候補を数個に絞り込んだ。現在、それぞれの系統で、さらに候補をワンペアのニューロンにまで絞れるよう実験を続けているとともに、Multicolor Flip-out を用いて正確に形態を撮影したり、NpHR 等を用いて Gal4 発現細胞を活動抑制した影響を確認したりといった実験を行っている。今後これらの Gal4 発現細胞間の入出力関係を調べ、前進ぜん動運動生成の回路メカニズムを明らかにする予定である。

相同的なコマンドニューロンの体節特異的な結合様式が接触刺激に対する部位依存的な行動選択を媒介する（高木優、宮本道人、能瀬聡直）

動物に外部環境からの接触刺激が与えられるとき、その刺激が与えられる体の部位によって異なる行動が惹起される。例えば、ショウジョウバエ幼虫は頭部に接触刺激を受けると後退ぜん動運動によって逃避し、尾部に刺激を受けると前進ぜん動運動によって逃避する。本研究では、このような部位依存的な行動選択を担う神経回路を探索した。我々は、接触刺激を担う MD III/IV 感覚神経細胞群の下流に位置する 2 次感覚ニューロンである Wave-1 neuron を同定した。Wave-1 は腹部の各神経節に存在する相同的なニューロンのクラスであるが、神経節ごとに異なる機能を発現していることを見出した。すなわち、頭部の神経節の Wave-1 neurons を活動亢進させると後退ぜん動運動のパターンが惹起されるのに対し、尾部の神経節で活動亢進を行うと前進ぜん動運動のパターンが惹起された。このような機能の体節差に相関して、Wave-1 neurons の形態にも体節差があることを見出した。すなわち、頭部の Wave-1 neurons は樹状突起と軸索を胸部神経節にまで投射させている一方、尾部の Wave-1 neurons は樹状突起を主に尾端に、軸索を近隣の腹部神経節にそれぞれ投射させていた。さらに我々は、頭部の Wave-1 neurons に着目して、これらが後退ぜん動運動を実行する感覚運動変換経路をコネクトーム解析によって探索した。その結果、頭部の Wave-1 neurons の下流の経路に 2 次運動ニューロンを同定し、これらが Wave-1 neuron 同様に接触刺激によって惹起される後退ぜん動運動の実行に必要であることを発見した。以上より、Wave-1 neurons が相同的なコマンドニューロンであるにも関わらず、体節によって異なる結合様式を有し、それが部位依存的な行動選択を媒介していることが示唆される。本研究は、米国ハワードヒューズ医学研究所ジャネリアリサーチキャンパスの Albert Cardona 博士、Marta Zlatic 博士、Richard Fetter 博士らおよび理化学研究所脳科学研究センターの風間北斗博士との共同研究である。

逃避行動を制御する神経回路の同定（平本篤紀、二木佐和子、能瀬聡直）

ショウジョウバエ幼虫の逃避行動の一種である後退ぜんどう運動を司る神経回路機構について研究した。まず、行動実験による Gal4 スクリーニングを行い、後退蠕動運動に関わるニューロンを標的している系統を同定した。この系統に対して MARCM と呼ばれる手法を用いて、どのニューロンが後退蠕動運動を惹起しているかを同定した。このニューロンの上流と下流を探索し、神経回路を同定することを目的とし、ショウジョウバエ幼虫で用いられるコネクトミクスの一種である CATMAID を用いた。結果として、各神経節に存在するこのニューロンは互いにシナプスしていることがわかった。このような神経結合様式を持つニューロンが逃避行動の制御においてどのような役割を持つのかについて調べるために、現在、カルシウムイメージングと活動亢進を同時に行う系を用いて、神経節ごとに活動亢進を行い、他の神経節のニューロンにどのように活動が伝播するのか、について調べる予定である。また、熱刺激によって GAL4 の発言がランダムになる系統を用いることで、GAL4 発現パターンと、行動実験の結果がどのような相関を示すのかについて調べる予定である。

神経伝達物質受容体遺伝子の発現細胞による行動の切り替え機構の解析（朴正ヒョク、尹永択、高坂洋史、能瀬聡直）

ショウジョウバエ幼虫は環境の変化に対応するため、行動の切り替えの研究に用いられるモデル生物の一つである。今までの研究で、行動の切り替えは多数の神経細胞の活動の変化が必要であることが知られていた。こういう多数の神経細胞の発火パターンの変化が生じることを神経修飾という。従って、神経修飾に関係がある神経修飾物質の受容体がある神経細胞が、行動の切り替えに関わっていかについて研究した。神経修飾物質であるドーパミン、セロトニン、チラミン、オクトパミンの受容体を発現する細胞に対して機能喪失と機能獲得を調べた結果、セロトニン受容体 2 A を発現する細胞の集団が行動の切り替えに関係があることが分かった。更に遺伝学的手法を用いて、行動の切り替えにもっとも重要であると考えられる細胞を同定し、PDNs（Pi-shaped Descending Neurons) と名前つけた。今後は外部刺激による行動の切り替えと PDNs の活動を調べ、どの神経回路の一部であるかを調べることと、PDNs のみ機能獲得されたときに行動の切り替えが起こるのかを試す実験を進める予定である。本研究は、国立遺伝学研究所の近藤周博士と、東北大学の谷本拓博士との共同研究である。

ショウジョウバエ幼虫の光逃避行動において後退運動を制御する介在神経細胞の同定（大浦将弥、高坂洋史、能瀬聡直）

動物が自然界を生きる上で外界の刺激に対して適切に反応することは重要である。しかし、その背景にある神経回路についてはまだ明らかになっていない。本研究では、ショウジョウバエ幼虫の光逃避行動をモデルとしてこの問題に取り組む。ショウジョウバエにおいて、青色光は、卵、幼虫、蛹、成虫の全ての段階で有害である。それゆえ、青色光から逃避する行動戦略はきわめて重大である。幼虫は、自由行動中、前進ぜん動運動を主に行っている。しかし、青色光に晒されると、方向転換と後退ぜん動運動により、逃避行動を行う。我々は、まず、幼虫が青色光に晒されている間の行動戦略について調べた。その結果、幼虫は青色光に晒された直後に後退ぜん動運動を行うのではなく、ある一定量の照射の後に後退ぜん動運動を行うことを発見した。さらに、後退ぜん動運動に先んじて、頭部を左右に振ることがわかった。これは、暗部への好ましい方向を探索していることを示唆している。これらの連続的な行動（頭部の左右への運動→後退ぜん動運動）は幼虫が効率的に青色光から逃避し、より好ましい環境を探索することを可能にしていると思われる。我々は、次に、光逃避行動を制御する介在神経細胞を調べた。Fly Light より Gal4 発現細胞数の少ない選出し、光遺伝学を用いて行動実験を行った。その結果、活動亢進により後退ぜん動運動を引き起こし、脳内に存在する一対の介在神経細胞を同定した。その神経の活動を抑制すると、青色光に対する後退ぜん動運動が減少することがわかった。これは、その神経細胞が、光逃避行動において不可欠な役割を担っていることを示唆している。今後は、その神経細胞がどのようにして光逃避行動を制御しているのかを解明する。

遺伝学と画像解析を用いた、運動速度制御を担う介在神経細胞の定量的探索（久門拓（4 年生特別実験)、松尾悠司、能瀬聡直、高坂洋史）

神経回路は、多数の神経細胞のネットワークにより構築される。個々の神経細胞は非線形素子であり、神経細胞間の相互作用は複雑なシナプス伝達によって実行される。この複雑系である神経回路は、全体としては調和のとれた活動を生み出す。いかにして、神経細胞のネットワークが調和のとれた時空間パターンを生み出すのかを明らかにするために、本研究では、ショウジョウバエ幼虫の運動回路をモデルとして運動速度の制御を担う介在神経細胞の同定を進めた。遺伝学的手法を用いて特定の介在神経細胞の活動を阻害し、幼虫の運動パターンに現れる効果を、画像解析・定量解析により明らかにした。その結果、速度を正に制御する介在神経細胞と負に制御する介在神経細胞が見出された。これは、神経回路がマクロスケールで持つ速度というパラメータが、細胞レベルではどのようにコードされているのかを明らかにする上で重要な知見となると考えらえる。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Hasegawa, E., Truman, J.W., Nose, A.: Identification of excitatory premotor interneurons which regulate local muscle contraction during *Drosophila* larval locomotion. *Sci Rep.* 6: 30806 (2016)

[2] Matsunaga, T., Kohsaka, H., Nose, A.: Gap junction-mediated signaling from motor neurons regulates motor generation in the central circuits of larval *Drosophila*. *J. Neurosci.* 37(8): 2045-2060 (2017)

[3] Kohsaka, H., Guertin, P.A., Nose, A.: Neural circuits underlying fly larval locomotion. *Current Pharm. Design.* 23:1-12 (2017)

(学位論文)

[4] 尹永択：Analyses of neural population dynamics generating distinct behaviors of *Drosophila* larvae.（博士論文）

[5] 川崎達平：Development of Coordinated Neural Activities in the Motor Circuits of *Drosophila* Larvae: the Role of Sensory Feedback and Gap Junctions.（博士論文、新領域創成科学研究科）

[6] パクジョンヒョク：ショウジョウバエ幼虫の行動を制御する神経修飾の遺伝学的研究（修士論文）

[7] 平本篤紀：ショウジョウバエ幼虫の逃避行動を制御する神経回路機構：光遺伝学とコネクトミクスを用いた解析（修士論文、新領域創成科学研究科）

[8] 草野真希：ショウジョウバエ幼虫における回転逃避行動の定量解析とその神経回路の探索（修士論文、新領域創成科学研究科）

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[9] Suguru Takagi, Sawako Niki, Dohjin Miyamoto, Hiroshi Kohsaka, Hokto Kazama, Richard D. Fetter, Albert Cardona, Akinao Nose.: Neural circuits that mediate backward escape responses to mechanical noxious stimuli in *Drosophila* larvae. Behavioral Neurogenetics of *Drosophila* Larva, 2016.10.23-26, HHMI Janelia Research Campus (USA)

招待講演

[10] 高坂洋史、Optogenetic dissection of *Drosophila* larval locomotion.: Developmental Neurobiology Course 2016, 沖縄科学技術大学院大学 Okinawa Institute of Science and Technology 2016.7.29, Okinawa

[11] Nose, A., Kohsaka, H., Yoon, Y., Takagi, S., Hiramoto, A., Ohura, S. and Niki, S.: Circuit mechanisms that regulate motor pattern in larval *Drosophila*. Behavioral Neurogenetics of *Drosophila* Larva, 2016.10.25 Janelia Farm Research Campus, USA.

[12] Kohsaka, H., Zwart, M. F., Fushiki, A., Fetter, R. D., Cardona, A., Truman, J. W. and Nose, A.: Local feedback on axial propagation in *Drosophila* larval locomotor circuits. Behavioral neurogenetics of *Drosophila* larva. HHMI Janelia research campus, 2016.10.23-26, U.S.A.

[13] Nose, A. : Genomic and connectomics analysis of the motor circuits in larval *Drosophila* 2016.11.18, Marriott Marquis San Diego Marina, USA

(国内会議)

一般講演

[14] Suguru Takagi, Sawako Niki, Dohjin Miyamoto, Hiroshi Kohsaka, Richard D. Fetter, Albert Cardona, Akinao Nose.: Neural circuits that mediate backward escape responses to specific sensory stimuli in *Drosophila* larvae. 第 39 回日本神経科学大会, 2016.7.20-22, 横浜

[15] 大浦将弥、二木佐和子、能瀬聡直：Search for interneurons that elicit stereotyped behaviors in *Drosophila* larvae., 第 39 回分子生物学会,2016.11.30-12.2 横浜

基調講演

[16] 能瀬聡直：行動制御を担う神経回路の動態と基盤構造、生物科学専攻リトリート 2017、2017.3.7, 水上温泉松乃井（群馬県）

(講義等)

[17] 高坂洋史、Optogenetics: Lab course in Developmental Neurobiology Course 2016, 沖縄科学技術大学院大学 Okinawa Institute of Science and Technology 2016.8.1-5, Okinawa

7.2 樋口研究室

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。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 分子の運動の、計測結果から分子機能を導く際の仮説を少なくすること研究を行った。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内の輸送機能や細胞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ったが、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。

7.2.1 分子研究

ミオシンフィラメント内の分子運動を直接計測する試み

我々は米粒に絵を描くような微細な動きからスポーツ時のような複雑で膨大な力を伴う動きまで，最先端

のロボットでは実現できない幅広い動作を達成することができる．その要因の 1 つが筋肉である．我々は筋肉の高度な機能を理解するため，分子レベルからボトムアップ的アプローチで筋収縮の分子メカニズムを検証してきた．特にミオシン分子集合体であるミオシンフィラメントの力発生において，ミオシン分子の機能がどのように拡張され，効率的な力発生を実現しているのかを明らかにすることを目的としてきた．そこで，ミオシンフィラメントに相互作用するアクチンの端にビーズを結合させて光ピンセットでトラップし，ミオシンフィラメントの発生する力を計測した．さらにシミュレーションモデルを構築し実験データとの比較から，外部負荷に対する各ミオシン分子の力発生状態を調べた結果，高負荷・高 ATP 濃度においてミオシンの力発生のタイミングが同調する可能性が示唆された．この結果から，筋肉が高負荷を担った場合，分子レベルではミオシンがより協同的に力を発生させている可能性が示唆された．しかしながら，この手法ではミオシン分子を直接みていないため，協同性を直接検証することはできない．そこでミオシン分子に金ナノ粒子を標識し，その散乱像を高速度カメラで計測する方法を開発し，ミオシン分子の動態を直接計測した．まずその第一歩として，無負荷で自由に動くアクチンと相互作用中のミオシン 1 分子の動態を計測したところ，平均 15 nm 程度ミオシンがアクチンと相互作用しながら移動する様子を 1 分子レベルで初めて捉えることに成功した．この結果から，ミオシンは構造変化による力発生後直ちにアクチンから解離するのではなく，しばらく結合していることが見えてきた．これは既存の筋収縮メカニズムでは予想されないものであり，新しい収縮メカニズム提唱につながる興味深い結果であった．

骨格筋ミオシンの頭部の変位を超解像法で測定する

骨格筋ミオシンは骨格筋の収縮を起こすモータータンパク質であり、アクチンと相互作用することで、筋収縮を実現している。ミオシンとアクチンの相互作用分子メカニズムを説いた古典的なミオシンとアクチンの相互作用距離はほぼミオシンの構造変化 (power stroke) の長さ程度と考えられてきた [AF Huxley 1957]。しかし、2010 年に茅らがミオシン頭部の非線形的弾性を発見し [M Kaya 2010]、ミオシンが power stroke を行った後、アクチンに押し込まれた時にミオシンが柔らかくことを示した。この結果からミオシンの相互作用距離は従来考えられてきたものより長い可能性が予想された。また、茅らがミオシン多数分子の力計測を行った実験結果から、ミオシン分子同士の power stroke が同調して力を発生する可能性を考えた。この考えに基づいてシミュレーションを行ったところ、高負荷においてミオシン同士の power stroke の同調現象を確認した。ミオシン複合体中にあるミオシン 1 分子の動態を調べる目的として、ミオシンフィラメント上にあるミオシン 1 分子の動態を高時空間分解能（位置精度 1.5nm、時間分解能 10000frames/s）で直接計測する実験系の開発にじめて成功した。測定方法として、プローブ標識可能なミオシン・ロッド・フィラメントに金コロイドをラベルし、レーザーで照射したときの金コロイドの散乱光を高速カメラで 10000Hz の時間分解能で撮影し、FIONA 法で金コロイドの散乱像の変位を推定することで、標識されたミオシン分子の位置変化を測定した。この測定方法でミオシンとアクチンの相互作用距離と時間を異なる ATP 濃度で計測したところ、5 μ M ATP では 15nm と 62ms、20 μ M ATP では 21nm と 32ms の相互作用距離と時間を計測した。この結果を見ると、相互作用距離は茅らが予想した長い相互作用距離を支持する結果となった。また、相互作用中のミオシン分子はステップ状の変位を示し、そのステップサイズ（約 5nm）とステップ幅である dwell time（約 9ms）も計算した。

また、茅らが示唆したミオシンの power stroke の同調を検証するため、多輝点推定法 [Y Ashida 2016] を用いて、回折限界内に位置するミオシン複数分子の動態を計測できる超解像イメージングの開発を試みた。その結果、量子ドットを標識プローブに用いた場合、約 4nm の位置精度で 100frames/s の時間分解能で観察可能な超解像顕微鏡の開発に成功したが、それはミオシンの相互作用を観測するのに時間分解能が足りない。高時空間分解能を可能にする金コロイドを用いた場合は、プローブ間の干渉などの相互作用により、ミオシン複数分子の超解像観測は実現できなかった。回折限界内にあるミオシン複数分子計測の実現のために、更なる実験装置と手法の改良が必要である。

ダイニン 1 分子のパワーストロークにともなう微小管の変位の測定

細胞質ダイニンは，ATP の加水分解エネルギーを利用して，微小管上をマイナス端（細胞の中心体）方向に運動する生体分子モーターである．ダイニン頭部のモータードメインの linker 部位の大きなスイングは，パワーストロークと呼ばれており，ダイニンの二足歩行運動に関わっていると提案されている．本研究では，ダイニン頭部のパワーストロークが運動を担っていることを明らかにするため，単量体ダイニン 1 分子が微小管結合に伴い発生する変位を光ピンセットにより測定した． ダイニンの変位と linker のスイングの関係を明らかにするために，まずは，リング内に BFP，linker の N 端に GFP を導入した単量体ダイニンを作製し，微小管非存在下での FRET 効率，linker のスイング度合いを評価した．その結果，高 ATP 濃度では FRET 効率は 51%と高く，ATP 濃度低下に伴い FRET 効率は 17 %まで低下した．ダイニン単体ではリン酸放出と ATP 結合が律速過程であると考えると，高 ATP 濃度では pre 状態（パワーストローク前の状態）のダイニンの割合が多いため FRET 効率が高く，ATP 濃度低下に伴い apo 状態（ヌクレオチド非結合の状態）の割合が増加することで FRET 効率が減少し， 3 μ M ATP で 2 状態の割合が半々であるというモデルを構造研究に基づいて提案した．次にダブルトラップおよびシングルトラップ法を用いて，ダイニンが微小管に結合した後に運動した変位を測定した結果，ATP 濃度低下に伴

い，変位は 8 nm（高 ATP 濃度）から 0 nm（apo 状態）に減少した．ATP 濃度依存的 FRET 効率から提案したモデルを踏まえると，高 ATP 濃度では pre 状態のダイニンが微小管と結合して 8 nm 運動し，ATP 濃度低下に伴いパワーストローク後の apo 状態のダイニンが微小管に結合する割合が増加するため運動変位が 0 nm に減少し， 13 μ M ATP で pre, apo 状態のダイニンが微小管に結合する割合が半々であるというモデルで説明できた．さらに，高 ATP 濃度でのダイニン単量体の変位 8 nm が linker のスイングにより引き起こされていることを確証するため，linker のスイングが阻害された変異ダイニンを用いて変位を測定した．その結果，微小管と結合してもダイニンの運動変位は起こらなかった．以上より，生体内と同程度の高 ATP 濃度のとき，ダイニン単量体はパワーストロークに伴い微小管上をマイナス端方向に 8 nm 運動し， 8 nm の運動変位でダイニン二量体の運動を担うことができると考えられた

キネシンネックリンカードッキングに伴う変位の測定

分子モーターキネシンの力発生にはネックリンカーと呼ばれる 3nm 程度のペプチド鎖が ATP 結合に伴って構造変化することが重要であると考えられている。そこで、ネックリンカーの水素結合をしているとされる部位に点変異を導入したキネシンを 2 種類精製し、1 分子力計測を行った。変異体キネシンは wild type に比べてバックステップの頻度がやや増えるものの、著しい変化は見られなかった。次に、AMPPNP を用いて ATP 結合に伴う 2 量体キネシンの変位の大きさを 3 6pN の負荷で測定した。AMPPNP 濃度を 10 μ M と低濃度にすることで、キネシンは AMPPNP 状態とヌクレオチドフリー状態を遷移する。その結果、微小管に沿ってプラス端・マイナス端の両方向に 5 6nm のステップ状の変位が見られた。この変位の大きさは、キネシンが二足歩行運動するときのステップサイズ (8.2nm) よりも小さく、単量体を用いてネックリンカーの構造変化を測定したときの変位 (5.1nm) と近い値であった。また、ATP 結合に伴う構造変化によってキネシン 1 分子が少なくとも 7.5kT(=30pNnm) の仕事ができることが分かった。

二量体分子モーターの歩行に関する統一モデル

二量体のモータータンパク質（キネシン－１，ミオシンＶ，ダイニン１）の単一分子は，ステップ上の変位を行い，微小管やアクチン線維上を前進あるいは後退しながらに連続的に運動を行う．これら分子のちから変位測定によって，モータータンパク質は，負の負荷を掛けたとき（運動方向と同じ向きの力）には，速度はあまり変化せず，負荷が増加するにつれて，速度は減少し，さらに負荷をますと速度がマイナス方向となり負荷の増加とともにマイナス速度が増加することの結果が明らかとなっていた（たたしダイニンの負荷速度関係は今回計測した）．そこで，モータータンパク質の前進運動と後退運動の比および，負荷と 1 歩に要する時間（Dwell time）の関係を説明する解析的モデルを構築した．そのモデルでは，両足結合状態と片足状態とが交互に起こり，もし後ろ足が片足状態となり前方に結合すれば前進運動が得られ，同様に前方の足が片足状態となり後方に結合すれば後方運動が得られる．この反応は，負荷に依存するとの一般的な課程を置き，反応速度に近似を行ったところ，実験結果をうまく説明できる解析的なモデルが得られた．

7.2.2 細胞研究

マクロファージ運動の走熱性と分子メカニズム

マクロファージは異物（病原菌・細菌）からあるいは炎症部位の細胞から発せられる化学物質の濃度勾配を感知し、より濃度の高い方向へ移動する走化性をもつ。近年マクロファージは温度センサーを持つことが示され、高温になると活性化することが示唆されたが、より温度の高い方向へ移動する走熱性を持つか否かについてはまだ分かっていない。そこで我々は温度勾配下でのマクロファージの運動の特徴を調べた。マウス初代腹腔マクロファージの近傍に水の光吸収係数が高い波長 1550 nm の赤外レーザーを照射することで、温度上昇を行った。その結果、温度勾配下でマクロファージはより温度の高い方向（熱源であるレーザー集光点方向）へ遊走する「走熱性」があることが明らかとなった。また、遊走中には、リーディングエッジと呼ばれる細胞移動方向の先端部分においてラフリングが激しくなり小胞が大量に生産するといった現象も観察された。温度勾配下でのマクロファージの運動について、細胞骨格系タンパク質 (アクチン、ミオシン、微小管) 及び Rho family タンパク質 (Cdc42、Rac1、RhoA) を阻害する実験を行い、それらの役割を調べた。その結果、アクチン、ミオシン、微小管を阻害すると細胞運動が阻害されることから、これらの動きにはこれら骨格系タンパク質が必須であることが分かった。また、Cdc42 阻害時には細胞体の面積を変えずにゆっくり伸展し、Rac1 阻害時には細胞運動がなくなり小さくなり、RhoA 阻害時には、後端を残しつつ前端の移動が起こった。このような変化が起こったことから、走熱性は走化性と同様に Rho family タンパク質による制御された運動であることが示唆された。

細胞の損傷を定量する新しい方法の開発

損傷を受けた細胞の死の過程や，損傷からの回復の過程を理解するためには，細胞の損傷の度合いである損傷度を測定することが重要である．そこで，細胞の損傷度を非侵襲で計測する新しい方法を開発し，細胞の損傷を定量的に評価した．細胞の損傷度は，ベシクルなどの細胞内小器官の運動から評価した．細胞全体のベシクルの運動を評価するために，各ピクセルの強度揺らぎを解析する，光ゆらぎ解析法を開発した．本解析法によって，損傷時の細胞の損傷度の

計測を行った．また，赤色光照射によって光活性化する赤色蛍光色素 IR700 を用いて細胞に損傷を与えた．その結果，損傷度に依存して細胞内運動が低下することを光ゆらぎ解析によって明らかとした．細胞内運動の低下が細胞損傷の指標となることを示すために，IR700 の光活性化が細胞内運動を低下させるメカニズムの解明を行った．その結果，IR700 の光活性化によって，リソソームが破壊され，さらに細胞内のキネシンなどの細胞内輸送分子に損傷を与えられていることを明らかとした．細胞損傷度に依存して細胞内輸送系が損傷を受け，それを光ゆらぎ解析法で計測していると考えられる．

がん細胞内にエンドサイトーシスされた PAR-1 小胞の運動

PAR-1 は，Gタンパク質とカップルして情報伝達を行う膜タンパク質である．PAR-1 が活性化すると，その情報によって細胞の転移運動が盛んになるため，細胞のがん化に重要なタンパク質である．タンパク質分解酵素のスロンビンは，PAR-1 を活性化することが知られており，我々は，量子ドットに PAR-1 抗体を結合し，活性化によってエンドサイトーシスされる量子ドットの結合した PAR-1 を内包した小胞がどのような運動を行うか調べた．2 つの異なる焦点位置を持つ装置を用いて，PAR − 1 小胞の運動を三次元的に測定を行った．三次元座標を得るために，2 枚の異なる焦点位置の画像の小胞の 2 次元位置（ＸＹ）を量子ドットの蛍光輝点をガウス関数で近似を行い，2 次元位置（ＸＹ）と強度を算出する．さらに，2 焦点での強度差から深さ方向の位置（Ｚ）を決定を行った．その結果，小胞は，細胞膜の上を拡散し，エンドサイトーシスされたのち，ある小胞は，リサイクリングされて，細胞膜に戻ることが明らかとなった．また，エンドサイトーシスされ時に，PAR-1 は，上下に振動するような運動も見られた．スロンビンによって，PAR-1 を活性化したところ，細胞膜上をゆっくり動く PAR-1 が減少した．以上のことから，PAR-1 がエンドサイトーシスされる前後に起こる現象や，PAR-1 の活性化により膜の拡散すなわち裏打ち構造がよりダイナミックになったことが示唆された．

心筋細胞の振動現象の計測と振動メカニズム

心臓は、Ca^{2+} 濃度依存に収縮・弛緩すると考えられている。しかし、心臓が心室内に十分な血液を溜め込むためには、Ca^{2+} 独立的な素早い弛緩をする必要があると指摘されてきた。実際、超音波診断装置によるヒト心臓の観測で、拍動によって励起される Ca^{2+} 変化と独立した機械振動が計測されている。この興奮波の位相特異点の力学特性を調べたところ、1 次元複素ギンツバーク・ランダウ方程式のホール解で記述できることが明らかとなった。すなわち、この興奮波は、心臓が自律振動子の集団であるがゆえに生まれていると示唆される。一定の Ca^{2+} 濃度で、心筋や骨格筋はサルコメアをユニットとする収縮振動 (SPOC) を行うため、この振動子の実体はサルコメアであると考えられる。しかし、超音波計測の分解能では、長さ 2 μ m のサルコメアの計測は出来ない。そこで、以前開発した SL-nanometry の方法を心臓に適応できる実験系の構築を進めている。一方、心臓での計測は未だであるが、単離・培養した心筋細胞内のサルコメアに対しては、自律振動の惹起・計測に成功している。特に HSOs (Hyperthermal Sarcomeric Oscillations) と命名した、心筋細胞を 38 〜42 ℃に温めることによって生じるサルコメア振動は、細胞の自発拍動による Ca^{2+} 濃度に対しても堅牢であり、心臓を積極的に弛緩させる自律振動子に近いものだと考えられる。そこで計測の時間分解能を 50fps から 500fps に改良し、個々のサルコメアの HSOs の振動波形を調べたところ、細胞内の Ca^{2+} 濃度変化に伴ってサルコメアは HSOs の振動振幅を小さくし、平均長も Ca^{2+} 濃度依存に縮めること、伴って振動 1 サイクルでの収縮時間と伸展時間も変化すること、しかし、それにもかかわらず、振動周期は一定に保つことが明らかとなった。石渡らとの共同研究で、上述の SPOC を良く説明できるサルコメアのシミュレーションモデルが、2 次元に拡張した場合においても実験結果と良く合致することを確認した。しかし、Ca^{2+} 濃度が変化する条件での、HSOs の縮みながら振動し続ける性質を再現できないことも分かった。鷲尾らとの共同研究で、サルコメア内部のミオシンの状態を考慮すると、この縮みながら振動し続ける特徴も再現できることが明らかとなった。石渡 SPOC モデルとの違いを調べるために、一定 Ca^{2+} 濃度でのサルコメア振動モデルを構築した [2]。このモデルは、首振り運動を行ったミオシンの集団的で可逆的構造変化がサルコメア振動の原因であると予言している。現在、このモデルの妥当性の検証と、上述の振動周期を一定に保つ仕組みの再現に挑戦している。

7.2.3 個体研究

マウス内のがん細胞のイメージング

本研究は、非侵襲下においてがん細胞を分子レベルで高精度にイメージングし、がん転移およびがん組織形成のメカニズムを解明することを目的とする。

これまでに「転移能の高い細胞で構成されるヒトがん組織の高効率の作製 (がんマウスの作製)」および「マウス耳介内に作製したがん細胞の非侵襲 in vivo イメージング（露光時間 0.1 秒)。」に成功している。今年度は特に非侵襲 in vivo イメージングの時間分解能を従来よりもあげることに成功した。実験では，細胞質内のチューブリンに GFP、核に蛍光強度が高い RFP（Red Fluorescent Protein: HcRed1）が発現するよう 2 重に蛍光ラベルしたヒト乳がん細胞を作出し、免疫不全マウスの耳介内に接種後、非侵襲において in vivo イメージングを行い、単一細胞の GFP 蛍光および RFP 蛍光を 0.01 秒の露光時間で撮影することに成功した。その際、がん細胞の接種箇所を極力、皮膚の直下とし、血流が遮断されない程度の圧

力でマウス耳介を顕微鏡ステージに水平に圧着するなど、皮膚表面からの深さを浅くするよう工夫を施した。これらのことにより、従来よりも露光時間が短く、かつ鮮明な像を撮影することに成功した。なお、イメージングは昨年度改良を加えたスピンディスクタイプの共焦点顕微鏡と EMCCD カメラを用いて行った。併せて、がん転移およびがん組織形成に密接にかかわる血管新生の非侵襲 in vivo イメージングを試みる前段階として、血管内皮細胞が GFP に蛍光するトランスジェニックマウス（Tg (TIE2GFP) 287Sato/J mouse）を入手し、これらのマウスの血管を非侵襲でイメージングすることに成功した。さらに、これらのマウスにヒトがん細胞を接種できるよう、免疫不全能を獲得させるため新規遺伝子改変技術（TAL ヌクレアーゼ）を使用し、現在あらたなトランスジェニックマウスの作製を遂行中である。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Morito Sakuma, Sayaka Kita and Hideo Higuchi. Quantitative evaluation of malignant gliomas damage induced by photoactivation of IR700 dye. Science and Technology of Advanced Materials. 17, 473-482 (2016.6)

[2] Takumi Washio, Seine A. Shintani, Hideo Higuchi and Toshiaki Hisada. Analysis of spontaneous oscillations for a three state power stroke model. Physical Review E. 95, 022411 (2017.2).

[3] Eug Kuan Moo, Daniel R Peterson, Timothy R Leonard, Motoshi Kaya, Walter Herzog. In vivo muscle force and muscle power during near-maximal frog jumps. PLoS One. Mar 10;12(3): e0173415 (2016.)

[4] Katsuhiko Sato, Koutaro Nakagome, Seine A. Shintani, Fuyu Kobirumaki-Shimozawa, Norio Fukuda, Kazuya Suzuki, Jun Takagi, Yuta Shimamoto and Takeshi Itabashi.,“Dynamic properties of bio-motile systems with a liquid-crystalline structure”, Molecular Crystals and Liquid Crystals, in press.

[5] Seiichi Tsukamoto, Teruyuki Fujii, Kotaro Oyama, Seine A. Shintani, Togo Shimozawa, Fuyu Kobirumaki-Shimozawa, Shin’ichi Ishiwata and Norio Fukuda,“Simultaneous imaging of local calcium and single sarcomere length in rat neonatal cardiomyocytes using yellow Cameleon-Nano140” J. Gen. Phys. 148, 341-355 (2016)

[6] Koutaro Nakagome, Katsuhiko Sato, Seine A. Shintani and Shin’ichi Ishiwata,“Model simulation of the SPOC wave in a bundle of striated myofibrils”, Biophysics and Physicobiology, 13, 217-226 (2016)

[7] Togo Shimozawa, Erisa Hirokawa, Fuyu Kobirumaki-Shimozawa, Kotaro Oyama, Seine A. Shintani, Takako Terui, Yasuharu Kushida, Seiichi Tsukamoto, Teruyuki Fujii and Shin’ichi Ishiwata,“In vivo cardiac nano-imaging: A new technology for high-precision analyses of sarcomere dynamics in the heart”, Prog. Biophys. Mol. Bio. 124, 31-40 (2017)

[8] Naoaki Bekki, Seine A. Shintani, Shin’ichi Ishiwata and Hiroshi Kanai,“A model for Measured Traveling Waves at End-Diastole in Human Heart Wall by Ultrasonic Imaing Method”, 85, 044802 (2016)

(著書，総説，解説)

[9] 茅 元司 第 11 章 少数の機能を知る（93-111 頁）「少数性生物学」永井健治・冨樫祐一編 日本評論社

[10] 樋口秀男 「生物物理学と他の領域をゆらぐ」 東大理学部ニュース 48 （2017．1）

[11] 木下慶美「Opinion- 研究の現場から ～研究交流から共同研究への実現に向けた挑戦～」，羊土社『実験医学』34 (3) (2016)

[12] 新谷正嶺「温めた心筋細胞に備わった収縮リズムの周期安定化の仕組みについて」国士舘大学紀要 情報科学 第 38 号 (2017.3)

[13] 戸次直明、石井啓翔、城戸真弥、新谷正嶺、鷲尾巧「心臓壁に対する非線形波動モデルを目指して」国士舘大学紀要 情報科学 第 38 号 (2017.3)

[14] 新谷正嶺「第 3 回少数性生物学トレーニングコース 参加者の声」少数性生物学 NEWS LETTER Vol. 5 (2016.8)

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[15] Hideo Higuchi, Motoshi Kaya, Takumi Washio, Seine Shintani. Cooperative force generation by muscle myosin molecules interacting with actin filaments. KIAS Protein Science Soul Korea (2016.9.22-24)

[16] Motoshi Kaya. Molecular mechanism of synchronous force generations among skeletal myosins. Symposium: Modeling and Manupilation of Life: a Challenge to Unveil Its Complex Mechanism. The 54th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Tsukuba, Japan (2016.11.25-27).

[17] Hideo Higuchi. Cooperative force generation by muscle myosin molecules interacting with actin filaments. International Symposium on Universal Biology Univ. Tokyo. Japan (2016.11.28-29)

[18] Yongtae Hwang, Kaya Motoshi and Hideo Higuchi. Cooperative force generation of cardiac myosin. B CUBE in Technische Universität Dresden and Max-plank institute of Molecular Cell Biology and Genetics (2017.03.01)

一般講演

[19] Motoshi Kaya, Yoshiaki Tani, Takumi Washio, Toshiaki Hisada, Hideo Higuchi. Mechanism of Synchronous Force Generations Between Skeletal Myosins in Myofilament. The 19th European Bioenergetics Conference, Riva del Garda, Italy (2016.7.2-7).

[20] Morito Sakuma and Hideo Higuchi. Quantitative evaluation of recovery from damage in cancer cells. International Conference on Single Cell Research. Ito International Research Center in The University of Tokyo, Tokyo, (2016. 11. 16-17)

[21] Motoshi Kaya, Takumi Washio, Hideo Higuchi. Molecular Mechanism of Synchronous Force Generations among Myosin Molecules. The 61st Annual Meeting of Biophysical Society, New Orleans, USA (2017.2.11-15).

[22] Yoshimi Kinoshita, Taketoshi Kambara, Kaori Nishikawa, Motoshi Kaya, Hideo Higuchi. The power stroke distance of human cytoplasmic dynein. Biophysical Society 61st Annual Meeting, 222-Plat, New Orleans, LA, USA (2017.2. 11-15)

(国内会議)

招待講演

[23] 新谷正嶺「心筋細胞を温めて生じる高速収縮振動の起源」第 6 回分子モーター討論会『分子モーター研究の最前線』(2016.7)

[24] 木下慶美「ヒト細胞質ダイニンの反応機構を掘り下げる」,『第 56 回生物物理若手の会 夏の学校』, P16, 千歳 (2016, 9. 2-5)

[25] 新谷正嶺「温めた心筋細胞で生じる高速収縮振動の発生機構」平成 28 年度統計数理研究所共同研究集会『動的生体情報の現状と展望 2』(立川) 2016.9.15.

[26] 樋口秀男, 茅元司, 鷲尾巧, 新谷正嶺 「ミオシン集団の持つ協同性と周期性」 生物物理学会東北支部会 東北大 仙台 (2016.12.16)

[27] 戸次直明、石井啓翔、城戸真弥、新谷正嶺、鷲尾巧「心臓壁に対する非線形波動モデルを目指して」第 8 回森和英記念計算科学研究報告会 (世田谷) 2016.12.17.

[28] 木下 慶美, 神原 丈敏, 西川 香里, 茅 元司, 樋口 秀男 「ヒト細胞質ダイニン 1 分子のパワーストロークに伴う運動距離の測定」,『生体運動研究合同班会議 2017』, 47, 神戸 (2017, 1. 6-8)

一般講演

[29] Yuichi Kondo, Higuchi Hideo. The mechanism of bio-nano machine kinesin's force generation. 第 14 回ナノ学会, 北九州, 日本 (2016.6.14-16)

[30] 新谷正嶺、鷲尾巧、樋口秀男「心筋細胞の高速振動を nm 精度で計測し振動の分子機構をシミュレーションで明らかにする」ナノ学会第 14 回大会 (北九州) 2016.6.14.

[31] Morito Sakuma, Sayaka Kita and Hideo Higuchi. Specific Movement of Vesicles in the Damaged Brain Tumor Stem Cell. The 68th Annual Meeting of the Japan Society for of Jap Cell Biology, Kyoto, Japan (2016.6.15-17).

[32] 佐伯喜美子、八幡和志、茅元司、樋口秀男「蛍光タンパク質のスペクトル測定教材の開発 (I)」 日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学、2016. 9. 13 - 17).

[33] 新谷正嶺、鷲尾巧、樋口秀男「温めた心筋細胞に備わった収縮リズムの発生機構と生理的意義」第 23 回日本時間生物学会学術大会 (名古屋) 2016.11.12.

[34] Morito Sakuma, Kazuhito Tabata, Hiroyuki Noji and Hideo Higuchi. Quantitative Evaluation of Recovery from Damage in Cancer Cells. The 54th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Tsukuba, Japan (2016.11.25-27).

[35] Hideo Saitou, Seine Shintani, Hideo Higuchi. Thermotaxis mechanism of mouse macrophage. The 54th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Tsukuba, Japan (2016.11.25-27).

[36] Yoshimi Kinoshita, Taketoshi Kambara, Kaori Nishikawa, Motoshi Kaya, Hideo Higuchi. Measurement of the power stroke distance of cytoplasmic dynein motor. The 54th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan. Tsukuba International Congress Center, Ibaragi, (2016. 11. 25-27).

[37] Seine A. Shintani, Takumi Washio and Hideo Higuchi, "Contractive oscillations intrinsic to heating cardiomyocytes maintain the period against late Ca^{2+} variations", The 54th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, (Tukuba) 2016.11.27.

[38] Yuichi Kondo, Higuchi Hideo. Measuring of energy at neck linker docking of single kinesin molecule. The 54th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Tsukuba, Japan (2016.11.25-27).

[39] ZhiYuan Zhang, Yuto Ashida, Masahito Ueda, Hideo Higuchi, Motoshi Kaya. Direct measurement of dynamics of individual skeletal myosin by using a super-resolution localization method. The 54th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan. Tsukuba International Congress Center, Ibaragi, (2016. 11. 25-27).

[40] Kazuo Sasaki, Motoshi Kaya, Hideo Higuchi. A unified walking model for dimeric motor proteins. The 54th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan. Tsukuba International Congress Center, Ibaragi, (2016. 11. 25-27).

[41] Seohyun Lee, Kohsuke Gonda and Hideo Higuchi. Trafficking of endocytic PAR-1 carrier vesicles in cancer cell. The 54th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Tsukuba, Japan (2016.11.25-27).

[42] 佐伯喜美子、八幡和志、茅元司、樋口秀男「蛍光タンパク質のスペクトル測定教材の開発 (II)」 日本物理学会 第 72 回年次大会 (大阪大学、2017. 3. 17 - 20).

[43] Sayaka Kita, and Hideo Higuchi: Noninvasive *in vivo* imaging of human cancer cells and mouse vascular endothelial cells in the auricle of mouse.

第 122 回　日本解剖学会　総会全国学術集会, 長崎 (2017.3.28-30)

＜受賞＞

[44] 新谷正嶺 : 日本生物学会優秀ポスター賞、日本時間生物学会 (2016.11.12)

[45] 張致遠、蘆田裕人、上田正仁、樋口秀男、茅元司「超解像イメージ法を用いた骨格筋ミオシン分子動態の直接計測」、第 54 回日本生物物理学会年会学生賞、つくば、2016.11.25 － 11.27

＜社会活動＞

[46] 樋口，齋藤，佐久間，茅，喜多．沼津西高生へ講義および実験の実演 (2016.10.17)

[47] 喜多清　出前授業「理科関係のお仕事（研究の仕事とは？）& 生き物の誕生」茨城県つくばみらい市市立小絹小学校 5 年生（2017.2.3）

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Å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。当研究室では、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・操作することで理解することを目指している。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 超解像蛍光顕微鏡の開発と応用

光は波であるため、光を用いた計測の分解能は回折によって制限される。可視光の波長は 500nm 程度であるため、光学顕微鏡の分解能の限界は 200nm 程度である。細胞の中では、タンパク質分子や脂質、核酸など複数種類の分子が集合して形成される大きさ 100nm 程度の超分子複合体が単位として機能することが少なくないが、その構造や動態を観察するには、光学顕微鏡の分解能の回折限界は大きすぎる。そのため、細胞内の超分子複合体の構造は電子顕微鏡を用いて観察されてきたが、電子顕微鏡では細胞を生きたまま観察することが出来ないため、生きた細胞の中で超分子複合体の動態を観察することは困難であった。

2000 年代から蛍光分子の特性を巧みに利用することで回折限界を超えた分解能を達成する超解像蛍光顕微鏡法の開発が活発に進められ、2014 年にはノーベル化学賞が授与されるに至った。しかし、空間分解能を向上させるだけでは、生きた細胞内での超分子複合体の動態観察は難しい。動いている対象を高い空間分解能で観察するには、高い時間分解能が必要である。たとえば、細胞内の構造体は、時に 5 m/s 程度の速度で動くため、画像取得にたとえば 20 ms を要する場合は、その間に 100nm 動いてしまう。従って、回折限界の 2 倍程度の 100nm の空間分解能で観察する場合でも、画像取得時間は 20ms より短くなければならない。しかし、既存の超解像蛍光顕微鏡法のほとんどは、時間分解能を犠牲にして空間分解能を向上させており、1 枚の超解像画像を取得するために 1 秒あるいはそれ以上の時間をかけて原画像を取得する必要があった。そのため、超解像蛍光顕微鏡を用いて生きた細胞の中の動的過程を観察することは困難であった [1, 2]。

そこで、私たちは、超解像蛍光顕微鏡法の中でも比較的高速に画像取得が可能である構造化照明法に着目し、その原理を再検討することによって高速化に着手した。その結果、構造化照明法と共焦点蛍光顕微鏡法の原理的な類似性が明らかとなった。すでに共焦点蛍光顕微鏡は生きた細胞の観察にも広く使用されており、これをベースに改良を加えることで構造化照明法と同等の超解像顕微鏡へとアップグレード可能であることが示唆された。この原理に基づき、スピニングディスク共焦点顕微鏡法をベースにしたスピニングディスク超解像顕微鏡 (SDSRM: Spinning Disk Super-Resolution Microscope) を開発し、時間分解能 100 フレーム毎秒 (1 枚の画像取得時間 10ms)、空間分解能 100nm で生きた細胞の中での微細構造の動態観察に成功した [3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]。

こうして、生きた細胞の中での高速高分解能観察が可能となったが、その空間解像度は約 100nm と回折限界の 2 倍に留まっていた。これに対し、2016 年度の特別実験 II において、4 年生の高荒、亀井の 2 人は、蛍光分子の非線形特性を利用することで空間分解能を更に向上出来ることを理論的に示し、生物試料を用いた実験による検証にも成功した [18, 19]。

7.3.2 細胞内一分子イメージングの高速化と細胞内 1 分子キネティクス計測

蛍光分子で表式された生体分子を 1 分子レベルでイメージングし、その動態計測を行うことは 2000 年頃に実現したが、時間分解能の制約により細胞質中を自由拡散する蛍光分子を観察することは困難であった。また、2000 年頃に発明され、いまも広く用いられている対物レンズ式全反射照明法では、レーザー光を対物レンズの瞳の外周付近の一点に集光することで高コントラストの一分子観察が実現されるが、レーザー照明光の干渉による照明ムラの影響などにより、細胞全体を一様に照明し広い視野で一分子観察することは困難であった。

これらの問題を克服するため、レーザー光を回折光学素子で整形し、瞳外周に円環状に集光するという輪帯全反射照明光学系を開発し、広視野高速一

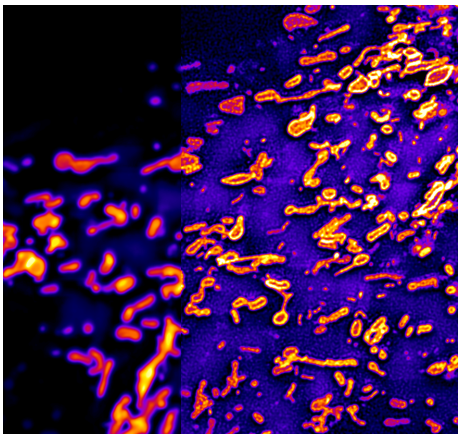

図 7.3.1: 図の左上側は従来の蛍光顕微鏡像。右下側が私たちが開発した超解像顕微鏡による像。ミトコンドリアの外膜表面の膜の複雑な動態が世界で初めて観察された [3]。

分子計測が実現された。さらに、これを用いて、細胞内でのキネシンと微小管の結合キネティクスを計測することに成功し、細胞内で微小管が 4 種類の異なる状態をとっていることが初めて示された [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 21]。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Uno S, Kamiya M, Yoshihara T, Sugawara K, Okabe K, Tarhan MC, Fujita H, Funatsu T, Okada Y, Tobita S and Urano Y. A spontaneously blinking fluorophore based on intramolecular spirocyclization for live-cell super-resolution imaging. Nat Chem 6: 681-689, 2014

[2] Okada Y, Nakagawa S. Super-Resolution Imaging of Nuclear Bodies by STED Microscopy in Nuclear Bodies and Noncoding RNAs (Nakagawa S, Hirose T ed), Methods in Molecular Biology 1262: 21-35, 2015

[3] Hayashi S, Okada Y. Ultrafast superresolution fluorescence imaging with spinning disk confocal microscope optics. Mol. Biol. Cell., 26:1743-51, 2015

(国内雑誌)

[4] 岡田康志　超解像蛍光顕微鏡法の現状と生体イメージングへの応用、レーザー研究 44:643-647, 2016

[5] 岡田康志、「超解像蛍光顕微鏡」、Clinical Neuroscience 34(6): 638-642, 2016 日本物理学会誌

(著書)

[6] 岡田康志 [編著]「初めてでもできる！ 超解像イメージング」羊土社 2016 年 7 月 1 日

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[7] Yasushi Okada, “Development and application of spinning disk super-resolution microscope for the high spatio-temporal resolution imaging of dynamic cellular components in living cells.” The 31st International Congress on High Speed Imaging and Photonics (ICHSIP-31), 2016

[8] Yasushi Okada, “Development and application of spinning disk supre-resolution microscope for the high spacio-temporal resolution imaging of dynamic cellular components in living cells,” Microscope Society of Canada, 43rd Annual Meeting

[9] Yasushi Okada,“Regulation of the conformational polymorphism of microtubule and its physiological role in the regulation of kinesin-based intracellular transport”, IGER International Symposium on “Now in actin study: Motor protein research reaching a new stage”

(国内会議)

招待講演

[10] 岡田康志、「高速超解像ライブイメージングによる小胞輸送解析」、第 39 回日本分子生物学会シンポジウム「メンブレントラフィック研究の新時代」

[11] 岡田康志、「高速高分解能広視野顕微鏡法の開発と応用」日本バイオインフォマティクス学会

[12] Yasushi Okada, “Development and application of super-resolution live imaging and single-molecule imaging for the study of neurons”, The 39th Annual Meeting of Japan Neuroscience Society

[13] 岡田康志、「簡便な超解像顕微鏡法と広視野全反射顕微鏡法の細胞生物学的応用」、第 68 回日本細胞生物学会シンポジウム

[14] 岡田康志、「次世代ライブセルイメージングのための顕微鏡技術開発」、第 122 回日本解剖学会総会・学術集会

[15] 岡田康志、「超解像蛍光顕微鏡法の新技術」、多元技術融合光プロセス研究会

[16] 岡田康志、「Development and application of superresolution and single-molecule microscopes for high-speed imaging in living cells」The 1st ABiS symposium

[17] 岡田康志、「高速超解像・1 分子顕微鏡による細胞内物理化学計測」、日本顕微鏡学会先端光学顕微鏡分科会ワークショップ

[18] 岡田康志、「共焦点顕微鏡の光学系を応用した超解像顕微鏡の原理と応用」第 54 回日本生物物理学会

[19] 岡田康志、「共焦点顕微鏡の光学系を応用した超解像顕微鏡の原理と応用」第 39 回日本分子生物学会

[20] Yasushi Okada, “Dissecting kinesin regulation through single molecule in cellulo measurements” 第 54 回日本生物物理学会、韓国-日本共催シンポジウム

[21] 岡田康志、「高速蛍光一分子イメージングとその応用」第 54 回日本生物物理学会

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 適応進化ダイナミクスの解析

進化シミュレーションと理論解析によるマクロレベルの細胞状態論の構築

細胞は膨大な種類の構成要素からなり、その状態遷移は高次元のダイナミクスによって記述される。しかし一方で、適応や進化の過程における状態遷移は、任意の方向に生じ得るのではなく、その変化には制約と方向性が存在する。こうした細胞状態遷移の制約と方向性がどのように出現するかを理解し、それを記述する適切な理論体系、特にマクロ状態論による細胞状態遷移論の構築を目指している。定常的に増殖する細胞系に注目し、その定常状態の安定性解析から、環境変動を与えたときにすべての構成要素の（対数）変化比が一定となり、かつその傾きが増殖速度変化に比例することを示し、細胞の進化シミュレーションと微生物の進化実験によって検証した [16, 38]。この結果は、定常増殖する細胞系においては、可能な状態変化が低次元に拘束されていることを意味している。さらに、分子の少数性に起因する細胞状態のゆらぎや、ランダムな突然変異による状態変化も、同じ低次元に拘束されていることが細胞シミュレーションによって示された。こうした細胞状態を拘束する “Dominant Mode” は進化過程の結果として出現すると予想され、そうした適切な少数自由度を抽出することにより、細胞状態を記述するマクロ状態遷移理論の構築が可能であることが示唆された。

微生物の進化実験を用いた進化過程の解析

世代時間の短い大腸菌などの微生物を、実験室で長期間にわたり植え継ぐことにより、その進化過程を解析することが可能となる。こうした進化実験は、そのダイナミクスの初期状態や過渡状態にアクセスすることを可能とし、また同じ条件で複数系列の進化実験を維持することにより、何が偶然に生じる変化で、何が必然的に生じる変化であるかをある程度明らかにすることが出来る。

本研究では、上述の理論研究で示唆された表現型進化が持つ性質を検証し、進化的拘束やその方向性がどのように決まるかを理解することを目的とした大腸菌進化実験を行っている。大腸菌を抗生物質・酸・アルカリ・界面活性剤など様々なストレス環境下で長期間培養することにより、それらストレスに対する耐性進化のダイナミクスを解析した。こうした多系列の進化実験は実験者に大きな負荷を与えることが予想されたので、我々が開発したラボオートメーションを用いた全自動の進化実験システム（図 7.4.1）を用いて進化実験を実施している。こうした進化実験で得られたストレス耐性を持つ大腸菌株について、網羅的な全遺伝子発現解析（トランスクリプトーム解析）と、超並列シーケンサを用いたゲノム変異解析を行い、表現型と遺伝子型の対応を解析したところ、大腸菌の遺伝子発現プロファイルの変化は比較的低次元に拘束されていることが示唆され、またストレス耐性の獲得により非ストレス環境において増殖速度が低下するという耐性と増殖のトレードオフの関係を定量的に明らかにした [9]。今後は、こうした大規模な進化実験データと、上述の理論解析を統合することにより、進化過程を記述する適切な状態論を構築する。

図 7.4.1: 全自動進化実験システムの外観。クリーンブース内に設置した自動分注器と、それに接続したインキュベーター・マイクロプレートリーダーなどから構成される。このシステムを用いることにより、数千系列の培養を全自動で行い、様々な環境条件や初期条件における進化ダイナミクスの解析が可能となる。

7.4.2 多細胞システムの多様性と安定性

触媒ネットワークモデルによる細胞分化・分業の理論

多細胞生物の出現は、生命の進化の歴史における大きな「跳躍」の 1 つであり、その起源は重要な問題である。多細胞生物では、単細胞生物と異なり、個体を構成する各細胞が 分化・分業を行うことで細胞の集団全体としての成長率を高めている。

我々は、多細胞生物がもつ、(1) 細胞分化能、(2) 細胞分化とそれに伴う分業による成長率の上昇、(3) 相補関係の安定性（分化細胞の比率の制御)、の 3 つの性質の起源について、シミュレーションを通して考察した [4, 31]。数理モデルとして、相互触媒する化学反応のネットワークを内部にもつ細胞モデルを用いた。 このモデルでは、それぞれ細胞膜を透過可能/不可能である k 種の化学成分からなる 1 つの細胞の状態を、k 次元ベクトルで指定する。外部環境中の栄養を取り込んで成長する n 個の細胞の内部状態ダイナミクスが、力学系として記述される。このモデルを用いた理論解析およびシミュレーションから、(1)-(3) の条件を満たしうるミニマルな触媒反応ネットワークを提示し、分化・分業は、栄養が少なく細胞間相互作用が強い環境において現れうること、またそのメカニズム等を明らかにした。

発現解析データに基づく遺伝子制御ネットワーク推定手法の開発

多細胞生物は、様々に異なる状態を持つ細胞タイプから構成される。こうした多様な細胞タイプは受精卵などの少数細胞からの増殖・分化によって出現するが、そのダイナミクスやその背後にある制御ネットワークの性質が理解されているとは言い難い。一方で実験技術の進展は、その分化過程の背後にある高次元の遺伝子発現量変化を定量可能としており、そうした大規模データから分化過程が持つダイナミクスが明らかになると期待できる。

本研究では、ヒト ES 細胞の制御因子（Transcriptional Factor; TF）の発現量を外部からコントロール可能とした細胞株のライブラリを用い、数百種類の TF の発現誘導によって生じる遺伝子発現プロファイルの変化をトランスクリプトーム解析（RNA-Seq）でそれぞれ定量したデータから、ES 細胞からの分化過程を支配する遺伝子制御ネットワークの推定を行った。一つの TF への摂動が他の遺伝子発現量に影響を与える過程を適切な微分方程式によってモデル化し、発現制御ネットワークのスパース性を仮定することにより、定量的な予測を可能とするネットワーク推定が可能であることを示した [8, 21]。今後は、こうした手法をさらに発展させ、1 細胞レベルのトランスクリプトーム解析などのデータと融合することにより、細胞分化ダイナミクスの不可逆性と安定性を記述する理論体系を構築する。

T 細胞による自己・非自己の識別に関する理論研究

免疫システムに関する最も重要な問いの一つは、T 細胞・B 細胞といった様々なタイプの細胞の相互作用によって、どのように自己抗原と非自己抗原を識別するかという点にある。むろん、例えば T 細胞は胸腺などで選択を受け、自己抗原に反応したものは死滅し、そうでないものだけが成熟した T 細胞として末梢組織に入ることが知られている。しかしながら一細胞レベルで解析すると、そうした選択を経た後の細胞でも、自己抗原には反応するものが一定の割合で残ることが示されている。つまり個々の細胞レベルでは自己・非自己の識別は完全ではなく、相互作用する細胞集団の性質として自己・非自己の識別が成されていると考えられるが、そのメカニズムは明らかになったとは言い難い。

本研究では、免疫応答を抑制する働きを持つ制御性 T 細胞（Treg）に注目し、Treg と通常 T 細胞（Tconv)、そして抗原提示細胞（APC）が相互作用する免疫システムの計算機モデルを構築し、APC による自己・非自己抗原の提示を安定に識別できるメカニズムの探索を行った。結果として、Treg による大域的な抑制作用と、個々の T 細胞の活性化・増殖のバランスから、細胞集団として自己・非自己抗原の識別が可能であることがシミュレーションによって示された [2]。この結果は、個々の免疫細胞状態の多様性と、Treg・Tconv そして APC の相互作用を定量的に解析することが、免疫応答における自己・非自己識別を理解するために必要であることを示唆している。

7.4.3 生体内化学反応における少数性効果

少数性現象の理論的基盤の構築

細胞内での化学反応では、しばしば反応に寄与する分子の数が非常に少数になるといった状況が起こりうる。こういった状況では分子の離散性・少数性に起因する確率性が無視できなくなり、決定論的方程式によるモデリングが破綻する。多くの場合、このような “ノイズ” は平均値のダイナミクスのまわりのゆらぎとして現れるにすぎないが、特定の化学反応系においては、少数性効果が系の性質を質的に変えてしまう現象 (双安定性の出現など) が起こりうると、理論的に示唆されて来た。しかしこの現象のはっきりとした定義や数理的表現はこれまで存在せず、どのような構造が大きな少数性効果を生むのかも不明瞭なままであった。

我々は、反応物質の濃度の定常分布に注目し、このような少数性効果を数理的に特徴づける手法を提案した。この手法を用いると、与えられた化学反応系に少数性効果が起きうるかどうか、起こるとしたらどのような効果が起きるのか、いくつからが “少数” であるのか、などといった問いに答えることが出来る。この手法を応用し、少数性効果を持ちうる化学反応モチーフの列挙を行ない、どのような構造が少数性効果に必要なのか議論した [1]。

分子モーター多体型に現われる協同現象:方向性スイッチ現象の理論解析

キネシンは微小管と結合し、一方向 (プラス端あるいは、マイナス端方向) に進む方向性を持った分子モーターとして知られている。しかし近年、kinesin5 cin8 という酵母の持つ分子モーターは微小管に結合しているキネ シン分子の数に依存して、進む方向性をスイッチさせることが実験的に明らかになった。すなわち、キネシン分子が多数微小管に結合している場合は各分子はプラス端方向性を持つが、結合するキネシンが少数になるとマイナス端方向性を示すようになる。しかし、どのような機構でこのようなスイッチが生じているのか、全くわかっていなかった。

本研究では、キネシン単分子がマイナス端方向に biased random walk する性質と、力を加えた際にキネシン-微小管結合の外れやすさが力の向きによって異なることを仮定した数理モデルを立て、これらの現象を説明することに成功した [5, 15, 22, 29, 30]（図 7.4.2)。提案した理論はさらに、微小管の粘性抵抗を増加させるとこの スイッチ現象が消失するという非自明な現象を予言している。近年、化学反応などにおいて、分子の数の少なさに起因して様々な新奇現象が起こりうることが理論的に示唆され注目を集めているが、本研究では生体機能に直接関連する少数性現象の例としてキネシンの双方向性を挙げ、そのメカニズムを明らかにした。提案されたメカニズ ムはこれまで議論されてきた少数性効果とも異なるものである。

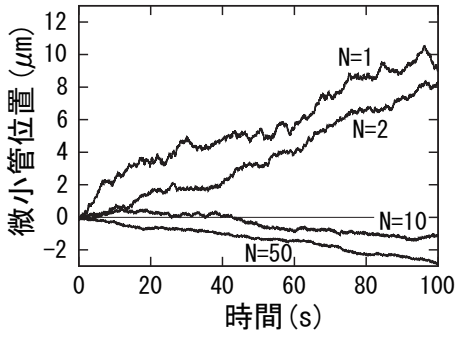

図 7.4.2: 分子モーター（キネシン）の協同現象。kinesin5 ファミリーの Cin8 というキネシンは、微小管に同時に結合する同種分子の数に依存して進む方向性をスイッチさせることが実験的に明らかになっている。その方向性スイッチのメカニズムを理解するために、微小管を介して相互作用する数理モデルを構築した。結果として、キネシン-微小管結合の外れやすさが力の向きによって異なることを仮定することにより、キネシンの分子数 N に応じて微小管運動の方向性がスイッチすることを示した。

＜報文＞

(原著論文)

[1] N. Saito, Y. Sughiyama and K. Kaneko: Motif Analysis for Small-Number Effects in Chemical Reaction Dynamics, Jour. Chem. Phys. **145**, 094111 (2016).

[2] C. Furusawa and T. Yamaguchi: Robust and Accurate Discrimination of Self/Non-Self Antigen Presentations by Regulatory T Cell Suppression, PLoS One **11**(9), e0163134 (2016).

[3] S. Suzuki, T. Horinouchi and C. Furusawa: Phenotypic changes associated with the fitness cost in antibiotic resistant Escherichia coli strains, Mol. Biosys **12**(2), 414-20 (2016).

[4] J. F. Yamagishi, N. Saito and K. Kaneko: Symbiotic Cell Differentiation and Cooperative Growth in Multicellular Aggregates, PLoS Comput. Biol. **12**(10), e1005042 (2016).

[5] Saito, Nen and Kunihiko Kaneko: Embedding dual function into molecular motors through collective motion, Scientific Reports **7**, 44288 (2017).

[6] H. Shimizu, C. Furusawa, T. Hirasawa, K. Yoshikawa, Y. Toya, T. Shirai and F. Matsuda: Omics-Integrated Approach for Metabolic State Analysis of Microbial Processes: Innovations and Future Directions, Appl. Bioeng. **5**, 213-236 (2017).

[7] S. Suzuki, T. Horinouchi and C. Furusawa: Expression profiling of antibiotic resistant bacteria obtained by laboratory evolution, Meth. Mol. Biol. **1520**, 263-279 (2017).

[8] H. Matsumoto, H. Kiryu, C. Furusawa, M. SH. Ko, S. BH. Ko, N. Gouda, T. Hayashi and I. Nikaido: SCODE: An efficient regulatory network inference algorithm from single-cell RNA-Seq during differentiation, Bioinformatics, in press

[9] S. Suzuki, T. Horinouchi and C. Furusawa: Acceleration and Suppression of Resistance Development by Antibiotic Combinations, BMC Genomics, in press

[10] M. Yoshida, S. G. Reyes, S. Tsuda, T. Horinouchi, C. Furusawa and L. Cronin: Time-programmable drug dosing allows the manipulation, suppression and reversal of antibiotic drug resistance *in vitro*, Nature Comm., in press

(国内雑誌)

[11] 古澤力, 鈴木真吾, 堀之内貴明: 大腸菌進化実験を用いた遺伝子発現量からの抗生物質耐性メカニズムの解析, バイオサイエンスとインダストリー **74**(2), 138-140 (2016).

[12] 古澤力: 進化実験を用いた薬剤耐性メカニズムの解析, 薬学雑誌 **137**(4), 373-376 (2017).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[13] Chikara Furusawa, Shingo Suzuki, Takaaki Horinouchi: Prediction of Stress Resistance By Gene Expression Profiles, Metabolic Engineering XI, Awaji, 2016 年 6 月.

[14] Takaaki Horinouchi, Shingo Suzuki, Hiroshi Shimizu, Chikara Furusawa: Experimental Evolution of *Escherichia coli* Under Various Chemical Compounds Using High-Throughput Automated Culture System, Metabolic Engineering XI, Awaji, 2016 年 6 月.

[15] Nen Saito: Collective motion switches directionality of molecular motor along filament, statphys26, Lyon, 2016 年 7 月.

[16] Chikara Furusawa: Toward Understanding of Biological Plasticity:Computational Analysis and Experimental Evolution, QBiC Symposium 2016, Osaka, 2016 年 9 月.

[17] Takaaki Horinouchi, Tomoya Maeda, Chikara Furusawa:: Escherichia coli cellular state profiling during adaptive evolution to various stress conditions using omics technology, QBiC Symposium 2016, Osaka, 2016 年 9 月.

[18] Chikara Furusawa: Analysis of evolutionary constraints and plasticity by laboratory evolution and computational models, Genome Evolution Conference, Rehovot, 2016 年 11 月.

招待講演

[19] Chikara Furusawa: Toward Understanding of Adaptive Evolution: High-throughput Laboratory Evolution and Computational Analysis, International Symposium on Universal Biology, Tokyo, 2016 年 11 月.

[20] Chikara Furusawa: Toward Understanding of Adaptive Evolution: Theoretical Analysis and Microbial Laboratory Evolution, 5th International Symposium of the Mathematics on Chromatin Live Dynamics, Hiroshima, 2017 年 3 月.

(国内会議)

一般講演

[21] 合田徳夫, 西村邦裕, 若林俊一, 中武悠樹, 齊藤花華, 松本拡高, 秋山智彦, 小田真由美, 古澤力, 洪繁, 洪実: 動的遺伝子ネットワーク解析のための数理解析手法の構築, 第三回数理デザイン道場, 2016 年 6 月.

[22] 斉藤稔: 協同現象により反転するキネシンの方向性, 大阪大学蛋白質研究所セミナー 第 6 回分子モーター討論会 分子モーター研究の最前線, 2016 年 7 月.

[23] 堀之内貴明, 古澤力: ハイスループット実験室進化とオミックス解析によるストレス耐性微生物の育種, 2016 年度生物工学若手研究者の集い 夏のセミナー, 2016 年 7 月.

[24] 斉藤稔, 金子邦彦: パターン形成における少数性効果, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月.

[25] 金子邦彦, 古澤力: 表現型進化の現象論, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月.

[26] 堀之内貴明, 酒井亜希, 田辺久美, 古澤力: 実験室進化とオミックス解析によるイソプロパノール耐性大腸菌の育種, 第 68 回日本生物工学会大会, 2016 年 9 月.

[27] 尾形駿介, 齊藤正輝, 吉川勝徳, 古澤力, 清水浩, 平沢敬: *Corynebacterium glutamicum* によるグルタミン酸生産に対するストレスの影響, 第 68 回日本生物工学会大会, 2016 年 9 月.

[28] 堀之内貴明, 前田智也, 古澤力: 全自動実験室進化システムの高度化と大腸菌の超ハイスループット実験室進化, 生命情報科学若手の会第 8 回研究会, 2016 年 10 月.

[29] 斉藤稔: 分子モーターによる協同的な微小管輸送の数理モデル, 定量生物の会, 2017 年 1 月.

[30] 斉藤稔: 分子モーターによる微小管の協同的輸送現象, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月.

[31] 山岸純平, 斉藤稔, 金子邦彦: 触媒ネットワークにおける細胞分化・分業の進化, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月.

[32] 徳山健斗, 戸谷吉博, 堀之内貴明, 古澤力, 清水浩: 実験室進化実験に基づく大腸菌の高コハク酸生産に有効な変異同定, 化学工学会第 82 回年会, 2017 年 3 月.

[33] 前田智也, 堀之内貴明, 阪田奈津江, 小谷葉月, 酒井亜希, 田邊久美, 古澤力: 全自動培養システムを用いた多種ストレス環境化における大腸菌進化ダイナミクスの解析, 第 11 回ゲノム微生物学会, 2017 年 3 月.

招待講演

[34] 古澤力: 適応進化ダイナミクスの解明–微物実験と理論解析, 東京大学物理学専攻 A7 サブコース第三回シンポジウム「生物物理の新展開」, 2016 年 5 月.

[35] 古澤力: 細胞シミュレーションと大腸菌進化実験を用いた適応進化ダイナミクスの解析, 第三回数理デザイン道場, 2016 年 6 月.

[36] Chikara Furusawa: Analyses of aging dynamics using mathematical models, Kickoff Workshop of Aging Project, 2016 年 6 月.

[37] 古澤力: 生き物はどこまで変われるのか-進化実験と理論解析-, 研究会「物理学的普遍性から生物学的普遍性へ」, 2016 年 8 月.

[38] 古澤力: 大腸菌進化実験による進化可能性の構成的理解に向けて, 日本進化学会第 18 回大会シンポジウム「進化可能性と方向性：実験と理論からのアプローチ」, 2016 年 8 月.

[39] Chikara Furusawa: Understanding geometry of phenotype space in bacterial adaptive evolution, Meeting of “Biology of symbiosis” project, 2016 年 10 月.

[40] 古澤力: 生物システムの可塑性の理解に向けて-理論解析と実験進化-, 第 54 会日本生物物理学会年会シンポジウム, 2016 年 11 月 .

[41] 古澤力: 生物システムの可塑性と安定性の理解へ向けて：実験室進化と理論解析によるアプローチ, Workshop on recent development of statistical physics, 2017 年 3 月.

8 技術部門

(佐伯、八幡、南野、大塚、南城 *、阿部 *)

∗ 技術補佐員

技術部門では、実験装置試作室業務、安全衛生業務、IT 関連業務、学生実験、学生実習、研究支援などの業務を行っている。技術部門の担当教員 (佐野教授、浅井教授、吉田教授、岡本准教授) とで月に 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

(大塚、南城、阿部)

8.1.1 利用状況

2016 年 4 月から 2017 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る。

- 内部製作件数 (366 件)
- 設計及び部品等の問い合わせ (外注を含む)
- 外注発注 (123 件)
- 他教室から作業依頼及び問い合わせ
  主な依頼者（五月祭、素粒子センター、地球惑星科学専攻、高橋研、吉岡研、化学専攻　長谷川研、山内研、岩崎研、鍵研、佃研、合田研、近松研、地殻化学実験施設、超高速強光子場科学研究センター、生物科学専攻、榎本研、寺島研)

8.1.2 工作実習

物理、地球惑星科学及び化学の大学院生と教職員を対象として、11 月 18 日、22 日の 2 日間、下記の内容で金属工作説明会を行った。

- 参加人員: 36 名 (物理 17 名、化学 17 名、地惑 2 名)
- 実習内容
  1. 測定器（ノギス）の使い方
  2. ねじの種類
  3. シャーリング（切断機）の使用方法
  4. 安全衛生上の注意事項、旋盤、フライス盤、シャーリング (切断機)、の使用方法の概略

8.2 技術室

(佐伯、八幡、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。
- 理学系防災連絡会のメンバーとして、コアとなる防災 WG に参加した。

8.2.2 IT 関連業務

(南野)

- 専攻業務
  大学院入学試験システムの改修を行った。
- 理学系研究科業務
  ネットワークインフラの管理および研究科全体の脆弱性スキャンを行った。
- ヘルプデスク業務

8.2.3 学生実験

- 物理学実験 I、II (佐伯)
  グループ編成、スケジューリング
- 物理学実験 I
  3 年生夏学期の物理学実験 I の「エレクトロニクス I」を技術指導した。(八幡)
  3 年生夏学期の物理学実験 I の「真空技術」を技術指導した。(佐伯)
- 物理学実験 II
  3 年生冬学期の物理学実験 II の「生物物理学」を指導した。(佐伯)
  3 年生冬学期の物理学実験 II の「パルス技術」の教材開発を指導、実施した。(八幡)

8.2.4 研究支援

(八幡)

2013 年度から行っている、大学院生向けの Field Programmable Gate Array (FPGA) 講習会 (3 日間) の教材、カリキュラムを更新し、実施した。

- 全参加人数　12 名

- 実習内容

  講義: FPGA の仕組み、応用範囲

  実習: FPGA を使ったデジタル回路の基礎、IP(ライブラリー) を使った回路設計、広帯域多チャンネルの Mixed Signal オシロスコープを使った信号観測

8.2.5 各種委員会

- 日本物理学会 代議員 （71〜72 期） (八幡)
- 機器・分析技術研究会 地域代表者 (八幡)
- 東京大学総合技術本部・本部員（兼 企画調整室・室員）(佐伯)
- 総合技術研究会実行委員会 (佐伯)
- 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)
- 理学系寒剤管理委員会 (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 (南野)
- 理学系防災連絡会 (八幡)
- 自衛消防中核要員 (八幡)

＜報文＞

[1] 技術部報告集 2016 (東京大学大学院理学系研究科理学部技術部、2017 年 3 月).

＜学術講演＞

(国内会議)

一般講演

[2] 八幡和志 : アクティブラーニング的実験講習の事例と考察、第 4 回大学の物理教育研究会 (立教大学、2016 年 6 月).

[3] 八幡和志 : 新世代 FPGA の技術導入と展開、2016 年度名古屋大学機器・分析技術研究会 (名古屋大学、2016 年 9 月).

[4] 八幡和志 : 教室共通機器業務の立ち上げ、2016 年度名古屋大学機器・分析技術研究会 (名古屋大学、2016 年 9 月).

[5] 佐伯喜美子、八幡和志、茅元司、樋口秀男 : 蛍光タンパク質のスペクトル測定教材の開発 (I)、日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学、2016 年 9 月).

[6] 八幡和志、松井朋裕、福山寛、超流動ヘリウムの第二音波検出の学生実験教材開発 (I)、日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学、2016 年 9 月).

[7] 八幡和志、FPGA 教材開発を通して得られた実験教材カリキュラム開発のフレームワーク、日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学、2016 年 9 月).

[8] 八幡和志、Field Programmable Gate Array(FPGA) の仕組みと利用、分子科学研究所技術討論会 (自然科学研究機構　岡崎コンファレンスセンター、2017 年 2 月).

[9] 八幡和志、FPGA 講習会における、トラブル事例と対処方法、分子科学研究所技術討論会 (自然科学研究機構　岡崎コンファレンスセンター、2017 年 2 月).

[10] 佐伯喜美子 : 蛍光タンパク質のスペクトル測定手法の確立、第 27 回生物学技術研究会 (岡崎コンファレンスセンター、2017 年 2 月).

[11] 佐伯喜美子 : 蛍光タンパク質を使った物理学実験教材の開発、総合技術研究会 2017　東京大学 (東京大学、2017 年 3 月).

[12] 八幡 和志、笹尾 愛、阿部 美玲、土屋 光、: ヘリウム回収ガスのオンライン純度管理、総合技術研究会 2017 東京大学 (東京大学、2017 年 3 月).

[13] 南野 真容子 : 修士課程入学試験システムの改修、総合技術研究会 2017 東京大学 (東京大学、2017 年 3 月).

[14] 佐伯喜美子、八幡和志、茅元司、樋口秀男 : 蛍光タンパク質のスペクトル測定教材の開発 (II)、日本物理学会　第 72 回年次大会 (大阪大学、2017 年 3 月).

[15] 八幡和志、松井朋裕、中村祥子、 福山寛 : 液体ヘリウムの第二音波の学生実験教材開発 (II)、日本物理学会　第 72 回年次大会 (大阪大学、2017 年 3 月).

II

Summary of group activities in 2016

1 Theoretical Nuclear Physics Group

Subjects: Structure and reactions of unstable nuclei, Monte Carlo Shell Model, Shell Evolution, Mean Field Calculations, Quantum Chaos, Curved spacetime, QCD phase diagram, Lattice simulation

Member: Takaharu Otsuka, Kenji Fukushima, Takashi Abe and Arata Yamamoto

In the nuclear theory group, a wide variety of subjects are studied. The subjects are divided into two major categories: Nuclear Sturcture Physics and Theoretical Hadron Physics.

Nuclear Structure Physics

In the Nuclear Structure group (T. Otsuka and T. Abe), quantum many-body problems for atomic nuclei, issues on nuclear forces and their combinations are studied theoretically from many angles. The subjects studied include
(i) structure of unstable exotic nuclei, with particular emphasis on the shell evolution,
(ii) shell model calculations including Monte Carlo Shell Model,
(iii) collective properties and Interacting Boson Model,
(iv) reactions between heavy nuclei,
(v) other topics such as dilute neutron system, quantum chaos, etc.
The structure of unstable nuclei is the major focus of our interests, with current intense interest on novel relations between the evolution of nuclear shell structure (called shell evolution for brevity) and characteristic features of nuclear forces, for example, tensor force, three-body force, etc. Phenomena due to this evolution include the disappearance of conventional magic numbers and appearance of new ones. We have published pioneering papers on the shell evolution in recent years. The new magic number 34 in an exotic nucleus ^{54}Ca was confirmed experimentally for the first time in 2013 and was reported in Nature. The structure of such unstable nuclei has been calculated by Monte Carlo Shell Model, for instance to Ni isotopes. Their applications have been made in collaborations with experimentalists internationally spread. Collaborations with many groups produce various interesting results. The Monte Carlo Shell Model has been improved with further developments, and we have carried out a number of calculations on the K computer.

We are studying on dilute neutron systems, time-dependent phenomena like fusion and multi-nucleon transfer reactions in heavy-ion collisions, double-beta-decay nuclear matrix element, and nuclear level density.

Theoretical Hadron Group

In Theoretical Hadron Physics group (K. Fukushima and A. Yamamoto), 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. Berry phase in lattice QCD [1]
2. Rotational effects in relativistic fermion systems [3, 7, 11]
3. Vacuum structures in inhomogeneous magnetic fields [5]
4. Non-equilibrium dynamics in kinetic theories

[1] S. Benic, A. Yamamoto, "Quantum Monte Carlo simulation with a black hole", Phys. Rev. D **93**, 094505 (2016).

[2] R. Fukuda, A. Nakamura, S. Oka, "Canonical approach to finite density QCD with multiple precision computation" , Phys. Rev. D **93**, 094508 (2016).

[3] H.-L. Chen, K. Fukushima, X.-G. Huang, K. Mameda, "Analogy between rotation and density for Dirac fermions in a magnetic field", Phys. Rev. D **93**, 104052 (2016).

[4] A. Yamamoto, "Berry phase in lattice QCD", Phys. Rev. Lett. **117**, 052001 (2016).

[5] P. Copinger, K. Fukushima, "Spatially assisted Schwinger mechanism and magnetic catalysis", Phys. Rev. Lett. **117**, 081603 (2016); (E) **118**, 099903 (2017).

[6] K. Fukushima, Y. Hidaka, "Magnetic shift of the chemical freeze-out and electric charge fluctuations", Phys. Rev. Lett. **117**, 102301 (2016).

[7] K. Mameda, A. Yamamoto, "Magnetism and rotation in relativistic field theory", Prog. Theor. Exp. Phys. 093B05 (2016).

[8] Y. Abe, K. Fukushima, "Analytic studies of the complex Langevin equation with a Gaussian ansatz and multiple solutions in the unstable region", Phys. Rev. D **94**, 094506 (2016).

[9] A. Yamamoto, T. Kimura, "Quantum Monte Carlo simulation of topological phase transitions", Phys. Rev. B, **94**, 245112 (2016).

[10] K. Fukushima, "Evolution to the quark-gluon plasma", Rept. Prog. Phys. **80**, 022301 (2017).

[11] S. Ebihara, K. Fukushima, K. Mameda, "Boundary effects and gapped dispersion in rotating fermionic matter", Phys. Lett. B **764** (2017) 94.

[12] S. Benic, K. Fukushima, O. Garcia-Montero, R. Venugopalan, "Probing gluon saturation with next-to-leading order photon production at central rapidities in proton-nucleus collisions", JHEP **1701**, 115 (2017).

[13] S. Benic, K. Fukushima, "Photon from the annihilation process with CGC in the pApA collision", Nucl. Phys. A **958**, 1-24 (2017).

2 Theoretical Particle and High Energy Physics Group

Research Subjects: The Unification of Elementary Particles & Fundamental Interactions

Member: Takeo Moroi, Koichi Hamaguchi, Yutaka Matsuo

The main research interests at our group are in string theory, quantum field theory and unification theories. String theory, supersymmetric field theories, and conformal field theories are analyzed relating to the fundamental problems of interactions. In the field of high energy phenomenology, supersymmetric unified theories are extensively studied and cosmological problems are also investigated.

We list the main subjects of our researches below.

1. High Energy Phenomenology
   - 1.1. Phenomenology of supersymmetric model [1, 2, 3, 4]
   - 1.2. Grand unification theory [5, 6, 7]
   - 1.3. 750 GeV diphoton excess [8, 9, 10, 11, 12]
   - 1.4. Instability of electroweak vacuum [13, 14]
   - 1.5. Particle creation and reheating [15, 16]
   - 1.6. Supergravity inflation models [17, 18]
   - 1.7. Gravitino problem [19, 20]
   - 1.8. Affleck-Dine lepton number generation [21]
   - 1.9. Flaxion models [22]
   - 1.10. High energy cosmic ray [23]
   - 1.11. Dark matter [24, 25]
2. Superstring Theory and Formal Aspects of Quantum Field Theories
   - 2.1. Aspects of supersymmetric field theories [26]
   - 2.2. Holography and entanglement entropy [28]

2.3. Entanglement entropy in quantum field theories [29]

References

[1] T. Moroi, T. T. Yanagida and N. Yokozaki, "Upper Bound on the Gluino Mass in Supersymmetric Models with Extra Matters," Phys. Lett. B **760** (2016) 681.

[2] K. J. Bae, H. Baer, N. Nagata and H. Serce, Phys. Rev. D **94**, no. 3, 035015 (2016) [arXiv:1606.02361 [hep-ph]].

[3] H. Baer, V. Barger, N. Nagata and M. Savoy, Phys. Rev. D **95**, no. 5, 055012 (2017) [arXiv:1611.08511 [hep-ph]].

[4] N. Nagata, H. Otono and S. Shirai, JHEP **1703**, 025 (2017) [arXiv:1701.07664 [hep-ph]].

[5] S. Chigusa and T. Moroi, "Bottom-tau unification in a supersymmetric model with anomaly-mediation," Phys. Rev. D **94** (2016) no.3, 035016 [arXiv:1604.02156 [hep-ph]].

[6] N. Nagata, K. A. Olive and J. Zheng, JCAP **1702**, no. 02, 016 (2017) [arXiv:1611.04693 [hep-ph]].

[7] J. Ellis, J. L. Evans, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, Eur. Phys. J. **77**, 232 (2017). [arXiv:1702.00379 [hep-ph]].

[8] K. J. Bae, M. Endo, K. Hamaguchi and T. Moroi, Phys. Lett. B **757** (2016) 493 [arXiv:1602.03653 [hep-ph]].

[9] K. Hamaguchi and S. P. Liew, Phys. Rev. D **94** (2016) no.3, 035012 [arXiv:1604.07828 [hep-ph]].

[10] K. J. Bae, C. R. Chen, K. Hamaguchi and I. Low, Phys. Rev. D **94** (2016) 015035 [arXiv:1604.07941 [hep-ph]].

[11] K. J. Bae, K. Hamaguchi, T. Moroi and K. Yanagi, Phys. Lett. B **759** (2016) 575 [arXiv:1604.08307 [hep-ph]].

[12] H. Ito and T. Moroi, "Production and Decay of Di-photon Resonance at Future e^+e^- Colliders," Phys. Rev. D **94** (2016) no.1, 015021.

[13] Y. Ema, K. Mukaida and K. Nakayama, JCAP **1610**, no. 10, 043 (2016) [arXiv:1602.00483 [hep-ph]].

[14] Y. Ema, K. Mukaida and K. Nakayama, Phys. Lett. B **761**, 419 (2016) [arXiv:1605.07342 [hep-ph]].

[15] Y. Ema, R. Jinno, K. Mukaida and K. Nakayama, Phys. Rev. D **94**, no. 6, 063517 (2016) [arXiv:1604.08898 [hep-ph]].

[16] Y. Ema, R. Jinno, K. Mukaida and K. Nakayama, JCAP **1702**, no. 02, 045 (2017) [arXiv:1609.05209 [hep-ph]].

[17] K. Nakayama, K. Saikawa, T. Terada and M. Yamaguchi, JHEP **1605**, 067 (2016) [arXiv:1603.02557 [hep-th]].

[18] J. Ellis, M. A. G. Garcia, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, JCAP **1611**, no. 11, 018 (2016) [arXiv:1609.05849 [hep-ph]].

[19] Y. Ema, K. Mukaida, K. Nakayama and T. Terada, JHEP **1611**, 184 (2016) [arXiv:1609.04716 [hep-ph]].

[20] F. Hasegawa, K. Mukaida, K. Nakayama, T. Terada and Y. Yamada, Phys. Lett. B **767**, 392 (2017) [arXiv:1701.03106 [hep-ph]].

[21] K. J. Bae, H. Baer, K. Hamaguchi and K. Nakayama, JHEP **1702**, 017 (2017) [arXiv:1612.02511 [hep-ph]].

[22] Y. Ema, K. Hamaguchi, T. Moroi and K. Nakayama, JHEP **1701**, 096 (2017) [arXiv:1612.05492 [hep-ph]].

[23] Y. Ema and T. Moroi, "Early decay of Peccei-Quinn fermion and the IceCube neutrino events," Phys. Lett. B **762**, 353 (2016) [arXiv:1606.04186 [hep-ph]].

[24] P. Ko and Y. Tang, Phys. Lett. B **768**, 12 (2017) [arXiv:1609.02307 [hep-ph]].

[25] S. P. Liew and F. Luo, JHEP **1702** (2017) 091 [arXiv:1611.08133 [hep-ph]].

[26] J. E. Bourgine, M. Fukuda, Y. Matsuo, H. Zhang and R. D. Zhu, "Coherent states in quantum $\mathcal{W}_{1+\infty}$ algebra and qq-character for 5d Super Yang-Mills," PTEP **2016**, no. 12, 123B05 (2016) [arXiv:1606.08020 [hep-th]].

[27] P. M. Ho and Y. Matsuo, "The Nambu bracket and M-theory," PTEP **2016**, no. 6, 06A104 (2016) [arXiv:1603.09534 [hep-th]].

[28] Y. Nakaguchi and T. Nishioka, "A Holographic Proof of Rényi Entropic Inequalities," JHEP **1612** (2016) 129 [arXiv:1606.08443 [hep-th]].

[29] C. P. Herzog and T. Nishioka, "The Edge of Entanglement: Getting the Boundary Right for Non-Minimally Coupled Scalar Fields," JHEP **1612** (2016) 138 [arXiv:1610.02261 [hep-th]].

3 Hayano Group

Research Subjects: Precision spectroscopy of exotic atoms and nuclei

Member: Ryugo S. Hayano and Takatoshi Suzuki

Laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms

Metastable antiprotonic helium atom ($\bar{\mathrm{p}}\mathrm{He}^+$) is three-body Rydberg atom, which consists of a helium nuclei surrounded by a ground state electron and an antiproton with large principal ($n \sim 38$) and orbital ($\ell \sim n+1 \sim 38$) quantum numbers.

The antiproton-to-electron mass ratio ($M_{\bar{\mathrm{p}}}/m_{\mathrm{e}}$) can be derived by comparing the experimental atomic transition frequencies of antiprotonic helium atoms measured by high-precision laser spectroscopy, with three-body QED calculations. The agreement of this value and proton-to-electron mass ratio with a precision of 1.3×10^{-9} is one of the verification of the CPT symmetry. In order to reduce systematic uncertainties caused by the particle masses and various QED and finite nuclear-size effects, it is important to measure many transitions precisely.

In 2016, non-linear two-photon transition of antiproton $(n, \ell) = (36, 34) \rightarrow (34, 32)$ was measured by using two-photon laser spectroscopy with gas buffer cooling. The mass ratio will be determined with a precision of $< 3 \times 10^{-10}$. The evolutions of the population of three $\bar{\mathrm{p}}^3\mathrm{He}^+$ states $(n, \ell) = (34, 32), (36, 34)$ and $(39, 35)$ were measured at low target pressure ($p \sim 1$ mb) and low temperature ($T \sim 1.5 - 1.8$ K) for the first time. The lifetimes of $(n, \ell) = (34, 32)$ and $(36, 34)$ do not change between two different target densities $\rho = 5 \times 10^{18}$ cm^{-3} and 2×10^{21} cm^{-3}.

Furthermore, we deduced the antiproton-to-electron mass ratio with a relative precision of 8×10^{-10} (published in Science). Comparison of this value with the known proton-to-electron mass ratio results in one of the most stringent CPT tests.

$\bar{\mathrm{p}}$-nucleus annihilation cross section at low energies

The antiproton is absorbed by the nucleus and annihilates with a surface nucleon. The cross sections, called annihilation cross sections, has been measured in order to study the interactions between them. In 2015, we measured the cross section in a momentum region of 100 MeV/c. In that region, annihilation cross sections of antineutron on some nucleus show unexpected enhancement, and we can understand this behaviors by comparing to these data to the one of antiprotons. In this experiment, we measured the cross sections with a carbon target.

Shapes of the antiproton beams were critical for this experiment, and they were tuned especially carefully. The timing of the kicker in the accelerator was optimized to make the pulse length shorter in time, and the pulse length became ~ 60 ns (in usual it is about 200 ns). The multiple extraction was performed to reduce the intensity of the beam not to saturate our detectors. Concerning the detector, we developed a Cherenkov counter monitoring intensities of the beams. For it we used lead fluoride crystals to maximize the number of Cherenkov photons, avalanche photodiodes to reduces background events caused by the nuclear counter effect and to guarantee the linearity. The experiment was carried out for 2 weeks and obtained data successfully.

In 2016 we analyzed the data and derived the annihilation cross section of the antiproton on carbon at 100 MeV/c. The cross section was compared to the one using the antineutron instead of the antiproton. The study of the mass dependence of the antiproton-annihilation cross sections using the past data was also carried out.

Spectroscopy of pionic atoms using a proton beam

Restoration of chiral symmetry breaking at a finite density has been one of the most important problems in recent hadron physics. We are studying this problem by performing spectroscopic experiments of pionic atoms of heavy nuclei such as Pb or Sn isotopes. It is known that the binding energy of deeply bound states such as 1s or 2s is related to the order parameter of the chiral symmetry breaking at the finite density. Experiments were performed in GSI and RIKEN using missing-mass spectroscopy of (d,^{3}He) reaction and the evidence of chiral symmetry restoration in nuclear medium was found.

We are now planning a new experiment of pionic atom spectroscopy using (p,^{2}He) reaction in RCNP. In this experiment, the binding energy is determined by analyzing two protons, which are decay products of ^{2}He, by the Grand Raiden spectrometer. A strong proton beam is employed with the

GRAF beamline, which was recently installed. We will try to achieve better resolution than existing experiments, by employing the high resolution spectrometer and the dispersion matching technique that eliminates the momentum spread of the incident beam.

In 2016, we performed a test experiment for a feasibility study. We measured the background of the experiment, where the main source of background is an accidental coincidence of two inelastic scattering in a single beam bunch. The cross-section of ^{120}Sn(p,p') was measured by Grand Raiden to be about 1.5 mb/sr/MeV and the accidental rate was evaluated to be comparable to the expected signal rate. In addition to the background measurement, we checked an availability of calibration methods of beam energy using LAS spectrometer. We submitted a proposal of the main experiment to RCNP and the beam time of 12.4 days was approved.

4 Sakurai Group

Research Subjects: Nuclear structure and dynamics of exotic nuclei

Member: Hiroyoshi Sakurai and Megumi Niikura

Exotic nuclei located far from the stability are new objectives for nuclear many-body problems. Our group explores exotic structures and dynamics in the nuclei that have never been investigated before, such as those with largely imbalanced proton and neutron numbers, hence to discover new phenomena and exotic properties in unstable nuclei. Our experimental programs mainly utilize fast radioactive isotope (RI) beams available at RI Beam Factory (RIBF) at RIKEN. RIBF is the leading facility where RI beam intensities are the highest in the world. We maximize RIBF utilization to access nuclei very far from the β-stability as well as to exploit new types of experiments and new methods of spectroscopy via new ideas and detector developments. Our research subjects to be covered are followings.

SEASTAR campaign

In May 2015 and May 2016, the SEASTAR experiments to systematically measure the excitation energy of extremely exotic nuclei were conducted at RIBF. The de-excitation γ-rays were detected by the NaI(Tl) scintillator array DALI2 after the proton-knockout-reactions with a 10-cm-thick liquid hydrogen target surrounded by the recoil proton tracking system MINOS. The obtained level structure of the neutron rich Cr and Fe isotopes revealed the enhanced deformation around that region. The analysis for the de-excitation γ-rays of ^{78}Ni has been performed and the discussion with theoretical calculations are on going.

Neutron single-particles states in ^{35}Mg populated by one-neutron knockout reaction

The in-beam γ-ray spectroscopy experiment of ^{35}Mg was performed at RIBF via an one-neutron knockout reaction to clarify the neutron single-particle configuration in ^{36}Mg. The γ-ray energy spectrum of ^{35}Mg, the exclusive one-neutron removal cross sections and the parallel momentum distribution were obtained. The level structure is discussed by comparison with several theoretical model calculations.

Exotic cluster structure in ^{16}C

We performed an invariant mass spectroscopy in order to search for α-cluster states in ^{16}C via α-inelastic scattering at 200 MeV/u. The excitation energies of ^{16}C are reconstructed from $^{16}\mathrm{C}^* \rightarrow {}^{12}\mathrm{Be} + {}^{4}\mathrm{He}\ (+\gamma)$ and $^{16}\mathrm{C}^* \rightarrow {}^{10}\mathrm{Be} + {}^{6}\mathrm{He}$ decay channels by measuring their four momenta with the SAMURAI spectrometer and γ-ray energy. Candidates of α-cluster states are found in the excitation energy spectrum.

Muon capture experiment at RCNP MuSIC

In May and June 2016, we measured γ rays following nuclear muon capture by ^{104,105,106,108,100}Pd isotope targets. X rays from muonic atom of each isotopes have been measured as well. The experiment was conducted at RCNP (Osaka university) MuSIC muon beam line. Muon capture rates for each Pd isotopes were derived by time distribution of γ rays, and charge radii of these isotopes were discussed using measured X ray energy. The following experiment which focused on emitted neutrons after muon capture was also conducted with ^{108}Pd target at MuSIC in February 2017. SEAMINE, which is newly constructed neutron detector array, was employed for the experiment. The analysis is in progress.

Development of neutron scintillator NiGIRI

We are developing neutron detector, NiGIRI (Neutron, ion and Gamma-ray Identification for Radioactive Isotope beam), to investigate equation of states of high-density matter. The detector consists of a organic scintillator aiming at identifying detected γ rays and neutrons using a pulse shape discrimination (PSD) technique. As a result of a PSD analysis, a 3σ separation between γ rays and neutron from a ^{252}Cf source was achieved.

5 Wimmer Group

Research Subjects: Spectroscopy of exotic nuclei using direct reactions

Member: Kathrin Wimmer

There are several experimental as well as theoretical indications that the structure of exotic nuclei differs significantly from what is known from well-studied stable nuclei. Our group performs spectroscopic studies of neutron-rich nuclei using direct reactions. These kinds of reactions are an excellent tool to probe the single-particle properties of nuclei. Therefore information on the nuclear wave functions can be obtained. With this technique we investigate the phenomena of shape-coexistence and new magic numbers across the nuclear chart.

Triple shape coexistence at $N = 28$

One of the most interesting forms of shape coexistence is the occurrence of three different shapes within one nucleus. Such a behavior is expected for ^{44}S, where three low-lying 0^+ states of the nucleus, exhibit spherical, prolate (rugby-ball shaped) and oblate (disk shaped) deformation. Measurements of single-particle properties of these exotic nuclei give further insights in the wave function composition of states. In this FY we have performed an experiment on one-neutron knockout reaction from ^{44}S at the National Superconducting Cyclotron Laboratory (NSCL) to investigate the ground state wave function of this nuclei. From this experiment we can obtain the occupation of the $f_{7/2}$ and $p_{3/2}$ orbitals in the ground state of ^{44}S and thus a measure of the shape mixing in this interesting nucleus, which is supposed to have three different shapes at the same time.

Spectroscopy of the $T_z = -1$ nucleus ^{70}Kr

Extremely proton-rich nuclei provide an interesting test ground for isospin symmetry in nuclei. Isospin non-conserving interactions lead to different structures of nuclei which have proton and neutron number interchanged. So far such tests are limited to lighter nuclei. In an experiment at the RIBF at RIKEN ^{70}Kr was studied by nucleon removal reactions and Coulomb excitation. Previously no excited state was known in this nucleus, our analysis shows candidates for 3 states, and comparison with theoretical calculations suggests that effects from the Coulomb interaction as well as isospin breaking components in the nuclear interaction play a major role in this $N < Z$ nucleus.

Rapid shape changes at $N = 60$

The shape transition at $N = 60$ in the Sr, Zr, Mo region exhibits one of the most dramatic ground state shape transitions known today. In order to develop a better understanding of the underlying wave functions of the states, more information on the underlying single-particle structure is required. Previously we measured the transfer reactions ^{94,95,96}Sr(d,p) to track the evolution of the single-particle energies and their occupation as $N = 60$ is approached at TRIUMF. The next step is to investigate pair-transfer reactions using a radioactive tritium target. These kind of reaction will open new opportunities to investigate the nature of 0^+ states in particular and provide key information on the nature of this most rapid shape transition in the nuclear chart.

Isomer and β-decay spectroscopy around $N = 40$ nuclei

Although not a traditional magic number, some nuclei with 40 neutrons or protons show the typical behavior of a closed shell configuration. This harmonic oscillator shell gap disappears for neutron-rich nuclei, but towards ^{60}Ca collectivity seems to decrease again. In an experiment at RIBF using the AIDA and EURICA setups we studied the β and isomeric decay of several isotopes around ^{60}Ti. New half-lives and γ-ray spectroscopy data for a large set of nuclei was obtained.

Magicity at $N = 32$

$N = 32$ has recently been established as a new magic number, which does not show up in nuclei close to stability. We will probe the magicity of ^{52}Ca at neutron number 32 by two complementary techniques. We will quantify the collectivity for this doubly magic nucleus through Coulomb excitation. The single-particle orbital occupation in the ground state of ^{52}Ca will be obtained by measuring the one-neutron and proton removal reactions. The combination of two complementary measurements will give new insights in the magicity of ^{52}Ca. Comparison with state-of-the art shell model calculations will allow us to draw conclusions on the microscopic structure of this doubly magic nucleus.

Development of a new target for two-neutron transfer reactions

Two-nucleon transfer reactions are a well-suited tool to investigate specific nuclear structure properties, like shape coexistence and pairing correlations. Two-neutron transfer reactions with OEDO at RIBF require a new kind of target. A self-supporting large area tritium target based on a tritium loaded titanium foil is currently developed at the University of Tokyo. A first prototype target, containing deuterons instead of tritium, was tested using a ^{20}Ne at RIKEN. The target has been characterized. Further prototypes containing a larger fraction of hydrogen have been fabricated at the University of Toyama and will be tested in beam next year.

6 Komamiya group

Research Subjects: (1) Preparation for an accelerator and an experiment for the International linear e^+e^- collider ILC, including beam focus study at ATF2 of KEK using nano-meter beam size monitor (Shintake Monitor), research and development of electromagnetic calorimeter for the ILC Experiment; (2) Higgs boson studies and supersymmetric particle searches with the ATLAS detector at the LHC pp collider; (3) Experiment for studying gravitational quantum effects and searching for new short range force using ultra-cold and cold neutron beam

Member: Sachio Komamiya, Yoshio Kamiya, Daniel Jeans

We, particle physicists, are entering an exciting period in which new paradigm of the field will be opened on the TeV energy scale triggered by the new discovery of a Higgs Boson at LHC. The details of the observed Higgs Boson and other new particles will be studied in a cleaner environment of e^+e^- collisions at the International Linear Collider ILC.

1) Preparation for the International e^+e^- Linear Collider ILC: ILC is the energy frontier machine for e^+e^- collisions in the near future. In 2004 August the main linac technology was internationally agreed to use superconducting RF system. The Technical Design Report was completed and published in 2013. Since then, ILC design and hardware development are passed to the Linear Collider Collaboration (LCC) lead by Lyn Evans. The Linear Collider Board (LCB), chaired by Sachio Komamiya is an oversight body of LCC. We are working on ILC accelerator related hardware development, especially on the final focus system. We are developing the Shintake beam size monitor at the ATF2, which is a test accelerator system for ILC located in KEK. The Shintake beam size monitor measured about 40[nm] beam size which is a world record. Also we have been studying possible physics scenario and the large detector concept (ILD) for an experiment at ILC. Since 2012 autumn, a new staff scientist from UK who is an expert on the silicon electromagnetic calorimeter was joined our group. Since then hardware and simulation studies of silicon-tungsten sandwich electromagnetic calorimeters have been extensively performed. He is also working on precise tau-lepton reconstruction at ILC to investigate, for example, CP properties of heavy Higgs bosons.

2) ATLAS experiment at LHC: The epoch of new paradigm for particle physics is going to open with the experiments at LHC. In July 2012, a Higgs Boson was discovered by the ATLAS and CMS experiments at LHC. We call this event as "2012 July Revolution". After the Higgs Boson discovery our students have been working on physics analysis beyond the Standard Model, especially on the searches for supersymmetric partners of gluon and partners of electroweak gauge bosons/ Higgs bosons. Some of the results are already published in journals.

2) Experiment for studying quantum bound states due to the earth's gravitational potential to study the equivalent theorem in the quantum level, and searching for new short-range force using ultra-cold neutron (UCN) beam: A detector to measure gravitational bound states of UCNs is developed. We decided to use CCD's for the position measurement of the UCN's. The CCD is going to be covered by a ^{10}B layer to convert neutron to charged nuclear fragments. The UCNs are going through a neutron guide of 100 $[\mu]$ height and their density is modulated in height as forming bound states within the guide due to the earth's gravity. In 2008 we tested our neutron detector at ILL Grenoble. In 2009 we started the test experiment at ILL. We significantly improved our detector system and performed the experiment in 2011, and the analysis was completed in 2012. The observed modulations in the vertical distribution of UCNs due to the quantization is in good agreement with the prediction by quantum mechanism using the Wigner function. This is the first observation of gravitationally bound states of UCNs with sub-micron spacial resolution. This result was published in PRL. In 2013 we have started a new experiment to search for a new short range force using cold neutron beams scattered with Xe atom. The experiment was performed in HANARO, KAERI, Korea in 2014 and ILL, D22, France in 2016. The new world record of the short range force was established by this experiment and was published in PRL.

7 Aihara-Yokoyama Group

Research Subjects: Experimental Particle Physics and Observational Cosmology.

(1) Study of CP-violation and search for physics beyond the Standard Model in the B meson and the τ lepton systems (Belle); (2) Search for physics beyond the Standard Model at the Super B Factory (Belle II); (3) Dark energy survey at the Subaru telescope (Hyper Suprime-Cam); (4) Long baseline neutrino oscillation experiment (T2K); (5) Search for proton decays (Super-Kamiokande); (6) R&D for the next generation neutrino and nucleon decay experiment (Hyper-Kamiokande); (7) R&D for an experiment to search for axion and light dark matter; (8) R&D of new generation photodetectors.

Members: Hiroaki Aihara, Masashi Yokoyama, and Yoshiuki Onuki

1. Search for new physics at KEK B-factory: Belle experiment One of the major research activities in our group has been a study of CP-violation and searches for physics beyond the Standard Model in the B meson and the τ lepton systems using the KEK B-factory (KEKB). We continue a study of Michel parameters of the τ lepton, which is sensitive to physics beyond the Standard Model. Using $\sim$ 700 million $\tau^+\tau^-$ pairs recorded with the Belle detector, we studied the radiative leptonic decays of τ ($\tau \to \mu\nu\nu\gamma$ and $\tau \to e\nu\nu\gamma$). Using the full kinematic information of daughter particles and their correlations, we measured two Michel parameters of τ for the first time; $\bar{\eta}^{\mu} = -1.3 \pm 1.5 \pm 0.8$, $(\xi\kappa)^{\mu} = 0.8 \pm 0.5 \pm 0.3$, and $(\xi\kappa)^{e} = -0.4 \pm 0.8 \pm 0.9$. We are also studying an improved measurement of the CP violating parameter, ϕ_3, which is currently the least well-measured of the three CKM angles.

2. Physics at the luminosity frontier: Belle II experiment The SuperKEKB project started in 2010. The upgraded accelerator, SuperKEKB, will have a 40 times more luminosity than KEKB. The Belle detector is also being upgraded as the "Belle II" detector with cutting-edge technologies. One of the key elements for the success of Belle II will be its Silicon Vertex Detector (SVD) to precisely measure the decay points of B mesons. Our group is responsible for the construction of the outermost layer of the Belle II SVD. This year we completed production of six ladders of the Belle II SVD. The R&D for the upgrade of the Belle II electromagnetic calorimeter was also carried out.

3. Study of Dark Energy with Subaru telescope: Hyper Suprime-Cam As an observational cosmology project, we have been involved in building a 1.2 Giga pixel CCD camera (Hyper Suprime-Cam) mounted on the prime focus of the Subaru telescope. With this wide-field camera, we plan to conduct an

extensive wide-filed deep survey to investigate the weak lensing. This data will be used to develop a 3-D mass mapping of the universe. It, in turn, will be used to study Dark Energy.

4. Study of neutrino oscillation with accelerator neutrino beam: T2K experiment T2K is a long baseline neutrino experiment using the J-PARC accelerator complex and the Super-Kamiokande detector, 295 km away. By combining both muon-type and electron-type neutrino interactions observed at the Super-Kamiokande detector, with both neutrino and anti-neutrino enhanced beam from J-PARC, we placed the world best constraint on the neutrino mixing angle θ_{23}, and the first-ever constraint on the CP asymmetry parameter in the lepton sector.

In order to improve the systematic uncertainty from neutrino-nucleus interaction cross sections, we have been carrying out a test experiment, named WAGASCI, at the J-PARC neutrino beam facility.

We have proposed an extension of T2K data taking (called T2K Phase II) with an upgrade of near detectors, which will allow us to observe CP violation in the lepton sector with a significance of 3 σ if the parameters are in a favorable region. Our group is leading the upgrade project of the T2K near detectors.

5. Search for proton decays: Super-Kamiokande Proton decay is the only way to directly prove the Grand Unified Theory, which is an attractive candidate for a model of physics beyond the Standard Model. We have established an analysis to enhance the sensitivity to proton decay at Super-Kamiokande with an improved event reconstruction. The lower limit of the proton lifetime, $\tau_p/\mathrm{Br}(p \to e^+\pi^0) > 1.87 \times 10^{34}$ years, has been obtained by the analysis of data recorded with the Super-Kamiokande detector.

6. Next generation large water Cherenkov detector: Hyper-Kamiokande project In order to pursue the study of neutrino properties beyond T2K, we propose the next generation water Cherenkov detector, Hyper-Kamiokande (Hyper-K). One of the main goals of Hyper-K is the search for CP violation in the leptonic sector using accelerator neutrino and anti-neutrino beams. The sensitivity to the CP violating phase is studied with full simulation by our group. It is shown that with Hyper-K and J-PARC accelerator, CP violation can be observed after five years of experiment for a large part of possible parameter space. The sensitivity to proton decay lifetime, which is expected to be an order of magnitude better than current Super-K sensitivity, is also studied in our group.

7. R&D for an experiment to search for axion and light dark matter We have started an R&D to investigate the feasibility of an experiment to search for axion and light dark matter using silicon pixel detector with Silicon On Insulator technology.

8 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

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.
  - New dibson Resonance: A small excess is found at M=750GeV for $\gamma\gamma$ resonance. We need more data to confirm the excess is new physics or just statistical fluctuation.

- (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:
  - Bose Einstein Condensation of positronium.
  - Axion searches using Spring 8
  - $\gamma\gamma$ scatter Using FEL Xray.
  - Vacuum Birefringence using Strong Magnetic field or Strong light.

9 Miyashita Group

Research Subjects: Statistical Mechanics, Phase Transitions, Quantum Spin systems, Quantum Dynamics, Non-equilibrium Phenomena

Member: Seiji Miyashita and Takashi Mori

Quantum response and Quantum dynamics

Quantum dynamics under time dependence field is one of the most important subjects in our group. In the 2016 fiscal year, we studied the following topics.

Quantum response to the external field has been one of projects of our group. We introduced a method to decompose the spectrum into contributions specified by the magnetizations of the resonating states, and applied the so-called moment method for each contribution. By making use of it, the size and temperature dependences of the ESR spectrum of the 1DXXZ spin model have been obtained [2].

Synergistic effects of the spin-orbit interaction and the external field on the optical conductivity of the Hubbard model were studied. In one-dimensional noninteracting case ($U = 0$: the tight-binding model), we obtained exact result of the effect as a function of the angle between the directions of the spin-orbit interaction and the external field. For the interacting case, we studied the model numerically and found the angle dependent properties.[39, 42, 47]

We have studied the relaxation of metastable state of magnetization under sweeping field in a uniaxial magnetic systems. In the fiscal year, we studied the spin size S dependence of the population dynamics over the adiabatic eigenstates after the Storner-Wohlfarh point, and found some universal aspects of the distribution which survives in the classical limit. We also studied the effect of thermal decoherence on the quantum beating which was found in the previous paper [20, 23, 26, 32].

We studied thermalization in isolated quantum systems. We formulate this problem as a general problem of the ensemble equivalence [9]. We showed that the system thermalizes when the effective dimension of the initial state is sufficiently large but may be exponentially smaller than the dimension of the Hilbert space.

We also consider the problem of the second law of thermodynamics from the viewpoint of the ensemble equivalence. We proved that the amount of increase of the entropy of the system must be extensively large, i.e. proportional to the system size, by using the large deviation property of the equilibrium state of a macroscopic quantum system [10].

We studied fundamental properties of the quantum master equation (QME). Usually QME is perturbatively derived by tracing out the degree of freedom of the thermal bath. We demonstrated this procedure in a spin system. We found that properties obtained by the QME derived by the perturbation method qualitatively agree with the numerical results, but quantitatively they differ each other [7].

The effects of noise on the apparatus to measure the current in mesoscopic quantum dot systems was quantum mechanically studied when the noise contains not only the usual gaussian noise but also a Poisson noise. [15]

We also studied relaxation phenomena to a metastable state (the pre-thermalized state) due to the entanglement of the state, which would be realized in cold atom systems, e.g., harmonic oscillators [11], and in the 1D Bose gas[12].

Cooperative Phenomena and Phase Transitions

Phase transitions and critical phenomena are also important subjects of our group.

The phase transitions in frustrated system show various interesting properties. We found a peculiar size dependence around the critical value of the next-nearest-neighbor (nnn) couping of the Mekata model (antiferromagnetic Ising model on the triangular lattice with nnn ferromagnetic model). If the couping is smaller than the critical value, the system exhibits an intermediate-temperature phase, i.e., the so-called partially-disordered (PD) phase, while it does not have the PD phase with large couplings. We also studied this phenomenon on the six-state clock model.[4]

We have studied the effect of the elastic interaction of the systems with bistable states which have different local lattice structure. In the fiscal year, we studied the so-called "elastic expansion" which has been observed experimentally in some spin-crossover materials after a pulse irradiation by time-resolve method. In particular, the effect of thermal diffusion was investigated.[28, 29]

We have been contributing the project of the Elements Strategy Initiative Center for Magnetic Materials (ESCICMM) under the outsourcing project of MEXT. We have studied microscopic mechanisms of the coercive force of permanent magnets at finite temperatures [51].

We studied threshold of magnetic fields for nucleation and domain wall propagation in a sandwich structure of hard-soft-hard magnet. There, we found a novel aspect due to the narrow domain wall effect inherent to the discreteness of the lattice structure and also to the reduction of the exchange energy at finite temperatures [6].

We also studied magnetic properties of $Nd_2Fe_{14}B$ in a realistic atomic scale by making use of the real structure and exchange constants obtained from the first-principle calculations. There, we investigated thermodynamic properties such as temperature dependences of magnetization $M(T)$ and the anisotropy constant $K(T)$. Indeed, we successfully reproduced the reorientation at a low temperature [3, 5].

Temperature dependent of structure of domain walls parallel and perpendicular to the Nd plane in microscopic realistic scale. The obtained width is consistent with the experimental estimations. The domain wall along the c-axis (perpendicular to the Nd plane) is shorter than that along the a-axis. The width of the Domain wall was found to increase with the temperature [1].

Furthermore, we demonstrate LLG dynamics of nucleation process and domain wall formation from the nucleation in a lattice of 12x12x9 unit cells, in which we found the revered magnetization propagates fast in the a-axis and a domain wall is formed parallel to the Nd-plane [21].

We will also discuss on effect of the dipole-dipole interaction on the domain wall formation [41, 45].

10 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, organic conductors, and magnetic systems with frustration and/or spin-orbit interactions. The followings are the current topics in our group.

- High-T_c superconductivity
  Flux states as a symmetry-breaking state in high-T_c superconductivity.[1]
  Microscopic theory of the electron-doped high-T_c cuprates.
- Dirac electron systems in solids
  Quantum electrodynamics in solids: Dielectricity and diamagnetism.
  Nuclear spin relaxation time of the orbital currents in Dirac electron systems.
- Orbital magnetic susceptibility
  Orbital magnetism of Bloch electrons: General theory and application to single-band models. [2]
  Corrections to the Peierls phase in the tight-binding model.[3]
  Theory of orbital susceptibility on excitonic insulator.[4]
- Theories on topological materials
  Spin current and axial current generation in a Dirac semimetal.[5]
  Magnon spin-momentum locking.
  Magnon spin current and spin-Seebeck effect in a topological-insulator/ferromagnet interface.[6]
  Relationship between fractal and quantum Hall coefficients.[7]
- Theories on heavy fermion systems and multi-band electron systems
  Quasiparticles in f^2-configuration.
- Spin systems, chiral magnets, and spin-orbit interaction
  Generic model and phase diagram for hyperkagome iridates.[8]
  Clustering of topological charges in Kagome classical spin liquid.
  Dynamics of a chiral soliton lattice under a constant current.
  Dzyaloshinskii-Moriya interaction induced from RKKY at an interface.[9]

[1] H. Yokoyama, S. Tanuma and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 124707-1-21 (2016). "Staggered Flux State in Two-Dimensional Hubbard Model"

[2] M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 044713-1-18 (2017). "Theory of Magnetization in Bloch Electron Systems". See also J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 064709 (2016), and *ibid* **85**, 104708 (2016).

[3] H. Matsuura and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 074709-1-6 (2016) "Theory of Orbital Susceptibility in the Tight-Binding Model: Corrections to the Peierls Phase"

[4] H. Matsuura and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 093701-1-4 (2016) "Theory of Orbital Susceptibility on Excitonic Insulator"

[5] N. Okuma and M. Ogata: Phys. Rev. B **93**, 140205-1-4 (2016). "Unconventional Spin Hall Effect and Axial Current Generation in a Dirac Semimetal"

[6] N. Okuma and K. Nomura: Phys. Rev. B **95**, 115403-1-8 (2017). "Microscopic derivation of magnon spin current in topological insulator/ferromagnet heterostructure"

[7] N. Yoshioka, H. Matsuura and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 064712-1-6 (2016) "Quantum Hall effect of massless Dirac fermions and free fermions in Hofstadter's butterfly"

[8] T. Mizoguchi, K. Hwang, K.-H. Lee and Y. B. Kim: Phys. Rev. B **94**, 064416 (2016). "Generic model for hyperkagome iridate in the local moment regime"

[9] T. Shibuya, H. Matsuura and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 114701-1-4 (2016) "Magnetic chirality induced from RKKY interaction at an interface of a ferromagnet/heavy metal heterostructure"

11 Tsuneyuki Group

Research Subjects: Theoretical Condensed-Matter Physics

Member: Shinji Tsuneyuki and Ryosuke Akashi

Computer simulations from first principles enable us to investigate properties and behavior of materials beyond the limitation of experiments, or rather to predict them before experiments. Our main subject is to develop and apply such techniques of computational physics to investigate basic problems in condensed matter physics, especially focusing on prediction of material properties under extreme conditions like ultra-high pressure or at surfaces where experimental data are limited. Our principal tool is molecular dynamics (MD) and first-principles electronic structure calculation based on the density functional theory (DFT), while we are also developing new methods that go beyond the limitation of classical MD and DFT for study of electronic, structural and dynamical properties of materials.

In FY2016, we investigated structural transformation and superconducting transition temperature of H_xs (x = 2-3) under ultra-high pressure with the density functional theory for superconductors (SC-DFT). We newly implemented a method of including the spin fluctuation effect in our SC-DFT code. We also developed various method of calculating material properties from first principles: thermal expansivity, electronic states spreading over a nano system based on the divide-and-conquer method, wave function theory to treat correlated electrons in solids (the transcorrelated method), etc.

Our research subjects in FY2016 are as follows:

- High-pressure phases of superconducting H_xS (x = 2-3)
- Effect of spin fluctuation in phonon-mediated superconductors
- Anisotropic superconducting gap in YNi_2B_2C
- Anharmonic effect of rattling atoms in clathrate
- Negative thermal expansivity of ScF_3
- Non-thermal ablation of metals by Laser pulses
- Impurity effect on the magnetic anisotropy of sintered magnets
- First-principles transcorrelated method
- A method for electronic structure calculation of large systems based on a divide and conquer method
- Data assimilation for crystal structure determination

12 Todo Group

Research Subjects: Novel state and critical phenomena in strongly correlated systems, Development of new simulation algorithms for strongly correlated many-body systems, Development of open-source software for next-generation parallel simulations

Member: Synge Todo and Hidemaro Suwa

We study novel phases and critical phenomena in strongly correlated many-body systems, such as classical/quantum magnets and Bose-Hubbard model, by using the state-of-the-art computational physics techniques like the Monte Carlo methods. We also develop new computational algorithms for quantum many-body systems, such as the tensor-network algorithms, study the parallelization technique for supercomputers, and develop open-source software for next-generation parallel simulations.

Novel state and critical phenomena in strongly correlated systems

- Spinon dispersion at the deconfined quantum critical point
- Effective dimension of the random-field Ising model with correlated randomness
- Quantum critical phenomena of system with strong spatial and temporal anisotropy

- Critical decay exponents of long-range interacting spin system
- Topological order parameter for two-dimensional SPT phase
- Optical bistability in cavity system
- Molecular dynamics study of shear band in glass

Development of new simulation algorithms for strongly correlated many body systems

- Directed worm algorithm with geometric optimization
- Combined optimization method and application to determination of crystal structure
- Parameter inference based on unsteady relaxation and application to inverse Ising problem
- Quantum Monte Carlo method for calculation of velocity of excitations of quantum spin systems

Development of open-source software for next-generation parallel simulations

We are developing various open-source software packages: ALPS: simulation software package for quantum lattice models, ALPSCore: next-generation of ALPS core library, ALPS/looper: loop algorithm quantum Monte Carlo method, BCL: Monte Carlo algorithm without detailed balance, Cluster-MC: cluster algorithm Monte Carlo method, HΦ: parallel Exact diagonalization package, Kω: linear algebra based on shifted Krylov subspace method, MateriApps: portal of materials science simulation, MateriApps installer: collection of install scripts of MateriApps applications, MateriApps LIVE!: Live USB Linux system for materials science simulations, Rokko: parallel exact diagonalization package, standards: standard algorithm library for computational science, worms: worm algorithm quantum Monte Carlo method, etc.

[1] Toshiki Horita, Hidemaro Suwa, Synge Todo, Upper and lower critical decay exponents of Ising ferromagnet with long-range interaction, Phys. Rev. E **95**, 012143 (2017).

[2] Andrey E. Antipov, Gabriele Carcassi, Tianran Chen, Xi Chen, Qiaoyuan Dong, Lukas Gamper, Jan Gukelberger, Ryo Igarashi, Sergey Iskakov, Mario Könz, James P. F. LeBlanc, Ryan Levy, Ping Nang Ma, Joseph E Paki, Hiroshi Shinaoka, Synge Todo, Matthias Troyer, Emanuel Gull, Updated Core Libraries of the ALPS Project, Comp. Phys. Comm **213**, 235–251 (2017).

[3] Mitsuaki Kawamura, Kazuyoshi Yoshimi, Takahiro Misawa, Youhei Yamaji, Synge Todo, Naoki Kawashima, Quantum Lattice Model Solver $\mathcal{H}\phi$, to appear in Comp. Phys. Comm.

13 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 which would give rise to a variety of quantum phases. We study theoretically these systems, with the aim of predicting novel quantum phenomena that have no counterpart in weakly-interacting systems. We are currently interested in (i) topological phases of matter, (ii) quantum spin liquids, and (iii) entanglement in quantum spin chains. In addition, we are also interested in the mathematical aspects of the study of the above mentioned fields. Our research projects conducted in FY 2016 are the following:

- Strongly correlated systems
  - Quantum trimer model and resonating-valence-bond states [1]
  - Supersymmetry breaking and Nambu-Goldstone fermions [2, 3]
- Topological phases of matter

  - Hofstadter's butterfly and the integer quantum Hall effect [4, 5]
  - Disordered topological insulators [6, 7]
- Solvable models and statistical physics
  - Entanglement spectra of integrable spin chains [8]
  - Volume-law entanglement in deformed Fredkin spin chain [9]

[1] Hyunyong Lee, Yun-Tak Oh, Jung Hoon Han, and Hosho Katsura, Phys. Rev. B, **95**, 060413(R) (2017).

[2] Noriaki Sannomiya, Hosho Katsura, and Yu Nakayama, Phys. Rev. D **94**, 045014 (2016).

[3] Noriaki Sannomiya, Hosho Katsura, and Yu Nakayama, Phys. Rev. D, **95**, 065001 (2017).

[4] Nobuyuki Yoshioka, Hiroyasu Matsuura, and Masao Ogata, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 064712 (2016).

[5] Yasuyuki Hatsuda, Hosho Katsura, and Yuji Tachikawa, New. J. Phys. **18**, 103023 (2016).

[6] Hosho Katsura and Tohru Koma, J. Math. Phys. **57**, 021903 (2016).

[7] Hosho Katsura and Tohru Koma, arXiv:1611.01928 (2016).

[8] Panjin Kim, Hosho Katsura, Nandini Trivedi, and Jung Hoon Han, Phys. Rev. B **94**, 195110 (2016).

[9] Olof Salberger, Takuma Udagawa, Zhao Zhang, Hosho Katsura, Israel Klich, and Vladimir Korepin, to appear in J. Stat. Mech.

14 Fujimori Group

Research Subjects: Spectroscopy of Strongly Correlated Systems

Member: Atsushi Fujimori and Goro Shibata

We study the electronic structure of superconductors and spintronics materials by high-energy spectroscopic techniques such as angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) and soft x-ray magnetic circular dichroism (XMCD) using synchrotron radiation. We investigate the mechanisms of high-temperature superconductivity [1], metal-insulator transitions [2], giant magnetoresistance, and spin/charge/orbital ordering in strongly correalted systems such as transition-metal compounds, ferromagnetic semiconductors [3], and their interfaces.

[1] L. Liu, K. Okazaki, T. Yoshida, H. Suzuki, M. Horio, L. C. C. Ambolode II1, J. Xu, S. Ideta, M. Hashimoto, D. H. Lu, Z.-X. Shen, Y. Ota, S. Shin, M. Nakajima, S. Ishida, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Mikami, T. Kakeshita, Y. Yamakawa, H. Kontani, S. Uchida, and A. Fujimori: Unusual nodal behaviors of the superconducting gap in the iron-based superconductor $Ba(Fe_{0.65}Ru_{0.35})_2As_2$: Effects of spin-orbit coupling, Phys. Rev. B **95**, 104504–1-5 (2017).

[2] B. A. Frandsen, L. Liu, S. C. Cheung, Z. Guguchia, R. Khasanov, E. Morenzoni, T. J. S. Munsie, A. M. Hallas, M. N. Wilson, Y. Cai, G. M. Luke, B. Chen, W. Li, C. Jin, C. Ding, S. Guo, F. Ning, S. J. L. Billinge, S. Sakamoto, A. Fujimori, T. Murakami, H. Kageyama, J. A. Alonso, G. Kotliar, M. Imada, and Y. J. Uemura, Volume-wise destruction of the antiferromagnetic Mott insulating state through quantum tuning, Nat. Commun. **7**, 12519 (2016).

[3] S. Sakamoto, Y. K. Wakabayashi, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, H. Suzuki, Y. Ban, H. Yamagami, M. Tanaka, S. Ohya, and A. Fujimori: Origin of robust nanoscale ferromagnetism in Fe-doped Ge revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy and first-principles calculation, Phys. Rev. B **95**, 075203–1-5 (2017).

15 Hasegawa Group

Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics

Members: Shuji HASEGAWA, Akari TAKAYAMA, and Ryota AKIYAMA

Surfaces of materials are platforms of our research where rich physics is expected due to the low-dimensionality, symmetry breakdown, a wide variety of structures, and direct access for measurements. (1) Electronic/spin/mass transports, (2) atomic/electronic structures, (3) phase transitions, (4) electronic excitations, (5) spin states and magnetism, and (6) epitaxial growths of coherent atomic/molecular layers/wires on surfaces of metals, semiconductors, topological insulators, and nano-scale phases such as surface superstructures, ultra-thin films including monolayer materials such as graphene and silicene. 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 Kerr effect apparatuses. Main results in this year are as follows.

(1) Surface electronic/spin transport:

- Detection of superconductivity in double-layer Thallium and superconductor-insulator transition induced by magnetic field
- Shubnikov-de Haas oscillation at double-layer graphene with intercalation
- Transport, magnetism, and atomic structure at interface between a topological insulator and magnetic insulator
- Detection of Photogalvanic effect at surface states of topological insulators
- Measurements of conductivity of organic molecule sheets by using four-tip STM
- Measurements of superconductivity at metal-covered Ge(111) surface structures

(2) Surface phases, ultra-thin films, and phase transitions:

- STM/S measurement at ultra-low temperature under magnetic field, on a monolayer superconductor Si(111)-$\sqrt{3} \times \sqrt{3}$-(Tl+Pb), revealing unconventional superconductivity nature
- Angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) of topological crystalline insulators

(3) Construction of new apparatuses:

- Fabrication of UHV-SQUID system to detect Meissner effect of atomic-layer superconductors
- Fabrication of a pure-spin-current injection probe

[1] S. Ichinokura, L. Bondarenko, A. Tupchaya, D. Gruznev, A. Zotov, A. Saranin, and S. Hasegawa: *Superconductivity in thallium double atomic layer and transition into an insulating phase intermediated by a quantum metal state*, 2D Materials **4**, 025020 (2017).

[2] T. Nakamura, R. Yoshino, R. Hobara,S. Hasegawa, and T. Hirahara: *Development of a convenient in situ UHV scanning tunneling potentiometry system using a tip holder equipped with current-injection probes*, e-J. Surf. Sci. Nanotech. **14**, 216-224 (2016).

[3] S. Ito, B. Feng, M. Arita, A. Takayama, R.-Y. Liu, T. Someya, W.-C. Chen, T. Iimori, H. Namatame, M. Taniguchi, C.-M. Cheng, S.-J. Tang, F. Komori, K. Kobayashi, T.-C. Chiang, and I. Matsuda: *Proving Nontrivial Topology of Pure Bismuth by Quantum Confinement*, Phys. Rev. Lett. **117**, 236402 (2016)

[4] Y. K. Wakabayashi, R. Akiyama, Y. Takeda, M. Horio, G. Shibata, S. Sakamoto, Y. Ban, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, M. Tanaka, and S. Ohya, *Origin of the large positive magnetoresistance of $Ge_{1-x}Mn_x$ granular thin films*, Physical Review B **95**, 014417 (2017).

[5] R. Ishikawa, T. Yamaguchi, Y. Ohtaki, R. Akiyama, S. Kuroda, *Thin film growth of a topological crystal insulator SnTe on the CdTe (111) surface by molecular beam epitaxy*, Journal of Crystal Growth **453**, 124-129 (2016).

16 Fukuyama Group

Research Subjects: Low Temperature Physics (Experimental):
Quantum fluids and solids with strong correlations and frustration,
Novel electronic states in graphene and carbon nanotube.

Member: Hiroshi Fukuyama, Tomohiro Matsui

Our interests are in (i) novel quantum phases with strong correlations and frustration in two dimensional (2D) helium three (^{3}He), four (^{4}He) and their mixture, and (ii) novel electronic properties of low dimensional materials, particularly graphene and carbon nanotube. We are investigating these phenomena in a wide temperature rage from room temperature down to microkelvins, using various experimental techniques such as NMR, calorimetry, torsional oscillator, scanning tunneling microscopy and spectroscopy (STM/S), and electronic transport measurement. Our efforts are also devoted to development of new experimental and cryogenic techniques.

1. **Quantum Spin Liquid state in 2D ^{3}He system:**

   Quantum spin liquid (QSL) is a noble magnetic ground state of $S = 0$ where the spin expectation value at each lattice site remains zero even at $T = 0$. 2D solid ^{3}He is the first candidate material for QSL which was found experimentally by our group in 1997. Since then, many other candidate materials had been found in highly frustrated electronic spin systems, but 2D ^{3}He is still one of the most promising candidates. Recently we have discovered a new QSL in 2D ^{3}He on graphite preplated with a bilayer of HD. This has anomalous power-law temperature dependencies of specific heat (C) and magnetic susceptibility (χ) with fractional powers, while the previously known QSL in the second layer of ^{3}He on graphite does a T-linear dependence for C and a T-independent χ.

2. **Possible superfluid "quantum liquid crystal" phase in 2D ^{4}He system:**

   So far, only three quantum phases, i.e., quantum gas, quantum liquid and quantum solid, have been known to exist in nature. Recently, we are proposing a new member to them, a quantum liquid crystal (QLC), which we found at densities in between the quantum liquid and solid phases below $T = 1.4$ K in the second layer of helium on graphite from heat capacity measurements. The most probable state for this is a *quantum hexatic phase* where the system possesses only the quasi-long range bond orientational ordering. In bosonic ^{4}He, superfluid order can coexist in this phase below 0.4 K, which is considered as a member of supersolids.

3. **Liquefaction of ^{3}He in two dimensions:**

   Until our recent C measurement of monolayers of ^{3}He of low densities, the ^{3}He system has long been believed not to liquefy in 2D unlike in 3D. This is because of increasing fluctuations in lower dimensions. But we found ^{3}He atoms form self-bound liquid paddles with a very low density of $0.6 - 0.9$ nm^{-2} below 1 K. Our finding stimulated theoreticians to reexamine this problem, and recent quantum Monte Carlo calculations seem to give results much closer to the experiment than the previous attempts. We are now planning to start a new C measurement using a graphite substrate with a much longer coherence length than Grafoil used previously.

4. **Zigzag edge state in graphene and its application to future nanoelectronics:**

   Graphene, a monatomic carbon sheet, has remarkable electronic and structural properties due to its unique linear dispersion relation. It is potentially applicable to a vast area of technology including graphene-based electronic devices. One of the most important topics in graphene studies is the *zigzag edge state* and its spin polarization. This localized electronic state was experimentally found for the first time by our group in 2005 using STM/S technique at naturally existing monatomic step edges on a graphite surface. It is expected that the spin degeneracy of the zigzag edge state can easily be lifted by a small perturbation like the electron-electron interaction. This will result in high spin polarization at the edge. Thus, in a nano ribbon with zigzag edges on both sides (zigzag nanoribbon), one can expect opening the band gap whose energy width is controllable by the ribbon width and

applied magnetic field. Due to this, zigzag nanoribbon is considered to be highly useful in future electronics.

Fabrication of zigzag nanoribbons is highly demanding because of the difficulty of precise processing of zigzag edge in an atomic scale. We have recently succeeded in fabrication of hexagonal nanopits of monatomic depth with high-quality zigzag edges on a graphite surface by use of hydrogen plasma etching. The size and density of nanopit can be controlled by tuning the plasma excitation power, temperature, dose time, and partial pressure of hydrogen. Therefore, one can also fabricate a zigzag nanoribbon in between two adjacent hexagonal nanopits. We are now studying the local electronic state of the spin polarized zigzag edge state by STM/S with an atomic spatial resolution.

5. **Random network of carbon nanotubes:**

   Carbon nanotube (CNT) is a rolled graphene with a nanometer size diameter and a high length/diameter ratio. It is a promising quasi one-dimensional (1D) material for future technology. Depending on the rolling chirality, CNT becomes either metallic or semiconducting. The electronic properties of metallic CNTs are expected to obey the Tomonaga-Luttinger liquid (TLL) theory which describes behaviors of interacting fermions in 1D. Recently we found that the electrical resistivity of random networks of high-purity double walled metallic CNTs show surprisingly behaviors expected from the TLL theory. Magneto-transport measurements gave us hints to solve the question why such a macroscopic 3D network can follow the TLL theory. Further research is now being undertaken to obtain more information and to seek for new functions of CNTs.

6. **Development of new refrigeration systems:**

   Two projects are on going. One is to develop a compact and continuous nuclear demagnetization refrigerator (ccNDR) with which $T = 0.8$ mK can be kept continuously by use of two $PrNi_5$ nuclear spin stages connected in serious. Such ultra-low temperatures are now required in many research disciplines including material science, quantum information, and astrophysics.

   The other is to develop a refrigeration system for scanning probe microscope (SPM) based on helium circulation which enables us to take STS data at $T = 2 - 4$ K without being interrupted by liquid helium refilling which is now expensive and sometimes not available stably in industries or developing countries. We have successfully tested the high thermal shielding performance of the low-consumption and low vibration-transmission helium transfer tube we designed.

17 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.

   It is well known that external magnetic fields and magnetic moments of impurities both suppress superconductivity. However, their combined effect on superconductivity has not been elucidated yet. In 2016, we have studied the superconducting transition in ultrathin Pb films with magnetic impurities grown on a cleaved GaAs(110) surface. It was demonstrated that the transition temperature can be enhanced by external magnetic fields applied parallel to the conducting plane. Furthermore, we found that a Pb-Ce alloy, where superconductivity is totally suppressed at zero-field, actually become superconducting in parallel magnetic fields. These phenomena were explained in terms of the suppression of the spin-exchange scattering rate, which can be controlled by the magnetic field.

   To observe the spatial modulation caused by the Cooper pairs with a finite momentum in two dimensional superconductivity without spatial inversion symmetry, we began to construct the scanning tunneling microscope that works under a high magnetic field in the direction parallel to the two dimensional plane.

18 Shimano Group

Research Subjects: Optical and Terahertz Spectroscopy of Condensed Matter

Member: Ryo Shimano and Ryusuke Matsunaga

We study light-matter interactions and many body quantum correlations in solids, aiming at the quantum phase control of many body systems by light. In order to investigate the role of electron and/or spin correlations in the excited states as well as the ground states, we focus on the low energy electromagnetic responses, in particular in the terahertz(THz) (1THz∼4meV) frequency range where quasi-particle excitations and various collective excitations exist. The research summary in this year is as follows.

1. **Photoexcited high density electron-hole system in semiconductor:** We have investigated the exciton Mott transition in a bulk GaAs under the condition of resonant excitation of excitons by using optical pump and THz probe spectroscopy. At high-density excitation above the Mott transition density we found that the optical conductivity spectrum remarkably deviates from that of Drude-type and shows the increase of the effective electron mass and the frequency-dependent scattering rate as typically observed in normal state of high T_c superconductors. This result indicates the transient appearance of an anomalous metallic phase with strong electron correlations, which imply a precursor of quantum condensation into the electron-hole BCS state. We also performed a rate equation analysis based on the Saha equation with a detailed balance between excitons and unbound electron-hole pairs. We found that the ionization ratio of excitons exhibits a bistability as a function of pair density in a good agreement with our experimental results.

2. **Optical control of superconductivity:** We performed the polarization-resolved nonlinear THz transmission experiment for NbN to clarify the origin of nonlinear interaction between the strong THz wave and the superconducting state. Both the collective Higgs amplitude mode and the charge-density fluctuation (or Cooper-pair breaking) can contribute the nonlinear response in superconductors and induce the strong THz third-harmonic generation (THG). We found that (i) the THG intensity is isotropic for the incident THz field polarization direction to the crystal axis, and (ii) the polarization of the THG is always parallel to that of the incident THz field for arbitrary crystal axis. From the symmetry arguments these experimental results exclusively indicates that the Higgs mode has a dominant contribution on the nonlinear response, which is opposite to the calculation based on the BCS mean-field analysis. The dynamical mean-field theory calculation has showed the BCS approximation significantly underestimates the contributions of the collective mode when the retarded electron-phonon interaction or impurity scattering is taking into consideration. Our results show

that for NbN where the electron-phonon interaction is remarkably strong, the Higgs mode appears in nonlinear susceptibility in preference to the charge-density fluctuation. We also performed the time-resolved measurement for high-T_c cuprate superconductors and for an iron-chalcogenide superconductor to study the nonlinear dynamics of the d-wave superconductivity and the strongly-coupled superconducting system.

3. **Ultrafast nonlinear optics in Landau-quantized graphene:** We studied the ultrafast nonlinear dynamics in Landau-quantized graphene by using THz pump and THz probe spectroscopy under magnetic field. From the pump-probe signals we obtained the THz pump-induced transient spectral change for right(left)-handed circular polarization. The absorption bleaching was observed for the right-handed circularly-polarized light, which can be interpreted by the Pauli blocking effect for the Landau-level transition near the Fermi energy. In addition, the induced absorption was also observed for left-handed circular polarization, indicating the drastic change of electron distribution far below the Fermi energy. These result were reproduced well by numerical calculation based on the density matrix formalism and indicates a realization of ultra-strong light-matter coupling regime in graphene.

19 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 FY2016 included, 5d complex Ir oxides with interplay of electron correlations and strong spin orbit coupling, spin liquids, anti-perovskites with Dirac electrons with excitonic ground states.

Realization of spin liquid state in (hyper-)honeycomb iridates:

Honeycomb iridates have been believed to become Kitaev-honeycomb-model spin liquid. The key ingredient here is bond-dependent anisotropic Ising-like interactions arising from spin-orbit coupling and specifiic material engineering for $J_{\rm eff} = 1/2$ quantum pesudo spins of Ir. We have demonstrated that $H_3LiIr_2O_6$ is indeed spin liquid, as the first material of such a liquid, down to 1 K by nuclear magnetic resonance and bulk experiments. And this year we confirmed that it remains paramagnetic (spin liquid) down to 50 mK by ultralow-temperature specific heat experiment. Three-dimensional hyper-honeycomb iridate β-Li_2IrO_3 is also found to be a clean qunatum spin liquid under ultrahigh pressure of 3.3 GPa, which is demonstrated by our ultrahigh-pressure NMR measurement. We now pursuit a realization of Kitaev spin liquid by investigating fractionalized elemental excitations or exotic gapped states under magnetic fields.

Three-dimensional Dirac electron systems:

We have demonstrated a realization of three-dimensional Dirac electrons in anti-perovskite oxide Sr_3PbO, which is evidenced by the quantum-limit characters in the magnetoresistance under high magnetic fields. This year, we have carried out ^{207}Pb NMR experiments on single-crystal samples with two different carrier densities to establish Dirac-type dispersions. It was found that the temperature dependence of NMR relaxation rate certainly reflects three-dimensional Dirac-type density of states. Chiral anomaly is a phenomenon peculiar to this quantum-limit physics, and we have found a sign reversal of magnetoresistance with respect to direction of applied megnetic field. The anisotropic transport caused by magnetic

field needs to be further considered in relation to the chiral anomaly and current jetting effect.

The semi-metallic $A\mathrm{IrO_3}$ (A=Sr,Ca) perovskites are predicted to have three dimensional Dirac-node electrons and heavier holes at the fermi level. We fabricated epitaxially grown $A\mathrm{Ir_{1-x}Sn_xO_3}$ (A=Sr,Ca) on $\mathrm{SrTiO_3}$(001) substrate to construct phase diagrams consisting of a magnetism phase, Dirac-node semimetal, and unknown physics in between. Substitution of Ir by Sn makes the system more insulating, and as a result, weak ferromagnetism appear. In these systems, namely, a competition between hopping and Coulomb repulsion can be well managed by a diltuion of Ir ions or a distortion of Ir-O-Ir bond. Details near the phase boundary are yet to be identified and will be investigated.

20 Hayashi Group

Research Subjects: Spin orbit effects in thin film heterostructures

Member: Masamitsu Hayashi, Masashi Kawaguchi

We have been working on the physics of phenomena that derive from the strong spin orbit interaction of materials and interface in thin film heterostructures. We study spin dependent transport, magnetism, thermal and optical response of metal/oxide heterostructures. Currently we put a strong effort on studies of phenomena that arise from the strong spin orbit interaction of the system: e.g. spin Hall and Nernst effects, Dzyaloshinskii-Moriya interaction, magneto-optical Kerr and Faraday effects, Rashba-Edelstein effect. The following are the research projects carried out in FY 2016.

- Spin current generation
  - Spin Hall effect of 5d transition metals[5]
  - Spin Hall magnetoresistance in metallic heterostructures[5]
- Spin orbit interaction at interfaces
  - Characterization of chiral domain walls[3]
  - Current controlled motion of chiral domain walls[1]
  - Electric field control of non-linear magnetic anisotropy[2]

[1] R. P. del Real, V. Raposo, E. Martinez, M. Hayashi, Current induced generation and synchronous motion of highly packed coupled chiral domain walls. Nano Lett. 17, 1814 (2017).

[2] Y.-C. Lau, P. Sheng, S. Mitani, D. Chiba, M. Hayashi, Electric field modulation of the non-linear areal magnetic anisotropy energy. Appl. Phys. Lett. 110, 022405 (2017).

[3] J. Torrejon, E. Martinez, M. Hayashi, Tunable inertia of chiral magnetic domain walls. Nature Comm. 7, 13533 (2016).

[4] J. Kwon, J. Yoon, P. Deorani, J. M. Lee, J. Sinha, K.-J. Lee, M. Hayashi, H. Yang, Giant nonreciprocal emission of spin waves in Ta/Py bilayers. Science Adv. 2, e1501892 (2016).

[5] J. Torrejon, J. Kim, J. Sinha, M. Hayashi, Spin-Orbit Effects in CoFeB/MgO Heterostructures with Heavy Metal Underlayers. SPIN 06, 1640002 (2016).

21 Theoretical Astrophysics Group

Research Subjects: Observational Cosmology, Extrasolar Planets, Star Formation, and high-energy astrophysics

Member: Yasushi Suto, Naoki Yoshida, Kazumi Kashiyama, & Masamune Oguri

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 and high-energy astrophysics.

"Observational Cosmology" attempts to understand the evolution of the universe on the basis of the observational data in various wavebands. The proper interpretation of the recent and future data provided by COBE, ASCA, the Hubble telescope, SUBARU, and large-scale galaxy survey projects is quite 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 evolutionary behavior of the universe in the past and in the future. Our current interests include nonlinear 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, and statistics of gravitationally lensed quasars.

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 directly, although not completely, the evolution of the cosmic structure all the way 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 stars were born, which illuminate 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 supercomputer simulations of structure formation in the early universe. Direct and indirect observational signatures are explored considering future radio and infrared telescopes.

Does a second earth exist somewhere in the universe? This naive question has been 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 a few thousands candidates of exoplanets have been reported as of May 2017. While most of the confirmed planets turned out to be gas giants, the number of rocky planet candidates is steadily increasing. Therefore the answer to the above question is supposed to be affirmative. Our group is approaching that exciting new field of exoplanet researches through the spin-orbit misalignment statistics of the Rossiter-MacLaughlin effect, simulations of planet-planet scattering and 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.

Let us summarize this report by presenting recent titles of the PhD and Master's theses in our group;

2016

- Evolution and Statistics of Non-sphericity of Galaxy Clusters from Cosmological Simulations
- Exploring the Architecture of Transiting Exoplanetary Systems with High-Precision Photometry
- Searching for Exoplanetary Rings via Transit Photometry: Methodology and its Application to the Kepler Data
- Superluminous supernova search with the Hyper Supreme-Cam Subaru Strategic Program
- Pulsar-driven supernova and its possible association with fast radio bursts
- Formation of massive black hole binaries in high-z universe

2015

- Chemo-thermal evolution of collapsing gas clouds and the formation of metal-poor star
- Cosmology with Weak Gravitational Lensing and Sunyaev-Zel'dovich Effect
- Far-infrared emission from SDSS galaxies in AKARI all-sky maps: Image stacking analysis and its implications for galaxy clustering

- Photo-evaporation of a proto-planetary disk

2014

- Stacking image analysis of SDSS galaxies in far-infrared and its implications for the Galactic extinction map
- Probing Cosmic Dark Matter and Dark Energy with Weak Gravitational Lensing Statistics
- Statistics of Submillimeter Line Emitters in Cosmological Simulation
- Characterization of a planetary system PTFO 8-8695 from the variability of its transit lightcurve induced by the nodal precession
- Neutrino-heating mechanism of core-collapse supernovae explosions
- Formation of Super-Massive Stars and Super-Massive Black Holes in the Early Universe

2013

- Giant primordial gas clouds and massive blackholes in the early universe
- Characterization of Multi-transiting Planetary Systems with Transit Timing Variations

2012

- Exploring the Landscape of Habitable Exoplanets via Their Disk-integrated Colors and Spectra: Indications for Future Direct Imaging Observations
- Toward a precise measurement of weak lensing signals through CMB experiments and galaxy imaging surveys: A theoretical development and its cosmological implications
- Measurements of Spin-Orbit Angles for Transiting Systems:Toward an Understanding of the Migration History of Exoplanets
- Modeling Redshift-Space Clustering of the SDSS Luminous Red Galaxies with Cosmological N-body Simulations: Implications for a Test of Gravity
- Probing the nature of dark matter by gravitational lensing observations
- The Formation and Evolution of Hot-Jupiter:Planet-Planet Scattering Followed by Tidal Dissipation
- Supernova Explosions in the Early Universe
- Validity of Hydrostatic Equilibrium in Mass Estimates of Simulated Galaxy Clusters

2011

- The Implication of the anomaly in the SFD Galactic extinction map on Far-infrared emission of galaxies

2010

- Precise measurement of number-count distribution function of SDSS galaxies

22 Murao Group

Research Subjects: Quantum Information Theory

Member: Mio Murao and Akihito Soeda

Quantum information processing seeks to perform tasks which are impossible or not effective with the use of conventional classical information, by using quantum information described by quantum mechanical states. Quantum computation, quantum cryptography, and quantum communication have been proposed and this new field of quantum information processing has developed rapidly especially over the last two decades.

This year, our group consisted of two faculty members, Mio Murao (Professor), Akihito Soeda (Assistant Professor), one postdoctoral researcher–Marco Túlio Coelho Quintino (JSPS foreign postdoctoral fellow), and 7 graduate students–Kotaro Kato (D3), Jisho Miyazaki (D3), Atsushi Shimbo (D2), Ryosuke Sakai (D1), Matthias Strödtkotter (D1) and Hayata Yamasaki (D1), and Qingxiuxiong Dong. We investigate various aspects of theoretical quantum information. Our projects worked in the academic year of 2016 were the following:

- Higher-order quantum operations
  - Universal controllization of unitary operations by Q. Dong, A. Soeda, and M. Murao with S. Shojun at National Institute of Informatics
  - Complex conjugation of unitary operations by J. Miyazaki, A. Soeda, and M. Murao
  - Computation of entanglement via higher-order quantum operations by J. Miyazaki, A. Soeda, and M. Murao
  - Distinguishability of unknown unitary operations by A. Shimbo, A. Soeda, and M. Murao
  - Higher-order quantum operation by adiabatic quantum computation and Grover search by A. Soeda and M. Murao with S. Shojun at National Institute of Informatics
- Information theoretic analysis of multipartite quantum states–Topological entanglement entropy and entanglement spectrum by K. Kato with F. Brandao at California Institute of Technology
- Quantum information processing by hybrid quantum systems–Input and output algorithm of quantum information for quantum systems under low controllability by R. Sakai, A. Soeda, and M. Murao
- Entanglement theory–Resource theory for output distributed quantum information processing by H. Yamasaki, A. Soeda, and M. Murao
- Quantum nonlocality
  - Robust test of quantum steering by maximally incompatible quantum mesurements by M. Quintino with J. Bavaresco at Quantum Optics and Quantum Information
  - Device-independent test of incompatibility of quantum measurements by M. Quintino with D. Cavalcanti at Institut de Ciencies Fotoniques

Please refer our webpage: http://www.eve.phys.s.u-tokyo.ac.jp/indexe.htm. The publication list for the year is available at the end of the Japanese version of the group research summary.

23 Ueda Group

Research Subjects: Bose-Einstein condensation, fermionic superfluidity, cold molecules, measurement theory, quantum information, information thermodynamics

Member: Masahito Ueda and Shunsuke Furukawa

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 topological excitations and correlation effects in spinor BECs, BCS-BEC crossover and Efimov physics under the control of an atomic interaction strength, quantum Hall states 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 formulation of the dynamics of state reduction in light of information flow under measurements and feedback controls. We list our main research subjects in FY2016 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms
  - Algebraic approach to continuous symmetry breaking in quantum many-body systems [1]
  - Universal properties of axisymmetry-broken p-wave Fermi gases [2]
  - Quantum dynamics and critical behavior influenced by measurement backaction [3, 4]
  - Renormalization group limit cycle in 4-body Efimov physics [5]
- Quantum Information, quantum measurement, and foundation of statistical mechanics
  - Fluctuation theorems in open quantum systems with feedback control [6]
  - Quantum Fisher information and linear-response theory [7]
  - Gibbs paradox revisited from the fluctuation theorem with absolute irreversibility [8]

[1] S. Higashikawa and M. Ueda, Phys. Rev. A **94**, 013613 (2016).

[2] S. M. Yoshida and M. Ueda, Phys. Rev. A **94**, 033611 (2016).

[3] Y. Ashida, S. Furukawa, and M. Ueda, Phys. Rev. A **94**, 053615 (2016).

[4] Y. Ashida and M. Ueda, Phys. Rev. A **95**, 022124 (2017).

[5] Y. Horinouchi and M. Ueda, Phys. Rev. A **94**, 050702(R) (2016).

[6] Z. Gong, Y. Ashida, and M. Ueda, Phys. Rev. A **94**, 012107 (2016).

[7] T. Shitara and M. Ueda, Phys. Rev. A **94**, 062316 (2016).

[8] Y. Murashita and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **118**, 060601 (2017).

24 Yokoyama(J) Group

Research Subjects: Theoretical Cosmology and Gravitation

Members: Jun'ichi Yokoyama and Teruaki Suyama

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, which is now succeeded by the newly established gravitational wave data analysis section led by Professor Kipp Cannon at RESCEU. Below is the list of topics studied during the academic year 2016.

Cosmology of the early universe

- Reheating after G-inflation
- Creation of supermassive black holes from inflation
- Entropic interpretation of the Hawking-Moss instanton
- Schwinger effects in de Sitter spacetime

Observational cosmology

- Observability of primordial nonGaussianity of tensor perturbation through B-mode polarization of CMB
- Constraints on evaporating primordial black holes by galactic gamma-ray radiation

Gravitation

- Construction of ghostless theories with higher derivative interactions
- Inflation in massive gravity
- Justification of gauge fixing at the level of the action
- Black hole perturbation in Horndeski theory with shift symmetry
- Consistent description of black hole evaporation
- Unruh effect of charged particles
- Neutron stars in scalar-tensor theories

Gravitational waves

- Primordial black holes as the origin of the LIGO events
- Constraints on primordial gravitational waves from non-detection of primordial black holes
- Accuracy of wave-form determination by pre-DECIGO
- Novel method to remove line noises in continuous gravitational wave search
- Search for stochastic gravitational wave background with phase-II TOBA
- Search for continuous gravitational waves with iKAGRA data
- Removal of nonGaussian noises by independent component methods

25 Takase 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: Yuichi Takase, Akira Ejiri, Naoto Tsujii

In Takase Group, we perform experiments on the TST-2 spherical tokamak ($R_0 = 0.36$ m, $a = 0.23$ m, $I_p < 120$ kA) at the Kashiwa Campus in order to develop physics understanding and technology to realize nuclear fusion power. Spherical tokamaks are able to achieve high β, but non-inductive plasma current start-up is a formidable challenge. We also collaborate with other fusion experiments, including JT-60SA, LHD, LATE, QUEST, and MAST (UK).

Our present focus on TST-2 is the establishment of plasma current ramp-up method using lower-hybrid waves (LHW). In FY2016, we performed more experiments using the capacitively-coupled combline (CCC) antenna installed at the top of the plasma. The antenna was developed in collaboration with General Atomics (US). Improvement of the driven current over the conventional outboard-launch scheme was expected due to up-shift of the parallel index of refraction and improved accessibility at higher density. However, there was not a significant difference in the plasma current achieved by the top-launch antenna and the outboard-launch antenna. The temperature profile of the plasma sustained with the top-launch antenna was hollow, similar to the profile obtained with the outboard-launch antenna. The poloidal flow was found to be around 0.5 km/s, and the direction was consistent with the positive plasma potential expected from fast electron loss.

Numerical simulation of LH current drive showed that there is an optimum density for current drive due to balancing of current drive saturation at low density and wave diffraction at high density. The simulated optimum density increased with the toroidal field strength, which was consistent with the experimental observation. Increase in the density limit was observed with the top-launch antenna, in agreement with the theoretical prediction. MEGA is a hybrid fluid-particle code which can be used to analyze MHD equilibria in the presence of fast particles. The code was improved for robust reconstruction of the equilibrium starting from an arbitrary initial electron distribution function. First results suggest that hollow current distribution profiles are relaxed and fast electrons migrate to the plasma center.

Internal reconnection events (IREs) of inductively formed TST-2 plasmas were studied using spectroscopy. It was found that the toroidal flow reverses its direction and poloidal flow slows down during an IRE. The phase velocity (in the lab frame) of magnetic fluctuations was in the same direction as the toroidal and the poloidal flow before an IRE, but did not change its direction during the IRE.

AC Ohmic heating is a method for pre-ionization, heating and current drive of a plasma by applying $\sim$1 kHz voltage on the Ohmic coil. Robust pre-ionization and plasma current ramp-up by applying a vertical field was demonstrated. Since the flux changes little with this method, it may be able to reduce the size of the Ohmic coil substantially. The break-down process was investigated in detail using visible camera with a dynamic range of 6 orders of magnitudes.

The magnetic pitch angle may be estimated by introducing trace impurity ions locally and measuring their spatial emission structure. Carbon was introduced using an acrylic probe and the emission was observed with a 2D visible camera. It was found that the emission at 530m$\pm$50 nm was elongated along the magnetic field line with $\pm5^\circ$ error. The impurity ion species and the injection method needs to be reconsidered to improve the accuracy. A microwave scattering diagnostic is being developed for direct measurement of the LHWs. In FY2016, a Ka-band (26.5–40 GHz) system was installed. The sensitivity of the system was improved to be able to measure -95 dB scattering signal, but no wave signal has been detected so far. A new mount for hard X-ray (HXR) diagnostic was developed to measure fast electron Bremsstrahlung emission during the LH-driven discharge. The HXR flux as well as the effective temperature was observed to increase with the plasma current.

As a collaboration, Thomson scattering of ECH driven steady-state plasmas is being developed on QUEST. The measured electron temperature of plasmas sustained by 28 GHz ECH was lower than those sustained by 8.2 GHz ECH. Spectroscopy was performed on LATE plasmas. From CV and OV emission, the ion temperature was estimated to be around 100 eV. Current sheet during magnetic reconnection in the UTST experiment was measured with a Rogowski probe array. The size of the current sheet was $\sim$32 mm in the major radius direction and $\sim$20 mm in the vertical direction.

26 Sano Group

Research Subjects: Physics of out-of-equilibrium systems and living matter

Member: Masaki Sano and Tetsuya Hiraiwa

Our main goal is to discover and elucidate prototypical phenomena in systems far from equilibrium. To

this end we develop our studies along the following three axes, integrating both experimental and theoretical approaches: (i) statistical mechanics in which non-equilibrium fluctuations overwhelm the thermal effects, (ii) active matters, as characteristic phenomena in far-from-equilibrium systems, (iii) biological systems, as important instances where non-equilibrium dynamics takes the essential role. Our current research topics include:

1. Statistical mechanics out of equilibrium
   (1) Directed percolation universality in absorbing state phase transition
   (2) Directed percolation with flow and active boundary
   (3) Non-equilibrium fluctuation of a growing surface

2. Active matters
   (1) Helical motion of a chiral liquid crystal droplet
   (2) Collective motion of self-driven colloidal particles [6]
   (3) Collective motion of filamentous proteins
   (4) Order and fluctuation in collective motion of bacteria [5]

3. Biological systems
   (1) Theory on mechanics of cellular dynamics and morphogenesis [1]
   (2) Application of theoretical model for cell migration to hematopoietic stem cell [2]
   (3) Traction force of collectively migrating neural stem cells

[1] T. Hiraiwa and G. Salbreux: Role of turnover in active stress generation in a filament network, Phys. Rev. Lett. **116**, 188101 (2016).

[2] M. Tarama and T. Ohta: Reciprocating motion of active deformable particle, Europhysics Letters, **114**, 30002 (2016).

[3] J. J. Molina, K. Otomura, H. Shiba, H. Kobayashi, M. Sano and R. Yamamoto: Rheological evaluation of colloidal dispersions using the smoothed profile method: formulation and applications, J. Fluid Mech., **792**, 590-619 (2016).

[4] J.-B. Delfau, J. Molina and M. Sano: Collective behavior of strongly confined suspensions of squirmers, Europhys. Lett., **114**, 24001, 1-5 (2016).

[5] D. Nishiguchi, K.H. Nagai, H. Chaté and M. Sano: Long-range nematic order and anomalous fluctuations in suspensions of swimming filamentous bacteria, Phys. Rev. E, **95**, 020601(R) (2017).

[6] T. Mano, J.-B. Delfau, J. Iwasawa and M. Sano: Optimal run-and-tumble-based transportation of a Janus particle with active steering, PNAS **114** (13), E2580-E2589 (2017).

[7] K. Kawaguchi, R. Kageyama and M. Sano: Topological defects control collective dynamics in neural progenitor cell cultures, Nature, accepted for publication (2017), doi:10.1038/nature22321

27 Yamamoto Group

Research Subjects: Submillimeter-wave and Terahertz Astronomy, Star and Planet Formation, Chemical Evolution of Interstellar Molecular Clouds, Development of Terahertz Detectors

Member: Satoshi Yamamoto and Yoshimasa Watanabe

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 a astrochemical viewpoint.

Since the temperature of a molecular cloud is as low as 10 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.

In particular, there exist a number of atomic and molecular lines in the millimeter to terahertz region, and we are observing them with various large radio telescopes including ALMA.

We are conducting a line survey of low-mass star forming regions with Nobeyama 45 m telescope and ASTE 10 m telescope, aiming at detailed understanding of chemical evolution from protostellar disks to protoplanetary disks. In the course of this effort, we have recently established a new chemistry occurring in the vicinity of a newly born star, which is called Warm Carbon Chain Chemistry (WCCC). In WCCC, carbon-chain molecules are produced by gas phase reactions of CH_4 which is evaporated from ice mantles. This has recently been confirmed by our detection of CH_3D in one of the WCCC sources, L1527. Existence of WCCC clearly indicates a chemical diversity of low-mass star forming regions, which would probably reflect a variety of star formation. We are now studying how such chemical diversity is brought into protoplanetary disks by using ALMA. In L1527, we have found that carbon-chain molecules only exist in an infalling-rotating envelope outside the centrifugal barrier ($r = 100$ AU), while SO preferentially exists around the centrifugal barrier. Hence, chemical compositions drastically changes across the centrifugal barrier of the infalling gas. Further analyses are in progress.

In parallel to such observational studies, we are developing a hot electron bolometer mixer (HEB mixer) for the future terahertz astronomy. We are fabricating the phonon cooled HEB mixer using NbTiN and NbN in our laboratory. Our NbTiN mixer shows the noise temperature of 470 K at 1.5 THz, which corresponds 7 times the quantum noise. This is the best performance at 1.5 THz in spite of the use of the wave-guide mount. Furthermore, we successfully realized the waveguide-type NbN HEB mixer by using the NbN/AlN film deposited on the quartz wafer. The 0.8/1.5 THz dual-band HEB mixer receiver was assembled, and was installed on the ASTE 10 m telescope for astronomical observations. The commissioning runs were performed in 2011, 2012, and 2015. We successfully observed Moon and Jupiter in the 0.9 THz continuum emission, and the Orion A molecular cloud in the ^{13}CO $J = 8 - 7$ line emission.

[1] Shiino, T., Shiba, S., Sakai, N., Yamakura, T., Jiang, L., Uzawa, Y., Maezawa, H., and Yamamoto, S., Improvement of the Critical Temperature of Superconducting NbTiN and NbN Thin Films Using the AlN Buffer Layer, Supercond. Sci. Technol. **23**, 045004 (2010).

[2] Watanabe, Y., Sakai, N., Lindberg, J.E., Jorgensen, J.K., Bisschop, S.E., and Yamamoto, S., "An Unbiased Spectral Line Survey toward R CrA IRS7B in the 345 GHz Window with ASTE" , ApJ, **745**, 126 (2012).

[3] Sakai, N. and Yamamoto, S., "Warm Carbon-Chain Chemistry" , Chemical Reviews, **113**, 8981 (2014).

[4] Sakai, N. et al., "Change in the Chemical Composition of Infalling Gas Forming a Disk around a Protostar" , Nature, **507**, 78, 2014.

28 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) Laser-field-free three-dimensional molecular orientation [1]

Laser-field-free three-dimensional orientation, corresponding to the complete control of spatial directions of asymmetric top molecules, is achieved with combined weak electrostatic and elliptically polarized laser fields with an 8-ns turnon and a 150-fs turnoff, which is shaped by a plasma shutter. Rotationally cold 3,4-dibromothiophene molecules are used as a sample and their lower-lying rotational states are selected by a molecular deflector to increase the degrees of orientation. After the rapid turnoff of the pump pulse, higher degrees of orientation are maintained for 5-10 ps, which is long enough for various applications including electronic stereodynamics in molecules with femtosecond pulses.

(2) Structure determination of molecules in an alignment laser field by femtsosecond photoelectron diffraction using an X-ray free-electron laser [2]

We have successfully determined the internuclear distance of I_2 molecules in an alignment laser field by applying our molecular structure determination methodology to an I $2p$ X-ray photoelectron diffraction profile observed with femtosecond X-ray free electron laser pulses. Using this methodology, we have found that the internuclear distance of the sample I_2 molecules in an alignment Nd:YAG laser field of 6×10^{11} W/cm^2 is elongated by from 0.18 to 0.30 Å"in average" relatively to the equilibrium internuclear distance of 2.666 Å. Thus, the present experiment constitutes a critical step towards the goal of femtosecond imaging of chemical reactions and opens a new direction for the study of ultrafast chemical reaction in the gas phase.

This work was done as a collaborative study with researchers from KEK, Ritsumeikan University, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Chiba University, Kyoto University, Japan Synchrotron Radiation Research Institute, and RIKEN SPring-8 Center.

[1] Daisuke Takei, Je Hoi Mun, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Laser-field-free three-dimensional molecular orientation," Phys. Rev. A **94**, 013401 (2016).

[2] Shinichirou Minemoto, Takahiro Teramoto, Hiroshi Akagi, Takashi Fujikawa, Takuya Majima, Kyo Nakajima, Kaori Niki, Shigeki Owada, Hirofumi Sakai, Tadashi Togashi, Kensuke Tono, Shota Tsuru, Ken Wada, Makina Yabashi, Shintaro Yoshida, and Akira Yagishita, "Structure determination of molecules in an alignment laser field by femtosecond photoelectron diffraction using an X-ray free-electron laser," Sci. Rep. **6**, 38654; doi: 10.1038/srep38654 (2016).

29 Bamba-Nakazawa Group

Research Subjects: High-energy astrophysics, mainly utilizing X-ray observatories in orbit. Targets are, black-holes, neutron-stars, magnetors, white dwarf, cluster of galaxies, as well as thunder-cloud gamma-rays.

Member: Associate Prof: Aya Bamba, Lecturer: Kazuhiro Nakazawa

We analyze the X-ray data of, neutron star high-mass X-ray binaries, neutron star low-mass X-ray binaries, magnetors, and associated supernova remnants. Also black-hole binaries, active galactic nuclei, as well as Ultra-Luminous X-ray sources, are analyzed. White dwarf binaries are also important. Clusters of galaxies, especially in its merging phase, are also important targets for us.

For further better observations, we are also developing a new generation X-ray satellites. Hitomi, the Japanese 6th X-ray satellite, was successfully launched on 17 Feb. Its initial observation was performed before the incident on 26 March leading to the loss of the satellite. Now the recovery mission of Hitomi is planned, and it is aimed to launch on fiscal year of ∼2021. We also work on more future development, the FORCE mission.

We are also working on the enigmatic MeV gamma-ray emission from thunder-clouds themselves.

[1] A. Bamba, M. Sawada, Y. Nakano, Y. Terada, J. Hewitt, R. Petre, L. Angelini, "New Identification of the Mixed-Morphology Supernova Remnant G298.6 − 0.0 with Suzaku", PASJ, 68, S5 (2016)

[2] Ono, K., Makishima, K., Sakurai, S., Zhang, Z., Yamaoka, K., Nakazawa, K.: "A Hard-to-Soft State Transition of Aquila X-1 Observed with Suzaku" Publ, Astr. Soc. Japan PASJ-2016-0147.R1

[3] Hitomi collaboration, Bamba, A., Nakazawa, K. et al. "The Quiet Intracluster Medium in the Core of the Perseus Cluster", Nature, 535, 117–121 (2016)

[4] Hitomi Collaboration, Bamba, A., Nakazawa, K. et al., "Hitomi Constraints on the 3.5 keV Line in Perseus", ApJL, 837, L15 (2017)

[5] Kobayashi, S., "Studies of astro-physical properties of Ultra Luminous X-ray sources", Ph.D. thesis

[6] Kobayashi, S. B., Nakazawa, K., & Makishima, K.: "*Suzaku* Observations of Spectra Variations of the Ultra-Luminous X-ray Source Holmberg IX X-1", *Publ. Astr. Soc. Japan* **69**, id 4 (2017)

[7] Miyake, K., Noda, H., Yamada, S., Makishima, K., & Nakazawa, K.: "The new primary X-ray component confirmed in the Seyfert I galaxy IC 4329A" , *Publ. Astr. Soc. Japan* **68**, id S28 (2016)

[8] Nakazawa, K., Kato, Y., Gu, L., Kawaharada, M., Takizawa, M., Fujita, Y., Makishima, K., "Suzaku observation of a high-entropy cluster Abell 548W" , *PASJ* , **68**, 68, id.S21, 12 pp. (2016)

[9] Ono, K., Sakurai, S., Zhang, Z., Nakazawa, K., Makishima, K., "A Suzaku observation of the low-mass X-ray binary GS 1826-238 in the hard state", *PASJ*, **68**, id.S14 8 pp. (2016)

30 Gonokami, Yumoto and Ideguchi Group

Research Subjects: Experimental studies on many-body quantum physics by light-matter interaction, Optical phenomena in artificial nanostructures, Development of laser based coherent light source

Member: Makoto Gonokami, Junji Yumoto and Takuro Ideguchi

We are trying to explore new aspects of many-body quantum systems and their exotic quantum optical effects through designed light-matter interactions. Our current target consists of a wide variety of matter, including excitons and electron-hole ensemble in semiconductors, antiferromagnetic magnons and ultracold atomic gases. In particular, we have been investigating the Bose-Einstein condensation phase of excitons, which is considered as the ground state of an electron-hole ensemble but as yet not proven experimentally. Based on quantitative spectroscopic measurements, the temperature and density are determined for an exciton gas in a quasi-equilibrium condition trapped inside a high purity crystal kept below 1 K. We are now investigating a stable and quantum degenerate state of dark exciton gas at such very low temperatures. We also investigate novel optical and terahertz-wave responses for some artificial nanostructures obtained by advanced micro-fabrication technologies. A project was started to develop new coherent light sources; covering a broad frequency range from terahertz to soft X-rays. Specifically, in collaboration with RIKEN, the Foundation for Coherent Photon Science Research was established. This is one of the Advanced Research Foundation initiatives from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. Within this initiative, we are developing intense and stable coherent light sources at a high repetition rate (That facility is named "Photon Ring").

This year the following activities were done:

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 and their application to nuclear physics
2. The quest for non-trivial optical responses and development of applications:
   - 2.1. Investigation of laser-breakdown process in wide band-gap dielectric materials
   - 2.2. Development of mode selective phonon exciation by waveform shaped short pulse laser
   - 2.3. Investigation of process of higher harmonic generation of solids
   - 2.4. Development of real time spectroscopic imaging by high sensitive teraherz camera
3. Development of novel coherent light sources and spectroscopic methods:
   - 3.1. VUV precision spectroscopy using higher-order harmonics
   - 3.2. Laser-based angle resolved photoemission spectroscopy
   - 3.3. "Photon ring" project
   - 3.4. Institute for Photon Science Technology

31 Ando Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Gravitational Wave, Laser Interferometer

Member: Masaki Ando and Yuta Michimura

In February 2016, the LIGO gravitational-wave observatory announced detection of a gravitational-wave signal. The new field of gravitational-wave astoronomy was opend. 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 (former LCGT). The detector is now under construction in KAMIOKA. This underground telescope is expected to catch gravitational waves from the coalescence of neutron-star binaries at the distance of 200Mpc. 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
  - Construction and test observation run
  - Optical design of the interferometer
- Space laser interferometer, DECIGO
- Development of TOBA (Torsion Bar Antenna)
  - A new type sensor for TOBA
  - Design and development of the next generation TOBA
- Development of the ultra stable laser source using cryogenic cavity
- High-precision experiments on relativity and opto-mechanics
  - Opto-mechanics experiments with triangular cavity
  - Optical levitation experiments
  - Experimental study of space isotropy

Reference

[1] K. Eda, A. Shoda, Y. Kuwahara, et al.: All-sky coherent search for continuous gravitational waves in 6-7 Hz band with a torsion-bar antenna, PTEP 1, 011F01 (2016).

[2] T. Nakamura, M. Ando, T. Kinugawa, et al.: Pre-DECIGO can get the smoking gun to decide the astrophysical or cosmological origin of GW150914-like binary black holes, PTEP 9, 930 (2016).

[3] Y. Kuwahara,A. Shoda, K. Eda, et al.: Search for a stochastic gravitational wave background at 1-5. Hz with a torsion-bar antenna, Physical Review D 94, 92003 (2016).

[4] N.. Matsumoto, K.. Komori, S.. Ito, Y.. Michimura, Y.. Aso: Direct measurement of optical-trap-induced decoherence, Phys. Rev. A, 94, 033822 (2016).

32 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 fruity, *Drosophila*. A part of our recent research activity is summarized below.

1.Identification of excitatory premotor interneurons which regulate local muscle contraction during Drosophila larval locomotion..

Larval locomotion is generated by rhythmic and sequential contractions of body-wall muscles from the posterior to anterior segments, which in turn are regulated by motor neurons present in the corresponding neuromeres. Motor neurons are known to receive both excitatory and inhibitory inputs, combined action of which likely regulates patterned motor activity during locomotion. Although recent studies identified candidate inhibitory premotor interneurons, the identity of premotor interneurons that provide excitatory drive to motor neurons during locomotion remains unknown. In this study, we searched for and identified two putative excitatory premotor interneurons in this system, termed CLI1 and CLI2 (cholinergic lateral interneuron 1 and 2). These neurons were segmentally arrayed and activated sequentially from the posterior to anterior segments during peristalsis. Consistent with their being excitatory premotor interneurons, the CLIs formed GRASP- and ChAT-positive putative synapses with motoneurons and were active just prior to motoneuronal firing in each segment. Moreover, local activation of CLI1s induced contraction of muscles in the corresponding body segments. Taken together, our results suggest that the CLIs directly activate motoneurons sequentially along the segments during larval locomotion. (Collaboration with Dr. James Truman at the Janelia Research Institute in the USA)

2.Gap Junction-Mediated Signaling from Motor Neurons Regulates Motor Generation in the Central Circuits of Larval Drosophila.

In this study, we used the peristaltic crawling of Drosophila larvae as a model to study how motor patterns are regulated by central circuits. Motor neurons are generally considered passive players in motor pattern generation, simply relaying information from upstream interneuronal circuits to the target muscles. This study shows instead that MNs play active roles in the control of motor generation by conveying information via gap junctions to the central pattern-generating circuits in larval Drosophila, providing novel insights into motor circuit control. The experimental system introduced in this study also presents a new approach for studying intersegmentally coordinated locomotion. Unlike traditional electrophysiology methods, this system enables the simultaneous recording and manipulation of populations of neurons that are genetically specified and span multiple segments.

References

[1] Hasegawa, E., Truman, J.W., Nose, A.: Identification of excitatory premotor interneurons which regulate local muscle contraction during *Drosophila* larval locomotion. *Sci Rep.* 6: 30806 (2016)

[2] Matsunaga, T., Kohsaka, H., Nose, A.: Gap junction-mediated signaling from motor neurons regulates motor generation in the central circuits of larval *Drosophila*. *J. Neurosci.* 37(8): 2045-2060 (2017)

[3] Kohsaka, H., Guertin, P.A., Nose, A.: Neural circuits underlying fly larval locomotion. *Current Pharm. Design.* 23:1-12 (2017)

33 Higuchi Group

Research Subjects: Motor proteins in in vitro, cells and mice

Member: Hideo Higuchi and Motoshi Kaya

The function of biological system is originated by the bio-molecular function. It is difficult to measure the molecular functions in cells and animals precisely. Therefore, we understand the molecular function, especially dynamic function, of purified protein molecule first by single molecule technology. Then we investigate the function of molecules or organelle by the single and imaging method. Finally, we imaged the molecules in mouse auricle to understand the function of molecule in vivo.

Displacement of single dynein molecules driven by the neck swing

Cytoplasmic dynein is a motor protein moving along microtubules, and plays important roles in vesicle transport and mitosis. To understand the conformational changes of dynein, we measured the efficiency of FRET from dynein ring-BFP to linker-GFP, and the distance driven by power stroke of single-headed dynein interacting with microtubules by optical tweezers. The efficiency and the (apparent) stroke distance depend on ATP concentration. The low efficiency and stroke distance at low ATP concentration indicate no structural change of dynein at no ATP binding (apo) state that is predominant at low ATP. With increasing ATP concentration, population of apo state decreased and that of pre-power stroke state such as dynein ADPPi should increase. Dynein at the pre-power stroke state will generate the stroke at binding to microtubule. Therefore, the mean power stroke distance increased with ATP concentration. High efficiency and distance (9nm) at 1mM ATP indicate that the 9-nm power stroke is generated by swing of linker. This is supported by the result that the dynein mutated at its linker did not generate the power stroke. The power stroke driven by structural change of dynein linker will be fundamental mechanism of dynein motility.

Trafficking of endocytic PAR-1 carrier vesicles in cancer cell

PAR-1 is a membrane protein in the G-protein coupled receptor family, the signal cascade of which results in enhanced cell mobility. In terms of the tumor progression, PAR-1 overexpressed cancer cell shows increased migration rate, and thus it may cause the cancer metastasis. Since the serine protease, such as thrombin, activates the PAR-1s for initializing intracellular signal cascade, we focused on the movement of the endocytic PAR-1 carrier vesicle when activated by thrombin. Using dual focus optics, the movement PAR-1 is tracked in three dimensions, from its internalization. The obtained images on the dual view are processed using the affine transformation, and the z-coordinate of a target point source is evaluated according to the calibration between the z-position and the intensity, after applying Gaussian approximation. As a result, three different movement patterns are observed: diffusion on the membrane, endocytosis, and recycling. Also, the endocytic PAR-1 particularly shows an oscillating movement along z-axis during internalization, which implies the dynamics of the cytoskeleton. When PAR-1s are activated by thrombin (50 U/ml), the ratio of the slowly diffusing endosomes decreased, indicating that the activated PAR-1s diffuse more rapidly. Furthermore, it is revealed that the activated PAR-1s are more directly internalized compared to the case that is not activated, from the successive movement analysis.

Thermotaxis mechanism of mouse macrophage

To understand the movement and shape change of macrophage induced by temperature jump, we took movies of the motility of mouse macrophage before and after the jump. The jump was initiated by local illumination, 1micrometer in diameter, of cell medium by the infrared laser (1550nm, ∼300mW). Most of mouse macrophages moved toward the heat source. They stretched filopodia and lamellipodia with time delay, 1minite, after the jump. These indicate that macrophage have an ability of thermotaxis. To understand mechanism of the thermotaxis, we observed the motility of macrophage in the presence of inhibitors for Rho family such as RhoA, Rac1, cdc42. The macrophages were able to migrate in the presence of inhibitor of RhoA but did not polarize in the direction of the temperature gradient. This suggesting thermotaxis towards heat source was regulated by RhoA family.

34 Okada Group

Research Subjects: Biophysics, cell Biology, super-resolution microscopy, live cell imaging and single molecule imaging.

Member: Yasushi Okada and Sawako Enoki

Proteins, lipids, nucleic acids and other cellular components often form supramolecular complexes, which serve as the functional units in the cell. However, their sizes are around 100 nm and much smaller than the diffraction limited resolution of the optical microscope. Electron microscope has, therefore, been used for their observations, and it has been impossible to observe their dynamics in living cells. Although super-resolution fluorescence microscopy has broken the diffraction barrier of the spatial resolution of optical microscopy, temporal resolution is also essential to observe the dynamic structures in living cells. For example, vesicles in the cells are around 100 nm in diameter and moving at around 1-5 μm/s. Most super-resolution microscope techniques can achieve a spatial resolution better than 100 nm [1, 2], but at the same time require a long image acquisition time, thus blurring the image motion. To avoid this problem, image acquisition should be faster than the velocity of movement. For example, an image should be taken within 10 ms to achieve 100 nm resolution for vesicles moving at 5μm/s.

Among other super-resolution microscope methodologies, structured illumination microscopy (SIM) does not require strong illumination and is suitable for live cell imaging from the viewpoint of photodamage and photobleaching. Furthermore, it is based on wide-field imaging that allows larger field-of-view without sacrificing the image acquisition time. Thus, SIM is relatively faster than other super-resolution microscopies. However, SIM requires 9 to 25 raw images for the reconstruction of a single super-resolution image, so that it takes 100 ms or longer for a single frame of super-resolution image.

To improve the temporal resolution of SIM, we have re-analyzed the theoretical basis of SIM, and noticed that SIM can be implemented with confocal microscope optics, which we named as spinning disk superresolution microscope (SDSRM). Theoretically, the SDSRM is equivalent to a structured illumination microscope (SIM) and achieves a spatial resolution of 120 nm, double that of the diffraction limit of wide-field fluorescence microscopy. However, the SDSRM is 10 times faster than a conventional SIM because super-resolution signals are recovered by optical demodulation through the stripe pattern of the disk. Therefore a single super-resolution image requires only a single averaged image through the rotating disk. On the basis of this theory, we modified a commercial spinning disk confocal microscope. The improved resolution around 120 nm was confirmed with biological samples. The rapid dynamics of micro-tubules, mitochondria, lysosomes, and endosomes were observed with temporal resolutions of 30-100 frames/s. Because our method requires only small optical modifications, it will enable an easy upgrade from an existing spinning disk confocal to a super-resolution microscope for live-cell imaging [3].

[1] Uno S, Kamiya M, Yoshihara T, Sugawara K, Okabe K, Tarhan MC, Fujita H, Funatsu T, Okada Y, Tobita S and Urano Y. A spontaneously blinking fluorophore based on intramolecular spirocyclization for live-cell super-resolution imaging. Nat Chem 6: 681-689, 2014

[2] Okada Y, Nakagawa S. Super-Resolution Imaging of Nuclear Bodies by STED Microscopy in Nuclear Bodies and Noncoding RNAs (Nakagawa S, Hirose T ed), Methods in Molecular Biology 1262: 21-35, 2015

[3] Hayashi S, Okada Y. Ultrafast superresolution fluorescence imaging with spinning disk confocal microscope optics. Mol. Biol. Cell., 26:1743-51, 2015

35 Furusawa Group

Research Subjects: Theoretical Biophysics, Evolutionary Biology, Complex Systems

Member: Chikara Furusawa and Nen Saito

Biological systems have both robustness and plasticity, a property that distinguishes them from artificial systems and is essential for their survival. Biological systems generally exhibit robustness to various perturbations, including the noise in gene/protein expressions and unexpected environmental changes. At the same time, they are plastic to the surrounding environment, changing their state through processes like 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.

The goal of our work is to extract the universal features of cellular dynamics that are responsible for robustness and plasticity in biological systems. We aim to 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. Construction of macroscopic state theory describing adaptation and evolution of biological systems
2. Laboratory evolution of bacterial cells to analyze dynamics of phenotype-genotype mappings
3. Dynamical systems modeling of cellular differentiation
4. Analysis of self/non-self discrimination ability for the immune system using computational models
5. Motif analysis for small-number effects in chemical reaction dynamics
6. Theoretical analysis for collective motion of molecular motors

References

[1] N. Saito, Y. Sughiyama and K. Kaneko: Motif Analysis for Small-Number Effects in Chemical Reaction Dynamics, Jour. Chem. Phys. **145**, 094111 (2016).

[2] C. Furusawa and T. Yamaguchi: Robust and Accurate Discrimination of Self/Non-Self Antigen Presentations by Regulatory T Cell Suppression, PLoS One **11**(9), e0163134 (2016).

[3] S. Suzuki, T. Horinouchi and C. Furusawa: Phenotypic changes associated with the fitness cost in antibiotic resistant Escherichia coli strains, Mol. Biosys **12**(2), 414-20 (2016).

[4] J. F. Yamagishi, N. Saito and K. Kaneko: Symbiotic Cell Differentiation and Cooperative Growth in Multicellular Aggregates, PLoS Comput. Biol. **12**(10), e1005042 (2016).

[5] Saito, Nen and Kunihiko Kaneko: Embedding dual function into molecular motors through collective motion, Scientific Reports **7**, 44288 (2017).

[6] H. Shimizu, C. Furusawa, T. Hirasawa, K. Yoshikawa, Y. Toya, T. Shirai and F. Matsuda: Omics-Integrated Approach for Metabolic State Analysis of Microbial Processes: Innovations and Future Directions, Appl. Bioeng. **5**, 213-236 (2017).

[7] S. Suzuki, T. Horinouchi and C. Furusawa: Expression profiling of antibiotic resistant bacteria obtained by laboratory evolution, Meth. Mol. Biol. **1520**, 263-279 (2017).

[8] H. Matsumoto, H. Kiryu, C. Furusawa, M. SH. Ko, S. BH. Ko, N. Gouda, T. Hayashi and I. Nikaido: SCODE: An efficient regulatory network inference algorithm from single-cell RNA-Seq during differentiation, Bioinformatics, in press

[9] S. Suzuki, T. Horinouchi and C. Furusawa: Acceleration and Suppression of Resistance Development by Antibiotic Combinations, BMC Genomics, in press

[10] M. Yoshida, S. G. Reyes, S. Tsuda, T. Horinouchi, C. Furusawa and L. Cronin: Time-programmable drug dosing allows the manipulation, suppression and reversal of antibiotic drug resistance *in vitro*, Nature Comm., in press

III

2016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：早野 龍五

1. 特殊相対性理論
1.1 ニュートン力学とガリレイの相対性
1.2 ガリレイの相対性と電磁気
1.3 光速
1.4 ローレンツ変換
1.5 ローレンツ変換のいくつかの帰結
1.6 ユークリッド空間とミンコフスキー空間
1.7 4 元速度
1.8 エネルギー運動量ベクトル
1.9 4 元加速度と 4 元力
1.10 ローレンツ力
2. SI 単位系
2.1 SI 単位系と秒の定義の変遷
2.2 m の定義の変遷
2.3 kg 原器の問題点
2.4 kg 原器の廃止に向けて
3. 静電場
3.1 自然界の 4 つの力
3.2 クーロンの法則
3.3 重ね合わせの原理
3.4 保存力
3.5 電場、電気力線
3.6 Gauss の法則
3.7 静電エネルギー
3.8 Maxwell の応力
3.9 静電ポテンシャル
3.10 Laplace 方程式と Earnshaw の定理
3.11 Poisson 方程式
4. 静電場中の導体
4.1 導体
4.2 導体表面の電場
4.3 鏡映法
4.4 静電容量
4.5 平行平板コンデンサー
4.6 静電エネルギー
4.7 電流・電流密度
4.8 電荷の保存
4.9 電気伝導度
4.10 ジュール熱
4.11 キルヒホッフの法則と直流回路
5. 静磁場
5.1 磁気単極子は存在しない
5.2 ローレンツ力
5.3 直線電流が作る磁場
5.4 2 本の平行な直線電流に働く力
5.5 磁場の発散と回転
5.6 アンペールの法則
5.7 ベクトルポテンシャル
5.8 ゲージ
5.9 ビオ・サバールの法則
5.10 磁気エネルギー
6. 時間とともに変化する電磁場
6.1 磁場中を運動する導体棒
6.2 誘導電流
6.3 ファラデーの法則
6.4 インダクタンス
6.5 変位電流
6.6 Maxwell 方程式
6.7 真空中の Maxwell 方程式の解
6.8 ポインティングベクトル
6.9 電磁波の運動量
7. Maxwell 方程式の相対論的共変性
7.1 共変ベクトルと反変ベクトル
7.2 ローレンツ共変性とは
7.3 電磁テンソル

7.4 電磁テンソルのローレンツ変換
7.5 Maxwell 方程式の相対論的共変性
7.6 電磁テンソルとローレンツ力
8. 物質中の電磁場
8.1 誘電体と分極
8.2 電束密度、誘電率、分極率
8.3 物質中の静電場の法則
8.4 電場と電束密度の境界条件
8.5 磁性体
8.6 物質中の静磁場の法則
8.7 物質中の Maxwell 方程式
8.8 誘電体中の電磁波

1.1.2 解析力学 : 横山 順一

0. 序論 力学とは何か
0.1 ニュートンの古典力学
0.2 力学のこれまでとこれから
0.3 ベクトルとスカラー
0.4 仮想仕事の原理・ダランベールの原理
1. ラグランジュ形式
1.1 ラグランジアンの導出
1.2 運動を解くということの別の見方
1.3 汎関数と変分法
1.4 最小作用の原理
1.5 オイラーラグランジュ方程式の共変性
1.6 拘束条件の下での運動
1.7 対称性と保存則
2. ハミルトン形式
2.1 ハミルトンの正準方程式
2.2 ルジャンドル変換
2.3 変分法による正準方程式の導出
2.4 正準変換
2.5 ポアソンの括弧式
2.6 位相空間とリュービルの定理
2.7 ハミルトンヤコビ方程式
3. 展開
3.1 電磁場中の荷電粒子の運動
3.2 断熱不変量
3.3 なぜ自然法則は時間二階微分方程式で表されるのか
3.4 大団円 : なぜ古典力学は最小作用の原理に従うのか

詳細版は
http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/~yokoyama/AM2016.html

1.1.3 量子力学 I : 福嶋 健二

1. 量子力学の導入
1.1 歴史的背景
1.2 古典・量子運動方程式
2. 1 次元 Schrödinger 方程式
2.1 変数分離
2.2 1 次元束縛問題
2.3 1 次元散乱問題
2.4 半古典 (WKB) 近似
3. 調和振動子
3.1 1 次元調和振動子の解法 I (生成消滅演算子)
3.2 1 次元調和振動子の解法 II (Sturm-Liouville 固有値問題)
3.3 1 次元調和振動子の解法 III (WKB 近似)
3.4 3 次元調和振動子
3.5 コヒーレント状態、スクイーズド状態
4. 相対論的量子力学入門
4.1 電子スピンの歴史的背景
4.2 Pauli 方程式
4.3 Dirac 方程式

1.1.4 物理実験学 : 福山 寛, 山本 智

自然科学の最先端は日々進化し、融合し続けている。その発展の礎には物理学の法則とそれを利用した新しい実験技術や装置の開発がある。物理学は実証科学であり、新しい物理概念は実験で検証される

必要がある。また多くの物理法則が実験から見出されてきた。ここでは、物理学の発展に寄与した歴史的な実験から最先端の実験も紹介しつつ、物理実験に必要な基礎知識（単位、実験技術、誤差論、レポート作成法など）を講義する。

1. 序論
- **1.1** 物理実験の魅力（歴史的実験から最先端実験まで）

2. 単位
- **2.1** SI 基本単位の定義
- **2.2** 各種の常用単位系とその変換

3. 基礎物理定数と標準
- **3.1** 基礎物理定数（プランク定数、ボルツマン定数など）
- **3.2** 標準（時間、質量、電流、電圧、電気抵抗）

4. 基礎的な実験技術
- **4.1** 実験（真空、低温、磁場）
- **4.2** 実験環境と安全（実験室実験、フィールド実験、飛翔体実験など）
- **4.3** 測定法（電気的・磁気的・熱的物性測定、X 線回折、分光測定など）
- **4.4** 試料作成（単結晶、薄膜、ナノ構造など）

5. 誤差論
- **5.1** 実験誤差
- **5.2** 確率統計
- **5.3** 実験データの解析

6. 実験レポートや論文の作成法と研究倫理
- **6.1** レポート・論文の目的と構成
- **6.2** 研究倫理

1.1.5 物理数学 I ：常行 真司

1. 複素関数の性質
複素平面、複素関数、リーマン面、初等関数と収束半径、対数関数とべき乗関数、無限乗積

2. 複素関数の微分と正則性
コーシー・リーマンの関係式、調和関数

3. 複素積分
定義と性質、コーシーの積分定理

4. コーシーの積分公式とその応用
コーシーの積分公式、テーラー展開、ローラン展開、特異点と留数、解析接続、δ 関数と主値積分

5. 等角写像

6. ガンマ関数
ガンマ関数、スターリングの公式、漸近展開

7. フーリエ級数とフーリエ変換の基礎
固有関数展開、フーリエ級数、フーリエ変換

8. 常微分方程式
常微分方程式の基本概念、解の存在と一意性、1 階常微分方程式の初等的解法、定数係数をもつ 2 階の線形微分方程式の解法

1.1.6 物理数学 II：村尾 美緒

1. フーリエ級数・フーリエ変換とその応用
- **1.1** フーリエ級数
- **1.2** フーリエ変換
- **1.3** 波動方程式
- **1.4** ラプラス方程式
- **1.5** ポアソン方程式

2. 直交多項式と特殊関数
- **2.1** 直交多項式の一般論
- **2.2** エルミート多項式
- **2.3** ラゲール多項式
- **2.4** ラゲール陪多項式
- **2.5** ルジャンドル多項式
- **2.6** ルジャンドル陪関数
- **2.7** 球面調和関数
- **2.8** ベッセル関数
- **2.9** 超幾何関数
- **2.10** 合流型超幾何関数

3. 回転群と角運動量演算子
- **3.1** 回転群と角運動量の性質

1.2 3年生 Sセメスター

1.2.1 電磁気学 II：岡本 徹

1. 序論（基本法則）
- **1.1** 真空中の電磁場の基本法則
- **1.2** 物質中の Maxwell 方程式
- **1.3** 電磁ポテンシャル
- **1.4** 電磁場のエネルギー
- **1.5** 電磁場の運動量

2. 静電場
- **2.1** 基本方程式と境界条件
- **2.2** 電荷分布による静電場
- **2.3** 境界値問題
- **2.4** 多重極展開
- **2.5** 導体系の静電場

3. 静磁場と準静的な磁場
- **3.1** 静磁場の基本方程式
- **3.2** Biot-Savart の法則
- **3.3** 磁気双極子モーメント
- **3.4** 物質の磁化
- **3.5** 境界値問題
- **3.6** 定常電流による磁場のエネルギー
- **3.7** 準静的な磁場と電磁誘導

4. 電磁波
- **4.1** 平面電磁波の基本的性質
- **4.2** 屈折と反射
- **4.3** 物質の交流電磁場応答

1.2.2 量子力学 II：立川 裕二

0. はじめに

1. 角運動量
- **1.1** 軌道角運動量
- **1.2** 角運動量演算子の固有状態
- **1.3** 角運動量の固有状態を座標表示すると球面調和関数
- **1.4** 角運動量の合成と Clebsch-Gordan 係数
- **1.5** スピン
- **1.6** s=1/2 のとき：パウリ行列

2. 球対称ポテンシャル内での粒子
- **2.1** この章でやること
- **2.2** 球対称ポテンシャルのとき、ハミルトニアンと角運動量は可換
- **2.3** 動径方向
- **2.4** 水素原子

3. スピンと磁気モーメント
- **3.1** 一様磁場中のループ電流
- **3.2** 角運動量と磁気モーメント
- **3.3** LS 結合
- **3.4** これまでの話を全部合わせると・・・
- **3.5** 一様磁場中のスピン

4. 様々な近似法
- **4.1** 摂動論（定常状態）
- **4.2** 摂動論（時間発展）
- **4.3** 準古典近似（WKB 近似）

5. 対称性と保存則
- **5.1** 運動量 p は並進、角運動量 L は回転の生成子
- **5.2** ユニタリー演算子とエルミート演算子
- **5.3** 対称性と保存則
- **5.4** 保存量
- **5.5** 対称性

6. オマケ

1.2.3 現代実験物理学 I ： （前半）北川 健太郎,（後半）樋口 秀男

1. 物性実験
- **1.1** 極限環境技術
- **1.2** 固体中の電子構造観測
- **1.3** 磁気共鳴を用いた実験
- **1.4** X 線を用いた実験

2. 一般物理学
- **2.1** レーザー物理学と種々のレーザー
- **2.2** レーザー冷却
- **2.3** ブラウン運動とパワースペクトラム
- **2.4** 生物物理学実験

1.2.4 流体力学 : 吉田 直紀

1. 完全流体の力学
2. 流れ関数と複素ポテンシャル, 渦の運動
3. 粘性流体および圧縮性流体: ナビエ-ストークス方程式
4. 流体の不安定性と乱流
5. 衝撃波と爆発現象
6. 宇宙流体力学と相対論的流体
7. 双曲型偏微分方程式と数値流体力学
8. 非線形波動
9. ボルツマン方程式と運動論

1.2.5 統計力学 I : 桂 法称

1. 統計力学とは何か？
2. 確率論からの準備
3. 量子論からの準備
4. カノニカル分布と平衡統計力学
   - 4.1 平衡状態とは何か？
   - 4.2 等重率の原理とミクロカノニカル分布
   - 4.3 カノニカル分布
   - 4.4 熱力学との関係
5. カノニカル分布の応用
   - 5.1 理想気体
   - 5.2 調和振動子
   - 5.3 常磁性と関連するモデル
   - 5.4 古典的な粒子の系
6. 結晶の比熱
   - 6.1 アインシュタイン・モデル
   - 6.2 デバイ・モデル
7. グランドカノニカル分布
8. 量子理想気体の統計力学
   - 8.1 多粒子系の量子力学 (同種粒子の扱い)
   - 8.2 理想フェルミ気体
   - 8.3 理想ボース気体
   - 8.4 ボース・アインシュタイン凝縮

1.2.6 計算機実験 : 藤堂 眞治

1. UNIX の基礎・C 言語・LaTeX・バージョン管理システム
2. 数値誤差・数値積分・ニュートン法
3. 常微分方程式
4. 連立一次方程式
5. 特異値分解・画像圧縮・回帰分析
6. 最適化問題
7. 乱数・モンテカルロ積分・マルコフ連鎖モンテカルロ
8. スパコンと計算物理

1.3 3年生 Aセメスター

1.3.1 物理数学 III: 上田 正仁

1. 群論の基礎
2. 表現論
3. リー群の基礎
4. リー群と多様体
5. 微分形式
6. ベクトル解析の諸公式の導出
7. 多様体上の積分
8. 閉形式と完全形式
9. 微分形式の応用

なお、講義ノートは下記を参照。
http://cat.phys.s.u-tokyo.ac.jp/lecture/MP3_16/maph3.pdf

1.3.2 量子力学 III：諸井 健夫

1. 同種粒子
1.1 同種粒子からなる多体系の波動関数
1.2 第 2 量子化
1.3 弦の量子化
2. 電磁場中の荷電粒子
2.1 ゲージ対称性とシュレディンガー方程式
2.2 磁場中の荷電粒子
2.3 ランダウ準位
3. 散乱
3.1 散乱断面積
3.2 グリーン関数
3.3 ボルン近似
3.4 部分波展開と位相のずれ

1.3.3 固体物理学 I：小形 正男

1. 概要と復習
量子力学、統計力学、原子構造など
2. 原子から分子・固体へ
3. 周期ポテンシャル中の電子とエネルギーバンド
4. 電子物性、電子比熱、**DOS**
5. 格子振動とフォノン、格子比熱
6. 固体中電子のダイナミクス
7. 金属と伝導電子
電気伝導、熱電効果などの輸送係数

1.3.4 現代実験物理学 II：駒宮 幸男, 浅井 祥仁

1. 素粒子の基礎
2. 素粒子と物質の相互作用
3. 粒子加速器の原理とエネルギーフロンティア加速器 **LHC/ILC**
4. 粒子検出器：原理と最先端検出器 **ATLAS**
5. 実験データと統計処理／統計現象の扱い方
6. ヒッグス粒子の見つけ方
7. 超対称性粒子の探し方
8. 暗黒物質の探し方

1.3.5 電磁気学 III：安東 正樹

1. 電磁波の基礎
1.1 自由電磁場とその性質
2. 電磁波の放射
2.1 遅延ポテンシャルと先進ポテンシャル
2.2 遅延ポテンシャルの多重極展開
3. 荷電粒子の出す電磁波
3.1 リエナール-ヴィーヒェルトのポテンシャル
3.2 運動する荷電粒子の作る電磁波
3.3 制動放射
3.4 点電荷による電磁波の散乱
3.5 チェレンコフ放射
4. 電磁波の伝播
4.1 導波管
4.2 空洞共振器
4.3 電磁波の回折
5. 電磁場の角運動量
6. 電磁波と重力波

1.3.6 生物物理学：能瀬 聡直, 岡田 康志

1. 生物物理学とは
生命とは何か、生物物理学の歴史・3 大課題
2. 遺伝と進化 **1**
メンデル遺伝、セントラルドグマ、個体群動力学
3. 遺伝と進化 **2**
集団遺伝学、中立説、分子進化
4. 生体高分子の構造と機能 **1**
回折限界、X 線結晶回折
5. 生体高分子の構造と機能 **2**

NMR、分子動力学計算

6. 生物物理学研究の実例 1
発生現象の数理モデル化

7. 生物物理学研究の実例 2
反応ネットワークのモデル化と進化の理論

8. 生物物理学研究の実例 3
マクスウェルの悪魔と分子モーター

9. 脳神経科学序論
脳神経系における情報の流れ、静止膜電位

10. 神経活動電位とホジキン・ハクスレー方程式

11. シナプス伝達
神経伝達物質の種類と放出、量子仮説

12. 神経ネットワーク解析の方法論
視覚系を例として

13. 脳の可塑性と記憶
学習記憶のモデル、長期増強現象

14. 遺伝子工学を用いた脳研究
光遺伝学、神経活動イメージング

1.3.7 統計力学 II： 宮下 精二

1. 相互作用がある系での統計力学
1.1 相転移現象
1.2 平均場近似
1.3 転送行列
1.4 臨界現象の普遍性とスケーリング
2. 非平衡統計力学
2.1 線形応答理論
2.2 オンサーガーの相反定理
2.3 久保公式
2.4 マスター方程式
2.5 ランジェバン方程式

1.4 4年生 Sセメスター

1.4.1 場の量子論 I：松尾 泰

1. 相対論的量子力学
1.1 Lorentz 変換とその表現
1.2 Klein-Gordon 方程式
1.3 Dirac 方程式
1.4 対称性と保存量：Noether の定理
1.5 第二量子化とその必然性
2. 場の量子化
2.1 場の正準量子化
2.2 Klein-Gordon, Dirac 場の量子化
2.3 電磁場の量子化
2.4 S 行列
2.5 相互作用描像
2.6 Feynman 則

1.4.2 サブアトミック物理学： Kathrin Wimmer

1. Global properties of the nucleus
mass and binding energy
2. Radioactive decay
3. Particle accelerators
4. Particle and gamma-ray detectors
5. Scattering
6. Nuclear structure models
7. Nuclear astrophysics
8. Quarks and gluons, strong interaction
9. The standard model of particle physics
10. Neutrinos

1.4.3 一般相対論： 須藤 靖

1. 一般相対論の心：宇宙を知り世界を知る
1.1 本講義について
1.2 宇宙と世界はどちらが大きいか？
1.3 物理屋的世界観

1.4 自然界にあふれた不思議なこと
1.5 地球に関する奇跡
1.6 物理学における必然と偶然
1.7 本質的なことはすべて誕生後３８万年の宇宙に刻まれている
1.8 物理法則の階層性
1.9 物理学の方法論

2. 4次元時空とシュワルツシルド計量
2.1 線素と計量
2.2 シュワルツシルド時空の性質

3. 一般相対性原理とその数学的表現
3.1 特殊相対論の限界: 慣性系とは? 重力は“力”か?
3.2 一般相対論の概念構成
3.3 物理量の表現: ベクトル
3.4 物理量の表現: 双対ベクトル
3.5 物理量の表現: テンソル
3.6 まとめ: 物理量とテンソル

4. 測地線の方程式
4.1 重力場のもとでの粒子の運動方程式
4.2 ニュートン理論との対応

5. 重力場の方程式
5.1 マッハの原理と重力場の方程式
5.2 エネルギー運動量テンソル
5.3 アインシュタイン方程式への道
5.4 ニュートン理論との対応
5.5 宇宙定数
5.6 変分原理による定式化

6. シュワルツシルド時空とブラックホール
6.1 球対称重力場の計量
6.2 シュワルツシルド解の導出
6.3 シュワルツシルド半径と事象の地平線
6.4 シュワルツシルドブラックホールの周りの質点の運動
6.5 一般相対論の古典的検証
6.6 水星の近日点移動の計算
6.7 光線の曲がり角の計算
6.8 ブラックホールは観測できるか? エディントン光度
6.9 天文学的ブラックホール

7. 重力波
7.1 アインシュタイン方程式の弱場近似
7.2 重力波の平面波解
7.3 測地線偏差の方程式
7.4 重力波の検出原理
7.5 線形化されたアインシュタイン方程式の遅延解と重力波の四重極近似解
7.6 円運動する連星系からの重力波振幅の定性的評価
7.7 重力波によるエネルギー損失率
7.8 連星パルサーからの重力波

1.4.4 宇宙物理学: 中澤 知洋

学部で学ぶ力学、電磁気学、相対論などを用いて、宇宙そのものや天体の特性を物理の言葉で理解することを目的とする。恒星や銀河、中性子星やブラックホール、ビッグバン宇宙とその中での物質進化を、観測の最前線を交えつつ議論する。

1. 重力と天体
1.1 重力とケプラー回転
1.2 自己重力系の基礎

2. 電磁放射の基礎
2.1 黒体放射
2.2 光子ガスの熱力学

3. 星の物理学
3.1 星の熱力学
3.2 主系列星のパラメータスケーリング
3.3 星の内部の核反応

4. 星の進化と終末
4.1 星の進化
4.2 電子縮退した星：白色わい星
4.3 核子縮退した星：中性子星

5. ビッグバン宇宙論
5.1 膨張宇宙の記述と宇宙論パラメータ
5.2 物質の起源と宇宙の熱史
5.3 ビッグバンにおける元素合成
5.4 宇宙の晴れ上がり

1.4.5 プラズマ物理学： 江尻 晶

1. 様々なプラズマ
2. プラズマの特徴

3. サイクロトロン運動
4. 単一粒子の軌道
5. ミラー磁場と断熱不変量
6. 種々の磁場配位と軌道
7. 衝突
8. 電気抵抗
9. 衝突と拡散
10. 電磁流体力学（**MHD**）方程式
11. **MHD** の応用
12. 平衡
13. 安定性
14. プラズマ中の波動

1.4.6 固体物理学 II：長谷川 修司

1. 固体物理 **I** の復習
1.1 自由電子気体
状態密度, 静電遮蔽, 電子比熱
1.2 バンド構造
Bloch の定理, ブリルアン領域, バンドギャップ, フェルミ面
1.3 電子輸送
Drude formula, 移動度, Bloch wave, バンド分散, 有効質量, 正孔, ボルツマン方程式, carrier scattering
1.4 半導体
半導体・金属・絶縁体, 直接遷移・間接遷移, 真性半導体, doping, ホール効果, 金属絶縁体転移, pn junction/ rectifying function, 太陽電池
1.5 格子振動
音響フォノンと光学フォノン, 格子振動の量子化, 格子比熱, 熱伝導
2. 超伝導
2.1 歴史
2.2 マイスナー効果, ロンドン方程式
2.3 メカニズム, クーパー対, BCS 理論
2.4 超伝導電流と臨界電流, 磁束の量子化
2.5 ジョセフソン効果, BEC
3. 磁性
3.1 常磁性と反磁性
3.2 交換相互作用
3.3 強磁性のバンドモデル
3.4 局在スピンモデル
3.5 磁気デバイス
4. 量子現象
4.1 低次元量子系
4.2 量子ホール効果
4.3 金属絶縁体転移
4.4 スピン軌道相互作用
4.5 トポロジカル物質

1.4.7 量子光学：酒井 広文

1. 原子と放射の相互作用
1.1 時間に依存する Schrödinger 方程式
1.2 相互作用ハミルトニアン
1.3 遷移速度
1.4 B 係数の表式
1.5 光学 Bloch 方程式
1.6 Rabi 振動
1.7 放射広がり
1.8 飽和広がり
1.9 放射減衰を伴う Rabi 振動
1.10 衝突広がり
1.11 Doppler 広がり
1.12 合成吸収線の形状
2. 電磁場の量子化
2.1 古典電磁場のポテンシャル論
2.2 Coulomb ゲージ
2.3 自由古典場
2.4 量子力学的調和振動子
2.5 場の量子化
2.6 場の交換の性質
2.7 零点エネルギー
2.8 モード位相演算子
2.9 単一モード個数状態の物理的性質
2.10 コヒーレント光子状態
2.11 単一モードコヒーレント状態の物理的性質
3. 量子化した場と原子との相互作用
3.1 原子の多極モーメント
3.2 多極相互作用ハミルトニアン

3.3 電気双極子近似
3.4 原子ハミルトニアンの第2量子化
3.5 光子の吸収速度と放出速度
4. レーザーの基礎
4.1 光共振器のモード
4.2 光共振器の安定性
4.3 発振条件
4.4 波動方程式に基づくレーザー理論
4.5 定常状態におけるレーザー発振
4.6 各種のレーザー
4.6.1 3準位レーザーと4準位レーザー
4.6.2 固体レーザー
4.6.3 気体レーザー
4.6.4 色素レーザー
4.6.5 半導体レーザー

1.4.8 生物物理学特論 : 樋口 秀男, 酒井 邦嘉, 陶山 明

1. 生体の機能
2. 脳・心・言語の関係
3. 普遍文法と言語獲得装置
4. 再帰性が生み出す構造
5. 自然言語処理（人工知能入門）
6. 脳イメージングの基礎
7. DNA コンピュータの基本原理
8. DNA コンピュータの物理的基礎
9. 超並列計算による NP 完全問題の解法
10. 生命科学への応用
11. 材料科学への応用
12. 細胞内蛋白質機能のイメージング
13. 個体内細胞の役割の多様性

1.4.9 統計力学特論 : 常次 宏一

1. 相転移と自発的対称性の破れ
2. ランダウ理論
3. いくつかの重要な概念
転送行列、高温展開と双対性
4. 揺らぎとランダウ・ギンツブルグ理論
5. ガウシアン理論と相関関数
6. スケーリング
7. 繰込み群のアイデア
8. ϕ^4 模型の波数空間繰込み群
ε 展開、Wilson-Fisher 固定点
9. 連続対称性
10. 非平衡現象入門
ボルツマン方程式、衝突積分、H 定理

1.5 4年生 Aセメスター

1.5.1 化学物理学 : 藤森 淳

1. 原子の電子状態
1.1 一電子状態
1.2 多電子原子
1.3 周期律
2. 分子の電子状態
2.1 水素分子・二原子分子
2.2 ベンゼン等の分子
2.3 金属錯体

1.5.2 素粒子物理学: 横山 将志

1. Introduction
2. Basic Concepts
3. Experimental Tools
4. Decay and Cross Sections

5. Dirac Equation
6. Quantum Electrodyamics (QED)
7. Weak Interactions
8. Electroweak Theory
9. Quark Model and QCD
10. Quark Mixing and CP Violation
11. Neutrino Oscillation

1.5.3 場の量子論 II : 渡利 泰山

1. introduction
2. S-matrix, Feynman rule, loop expansion
incl. spectral representation, LSZ formula.
3. tree-level scattering processes
incl. polarization, non-relativisitic limit, Mott scattering, Compton/Thomson scattering
4. bound states
incl. Bethe-Salpeter eq., fine and hyperfine structure
5. unitarity
6. low-energy effective theory
7. path integral
incl. imaginary time and Keldysh formalism
8. introduction to 1-loop computation
9. Borel resummation

1.5.4 原子核物理学 : 大塚 孝治

1. 原子核のスケールと単位
2. 原子核の大きさと密度
3. 原子核の質量と結合エネルギー
4. フェルミガス模型
5. 平均ポテンシャル
6. 調和振動子ポテンシャル
7. 殻構造
8. シェルモデル、アイソスピンと核力
9. 原子核の形
10. 原子核の崩壊と放射線
11. エキゾチックな原子核

1.5.5 固体物理学 III : 高木 英典, 吉岡 孝高

1. 光物性物理学
1.1 屈折率と比誘電率、分散関係
1.2 誘電体の比誘電率の古典論
1.3 ポラリトン
1.4 金属・ドープ半導体の光学応答
1.5 光学遷移と半導体の線形光学応答
1.6 励起子とボース・アインシュタイン凝縮
2. 相関電子の超伝導
2.1 電子相関
2.2 モット絶縁体と磁性
2.3 フェルミ液体論
2.4 金属絶縁体転移
2.5 層状銅酸化物の高温超伝導
2.6 異方的超伝導

1.5.6 電子回路論 : 勝本 信吾

1. 電磁場と電子回路
1.1 この講義について
1.2 電子回路とは
1.3 2端子素子
1.4 回路図
1.5 抵抗器
1.6 キャパシタ
1.7 インダクタ
2. 線形回路序論
2.1 線形システムと電子回路
2.2 電源
2.3 回路網
2.4 4端子 (2端子対) 回路
2.5 端子対回路の諸定理

2.6 双対性
2.7 受動素子と能動素子
3. 伝達関数と周波数応答・過渡応答
3.1 受動素子 2 端子回路の伝達関数
3.2 2 端子受動素子回路
3.3 受動素子回路の過渡応答
4. 増幅回路
4.1 増幅回路と系の制御
4.2 OP アンプ
4.3 トランジスタ
4.4 電場効果トランジスタ
5. 分布定数回路
5.1 伝送路
5.2 伝送路の伝播現象
5.3 S 行列 (S パラメタ)
5.4 シュレディンガー方程式と LC 伝送路
6. 信号，雑音，波形解析
6.1 ゆらぎ
6.2 増幅器の雑音
6.3 変調とアナログ信号伝送
6.4 離散化信号
7. ディジタル信号とディジタル回路
7.1 ディジタル信号序論
7.2 論理ゲート
7.3 論理ゲートの実装
7.4 論理演算の回路化と簡単化
7.5 A-D/D-A コンバータ
7.6 ディジタルフィルター
7.7 ハードウェア記述言語：HDL

1.5.7 現代物理学入門： 馬場 彩, 林 将光

1. 高エネルギー宇宙物理学 (担当: 馬場)
1.1 高エネルギー宇宙物理学とは
1.2 プラズマからの放射の基礎
1.3 宇宙に存在するプラズマ
1.4 宇宙線の概要と発見の歴史
1.5 宇宙線加速の原理と加速現場
1.6 コンパクト星に関する話題
1.7 高エネルギー宇宙物理学の歴史と検出器開発
2. スピン物性物理学 (担当: 林)
2.1 物性物理基礎
2.2 磁性
2.3 量子効果
2.4 スピン移行トルク
2.5 スピン流
2.6 スピン依存伝導
2.7 トポロジカル物質

1.5.8 普遍性生物学： 金子 邦彦, 古澤 力

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
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）
3. 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. 発生ー進化対応
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

1.5.9 系外惑星： 須藤 靖, 生駒 大洋

1. 物理定数と世界の安定性
- **1.1** 宇宙と世界はどちらが大きいか？
- **1.2** 天体形成史
- **1.3** 宇宙の階層構造
- **1.4** 物理法則と初期条件
- **1.5** ガス惑星の質量
- **1.6** 恒星の質量
- **1.7** 宇宙の階層と基本物理定数
- **1.8** 物理学における必然と偶然
- **1.9** 世界を知るための天文学

2. 系外惑星検出史
- **2.1** 系外惑星発見数
- **2.2** 太陽系外惑星検出方法のまとめ
- **2.3** 太陽系外惑星発見の歴史
- **2.4** プロキシマ・ケンタウリの周りのハビタブル惑星

3. 系外惑星系の軌道進化と古在効果
- **3.1** 古在効果とは
- **3.2** 惑星形成の標準シナリオ: コア集積モデル
- **3.3** 重力２体問題
- **3.4** ケプラー問題とハミルトン・ヤコビ方程式
- **3.5** 重力３体問題と永年摂動
- **3.6** 古在効果
- **3.7** 潮汐作用

4. 惑星内部
- **4.1** 太陽系の惑星 (概観)
- **4.2** 内部構造の基礎
- **4.3** ホットジュピター
- **4.4** クールジュピター
- **4.5** スーパーアースとミニネプチューン

5. 惑星大気
- **5.1** 太陽系の惑星 (概観)
- **5.2** 大気構造の基礎
- **5.3** 大気透過観測
- **5.4** 大気放射観測

6. 惑星系の多様性と起源
- **6.1** 巨大惑星
- **6.2** 小規模惑星
- **6.3** 恒星タイプ依存性

2　各賞受賞者紹介

2.1　福山秀敏 名誉教授

— 文化功労者 —

本物理学教室に 1992 年から 1999 年の間、教授として在籍しておられた福山秀敏教授が、物性物理学の分野における多大な功績が評価され、平成 28 年度の文化功労者に選ばれました。福山教授は、1964 年に本学物理学科を卒業され、大学院は久保亮五研究室で学位を取得されました。その後、東北大学理学部助手、ハーバード大学ポスドク、ベル研究所研究員を経て、1977 年に東京大学物性研究所に移られ、1992 年に理学部物理学科に来られました。現在は東京理科大学理学部におられます。福山教授は、ホール効果・軌道磁性に関するグリーン関数を用いた定式化（とくに後者は軌道磁性に関する「福山公式」として知られています）、一次元系物質における位相ハミルトニアン・各種ソリトンの研究、電荷密度波のダイナミクス、アンダーソン局在に関する微視的研究、ウィグナー結晶、励起子絶縁体の理論、超伝導近接効果、量子トンネル現象、メゾスコピック系・電気伝導度の揺らぎ理論、有機導体における微視的モデルの提唱・電荷秩序状態の理論的予言、高温超伝導に対する RVB 理論、ディラック電子系におけるスピンホール効果など物性物理学の広範囲な分野にわたって重要な研究を行ってこられました。また若手育成にも非常に熱心で、2007 年に秋光純氏とともに凝縮系科学賞を設けられ、毎年数名の若手物性研究者を表彰しておられます。

2.2　吉田直紀 教授

— 第 13 回日本学術振興会賞, 日本学士院学術奨励賞 —

吉田直紀教授が「大規模数値シミュレーションに基づく初期宇宙での構造形成の研究」に対して第 13 回日本学術振興会賞・日本学士院学術奨励賞を受賞されました。日本学術振興会賞は 45 歳未満の優れた若手研究者に対して与えられる賞で、全学術分野から 25 名程度が選ばれ、さらに特に優れた 6 名以内には日本学士院学術奨励賞が授与されることになっています。吉田教授は、他の追随を許さない優れた大規模数値シミュレーションを駆使して、宇宙論的初期条件から第一世代の天体が誕生する過程を詳細に追跡し、それらの多くは太陽の数十倍から百倍程度の大質量始原星となることを予言しました。大質量星はその後の超新星爆発やブラックホール形成・成長を通じて、様々な天文現象に関係しており、現在世界中で進行中の観測プロジェクトの重要な科学的ターゲットです。吉田教授の今回の受賞を心からお祝いするとともに、今後のますますのご活躍をお祈りしています。

2.3　林将光 准教授

— 文部科学大臣表彰若手科学者賞 —

林将光准教授が，業績「電流駆動磁化制御と薄膜ヘテロ構造のスピン軌道効果の研究」により文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞されました。磁化の向きを情報の記憶ビットとして用いるスピントロニクス素子は、高性能の不揮発性メモリや不揮発性論理演算素子へ応用できるとして期待が高まっています。林准教授は、大容量メモリの根幹を成すシフトレジスタの基本動作を強磁性ナノ細線を用いて実証し、実用化に向けた重要な一歩を示すとともに、磁性体ナノ構造における磁化のダイナミクスに関する現象の物理解明に寄与しました。また、林准教授は、薄膜ヘテロ構造におけるスピン-軌道相互作用に起因した物理現象に関する研究を推進し、磁化に作用するトルクの定量評価手法を確立するなど、スピントロニクスの新たな展開を切り開きました。これらの研究成果は、今後の情報化社会において重要な役割を果たすスピントロニクス素子の開発に大きく寄与するものと期待されています。

2.4 桂法称 准教授

— Nevill F. Mott Prize 2016 —

桂法称准教授が、磁性由来の強誘電性および量子磁性体における熱ホール効果の機構に関する理論的研究で、2016 年 Nevill F. Mott 賞を受賞しました。この賞は、強相関電子系の国際会議 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES) で表彰される Early career prizes のひとつです。桂准教授は、スピン軌道相互作用によって磁性に由来する強誘電性が発現する可能性があることを、微視的な理論を構築し予言しました。このことは、マルチフェロイクスと呼ばれる物質群のうち、特にサイクロイド型らせん秩序を持つ系において実験的にも確かめられました。また、桂准教授は、電荷をもたない準粒子である磁性体中のマグノンも、Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用などの磁気的相互作用が存在する場合には、(熱流の) ホール効果を起こすことを理論的に予言しました。このことも、パイロクロア構造をもつ強磁性体などにおいて実験的に確認されました。また、理論的にはトポロジカル絶縁体とも共通点を持つことから、注目を集めています。

2.5 増田賢人 氏 (須藤研)

— 第 7 回日本学術振興会育志賞 —

増田賢人氏が、「高精度測光観測によるトランジット系外惑星系の探究」に対して第 7 回日本学術振興会育志賞を受賞しました。増田氏は、系外惑星系の専用観測衛星であるケプラーのデータを用いて、複数惑星系のスピン軌道角の初検出、惑星食の発見、重力減光を用いたパラメータ推定法の確立、星振学を応用した惑星系の自転公転角の決定など、トランジット惑星系に関する多くの優れた研究を行いました。増田氏は、修業年限特例で学位取得後、現在はプリンストン大学において日本人で初めてのカールセーガンフェローとしてさらに研究を展開させつつあります。育志賞は全学術分野で優れた研究を行っている大学院学生に対して与えられるもので、これからも本物理教室から多くの学生の皆さんが受賞されることを期待しています。

2.6 樊星 氏 (浅井研)

— 東京大学総長賞、International School of Subnuclear Physics 2016 Best Student award —

「真空には、仮想電子が詰まっている」物理学科の先生や学生さんは、さも見てきたかの様に話す。でも、実は誰も実験的に見た人はいない。そんな真空に隠れた仮想電子の存在を探るために、10T 級の超強力磁石と、pm(10-12m) より短い距離を制御する超高精度のレーザー干渉計を組み合わせる必要がある。この二つを新しい技術開発を行うばかりでなく、二つを組み合わせ安定的に実験することに成功したのが、樊星さんの業績「高速繰り返しパルス磁石と Fabry-Pérot 共振器を用いた真空の複屈折の探索」である。総長賞ばかりでなく、世界の若手研究者が集まる国際スクールで best student 賞を受賞した研究成果であり、本当にスゴイ実験をやってくれたと言う驚きに近い感動を一緒にやった私 (浅井) を含めて多くの仲間に与えてくれた。この場で、樊さんに感謝すると同時に、この実験は、物理教室の五神・湯本・井手口研究室 、工学系の吉岡研究室の皆さん、物性研の金道研の皆さん、素粒子物理国際研究センターの皆さん、東北大学金属研究所の野尻研の皆さんの協力でなしえたものでこの場を借りて感謝申し上げます。

2.7 角田佑介 氏 (大塚研、現 附属原子核科学研究センター)

— 日本物理学会若手奨励賞 —

角田佑介氏が第 11 回 (2017 年) 日本物理学会若手奨励賞 (理論核物理領域) を受賞されました。陽子の数と中性子の数がアンバランスな不安定原子核の性質は現代の原子核物理学の中心課題の一つであるが、その中でも、異なった形状を持つ状態がほぼ等しいエネルギーで安定的に存在する変形共存現象は、最近特に興味を集めている。受賞論文は、ニッケルの中性子過剰同位体の変形共存現象を調べたものである。角田佑介氏はモンテカルロ殻模型により、信頼性の高い量子多体計算を実現し、原子核形状を解析する新しい手法を導入することで、ニッケル同位体で 3 種の変形状態が共存することを予言した。また、その研究では、粒子配位の変化に伴い動的に殻構造が変化する「第二種殻進化」が新しいタイプの構造メカニズムとして提唱され、変形共存現象を起こす源の一つであることが示された。角田氏の原子核形状を解析する新しい手法では、量

子多体系の波動関数から内部固有系での形状の情報を引き出し、可視化するができる。変形共存現象の研究を大幅に前進させるこの方法は、その後 T-plot と呼ばれ、世界的に広く用いられるに至った。本論文は発表以来、国内外の注目を集めており、実験との共同研究によってその理論予測が証明されつつある。さらに、第二種殻進化の概念が他の同位体チェインにも適用されるなど、この研究成果は原子核物理学の発展に大きく寄与しており、若手奨励賞にまことにふさわしいものである。

2.8 中島秀太 氏（上田研、現 京都大学)

— 日本物理学会若手奨励賞 —

中島秀太氏が第 11 回（2017 年）日本物理学会若手奨励賞 (領域 1) を受賞されました。2 個の原子が束縛状態を持たない状況で 3 個の原子が束縛状態を形成する場合がある。そのような状態はエフィモフ状態と呼ばれ、1970 年代に原子核を念頭にエフィモフによって予言されたが 2006 年に冷却原子気体を用いて実現された。エフィモフ状態は普遍的な自己相似スペクトルや量子揺らぎによってスケール普遍性が破れる量子異常などユニークな性質を持つ。中島氏は、冷却原子気体を用いてエフィモフ状態のエネルギーの測定に成功した。また、トポロジカルな性質に基づいて原子を輸送するトポロジカルポンプという現象を同じく冷却原子を用いて世界で初めて実現した。

2.9 鎌田耕平 氏（横山順一研、現 アリゾナ州立大学)

— 日本物理学会若手奨励賞 —

鎌田耕平氏が「ヒッグスインフレーションの包括的研究」に対して、第 11 回（2017 年）日本物理学会若手奨励賞 (宇宙線・宇宙物理領域) を受賞されました。初期宇宙にインフレーションと呼ばれる宇宙の加速的膨張が起こり、それによって平坦性・地平線問題が解決されると共に、観測されている密度ゆらぎが量子的に生成した、という考え方は現在広く受け入れられると共に、観測とも整合的である。一方それを引き起こす素粒子論的な機構はいまだ定説がない。鎌田氏は標準模型のヒッグス場がインフレーションを引き起こした可能性を包括的に研究し、既知の全ての模型を統一的に記述するとともに、新たな可能性を発見した。また、その量子論的安定性を研究し、高階微分相互作用を含んでいても、インフレーションのスケールまで十分安定であることを示した。これらはヒッグスインフレーションの実現機構とそれを可能にする基礎物理学理論への大きな貢献であると認定され、若手奨励賞が授与された。

2.10 樽家篤史 氏（須藤研助教、現 京都大学基礎物理学研究所)

— 第 10 回 湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞 —

以前須藤研の助教であった樽家篤史氏が「宇宙論的重力構造進化の高精度非線形摂動論の開拓」に対して第 10 回 湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞を受賞されました。この研究は、宇宙大規模構造の非線形重力進化に対する高精度予言を可能とする解析的な理論計算法を開拓し、さらに赤方偏移空間ゆがみ効果を取り入れた理論モデルの構築、それらを取り入れた数値計算法の高速化などを進め、上述の研究を行うための実用的な高精度理論テンプレートを開発したものです。樽家氏が開発した理論テンプレートの数値計算コードは広く公開されており、すでに国内外の銀河サーベイプロジェクトで用いられています。このように、基礎物理学的な側面からの重要性と、天文学的応用の可能性を兼ね備えた樽家氏の研究の受賞に対して、お祝いさせて頂くとともに、今後ますます活躍されることを期待しています。

2.11 平成 28 年度 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、平成 28 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） 西口大貴君、高橋文雄君、増田賢人君、堀尾眞史君

- 理学系研究科 研究奨励賞（修士課程）　樊星君、榎本雄太君、米田浩基君、吉田聡太君
- 理学部 学修奨励賞　川畑幸平君、萩原大佑君、森脇可奈さん

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]

林 将光	准教授	H28/4/1	採用	独立行政法人物質・材料研究機構 主任研究員 兼務
馬場 彩	准教授	H28/4/1	採用	青山学院大学理工学部 准教授
白石 絵理	事務補佐員 (村尾研)	H28/4/1	採用	
岡田 康志	教授	H28/5/1	採用	独立行政法人理化学研究所 チームリーダー 兼務
古澤 力	教授 (生物普遍)	H28/5/1	採用	独立行政法人理化学研究所 チームリーダー 兼務
河口 真志	助教 (林研)	H28/6/1	採用	物性研究所 特任研究員
渡辺 真由子	事務補佐員 (物理事務室)	H28/6/1	採用	
牟田 真理子	事務補佐員 (樋口研)	H28/6/1	採用	
長瀬 恵子	事務補佐員 (生物普遍)	H28/6/1	採用	
齋藤 稔	助教 (生物普遍)	H28/7/1	採用	総合文化研究科 特任助教
藤枝 伸	職員 (物理事務室)	H28/7/1	配置換え	薬学部・薬学系研究科教務チーム 係長
山口 奈央美	事務補佐員 (生物普遍)	H28/7/1	採用	
井手口 拓郎	講師	H28/7/16	採用	理学系研究科附属 スペクトル化学研究センター 助教
永田 夏海	助教 (濱口研)	H28/9/1	採用	ミネソタ大学
榎 佐和子	助教 (岡田研)	H28/9/1	採用	工学系研究科・応用化学専攻 特任研究員
樫山 和己	助教 (吉田研)	H28/9/16	採用	University of California Berkeley NASA Einstein Fellow
松井 春枝	事務補佐員 (教務)	H28/10/16	採用	
NAGORNOV IURII	特任研究員 (常行研)	H28/11/1	採用	トリヤッチ州立大学
TANG YONG	特任研究員 (井研)	H28/11/16	採用	韓国 高等科学院 博士研究員
PEIRANI Sebastien	特任研究員 (須藤研)	H28/11/16	採用	Institut d‘ Astrophysique de Paris 研究員
Gallais Yann	特任教授 (GSGC)	H29/1/16	採用	パリ・ディドロ大学　教授
KRAUTH Werner	特任教授 (GSGC)	H29/1/16	採用	エコール・ノルマル・シュペリュール 連携教授

[物理学教室から移られた方々]

LOREZ SEPULCRE ANA	特任研究員 (山本研)	H28/ 5/29	辞職	
BAE KYUJUNG	特任研究員 (濱口研)	H28/6/30	辞職	Institute for Basic Science
MAJUMDER MAYUKH	特任研究員 (高木研)	H28/6/30	辞職	
熊崎 丈晴	職員 (物理事務室)	H28/6/30	配置換え	環境安全衛生部安全衛生課保健・健康推進チーム柏保健センター 係長
八島 恵子	学術支援職員 (宮下研)	H28/8/31	辞職	
梅木 誠	助教	H28/9/30	辞職	
柏葉 朋子	技術職員	H28/10/31	辞職	
BENIC SANJIN	特任研究員 (福嶋研)	H28/11/6	辞職	Zagreb Universitu Postdoctoral Researcher
玉井 文	学術支援職員 (第 2 分室)	H28/11/30	辞職	
JEANS DANIEL	特任研究員 (駒宮研)	H28/12/31	辞職	高エネルギー加速器研究機構
THOMELIN DIETRICH				素粒子原子核研究所 准教授
PEIRANI Sebastien	特任研究員 (須藤研)	H28/12/31	辞職	Institut d‘ Astrophysique de Paris 研究員
立津 慶幸	特任研究員 (常行研)	H29/3/15	辞職	東京工業大学 特任研究員
早野 龍五	教授	H29/3/31	定年退職	
大塚 孝治	教授	H29/3/31	定年退職	
川野 輝彦	助教 (松尾研)	H29/3/31	辞職	京都府立医科大学大学院医学研究科物質生命基礎科学 准教授
渡邉 祥正	助教 (山本研)	H29/3/31	辞職	筑波大学数理物質系物理学域 助教
石川 隆	助手	H29/3/31	辞職	理学系研究科短時間勤務有期雇用教職員 技術補佐員
Gallais Yann	特任教授 (GSGC)	H29/3/31	辞職	
KRAUTH Werner	特任教授 (GSGC)	H29/3/31	辞職	
上田 美樹	学術支援職員 (山本研)	H29/3/31	辞職	
島崎 裕子	学術支援職員 (藤森研)	H29/3/31	辞職	
小林 尚美	事務補佐員 (物理事務室)	H29/3/31	辞職	

4　役務分担

役務	担当教員	技術職員・事務職員
専攻長・学科長	長谷川	熊崎・藤枝、高橋、小倉
幹事	須藤、上田、宮下、佐野	
専攻主任	樋口	物理教務
専攻副主任	諸井	物理教務
常置委員	高木、浅井	物理教務
優先配置	村尾	高橋
教務	松尾 (理)、酒井 (大学院)、小形 (ガイダンス)、	
	中澤 (学生相談)、安東 (留学)、吉田 (留学生支援)	
学生実験	浅井、岡本、安東、横山	佐伯、八幡
就職	櫻井	仁井田、高橋
奨学金	大塚	尾澤
博士課程学生支援制度	濱口	小林、小倉
部屋割	駒宮	熊崎・藤枝
安全衛生	岡本	八幡
放射線	横山	朝倉、熊崎・藤枝
管理技術室	佐野 (統括、試作室)	大塚
(技術室会議メンバー)	浅井 (学生実験)	佐伯、八幡
	岡本 (安全衛生・低温)、	八幡
	吉田 (IT 関連)	南野
図書	宮下、松尾、中澤、酒井、北川	水落
コロキウム	須藤、福山、諸井、金子、相原	小林、小倉、佐山
年次報告	桂、馬場 (URA)	仁井田、八幡
記録係	藤堂、桂、北川、林、馬場	小倉
物品供用官	湯本	熊崎・藤枝
事務分室	第一：藤森、第二：宮下	熊崎・藤枝
理交会	福山	熊崎・藤枝
親睦会	北川	
進学指導	専攻長、駒宮、吉田、小形	物理教務
	推薦入試アドバイザー：駒宮、小形	
進振委員	福嶋	高橋
ホームページ、IT	吉田、藤堂、佐野 (教務)	南野
オープンキャンパス	濱口	熊崎・藤枝
リーディング大学院	相原、藤森、高木、宮下、常行、横山	物理事務、物理教務
アーカイブ室	宮下、佐野	熊崎・藤枝
駒場対策	村尾 (5 月)、濱口、能勢、横山 (順)、Wimmer、	物理教務
	小形 (12 月)、福嶋	
	進学指導 (専攻長、駒宮、吉田、小形)	
GSGC	相原、浅井、村尾、吉田、横山 (順)、小形	高橋

5　教室談話会

- 2016 年 6 月 10 日 (金) 16:00-18:00
  関口 雄一郎氏 (東邦大学理学部)
  重力波で探る中性子星物質の物理
- 2016 年 12 月 2 日 (金) 16:30-18:00
  Nigel Goldenfeld 氏（Department of Physics, University of Illinois Urbana-Champaign）
  Universal Biology, the Genetic Code and the First Billion Years of Life on Earth
- 2017 年 1 月 27 日 (金) 17:30-18:50
  石﨑 章仁氏（自然科学研究機構分子科学研究所）【Sir Martin Wood Prize Lecture】
  実時間量子散逸系の理論とその光合成初期過程への展開
- 2017 年 3 月 15 日 (水) 14:00-15:30
  大塚 孝治教授（最終講義）
  核物理の夢を追って４０年
- 2017 年 3 月 15 日 (水) 16:00-17:30
  早野 龍五教授（最終講義）
  CERN と 20 年福島と 6 年 - 311 号室を去るにあたって
- 2017 年 3 月 24 日 (金) 16:30-18:00
  本多 久夫氏（神戸大学医学研究科）
  形態形成を遺伝子で説明するには数理モデルが必須である

6　物理学教室コロキウム

- 第 79 回 2016 年 4 月 22 日 (金) 16:30-18:00
  日下 暁人氏 (ローレンスバークレー研究所)
  宇宙マイクロ波背景放射で探る宇宙の暗黒成分とインフレーション
- 第 80 回 2016 年 5 月 6 日 (金) 16:30-18:00
  馬場 彩氏 (物理学教室)
  熱く激しい宇宙を探る高エネルギー宇宙物理学
- 第 81 回 2016 年 6 月 3 日 (金) 16:30-18:00
  林 将光氏 (物理学教室)
  電子スピン流を操作する最先端スピントロニクス
- 第 82 回 2016 年 7 月 1 日 (金) 16:30-18:00
  野地 博行氏 (東京大学工学系研究科)
  1 分子生物物理から合成生物学へ
- 第 83 回 2016 年 10 月 7 日 (金) 16:30-18:00
  柴田 大氏 (京都大学基礎物理学研究所)
  重力波天文学の幕開け
- 第 84 回 2016 年 11 月 4 日 (金) 16:30-18:00
  岡田 康志氏 (物理学教室、理化学研究所)
  細胞を分子粒度で見て測って理解する:生命現象の物理的理解を目指して
- 第 85 回 2016 年 12 月 9 日 (金) 16:30-18:00
  立川 裕二氏 (IPMU)
  量子重力の現状: または私は如何にして心配するのを止めて弦理論を愛するようになったか
- 第 86 回 2017 年 1 月 20 日 (金) 16:30-18:00
  堀 正樹氏 (マックスプランク量子光学研究所)
  反陽子や中間子でできた原子に光をあてる
- 第 87 回 2017 年 2 月 10 日 (金) 16:30-18:00
  中村 泰信氏 (東京大学先端科学技術研究センター)
  電気回路で量子力学:超伝導量子ビット研究の進展

7　金曜ランチトーク

- 2016 年 4 月 22 日　阿部 喬 (大塚研究室)

  「Nuclear forces and ab-initio nuclear structure」

- 2016 年 5 月 6 日　石田 明 (浅井研究室)

  「Antimatter: antihydrogen and positronium」

- 2016 年 6 月 3 日　赤城 裕 (桂研究室)

  「Topological Excitations in Quantum Spin-nematics」

- 2016 年 6 月 10 日　新倉 潤 (櫻井研究室)

  「Lifetime measurements in nuclear physics experiment」

- 2016 年 7 月 8 日　諏訪 秀麿 (藤堂研究室)

  「Monte Carlo Spectral Analysis at Quantum Phase Transition beyond Landau-Ginzburg-Wilson Paradigm」

- 2016 年 7 月 22 日　辻井 直人 (高瀬研究室)

  「Studies of lower-hybrid current drive in fusion plasmas」

- 2016 年 9 月 9 日　山本 新 (福嶋研究室)

  「Lattice QCD with External Electromagnetism」

- 2016 年 9 月 30 日　小関 忠 (高エネルギー加速器研究機構)

  「Achievements and future prospects of J-PARC accelerator」

- 2016 年 10 月 7 日　酒見 泰寛 (原子核科学研究センター)

  「Fundamental symmetry and interaction in composite systems」

- 2016 年 11 月 25 日　中山 和則 (諸井研究室)

  「Stability of our vacuum」

- 2016 年 12 月 9 日　小野寺 宏 (光量子科学研究センター)

  「Testing Lorentz Invariance with an Optical Cavity」

- 2017 年 1 月 20 日　須山 輝明 (横山順一研究室)

  「LIGO and primordial black holes」

- 2017 年 2 月 10 日　樫山 和己 (吉田研究室)

  「IceCube neutrinos: what we have learned so far」

- 2017 年 2 月 24 日　永田 夏海 (濱口研究室)

  「Minimal SUSY GUT and dark matter」

年次研究報告　2016年度

2017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　　長谷川修司
編　集　　馬場　彩
　　桂　法称
　　八幡和志