ISSN 0910-0709

Department of Physics

School of Science

The University of Tokyo

Annual Report

2017

平成29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

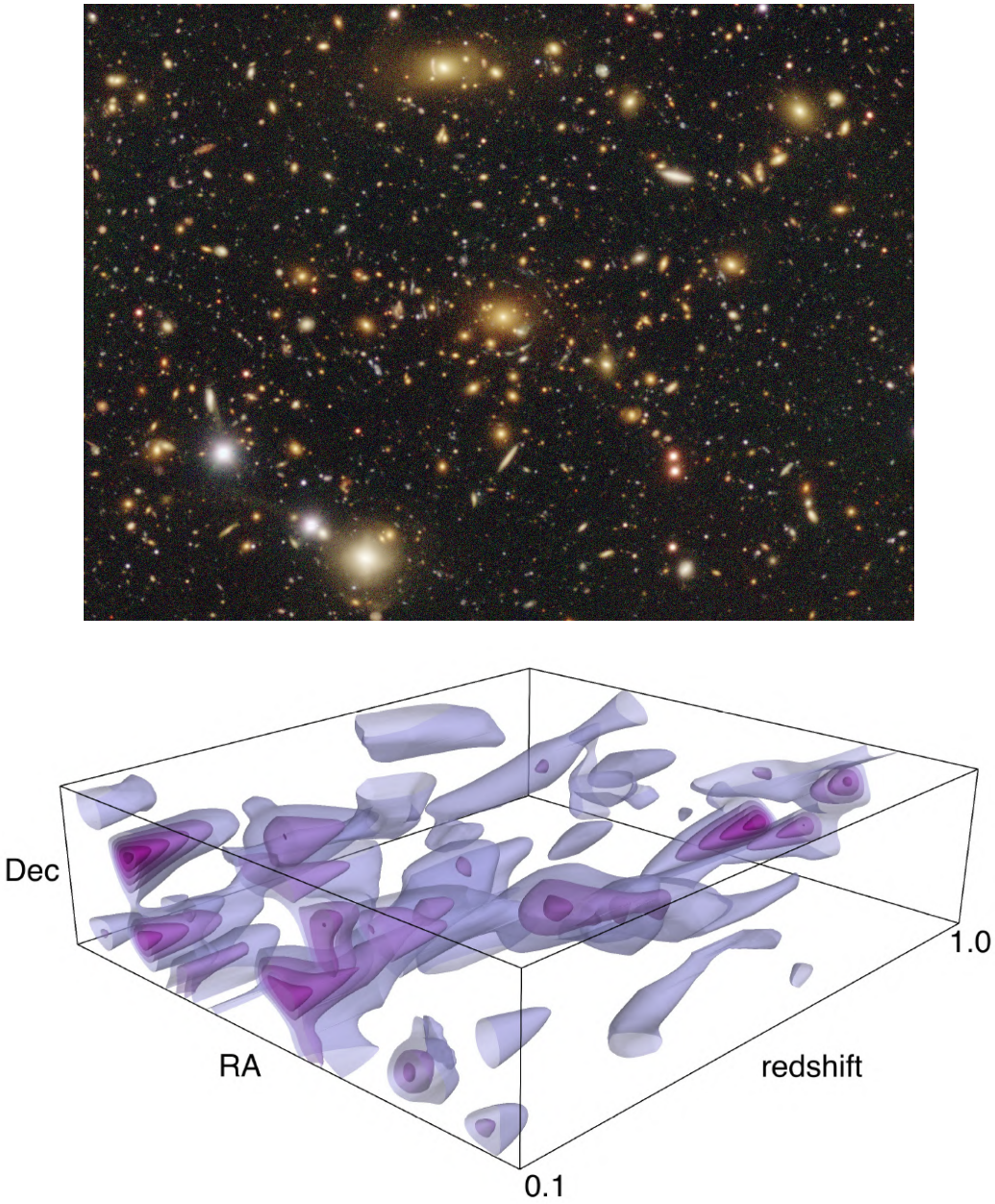


図 0.0.1: すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam サーベイで取得された撮像データ (上図：国立天文台提供) の弱い重力レンズ解析から得られた三次元質量 (ダークマター) 地図 (下図)。この質量分布が銀河分布と相関ししたがって正しく三次元質量分布が再構築されていることを確認した。160 平方度の天域にわたった HSC サーベイデータの解析により、これまででもっとも広い領域で三次元ダークマター地図を作成したことになる。(宇宙理論研究室)

The three-dimensional mass (dark matter) map (lower panel) obtained from the weak lensing analysis of Subaru Hyper Suprime-Cam survey images (upper panel, provided by NAOJ). The validity of the reconstructed mass map was confirmed by the significant cross-correlation of the map with the three-dimensional galaxy distribution. The three-dimensional dark mass map was constructed for about 160 square degrees of the sky in total, which represents the biggest three-dimensional dark matter map ever created. (Theoretical astrophysics group)

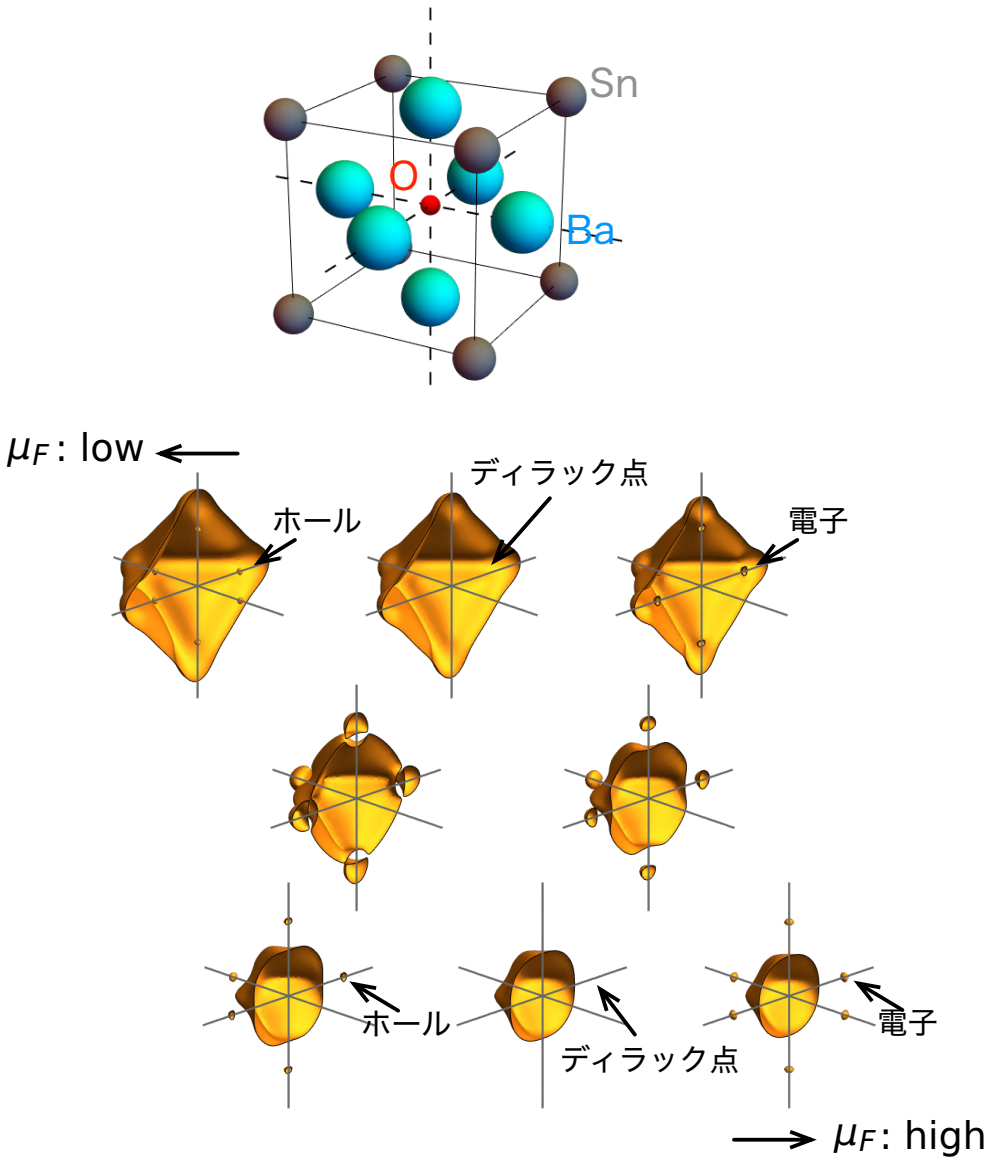


図 0.0.2: 双子のディラック電子系：（上）Ba_3SnO の結晶構造。（下）Ba_3SnO のバンド構造の等エネルギー面（つまり rigid band 近似でのフェルミ面）の化学ポテンシャル μ_F の依存性。化学ポテンシャル μ_F を上げるにつれて、『ホールのフェルミ面→ディラック点→電子のフェルミ面』という入れ替わりがあり、さらに化学ポテンシャルを上げると、次の『ホールのフェルミ面→ディラック点→電子のフェルミ面』の入れ替わりに連続的につながっている。（小形研究室：T. Kariyado and M. Ogata: Phys. Rev. Materials **1**, 061201(R) (2017) "Evolution of Band Topology by Competing Band Overlap and Spin-Orbit Coupling: Twin Dirac Cones in Ba_3SnO as a Prototype" 参照）

Twin Dirac electron system: (above) Crystal structure of Ba_3SnO (below) Energy evolution of the isoenergy surfaces of the band structure of Ba_3SnO. As the chemical potential μ_F increases, the hole-like Fermi surface shrinks, disappears (becomes a Dirac point), and reappears as an electron-like Fermi surface. As μ_F increases further, the electron-like surface changes into a hole-like surface and again another Dirac point appears. (Ogata group: See T. Kariyado and M. Ogata: Phys. Rev. Materials **1**, 061201(R) (2017) "Evolution of Band Topology by Competing Band Overlap and Spin-Orbit Coupling: Twin Dirac Cones in Ba_3SnO as a Prototype")

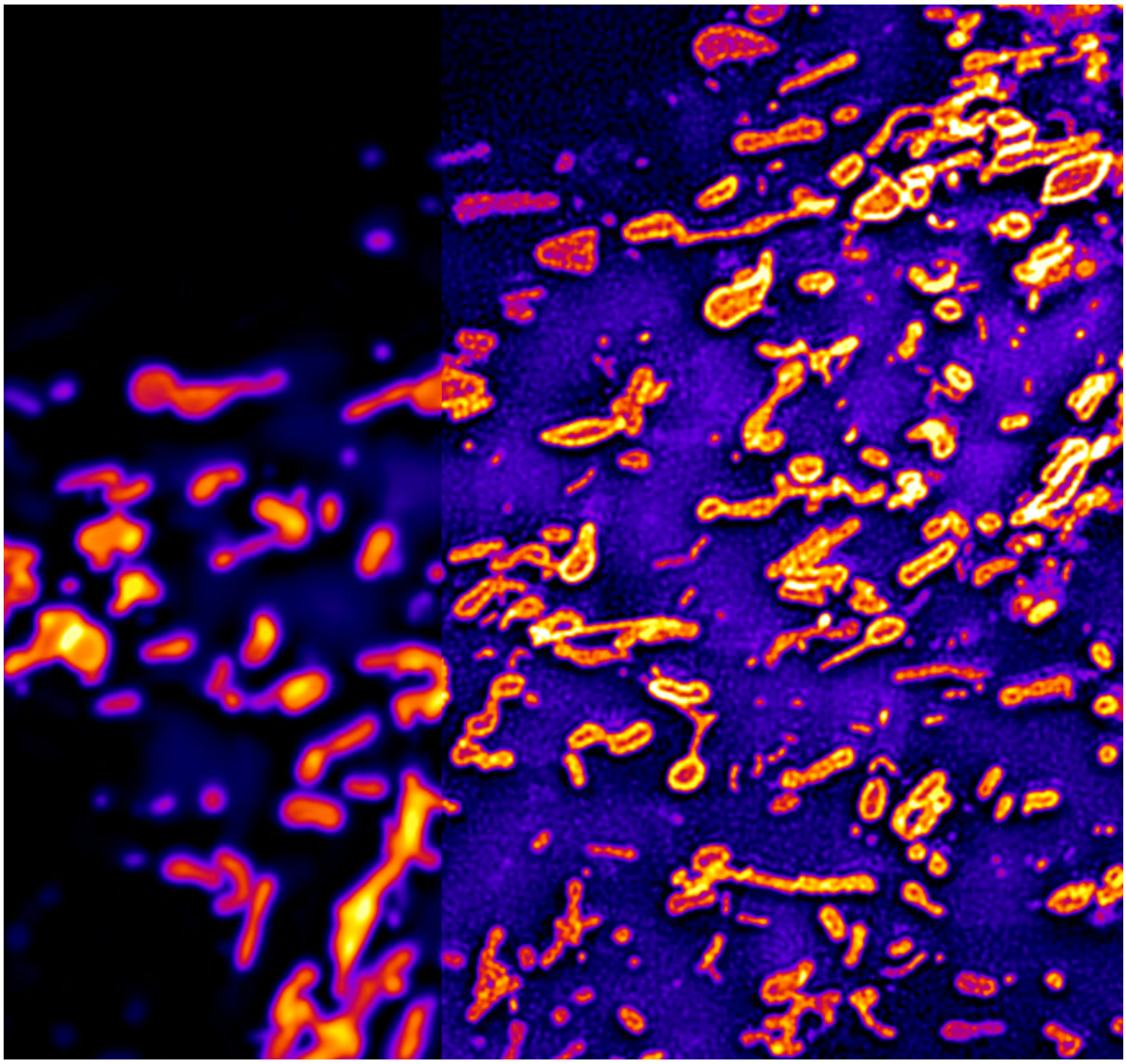


図 0.0.3: 超解像ライブイメージングにより初めて可視化されたミトコンドリア外膜の動態。
ミトコンドリアは、細胞内共生という進化的起源を反映して、細胞由来の外膜とミトコンドリア由来の内膜という二重の膜構造を持つが、従来の光学顕微鏡では回折による分解能の限界のため、可視化することは出来なかった (図左)。私たちが開発した超解像顕微鏡による観察で (図右)、ミトコンドリアの外膜のみが内膜とは無関係に特異な動態を示すことが初めて示された。(岡田研究室)

Super-resolution live imaging of the dynamics of the outer membrane of mitochondria.
Mitochondria are derived from endosymbiotic bacteria. Thus they are covered with two membranes: the outer membrane originating from the host cell, and the inner membrane originating from the bacteria. The resolution of the conventional microscope was limited by diffraction and this double-membrane structure was not resolved (left part of the figure). We have developed a novel super-resolution microscope for the observation of living cells at higher resolutions. The structure of the outer membranes of mitochondria were clearly imaged with this new microscope, and the unique dynamics of the outer membrane-derived tubulovesicular structures that do not contain inner-membranes were first described (right). (Okada group)

序

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・理学部物理学科の平成 29 年度（2017 年 4 月-2018 年 3 月）年次研究報告をお届けします。この小冊子が物理学教室で広く行われている多彩で活発な研究・教育の現状を知っていただく手がかりになれば幸いです。　最初に、新しく入ってこられた教員ですが、准教授として、日下暁人氏（宇宙物理実験：Lawrence Berkeley National Laboratory より）、助教として、池崎圭吾氏（岡田研）、木内健司氏（日下研）、大屋瑶子氏（山本研）、吉川尚孝氏（島野研）が着任されました。また、中澤知洋講師が名古屋大学准教授として、阿部喬助教（福嶋研）が本研究科附属原子核科学研究センター特任助教として、高山あかり助教（長谷川研）が早稲田大学理工学術院専任講師として、松永隆佑助教（島野研）が本学物性研究所准教授として、大槻朋子特任教授が本研究科附属フォトンサイエンス研究機構特任教授として転出されました。また、駒宮幸男教授が本年度定年を迎えられました。

本年度も教室関係者の活発な研究・教育活動の結果、多くの方が受賞されています。石田明助教（浅井研）が日本陽電子科学会奨励賞を、増田賢人氏（元須藤研）が第 34 回井上研究奨励賞を受賞しました。また、一ノ倉聖氏、高山あかり氏、長谷川修司氏 (長谷川研) が参加した論文が応用物理学会第 2 回薄膜・表面物理分科会論文賞を受賞しました。さらに、大屋瑶子さん（山本研) が東京大学総長賞を受賞しました。また、大屋瑶子さん、村下湧音君、秋葉和人君、坂本祥哉君が平成 29 年度理学系研究科研究奨励賞（博士課程）を、勝見恒太君、中西亮介君、上岡修星君、Omand Conor Michael Bruce 君が研究奨励賞（修士課程）を、加藤尚明君、山口大器君、渡辺彬生君が平成 29 年度理学部学修奨励賞を受賞しました。

平成 30 年度より専攻長という重責を背負うことになり、身の引き締まる思いでいます。いうまでもなく、物理学はあらゆる自然科学の重要な基礎をなすとともに、周辺分野とのかかわりでも大きく発展しつつあります。このことは、この年次報告にある各研究室の活躍を見てもおわかりになることと思います。物理学のこの役割は、今後も不動のものです。一方で、物理学教室を取り巻く社会的環境は、激動する時代の中にあって大きく、また、急速に変化していることも確かで、その変化はますます大きくなっているように感じます。その中で、しっかり物理学教室における教育、研究を強化し、研究成果を挙げ、社会で活躍する次世代の人材を育成していくには、様々な外的要因に適切にリアクションするだけでなく、主体的なアクションを起こしていくことが大事だと思っています。そのために、10 年先の物理学の発展を見通しながら、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・発展させるようにしていきたいと考えています。時には多少の痛みを伴うことがあったとしても、現在の課題に長期的視点から取り組んでいきます。今後とも、先輩の先生方、関係各位の皆様のご支援、ご鞭撻とご協力をよろしくお願い申し上げます。また、学生、院生の諸君には、勉学・研究に益々励んでいただきたいと思います。

この年次研究報告は、日下暁人准教授、馬場彩准教授、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。

2018 年 5 月 1 日

物理学専攻 専攻長・物理学科 学科長

山本　智

目 次

I 研究室別 2017 年度 研究活動報告 **1**

1 原子核・素粒子理論 **2**
1.1 原子核理論 (福嶋) 研究室 . . . 2
1.2 素粒子論研究室 . . . 5
1.2.1 現象論 . . . 5
1.2.2 弦理論、場の理論全般 . . . 7

2 原子核・素粒子実験 **11**
2.1 原子核実験グループ（櫻井研究室・Wimmer 研究室） . . . 11
2.1.1 理化学研究所 RIBF における不安定核の構造研究 . . . 11
2.1.2 エキゾチック原子の分光研究 . . . 12
2.1.3 直接反応によるエキゾチック核の分光研究 . . . 12
2.1.4 実験装置開発 . . . 13
2.2 駒宮研究室 . . . 16
2.2.1 電子・陽電子リニアコライダー ILC 計画 . . . 17
2.2.2 LHC 実験 . . . 18
2.2.3 小規模実験 . . . 20
2.3 相原・横山研究室 . . . 22
2.3.1 （スーパー）B ファクトリー実験 . . . 22
2.3.2 加速器ニュートリノ実験 . . . 23
2.3.3 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 . . . 24
2.3.4 HSC 暗黒エネルギー研究 . . . 24
2.3.5 アクシオンおよび軽い暗黒物質探索実験 . . . 25
2.4 浅井研究室 . . . 29
2.4.1 LHC・ATLAS 実験での研究 . . . 29
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 . . . 30

3 物性理論 **34**
3.1 宮下研究室 . . . 34
3.1.1 量子応答、量子ダイナミクス . . . 34
3.1.2 協力現象の統計力学 . . . 36
3.2 小形研究室 . . . 39
3.2.1 高温超伝導の理論 . . . 40
3.2.2 ディラック電子系 . . . 40
3.2.3 反磁性 . . . 41
3.2.4 トポロジカル物質の理論 . . . 42
3.2.5 有機伝導体 . . . 42
3.2.6 スピン系およびスピン軌道相互作用 . . . 43
3.3 常行研究室 . . . 45
3.3.1 超高圧下の結晶構造と超伝導 . . . 46
3.3.2 熱電材料の非調和格子振動 . . . 46

3.3.3 超短パルスレーザー照射による非熱的プロセスの物理 . . . 47
3.3.4 励起子状態の光学的制御 . . . 47
3.3.5 層状物質におけるブロッホ波動関数干渉の一般論 . . . 47
3.3.6 シミュレーション手法開発 . . . 48
3.4 藤堂研究室 . . . 51
3.4.1 強相関多体系における新奇な状態・相転移現象 . . . 51
3.4.2 新奇な非平衡・非定常状態 . . . 52
3.4.3 新たな計算物理学的手法の開発 . . . 53
3.4.4 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 . . . 53
3.5 桂研究室 . . . 56
3.5.1 強相関系 . . . 56
3.5.2 トポロジカル系 . . . 57
3.5.3 可解模型・統計力学 . . . 58
3.5.4 共形場理論のサイン二乗変形 . . . 58
3.5.5 その他 . . . 59

4 物性実験 62
4.1 藤森研究室 . . . 62
4.2 長谷川研究室 . . . 66
4.2.1 表面電子・スピン輸送 . . . 66
4.2.2 表面・原子層ナノ構造 . . . 67
4.2.3 新しい装置・手法の開発 . . . 68
4.3 福山研究室 . . . 72
4.3.1 2 次元ヘリウムの量子相の研究 . . . 72
4.3.2 グラフェンのエッジ状態の研究 . . . 73
4.3.3 極低温実験技術の開発 . . . 75
4.4 岡本 研究室 . . . 77
4.4.1 劈開表面に形成された 2 次元電子系 . . . 77
4.4.2 金属超薄膜の超伝導 . . . 78
4.5 島野研究室 . . . 81
4.5.1 半導体光励起電子正孔系 . . . 81
4.5.2 超伝導体の光応答・光制御 . . . 82
4.6 高木・北川研究室 . . . 85
4.6.1 ハニカム格子上のスピン軌道量子液体の発見 . . . 85
4.6.2 3 次元ディラック電子 . . . 86
4.7 林研究室 . . . 89
4.7.1 スピン流生成とその物性 . . . 90
4.7.2 光-スピン変換 . . . 90

5 一般物理理論 93
5.1 宇宙理論研究室 (須藤・吉田) . . . 93
5.1.1 観測的宇宙論 . . . 93
5.1.2 系外惑星 . . . 96
5.1.3 星・ブラックホール形成 . . . 96
5.1.4 高エネルギー天文現象 . . . 98
5.2 村尾研究室 . . . 105
5.2.1 高階量子演算 . . . 105
5.2.2 ハイブリッド量子系の量子情報処理 . . . 106
5.2.3 分散量子情報処理とエンタングルメント . . . 106
5.2.4 量子力学基礎論 . . . 106
5.2.5 量子多体系の量子情報的解析 . . . 107

5.3 上田研究室 . . . 109
5.3.1 冷却原子気体 . . . 109
5.3.2 量子論・統計力学と情報理論の融合 . . . 111
5.4 横山（順）研究室 . . . 115
5.4.1 初期宇宙論 . . . 115
5.4.2 観測的宇宙論 . . . 116
5.4.3 重力理論 . . . 117
5.4.4 重力波 . . . 117

6 一般物理実験 122
6.1 高瀬研究室 . . . 122
6.1.1 TST-2 実験の概要 . . . 122
6.1.2 高周波プラズマ立ち上げ実験 . . . 122
6.1.3 オーミックプラズマ実験 . . . 124
6.1.4 計測器開発 . . . 124
6.1.5 共同研究 . . . 124
6.2 佐野研究室 . . . 128
6.2.1 非平衡系の動力学・統計力学 . . . 128
6.2.2 アクティブマターの動力学 . . . 128
6.2.3 非平衡系としての生命現象 . . . 129
6.3 山本研究室 . . . 132
6.3.1 星形成の観測研究 . . . 133
6.3.2 テラヘルツ帯観測技術の開拓 . . . 135
6.4 酒井広文 研究室 . . . 137
6.4.1 レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展 . . . 138
6.4.2 単一アト秒パルスの発生とその偏光制御に向けて . . . 140
6.4.3 硫化カルボニル分子の多チャンネル解離性イオン化の配向依存性に対するレーザー波長の効果 . . . 140
6.4.4 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原子・分子の角度分解光電子分光 . . . 141
6.4.5 その他 . . . 141
6.5 五神-湯本-井手口研究室 . . . 143
6.5.1 物質系の巨視的量子現象の探索 . . . 144
6.5.2 非自明な光学現象の探索とその応用 . . . 145
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 . . . 147
6.5.4 コヒーレント光科学研究基盤の整備 . . . 148
6.5.5 フォトンサイエンス研究機構 . . . 148
6.6 安東研究室 . . . 152
6.6.1 大型重力波望遠鏡 KAGRA . . . 152
6.6.2 宇宙空間レーザー干渉計 . . . 153
6.6.3 ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA . . . 154
6.6.4 相対論・量子光学精密実験 . . . 155
6.7 馬場・中澤研究室 . . . 158
6.7.1 はじめに . . . 158
6.7.2 「ひとみ」衛星とそのリカバリー . . . 158
6.7.3 超新星残骸での粒子加速と爆発機構 . . . 159
6.7.4 活動銀河核の研究 . . . 159
6.7.5 雷雲ガンマ線の研究 . . . 160
6.7.6 将来計画 . . . 161
6.8 日下 研究室 . . . 164
6.8.1 POLARBEAR 実験と Simons Array 実験 . . . 164

6.8.2 Simons Observatory 実験 . . . 164
6.8.3 次世代 CMB 実験用 装置開発 . . . 165

7 生物物理 166
7.1 能瀬研究室 . . . 166
7.1.1 神経回路の活動ダイナミクス . . . 166
7.1.2 運動神経回路を構成する神経細胞の同定 . . . 167
7.2 樋口研究室 . . . 170
7.2.1 はじめに . . . 170
7.2.2 二足歩行運動を行う分子モーターの統一モデル . . . 170
7.2.3 広い負荷領域におけるキネシン 1 分子のステップ運動 . . . 170
7.2.4 細胞質ダイニンのリンカーの運動 . . . 171
7.2.5 ミオシン分子運動を超解像法を用いて検出する試み . . . 171
7.2.6 心筋細胞の昇温誘起の高速サルコメア振動の観察と運動のシュミレーション . . . 171
7.2.7 がん細胞の非侵襲 in vivo イメージングおよび免疫不全トランスジェニックマウスの作出 172
7.3 岡田研究室 . . . 174
7.3.1 超解像蛍光顕微鏡の開発と応用 . . . 174
7.3.2 細胞内一分子計測による反応速度解析 . . . 174
7.3.3 核内微細構造の超解像・一分子イメージング . . . 175
7.4 古澤研究室 . . . 176
7.4.1 マクロレベルの細胞状態論の構築 . . . 177
7.4.2 自動培養システムを用いた進化実験 . . . 177
7.4.3 微生物の進化的拘束の実験検証 . . . 177
7.4.4 アメーバ細胞のマクロピノサイトーシス動態の解析 . . . 178
7.4.5 力学系モデルを用いた代謝ダイナミクスの安定性の解析 . . . 178

8 技術部門 181
8.1 実験装置試作室 . . . 181
8.1.1 利用状況 . . . 181
8.2 技術室 . . . 181
8.2.1 安全衛生 . . . 181
8.2.2 IT 関連業務 . . . 181
8.2.3 学生実験 . . . 181
8.2.4 研究支援 . . . 182
8.2.5 各種委員会 . . . 182

II Summary of group activities in 2017 183
1 Theoretical Nuclear Physics (Fukushima) Group . . . 184
2 High Energy Physics Theory Group . . . 184
3 Sakurai Group . . . 185
4 Wimmer Group . . . 186
5 Komamiya group . . . 188
6 Aihara-Yokoyama Group . . . 189
7 Asai group . . . 190
8 Miyashita Group . . . 190
9 Ogata Group . . . 191
10 Tsuneyuki Group . . . 192
11 Todo Group . . . 193
12 Katsura Group . . . 194
13 Fujimori Group . . . 195

14 Hasegawa Group . . . 195
15 Fukuyama Group . . . 196
16 Okamoto Group . . . 197
17 Shimano Group . . . 198
18 Takagi-Kitagawa Group . . . 199
19 Hayashi Group . . . 200
20 Theoretical Astrophysics Group . . . 201
21 Murao Group . . . 203
22 Ueda Group . . . 204
23 Yokoyama(J) Group . . . 205
24 Takase Group . . . 206
25 Sano Group . . . 207
26 Yamamoto Group . . . 208
27 Sakai (Hirofumi) Group . . . 209
28 Gonokami, Yumoto and Ideguchi Group . . . 210
29 Ando Group . . . 211
30 Bamba-Nakazawa Group . . . 212
31 Kusaka Group . . . 212
32 Nose Group . . . 213
33 Higuchi Group . . . 214
34 Okada Group . . . 215
35 Furusawa Group . . . 216

III 2017 年度 物理学教室全般に関する報告 219

1 学部講義概要 220
1.1 2 年生 Aセメスター . . . 220
1.1.1 電磁気学 I : 駒宮 幸男 . . . 220
1.1.2 解析力学 : 常行 真司 . . . 220
1.1.3 量子力学 I : 福嶋 健二 . . . 221
1.1.4 物理実験学 : 酒井 広文, 藤森 淳 . . . 221
1.1.5 物理数学 I : 松尾 泰 . . . 221
1.1.6 物理数学 II : 村尾 美緒 . . . 222
1.2 3 年生 S セメスター . . . 222
1.2.1 電磁気学 II : 岡本 徹 . . . 222
1.2.2 量子力学 II : 上田 正仁 . . . 222
1.2.3 現代実験物理学 I : 福山 寛, 樋口 秀男 . . . 222
1.2.4 流体力学 : 吉田 直紀 . . . 223
1.2.5 統計力学 I : 桂 法称 . . . 223
1.2.6 計算機実験 I : 藤堂 眞治 . . . 223
1.3 3 年生 Aセメスター . . . 224
1.3.1 光学 : 井手口 拓郎, 湯本 潤司 . . . 224
1.3.2 物理数学 III : 立川 裕二 . . . 224
1.3.3 量子力学 III : 諸井 健夫 . . . 224
1.3.4 生物物理学 : 岡田 康志, 樋口 秀男 . . . 224
1.3.5 電磁気学 III : 安東 正樹 . . . 225
1.3.6 固体物理学 I : 小形 正男 . . . 225
1.3.7 現代実験物理学 II : 浅井 祥仁, 横山 将志 . . . 225
1.3.8 統計力学 II : 宮下 精二 . . . 225
1.3.9 計算機実験 II : 藤堂 眞治 . . . 226

1.4 4 年生 S セメスター . . . 226
1.4.1 場の量子論 I : 濱口 幸一 . . . 226
1.4.2 サブアトミック物理学 : 相原 博昭 . . . 226
1.4.3 一般相対論 : 横山 順一 . . . 227
1.4.4 宇宙物理学 : 馬場 彩 . . . 227
1.4.5 固体物理学 II : 林 将光 . . . 228
1.4.6 量子光学 : 酒井 広文 . . . 228
1.4.7 プラズマ物理学 : 江尻 晶 . . . 228
1.4.8 統計力学特論 : 常次 宏一 . . . 229
1.4.9 計算科学概論 : 大久保 毅 ほか 6 名 . . . 229
1.4.10 物性物理学特論 : 長谷川 修司, 小森 文夫 . . . 229
1.4.11 生物物理学特論 I : 佐野 雅己, 岡田 真人 . . . 229
1.4.12 生物物理学特論 II : 能瀬 聡直, 酒井 邦嘉, 陶山 明 . . . 230
1.5 4 年生 A セメスター . . . 230
1.5.1 化学物理学 : 山本 智 . . . 230
1.5.2 素粒子物理学 : 横山 将志, 大谷 航 . . . 230
1.5.3 場の量子論 II : 伊部 昌宏 . . . 230
1.5.4 原子核物理学 : Kathrin Wimmer . . . 231
1.5.5 固体物理学 III : 北川 健太郎, 高木 英典 . . . 231
1.5.6 重力波物理学 : Kipp Cannon, Raffaele Flaminio . . . 231
1.5.7 電子回路論 : 中澤 知洋 . . . 231
1.5.8 現代物理学入門 : 岡田 康志, 井手口 拓郎 . . . 231
1.5.9 普遍性生物学 : 金子 邦彦, 古澤 力 . . . 232
1.5.10 系外惑星 : 須藤 靖, 生駒 大洋 . . . 232

2 各賞受賞者紹介 233
2.1 石田明 助教 (浅井研) . . . 233
2.2 増田賢人 氏（須藤研）現 プリンストン大学 カールセーガンフェロー . . . 233
2.3 一ノ倉聖、高山あかり、長谷川修司 氏（長谷川研） . . . 233
2.4 大屋瑶子 氏（山本研） . . . 233
2.5 平成 29 年度 理学系研究科 研究奨励賞・理学部 学修奨励賞 . . . 234

3 人事異動 235

4 役務分担 236

5 教室談話会 237

6 物理学教室コロキウム 238

7 金曜ランチトーク 239

I

研究室別 2017年度 研究活動報告

1 原子核・素粒子理論

1.1 原子核理論 (福嶋) 研究室

原子核理論研究室では、福嶋健二教授、山本新助教、博士研究員と大学院生らによって最先端のフロンティアを開拓する世界的な研究が活発に行われた。ここではそれらの活動と成果の概要を述べる。

ハドロン (バリオン、メソンの総称) を形成するクォークとグルーオンは、量子色力学 (QCD) により定式化された相互作用に従う。QCD は一見単純なラグランジアンで記述されるが、その非摂動性、非線型性のために、量子場の理論として他に類を見ないユニークな性質を持つ。我々の研究室では高温・高密度クォーク・グルーオン物質の理論、高電磁場中のクォーク物質の物性とトポロジー、中性子星研究、実時間量子シミュレーションなど、原子核ハドロン物理よりも更に大きな枠組みから、QCD 量子多体問題という難問に挑戦している。

有限系の表面効果を取り入れた磁気触媒効果の計算

有限半径のシリンダー系のフェルミオンを考え、磁場中でカイラル凝縮が大きくなる「磁気触媒効果」が境界条件によりどのような影響を受けるのか調べた。明示的な計算により、表面付近に大きな角運動量成分を持った波動関数が堆積することが分かり、それにより磁気触媒効果が増大することを発見した [1]。

カラーグラス凝縮理論での Wilson ループ計算

カラーグラス凝縮理論を用いて、高エネルギー QCD 反応計算に必要な Wilson ループ期待値の一般的な計算公式を、群論的なテクニックを駆使して導いた [2]。

カイラル磁気効果の微視的理論計算

外部磁場中における磁場と並行な方向の電気伝導度の計算を微視的に行った。この計算には単にランダウ量子数の足し上げだけでなく、ピンチ特異点を運動方程式によって足し上げるなど、場の量子論の高度なテクニックが要求される。得られた結果はカイラル磁気効果の実験と定性的によく合っていることが確認できた [3]。

マヨラナ正定値性に基づいた符号問題の研究

モンテカルロ法は量子系において有用な方法であるが、符号問題という潜在的な問題が存在する。我々は、マヨラナ正定値性という考え方に基づいて、フェルミオンの符号問題を分類した [5]。また、マヨラナ正定値性の応用の一例として、物性系におけるマヨラナ有効模型に符号問題が存在しない事を示し、数値計算による解析を行った [6]。

Chiral kinetic theory

Chiral kinetic theory (CKT) is an effective theory for massless fermions with quantum corrections. It has been widely used to describe the chiral transport phenomena related to chiral anomaly, e.g. chiral magnetic effects. Last year, we firstly reviewed our previous derivations near the thermal equilibrium and demonstrate the ambiguities near the thermal equilibrium [8]. Secondly, we have discussed the second order non-linear electromagnetic response in CKT through the relaxation time approaches [9].

Relativistic Magneto-hydrodynamics

Relativistic magneto-hydrodynamics are the macroscopic effective theory for relativistic heavy ion collisions. We have investigated the possible modifications of elliptic flow coefficientv_2 of π^- in the presence of given background electromagnetic fields [10]. We found that the elliptic-flow coefficient v_2 of π^- is shown to increase in the presence of an external magnetic field and the increment in v_2 is found to depend on the evolution and the initial magnitude of the magnetic field.

On the other hand, we have also computed the circulation integrations of thermal vorticity with and without charged currents in dissipative fluids [16]. We find that the relativistic Kelvin circulation theorem will be modified by the dissipative effects, therefore, the circulation integrations of thermal vorticity may not be conserved during the fluid evolution.

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 [11, 31, 39]。初めに、時間発展の不動点 (定常解) を調べた。平衡解の他に、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。

複素ランジュバン法の安定性解析

符号問題の解決策の一つとして期待されている複素ランジュバン法には、計算の不安定性と誤収束の問題がある。本研究では計算の不安定性について、解析的な解を書き下せる簡単な模型を用いて数値的・解析的な計算を行った。その結果、複素ランジュバン法の安定性の問題は、行列の固有値分布の問題に帰着することが示された。これらの結果と前年までのランジュバン法の誤収束の問題について、ECT* での会議で発表した [21]。

CP(N-1) 模型のモンテカルロ計算

2 次元 CP(N-1) 模型は閉じ込めポテンシャルや自発的質量生成などの性質から、QCD の簡単な模型として古くからよく用いられている。本研究では、この模型が格子上でも整数値に離散化されたトポロジカル電荷を持つことに着目し、電荷密度の結合定数依存性を解析した。その結果、トポロジカル電荷密度のフーリエスペクトル、特にその $p = 0$ での微係数が、非自明な結合定数依存をすることが見出された

Schwinger's Formula and the Axial Ward Identity for Chirality Production

The axial Ward identity, which is exact at the operator level, is studied under it's vacuum expectation value in homogeneous non-trivial electromagnetic fields. Through a careful consideration of the vacuum states, i.e. usage of the same in state, an exact expression is found for the psuedoscalar and hence the axial Ward identity. A direct connection between Schwinger mechanism and the production of chirality is identified. Similar to the vacuum persistence probability, the time rate of change of the chirality is also found to be exponentially suppressed by the square of the fermion mass.

ブースト不変な条件下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応用した。Berry 曲率のために非自明に成立する Lorentz 不変性に注意を払い、ブースト不変な拘束下でのカイラル運動学的理論を定式化し、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 [12]。

α-$ZrCl_3$ における磁性 SU(4) スキルミオン

蜂の巣格子上の磁性物質 α-$ZrCl_3$ は、スピン軌道相互作用が強い極限において系の対称性が創発的に拡大され、SU(4) 量子スピン液体相を示すことが提案されている。本研究ではこの物質の模型に現実的な摂動として次隣接ホッピングを導入し、SU(4) スピンが non-Abelian なフラックスと結合した有効模型を導出するとともに、SU(4) スキルミオンが生じることを見出した。

中性子過剰核の核構造と殻模型有効相互作用

現象論的相互作用に基づいた殻模型計算により質量数 40 領域における中性子過剰核からのベータ崩壊の系統的記述を行った。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、偶偶核で低エネルギー領域における Gamow-Teller 遷移強度が増大するメカニズムをはじめて微視的に議論した [33, 35](現在投稿中)。

並行して、核力に依拠した殻模型有効相互作用の導出に関する研究も遂行している [17, 23]。こうした方向性は一定の成功を収めつつあるが、依然として、核力自体や多体手法に残された不定性に由来する計算結果の信頼度が自明ではない。そこで新たな試みとして、殻模型のインプットとなる有効相互作用のパラメータをベイズ的に推定することで、まずは多体手法の統計誤差を適切に評価するといった方法論にも着手している [34]。

高密度核・クォーク物質状態方程式に対する機械学習の適用

中性子星の構造を決める高密度核・クォーク物質の状態方程式の理論計算には様々な困難が存在する。一方で、中性子星の観測は、今後利用できる情報の

量と精度が向上すると考えられており、これらを利用して状態方程式を拘束、推定することは特に有用である。本研究では、形式的に 1 対 1 の対応がつく質量-半径の観測量と状態方程式との間の関係に注目した。観測量が誤差を持つ場合でも、この関係を最適化された人工ニューラルネットワークとして求められるような、状態方程式を推定するための方法論を確立した [36]。

渦糸の存在下でのカイラル有効模型の研究

高密度核・クオーク物質には種々の渦糸が現れる。我々は渦糸の存在下でのカイラル有効模型のゲージ対称性を検討し、カイラル有効模型の作用に新たな項が要求されることと、この新たな項が渦糸を流れる量子異常誘起のカレントを与えることを示した [14]。

chiral Einstein de Haas Effect

The classical Einstein de Haas Effect is the phenomenon that the change in magnetic moment of a free body will cause it to rotate. This is the result of the conservation of angular momentum since the magnetization is related to the constituent particles' angular momentum via Lande g-factor. Upon magnetization, this additional angular momentum needs to be counteracted so that a macroscopic rotation of the whole system arise. The inverse procedure, i.e. the magnetization induced by rotation, also exists, and is defined as Barnett effect. These phenomena have been experimentally observed in ferromagnetic materials for a long time. And they are significant in the sense of connecting classical and quantum effects. We're now researching on the analogy of Einstein de Haas effect in a chiral system where spin polarization can be induced by chiral anomaly. Then, will this net spin further induce a rotation of the whole system following the similar derivation of classical Einstein de Haas effect? If so, it means another macroscopic phenomenon which manifests the microscopic quantum anomaly, and is exactly what we're looking for.

＜報文＞

(原著論文)

[1] H. L. Chen, K. Fukushima, X. G. Huang and K. Mameda, Phys. Rev. D **96**, 054032 (2017).

[2] K. Fukushima and Y. Hidaka, JHEP **1711**, 114 (2017).

[3] K. Fukushima and Y. Hidaka, arXiv:1711.01472 [hep-ph] (Phys. Rev. Lett. in press).

[4] K. Fukushima and V. Skokov, Prog. Part. Nucl. Phys. **96**, 154 (2017).

[5] T. Hayata, A. Yamamoto, "Classification of sign-problem-free relativistic fermions on the basis of the Majorana positivity", PTEP **2017**, 043B08 (2017).

[6] T. Hayata, A. Yamamoto, "Quantum Monte Carlo simulation of a two-dimensional Majorana lattice model", Phys. Rev. B, **96**, 035129 (2017).

[7] A. Yamamoto, "1D anyons in relativistic field theory", PTEP, **2018**, 043B03 (2018).

[8] J. h. Gao, S. Pu and Q. Wang, Phys. Rev. D **96**, 016002 (2017).

[9] Y. Hidaka, S. Pu and D. L. Yang, Phys. Rev. D **97**, 016004 (2018).

[10] V. Roy, S. Pu, L. Rezzolla and D. H. Rischke, Phys. Rev. C **96**, 054909 (2017).

[11] K. Fukushima, K. Murase and S. Pu, Annals Phys. **386**, 76 (2017).

[12] S. Ebihara, K. Fukushima, S. Pu, "Boost invariant formulation of the chiral kinetic theory", Phys. Rev. D **96**, 016016 (2017).

[13] S. Adachi, T. Kawabata, K. Minomo, T. Kadoya, N. Yokota, (snip), and S. Yoshida, Phys. Rev. C **97**, 014601 (2018), "Systematic analysis of inelastic α scattering off self-conjugate $A = 4n$ nuclei"

[14] K. Fukushima and S. Imaki, "Anomaly inflow on QCD axial domain-walls and vortices", [arXiv:1802.08096 [hep-ph]].

(会議抄録)

[15] A. Yamamoto, "Lattice simulation with the Majorana positivity", EPJ Web Conf. **175**, 11003 (2018).

[16] Y.-g. Yang and S. Pu, Acta Phys. Polon. Supp. **10** 771 (2017).

[17] S. Yoshida, M. Kohno, T. Abe, T. Otsuka, N. Tsunoda, N. Shimizu, to appear in JPS. Conf. Proc., "Shell-Model Hamiltonians from Chiral Forces".

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[18] A. Yamamoto : "Lattice simulation with the Majorana positivity", The XXXV International Symposium on Lattice Field Theory, Granada Conference and Exhibition Centre, Granada, Spain, June 18-24, 2017.

[19] S. Pu : "Chiral Kinetic Theory with Bjorken Expansion", QCD Chirality Workshop 2017, UCLA, USA, Mar. 27-30, 2017.

[20] S. Pu : "Boost invariant formulation of the chiral kinetic theory", Phases of Quantum Chromodynamics (QCD) and Beam Energy Scan Program with Heavy Ion Collisions, Shanghai, China, Aug. 15-18, 2017.

[21] Y. Abe : “Analytical studies of the complex Langevin equation with Gaussian Truncation”, Simulating QCD on Lefschetz thimbles, ECT*, Trento, Italy, June 28-30, 2017.

[22] S. Ebihara : “Enhanced chiral anomaly in Floquet QED”, Topological Matter in Artificial Gauge Fields, Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Germany, Feb. 26 - Mar. 2, 2018.

[23] S. Yoshida, M. Kohno, T. Abe, T. Otsuka, N. Tsunoda, N. Shimizu : “Shell-model Hamiltonians from chiral forces”, Ito International Research Center (IIRC) symposium, “Perspectives of the physics of nuclear structure” (PPNS), The University of Tokyo, November 1 - 4, 2017.

招待講演

[24] K. Fukushima : “Particle Production in CGC”, Saturation : Recent developments, new ideas and measurements, Brookhaven National Laboratory, New York, USA, April 27, 2017.

[25] K. Fukushima : “Quantum Percolation from Nuclear to Quark Matter”, Phases of QCD and BES Program with HICs, Fudan University, Shanghai, China, August 16, 2017.

[26] K. Fukushima : “Electric fluctuations and conductivity at finite density under a magnetic field”, Critical Fluctuations Near the QCD Phase Boundary in Relativistic Nuclear Collisions, Central China Normal University, Wuhan, China, Oct. 11, 2017.

[27] K. Fukushima : “QCD Matter in Neutron Star Environments”, Workshop of Recent Developments in QCD and QFT, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, Nov. 9, 2017.

[28] A. Yamamoto : “Lattice simulation with the Majorana positivity”, Toward real-time simulations of quantum field theories and solutions to the sign problem, Keio University, Kanagawa, Japan, Sep. 20, 2017.

[29] S. Pu : “Boost invariant formulation of the chiral kinetic theory”, Workshop of Recent Developments in QCD and Quantum Field Theories, Taiwan, Taipei, Nov. 9-12, 2017.

[30] S. Pu : “Effects of strong magnetic fields in heavy ion collisions”, 4th Workshop on Chirality, Vorticity and Magnetic Field in Heavy Ion Collisions, Florence, Italy, Mar. 19-22, 2017.

(国内会議)

一般講演

[31] 村瀬功一、Shi Pu、福嶋健二 : 運動論的方程式における非熱的固定点とフロー解析日本物理学会 2017 年秋季大会, 宇都宮大学, 2017 年 9 月 14 日

[32] 海老原周、福嶋健二 : “周期外場駆動 Weyl 半金属におけるアノマリー現象の解析”, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2017 年 9 月 24 日

[33] 吉田聡太、宇都野穣、 清水則孝、 大塚孝治 : “質量数 40 領域の中性子過剰核におけるベータ崩壊の系統的記述”, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 宇都宮大学, 2017 年 9 月 12-15 日.

[34] 吉田聡太、清水則孝、富樫智章、大塚孝治 : “ベイズ推定に基づく殻模型有効相互作用の解析”, 日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学, 2017 年 3 月 22-25 日.

[35] 吉田 聡太 : “中性子過剰核におけるベータ崩壊と陽子-中性子相関”, RIBF 理研若手放談会:エキゾチック核物理の広がり, 理研神戸, 2017 年 7 月 31 日-8 月 2 日.

[36] 藤本悠輝、福嶋健二、村瀬功一 :「中性子星の状態方程式に対する機械学習の方法論的研究」、日本物理学会第 73 回年次大会、東京理科大学、2018 年 3 月 17-20 日.

(セミナー)

[37] 山本新 : “Computation of the Berry curvature in QCD and in condensed matter physics”, (理化学研究所、2018 年 1 月 30 日)

[38] 山本新 : “Quantum Monte Carlo simulation of Majorana fermions”, (東京大学工学系研究科、2018 年 2 月 1 日)

[39] 村瀬功一 : “Fixed points and flow analysis of the boson Boltzmann equation”, (理化学研究所　量子ハドロン物理学研究室、2017 年 5 月 3 日)

[40] 村瀬功一 : “Integrated dynamical models for small systems in high-energy nuclear collisions”, (理化学研究所　放射線研究室、2017 年 9 月 25 日)

[41] Sota Yoshida : “Shell-model interactions with chiral NN and NNN forces”, (TU Darmstadt, Darmstadt, Germany, Aug. 11, 2017.)

1.2 素粒子論研究室

1.2.1 現象論

超対称模型における現象論

伊藤、諸井、永田は、陣内（東工大）、音野（九州大）とともに、$\mathcal{O}(1)$ mm 以下の短い崩壊長を持つグルイーノの LHC における探索法を研究した [1]。対生成されたグルイーノの崩壊点を再構成し、それらの距離が有意に離れていることを事象選択の条件として新たに加えることで、およそ 100 μm 以上の崩壊長をもつグルイーノの探索効率を飛躍的に上昇させることが可能であることを示した。

永田は、福田、白井（ともに IPMU）、音野（九州大）とともに、消失トラック事象の探索を通じてヒッグシーノを検出する可能性について議論した [2]。ピ

クセル検出器において荷電トラックを再構成するために要求するヒット数を減らすことで、広範囲の質量領域に渡ってヒッグシーノを探索しうることが明らかになった。

永田は、J. L. Evans (KIAS), T. Gherghetta, M. Peloso（ともにミネソタ大）とともに、超対称リラクシオン模型における低スケール D-term インフレーションの可能性に関して研究を行った [3]。２つのリラクシオン場のうちの片方を低スケール D-term インフレーションのインフラトン場とみなすことで、現在の宇宙観測と無矛盾なリラクシオン模型が構築可能であることを明らかにした。

川村は、大村 (KMI) とともに、ウィーノ質量がグルイーノより相対的に重い場合について、暗黒物質の性質を研究した [4]。このような場合には、暗黒物質の直接探査からの制限を満たしつつ、グルイーノが将来の加速器実験で見つかりうる領域がある事を示した。

川村は、大村 (KMI) とともに、ミラージュ伝達の特定の場合では、ヒッグスセクターだけが他の超対称性粒子よりも軽くなる、特徴的なスペクトラムになる事を見出し、その現象論を研究した [5]。

浜口、柳は、遠藤（KEK)、岩本（Technion）とともに、最小超対称模型の枠組みでミューオンの異常磁気モーメントの理論値と実験値のズレと、暗黒物質残存量を同時に説明できるようなシナリオを提案した。そしてパラメーター領域の大部分が、将来の LHC の高ルミノシティ実験で探索可能であることを明らかにした [6]。

大統一理論

千草、諸井は、余分な粒子が存在する場合の SU(5) 模型に関して、ボトムクォーク、タウレプトンの湯川結合定数の統一が実現されるかを議論した [7]。その結果、新粒子がゲージ結合定数の大きさを変える効果により統一は一般に悪くなるものの、模型によっては、新粒子の湯川結合が統一を良くすることを示した。

永田は、J. Ellis (CERN, King's Coll. London), M. A. G. Garcia (Rice 大), D. V. Nanopoulos (Texas A&M, Athens Academy), K. A. Olive (ミネソタ大) とともに、no-scale flipped SU(5) 大統一理論における Starobinsky 型のインフレーションとニュートリノ物理との関連について研究を行った [8]。特に、インフラトン場がニュートリノ場と混合する場合において、再加熱温度が十分高い場合にバリオン非対称性の観測値を再現しうることが明らかになった。

真空の不安定性

LHC で測定されたヒッグス粒子の質量は、電弱真空が準安定真空であることを予言している。江間、中山は向田（DESY）とともに、インフレーション終了後の再加熱期におけるヒッグス場の共鳴的増幅を解析し、電弱真空の崩壊が引き起こされる可能性があることを指摘した [9]。

諸井は、不安定な真空の崩壊率について、ゲージ対称性が明らかとなる定式化を完成させた [10, 11]。また、千草、諸井は、庄司（KEK）と共に、素粒子標準模型における電弱真空の不安定性を研究した [12]。特に、近年開発された、ゲージ不変性が明らかな定式化を用いて計算を行い、従来の計算では正確に扱われていなかった、ゲージ対称性およびスケール不変性に付随するゼロモードの取り扱い方を確立した。

暗黒物質

宇宙背景放射の観測から求められたハッブル定数と、近傍宇宙の観測から求められたハッブル定数の値の間に食い違いがあることが指摘されている。浜口、中山、Tang はこのずれを説明する模型として、崩壊するグラビティーノ暗黒物質模型を提案した [13]。また、永田、Tang は、P. Ko (KIAS) とともに、隠れたゲージ対称性の帰結として生じる軽い粒子によってもこのずれを説明することが可能であることを示した [14]。

柳は Bae（IBS)、鎌田（IBS)、Liew（Munich, Tech. U.）とともに、Freeze-in で生成される軽い暗黒物質につく Lyman-alpha forest からの制限を研究した。具体的な模型として X 線観測で示唆されている 3.5 keV のアクシーノ粒子を選び、Lyman-alpha forest の観測と整合しないことを示した。また、その制限を逃れるために必要なサクシオン粒子からのエントロピー生成を計算した [15, 16]。

Tang は、Y. L. Wu (ICTP-AP, Inst. Theor. Phys., 中国科学院大学) とともに、重力を通じた初期宇宙における熱的な暗黒物質生成について計算を行った [17]。この寄与は、暗黒物質が他の粒子と熱平衡にない場合特に重要となる。また、宇宙の再加熱温度が 10^{12} GeV 以下の場合に、インフラトンの重力を通じた消滅過程が支配的になりうることを示した。

フレーバー物理

浅井、浜口、永田は、最小 $\mathrm{U}(1)_{L_\mu - L_\tau}$ ゲージ模型におけるニュートリノ質量行列の構造を解析し、ニュートリノ質量固有値と CP 位相とが混合角と質量二乗差の関数として求まることを示したうえで、それらの予言値が現在までの観測結果と無矛盾であることを明らかにした [18]。また、レプトジェネシスとの関連性についても議論し、この模型において正しいバリオン数の符号が得られることを示した。

Tang は、Y. L. Wu (ICTP-AP, Inst. Theor. Phys., 中国科学院大学) とともに、右巻きニュートリノを含む最も一般的な Z' 模型を研究し、それらを５つの独立なカテゴリーへと分類した [19]。その上で、B 中間子のレプトン崩壊モードにおいて最近観測された非一様性をいかにしてこのような模型で説明しうるかを明らかにした。

川村は、大村 (KMI)、大川 (名古屋大) とともに、LHCb 実験で観測された $b \to s\ell\ell$ アノマリーを、vectorlike フェルミオンと暗黒物質を導入した模型によって説明できる事を示した [20]。特に、アノマリーと同時に暗黒物質の残存量を熱的に説明できる事を示し、これらの間の相関を明らかにした。

ニュートリノ物理とインフレーション

中山は高橋 (東北大)、柳田 (IPMU) とともに、超重力理論において右巻きスカラーニュートリノをインフラトンと同定する模型を提案するとともに、この模型におけるニュートリノセクターの構造を解析し、ニュートリノ CP 位相の値を予言した [21]。

超対称模型におけるアクシオンの生成

アクシオン模型は標準模型における Strong CP 問題を自然に解決する模型として有力視されている。江間、中山は超対称アクシオン模型においてスアクシオン場の振動によるアクシオン粒子の生成を詳細に解析し、アクシオンの爆発的生成が起こることを指摘した [22]。

ビッグバン元素合成

諸井は長寿命粒子の宇宙初期における生成と崩壊がビッグバン元素合成に与える影響について研究した [23]。理論計算の結果を最新の軽元素量観測の結果と比較することにより、宇宙初期に存在し得る超寿命粒子の量の上限を得た。さらにその結果を不安定なグラビティーノを含む超対称模型に応用することで、そのような模型におけるインフレーション後宇宙歳加熱温度の上限を得た。

宇宙赤外背景放射

最近、CIBER 実験において宇宙赤外背景放射の超過が観測された。諸井、中山は郡 (KEK) ともに暗黒物質の崩壊により赤外線超過を説明する可能性を追求した。その結果、赤外背景放射の非等方性の観測がこうしたシナリオに強い制限を与えることを指摘した [24]。

グラビティーノ問題

中山は長谷川 (東大宇宙線研)、寺田 (KEK)、山田 (Stanford 大) とともに、最近提唱された Geometric inflation と呼ばれるクラスの超重力インフレーションにおけるグラビティーノ生成量を解析し、深刻な宇宙論的問題を引き起こすことを指摘した [25]。

1.2.2 弦理論、場の理論全般

量子 Toroidal 代数とゲージ／ストリング理論の双対性

Bourgine(KIAS) と福田、松尾、朱は 5 次元ゲージ理論のインスタントン分配関数を量子 Toroidal 代数の表現論の観点から調べた。まず、与えられえたゲージ理論に対し (p,q) brane-web による記述を粟田・Feigin・白石による intertwinner 演算子を用いて行い、Gaiotto 状態や CFT の頂点演算子を intertwinner 演算子の組み合わせで書き表した。また、Nekrasov の qq-character の構成法を intertwinner 演算子の性質を用いて導いた。A 型の quiver gauge 理論に対する qq-character はこの方法ですべて導くことができる。また、少し違う観点で qq-character を構成した木村・Pestun の構成法との比較を行った [26]。

Bourgine, 福田、松尾、朱は Toroidal 代数に対する境界状態 (反射状態) を定義し、Brane-web に組み込むと、D 型の quiver ゲージ理論に対しても Toroidal 代数から分配関数が導けることを示した。境界状態はストリング理論の配位空間に存在する O プレーンの役割を果たす [27, 51, 52]。

4 次元 N=2 超対称ゲージ理論は Seiberg と Witten により 2 次元可積分系と関連づくことが知られていた。最近 Maulik と Okounkov により対応する可解格子模型が無限次元の Fock 空間を各格子点上に置いたものであることが R 行列の解析などにより分かった。この R 行列は W 代数と呼ばれる無限次元リー代数とも深い関係がある。福田、原田、松尾、朱はこの模型の量子変形版を調べ、q-変形 W 代数などとの関係を調べた [28]。

超対称 Rényi エントロピーと欠損演算子

西岡は I. Yaakov (IPMU) との共同研究において、3, 4, 5 次元超対称ゲージ理論の超対称 Rényi エントロピーにおける欠損演算子の役割について調べた。超対称局所化による計算と欠損演算子を用いた計算を比較し、それらが一致することを明らかにした [29]。

共形場理論の欠損演算子とホログラフィー

西岡と福田は小林望 (IPMU) との共同研究で、共形場理論における欠損演算子の局所演算子による演算子積展開を調べた。特に shadow formalism と呼ばれる手法を用いて欠損演算子の共形群の既約表現への分解が具体的に積分表示で与えた。さらにこの積分表示に Radon 変換を施すことで、共形欠損演算子から反ドシッター時空上のスカラー粒子が構成できることを示した [30]。

境界のある共形場理論

佐藤は、Karch (Washington 大) とともに、境界や欠損のある共形場理論における二点関数の共形ブロックについて議論した [31, 32]。この結果、ホログラフィックに記述できる共形場理論では、測地的 Witten 図形にされることを明らかにした。

＜受賞＞

＜報文＞

(原著論文)

[1] H. Ito, O. Jinnouchi, T. Moroi, N. Nagata and H. Otono, Phys. Lett. B **771**, 568 (2017) [arXiv:1702.08613 [hep-ph]].

[2] H. Fukuda, N. Nagata, H. Otono and S. Shirai, Phys. Lett. B **781**, 306 (2018) [arXiv:1703.09675 [hep-ph]].

[3] J. L. Evans, T. Gherghetta, N. Nagata and M. Peloso, Phys. Rev. D **95**, no. 11, 115027 (2017) [arXiv:1704.03695 [hep-ph]].

[4] J. Kawamura and Y. Omura, JHEP **1708**, 072 (2017) [arXiv:1703.10379 [hep-ph]].

[5] J. Kawamura and Y. Omura, JHEP **1711**, 189 (2017) [arXiv:1710.03412 [hep-ph]].

[6] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto and K. Yanagi, JHEP **1706**, 031 (2017) [arXiv:1704.05287 [hep-ph]].

[7] S. Chigusa and T. Moroi, PTEP **2017** (2017) no.6, 063B05 [arXiv:1702.00790 [hep-ph]].

[8] J. Ellis, M. A. G. Garcia, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, JCAP **1707**, no. 07, 006 (2017) [arXiv:1704.07331 [hep-ph]].

[9] Y. Ema, K. Mukaida and K. Nakayama, JCAP **1712**, no. 12, 030 (2017) [arXiv:1706.08920 [hep-ph]].

[10] M. Endo, T. Moroi, M. M. Nojiri and Y. Shoji, Phys. Lett. B **771** (2017) 281.

[11] M. Endo, T. Moroi, M. M. Nojiri and Y. Shoji, JHEP **1711** (2017) 074.

[12] S. Chigusa, T. Moroi and Y. Shoji, Phys. Rev. Lett. **119** (2017) no.21, 211801 [arXiv:1707.09301 [hep-ph]].

[13] K. Hamaguchi, K. Nakayama and Y. Tang, Phys. Lett. B **772**, 415 (2017) [arXiv:1705.04521 [hep-ph]].

[14] P. Ko, N. Nagata and Y. Tang, Phys. Lett. B **773**, 513 (2017) [arXiv:1706.05605 [hep-ph]].

[15] K. J. Bae, A. Kamada, S. P. Liew and K. Yanagi, Phys. Rev. D **97**, no. 5, 055019 (2018) [arXiv:1707.02077 [hep-ph]].

[16] K. J. Bae, A. Kamada, S. P. Liew and K. Yanagi, JCAP **1801**, no. 01, 054 (2018) [arXiv:1707.06418 [hep-ph]].

[17] Y. Tang and Y. L. Wu, Phys. Lett. B **774**, 676 (2017) [arXiv:1708.05138 [hep-ph]].

[18] K. Asai, K. Hamaguchi and N. Nagata, Eur. Phys. J. **C77** (2017), no.11 763. [arXiv:1705.00419 [hep-ph]].

[19] Y. Tang and Y. L. Wu, Chin. Phys. C **42**, no. 3, 033104 (2018) [arXiv:1705.05643 [hep-ph]].

[20] J. Kawamura, S. Okawa and Y. Omura, Phys. Rev. D **96**, no. 7, 075041 (2017) [arXiv:1706.04344 [hep-ph]].

[21] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B **773**, 179 (2017) [arXiv:1705.04796 [hep-ph]].

[22] Y. Ema and K. Nakayama, Phys. Lett. B **776**, 174 (2018) [arXiv:1710.02461 [hep-ph]].

[23] M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi and Y. Takaesu, Phys. Rev. D **97** (2018) no.2, 023502.

[24] K. Kohri, T. Moroi and K. Nakayama, Phys. Lett. B **772**, 628 (2017) [arXiv:1706.04921 [astro-ph.CO]].

[25] F. Hasegawa, K. Nakayama, T. Terada and Y. Yamada, Phys. Lett. B **777**, 270 (2018) [arXiv:1709.01246 [hep-ph]].

[26] J. E. Bourgine, M. Fukuda, K. Harada, Y. Matsuo and R. D. Zhu, JHEP **1711**, 034 (2017) [arXiv:1703.10759 [hep-th]].

[27] J. E. Bourgine, M. Fukuda, Y. Matsuo and R. D. Zhu, JHEP **1712**, 015 (2017) [arXiv:1709.01954 [hep-th]].

[28] M. Fukuda, K. Harada, Y. Matsuo and R. D. Zhu, PTEP **2017**, no. 9, 093A01 (2017) [arXiv:1705.02941 [hep-th]].

[29] T. Nishioka and I. Yaakov, JHEP **1711**, 071 (2017) [arXiv:1612.02894 [hep-th]].

[30] M. Fukuda, N. Kobayashi and T. Nishioka, JHEP **1801**, 013 (2018) [arXiv:1710.11165 [hep-th]].

[31] A. Karch and Y. Sato, JHEP **1709** (2017) 121 [arXiv:1708.01328 [hep-th]].

[32] Y. Sato, Phys. Rev. D **97** (2018) no.2, 026005 [arXiv:1711.02138 [hep-th]].

(会議抄録)

(国内雑誌)

(学位論文)

[33] 修士論文: 吾郷太一, “格子上のカイラルゲージ理論.”

[34] 修士論文: 浅井健人, “ゲージ化したレプトンフレーバー対称性による標準模型の拡張とその現象論.”

[35] 修士論文: 原田浩一, “Ding-Iohara-Miki 代数を用いた可解模型の解析と 2 次元共形場理論への応用.”

[36] 博士論文: 江間陽平, “Higgs Dynamics in the Early Universe (初期宇宙におけるヒッグス場のダイナミクス).”

[37] 博士論文: 伊藤隼人, “Collider Phenomenology of Metastable Particles with Sub-Millimeter Displaced Vertices (1 ミリ以下の崩壊長をもつ準安定粒子に関する加速器現象論).”

(著書)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[38] K. Harada, “R-matrix of Ding-Iohara-Miki algebra at root of unity”, KEK Theory Workshop 2017, 2017 年 11 月 15 日.

[39] J. Kawamura, “Study of dark matter physics in non-universal gaugino mass scenario”, PASCOS 2017, IFT, Spain, 19-23 June, 2017.

[40] J. Kawamura, “Study of dark matter physics in non-universal gaugino mass scenario”, DSU 2017, IBS, Korea, 10-14 July, 2017.

[41] T. Moroi, “Stability of electroweak vacuum in the standard model and beyond,” NCTS Annual Theory Meeting 2017 (December 5 – 8, 2017), Hsinchu, Taiwan.

[42] T. Moroi, “PeV Neutrinos from Heavy Relic Decays in Early Universe,” PAHEN (September 25 – 26, 2017), Naples, Italy.

[43] N. Nagata, “Two-pixel-hit searches for wino and higgsino,” Dark Side of the Universe 2017, KAIST Munji Campus, Daejeon, Korea, Jul. 13, 2017.

[44] K. Yanagi, “Probing Minimal SUSY Scenarios in the light of Muon g-2 anomaly and DM”, The Dark Side of the Universe, IBS, Daejeon, Korea, 2017 年 7 月.

[45] K. Yanagi, “Colder Freeze-in Axions Decaying into Photons”, The 21st annual International Conference on Particle Physics and Cosmology (COSMO-17), Paris Diderot University, Paris, France, 2017 年 8 月.

[46] K. Yanagi, “keV Freeze-in Axinos & Lyman-alpha forest constraint”, The 7th KIAS workshop on particle physics and cosmology, KIAS, Seoul, Korea, 2017 年 11 月.

招待講演

[47] K. Asai, “Extension of the Standard Model by a gauged lepton flavor symmetry and leptogenesis”, 1st workshop on Phenomenolgy for Particle and Anti-Particle (PPAP 2018), Hiroshima, March 8, 2018.

[48] Koichi Hamaguchi, “Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model,” IBS Conference on Dark World 2017, IBS, Korea, Nov. 1, 2017.

[49] Koichi Hamaguchi, “Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model,” PACIFIC 2018, Hokkaido, Feb. 15, 2018.

[50] Koichi Hamaguchi, “Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model,” The 53rd Rencontres de Moriond, ELECTROWEAK INTERACTIONS AND UNIFIED THEORIES, La Thuile, Italy, Mar. 13, 2018.

[51] Yutaka Matsuo “Description of (p, q)-brane web from q-deformed toroidal symmetry,” 25th International Conference on Integrable Systems and Quantum symmetries, Prague, June 6-10, 2017.

[52] Yutaka Matsuo, “Quantum toroidal symmetry and SL(2,Z) covariant description of AGT and qq-character,” INTEGRABILITY IN LOW-DIMENSIONAL QUANTUM SYSTEMS, 26 June 2017 - 21 July 2017, Creswick, Australia.

[53] N. Nagata, “Dark Matter in Non-Supersymmetric SO(10) Grand Unified Models,” Matter over Anti-matter: The Sakharov Conditions After 50 Years, Lorentz Center, Snellius, Netherlands, May. 8–12, 2017.

[54] N. Nagata, “Probing metastable gluinos at the LHC,” Olivefest: Astroparticle Physics Looking Forward, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA, May. 17–19, 2017.

[55] N. Nagata, “Theoretical Overview,” Workshop on Long-lived-particle searches in collider experiments, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, Sep. 22, 2017.

[56] N. Nagata, “Vacuum stability in an SO(10) DM model,” Mini-Workshop on Higgs Physics and Gravitational waves, NCTS, Taiwan, Nov. 17–18, 2017.

[57] N. Nagata, “Neutrino Physics in the minimal gauged $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ model,” New Physics Forum, University of Tokyo, Dec. 1st, 2017.

[58] N. Nagata, “Neutrino Physics in the minimal gauged $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ model,” Testing CP-Violation for Baryogenesis, University of Massachusetts Amherst, USA, Mar. 29–31, 2018.

[59] K. Nakayama, “Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model” Focus Meeting: new perspectives on light particles, IBS (2017/11/28)

[60] T. Nishioka, “Entanglement and Supersymmetry,” in a workshop “Gauge theories, supergravity and superstrings,” Centro de Ciencias de Benasque Pedro Pascual, Spain, June 22, 2017.

[61] T. Nishioka, “Entanglement Entropy and RG Flows,” lectures delivered at University of Cape Town, South Africa, February 5-7, 2018.

[62] T. Nishioka, “OPE for Conformal Defects and Holography,” YITP Workshop “Holography, Quantum Entanglement and Higher Spin Gravity II,” Kyoto University, Japan, March 14-16, 2018.

[63] Yong Tang, On Thermal Gravitational Contribution to Dark Matter Production, BARAM, Jeju(South Korea), 2018 年 3 月.

[64] Yong Tang, On Thermal Gravitational Contribution to Dark Matter Production, QCD and SM Beyond, Wuhan University(China), 2017 年 12 月.

[65] Yong Tang, Interacting Dark Matter and Astrophysical Signatures, Light Dark World, University of Pittsburgh(USA), 2017 年 10 月.

(国内会議)

一般講演

[66] 浅井健人, “Predictions for the neutrino parameters in the minimal gauged $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ model”, 日本物理学会 2017 年度秋季大会, 宇都宮大学, 2017 年 9 月 15 日.

[67] 浅井健人, “Predictions for the neutrino parameters in the minimal gauged $U(1)_{L_\nu - L_\tau}$ model”, 基研研究会 PPP2017, 京都大学基礎物理学研究所, 2017 年 8 月 2 日.

[68] 千草颯, “Bottom-Tau unification in Supersymmetric Models”, 基研研究会 PPP2017, 京都大学基礎物理学研究所, 2017 年 8 月 3 日.

[69] 萩原大佑、“Supersymmetric flaxion model,” 日本物理学会 第 73 回年次大会、東京理科大学、2018 年 3 月 25 日.

[70] 原田浩一 “R-matrix of Ding-Iohara-Miki algebra at root of unity and super Virasoro algebra” 日本物理学会 2017 年秋季大会, 宇都宮大学, 2017 年 9 月 14 日

[71] J. Kawamura, “two Higgs doublet model from mirage mediation”, Japan Physics Society Autumn Meeting 2017, Utsunomiya University, 12-15 September, 2017.

[72] J. Kawamura “Study of dark matter physics in non-universal gaugino mass scenario”, Progress in Particle Physics 2017, Kyoto University, 31 July-4 August, 2017.

[73] 中山和則、“Flaxion” 日本物理学会 2017 年秋期大会、宇都宮大学 (2017/09/13)

[74] Yong Tang, On Thermal Gravitational Contribution to Dark Matter Production, KEK-PH 2018, KEK(Japan), 2018 年 2 月.

[75] Yong Tang, On Thermal Gravitational Contribution to Dark Matter Production, CosPA 2017, Kyoto University(Japan), 2017 年 12 月.

[76] 柳圭祐, “ミューオン g-2 のズレと暗黒物質残存量を説明するミニマルな超対称模型の探索”, 日本物理学会秋季大会, 宇都宮大学,

招待講演

[77] 濱口幸一「チュートリアル講演 二重ベータ崩壊 + レプトジェネシス」宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究 2017 年領域研究会 (岡山大学) 2017 年 5 月 21 日.

[78] 永田夏海、「電弱相互作用を行う暗黒物質と直接探索実験」宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究 2017 年領域研究会 (岡山大学) 2017 年 5 月 22 日.

[79] 永田夏海、「WIMP 暗黒物質探索の現状とこれから」第 45 回北陸信越地区素粒子論グループ合宿、石川県立白山青年の家、2017 年 6 月 24, 25 日.

[80] 中山和則、“物質と反物質の非対称性” Flavor Physics Workshop 2017、三浦マホロバ温泉 (2017/11/1)

[81] 中山和則、“Phase transition and gravitational waves” Gravitational Wave Physics and Astronomy : Genesis, Area Workshop 2017A, 東北大学 (2017/12/7)

[82] 中山和則、“宇宙初期の相転移で生成される重力波” KEK-Cosmo 2018 Workshop 宇宙重力波検出への期待、KEK (2018/1/23,24)

(セミナー)

2　原子核・素粒子実験

2.1　原子核実験グループ (櫻井・Wimmer)

原子核実験グループは、現在櫻井研、Wimmer 研の二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。

櫻井研究室では、原子核のまわりに電子以外の負電荷の粒子が回っている奇妙な原子（エキゾチック原子）や、天然に安定存在する原子核よりも中性子数または陽子数が極端に多い不安定核（エキゾチック原子核）の構造研究をしている。大阪大学の核物理研究センターではπ中間子やミューオンで作られるエキゾチック原子の分光研究を、理化学研究所の重イオン加速器研究施設 RI ビームファクトリー (RIBF) では、高強度な不安定核ビームを利用した核分光研究を進めている。

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実験的に求めることで、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) などで行っている。

2.1.1　理化学研究所 RIBF における不安定核の構造研究

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、2015 年 5 月、2017 年 5 月の 3 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する、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 を組み合わせた 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、第一回の SEASTAR 実験で行った ^{79}Cu の核分光の成果を発表した。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 でも陽子魔法数 28 を形成する殻ギャップが十分に大きいことを確認し、^{79}Ni は二重閉殻構造を持つ良い芯であることを示した。[30, 49, 66] また、第三回の SEASTAR 実験では、新しい中性子魔法数 34 に関連した一粒子準位構造の測定を核子ノックアウト反応によって測定し、^{55}Ca と ^{55}K の脱励起ガンマ線の測定に成功した。[65]

BRIKEN 国際共同研究

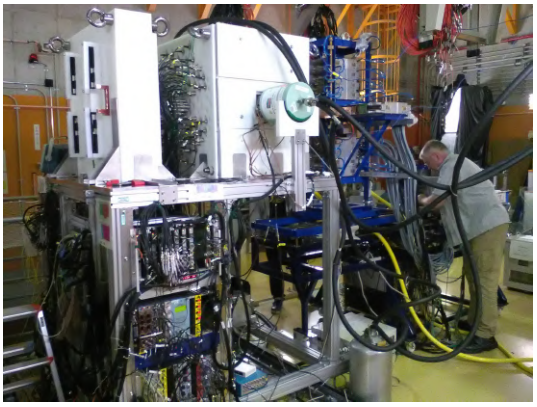


図 2.1.1: BRIKEN アレイのセットアップの様子。

BRIKEN (Beta-delayed neutrons in RIKEN) プロジェクトは、理化学研究所における β 遅発中性子放出確率（$P_{\rm n}$）の測定を目的とした国際共同研究である。本年度は、世界水準の検出効率を持つ中性子検出器アレイを用いて、$P_{\rm n}$ 測定実験を行った。不安定核の埋め込み位置測定および β 線測定には、シリコン半導体検出器アレイ AIDA（Advanced Implantation Detector Array）や位置有感型光電子増倍管を用いた YSO シンチレーターを使用した。また、β 遅発ガンマ線を検出するために、クローバー型ゲルマニウム半導体検出器を BRIKEN アレイに組み込んで使用した。これにより BRIKEN プロジェクトでは、ニッケルからヨウ素までの中性子過剰同位体における $P_{\rm n}$ の精密測定に成功した。

ノックアウト反応による ^{35}Mg のインビーム核分校

$Z = 10$–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、一粒子軌道準位について議論した。[23]

中性子過剰核におけるクラスター構造の研究

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。[48, 52, 53]

2.1.2 エキゾチック原子の分光研究

陽子ビームを用いたパイ中間子原子の分光実験

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。パイ中間子原子の深い束縛状態の分光実験はそのための実験的なアプローチの一つであり、理研や GSI で実験が行われてきた。我々は大阪大学 RCNP において陽子ビームを用いた新たなパイ中間子原子の分光実験を計画しており、従来の実験よりも分解能の向上を目指している。本年度は第一歩の実験として、^{124}Sn を標的として用いて実験を行った。およそ 170 時間分の測定を行い、ほぼ計画通りの統計量を得ることに成功した。今後は取得したデータの解析を進めて、過去実験との比較・RCNP での将来的な実験の方針について議論する予定である。

パラジウム同位体におけるミューオン捕獲の研究

ミューオン捕獲とは、ミューオンが (Z, A) の原子核に弱い相互作用で捕獲され、$(Z-1, A)$ の原子核の励起状態となる反応である。よく知られた原子核の崩壊過程である電子捕獲との類似反応であるが、ミューオンの持つ大きな質量のため崩壊後の励起エネルギーは数十 MeV にも達する。ミューオン捕獲によってどのような励起状態が生成されるか、またその励起状態がどのように安定核に崩壊するのかについての統一的な理解は得られておらず、詳細な実験データの蓄積が強く求められている。

我々グループでは、ミューオン捕獲後の励起状態から放出される中性子のエネルギー分布および個数を実験的に決定する研究を特にパラジウム同位体について行なっている。主に中性子のエネルギー分布測定を目的とした中性子検出器アレイ SEAMINE を用いた実験を大阪大学核物理研究センター MuSIC ビームラインにおいて実施し、放出個数を生成核のベータ崩壊から求める実験を英国 RAL 研究所理研ビームラインおよび J-PARC MUSE ビームラインにてそれぞれ行った。これらの相補的な実験を組み合わせることでミューオン捕獲後の励起状態の解明を目指す。

2.1.3 直接反応によるエキゾチック核の分光研究

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。中性子過剰な ^{44}S 核には低励起エネルギーに 3 つの 0^+ 準位が存在することが知られており、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、変形

共存現象を起こすメカニズムの解明につながることが期待されている。[67, 55]

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ミラー対称な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準位が知られていなかったが、我々の研究によって 5 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。今年度は、このアイソスピン対称性の破れのさらなる解明のため ^{66}Se および ^{62}Ge における核分光実験を RIBF 実験審査委員会に提案し認められた。

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、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。

2.1.4 実験装置開発

RIBF における核子移行反応研究に向けて

今年度、RIBF では低エネルギーの RI ビームを効率的に生成する新しいビームライン OEDO が建設された。我々は、理化学研究所と共同でこの新しいビームラインを使い核子移行反応実験を実現するため、シリコン半導体検出器を使った反跳粒子検出器 TINA の開発を行なった。今年度は、この設計と装置建設が完了し、九州大学のタンデム加速器を使った初めてのパフォーマンステストと、OEDO ビームラインでのコミッショニング実験を行なった。現在は、これらの実験で得られた結果を元に検出器の改良を進めている。

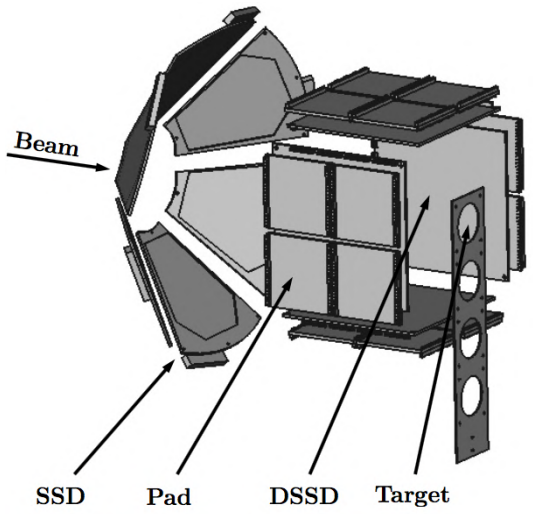


図 2.1.2: 反跳粒子検出器 TINA。標的周りをシリコン半導体検出器で覆って反応によって放出される荷電粒子を高分解能で測定する。

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、変形共存や対相関のような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。今年度 RIBF で建設が完了した OEDO ビームライン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、チタン薄膜にトリチウムを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九州大学のタンデム加速器の ^{12}C ビームを用いて行い、標的のビーム応答や特徴を理解することができた。現在は、より厚い標的の作成技術の開発を進めている。

次世代型ガンマ線検出器の開発

RIBF で行われる実験では、ガンマ線核分光という手法が広く使われ多くの成果をあげている。一方で、現在主に使用している DALI2 と呼ばれる NaI(Tl) シンチレーターを使ったアレイは、すでに開発・建設から 20 年が経ち、その性能の国際的な競争力は十分とは言えなくなってきた。我々は、RIBF での不安定核物理の展開を推し進めるために、新たな検出器開発に向けてその戦略を検討してきた。トラッキング型ゲルマニウム半導体検出器アレイは、高分解能のガンマ線分光を実現する現在知られている最も有効な手段であるが、一方で最新のシンチレーター検出器を使ったアレイはその高い検出効率から、特に稀なガンマ線の検出が必要とされる実験において有効となる。我々はこの両面の開発を進めている。今年度は新しいシンチレーターの選定と設計を進め、その性能評価を開始した。

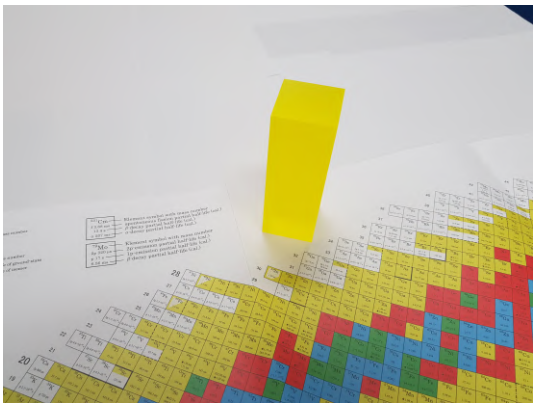


図 2.1.3: 次世代型のガンマ線検出用シンチレーターの候補となる GAGG 結晶。

＜報文＞

(レビュー論文)

[1] T. Nakamura, H. Sakurai and H. Watanabe, "Exotic nuclei explored at in-flight separators", Prog. Part. Nucl. Phys. **97**, 53 (2017).

[2] K. Wimmer, "Nucleon transfer reactions with radioactive beams", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **45**, 033002 (2018).

(原著論文)

[3] J. G Johansen *et al.*, "Study of bound states in 10Be by one neutron removal reactions of 11Be", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **44**, 044009 (2017).

[4] H. N. Liu *et al.*, "Intruder configurations in the ground state of ^{30}Ne", Phys. Lett. **B767**, 58 (2017).

[5] P. Doornenbal *et al.*, "Low-Z shore of the "island of inversion" and the reduced neutron magicity toward ^{28}O", Phys. Rev. C **95**, 041301(R) (2017).

[6] F. Wang *et al.*, "Spectroscopic factor and proton formation probability for the $d_{3/2}$ proton emitter ^{151m}Lu", Phys. Lett. **B770**, 83 (2017).

[7] B. Moon *et al.*, Nuclear structure and β-decay schemes for Te nuclides beyond $N = 82$", Phys. Rev. C **95**, 044322 (2017).

[8] S. Chen *et al.*, "Low-lying structure and shape evolution in neutron-rich Se isotopes", Phys. Rev. C **95**, 041302(R) (2017).

[9] T. Sumikama *et. al.*, "Observation of new neutron-rich Mn, Fe, Co, Ni, and Cu isotopes in the vicinity of ^{78}Ni", Phys. Rev. C **95**, 051601(R) (2017).

[10] V. Vaquero *et. al.*, "Gamma Decay of Unbound Neutron-Hole States in ^{133}Sn", Phys. Rev. Lett. **118**, 202502 (2017).

[11] W-J. Ong et al., "Low-lying level structure of ^{56}Cu and its implications for the *rp* process", Phys. Rev. C **95**, 055806 (2017).

[12] A. Kankainen *et al.*, "Measurement of key resonance states for the reaction rate, and the production of intermediate-mass elements in nova explosions", Phys. Lett. **B769**, 549 (2017).

[13] E. Sahin *et al.*, "Shell Evolution towards ^{78}Ni: Low-Lying States in ^{77}Cu", Phys. Rev. Lett. **118**, 242502 (2017).

[14] F. Flavigny *et al.*, "Shape Evolution in Neutron-Rich Krypton Isotopes Beyond $N = 60$: First Spectroscopy of ^{98,100}Kr", Phys. Rev. Lett. **118**, 242501 (2017).

[15] A. I. Morales *et al.*, "Simultaneous investigation of the $T = 1$ ($J^\pi = 0^+$) and $T = 0$ ($J^\pi = 9^+$) β decays in ^{70}Br", Phys. Rev. C **95**, 064327 (2017).

[16] H. L. Crawford *et al.*, "Unexpected distribution of $\nu 1f_{7/2}$ strength in ^{49}Ca", Phys. Rev. C **95**, 064317 (2017).

[17] M. Lettmann *et al.*, "Triaxiality of neutron-rich ^{84,86,88}Ge from low-energy nuclear spectra", Phys. Rev. C **96**, 011301(R) (2017).

[18] A. Chester et al., "Recoil distance method lifetime measurement of the 2_1^+ state in ^{94}Sr and implications for the structure of neutron-rich Sr isotopes", Phys. Rev. C **96**, 011302(R) (2017).

[19] B. Moon *et al.*, "β-decay scheme of ^{140}Te to ^{140}I: Suppression of Gamow-Teller transitions between the neutron $h_{9/2}$ and proton $h_{11/2}$ partner orbitals", Phys. Rev. C **96**, 014325 (2017).

[20] F. Browne *et al.*, "K selection in the decay of the $(\nu\frac{5}{2}[532] \otimes \frac{3}{2}[411])4^-$) isomeric state in ^{102}Zr", Phys. Rev. C **96**, 024309 (2017).

[21] Z. Patel *et al.*, "Isomer-delayed γ-ray spectroscopy of $A = 159$ - 164 midshell nuclei and the variation of K-forbidden $E1$ transition hindrance factors", Phys. Rev. C **96**, 034305 (2017).

[22] S. Kawase *et al.*, "Study of proton- and deuteron-induced spallation reactions on the long-lived fission product ^{93}Zr at 105 MeV/nucleon in inverse kinematics", Prog. Theo. Exp. Phys. **2017** 093D03 (2017).

[23] S. Momiyama *et. al.*, "In-beam γ-ray spectroscopy of ^{35}Mg via knockout reactions at intermediate energies", Phys. Rev. C **96**, 034328 (2017).

[24] J. Park *et al.*, "Properties of γ-decaying isomers and isomeric ratios in the ^{100}Sn region", Phys. Rev. C **96**, 044311 (2017).

[25] C.M. Shand *et. al.*, "Shell evolution beyond $Z = 28$ and $N = 50$: Spectroscopy of ^{81,82,83,84}Zn", Phys. Lett. **B773**, 492 (2017).

[26] F. Didierjean *et al.*, "Neutron effective single-particle energies above ^{78}Ni: A hint from lifetime measurements in the $N = 51$ isotones ^{85}Se and ^{87}Kr", Phys. Rev. C **96**, 044320 (2017).

[27] B. Elman *et al.*, "Quadrupole collectivity beyond $N = 50$ in neutron-rich Se and Kr isotopes", Phys. Rev. C **96**, 044332 (2017).

[28] A. L. Richard et al., "Strongly coupled rotational band in ^{33}Mg", Phys. Rev. C **96**, 011303(R) (2017).

[29] L.A. Gurgi *et al.*, "Isomer spectroscopy of neutron-rich ^{168}Tb$_{103}$", Rad. Phys. Chem. **140**, 493 (2017).

[30] L. Olivier *et al.*, "Persistence of the $Z = 28$ Shell Gap Around ^{78}Ni: First Spectroscopy of ^{79}Cu", Phys. Rev. Lett. **119**, 192501 (2017).

[31] H. Suzuki *et. al.*, "Discovery of ^{72}Rb: A Nuclear Sandbank Beyond the Proton Drip Line", Phys. Rev. Lett. **119**, 192503 (2017).

[32] F. Wang *et al.*, "Reinvestigation of the excited states in the proton emitter ^{151}Lu: Particle-hole excitations across the $N = Z = 64$ subshell", Phys. Rev. C 96, 064307 (2017).

[33] D. Steppenbeck *et. al.*, "Structure of ^{55}Sc and development of the $N = 34$ subshell closure", Phys. Rev. C **96**, 064310 (2017).

[34] Y. K. Tanaka *et al.*, "Missing-mass spectroscopy of the ^{12}C(p, d) reaction near the η'-meson production threshold", Phys. Rev. C **97**, 015202 (2018).

[35] T. Nishi *et al.*, "Spectroscopy of pionic atoms in ^{122}Sn$(d,^3$ He) reaction and angular dependence of the formation cross sections", Phys. Rev. Lett. **120**, 152505 (2018).

(会議抄録)

[36] D. Steppenbeck *et al.*, "Low-lying Structures Of Exotic Sc Isotopes And The Evolution Of The $N = 34$ Subshell Closure", Proceedings of science (INPC2016), 030 (2017).

[37] H. Wang *et al.*, "Spallation reaction study for the long-lived fission products in nuclear waste: Cross section measurements for ^{137}Cs, ^{90}Sr and ^{107}Pd using inverse kinematics method", Energy Procedia **131**, 127-132 (2017).

[38] S. Kawase *et al.*, "Cross section measurement of residues produced in proton- and deuteron-induced spallation reactions on 93Zr at 105MeV/u using the inverse kinematics method", EPJ Web Conf. **146**, 03012 (2017).

[39] H. Wang *et al.*, "Spallation reaction study for fission products in nuclear waste: Cross section measurements for ^{137}Cs, ^{90}Sr and ^{107}Pd on proton and deuteron", EPJ Web Conf. **146**, 09022 (2017).

[40] K. Nakano *et al.*, "Cross sections for nuclide production in proton- and deuteron-induced reactions on ^{93}Nb measured using the inverse kinematics method", EPJ Web Conf. **146**, 11046 (2017).

(国内雑誌)

[41] 櫻井博儀, "核廃棄物の核変換処理と核反応率", パリティ, 2018 年 1 月.

[42] 櫻井博儀, "不安定核ビームを利用した核構造研究", 原子核研究, 2018 年 1 月.

(著書)

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[43] H. Sakurai, "Recent highlights and future projects for the nuclear structure study at RIBF", 16th International Symposium on Capture Gamma-ray Spectroscopy and Related Topics, September 18-22, Shanghai Jiao Tong University (China).

[44] K. Wimmer, "Shape Coexistence at $N = Z$: Spectroscopy of the $T_z = -1$ Nucleus ^{70}Kr and its Neighbors", 16th International Symposium on Capture Gamma-ray Spectroscopy and Related Topics, September 18-22, Shanghai Jiao Tong University (China).

[45] K. Wimmer, "Single-particle structure and shapes of exotic strontium isotopes", The International Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2017 (ISPUN17), September 25-30, Halong City (Vietnam).

[46] K. Wimmer, "Overview of in-beam gamma-ray spectroscopy at the RIBF", Physics Opportunities using CAGRA and RCNP tracking Ge detector (CAGRA17), October 10-12 2017, Osaka (Japan).

[47] H. Sakurai, "Decay Spectroscopy at RIBF past and future", Collaboration workshop on RI and heavy-ion sciences, October 19-20, Ewha Womans University, Seoul (Korea).

[48] S. Koyama, "Study of cluster structure in ^{16}C", Workshop on Nuclear Cluster Physics 2017, October 25, Hokkaido University (Japan).

[49] M. Niikura, "Gamma-ray spectroscopy in the closest vicinity of ^{78}Ni at RIBF", Fall meeting of the Korean Physics Society, October 26, HICO at Gyeongju (Korea).

[50] K. Wimmer, "In-beam gamma-ray spectroscopy at the RIBF", NUSTAR Annual meeting, February 26, GSI Darmstadt (Germany).

[51] K. Wimmer, "In-beam gamma-ray spectroscopy at the RIBF", 2nd Workshop in the framework of JSPS-FWO collaboration, March 13, Tokyo (Japan).

一般講演

[52] S. Koyama, "Study of cluster states via invariant-mass spectroscopy", SAMURAI International Collaboration Workshop 2017, August 8, Darmstadt (Germany).

[53] S. Koyama, "Analysis for multi-charged particle coincidence events with SAMURAI", SAMURAI International Collaboration Workshop 2017, August 10, Darmstadt (Germany).

[54] R. Taniuchi, “Level structure of ^{78}Ni”, SUNFLOWER workshop 2017, September 11, Oslo (Norway).

[55] S. Momiyama, “In-beam gamma-ray spectroscopy of ^{43}S via one-neutron knockout reaction”, International Workshop on “Physics Oppotunities using CAGRA and RCNP tracking Ge detector” (CAGRA17), October 10, Osaka University (Japan).

[56] K. Wimmer, “Mirror Energy Differences and Shape Coexistence in Proton-Rich Nuclei”, 5th Sunflower Workshop, September 18 - 20, Hong Kong (China).

[57] K. Wimmer, “RIBF94: Coulomb excitation of ^{70}Kr and new proposals around $N = Z$ nuclei”, 6th Sunflower Workshop, September 11 - 15, Oslo (Norway).

(国内会議)

招待講演

[58] K. Wimmer, “Nucleon removal reactions and in-beam gamma-ray spectroscopy”, 72th Annual Meeting, The Physical Society of Japan, Osaka University, March 17 - 20 2017, Osaka, Japan

[59] 新倉潤, “Muon Capture Reaction on Pd”, ImPACT-OEDO workshop 2017, 2017 年 7 月 13-14 日, 理化学研究所.

[60] K. Wimmer, “Towards two-neutron transfer reactions with OEDO beams”, ImPACT-OEDO workshop 2017, 2017 年 7 月 13-14 日, RIKEN, Wako, Japan

一般講演

[61] 渡辺珠以 , “RCNP E483 実験終了報告”, 討論型研究会「中間子原子と中間子原子核」, 2017 年 11 月 15 日, 京都大学.

[62] 新倉潤, “Muon Nuclear Capture Reaction”, 第 8 回 Muon 科学と加速器研究, 2018 年 1 月 11 日, 高エネルギー加速器研究機構.

[63] 齋藤岳志, “Absolute Nuclear Charge Radii Determined by Muonic X-ray”, 第 8 回 Muon 科学と加速器研究, 2018 年 1 月 11 日, 高エネルギー加速器研究機構.

[64] 齋藤岳志, “ミューオン原子 X 線を用いた Pd 同位体の核荷電半径の測定”, 第 73 回日本物理学会年次大会, 2018 年 3 月 23 日, 東京理科大学.

[65] 小岩井拓真, “In-beam γ spectroscopy of ^{55}Ca and ^{55}K via nucleon knockout reactions”, 第 73 回日本物理学会年次大会, 2018 年 3 月 24 日, 東京理科大学.

[66] 新倉潤, “一陽子ノックアウト反応による ^{79}Cu のインビーム核分光”, 第 73 回日本物理学会年次大会, 2018 年 3 月 24 日, 東京理科大学.

[67] 籾山悟至, “一中性子ノックアウト反応による ^{44}S のインビームガンマ線核分光”, 第 73 回日本物理学会年次大会, 2018 年 3 月 24 日, 東京理科大学.

(セミナー)

[68] M. Niikura, “Gamma-ray spectroscopy with muon beam”, NESTAR Seminar, June 20, Institute of Nuclear Physics at Orsay (France).

[69] 櫻井博儀, “はかる！ ”, 2017 年 6 月, 埼玉県立不動岡高校.

[70] 櫻井博儀, “親子一緒に先端研究者から科学を学ぼう”, 2017 年 7 月, 東京大学.

[71] 櫻井博儀, “不安定核ビームを利用した核構造研究”, 原子核三者若手夏の学校, 2017 年 8 月, 国立オリンピック記念青少年総合センター.

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おこなっている。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

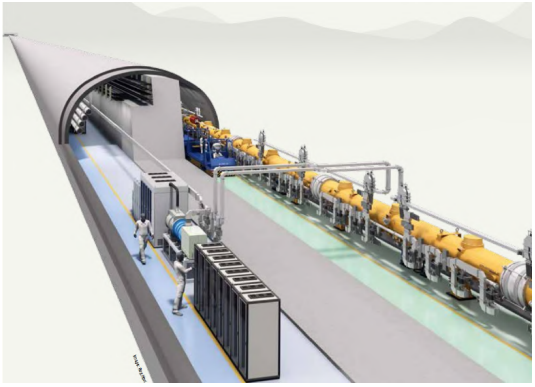


図 2.2.1: 電子・陽電子衝突のリニアコライダー、ILC

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。LHC 13 TeV で新粒子の兆候がなかったことで、有効場理論が精度よく成り立ち、250 GeV ヒッグスファクトリーだけでヒッグス粒子と他の素粒子との結合定数の精密測定が可能となった。これらの標準理論の予言とのずれのパターンを精査することで、素粒子物理学が標準理論を超えて進展する方向を示すことができる。一方、KEK と Fermilab は ILC コストの削減に協力している。超伝導線形加速器の技術革新とエネルギーの低減によって、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。2017 年 11 月にカナダのオタワで開かれた LCB/ICFA の会合で、ILC を衝突エネルギー 250 GeV のヒッグスファクトリーとして見直すことが正式に決まった。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 [13, 24, 26, 27, 28]。

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、ILC と同じ最終収束系 (ATF2 ビームライン) を増設して、ビームサイズチューニングに関するノウハウを得ながら、最終収束系の検証を行っている。ILC と ATF との電子ビームの到達エネルギーの違いから収差の色影響を同程度に抑えつつスケールして、ATF2 では鉛直方向にビームサイズを 37 nm に絞ることが第一の目標となっている。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 の目的を達成した。

現在は新竹モニターでの測定系統誤差の評価と低減が行われている。具体的にはまずは使用しているレーザー光パラメーターを調べ、仮装衝突点におけるレーザー光の径やレイリー長を計算した。そしてこれを用いて現在考えられる測定系統誤差要因の影響の程度を試算した。また上下のレーザー光のプロファイルがうまく重なるように、レーザー光の収差の低減を行った。収差の原因は、仮装衝突点の位置が設計とずれていて、ハーフミラーで分けられた後の 2 本のレーザーが上下非対称に伝搬されていたことであった。そこで仮装衝突点の位置を正しく合わせられるように調整システムを導入し、さらにコンプトン散乱光の収量を上げるために設置されている収束レンズの中心に光を通すように光路調整の方法を改善した。実際に比較実験を行ったところ、この調整により収差が抑えられて系統誤差が有意に減ったことが実証された [8, 18, 22]。

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ハドロン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 [5]。

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。照射した中性子量は、飛跡貫通型検出器を用いて計測したもとで、ILC での運用で予想される中性子量を考えると、50 年から 100 年程度の耐性を持つことが確認された。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。

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)。2017 年も LHC は 13TeV で順調に陽子陽子衝突事象を生成し、ビームを設計値よりも絞ることで、設計値の 2 倍の最高ルミノシティである 2×10^{34} cm^{-2}s^{-1} に達しており、ルミノシティの平坦化を導入している。バンチ数もまだ増加させる余地を残している。物理解析も順調に進んでおり、超対称性粒子の探索では、本研究室のメンバーは、グルーオンの超対称性パートナーであるグルイーノや、長寿命をもったチャージーノの探索において成果を挙げている。また 2015 年の終わりに $\gamma\gamma$ の質量分布にあった 750GeV 付近のピークは、データが溜まってくると 2016 年夏の時点で消えてしまったが、これについても本研究室の大学院生が解析を行った。ATLAS 実験では今後も超対称性粒子やそのほかの新粒子の探索を果敢に行っていく。

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。LHC が特に得意とするのは重いグルイーノの探索であり、常にデータの統計誤差で感度が制限されているためデータを増やした再解析は有意義である。2017 年は 2016 年いっぱいまでに記録したデータ (積分ルミノシティー:36.1 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。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, 6] (図 2.2.2)。

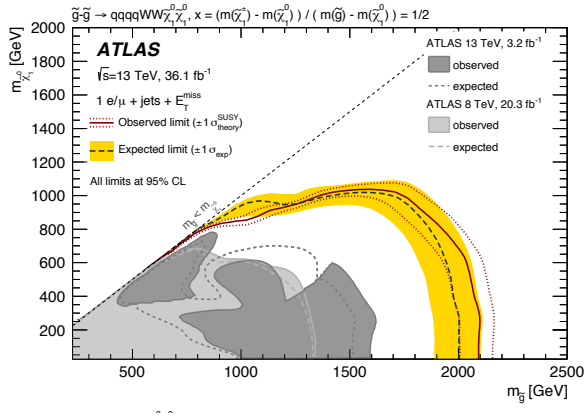


図 2.2.2: 2016 年までのデータを用いた 1 レプトン解析による荷電ゲージーノを経由するグルイーノ崩壊モードに対する制限 [3]。最大でグルイーノ質量 2.0 TeV まで棄却した。

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をはじめとして超対称性理論において非常に広い枠組みで支持されているが、生成断面積が小さいために探索感度が低く、桁違いにレートが高い標準理論過程の背景事象がネックとなり LHC では感度が制限されてきた。特に naturalness の観点から支持されるヒグシーノの探索は終状態に非常に低運動量の粒子しか生成しないため探索が困難であったが、2017 年に行われた解析で低運動量の粒子識別などを改善したことにより大幅に感度を向上させた。結果は標準理論と無矛盾であったが、長らく世界記録となってきた LEP2 のヒグシーノに対する質量制限を 18 年ぶりに更新することに成功した [4]。

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 (図 2.2.3)。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 [2, 7, 10, 16, 23]。

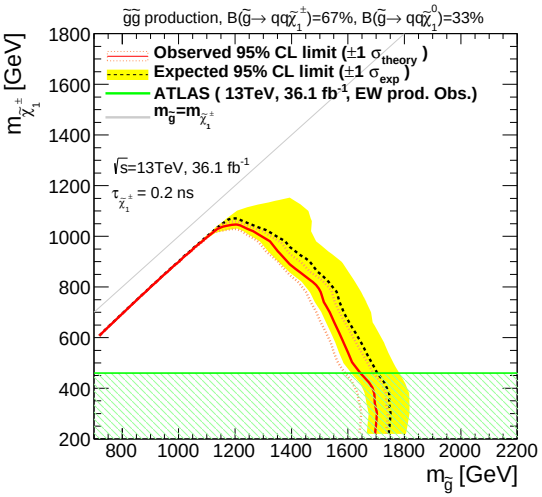


図 2.2.3: 積分ルミノシティ 36.1fb^{-1} における消失飛跡探索によるグルイーノ対生成事象の排除領域 [2]。

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、光子ジェット事象に特化した解析手法を考案し、探索を行った。従来では探索が行われていないような phase space 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、および背景事象の評価手法の確立は完了し、結果をまとめる作業を進めている [17, 21]。

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、現在実験に向けて、Silicon on Insulator (SOI) 技術を用いた微細ピクセルセンサーを基に、新しい中性子測定器の開発を進めている [12, 14, 15, 20, 25]。

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。

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。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、散乱実験を行った (図 2.2.4)。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 [11]。

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 [9, 19]。

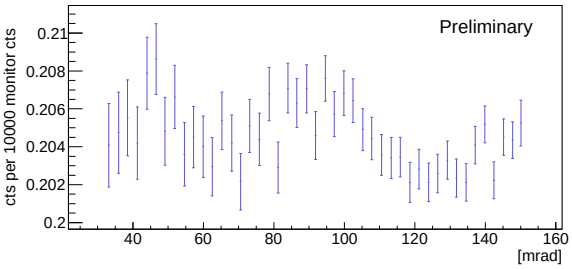


図 2.2.4: 1 気圧のキセノンによる中性子散乱の角度分布。横軸は散乱角度、縦軸はフラックスモニターでの 1 万カウントで規格化した散乱強度。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Y. Sakai, I. Gadjev, P. Hoang *et al.*, "Single shot, double differential spectral measurements of inverse Compton scattering in the nonlinear regime", Phys. Rev. Accel. Beams 20, 060701 (2017)

[2] ATLAS collaboration (M. Aaboud *et al.*), "Search for long-lived charginos based on a disappearing-track signature in *pp* collisions at $\sqrt{s}$ = 13 TeV with the ATLAS detector", arXiv:1712.02118 (2017)

[3] ATLAS collaboration (M. Aaboud *et al.*), "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", Phys. Rev. D 96, 112010 (2017)

[4] ATLAS collaboration (M. Aaboud *et al.*), "Search for electroweak production of supersymmetric states in scenarios with compressed mass spectra at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Rev. D 97, 052010 (2018)

[5] CALICE Collaboration (J. Repond *et al.*), "Construction and Response of a Highly Granular Scintillator-based Electromagnetic Calorimeter", Nucl. Instrum. Meth. A887, 150-168 (2018)

(学位論文)

[6] 陳詩遠、「Search for Gluinos using Final States with One Isolated Lepton in the LHC-ATLAS Experiment (LHC-ATLAS 実験における 1 レプトン終状態を用いたグルイーノ探索)」博士論文（東京大学大学院理学系研究科）、2017 年 8 月、https://cds.cern.ch/record/2284333/

[7] 小坂井千紘、「Search for Long-lived Chargino via Gluino Pair Production in pp Collisions at $\sqrt{s} =$ 13 TeV with the ATLAS Detector (ATLAS 実験における重心系エネルギー 13 TeV での陽子陽子衝突によるグルイーノ対生成チャンネルを用いた長寿命チャージーノ探索)」、博士論文（東京大学大学院理学系研究科）、2018 年 3 月

[8] 安居孝晃、「ATF2 における新竹電子ビームサイズモニターの実験的評価」、修士論文（東京大学大学院理学系研究科）、2018 年 3 月

[9] 山田耕史、「冷中性子散乱による重力的相互作用の探索」、修士論文 (東京大学大学院理学系研究科) 、2018 年 3 月

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[10] C. Kozakai, "Searches for supersymmetry in resonance production, R-parity violating signatures and events with long-lived particles with the ATLAS detector", Phenomenology2017, May 8-10 2017, Pittsburgh University, USA

[11] Y. Kamiya, Y. Sasayama, K. Itagaki *et al.*, "Search for New Gravity-like Forces using Neutron Scattering Instruments and Possible Reductions of Systematic Uncertainties", International Conference on Neutron Scattering 2017, July 9-13 2017, Daejeon, Republic of Korea

[12] Y. Kamiya, Y. Arai, S. Komamiya *et al.*, "Imaging Detector for Ultracold Neutrons using SOI Pixel Sensors and its Application to an Experimental Test of the Weak Equivalence Principle", 11th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD11) in conjunction with 2nd Workshop on SOI Pixel Detectors (SOIPIX2017), Dec. 10-15 2017, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (OIST), Japan

招待講演

[13] S. Komamiya, "Particle Physics in Asia ", DPF Meeting, 1st August 2017, Fermi National Laboratory, Batavia, IL, USA

(国内会議)

一般講演

[14] 神谷好郎、山田耕史、内田健太、駒宮幸男、「SOI 技術を用いた中性子検出器の開発と弱い等価原理の検証実験」、新学術領域研究「3 次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」第 8 回研究会、2017 年 6 月 29 日 - 2017 年 6 月 30 日、宮崎大学・木花キャンパス、宮崎

[15] 神谷好郎、「Wigner 擬確率分布関数を用いた超冷中性子の量子状態の記述」、弱値を通した新物理の探索、2017 年 9 月 8 日、高エネルギー加速器研究機構、茨城

[16] 内田健太、小坂井千紘、加地俊瑛、齊藤真彦、澤田龍、浅井祥二、「LHC-ATLAS 実験 Run2 における Pixel+SCT 消失飛跡を用いた長寿命チャージーノ探索」、日本物理学会秋季大会、2017 年 9 月 12 日、宇都宮大学、栃木

[17] 加納勇也、浅井祥仁、石野雅也、奥村恭幸、陣内修、田中純一、寺師弘二、留目和輝、山口洋平、「LHC-ATLAS 実験 Run2 における凝縮した光子群に崩壊する共鳴状態の探索」、日本物理学会秋季大会、2017 年 9 月 14 日、宇都宮大学、栃木

[18] 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 の電子ビームサイズモニターのアップデート」、日本物理学会秋季大会、2017 年 9 月 15 日、宇都宮大学、栃木

[19] 山田耕史、神谷好郎、駒宮幸男、R. Cubbit、O. Zimmer、L. Porcar、「キセノン原子による低速中性子散乱を用いた未知短距離力探索実験」、日本物理学会秋季大会、2017 年 9 月 15 日、宇都宮大学、栃木

[20] 神谷好郎、「Wigner 擬確率関数による超冷中性子の量子束縛状態の記述と時間発展」、弱値・弱測定、エンタングルメント、量子コヒーレンスの新地平、2018 年 2 月 21 日 - 2018 年 2 月 22 日、高エネルギー加速器研究機構、茨城

[21] 加納勇也、浅井祥仁、石野雅也、奥村恭幸、陣内修、田中純一、寺師弘二、留目和輝、山口洋平、「LHC-ATLAS 実験 Run2 における光子ジェット対共鳴探索の結果」、日本物理学会年次大会、2018 年 3 月 22 日、東京理科大学、千葉

[22] 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 における新竹電子ビームサイズモニターの光学系の現状」、日本物理学会年次大会、2018 年 3 月 22 日、東京理科大学、千葉

[23] 内田健太、齊藤真彦、加地俊瑛、澤田龍、浅井祥仁、「LHC-ATLAS 実験 Run2 における消失飛跡を用いた長寿命チャージーノ探索における解析手法の改善」、日本物理学会年次大会、2018 年 3 月 25 日、東京理科大学、千葉

招待講演

[24] 駒宮幸男、「ILC (International Linear Collider)」、日本学術会議・素核分科会、2017 年 9 月 20 日、日本学術会議、東京

[25] 神谷好郎、「超冷中性子検出に向けた半導体検出器開発と弱い等価原理検証実験への応用」、電気学会低レベル放射線 (能) 測定に関する技術調査専門委員会シンポジウム、2017 年 11 月 1 日、東京大学、東京

[26] 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、2017 年 11 月 28 日、東京大学伊藤国際ホール、東京

[27] 駒宮幸男、「ILC 計画とその物理的意義」、応用物理学会、2018 年 3 月 17 日、早稲田大学西早稲田キャンパス、東京

[28] 駒宮幸男、「ILC 計画の概要　物理と加速器」、日本物理学会、シンポジウム　ILC 計画と新しい科学プロジェクトの在り方、2018 年 3 月 23 日、東京理科大学・野田キャンパス、千葉

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），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，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，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，さらに，将来の研究計画に向けた新型光検出器（HPD・MPPC）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 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精密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。



図 2.3.1: 建設中の Belle II（ベルツー）測定装置。

基本粒子のひとつであるタウレプトンは，標準理論の厳密な検証を行い，新物理を探索するために非常に良いプローブである。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。現在我々は，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研究や，$\tau^- \to \ell^-\ell'^+\ell'^-\bar{\nu}_\ell\nu_\tau$ $(\ell, \ell' = e, \mu)$ 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研究を進めている。また，これまで未測定であった $\tau^- \to \pi^-\ell^+\ell^-\nu_\tau$ $(\ell = e, \mu)$ の崩壊分岐比の測定を目指して解析を開始した。

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 $(8 \times 10^{35}\ \mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1})$ 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検出器 (PXD) 2 層と両面ストリップ型検出器 (SVD) 4 層の計 6 層からなり，それぞれラダーと呼ばれる短冊状の検出器モジュールが円筒状に配置された形状をとる。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特に K_S を含む崩壊モードの検出効率が改善され，超対称性模型などの標準模型を超えた新物理からの影響が見えると期待される $b \to s$ 崩壊や $b \to s\gamma$ 崩壊などの感度が向上する。一方，大面積を覆うために特

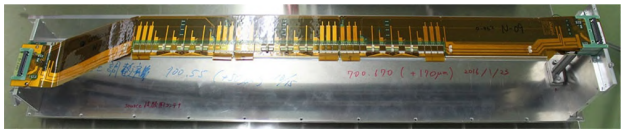


図 2.3.2: 本研究室を中心に製作した，Belle II SVD 6 層目ラダーの量産機。

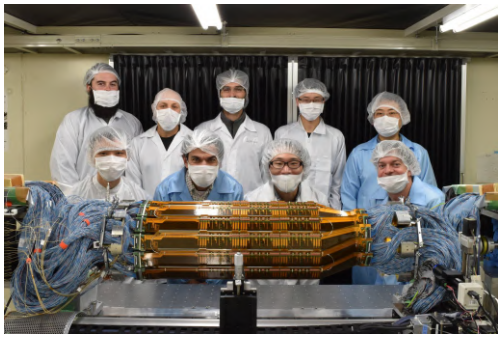


図 2.3.3: 本研究室が貢献した BelleII 実験 SVD 崩壊点検出器。最外層の 6 層目ラダーが見えている。

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た。

本研究室は，最外層の 6 層目ラダーモジュール（図 2.3.2）の製造を東京大学 国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) 内で行ってきた。2011 年に開発を始め，試作から量産へと技術開発を進めてきたが，本年度は，ついに実験で使用されるラダーの量産を完了した。製作されたラダーは KEK で検出器として組み上げられている（図 2.3.3）。引き続き，2019 年初頭の物理実験開始を目指し，SVD 検出器のコミッショニング，調整，運用を行う。

Belle II 実験では最終的に Belle 実験の 50 倍のデータを蓄積する予定である。この膨大な統計量を活用し，標準理論が支配的な崩壊と新物理の寄与が入り得る稀崩壊において互いの測定値を比較することで，新物理の探索が可能である。本研究室では $B \to K_S K_S K_S$ 崩壊や $B \to K^* \ell^+ \ell^-$ 崩壊を用いて標準理論の値からズレを検出し，新物理を探索するべく研究を進めている。

2.3.2 加速器ニュートリノ実験

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得られる可能性がある。

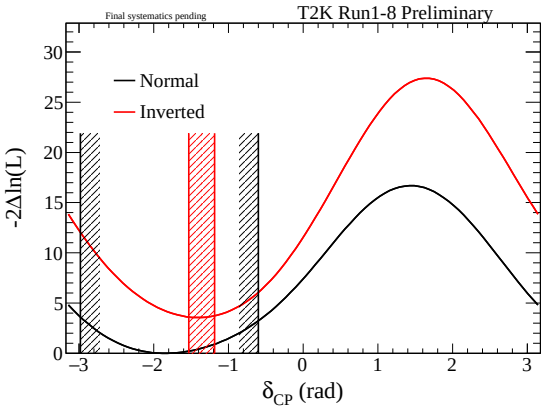


図 2.3.4: T2K 実験の 2017 年の解析による，CP 対称性を破る複素位相 δ_{CP} に対する信頼区間。質量階層性に関して順階層（Normal）と逆階層（Inverted）の両方の仮定のもとに解析を行った。2 つの縦線の内側が 2σ での信頼区間であり，CP を保存する値 $\delta_{CP} = 0$ または $\delta_{CP} = \pm\pi$ はその外にある。

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を立案・遂行している。

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（または，ミューオン反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反応事象を観測することで，世界最高精度でニュートリノ振動を測定している。

2017 年度には，前年度に比べてニュートリノモードのデータ量をほぼ倍に増やし，標的に照射した総陽子数にして 2.2×10^{21} 個に相当するデータの解析を行った。今回の解析ではスーパーカミオカンデでの事象再構成・選択を一新し，信号の選択効率をあげるとともに背景事象の削減を実現し，ニュートリノ振動測定の感度を向上させることに成功した。

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て，CP 対称性を破る複素位相 δ_{CP} に対する許容区間を求めた（図 2.3.4）。質量階層性の仮定にかかわらず，CP を保存する値 $\delta_{CP} = 0$ または $\delta_{CP} = \pm\pi$ は 95%信頼度で許容区間の外にあり，CP 対称性が破れていることを強く示唆する結果を得た。これは，今後のニュートリノおよび素粒子

研究の指針となる画期的な成果である。

T2K phase II と前置検出器アップグレード

我々は，今後予定されている J-PARC の大強度化を最大限に生かし，データ量を大幅に増やすとともに T2K 実験の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 対称性に関して，現在の結果から示唆されるようにそ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。

本研究室では，この T2K Phase II と呼ばれる実験計画に向けて，J-PARC 内に置かれた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提案し，2021 年のインストールを目標に国際共同プロジェクトを主導している。2017 年度には我々の提案が T2K 実験グループで認められて，いよいよプロジェクトが公式に立ち上がった。CERN など新たなパートナーを含む国際協力体制の構築と並行して，シミュレーションによる検出器設計の最適化や性能評価や，SuperFGD と呼ばれる，プラスチックシンチレータのキューブを多数並べて 3 方向から読み出す新構造の検出器の設計・要素開発を行った。

水標的でのニュートリノ反応断面積測定実験

我々は，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行い，水標的かつ大角度まで高いアクセプタンスを持つ新しい検出器（WAGASCI 検出器）を開発してきた。前置検出器ホールのスペースに WAGASCI 検出器を設置する計画 (J-PARC T59) を立案し，さらに，この検出器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・遂行した。

本年度は，INGRID water module でのデータ解析を進め，水とプラスチックの反応断面積の比を約 5%の精度で測定した。さらに，長基線ニュートリノ振動実験において世界で初めての試みとして，我々の測定を既存の前置検出器による測定と比べることで，前置検出器の測定を後置検出器に外挿する手法の検証を行った。

また，２台目の検出器モジュールに向けてフランス・Ecole Polytechnique のグループと共同で開発してきた専用の信号読み出し回路も完成し，1280 チャンネル分の全数試験を終えて検出器に組み込んだ。このモジュールは 2017 年夏に J-PARC の前置検出器ホールに設置し，秋からニュートリノビームによる測定を開始した。

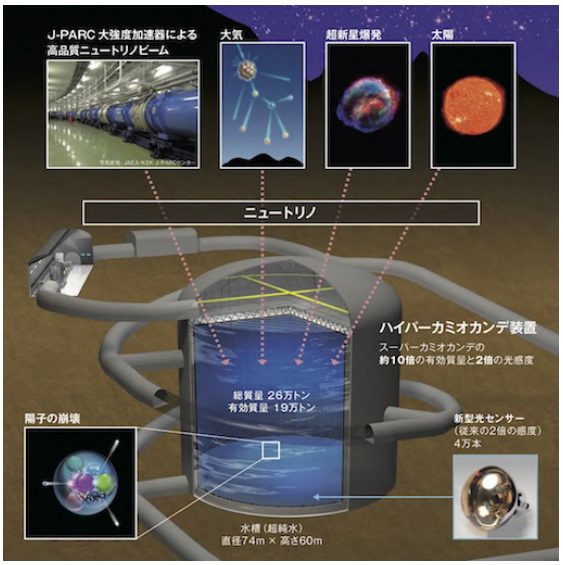


図 2.3.5: ハイパーカミオカンデ検出器の概念図。

2.3.3 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の CP 非対称性を詳細に研究するためには，T2K 実験の数十倍の統計が必要となる。また，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 2.3.5）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，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。また，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。

2.3.4 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。

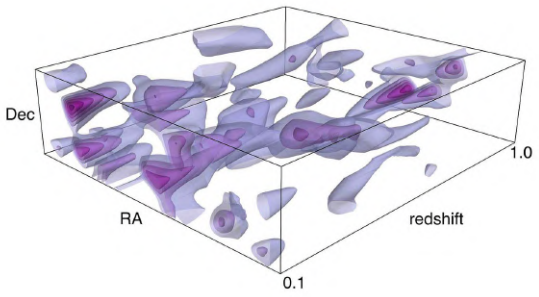


図 2.3.6: 重力レンズ解析と背景銀河の距離の情報を組み合わせて，HSC データから推定された暗黒物質の 3 次元分布図 ([34])。詳細な密度構造の復元に成功している。

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 年度にはサーベイの観測の第 1 期データが公開された ([38])。

本年度 HSC-SSP サーベイチームでは，最初の 2 年間の観測を用いて，重力レンズ解析を始めとする幅広いサイエンスについての初期成果を論文にまとめた。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た重力レンズ効果の解析も進められ，これまでになく広天域での暗黒物質マップが得られた。2016 年 4 月までの観測データの解析から復元した暗黒物質マップを図 2.3.6 に示す。

今後 HSC の探査観測は 2019 年末まで推進される予定であり，更なる解析から暗黒物質の正体に迫る物理結果を出していきたい。

2.3.5 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行っている。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さ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も神戸大・京都大とともに研究している。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 100 GeV 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 KEK 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，α 線，宇宙線の信号の検出に成功し，その全てに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。

また，実験の更なる高感度化を目指し，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い，低バックグラウンド部材の選定を可能とした。さらにこの結果を用いたモンテカルロシミュレーションを開発し，より現実的なバックグラウンドの評価を行った結果，スタック検出器 2 層を用いた時のアクシオン質量に対する 95% 信頼度での制限として，先行実験の結果である 145 eV よりも良い 104 eV という感度を実現できるという予想を得た。現在，実験の開始を目指して準備を進めている。

＜報文＞

(原著論文)

B ファクトリー関連

[1] S. Hirose *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the τ lepton polarization and $R(D^*)$ in the decay $\bar{B} \to D^* \tau^- \bar{\nu}_\tau$," Phys. Rev. Lett. **118** (2017) no.21, 211801.

[2] J. Grygier *et al.* [Belle Collaboration], "Search for $B \to h\nu\bar{\nu}$ decays with semileptonic tagging at Belle," Phys. Rev. D **96**, 091101 (2017).

[3] K. Prasanth *et al.* [Belle Collaboration], "First measurement of T-odd moments in $D^0 \to K^0_S\pi^+\pi^-\pi^0$ decays," Phys. Rev. D **95**, 091101 (2017).

[4] C. Beleno *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the decays $B \to \eta\ell\nu_\ell$ and $B \to \eta'\ell\nu_\ell$ in fully reconstructed events at Belle," Phys. Rev. D **96**, no. 9, 091102 (2017).

[5] K. Chilikin *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of an alternative $\chi_{c0}(2P)$ candidate in $e^+e^- \to J/\psi D\bar{D}$," Phys. Rev. D **95**, 112003 (2017).

[6] T. Julius *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the branching fraction and CP asymmetry in $B^0 \to \pi^0\pi^0$ decays, and an improved constraint on ϕ_2," Phys. Rev. D **96**, no. 3, 032007 (2017).

[7] C.-L. Hsu *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of branching fraction and direct CP asymmetry in charmless $B^+ \to K^+K^-\pi^+$ decays at Belle," Phys. Rev. D **96**, no. 3, 031101 (2017).

[8] N. Dash *et al.*, "Search for CP Violation and Measurement of the Branching Fraction in the Decay $D^0 \to K^0_S K^0_S$," Phys. Rev. Lett. **119**, no. 17, 171801 (2017).

[9] R. Seidl *et al.* [Belle Collaboration], "Invariant-mass and fractional-energy dependence of inclusive production of di-hadrons in e^+e^- annihilation at $\sqrt{s} = 10.58$ GeV," Phys. Rev. D **96**, 032005 (2017).

[10] B. Pal *et al.* [Belle Collaboration], "Search for $\Lambda_c^+ \to \phi p\pi^0$ and branching fraction measurement of $\Lambda_c^+ \to K^-\pi^+p\pi^0$," Phys. Rev. D **96**, 051102 (2017).

[11] T. Horiguchi *et al.* [Belle Collaboration], "Evidence for Isospin Violation and Measurement of CP Asymmetries in $B \to K^*(892)\gamma$," Phys. Rev. Lett. **119**, no. 19, 191802 (2017).

[12] E. Guido *et al.* [Belle Collaboration], "Study of η and dipion transitions in $\Upsilon(4S)$ decays to lower bottomonia," Phys. Rev. D **96**, 052005 (2017).

[13] V. Zhukova *et al.* [Belle Collaboration], "Angular analysis of the $e^+e^- \to D^{(*)\pm}D^{*\mp}$ process near the open charm threshold using initial-state radiation," Phys. Rev. D **97**, no. 1, 012002 (2018).

[14] S. Hirose *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the τ lepton polarization and $R(D^*)$ in the decay $\bar{B} \to D^*\tau^-\bar{\nu}_\tau$ with one-prong hadronic τ decays at Belle," Phys. Rev. D **97**, 012004 (2018).

[15] Y. Kato *et al.* [Belle Collaboration], "Measurements of the absolute branching fractions of $B^+ \to X_{c\bar{c}}K^+$ and $B^+ \to \bar{D}^{(*)0}\pi^+$ at Belle," Phys. Rev. D **97**, no. 1, 012005 (2018).

[16] N. Shimizu *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the tau Michel parameters $\bar{\eta}$ and $\xi\kappa$ in the radiative leptonic decay $\tau^- \to \ell^-\nu_\tau\bar{\nu}_\ell\gamma$," PTEP **2018**, no. 2, 023C01 (2018).

[17] S. Jia *et al.* [Belle Collaboration], "Search for light tetraquark states in $\Upsilon(1S)$ and $\Upsilon(2S)$ decays," Phys. Rev. D **96**, no. 11, 112002 (2017).

[18] J. Yelton *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of Excited Ω_c Charmed Baryons in e^+e^- Collisions," Phys. Rev. D **97**, no. 5, 051102 (2018).

[19] J. Yelton *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of branching fractions of hadronic decays of the Ω_c^0 baryon," Phys. Rev. D **97**, 032001 (2018).

[20] M. Masuda *et al.* [Belle Collaboration], "Study of K^0_S pair production in single-tag two-photon collisions," Phys. Rev. D **97**, no. 5, 052003 (2018).

[21] Y. B. Li *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of $\Xi_c(2930)^0$ and updated measurement of $B^- \to K^-\Lambda_c^+\bar{\Lambda}_c^-$ at Belle," Eur. Phys. J. C **78**, 252 (2018).

T2K/Super-K/Hyper-K 関連

[22] E. S. Pinzon Guerra *et al.* [DUET Collaboration], "Measurement of $\sigma_{\rm ABS}$ and $\sigma_{\rm CX}$ of π^+ on carbon by the Dual Use Experiment at TRIUMF (DUET)," Phys. Rev. C **95**, no. 4, 045203 (2017).

[23] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Combined Analysis of Neutrino and Antineutrino Oscillations at T2K," Phys. Rev. Lett. **118**, 151801 (2017).

[24] K. Abe *et al.*, "Search for Lorentz and CPT violation using sidereal time dependence of neutrino flavor transitions over a short baseline," Phys. Rev. D **95**, 111101 (2017).

[25] T. Fukuda *et al.*, "First neutrino event detection with nuclear emulsion at J-PARC neutrino beamline," PTEP **2017**, 063C02 (2017).

[26] K. Yamada *et al.*, "First demonstration of an emulsion multi-stage shifter for accelerator neutrino experiments in J-PARC T60," PTEP **2017**, 063H02 (2017).

[27] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Updated T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using $1.5{\times}10^{21}$ protons on target," Phys. Rev. D **96**, 011102 (2017).

[28] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Search for nucleon decay into charged antilepton plus meson in 0.316 megaton·years exposure of the Super-Kamiokande water Cherenkov detector," Phys. Rev. D **96**, 012003 (2017).

[29] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Measurement of $\bar{\nu}_\mu$ and ν_μ charged current inclusive cross sections and their ratio with the T2K off-axis near detector," Phys. Rev. D **96**, 052001 (2017).

[30] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Measurement of neutrino and antineutrino oscillations by the T2K experiment including a new additional sample of ν_e interactions at the far detector," Phys. Rev. D **96**, 092006 (2017).

[31] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], "Search for an excess of events in the Super-Kamiokande detector in the directions of the astrophysical neutrinos reported by the IceCube Collaboration," Astrophys. J. **850**, no. 2, 166 (2017).

[32] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "Measurement of the single π^0 production rate in neutral current neutrino interactions on water," Phys. Rev. D **97**, no. 3, 032002 (2018).

[33] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], "First measurement of the ν_μ charged-current cross section on a water target without pions in the final state," Phys. Rev. D **97**, 012001 (2018).

HSC/PSF 関連

[34] M. Oguri *et al.*, "Two- and three-dimensional wide-field weak lensing mass maps from the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program S16A data," PASJ, 70, S26 (2017).

[35] Y. Komiyama *et al.*, "Hyper Suprime-Cam: Camera dewar design" PASJ, 70, S2 (2017)

[36] H. Aihara *et al.*, "The Hyper Suprime-Cam SSP Survey: Overview and survey design" PASJ, 70, S4 (2017).

[37] S. Miyazaki *et al.*, "Hyper Suprime-Cam: System design and verification of image quality" PASJ, 70, S1 (2017).

[38] H. Aihara *et al.*, "First Data Release of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program," PASJ, 70, S8 (2017).

(会議抄録)

[39] Yifan Jin, "Study of $\tau^- \to \pi^- l^+ l^- \nu_\tau$ at Belle," in proceedings of Tau 2016 conference, Nucl. Part. Phys. Proc. **287-288**, 215 (2017).

[40] N. Chikuma *et al.*, "Development of electronics and data acquisition system for the J-PARC T59 (WAGASCI) experiment," PoS **EPS-HEP2017**, 780 (2017).

[41] J. Sasaki, "Study of tau five-body leptonic decays at Belle," Proceedings of 14th International Workshop on Tau Lepton Physics (TAU 2016), Nucl. Part. Phys. Proc. **287-288**, 212 (2017).

[42] J. Sasaki, "Study of five-body leptonic decays of tau at Belle experiment," Proceedings of 31st Annual Meeting of the Division of Particles and Fields (DPyC) of the Mexican Physical Society, J. Phys. Conf. Ser. **912**, no. 1, 012002 (2017).

(学位論文)

博士論文

[43] Yusuke Suda, "Search for Proton Decay Using an Improved Event Reconstruction Algorithm in Super-Kamiokande," Sep. 2017.

修士論文

[44] Johnny Alejandro Mora Grimaldo, "Background Studies for Axion & WIMP Detection Experiments Using the XRPIX Silicon Detector," Sep. 2017.

[45] Wan Kun, "Feasibility study of ghost hits reduction in Silicon Vertex Detector for Belle II experiment," Sep. 2017.

[46] 田村陸, "Construction and performance of a neutrino detector for neutrino-nucleus interaction cross-section measurements," Mar. 2018.

[47] 小瀬樹, "Study of the sensitivity of a solar axion search experiment using SOI pixel detector," Mar. 2018.

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[48] Junya Sasaki, "Study of five-body leptonic decays at Belle," mini-Workshops on Tau lepton Physics, Cinvestav, Mexico, May 22–23, 2017.

[49] Masashi Yokoyama, "T2K ND280 Upgrade," 11th International Workshop on Neutrino-Nucleus Scattering in the Few-GeV Region (NuINT17), Toronto, Canada, June 25–30, 2017.

[50] Masashi Yokoyama, "Hyper-Kamiokande," 18th Lomonosov Conference, Moscow State University, August 24–30, 2017.

[51] Konosuke Iwamoto, "Neutrino Oscillation Experiments and Recent Results from T2K," KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2018), KEK, February 13–16, 2018.

[52] Hiroaki Aihara, "Japanese HEP community discussion on the 250 GeV ILC," American Workshop on Linear Colliders 2017, June 28, 2017, SLAC

一般講演

[53] Junya Sasaki, "Study of the Lorentz structure of tau decays at Belle," Particles and Nuclei International Conference 2017, Beijing, China, September 1–5, 2017.

[54] Yoshiyuki Onuki, "Low background radiation SOI pixel detector for Solar Axion search experiment," 11th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detector(HSTD11) in conjunction with 2nd Workshop on SOI Pixel Detector(SOIPIX2017), OIST, December 10–15, 2017.

[55] Johnny Alejandro Mora Grimaldo, “Signal Clustering and Particle Tracking Using a Single Event-Driven SOI Pixel Detector for Axion Search Experiment,” *ibid.*

[56] Hiroko Niikura, “Tightest bounds on PBH abundance with HSC observation of M31,” 22nd International Microlensing Conference, 24–28 January, 2018, Auckland, New Zealand.

ポスター発表

[57] Riku Tamura, “Development of a neutrino detector and electronics for precise measurement of neutrino cross-section ratios,” 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Atlanta USA, October 21–28, 2017.

(国内会議)

招待講演

[58] 相原博昭,「ILC 計画とその科学的意義」, 2017 年秋季 応用物理学会学術講演会・放射線分科会企画シンポジウム 2017 年 9 月 6 日

[59] 小貫良行, 「Belle II での CPV の物理」, Flavor Physics Workshop 2017, 神奈川県三浦市, 2017 年 10 月 30 日–11 月 2 日

[60] 古賀太一朗, “T2K progresses,” 新学術領域「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会, 滋賀県大津市, 2017 年 12 月 11 日–13 日

[61] 小貫良行,「素粒子物理実験における低 BG 半導体検出器開発」, 電気学会ミニシンポジウム「低レベル放射線（能）測定に関する技術調査専門委員会シンポジウム」, 東京大学, 2017 年 11 月 1 日

一般講演

[62] 小貫良行,「SOI ピクセル検出器 XRPIX を用いた太陽アクシオン及び軽い暗黒物質探索実験の開発状況」, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 宇都宮大学, 2017 年 9 月 12 日–15 日.

[63] 小瀬 樹,「SOI ピクセル検出器を用いた太陽アクシオン探索に向けた予備実験の状況報告」,

[64] 佐々木淳弥, 「Belle 実験におけるタウ粒子の 5 体レプトン化崩壊過程研究」, 同上.

[65] 横山将志, 「T2K 前置検出器 アップグレード計画の概要」, 同上.

[66] 岩本康之介,「T2K ND280 前置ニュートリノ検出器のアップグレードに向けた電子ニュートリノ事象選択解析の現状」, 同上.

[67] 田村 陸,「多チャンネルの MPPC の制御読み取りに向けた SPIROC2D を用いたエレクトロニクスの開発状況及び性能評価試験」, 同上.

[68] 新倉広子,「アンドロメダ銀河領域における重力マイクロレンズ効果による宇宙ひもの探査」, 第 6 回観測的宇宙論ワークショップ, 弘前大学, 2017 年 10 月 23 日–26 日.

[69] 岩本康之介,「T2K 第二フェーズに向けた ND280 前置検出器アップグレードの概要」, 第 24 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, 2018 年 2 月 18 日–21 日.

[70] 横山将志, 「加速器ニュートリノ振動実験の現状と展望」, 同上

[71] 藤田亮, 「T2K 前置検出器アップグレードのためのキューブ積層型プラスチックシンチレータ検出器の性能測定」, 第 72 回 日本物理学会年次大会, 東京理科大学, 2018 年 3 月 22–25 日.

[72] 岩本康之介,「T2K ND280 前置検出器のアップグレードに向けた電子ニュートリノ事象選択における光子由来の背景事象抑制, 同上.

[73] 竹馬匠泰,「J-PARC T59 実験 : 新検出器 WAGASCI における反ニュートリノビーム測定の現状」, 同上.

[74] 古賀太一朗, 「Off-axis 角が異なる 2 つの T2K 前置検出器を用いたニュートリノ-原子核反応の測定と比較」, 同上.

ポスター発表

[75] 新倉広子,「アンドロメダ銀河領域でのかんむり座 R 型変光星の観測」, 日本天文学会秋季大会, 北海道大学, 2017 年 9 月 11 日–13 日.

[76] 藤田亮, “Light yield measurement and microscopic observation of scintillator cube for Super-FGD,” 新学術領域「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2017 年 12 月 11 日-13 日 滋賀県大津市

[77] 岩本康之介, “Electron-Photon Separation in T2K ND280 Upgrade Target,” 同上.

(セミナー，その他)

[78] 相原博昭,「SDGs 達成に向けた東京大学の貢献」, 外務省国際協力スタディグループ第 2 回会合, 2017 年 4 月 12 日

[79] Masashi Yokoyama, “T2K near detector upgrade & Hyper-Kamiokande project,” Indo-Japan Neutrino Meeting 2017, Institute of Physics, Bhubaneswar, India, May 15, 2017.

[80] Masashi Yokoyama, “T2K near detector upgrade & Hyper-Kamiokande project,” Indo-Japan Neutrino Meeting 2017, Saha Institute of Nuclear Physics, Bhubaneswar, India, May 16, 2017.

[81] 相原博昭, 「ILC 計画とその科学的意義 」, 第 54 回アイソトープ・放射線研究発表会, 2017 年 7 月 5 日

[82] 相原博昭,「研究倫理について —最近の不正事案の背景と今後の課題—」, 物理学専攻会議 Faculty Development, 2017 年 11 月 1 日

[83] Hiroaki Aihara, ”Future Society Initiative, Education and Development (fund raising) in a global context,” University of Tokyo Global Advisory Board, November 28, 2017

[84] 相原博昭,「高エネルギー物理学分野のオープンサイエンス」, 文部科学省オープンサイエンスの推進に向けた意見交換会, 2017 年 12 月 13 日



図 2.4.1: LHC 加速器

[85] 横山将志, 「ハイパーカミオカンデ計画」, 2017 年度第 2 回 CRC 将来計画タウンミーティング, 東京大学柏キャンパス, 2017 年 12 月 16 日

[86] Masashi Yokoyama, “Status and prospects of neutrino oscillation experiments,” 素粒子論研究室セミナー, 東京大学, 2017 年 12 月 18 日

[87] 横山将志, 「ニュートリノビームで狙う宇宙の謎」, 東大理学部 高校生のための冬休み講座 2017, 東京大学, 2017 年 12 月 27 日

[88] Hiroko Niikura, “Dense-cadence HSC observation of M31 and its implications,” Nagoya University Cosmology Group C-lab seminar, 18 January, 2018, Nagoya, Japan.

[89] 相原博昭,「東京大学における U.N. Sustainable Development Goals (SDGs) に向けての取組」, 東京大学産学連携協議会アドバイザリーボードミーティング, 2018 年 2 月 23 日

[90] 相原博昭,「JAXA-IPMU/東京大学硬 X 線・ガンマ線イメージング連携拠点」, 記者発表, 2018 年 3 月 26 日

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。

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 年から重心系エネルギーが 13 TeV に増強されて運転を再開している。2017 年までに、積算ルミノシティーで約 80 fb^{-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・重いヒッグス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新物理を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. 電弱ゲージーノがウィーノ/ヒグシーノだったときの異常な飛跡
3. 2 つのタウ粒子に崩壊する重いヒッグス粒子

今年度は特に、 2. と 3. のモードに関して研究が進められた。

電弱ゲージーノがヒグシーノだったときの異常な飛跡

ウィーノやヒグシ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。前年度、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、有意な超過は観測されず、ウィーノの質量に対して 460 GeV の質量下限が得られた。今年度はヒグシーノに対しても解釈を行い、LEP 以降初めてヒグシーノに対する世界で最も厳しい制限を付けた (図 2.4.2)。また、長期的な視野での研究も進めており、2026 年から運転が計画されている HL-LHC、100 TeV の重心系エネルギーを持つ FCC など、将来加速器における超対称性粒子探索の展望に関しても研究を進めている。

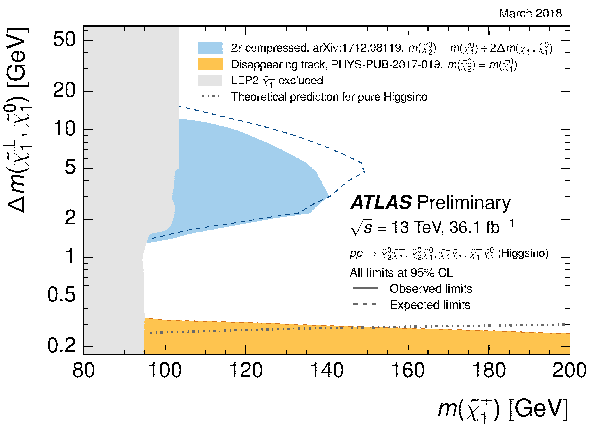


図 2.4.2: ヒグシーノの質量とその質量差 (荷電ヒグシーノと中性ヒグシーノ) 平面で棄却された領域. 黄色領域が今回消失飛跡探索で棄却した領域 (95%CL)

２つのタウ粒子の崩壊する重いヒッグス粒子の探索

H 粒子や A 粒子と呼ばれる重い中性ヒッグス粒子の発見は超対称性の存在を示唆し、ヒッグス粒子発

見後の最も重要なテーマの一つである。2 つタウ粒子に崩壊するチャネルは背景事象が少なく、重いヒッグス粒子とタウ粒子の coupling がかなり強いモデルもあるため、高い発見感度が期待されている。今までタウを探すため、電荷をもったトラック数が 1 本もしくは 3 本だけのものに注目していたが、今回、2 本のトラックの場合を新たに加えることで、シグナルの取得効率が 30 % 程改善した。また、タウ粒子らしさによって細かく分類するという方法を導入することで、発見感度がおよそ 25 % 改善した。更に、重いヒッグス粒子に対する新しい質量再構成方法の研究も進めている。今後は 2015 年から 2018 年までの実験データを用い、三つの新手法の導入でさらなる大幅な感度の改善を図る。

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。

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、ガンマ線レーザー実現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。Ti:Sapphire 結晶を用いたパルス化・増幅のプロトタイプの製作や非線形光学結晶を用いた波長変換などに成功した。また、Pick-off 消滅を用いて低温環境中でのポジトロニウムの熱化測定を行い、100 K までポジトロニウムが冷却される過程を初めて観測した。さらに、産総研、KEK、量研、九州大学、大阪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。

放射光施設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。本年度はラウエ型チャンネルカット結晶内の強い周期電場を利用し、SPring-8 のビームライン BL19LXU で 1 keV までの比較的重い粒子を探索した。新粒子は発見できなかったが、300 eV–1 keV の領域で最も厳しい制限を得た (図 2.4.3)。

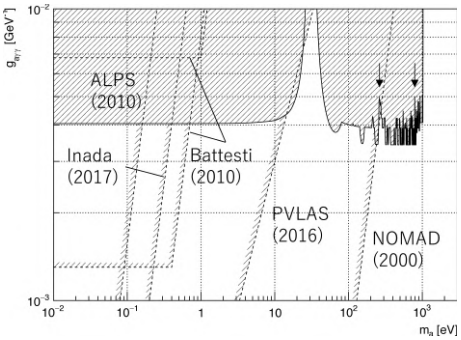


図 2.4.3: 弱結合粒子探索結果と過去の実験との比較 [13]。ハッチ領域が今回の探索で排除された。

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 線を用いて行っている。

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 (OVAL 実験)

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。本研究室では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今年度はフィネス $\sim 340,000$ の装置を用いて真空複屈折の探索を行った。1 日のデータ取得で世界最高となる合計 6,000 発のパルス磁場印加に成功した。真空複屈折は観測できなかったが、質量 0.1 eV 付近の Millicharged Particles に対して世界で最も厳しい制限を得た (図 2.4.4)。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。

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

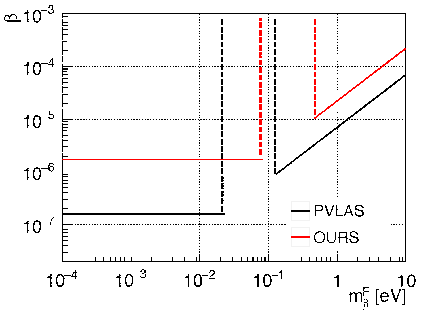


図 2.4.4: 真空複屈折探索によるフェルミオン Millicharged Particles への制限。 [107]

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。今年度はプロトタイプ実験として 2.5 TW レーザーを用いてレーザーと X 線間の時間及び空間アライメント技術を確立した。真空回折現象は観測できなかったが、QED 予言値の 1.2×10^{37} 倍以下 (95% C.L.) という世界初の制限をつけた。今後は BG 抑制、レーザー集光、500 TW レーザーの使用により、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、現在結果をまとめている。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、Best Student award, International School of Subnuclear Physics 2017, 2017 年 6 月.

[2] 周健治、最優秀賞　若手口頭発表部門、第 60 回放射線化学討論会、2017 年 9 月.

[3] 石田明、日本陽電子科学会奨励賞、2017 年 12 月.

[4] 上岡修星、理学系研究科研究奨励賞　修士課程、2018 年 3 月.

＜報文＞

(原著論文)

[5] T. Inada, T. Yamazaki, T. Yamaji, Y. Seino, X. Fan, S. Kamioka, T. Namba and S. Asai, “Probing Physics in Vacuum Using an X-ray Free-Electron Laser, a High-Power Laser, and a High-Field Magnet”, Appl. Sci. **7**(2017)671.

[6] X. Fan, S. Kamioka, K. Yamashita, S. Asai and A. Sugamoto, “Vacuum Magnetic Birefringence Experiment as a probe of Dark Sector”, arXiv:1707.03609 (2017).

[7] The ALPHA Collaboration, “Observation of the hyperfine spectrum of antihydrogen”, Nature **548**(2017)66.

[8] The ALPHA Collaboration, “Antihydrogen accumulation for fundamental symmetry tests”, Nat. Commun. **8**(2017)681.

[9] S. Asai *et al.*, “Report by the Committee on the Scientific Case of the ILC Operating at 250 GeV as a Higgs Factory”, arXiv:1710.08639 (2017).

[10] X. Fan, S. Kamioka, T. Inada, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai *et al.*, “The OVAL experiment: a new experiment to measure vacuum magnetic birefringence using high repetition pulsed magnets”, Eur. Phys. J. D **71**(2017)308.

[11] T. Yamaji, T. Yamazaki, K. Tamasaku and T. Namba, “Theoretical calculation of coherent Laue-case conversion between x-rays and ALPs for an x-ray light-shining-through-a-wall experiment”, Phys. Rev. D **96**(2017)115001.

[12] K. Yamashita, X. Fan, S. Kamioka, S. Asai and A. Sugamoto, “Generalized Heisenberg-Euler formula in Abelian gauge theory with parity violation”, Prog. Theor. Exp. Phys. **2017**(2017)123B03.

[13] T. Yamaji, K. Tamasaku, T. Namba, T. Yamazaki and Y. Seino, “Search for Axion like particles using Laue-case conversion in a single crystal”, arXiv:1802.08388 (2018).

The ATLAS Collaboration

[14] Eur. Phys. J. C **77**(2017)490.

[15] Eur. Phys. J. C **77**(2017)70.

[16] Phys. Rev. C **95**(2017)064914.

[17] Phys. Lett. B **765**(2017)32.

[18] Phys. Lett. B **764**(2017)11.

[19] Eur. Phys. J. C **77**(2017)26.

[20] Eur. Phys. J. C **77**(2017)40.

[21] JHEP **04**(2017)086.

[22] Phys. Rev. D **95**(2017)032001.

[23] Phys. Rev. C **96**(2017)024908.

[24] Phys. Lett. B **765**(2017)132.

[25] Eur. Phys. J. C **77**(2017)241.

[26] Eur. Phys. J. C **77**(2017)141.

[27] JHEP **01**(2017)099.

[28] JHEP **02**(2017)071.

[29] JHEP **01**(2017)117.

[30] Eur. Phys. J. C **77**(2017)220.

[31] Eur. Phys. J. C **77**(2017)144.
[32] Nucl. Phys. B **918**(2017)257.
[33] Eur. Phys. J. C **77**(2017)317.
[34] Eur. Phys. J. C **77**(2017)332.
[35] Eur. Phys. J. C **77**(2017)195.
[36] Eur. Phys. J. C **77**(2017)264.
[37] Eur. Phys. J. C **77**(2017)367.
[38] Eur. Phys. J. C **77**(2017)76.
[39] JHEP **02**(2017)117.
[40] Eur. Phys. J. C **77**(2017)299.
[41] JHEP **03**(2017)113.
[42] JHEP **03**(2017)157.
[43] Phys. Lett. B **770**(2017)473.
[44] Eur. Phys. J. C **77**(2017)379.
[45] Nat. Phys. **13**(2017)852.
[46] Eur. Phys. J. C **77**(2017)531.
[47] Phys. Lett. B **773**(2017)354.
[48] Eur. Phys. J. C **77**(2017)361.
[49] JINST **12**(2017)P05002.
[50] JHEP **09**(2017)118.
[51] JHEP **04**(2017)124.
[52] Phys. Rev. D **95**(2017)072003.
[53] Eur. Phys. J. C **77**(2017)474.
[54] Phys. Rev. D **96**(2017)052004.
[55] Phys. Rev. D **96**(2017)072002.
[56] Eur. Phys. J. C **77**(2017)466.
[57] JHEP **08**(2017)026.
[58] Phys. Rev. C **96**(2017)064908.
[59] Eur. Phys. J. C **77**(2017)393.
[60] Phys. Rev. D **95**(2017)112005.
[61] Eur. Phys. J. C **77**(2017)673.
[62] JHEP **09**(2017)88.
[63] JHEP **07**(2017)107.
[64] Eur. Phys. J. C **77**(2017)580.
[65] JHEP **11**(2017)62.
[66] Phys. Rev. Lett. **119**(2017)051802.
[67] Eur. Phys. J. C **77**(2017)428.
[68] JHEP **08**(2017)052.
[69] Eur. Phys. J. C **77**(2017)563.
[70] JHEP **11**(2017)086.
[71] JHEP **09**(2017)020.
[72] JHEP **09**(2017)084.
[73] JHEP **08**(2017)006.
[74] Phys. Rev. D **96**(2017)112004.
[75] Phys. Lett. B **774**(2017)379.
[76] JHEP **10**(2017)129.
[77] Phys. Rev. Lett. **119**(2017)181804.
[78] JHEP **10**(2017)182.
[79] Eur. Phys. J. **77**(2017)872.
[80] JINST **12**(2017)P12009.
[81] Eur. Phys. J. C **77**(2017)765.
[82] JHEP **10**(2017)141.
[83] Phys. Lett. B **775**(2017)105.
[84] JHEP **12**(2017)017.
[85] Eur. Phys. J. C **77**(2017)646.
[86] Phys. Rev. Lett. **119**(2017)191803.
[87] Phys. Lett. B **774**(2017)494.
[88] JHEP **10**(2017)112.
[89] JHEP **11**(2017)191.
[90] JHEP **10**(2017)132.
[91] JHEP **12**(2017)024.
[92] Eur. Phys. J. C **77**(2017)898.
[93] JHEP **12**(2017)034.
[94] Phys. Lett. B **777**(2017)91.
[95] Phys. Rev. D **96**(2017)112010.
[96] JHEP **11**(2017)195.
[97] Phys. Lett. B **776**(2017)318.
[98] JHEP **12**(2017)085.
[99] Phys. Rev. D **96**(2017)092008.
[100] Eur. Phys. J. C **77**(2017)804.
[101] Phys. Lett. B **775**(2017)206.
[102] JHEP **12**(2017)059.

(国内雑誌)

[103] 樊星、上岡修星、難波俊雄、“OVAL 実験 -真空を探る”、高エネルギーニュース **36**(2017)9.
[104] 山崎高幸、清野結大、稲田聡明、難波俊雄、浅井祥仁、“XFEL の高輝度性を利用した真空の探索”、レーザー研究 (レーザー学会誌 8 月号) **45**(2017)488.

(学位論文)

[105] 安達俊介, “Search for gluinos in final states with jets and large missing transverse momentum using 36fb^{-1} data observed in the ATLAS detector”, 博士論文 (2017).
[106] 山道智博, “Search for Axion Like Particles using Laue-case Conversion in a Single Crystal”, 博士論文 (2017).
[107] 上岡修星, “高速繰り返しパルス磁石と高フィネス Fabry-Pérot 共振器を用いた真空複屈折の探索”, 修士論文 (2018).
[108] 村吉諄之, “ボース・アインシュタイン凝縮の実現を目指したポジトロニウムの冷却用光源の開発”, 修士論文 (2018).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[109] S. Adachi, “Inclusive searches for squarks and gluinos with the ATLAS detector”, 6th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2017), August 16–29, 2017, Crete, Greece.

Light driven Nuclear-Particle physics and Cosmology 2017 (LNPC’17), April 21, 2017, Pacifico Yokohama

[110] Y. Okesaku, “Search for Hidden Photon Dark Matter (HPDM) using Dish Antenna in Millimeter-wave region”.

[111] T. Yamaji, “Search for X-ray photon-photon elastic scattering with a Laue-case beam collier”.

[112] S. Kamioka, “Search for Vacuum Magnetic Birefringence with Pulsed Magnets”.

[113] Y. Seino, “Search for Vacuum Diffraction Using high power laser and X-ray Free Electron Laser SACLA”.

招待講演

[114] S. Asai, “Probe into vacuum field using High-intensity X-ray Applications to the Particle Physics”, International Conference on X-ray Optics and Applications 2017 (XOPT’17), April 19, 2017, Pacifico Yokohama.

[115] K. Shu, “Toward a Realization of Bose-Einstein Condensation of Positronium”, 2nd Jagiellonian Symposium on Fundamental and Applied Subatomic Physics, June 6, 2017, Krakow, Poland.

[116] A. Ishida, “Study on positronium Bose-Einstein condensation”, The 3rd China-Japan Joint Workshop on Positron Science (JWPS2017), June 9, Hefei, China.

[117] A. Ishida, “Recent progress in positronium experiments for Bose-Einstein condensation”, Low Energy Antiproton Physics Conference 2018 (LEAP 2018), March 15, Paris, France.

ポスター

[118] M. Saito, “Search for Long-lived particles with the ATLAS detector”, European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP) 2017, July 5–12, 2017, Venice, Italy.

(国内会議)

一般講演

[119] 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”, 第 54 回アイソトープ・放射線研究発表会、2017 年 7 月 6 日、東京大学弥生講堂.

[120] 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”, 第 60 回放射線化学討論会、2017 年 9 月 27 日、つくば (産総研).

[121] 安達俊介, “ATLAS 検出器を用いたジェットと横方向消失運動量を持つ終状態でのグルイーノ探索”, 第 24 回素粒子物理国際研究センターシンポジウム、2018 年 2 月、長野県北安曇郡白馬村岳美山荘.

[122] 周健治, “ナノ空孔材料を利用した高密度・低温ポジトロニウムの生成”, 第 1 回産総研微細構造解析プラットフォーム設備利用講習会　陽電子プローブと機能材料および関連課題、2018 年 3 月 13 日、つくば (産総研).

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:2017 年 12 月

[123] 石田明, “ポジトロニウムの超微細構造の新しい方法による精密測定”.

[124] 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”.

日本物理学会秋季大会:宇都宮大学:2017 年 9 月

[125] 齊藤真彦, “LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるより短い消失飛跡再構成新手法の開発”.

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

[127] 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”.

[128] 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”.

[129] 山道智博, “ラウエ型チャンネルカット結晶を用いた弱結合未知粒子の探索”.

[130] 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”.

[131] 清野結大, “X 線自由電子レーザー施設 SACLA における高強度レーザーを用いた真空回折の探索”.

日本物理学会:第 73 回年次大会:東京理科大学:2018 年 3 月

[132] 齊藤真彦, “将来の大型ハドロン加速器実験における消失飛跡を用いた長寿命新粒子探索の展望”.

[133] 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”.

[134] 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”.

[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 II”.

[136] 清野結大, “X 線自由電子レーザー施設 SACLA における高強度レーザーを用いた真空回折の探索”.

[137] 上岡修星, “OVAL 実験: 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”.

招待講演

[138] 浅井祥仁, “光を使って真空や時空を探る”, 光・量子ビーム科学合同シンポジウム 2017, 2017 年 5 月 10 日, 大阪.

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。29 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、29 年度は以下のテーマについて研究を進めた。

孤立量子系の緩和

熱環境から孤立した量子系の熱平衡化過程について研究した。孤立量子系の熱平衡化を説明する有望な理論の一つとして、固有状態熱平衡化仮説 (ETH: Eigenstate Thermalization Hypothesis) がよく知られている。これは、系の各々のエネルギー固有状態自身がそのエネルギーを持つ熱平衡状態と同一視できるという仮説であり、理論的には仮説にすぎないが、これまでいくつかの模型について数値的に検証されてきた。その結果、可積分系では ETH は破れるが、非可積分系では ETH が満たされるらしいことがわかってきた。我々は、この ETH の熱平衡化のシナリオの反例となる理論模型を構成した [9, 10]。この新しく提案した模型では、非可積分系でありながら、ETH が破れることを厳密に証明できる。この結果は、孤立量子系の熱平衡化を説明するメカニズムとして、従来考えられてきたものでは不十分であり、これからの理論研究を深めることの必要性なことを示している [31]。また、半古典領域において熱平衡化がどのように起こるかを研究した。その結果、古典極限で得られる力学系がエルゴード性を示すことと、もとの量子系が ETH を満たすことが等価であるという理論的説明、および数値的証拠を得た。これらの成果に関して、京都で開催された国際会議で招待講演を行った [11]。また、この問題について包括的に論じた招待レビュー論文（J. Phys. B）の執筆を行なった。

周期外場によって駆動された量子多体系のダイナミクス

昨年度に引き続き、周期外場によって駆動された量子多体系について研究した。今年度は、可積分系が周期外場によってどこまで温度が上昇するかを調べた。可積分系では保存量が存在するために、周期外場で駆動し続けたとしても、ある有限の温度でエネルギー吸収が止まるだろうと考えられてきたが、我々は、系のサイズと駆動する外場の周期の両方を無限大に近づける極限で、系は漸近的に温度無限大の状態に緩和していくことを明らかにした。また、この漸近的な領域で系が吸収するエネルギー量が、外場の周期とシステムサイズについてスケーリング則を示すことを明らかにした。この研究は羽田野研究室（生産技術研究所）との共同研究である。

量子マスター方程式による光双安定性 (Optical Bistability) における有限サイズ効果

マイクロキャビティに閉じ込められた原子の離散準位やスピン自由度など離散自由度と、外部から駆動されたキャビティ光子の相互作用はさまざまな興味深い協力現象を引き起こし、そのため、相互作用の強さと駆動外場の強さの関数としていろいろな動的相転移が起こる。その典型的な現象として光双安定性 (Optical Bistability) がある。この現象に関する量子マスター方程式による解析はこれまで盛んに行われ、平均場近似によって相図などが明らかになってきている。また、最近、マイクロキャビティを特徴づける量として、離散自由度の数 N（スピン数）とキャビティ内の光子数 n の比が指摘され、$N > n$ の領域 (I) では相互作用のため強い量子効果 (真空 Rabi 分裂) が現れ、$N < n$ の領域 (II) では、光子は古典電磁場とみなされ通常の共鳴現象 (Rabi 振動) が現れることが知られている。これまでの光双安定性転移は主に、領域 (I) と領域 (II) をまたぐ変化として調べられてきた。しかし、量子効果が強い領域 (I) 内部でも光双安定性転移が起こることを指摘し、実際の実験状況に即して、有限の粒子数でのその遷移を量子マスター方程式の直接数値計算によって明らかにした [37, 45, 24]（図 3.1.1）。この研究は藤堂研究室との共同研究である。

量子 Stoner-Wohlfarth 模型における磁化反転に伴う様々な現象

Stoner-Wohlfarth 模型を量子化した量子 Stoner-Wohlfarth 模型において、磁化反転に伴う様々な現象を調べた。特に、Stoner-Wohlfarth 点を境にして擬交差点の間隔が変化すること、磁化反転後の量子状態の分布がスピンの大きさに依らない特徴をもっていること、有限の速さで磁場を掃引したときの磁化反転の遅れにエネルギーギャップの臨界性が反映されることなどを明らかにした [12]。

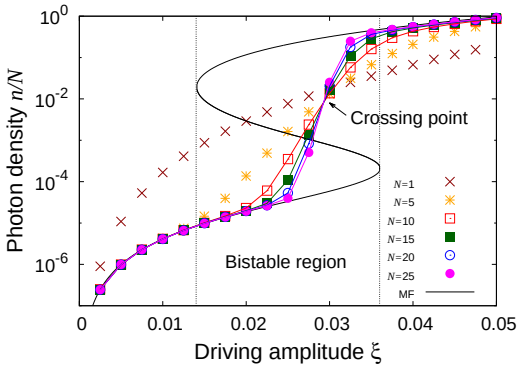


図 3.1.1: 有限自由度での光双安定性 (Optical Bistability) 転移

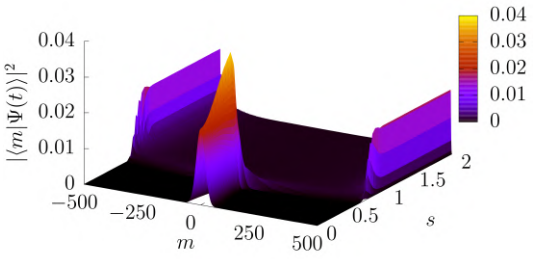


図 3.1.2: 断熱時間発展の加速による BEC 猫状態の生成過程

断熱時間発展の加速

断熱時間発展の加速と呼ばれる、断熱時間発展があたかも有限の時間で実現しているかのように系を制御する方法に関して研究をおこなった。断熱時間発展の加速は目的とする量子状態を高速かつ高精度で得ることができる強力な手法であるが、制御ハミルトニアンが非局所的かつ多体の相互作用を含み、相転移点などで発散するという問題点がある。我々が提案した平均場近似を用いた手法 [13, 21, 50] では、制御ハミルトニアンが局所的な 1 体相互作用のみで与えられる。また、近似を含んでいるにも関わらず、数値計算により高い精度で断熱時間発展を模倣することができることがわかった。それゆえ、実験で容易に実現することができ、かつ高精度で目的の状態が得られることが期待される。また、断熱時間発展の加速を利用して、ボース-アインシュタイン凝縮体において猫状態を生成する手法を提案した [14, 22, 51] (図 3.1.2)。また、数値計算により従来の断熱時間発展を用いた生成方法よりも高速で十分な大きさの猫状態を生成することができることを明らかにした。提案した制御ハミルトニアンは 2 体の相互作用のみで与えられるので、実験での実現も可能であると考えている。

エンタングルメントを起源とする前期熱平衡化現象 (entanglement prethermalization)

系が熱平衡状態に到達するよりも前に長い寿命を持った準定常状態に緩和する現象を前期熱平衡化 (prethermalization) という。初期状態に部分系間のエンタングルメントがあり、さらにエネルギー縮退を持つ系を考えると、時間発展した後も初期のエンタングルメントが生き残り、準定常状態への緩和を引き起こすのが entanglement prethermalization のメカニズムである。今年度は一次元ボース気体を記述する模型として朝永-Luttinger 模型を考え、粒子数が 10000 個程度の大きな粒子系でも entanglement prethermalization が生じることを数値計算によって示し、さらに準定常状態が一般化ギブス分布で記述できることを明らかにした [15, 25, 26]。この研究は上田研究室との共同研究である。

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

スピン軌道相互作用 (SOC) と磁場 (Zeeman splitting (ZS)) の相乗効果による現象を明らかにするため、SOC を考慮した hopping 積分を用いた 1 次元ハバード模型のエネルギー構造 (図 3.1.3) を調べ、光学伝導度などを久保公式を用いて調べた [5]。特に、金属状態での電子双極子スピン共鳴 (EDSR) と, モット絶縁体相での光学伝導度に注目し、SOC を特徴づける D ベクトルと磁場 H の方向の相対的な角度 α の関数として、それらの量がどのように変化するかを明らかにした。まず、ハバードパラメータ U がない場合のスピン共鳴を調べ、SOC あるいは ZS のどちらも単独の場合には現れない共鳴が両者が共存する場合に現れることを見いだした。さらに、U が存在する場合も数値計算によって、共鳴の α 依存性を明らかにした。

多軌道モット絶縁体でのサブギャップ光学伝導とそのキタエフ物質への応用

モット絶縁体状態では光学伝導度はギャップを持つ。しかしながら、特に、交流外場に応答する分数化された低励起をもつスピン液体などでは仮想的な電子遷移を通してサブギャップ光学電動は可能である。最近の α-RuCl3 に関するテラヘルツ吸収の実験に触発され、我々は蜂の巣格子上のキタエフ模型で表される物質での電磁波吸収の理論を、t_{2g} 軌道にホールをもつ多軌道ハバード模型において構築した。それによって、近接ホッピング遷移の 2 次でのスピン-分

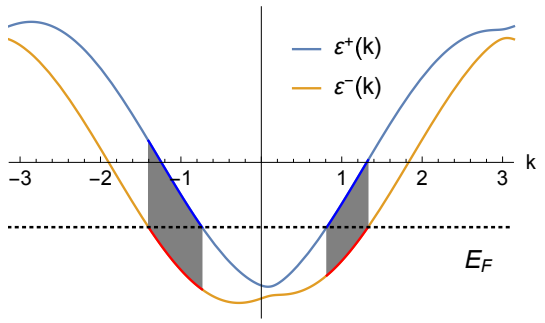


図 3.1.3: SOC を考慮した hopping 積分を用いた 1 次元ハバード模型のエネルギー構造

極結合の機構を導き、解析計算と数値計算によって量子スピン液体を示すキタエフ物質のサブギャップ光学伝導をマヨラナフェルミオンを用いて定式化した [35, 56]。この研究は桂研究室、小形研究室との共同研究である。

局在状態の局所的外場に対する応答と操作

VBS 的基底状態を持つ 1 次元量子スピン模型においては、端や不純物の周辺に実効的なスピン自由度が誘起されることが知られている。このようなスピン自由度については実験的な検証も盛んに行われており、ロバストな量子ビットとしての応用などが提案されている。このような性質を持つ模型として、不純物スピンをドープした AKLT 模型と、反強磁性相互作用の強さに交替構造を持つハイゼンベルグ模型に着目して研究を進めた。このような模型の基底状態において生じる実効的なスピン自由度に対して、状態の行列積波動関数の構造に着目し、自由度の特徴づけを一般性のある形で行った。その結果、実効的なスピン自由度は、磁化の局在相関長と行列の構造に関する相関長の 2 つの長さスケールによって特徴付けられることを発見した。後者が前者よりも短いことが予想され、磁化の相関が重なる場合にも、実効的自由度に対応する実効的外場を定義することで、自由度が外場に対して真のスピン自由度と同様に振る舞うことを示し、集密度の高い実効スピン系においても独立な量子ビットとしての操作が可能であることを示した [47]。

ベリー曲率のもとでの粒子ダイナミクス

ベリー位相の種々の輸送現象における役割が詳しく調べられてきているが、粒子の拡散の実時間ダイナミクスに関するベリー位相の効果についてはあまり知られていない。我々は、実空間、運動量空間、それらの交差空間でのベリー曲率を取り入れた拡散現象を解析し、散逸環境のもとでの粒子の拡散初期過程において、ベリー曲率が大きな役割をすることを明らかにした。さらに、それぞれの空間でのベリー曲率によって興味深い特異な現象が現れることを示した [16]。この研究は永長研究室との共同研究である。

3.1.2 協力現象の統計力学

多重な秩序変数を持つ系での準安定性の研究

積層欠陥や層状スピンクロスオーバー系などでは多重な秩序変数を持つ系では逐次的な 1 次相転移が観測される。これらの系における準安定状態の広がりを研究し、実際に温度などのパラメータを掃引した場合にどのような相図が得られるかを、典型的な多重秩序相をもつ ANNNI モデルで調べた。準安定状態はスピノーダル点で消滅するが、ANNNI モデルでは準安定状態が広い範囲に広がり多重な秩序変数が共存することが明らかになった。そのような場合には、熱擾乱などによって自由エネルギー障壁を乗りこえる核生成が重要な役割をすると考えられる。自由エネルギー構造のもとでのミニマム経路法でそのようなゆらぎの形態について研究した [19, 36]。

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で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。特に、高スピン (HS) 状態から中間相を経由して低スピン（LS) 状態に変化する二段階のステップによるスピンクロスオーバー相転移の解析には反強磁性イジング模型が用いられる。しかし、通常のイジング模型とは異なり格子変形に伴う弾性相互作用効果によって長距離強磁性相互作用が現れる。そのため、短距離反強磁性相互作用と長距離強磁性相互作用の競合の結果、角状の強磁性-常磁性相転移線をもつ興味深い相があることを弾性相互作用を取り入れたスピンクロスオーバーモデルで明らかにした [2]。さらに、3 次元モデルの相変化の様子を大規模シミュレーションで明らかにした [3]。光照射による励起によって、HS-LS 転移を誘起する動的な過程において熱効果による膨張に先駆けて起こる弾性相互作用誘起膨張現象に関するモデル化を行い、照射のタイプによる種々の遷移過程を明らかにした [4]。

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。特に、永久磁石の性能の向上を目的に，保磁力の微視的起源を原子スケールのスピン模型を用いて解析している [6, 7]。

実際の磁石では、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。29 年度は、保磁力の律速過

程を与える単独磁気グレインの磁化反転に関して、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、保磁力の温度依存性、サイズ依存性を調べた。磁化反転の律速過程を明らかにするため、磁化の関数としての自由エネルギー構造を Wang-Landau 法を用いたモンテカルロ法によって調べ、保磁力の温度依存性を明らかにした。特に、$Nd_2Fe_{14}B$ 磁石の複雑な結晶構造を取り入れたシミュレーションの特徴を活かして原子を特定した秩序状態の温度変化についても明らかにした [38]。さらに、強磁性体の秩序化では双極子相互作用が重要な役割をする。しかし、双極子相互作用は長距離相互作用であるため計算に工夫が必要である。これまでに長距離相互作用系を厳密かつ効率よく解く方法として SCO 法と呼ばれるモンテカルロ手法が提唱されていた。しかし、この手法はアモルファス系などの複雑な格子構造をもつ系に適用すると計算効率が下がるため、1 ユニットセルに 68 個のスピンが存在する NdFeB 系の原子スケール模型へそのまま適用するには不適当であった。そこで、そのような場合にも効率よい計算ができる新しいアルゴリズムを開発した。その方法を用い、有限温度での鉄原子の弱い異方性が磁石全体の保磁力に重要な役割を果たしていることを明らかにした [8](図 3.1.4)。

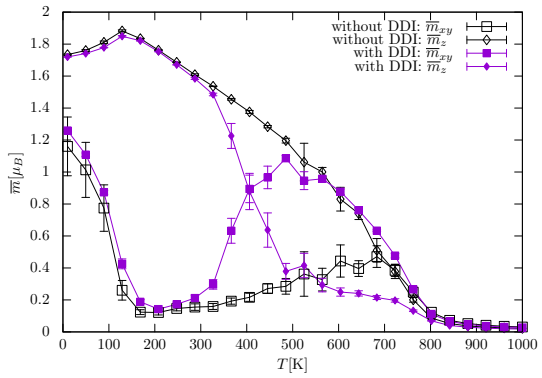


図 3.1.4: 鉄の異方性の有無による双極子相互作用下での磁化の温度変化

さらに大きな系のシミュレーションを行うため、繰り込み群のブロックスピン変換の考え方を利用した粗視化アルゴリズムの開発を行なった [46]。

また、$Nd_2Fe_{14}B$ は Nd の異方性エネルギーが c 軸から傾いていることを反映して低温では磁化の向きが変化する再配置転移が起こる。このような場合での強磁場共鳴（FMR) の特徴を明らかにした [44]。

＜受賞＞

[1] Seiji Miyashita, Outstanding Referee for the journals of the American Physical Society, American Physical Society, 10 January 2018.

＜報文＞

(原著論文)

[2] Masamichi Nishino, Seiji Miyashita, and Per Arne Rikvold, Nontrivial phase diagram for an elastic interaction model of spin crossover materials with antiferromagnetic-like short-range interactions, Phys. Rev. B **96**, 144425 (2017).

[3] Laurentiu Stoleriu, Masamichi Nishino, Seiji Miyashita, Alexandru Stancu, Andreas Hauser, and Cristian Enachescu, Cluster evolution in molecular three-dimensional spin-crossover systems, Phys. Rev. B **96**, 064115 (2017).

[4] Cristian Enachescu, Laurentiu Stoleriu, Masamichi Nishino, Seiji Miyashita, Alexandru Stancu, Maciej Lorenc, Roman Bertoni, Hervé Cailleau, and Eric Collet, Theoretical approach for elastically driven cooperative switching of spin-crossover compounds impacted by an ultrashort laser pulse. Phys. Rev. B **95**, 224107 (2017).

[5] Adrien Bolens, Hosho Katsura, Masao Ogata, and Seiji Miyashita, Synergetic effect of spin-orbit coupling and Zeeman splitting on the optical conductivity in the one-dimensional Hubbard model, Phys. Rev. B **95**, 235115 (2017).

[6] Satoshi Hirosawa, Masamichi Nishino and Seiji Miyashita, Perspectives for high-performance permanent magnets: applications, coercivity, and new materials, Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.**8**, 013002, (2017).

[7] Seiji Miyashita, Masamichi Nishino, YutaToga,Taichi Hinokihara,Takashi Miyake, Satoshi Hirosawa, and Akimasa Sakuma, Perspectives of stochastic micromagnetism of Nd2Fe14B and computation of thermally activated reversal process, Scripta Materialia, (2017), in Press

[8] Taichi Hinokihara, Masamichi Nishino, Yuta Toga, and Seiji Miyashita, Exploration of the effects of dipole-dipole interactions in Nd2Fe14B thin films based on a stochastic cutoff method with a novel efficient algorithm, Phys. Rev. B in press.

[9] Naoto Shiraishi and Takashi Mori, Systematic Construction of Counterexamples to the Eigenstate Thermalization Hypothesis, Phys. Rev. Lett. **119**, 030601 (2017)

[10] Takashi Mori and Naoto Shiraishi, Thermalization without eigenstate thermalization hypothesis after a quantum quench, Phys. Rev. E **96**, 022153 (2017)

[11] Takashi Mori, Classical ergodicity and quantum eigenstate thermalization: Analysis in fully connected Ising ferromagnets, Phys. Rev. E **96**, 012134 (2017)

[12] Takuya Hatomura, Bernard Barbara, and Seiji Miyashita, Distribution of eigenstate populations and dissipative beating dynamics in uniaxial single-spin magnets, Phys. Rev. B **96**, 134309 (2017).

[13] Takuya Hatomura, Shortcuts to Adiabaticity in the Infinite-Range Ising Model by Mean-Field

Counter-Diabatic Driving, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 094002 (2017).

[14] Takuya Hatomura, Shortcuts to adiabatic cat-state generation in bosonic Josephson junctions, New J. Phys. **20**, 015010 (2018); Invited paper for the special issue “Focus on Shortcuts to Adiabaticity”.

[15] Eriko Kaminishi, Takashi Mori, Tatsuhiko N. Ikeda and Masahito Ueda, Entanglement prethermalization in the Tomonaga-Luttinger model, Phys. Rev. A **97**, 013622 (2018).

[16] Kou Misaki, Seiji Miyashita, and Naoto Nagaosa, Diffusive real-time dynamics of a particle with Berry curvature, Phys. Rev. B **97**, 075122 (2018).

(国内雑誌)

[17] 宮下精二, コスタリッツ-サウレス転移, 現代物理学のキーワード, 日本物理学会誌 **72**, 552 (2017)

[18] 森貴司, 桑原知剛, 齊藤圭司, 周期駆動下での量子多体系の非平衡緩和過程, 日本物理学会誌, **72**, 800 (2017)

(学位論文)

[19] 後藤優太 (Yuta Goto) : 多重な秩序変数を持つ系での準安定性の研究 (Study on metastable states in systems with multiple order parameters) 修士論文 (東京大学 2018)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[20] Seiji Miyashita, Atomic scale simulation(LLG,and MC) of magnetic reversal at finite temperatures. IEEE Magnetics (Intermag2017) Bublin, Ireland, 2017.04.24-27.

[21] Takuya Hatomura, Fast quantum annealing for the infinite-range Ising model by mean-field counterdiabatic driving, Adiabatic Quantum Computing Conference 2017, GranTokyo South Tower, 2017.6.26-29.

[22] Takuya Hatomura, Shortcuts to adiabatic cat-state generation in Bose-Einstein condensates, The 2nd International Symposium on Dynamics in Artificial Quantum Systems (DAQS2018), The University of Tokyo, 2018.1.15-17.

[23] Takashi Mori, Tomotaka Kuwahara, and Keiji Saito, Floquet-Magnus theory and generic transient dynamics in periodically driven many-body quantum systems, 14th Granada Seminar, Granada, Spain, 2017.6.20-23.

[24] Tatsuhiko Shirai, Takashi Mori, Seiji Miyashita, ”Floquet Gibbs state in time periodically driven open quantum systems”, 14th Granada Seminar, University of Granada, 2017.6-20.23.

[25] Eriko Kaminishi, Takashi Mori, Tatsuhiko Ikeda, Masahito Ueda, Entanglement prethermalization in one-dimensional Bose gas, 14th Granada Seminar - Quantum Systems In and Out of Equilibrium : Fundamentals, dynamics and applications-, Granada, Spain, 2017.6.20-23.

[26] Eriko Kaminishi, Takashi Mori, Tatsuhiko Ikeda, Masahito Ueda, Entanglement prethermalization in coherently split one-dimensional Bose gases, Quantum Thermodynamics: Thermalization and Fluctuations, Kyoto, Japan, 2017.09.27-30.

招待講演

[27] Seiji Miyashita, Atomic scale simulations(LLG and MC) of magnetization reversal at finite temperatures, COMA-RUGA 2017,13th International Workshop on Magnetism & Superconductivity at the Nanoscale, Nuba Hotel Comarruga Spain., 2017.7.2-7.

[28] Seiji Miyashita, Masamichi Nishino, Yuta Toga, Taichi Hinokihara, Takashi Miyake, Satoshi Hirosawa, Hisazumi Akai, Shotaro Doi and Akimasa Sakuma, Size and field dependence of the trigger process of the magnetization reversal of Nd2Fe14B magnet, Yamada Science Foundation Junjiro Kanamori Memorial International Symposium-New Horizon of Magnetism-, Koahiba Hall,The University of Tokyo,Tokyo,Japan,2017.9.21-24.

[29] Yuta Toga, Shotaro Doi, Munehisa Matsumoto, Seiji Miyashita, Hisazumi Akai, Free energy barrier at magnetization reversal for rare-earth permanent magnets, Yamada Science Foundation Junjiro Kanamori Memorial International Symposium-New Horizon of Magnetism-, Koahiba Hall,The University of Tokyo,Tokyo,Japan,2017.9.21-24.

[30] Seiji Miyahita,Quantum aspects of the collapse of metastable state, The 5th Workshop on Physics between Ecole Normale Superieure and University of Tokyo, Faculty of Science Bldg.4,The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2017.11.15-16.

[31] Takashi Mori, Construction of translation-invariant nonintegrable models without eigenstate thermalization, Quantum Thermodynamics: Thermalization and Fluctuations, Kyoto, Japan, 2017.9.27-30.

[32] Takashi Mori, Construction of counterexample to eigenstate thermalization hypothesis, The 4th East Asia Joint Seminars on Statistical Physics, Kaohsiung, Taiwan, 2017.10.17-20.

(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, 元素戦略磁性材料研究拠点第 11 回磁性材料研究拠点成果報告会, TKP ガーデンシティ PREMIUM 名駅西口,2017.6.9-10.

[34] 檜原太一, 西野正理, 栂 裕太, 宮下精二, ネオジム磁石中の双極子相互作用の理論解析, 一般社団法人日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2017.9.21-24.

[35] Adrien Bolens, Hosho Katsura, Masao Ogata,Seiji Miyashita, Charge fluctuation and potical response in two-dimensional Mott insulators, 一般社団法人日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2017.09.21-24.

[36] 後藤優太, 宮下精二, ANNNI モデルにおける準安定平衡状態図, 一般社団法人日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2017.9.21-24.

[37] 白井達彦, 藤堂眞治, 宮下精二, 並列化計算を用いた量子キャビティ系での光双安定性の解析, 一般社団法人日本物理学会　2017 年秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2017.9.21-24.

[38] 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, 一般社団法人日本物理学会　2017 年秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2017.9.21-24.

[39] 西野正理, 檜原太一, 宮下精二, ネオジム磁石の原子論的モデルによる磁化反転ダイナミクス, 一般社団法人日本物理学会　2017 年秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2017.9.21-24.

[40] 森貴司, 量子系の Eigenstate thermalization hypothesis と古典系のエルゴード性の関係：全結合 Ising 模型による解析, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学（上田キャンパス）, 2017.9.21-24.

[41] 白石直人, 森貴司, Eigenstate thermalization hypothesis を破る非可積分系の具体的構成, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学（上田キャンパス）, 2017.9.21-24.

[42] 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 12 回磁性材料研究拠点成果報告会, 国立研究開発法人　物質・材料研究機構, 2017.12.1-2.

[43] 白井達彦, 藤堂眞治, H. De Raedt, 宮下精二「共振器系で起こる光双安定性の微視的模型による記述」, 第 1 回ポスト「京」萌芽的課題「基礎科学の挑戦」・「極限マテリアル」合同公開ワークショップ, ステーションコンファレンス東京, 2018.1.30.

[44] 西野正理, 宮下精二, ネオジム磁石における強磁性共鳴の理論解析, 一般社団法人日本物理学会 2018 年春季大会, 東京理科大学 野田キャンパス, 2018.3.22-25.

[45] 白井達彦, 藤堂眞治, 宮下精二, 共振器系で起こる光双安定性の微視的模型による記述, 一般社団法人日本物理学会 2018 年春季大会, 東京理科大学 野田キャンパス, 2018.3.22-25.

[46] 檜原太一, 西野正理, 栂　裕太, 宮下精二, 原子スケール模型の粗視化模型の構築と保磁力解析, 一般社団法人日本物理学会 2018 年春季大会, 東京理科大学 野田キャンパス, 2018.3.22-25.

[47] 中野　颯, 宮下精二, 1 次元量子スピン系における局材状態の局所的外場に対する応答と操作, 一般社団法人日本物理学会 2018 年春季大会, 東京理科大学 野田キャンパス, 2018.3.22-25.

[48] 檜原太一, 西野正理，栂裕太，宮下精二， Study on dipole-dipole interaction Nd2Fe14B magnets by stochastic cut-off method, 第 11 回 ESICMM 成果報告会, 愛知県名古屋市, 2017.6.9-10

[49] 檜原太一, 西野正理, 栂裕太, 宮下精二,Coarse-graining method of atomistic spin models for analysis of large-scale systems with dipole-dipole interaction, 第 12 回 ESICMM 成果報告会, 物質・材料研究機構, 2017.12.1-2.

[50] 鳩村拓矢, 平均場近似を用いた局所制御ハミルトニアンによる断熱時間発展の加速, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2017.9.21-24.

[51] 鳩村拓矢, 2 成分 Bose-Einstein 凝縮体における猫状態の断熱生成の加速, 日本物理学会 第 73 回年次大会, 東京理科大学 野田キャンパス, 2018.3.22-25.

[52] 上西慧理子，池田達彦，森貴司，上田正仁, 一次元ボース気体におけるエンタングルメントを起源とする前期熱平衡現象，日本物理学会 2017 年秋季大会，2017.9.21.

(セミナー)

[53] 森貴司, Systematic Construction of Counterexamples to Eigenstate Thermalization Hypothesis, Qulink セミナー, 国立情報学研究所, 2017.5.30.

[54] 上西慧理子, Prethermalization, thermalization, and recurrence in one dimensional Bosons, 京都大学基礎物理学研究所, 2017.5.22.

[55] 上西慧理子, Prethermalization, thermalization, and recurrence in one dimensional Bosons, 東京工業大学　笹本研究室 2017.7.14.

[56] Adrien Bolens, Mechanism for sub-gap optical conductivity in honeycomb Kitaev materials, University of Tokyo (Komaba campus), 2017.10.24.

[57] Tatsuhiko Shirai, Synge Todo, Hans De Raedt, Seiji Miyashita, “Microscopic description of Optical Bistability”, 川島研・藤堂研合同セミナー, 東京大学, 2017.1.04.

[58] Tatsuhiko Shirai, Synge Todo, Hans De Raedt, Seiji Miyashita, “Microscopic description of Optical Bistability”, 統計力学セミナー, 東京大学, 2017.10.23.

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。

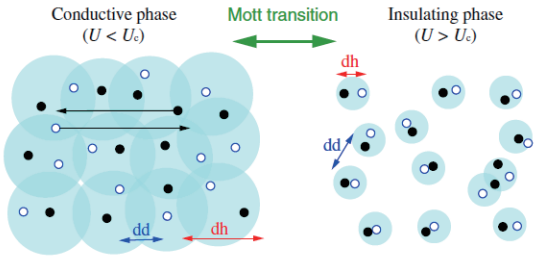


図 3.2.1: 黒丸が doublon、白丸が holon を表す。右は束縛状態を作った絶縁体状態（モット絶縁体）で、左は束縛状態が重なり合って金属となった状態。右図の状態に動けるキャリアがドープされた状態が、高温超伝導の舞台であると考えられる。

擬ギャップ状態における異常な準粒子分散関係

銅酸化物超伝導体の有限温度・低ホールドープ領域に見られる擬ギャップ状態の起源は未だに明らかになっていない。現在でも、従来の反強磁性ゆらぎまたは超伝導ゆらぎによる観点からは解釈できないような、新たな実験的発見が続いている。そのひとつに、角度分解高電子分光（ARPES）実験によって発見された擬ギャップ状態における特異な準粒子分散関係が挙げられる。これは、ブリルアンゾーン境界における準粒子の分散関係が、超伝導および反強磁性状態から期待されるものと明確に異なるというもので、何らかの隠れた秩序状態の存在を示唆している。そこで我々は，交替フラックス状態と呼ばれる状態を仮定し、t-J 模型を用いて Gutzwiller 近似の範囲で準粒子分散関係を調べたところ、ARPES による観測結果をよく再現する分散関係が得られた。これにより、擬ギャップ状態において交替フラックス状態の強いゆらぎが存在する可能性が示唆された。[18, 31]

T′ 型銅酸化物超伝導体における超伝導

最近、T′ 型とよばれる構造をもつ電子ドープ型の銅酸化物超伝導体において、試料作成時に過剰に混入した酸素を十分な還元処理により除去すると、従来は反強磁性相と考えられていた低電子キャリア領域においても超伝導転移が見られるという実験結果が報告されている。これは、少なくとも一部の T′ 型超伝導体においては、電荷移動ギャップがほぼ消失していることを示唆している。そこで我々は、CuO_2 面における酸素の自由度を明示的に取り入れた 2 バンド有効模型を用いて、揺らぎ交換近似（FLEX）の範囲で超伝導転移の可能性を調べた。電荷移動ギャップについて、これまで特に顧みられることのなかった広い範囲について調べることにより、実験で報告されているような超伝導転移が確かに見られることが分かった。さらに、電子ドープ濃度およびホールドープ濃度に対する超伝導転移温度の変化は、実験結果とよく一致することが分かった。[17, 30]

3.2.2 ディラック電子系

単層グラファイト（グラフェン）やトポロジカル絶縁体の表面状態、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。

物質中の量子電磁力学

ディラック電子系物質が示す大きな反磁性と量子電磁力学 (QED) における真空分極との間には美しい対応があり、絶対零度の絶縁体において動的電気感受率と動的磁化率は単純な比例関係で結ばれることを見出した。すなわち、ディラック電子系は誘電率の著しい増大と大きな反磁性という 2 つの際立った性質によって特徴付けられ、それらは物質中のディラック方程式が満たす有効的なローレンツ共変性によって結ばれていることを明らかにした。さらに、この結果を導出する過程において、通常の温度グリーン関数の方法をディラック電子系へと拡張し、ディラック方程式の共変性が明らかな形に定式化した (物質中の QED)。この物質中の QED をつかうと、「ディラック電子系の有限温度における動的応答関数を久保公式から微視的に導出する」という複雑な計算も容易に遂行することができる。実際、物質中の QED をもちいてディラック電子系の核磁気緩和率やスピンホール係数などの系統的な研究を行った。[3, 4, 23, 32, 40, 50]

ディラック電子系物質の不純物効果と核スピン緩和率

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 $1/T_1$ 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 [2, 4, 22, 32]。実際、ワイル半金属 TaP において核スピン緩和率が温度の三乗に比例することが見つかり、軌道効果によるものではないかと考えられている。この振る舞いは 30K を超えた温度で見られる一方、30K 以下で

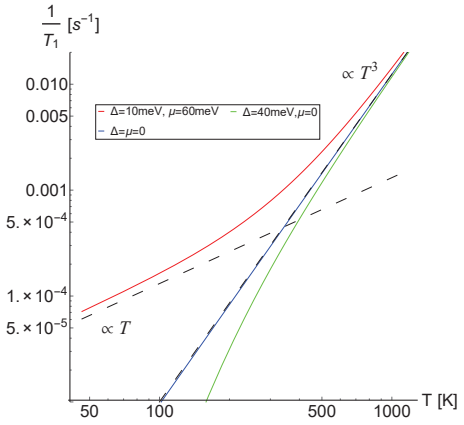


図 3.2.2: ディラック電子系での核スピン緩和率

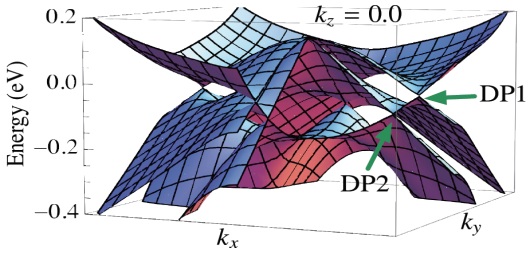


図 3.2.3: Ba_3SnO のフェルミエネルギー近傍の分散関係。DP1 と DP2 が 2 つの Twin Dirac 点を示している。

は温度の低下につれて $1/T_1T$ が上昇していることがわかった。この現象を理解するために、不純物効果と化学ポテンシャルの温度依存性を取り入れた上で、核スピン緩和率の計算を行った。[2, 42]

Twin Dirac 電子系の発見

グラフェンやビスマス以外に、ディラック電子系を持つ新しい物質を発見することは、当該分野における重要課題のひとつである。我々は以前、第一原理電子状態計算を用いて立方晶逆ペロブスカイト物質 Ca_3PbO(及びその関連物質) を新しいディラック電子系として提案した。この物質群は 3 次元的であり、かつディラック点がまさにフェルミエネルギーのところに位置している。さらに我々は関連物質である Ba_3SnO の電子状態を詳細に解析し、Ba_3SnO においては 2 つのディラック点がエネルギー・運動量空間できわめて近接して現れることを見出した (図 3.2.3 参照)。スピン軌道相互作用がバンド反転より大きい場合に、このような双子のディラック点が現れる。これらのパラメータは元素置換によって実現できることも理論的に示した。[7]

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、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含め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。[1, 19]

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。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。[19, 33, 34]

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。[19, 26, 33, 34]

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。[36]

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。その結果、電子系では見出されていない高い巻き付き数を持った特異スピン構造を発見した。この 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かつ完全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。[6, 20]

Z_2 指数とディラックノーダルライン

近年、ディラックノーダルラインと呼ばれる、分散関係に線的に繋がった縮退をもつ系が注目されている。そのような物質の探索においては、主に計算コストの事情から、ブリルアンゾーンの対称点の情報を用いた手法を用いるのが望ましい。実際に、スピン軌道相互作用を無視した場合について、空間反転固有値から計算される Z_2 指数を用いた方法が提案されている。また、そのような系にスピン軌道相互作用を導入した場合、トポロジカル絶縁体やディラック電子系など、他のトポロジカルに非自明な電子状態が現れることが知られている。我々は第一原理計算などを用いて、従来の Z_2 指数では自明と判定されるが、スピン軌道相互作用を無視した場合にディラックノーダルラインを持つ系の一例 (面心立方格子の SnSe) を発見した。また、面心立方格子の SnSe はスピン軌道相互作用を考慮すると、トポロジカル結晶絶縁体となることも明らかにした。このことから、Z_2 自明なディラックノーダルラインと、トポロジカル結晶絶縁体との間の関連が示唆される。[15, 21, 41]

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

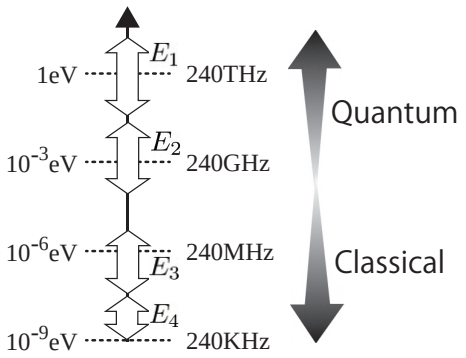


図 3.2.4: 電荷励起に関する 4 つのエネルギースケール

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。[13, 14, 20]

3.2.5 有機伝導体

電荷励起に関するエネルギーランドスケープ

1/4-filled 強相関分子性固体の多様な基底状態は、ダイマーモット状態 (DM) と電荷秩序状態 (CO) を両極とし、これらを dimerization の度合いによって繋ぐことで統一的に記述できる。出発点となるモデルのエネルギースケールは eV〜10^{14}Hz 程度であり、「高エネルギーハミルトニアン」である。これに対して、最近の κ-$ET_2Cu_2(CN)_3$ において 50K 以下で見られる kHz オーダーの誘電異常は、エネルギーとして 10^{10} の違いがある (図 3.2.4)。我々は、このような 10 桁以上にも及ぶ広大なエネルギースケールの広がりが、電子自由度だけを含むハミルトニアンから“創発”される仕組みを探求した。具体的には、ダイマー内電荷変位に関する分域 (ドメイン) ができ、このドメイン壁のゆっくりとした運動が誘電異常を引き起こすと考えることによって「10 桁問題」が理解できることを示した。[11, 25, 48]

有機導体 α-$(ET)_2I_3$ における電子相関効果

有機導体 α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ は、圧力下においてディラック電子系 (ゼロギャップ状態) の性質を示すことが知られ、盛んに研究がされてきている。我々は、この物質における電子相関効果に着目し、変分モンテカルロ法と自己無撞着 RPA により電子状態を調べた。その結果、自己無撞着 RPA により得られた温度圧力相図は、実験結果を定性的に再現することが分かった。[44] この相図では、常圧で生じる電荷秩序状態が圧力によって抑制され、ディラック電子系が現れる。この結果は変分モンテカルロ法による絶対零度での計算結果とも整合する。[35] さらに、準粒子バンドを計算し、圧力印加の方法として静水圧と一軸圧の場合を比較した結果、前者でのディラック電子系の出現に対して、電子相関効果が重要な役割を果たしうることを明らかにした。[35, 44, 51, 53, 54]

3.2.6 スピン系およびスピン軌道相互作用

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による新しいスピン液体

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 [5]。

チェッカーボード格子 J_1-J_2-J_3 イジング模型における磁化過程

近年、フラストレーションがある古典スピン模型において、次近接以降の相互作用を考えると、分数自由度（磁気モノポール）がクラスターを組む新奇なスピン液体状態が実現する事が明らかになった。この状態に磁場をかけると、相互作用とゼーマンエネルギーの競合によって新たな状態が誘起されると期待される。このような背景のもと、我々はチェッカーボード格子上の J_1-J_2-J_3 イジング模型の基底状態および磁化過程を調べた。その結果、有限の磁場によって新しい古典スピン液体状態が発現する事を明らかにした。また、この状態は磁化曲線中のプラトーによって特徴づけられる。

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。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。[12, 28, 29]

$5d$ 電子系におけるジャロシンスキー・守谷相互作用

スピン軌道相互作用の大きい系として注目を集める $5d$ 電子系においては新たな形のジャロシンスキー守谷相互作用 (DMI) の発現が期待される。この問題の理解のため、我々は反転対称が破れた立方晶に対応する 2 サイトモデルを厳密対角化により解析した。その結果、通常のスピンで記述される DMI とは異なったふるまいを持つ、全角運動量で記述される新たな形の DMI を見出した。さらに、$5d^1$ 電子系においては、多極子モーメント間で DMI に類似した相互作用が生じることが明らかになった。[43]

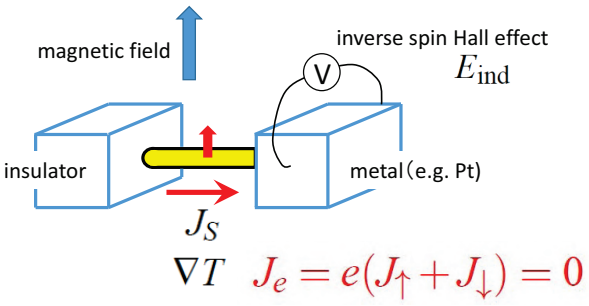


図 3.2.5: スピンゼーベック効果測定のためのセットアップ。

量子細線におけるスピンゼーベック効果

久保公式と温度グリーン関数を用いてスピンゼーベック係数を微視的に導いた。図 3.2.5 のような配置にすれば、通常電流が流れず純粋なスピン流の効果を測定することができる。磁場下で、不純物の効果は自己無撞着 t-matrix 近似により取り入れる。とくに、化学ポテンシャルが 1 次元のバンドエッジに近い場合には、誘起されたスピン流を逆スピンホール効果で観測すれば十分な大きさがあることが分かった。実際の計算では熱流に対する不純物ハミルトニアンの効果を考慮する必要がある。[10, 46, 47]

＜報文＞

(原著論文)

[1] M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 044713-1-18 (2017). “Theory of Magnetization in Bloch Electron Systems”

[2] T. Hirosawa, H. Maebashi, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 063705-1-5 (2017). “Nuclear Spin Relaxation Time Due to the Orbital Currents in Dirac Electron Systems”

[3] H. Maebashi, M. Ogata, and H. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 083702-1-4 (2017). “Lorentz Covariance of Dirac Electrons in Solids: Dielectric and Diamagnetic Properties”

[4] H. Maebashi, T. Hirosawa, M. Ogata, and H. Fukuyama: to appear in J. Phys. Chem. Solids (2018), doi:10.1016/j.jpcs.2017.12.034. “Nuclear Magnetic Relaxation and Knight Shift Due to Orbital Interaction in Dirac Electron Systems”

[5] T. Mizoguchi, L. D. C. Jaubert, and M. Udagawa: Phys. Rev. Lett. **119**, 077207 (2017). “Clustering of Topological Charges in a Kagome Classical Spin Liquid”

[6] N. Okuma: Phys. Rev. Lett. **119**, 107205-1-6 (2017). “Magnon Spin-Momentum Locking: Various Spin Vortices and Dirac magnons in Noncollinear Antiferromagnets”

[7] T. Kariyado and M. Ogata: Phys. Rev. Materials **1**, 061201(R) (2017). “Evolution of Band Topology by Competing Band Overlap and Spin-Orbit Coupling: Twin Dirac Cones in Ba_3SnO as a Prototype”

[8] A. Bolens, H. Katsura, M. Ogata, and S. Miyashita: to appear in Phys. Rev. B. “Mechanism for sub-gap optical conductivity in honeycomb Kitaev materials”

[9] A. Bolens, H. Katsura, M. Ogata, and S. Miyashita: Phys. Rev. B **95**, 235115 (2017). “Synergetic effect of spin-orbit coupling and Zeeman splitting on the optical conductivity in the one-dimensional Hubbard model”

[10] M. Ogata and H. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 094703-1-5 (2017). “Theory of Spin Seebeck Effects in a Quantum Wire”

[11] H. Fukuyama, J. Kishine, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 123706-1-5 (2017). “Energy Landscape of Charge Excitations in the Boundary Region between Dimer-Mott and Charge Ordered States in Molecular Solids”

[12] K. Tokushuku, J. Kishine and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 124701-1-6 (2017). “Tunable Spin Dynamics in Chiral Soliton Lattice”

[13] N. Okuma and K. Nomura: Phys. Rev. B **95**, 115403-1-8 (2017). “Microscopic derivation of magnon spin current in topological insulator/ ferromagnet heterostructure”

[14] 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”

[15] I. Tateishi and H. Matsuura: arXiv:1804.01240, submitted to J. Phys. Soc. Jpn.“Face centered cubic SnSe as a Z_2 trivial Dirac nodal line material”

(会議抄録)

[16] K. Yamazaki, T. Yoshioka, H. Tsuchiura, and M. Ogata: J. Phys.: Conf. Ser. **871**, 012009 (2017). “An effective Hamiltonian and its phase diagram for T′-structure cuprates”

[17] K. Yamazaki, H. Tsuchiura, T. Yoshioka, and M. Ogata: to appear in J. Phys.: Conf. Ser. (2018) “Superconductivity in the underdoped region of the T′-structure cuprates based on an effective two-band model”

[18] H. Tsuchiura, M. Ogata, K. Yamazaki, and R. Asaoka, arXiv:1711.04982, to appear in J. Phys.: Conf. Ser. (2018) “Anomalous dispersion relations in the staggered flux state”

(国内雑誌)

[19] 小形正男、松浦弘泰: 固体物理 **10**, 52 (2017). “固体中電子の磁性再考：大統一理論”

(学位論文)

[20] 大熊信之：“Mathematical aspects of spin-momentum locking: Generalization to magnonic systems and application of orbifold to topological material science” (スピン運動量ロッキングの数理：マグノン系への一般化及びオービフォールドのトポロジカル物質科学への応用) (博士論文)

[21] 立石幾真：“時間反転対称性がある系における特殊なバンド構造に関する研究” (Analysis of special band structures in time reversal symmetrical systems)(修士論文)

[22] 広沢智紀：“Nuclear Magnetic Resonance in 3D Dirac materials” (三次元ディラック物質における核磁気共鳴)(修士論文)

＜**学術講演**＞

(国際会議)

一般講演

[23] M. Ogata and H. Maebashi: Workshop “Spin Dynamics in the Dirac Systems” (Mainz, Germany, June 6–9, 2017). “Spin Hall effect and electrodynamis of Dirac electrons in solids”

[24] N. Okuma, M. R. Masir, and A. H. MacDonald: Spin Dynamics in the Dirac Systems (Mainz, June, 2017). “Theory of Topological Spin Seebeck Effect”

[25] H. Fukuyama, J. Kishine, and M. Ogata: 12th Int. Sympo. on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM2017) (Zao, September 24–29, 2017) “Energy Landscape of Charge Excitations in Boundary Region between Dimer-Mott and Charge Order State in Molecular Solids”

[26] H. Matsuura: The 6th Toyota RIKEN International Workshop 2017 (Nagoya, November 10–12, 2017). “Theory of Charge Kondo Effect due to Valence Skipping Phenomenon”

[27] N. Okuma: Int. Conf. on Topological Material Science (Tokyo, May 2017) “Magnon spin-momentum locking: Possible realization in kagome-lattice antiferromagnet” (Best preview award).

[28] K. Tokushuku, J. Kishine and M. Ogata: Int. Workshop Dzyaloshinskii-Moriya Interaction and Exotic Spin Structures (Peterhof, May 23–26, 2017). “Dynamics of chiral soliton lattice under an electric field and its magnetic dependence”

[29] K. Tokushuku, J. Kishine and M. Ogata: Int. Conf. on Strongly Correlated Electron Systems (Prague, July 17–21, 2017). “Theoretical study of the magnetic dependent dynamics of chiral soliton lattice by the spin transfer method”

[30] K. Yamazaki, H. Tsuchiura, T. Yoshioka, and M. Ogata: 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28) （Gothenburg, Sweden, August 9–16, 2017) “Superconductivity in the underdoped region of the T′-structure cuprates based on an effective two-band model”

[31] H. Tsuchiura, M. Ogata, K. Yamazaki, and R. Asaoka: LT28. “Anomalous dispersion relations in the staggered flux state”

招待講演

[32] M. Ogata, H. Maebashi, T. Hirosawa, and H. Fukuyama: Int. Workshop on “Frontiers of Research in Quantum Materials” (Stuttgart, December 18–20, 2017) “Charge dynamics of Dirac electrons: Large permittivity, and NMR $1/T_1T$ due to orbital motion”

[33] H. Matsuura: Trend in Theory of Correlated Materials (TTCM2017) (Tsukuba, September 10–13, 2017). “Theory of Orbital Susceptibility in the Tight Binding model: Correction to the Peierls Phase and Application to Excitonic Insulator”

[34] H. Matsuura: RIKEN Symposium Int. Workshop on Organic Molecule Systems (Malaysia, August 1–3, 2017) “Theory of Orbital Susceptibility in the Tight Binding model: Correction to the Peierls Phase and Application to Excitonic Insulator”

(国内会議)

一般講演

[35] 田中康寛、小形正男：日本物理学会、岩手大学 2017, 9.21–9.24 (秋季大会) “静水圧下における α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ の電荷秩序とゼロギャップ状態：電子相関の効果”

[36] 宮藤大輔、小形正男：日本物理学会、岩手大学 “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”

[37] 立石幾真、松浦弘泰、小形正男：日本物理学会、岩手大学 “ドープされたディラック電子系である $Ag_{1-x}Sn_{1+x}Se_2$ の電子状態の解析”

[38] 山崎国人、土浦宏紀、吉岡匠哉、小形正男：日本物理学会、岩手大学 “T′ 型銅酸化物超伝導体における超伝導転移と過剰酸素の相関”

[39] 小形正男、前橋英明：日本物理学会、東京理科大学 2018, 3.22–3.25（年次大会）“スピンホール係数と帯磁率の一般的相関”

[40] 前橋英明、広沢智紀、小形正男、福山秀敏：日本物理学会、東京理科大学 “ディラック・ワイル物質における核磁気共鳴の理論:軌道相互作用と電気四重極相互作用”

[41] 立石幾真、大熊信之：日本物理学会、東京理科大学 “空間反転と時間反転対称性がある系でのノーダルライン半金属の探求”

[42] 広沢智紀、 前橋英明、小形正男：日本物理学会、東京理科大学 “核磁気共鳴におけるディラック電子系の不純物効果”

[43] 細井將史、溝口知成、檜原太一、松浦弘泰、小形正男：日本物理学会、東京理科大学 “$5d^1$ 電子系における四極子間 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用”

[44] 田中康寛、小形正男：日本物理学会、東京理科大学 “静水圧下 α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ における電子相関効果”

[45] 松浦弘泰：SPRUC, 分野融合 (実用) 固液界面ミーティング (大阪大学 2017, 9.28) “固液界面の電子状態:リチウムイオン電池における負極界面上被膜 (SEI) の厚さの見積もり”

[46] 福山秀敏、小形正男：第 11 回　物性科学領域横断研究会 (東京大学物性研 2017, 11.17–18) “量子細線でのスピンゼーベック効果の理論”

[47] 小形正男、福山秀敏：東北大学金属材料研究所ワークショップ「多自由度が協奏する分子システムの科学」(東北大学、2017, 12.4–6) “Theory of Spin Seebeck Effects in a Quantum Wire”

[48] 岸根順一郎、小形正男、福山秀敏：東北大学金属材料研究所ワークショップ「多自由度が協奏する分子システムの科学」“ダイマーモットと電荷秩序相境界領域での電荷励起エネルギーランドスケープ”

[49] 小形正男、溝口知成：つくば-柏-本郷 超伝導かけはしプロジェクトワークショップ (物質・材料研究機構 2018, 3.26–27) “ディラック電子系におけるマイスナー効果”

招待講演

[50] 小形正男：IGER グリーン自然科学レクチャー (2017, 12.7）名古屋大学、坂田・平田ホール “固体中電子の奇妙なふるまい—ディラック電子と疑似相対性理論”

[51] 田中康寛：早稲田大学高等研究所 Top Runner’s Lecture Collection of Science 「分子性導体研究の最前線：クーロン相互作用と分子自由度が生み出す新たな展開」(2018, 1.11)“分子性導体における電荷秩序、ディラックフェルミオン、および光誘起現象について”

(セミナー)

[52] 松浦弘泰：キラル若手の学校、(大阪府立大学 i-site なんば, 2017, November 20) “磁性入門”

[53] 田中康寛：第 3 回早稲田物性セミナー (早稲田大学, 2017, July 27) “α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ の電荷秩序およびゼロギャップ状態:電子相関の効果”

[54] 田中康寛：加藤研セミナー (理化学研究所, 2018, January 30) “α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ の電荷秩序およびゼロギャップ状態に対する電子相関効果”

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，結晶構造探査手法の開発，遅い物理現象を取り扱うシミュレーション手法の開発，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，超高圧下のような極限条件下の結晶構造探索と物性予測，物質の光励起と光加工，水素を含む新物質と物性の理論予測などが主要な研究テーマである.

3.3.1 超高圧下の結晶構造と超伝導

H-S 系の高圧下相図

硫化水素は高圧下で高温超伝導を示すことが理論的に予測され，近年実際に実験によって約 150GPa で転移温度 200 K 以上の高温超伝導が確かめられた。この系は圧力に応じて硫黄と水素の組成比が変化することが指摘されており，その過程でこれまでに見つかっていない結晶構造の出現が期待される。そこで明石と吉川は，Skolkovo Institute of Science and Technology (ロシア) のグループと共同で，高圧における水素-硫黄系の安定構造を網羅的に探索し，実現しうる超伝導状態をシミュレーションによって調べた。これにより，硫黄が多数を占める新しい超伝導相が発見された [4]。新たな構造の発現は，近年発見された硫化水素の高温超伝導相の実現に影響している可能性がある。

筒状ユニットからなる高圧下 H_3S ポリタイプの理論予測

硫化水素の高温超伝導相の組成は H_3S であると理論予測され，実際この予想と矛盾しない X 線回折ピークが超高圧実験で報告されている。この H_3S 組成のまま 10 – 110 GPa に減圧した時の安定な結晶構造も理論的に調べられており，$Cccm$ 構造や，さらに安定な $C2/c$ 構造が提案されている。吉川らはこれらの構造がともに，H_2 分子を内包した組成 H_2S の筒状ユニットによって構成されていること，さらには $C2/c$ 構造の筒状ユニットの向きを変えて積み重ねることで，ポリタイプを無数に構成できることを見出した（図 3.3.1）。これらのポリタイプについて第一原理に基づく全エネルギー計算を行った結果から，エネルギーがほぼ同じポリタイプが無数に存在し，$C2/c$ 構造はこのようなポリタイプの一種であることが明らかになった [13]。

BiS_2 系におけるフォノン機構超伝導の可能性の検討

層状ビスマス硫化物においては，水口らにより 2012 年に超伝導転移が発見されて以来，その機構が精力的に調べられている。明石は理研，ケンブリッジ大 (イギリス) のグループと共同でこの機構を第一原理計算の観点から調べた。従来この系ではフォノンによって媒介される超伝導ペアリング力が大きいとされていたが，明石らは計算アルゴリズムを改良し見積もりを再検討，実際のペアリングの強さが超伝導転移温度の実験値を定量的に再現しえないことを指摘した。これはこの系における非従来的な機構の存在を示唆するものである [2]。

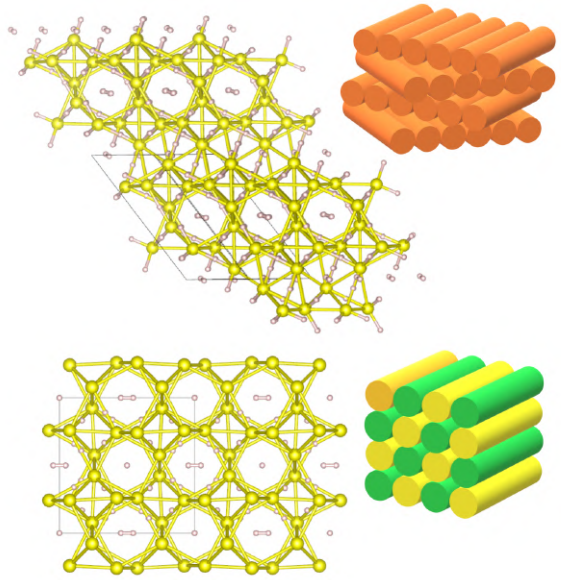


図 3.3.1: $C2/c$ 構造と $Cccm$ 構造の筒状ユニットの模式図。$C2/c$ 構造（上）では，1 種類の筒状ユニットが約 60 度回転しながら積み重なっている。$Cccm$ 構造（下）では，2 種類の筒状ユニットが同じ方向を向いて互い違いに積み重なっている。

3.3.2 熱電材料の非調和格子振動

クラスレート化合物の格子熱伝導率

籠の中にイオンを閉じ込めた構造を持つクラスレート化合物は，格子熱伝導率が特異的に低いことから，熱電材料として期待されている。これらの系では，格子振動の非調和性が極めて強いことから，３次非調和項までを考える通常の近似の枠を超え，より高次の項を考慮した熱伝導の取り扱いが必要となると考えられる。只野らは，セルフコンシステントフォノン法に基づき，４次の非調和効果を精密に取り扱うことで，クラスレート化合物 $Ba_8Ga_{16}Ge_{30}$ (BGG) の格子熱伝導率の温度依存性が T^{-1} から大きくずれることを，定量的に再現することに成功した。またセルパラメータの変化（あるいはイオンサイズの変化）により，格子熱伝導率の低温での振る舞いが結晶的なものからガラス的なものまで変化することが明らかになった。[6]

層状窒化物の格子熱伝導率

層状窒化物 AMN_2 (A =Sr, Ba; M =Ti, Zr, Hf) は，よく似た構造を持つ $SrTiO_3$ よりも電子熱電性能指数 Z_e が大きいことから，熱電材料の候補物質として検討されているが，合成例が少なく，格子熱伝導率が測定されていない。そこで浦らは，当研究室で開発してきた第一原理計算に基づく非調和格子モデル手法 [5] を用いて，これら層状物質の格子熱伝導

率の精密予測を行い，$SrTiO_3$ と同等もしくは（高温では）それ以下の値であることを確認した。また特異な金属原子種 (M) 物質依存性を見出した [14]。

3.3.3 超短パルスレーザー照射による非熱的プロセスの物理

金属における非熱的アブレーションの物理的機構の解明とその数理モデルの構築

レーザ照射による金属加工は，医療器具・電子デバイスの加工をはじめとする幅広い用途に使用されている。熱的損傷を避けて微細加工を行うには，パルス幅サブ ps の超短パルスレーザを使う必要があることが知られているが，この物理機構には不明な点が多い。そのため，レーザ加工時のレーザ照射条件は経験に頼ることが多く，シミュレーションや理論から決定することは困難である。そこで田中らは，各種物理パラメータが良く調べられている銅に関する第一原理電子状態計算を用いて，この金属微細加工の物理機構の解明と，実験結果 (加工深さ) を定量的に再現できる数理モデルの構築を試みた。

レーザ照射後，電子系と格子系それぞれが瞬間的に緩和するという仮定をおくことで，超短パルスレーザ照射直後の表面の状態を高温の電子系・低温の格子系と表現した (二温度モデル)。有限温度密度汎関数理論に基づく第一原理計算の結果，ある電子温度以上では電子エントロピーの効果によって凝縮状態が不安定化することが分かった。我々はこの不安定化の原因を体積変化による化学ポテンシャル付近の電子状態の変化により説明した。これらの結果に基づき，我々は金属の微細加工を説明する機構として「電子エントロピー誘起機構」を提案した。また，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，シミュレーションを行った結果，実験をよく再現する結果が得られた。本研究の論文は，Appl. Phys. Express 誌の Spotlights に選ばれた [7]。

Fe-Al 金属間化合物の安定性の電子温度依存性の検討

現在，自動車から排出される CO_2 削減のため，車体のマルチマテリアル化の研究が精力的に行われている。そのため，軽量化材料である Al と従来の車体に使われている Fe の強固な接合技術は重要である。しかし，レーザ融解による Fe-Al 接合では，接合境界に脆い金属間化合物が生成され，結合強度が低下するという問題がある。近年，超短パルスレーザ (パルス幅 $< 10^{-12}$ s) の照射により，脆い金属間化合物が生成されない Fe ナノ粒子と Al ナノ粒子の接合が確認されたが，その原因に関してはほとんど研究されていない。田中らは，レーザ照射直後の状態を電子温度高温・格子温度低温と表現する二温度モデルを用いて，Fe-Al 金属間化合物の安定性に対する電子温度効果の検討を行った。具体的には，計算もしくは実験において安定 (もしくは準安定) と報告されている Fe-Al 金属間化合物の自由エネルギー・組成比座標空間での convex hull を電子温度のみ高温の有限温度密度汎関数理論を用いて計算した。その結果，電子温度約 1 万 K の状況下では，脆い金属間化合物が強固な金属間化合物に対して不安定化するという結果が得られた。またその不安定の原因として，電子エントロピーの寄与の重要性が確認できた。

3.3.4 励起子状態の光学的制御

本研究の目的は，励起子の光学的制御技術の実現可能性を数値シミュレーションに基づき提案することである。

光を用いた中性粒子の閉じ込めは，冷却原子系の実験技術として長い歴史がある。中性粒子が離散的な内部励起状態を持つとき，準位の幅に共鳴するような周波数を持つ電磁波を印加すると，粒子の準位が混成しエネルギーがシフトする。レーザー定在波を用いるとエネルギーシフトの大きさが空間的に変調し，光格子として機能する。加藤らは，第一原理計算からとモデル計算により，具体的な系で励起子の束縛エネルギーを定量的に予測することにより，励起子トラップの実現可能性を提案した。

励起子のスペクトル構造と電磁波との結合強度のようなモデルパラメータは，第一原理計算で得られる励起子波動関数から計算する。本研究では励起子状態のシミュレーションに GW+BSE 法を用いた。これは固体の励起子状態をもっとも精度よく計算できる手法の一つとして知られている。GW+BSE 法は密度汎関数理論 (DFT) と組み合わせて用いられる。DFT 計算には Quantum-ESPRESSO を，GW+BSE 法の計算には BerkeleyGW を用いた。

具体的な物理系としてはグラファンという，グラフェンに水素を添加することで絶縁体化した直接ギャップ半導体の励起子を対象とした。この物質はバンド構造が単純であり，また励起子の束縛エネルギーが巨大で実験的な準位の同定が容易である。GW+BSE 計算の結果，最低エネルギー状態から数えて 5 つの励起子状態が光ポテンシャルの実現に適しており，$10^7 \mathrm{W/cm^2}$ の電場強度で 100μ eV の桁のポテンシャルが印加可能であることがあきらかになった [12]。

3.3.5 層状物質におけるブロッホ波動関数干渉の一般論

2 次元結晶を積み重ねたとき，その電子状態は層間の位置関係に依存して大きく変化する。明石らは周期系における電子波動関数の性質 (ブロッホの定理) にもとづき，積層した 2 次元結晶における層間の電子移動に関する理論を定式化した。層の間のずれが特定の条件を満たすとき，ブロッホ波動関数の干渉効果により電子が層間を移動できなくなる。明石らはこの干渉効果が起こりうるパターンを網羅してまとめた [3]。本研究は学部 4 年生 (2014 年度当時) 飯田耀氏，山本航平氏との共同研究であり，論文には

学部 4 年講義「理論演習」において実施された計算が含まれる。

3.3.6 シミュレーション手法開発

データ同化による結晶構造予測

化学組成から物質の結晶構造を予測することは，計算物質科学における最大の難問の一つである。近年，遺伝的アルゴリズムや粒子群最適化法といった様々な最適化手法が開発・応用され，ユニットセル中の原子数が少ない場合には結晶構造予測が可能になってきたが，数十原子を超える極めて大きな自由度を持つ系の構造探索は，いまだに困難である。そこで辻本らは，藤堂研究室との共同研究により，X 線や中性子線のわずかな回折実験データが得られる場合に，そのデータを利用（同化）して結晶構造探索を進める手法，すなわち多次元空間での最適化問題を効率的に解く手法の開発を行っている。今年度はこの手法の開発を進め，回折データのノイズに対する安定性を検証した。

集団座標フリーのポテンシャル極小脱出経路生成アルゴリズム

原子から成る系がとりうる構造は，その配置空間におけるポテンシャル平面によって決まる。特に興味深いのは局所安定な原子配置の間をどのように移り変わるかであるが，エネルギー障壁が最小となる経路の探索は難しい課題であり，通常これは人工的な力を「それらしい」方向 (=集団座標) に及ぼすことにより行われていた。明石と Nagornov は集団座標および人工的なポテンシャル力を用いず最適経路を生成するアルゴリズムを提案した。これにより未知の反応物およびその経路の非経験的探索が可能になる。

原子核構造を取り扱う密度汎関数理論のための交換汎関数

原子核構造における密度汎関数法 (DFT) では, クーロン交換エネルギーは一般的には局所密度近似 (LDA) で扱われている。一方, 電子系の DFT では, 密度勾配による補正を取り込んだ一般勾配化近似 (GGA) が広く使われおり, また, クーロン相関エネルギーも考慮されているため，より高精度な計算が可能である. 内藤らは，交換相関汎関数の密度に実験で得られた電荷密度を用い, 電子系での交換相関汎関数を原子核系に適用可能か確認をした。その結果, 相関汎関数は適用不可能であるものの, GGA 交換汎関数は適用可能であることがわかった。特に, GGA 交換相関汎関数は表面付近で LDA と異なる寄与をし, 最終的に厳密な Fock 項に近い交換エネルギーを与えることがわかった.

ニューラルネットワークを用いたコーン-シャム交換相関ポテンシャル

第一原理計算に用いるコーン-シャム方程式においては，電子の間の相互作用の効果は交換相関ポテンシャルによって記述される。交換相関ポテンシャルは原理的には厳密形が存在するが，その具体的な形は長年不明であった。明石らは少数の高コスト計算を参照した機械学習によって，この交換相関ポテンシャルを数値的に構成する方法を定式化した。これは交換相関ポテンシャルの構成法として新たな方向性を拓くものである。本研究は学部 4 年講義「理論演習」の課題を発展させたもので，学部 4 年生 (2017 年度当時) 永井瞭氏，佐々木秀氏との共同研究である。

＜報文＞

(原著論文)

[1] N. Sato, R. Akashi, and S. Tsuneyuki, Universal two-dimensional characteristics in perovskite-type oxyhydrides $A\mathrm{TiO_2H}$ (A = Li, Na, K, Rb, Cs), J. Chem. Phys. 147,034507 (2017).

[2] C. Morice, R. Akashi, T. Koretsune, S. S. Saxena, and R. Arita, Weak phonon-mediated pairing in $\mathrm{BiS_2}$ superconductor from first-principles, Phys. Rev. B 95, 180505(R) (2017).

[3] R. Akashi, Y. Iida, K. Yamamoto, and K. Yoshizawa, Interference of the Bloch phase in layered materials with stacking shifts, Phys. Rev. B 95, 245401 (2017).

[4] I. Kruglov, R. Akashi, S. Yoshikawa, A. R. Oganov, and M. M. D. Esfahani, Refined phase diagram of the HS system with high-Tc superconductivity Phys. Rev. B 96, 220101(R) (2017).

[5] T. Tadano and S. Tsuneyuki, First-Principles Lattice Dynamics Method for Strongly Anharmonic Crystals, J. Phys. Soc. Japan 87, 041015 (2018).

[6] T. Tadano and S. Tsuneyuki, Quartic Anharmonicity of Rattlers and its Effect on Lattice Thermal Conductivity of Clathrates from First Principles, Phys. Rev. Lett. 120, 105901 (2018).

[7] Y. Tanaka and S. Tsuneyuki, Possible electronic entropy-driven mechanism for non-thermal ablation of metals, Appl. Phys. Express 11, 046701 (2018).

[8] Y. Gohda, Y. Tatetsu, and S. Tsuneyuki: Electron theory on grain-boundary structures and local magnetic properties of neodymium magnets, Mater. Trans., 59, 332 (2018).

(国内雑誌)

[9] 常行真司，杉野修，有田亮太郎，「第一原理シミュレーション概観」，固体物理 vol.52(11), 575 (2017).

[10] 只野央将， 常行真司，「第一原理からの非調和フォノンと格子熱伝導」，固体物理 vol.52(11), 637 (2017).

[11] 越智正之，有田亮太郎，常行真司，「固体のための波動関数理論：トランスコリレイティッド法の発展」，固体物理 vol.52(11), 715 (2017).

(学位論文)

[12] 加藤洋生, A theoretical study on quantum state and optical trapping of excitons (励起子の量子状態と光学トラップに関する理論研究) (東京大学，2018 年 3 月 博士（理学）)

[13] 吉川誠司, Structure search for sulfur hydride at high pressure based on imaginary phonon modes（虚数フォノンモードに基づいた高圧下硫化水素の構造探索）(東京大学，2018 年 3 月 修士)

[14] 浦 宏行, Prediction of lattice thermal conductivity of layered nitrides by first-principles calculation based on perturbation theory（摂動論に基づく，層状窒化物半導体の格子熱伝導率の第一原理的予測）(東京大学，2018 年 3 月 修士)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[15] Y. Tatetsu, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda: First-principles study on element-doping effects in Nd-Fe-B sintered magnets, Intermag 2017, Dublin, Ireland, Apr. 24-28, 2017.

[16] K. Yoshizawa, Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki: “Improving usability of DFT codes by using GUI software C-Tools”, Interdisciplinary symposium on modern density functional theory, Saitama, Japan, Jun. 20, 2017.

[17] R. Akashi, Y. Iida, K. Yamamoto, and K. Yoshizawa, Relation between the Stacking Shift and Electronic Structure in Layered Materials: General Theory The Tenth International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC-10) Aug. 1–3, 2017; Mielparque-Yokohama, Yokohama, Japan.

[18] K. Yoshizawa, Y. Iwazaki, Y. Gohda and S. Tsuneyuki: “The structure of impurity hydrogen and Ti3+ ions in rutile TiO2”, 28th International Conference on Low Temperature Physics(LT28), Gteborg, Sweden, Aug. 10, 2017.

[19] N. Tsujimoto, D. Adachi, R. Akashi, S. Todo and S. Tsuneyuki, Crystal structure prediction supported by Incomplete diffraction data, STAC10, Yokohama, Japan, Aug. 1-3, 2017.

[20] T. Tadano and S. Tsuneyuki: Modeling Phonon Transport in Emergent Thermoelectric Materials with Large Atomic Displacements: A First-Principles Study, IUMRS-ICAM2017, Tokyo, Japan, Aug. 28, 2017.

[21] Y. Tatetsu, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda: First-principles study on the magnetic anisotropy of Ga-added Nd-Fe-B magnets, FMS2017, Greifswald, Germany, Sept. 4-6, 2017.

[22] T. Tadano and S. Tsuneyuki: Finite-temperature effects on phonon dispersion and thermal transport in thermoelectric materials: A first-principles lattice dynamics study, 15th European Conference on Thermoelectrics (ECT2017), Padua, Italy, Sep. 25, 2017.

[23] Y. Tatetsu, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda: First-principles approach to the magnetic anisotropy at the grain boundaries of Nd-Fe-B magnets, Junjiro Kanamori Memorial International Symposium, Tokyo, Japan, Sept. 27-29, 2017.

[24] Y. Tatetsu, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda: First-principles study on the role Nd6Fe13Ga in Nd-Fe-B magnets, MMM 2017, Pittsburgh, USA, Nov. 6-10, 2017.

[25] Y. Tatetsu, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda: First-principles study on the magnetic anisotropy around the grain boundaries of Nd-Fe-B magnets, ISAMMA 2017, Phu Quoc, Vietnam, Dec. 11-13, 2017.

[26] N. Tsujimoto, D. Adachi, R. Akashi, S. Todo and S. Tsuneyuki, Crystal structure prediction supported by Insufficient experimental data RECS2017, Tokyo, Japan, Dec. 17-18, 2017.

[27] Y. Tanaka and S. Tsuneyuki: Physical mechanism of non-thermal ablation of metals, Research and Education of Computational Science, Tokyo, Japan, Dec. 19, 2017.

[28] T. Naito: Coulomb Energy Density Functionals for Nuclear Systems. YITP School ”Recent Progress of Nuclear Structure and Reaction Physics”, Kyoto, Japan, Dec. 19, 2017.

[29] R. Akashi, Y. Iida, K. Yamamoto, and K. Yoshizawa, Relation between the Stacking Shift and Electronic Structure in Layered Materials: General Theory APS March Meeting 2018 Mar. 5–9, 2018; Los Angeles Convention Center, Los Angeles, California, USA.

[30] T. Tadano and S. Tsuneyuki: Quartic Anharmonicity of Rattlers and its Effects on Exceptional Thermal Transport in Intermetallic Clathrates: A First-Principles Investigation, APS March meeting 2018, Los Angeles, CA, USA, Mar. 7 2018.

[31] Y. Tatetsu, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda: Computational approach to the magnetic properties of Ga-added Nd-Fe-B sintered magnets, TMS 2018, Phoenix, USA, Mar. 11-15, 2018.

[32] T. Naito: Density Functional Theory with Electromagnetic Interaction Seminar at Department of Nuclear Physics of China Institute of Atomic Energy, Beijing, China, Mar. 12, 2018.

招待講演

[33] S. Tsuneyuki, Transcorrelated Method for Condensed Matter, CECAM Workshop: Theoretical Chemistry for Extended Systems: systematically

improvable electronic structure method, CECAM-FR-GSO (Toulouse), May 22-24, 2017.

[34] S. Tsuneyuki, "MI2I", Paris Meeting – Computational Materials: Challenges and Future Opportunities (Paris), May 31-Jun. 2, 2017.

[35] R. Akashi, Quantifying the Impact of Plasmon and Paramagnon Effects in "Conventional" Superconductors from the First Principles Interdisciplinary Symposium on Modern Density Functional Theory Jun. 19–23, 2017; Okochi Hall, RIKEN, Wako, Japan.

[36] R. Akashi, Plasmon and paramagnon effects in "conventional" superconductors studied with density functional theory ELECTRON CORRELATION IN SUPERCONDUCTORS AND NANOSTRUCTURES (ECSN-2017) Aug. 17–20, 2017; Londonskaya Hotel, Odessa, Ukraine.

[37] S. Tsuneyuki, What We Expect from Materials Informatics, 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials, Short Course (Sendai), Sep. 19, 2017.

[38] R. Akashi, First-principles study of superconductors: recent advances 20th Asian workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN-20) Oct. 30–Nov.1, 2017; Nanjing University, Nanjing, China.

[39] S. Tsuneyuki, Computational Science Projects with Prof. Oshiyama, Symposium on Materials Science and Technology towards Energy-Saving Society (MASTES2018), Mar. 12-13, 2018, Tokyo.

(国内会議)

一般講演

[40] 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ユーザビリティ向上について」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）, 2017 年 4 月 3 日.

[41] 辻本直人, 足立大樹, 明石遼介, 藤堂眞治, 常行真司：「不完全な回折データを利用した結晶構造予測」, 元素戦略磁性材料研究拠点成果公開シンポジウム, 名古屋, 愛知, 2017 年 6 月 9 日.

[42] 立津慶幸, 常行真司, 合田義弘：「First-principles study on the effects of subphases in Nd-Fe-B magnets」, 元素戦略磁性材料研究拠点成果公開シンポジウム, TKP ガーデンシティ PREMIUM 名駅西口 (名古屋市), 2017 年 6 月 9 日

[43] 辻本直人, 足立大樹, 明石遼介, 藤堂眞治, 常行真司：「不完全な回折実験データを利用した結晶構造予測」, ポスト「京」プロジェクト課題 7「共通基盤シミュレーション手法」研究会, 東京大学物性研, 2017 年 6 月 16 日.

[44] 吉澤香奈子, 吉本芳英, 常行真司: 「DFT コードに対する入力支援ツール C-Tools を用いた HPCI での性能測定」, 第 2 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）, 2017 年 7 月 11 日.

[45] 明石遼介, Yu S. Nagornov "固体における相変態の原子論的シミュレーションに向けて" 第 2 回 CDMSI(ポスト「京」重点課題（7）) 研究会 東京大学本郷キャンパス　2017 年 07 月 11 日–12 日

[46] 立津慶幸, 常行真司, 合田義弘：「Nd-Fe-B 磁石の元素添加効果に関する第一原理計算」, 第 2 回 CDMSI(ポスト「京」重点課題 (7) 研究会, 東京大学 (文京区), 2017 年 7 月 11 日.

[47] 明石遼介, Yu S. Nagornov "固体における相変態の原子論的シミュレーションに向けて" 第 1 回ポスト「京」萌芽的課題「基礎科学の挑戦」・「極限マテリアル」合同公開シンポジウム 東北大学金属材料研究所　2017 年 07 月 18 日

[48] T. Naito: ABC of EDF—Introduction and Future Works of Energy Density Functional for Electron Systems—, 56th DFT-meeting, 理化学研究所 (和光市), 2017 年 7 月 27 日.

[49] 田中悠太，常行真司：「金属におけるフェムト秒レーザーアブレーションの閾値レーザーフルエンスのシミュレーション」，第 64 回応用物理学会秋季学術講演会，福岡国際会議場・国際センター・福岡サンパレス（福岡），2017 年 9 月 6 日。

[50] K. Yoshizawa, Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki: "First-principles simulation by DFT input support tool C-Tools", "TIA かけはし" ポスター交流会－計算科学とデータ科学の連携による実験データ高度解析手法の社会実装－, 東京大学柏の葉キャンパス駅前サテライト（柏市）, 2017 年 9 月 12 日.

[51] 加藤洋生, 常行真司,「第一原理計算手法で探る励起子系の光ポテンシャルの実現可能性 」, 日本物理学会 2017 年秋季大会，岩手大学 (盛岡市)，2017 年 9/21-2/24

[52] 辻本直人, 足立大樹, 明石遼介, 藤堂眞治, 常行真司：「不完全な回折実験データを利用した結晶構造予測」, 日本物理学会, 岩手大, 2017 年 9 月 21-24 日.

[53] 明石遼介"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 II: 動的揺らぎの考慮およびプラズモン効果との競合" 日本物理学会　2017 年秋季大会　岩手大学　2017 年 9 月 21 日–24 日

[54] 明石遼介，飯田耀，山本航平，吉澤香奈子"層状物質における電子状態の積層パターン依存性についての一般論" 日本物理学会　2017 年秋季大会　岩手大学　2017 年 9 月 21 日–24 日

[55] 立津慶幸, 常行真司, 合田義弘：「第一原理計算による Ga 添加型 Nd-Fe-B 磁石の界面磁気異方性解析」, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 (盛岡市), 2017 年 9 月 22 日.

[56] 吉澤香奈子, 吉本芳英, 常行真司: 「C-Tools を用いた DFT コードの性能測定」, 第 3 回ポスト「京」重点課題（7）研究会, 東京大学物性研究所（柏市）, 2017 年 12 月 4 日.

[57] 立津慶幸, 常行真司, 合田義弘：「Nd-Fe-B 焼結磁石の副相 Nd-Fe 合金に関する第一原理計算的研究」, 第 3 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 (柏), 2017 年 12 月 5 日.

[58] 辻本直人, 足立大樹, 明石遼介, 藤堂眞治, 常行真司：「不完全な実験データを利用した結晶構造予測」, 第 3 回 CDMSI（ポスト「京」重点課題（7））シンポジウム, 東京大学物性研, 2016 年 12 月 5-6 日.

[59] 常行真司:「結晶中の不純物水素再訪」, 第 14 回水素量子アトミクス研究会（KEK 物構研）, 2017 年 12 月 9 日.

[60] 常行真司:「非熱的レーザー加工の実現に向けて」, 第 3 回 ICCPT シンポジウム 第 1 回 TACMI コンソーシアムシンポジウム 合同シンポジウム（東大伊藤謝恩ホール）, 2017 年 12 月 13 日.

[61] T. Naito: Coulomb Energy Density Functionals for Nuclear Systems. 59th DFT-meeting, 新潟大学 (新潟市), 2018 年 3 月 3 日.

[62] 明石遼介, Yuri S. Nagornov: 「非定常状態のハイパーダイナミクス」, 日本物理学会 第 73 回年次大会 東京理科大学 2018 年 3 月 22 日–25 日

[63] 加藤洋生，明石遼介，常行真司:「第一原理計算から提案する励起子の光学的制御技術の可能性」，日本物理学会第 73 回年次大会，東京理科大学 (野田市), 2018 年 3/22-3/25

招待講演

[64] 常行真司:「電子論とシミュレーションと AI による次世代材料開発」, 第 10 回東京大学-NTT 技術交流会（ホテルオークラ，東京）, 2017 年 7 月 10 日.

[65] 明石遼介: ”Interference of the Bloch phase in stacked periodic structures”, 第 47 回トポロジカル物質科学セミナー 京都大学 2017 年 8 月 8 日.

[66] 辻本直人:「不完全な実験データを利用した結晶構造予測」, 2017 年度 SPRUC 高圧物質科学研究会, 広島大, 2017 年 9 月 5 日.

[67] 常行真司:「大規模計算を用いた材料・デバイス開発の可能性〜ポスト「京」重点課題（7）の成果を中心に」, 平成 29 年度 PCoMS シンポジウム＆計算物質科学スパコン共用事業報告会（東北大金研，仙台）, 2017 年 11 月 9 日.

[68] 明石遼介:「第一原理計算による硫化水素における圧力誘起超伝導の研究」，第二回かけはし研究会「温度変化で発電するモバイル発電器」 筑波大学 2018 年 1 月 22 日.

[69] 常行真司:「物質科学シミュレーションのアプリ開発と普及」, 第 3 回元素戦略プロジェクト＜研究拠点形成型＞・大型研究施設連携シンポジウム〜新学理が牽引する物質・材料機能発現メカニズムの理解と産業応用〜（東京大学伊藤謝恩ホール）, 2018 年 2 月 5-6 日

[70] 合田義弘, 立津慶幸, 常行真司：「「京」によるネオジム磁石組織界面の第一原理計算」, 第 3 回元素戦略プロジェクト＜研究拠点形成型＞・大型研究施設連携シンポジウム〜新学理が牽引する物質・材料機能発現メカニズムの理解と産業応用〜 （東京大学伊藤謝恩ホール）, 2018 年 2 月 5 日.

(セミナー)

[71] 明石遼介「超伝導密度汎関数理論の発展:理論および応用」，NIMS-MANA 理論グループセミナー 物質材料研究機構 2017 年 10 月 16 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・相転移現象

キタエフ物質の基底状態

近年、スピン軌道相互作用による異方的な相互作用を持つ物質群が注目を集めている。Na_2IrO_3 や α-$RuCl_3$ はその代表例であり、これらの物質では有効スピン $J = 1/2$ が二次元ハニカム格子を形成し、キタエフ相互作用と呼ばれる異方的なスピン相互作用が存在している。キタエフ相互作用のみが存在する $S = 1/2$ 量子スピン模型 (キタエフ模型) の基底状態は厳密に非磁性のスピン液体状態になっている一方で、実際の物質にはハイゼンベルグ相互作用や非対角相互作用などが存在しており、これらの影響の理解が重要になる。我々は、波動関数をテンソルのつながりで効率的に表現するテンソルネットワーク変分法を用いて、キタエフ模型近傍の基底状態を計算し、Na_2IrO_3 の近傍で多様な磁気秩序状態が安定化することを明らかにした。また、非対角相互作用の影響を詳細に計算し、厳密対角化法や密度行列繰り込み群法で予想されていたよりも、スピン液体の安定領域が狭くなる可能性を明らかにした [5, 23, 29, 31, 32, 34]。

1 イオン異方性を持つハルデン鎖の基底状態

$S = 1$ の反強磁性スピン鎖におけるハルデン相は対称性に保護されたトポロジカル (SPT) 相の代表例である。実際の物質において、このようなスピン系を考える場合、一軸異方性 $D(S_z)^2$ や rhombic 異方性 $E((S_x)^2 - (S_y)^2)$ という 1 イオン異方性を考慮した基底状態の理解が重要になる。これまでは主に、一軸異方性の影響を中心に研究が行われ、ハルデン

相の他に S_z の反強磁性秩序相、Large-D 相が存在することが知られていた。我々は、密度行列繰り込み群法を用いて、rhombic 異方性も考慮した場合の基底状態相図を明らかにし、わずかでも rhombic 異方性が存在すると、ハルデン相と Large-D 相の間に中間相 (S_x または S_y の反強磁性秩序相) が生じることを示した。また、エネルギー準位の交差により相転移点を決定するレベルスペクトロスコピーにより、rhombic 異方性がない場合のハルデン相と Large-D 相の相境界を 6 桁の精度で精密に決定した [4]。

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 [1, 14]。

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、3 次元及び 4 次元の空間的相関をもつ RFIM の臨界的振る舞いを、モンテカルロシミュレーションを用いて数値的に評価した。その結果、上部臨界次元と下部臨界次元の中間領域において、有効次元が指数 ρ に比例して変化する様子が示唆された。さらに、ランダム場の相関が強くなるほど系の有効次元が下部臨界次元に近づき、物理量の有限サイズ効果が顕在化だけでなく、同時に比熱に新たなピーク構造が現れるなど、これまで予想されていなかった特異な振る舞いが明らかとなった [14]。

二次元 SPT 相におけるトポロジカル秩序変数

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。

3.4.2 新奇な非平衡・非定常状態

共振器系での動的な協力現象

レーザー照射の下で現れる光双安定性は、レーザー強度に対して共振器中のフォトン数が双安定な状態を示し、またその間を不連続に跳ぶといった一次相転移現象に似た振る舞いの現れる相転移現象である。このような量子非平衡系で現れる動的な協力現象を、大規模な数値計算によって量子力学的な微視的模型から解析を行った。具体的には多数のフォトンと多数の二準位原子の自由度からなる量子マスター方程式を近似なく解く並列計算を実行した。量子マスター方程式の時間発展演算子の固有値・固有状態から、定常状態でのフォトン数分布関数のサイズ依存性、および緩和時間のサイズ依存性を調べ、平衡系での一次相転移に対応する結果を得た。また、従来の光双安定性の研究と比べ、フォトン数密度の小さな領域について調べ、その領域では準安定状態のレーザー周波数依存性が定性的に異なることを明らかにした [18, 26, 30, 33, 35]。

古典調和振動子模型の非エルゴード性

記憶を含んだランジュバン方程式である一般化ランジュバン方程は、通常のランジュバン方程式と異なり、その記憶効果によって特異な拡散現象を示すことが知られている。近年、異常拡散の解析で活発に利用され、またこの異常拡散の示す非エルゴード性が注目を集めている。しかしながら、従来の研究ではエルゴード性の定義について混乱があり、また具体的な物理的モデルを用いた解析は少なく、その物理的意味は明らかではなかった。我々は、非エルゴード性を示す古典調和振動子系を提案し、系における注目粒子の振る舞いを、分子動力学計算、厳密対角化、解析計算を用いて調べた。また同時に、エルゴード性の定義について再考した。その結果、本モデルにおける非エルゴード性の起源は注目粒子の周りに励起される孤立局在モードであることが明らかとなった [12, 25]。

3.4.3 新たな計算物理学的手法の開発

実験データと第一原理計算を組み合わせた結晶構造推定

結晶構造推定は非常に難しい問題として古くから知られており、様々な推定方法が開発されてきた。特に最近では、実験データがある場合にはエネルギーの最適化と実験データの再現を同時に行うことによって、結晶構造推定の成功率を上げられることが知られてきている。その際に用いられる方法は、実験データの再現度とエネルギーを足し合わせた新しい評価関数を用いて最適化を行うと言った方法である。しかしながら、2 つの評価関数を足し合わせてしまっているため、それぞれの評価関数の情報が失われてしまうといった欠点がある。我々は 2 つの評価関数の同時最適点を探る方法として重ね合わせ最適化法を開発し、その性能について調査を行なっている。例えば SiO_2 系は、エネルギーの局所最適点が多く存在するため結晶構造を決定するのが難しい系であるが、我々の方法を用いることで結晶構造の推定精度が大幅に上昇することことを確認した [8, 27, 40]。

物理演算子に依存した遷移行列を用いるマルコフ連鎖モンテカルロ法

マルコフ連鎖モンテカルロ法は高次元系における物理量を計算する手法として広く用いられているが、次の状態への遷移確率の選び方によって物理量の推定誤差が変わるため、どのような遷移確率を用いれば良いかという研究が古くから行われている。特に最近では、棄却率最小化や詳細釣り合いの破れといった方法が提案されているが、これらの指標のみからでは一意に遷移行列を決定できない。我々は新しく、物理量の自己相関を陽に減らす更新手法を提案した。その方法に基づいてモンテカルロ計算を行うことによって、複数の模型で物理量の推定誤差が小さくなることを確認した [17, 36]。

非一様な系に対するテンソルネットワーク繰り込み

テンソルネットワークは、厳密対角化といった指数的にコストがかかる計算手法に比べ、ベキ的な計算量ですむ計算手法として、近年注目されている手法である。これまでテンソルネットワークは主に一様な系に対して用いられてきたが、本研究では、テンソルネットワークの手法の一つである HOTRG を非一様系に拡張し、ボンド希釈系を含む 2 次元イジングモデルに適用した。その結果、ボンドの希釈率が 1/2 に近づくにつれ、転移温度が 0 に推移していくことが確かめられた。また、HOTRG のアルゴリズムに改良を施し、繰り込みの際に用いる isometry を、すでに計算したものを使い回すことで、計算コストを減らし、かつ通常の HOTRG とほとんど変わらない精度で計算できることを示した [13, 20, 28, 37]。

深層学習における分散処理

近年、深層学習において、複数の GPU を使って学習を分散処理するときの GPU 間の通信量が大きな課題となっている。一般的なデータ並列による分散処理では、最新のニューラルネットの構成を用いると一回の更新あたり数十〜数百 MB に及ぶ通信が発生する。そのため、分散処理による学習時はこの通信にかかる時間がボトルネックとなってしまうことが多い。我々は GPU 間での通信量を大幅に減らす方法を提案した。これを用いると、分散処理をしても GPU 間の通信速度に依らず高速に学習することが示された。

連続空間における経路積分モンテカルロ法

He4 の 2 次元系は低温で並進対称性とゲージ対称性が同時に破れ、超固体と呼ばれる量子相へ転移することが予想されている。有限温度での 2 次元系 He4 の平衡分布を調べ超固体の予想を裏付けるため、連続空間における経路積分モンテカルロ法の改良を進めている。Event-chain モンテカルロの手法と、worm algorithm の手法を援用し、詳細釣り合い条件を破るアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムを相互作用のない理想 Bose 粒子に適用し、従来の方法より分布の収束が速く、トロッター数に対する時間計算量が改善した結果を得た [19]。

3.4.4 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

並列厳密対角化パッケージ

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, 10]。

物質科学シミュレーションのポータル MateriApps

日本国内においても、高性能な物質科学シミュレーションソフトウェアが数多く開発・公開されているが、その知名度は必ずしも高くない。また、ドキュメントの作成やユーザサポートにも問題が多く、普及の妨げとなっている。物質科学アプリケーションのさらなる公開・普及を目指し、物質科学シミュレーションのポータルサイト「MateriApps」の整備を行った。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 [11, 39]。

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
`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
`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
`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] Alexander Gaenko, 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 $\mathcal{H}\Phi$, Comp. Phys. Comm **217**, 180–192 (2017).

[4] Yu-Chin Tzeng, Hiroaki Onishi, Tsuyoshi Okubo, Ying-Jer Kao, Quantum phase transitions driven by rhombic-type single-ion anisotropy in the $S = 1$ Haldane chain, Phys. Rev. B **96**, 060404(R) (2017).

[5] Tsuyoshi Okubo, Kazuya Shinjo, Youhei Yamaji, Naoki Kawashima, Shigetoshi Sota, Takami Tohyama, Masatoshi Imada, Ground-state properties of Na_2IrO_3 determined from an ab initio Hamiltonian and its extensions containing Kitaev and extended Heisenberg interactions, Phys. Rev. B **96**, 054434 (2017).

[6] Kazuya Nomura, Yasuhiro H. Matsuda, Yasuo Narumi, Koichi Kindo, Shojiro Takeyama,Yuko Hosokoshi, Toshio Ono, Naoya Hasegawa, Hidemaro Suwa, Synge Todo, Magnetization process of the $S = 1/2$ two-leg organic spin-ladder compound BIP-BNO, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 104713 (2017).

[7] Shohei Hayashida, Hajime Ishikawa, Yoshihiko Okamoto, Tsuyoshi Okubo, Zenji Hiroi, Maxim Avdeev, Pascal Manuel, Masato Hagihala, Minoru Soda, Takatsugu Masuda, Magnetic state selected by magnetic dipole interaction in the kagome antiferromagnet $NaBa_2Mn_3F_{11}$, Phys. Rev. B **97**, 054411 (2018).

[8] Naoto Tsujimoto, Daiki Adachi, Ryosuke Akashi, Synge Todo, Shinji Tsuneyuki, Crystal Structure Prediction Supported by Insufficient Experimental Data, to appear in Phys. Rev. Materials.

(国内雑誌)

[9] 西野友年, 大久保 毅, テンソルネットワーク形式の進展と応用, 日本物理学会誌 **72**, 702 (2017).

[10] 山地洋平, 三澤貴宏, 吉見一慶, 河村光晶, 藤堂眞治, 川島直輝, 量子格子模型の汎用数値対角化パッケージ $\mathcal{H}\Phi$ -スピン液体近傍の熱・スピン励起への適用-, 固体物理 **52**, 539–550 (2017).

[11] 本山裕一, 三澤貴宏, 加藤岳生, 藤堂眞治, 物質科学シミュレーションのポータルサイト MateriApps, 固体物理 **52**, 743–755 (2017).

(学位論文)

[12] Fumihiro Ishikawa, Nonergodicity and localized mode in a classical harmonic chain bath model (修士論文)

[13] Takuya Yamamoto, Tensor Network Renormalization for Non-uniform Classical Spin Systems (修士論文)

[14] Toshiki Horita, Critical Phenomena of the Ising Model with Non-Integer Effective Dimensions - a Monte Carlo Study (博士論文)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[15] Tatsuhiko Shirai, Takashi Mori, Seiji Miyashita, "Floquet Gibbs state in time periodically driven open quantum systems," 14th Granada Seminar, June 2017, University of Granada.

[16] Tatsuhiko Shirai, Takashi Mori, Seiji Miyashita, "Floquet-Gibbs state in open quantum systems," Quantum Thermodynamics: Thermalization and Fluctuations, September 2017, Kyoto.

[17] Daiki Adachi, Synge Todo, "Acceleration of Markov chain Monte Carlo methodbased on physical operator," 2nd International Symposium on Research and Education of Computational Science (RECS), December 2017, Tokyo.

[18] Tatsuhiko Shirai, Synge Todo, Seiji Miyashita, "Microscopic description of Optical Bistability," 2nd International Symposium on Research and Education of Computational Science (RECS), December 2017, Tokyo.

[19] Motoi Suzuki, Synge Todo, "Path Integral Monte Carlo for Continuous Space Breaking the Detailed Balance Condition," 2nd International Symposium on Research and Education of Computational Science (RECS), December 2017, Tokyo.

[20] Takuya Yamamoto, Synge Todo, "Tensor Network Renormalization for Non-uniformClassical Spin Systems," 2nd International Symposium on Research and Education of Computational Science (RECS), December 2017, Tokyo.

招待講演

[21] Tsuyoshi Okubo, "Multiple-q States and Skyrmion Lattice in Frustrated Spin Systems," Skyrmionics: Materials, Phenomena and Applications, August 2017, Santa Fe.

[22] Synge Todo, "Recent progress in Markov Chain Monte Carlo Method (plenary talk)," 36th JSST Annual International Conference on Simulation Technology, October 2017, Tokyo.

[23] Tsuyoshi Okubo, "Tensor network study on Kitaev materials," Novel Quantum States in Condensed Matter 2017, November 2017, YITP.

(国内会議)

一般講演

[24] 大久保毅、川島直輝,「テンソルネットワーク法によるカゴメ格子量子スピン模型の磁化過程計算」, 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」, 2017 年 4 月, 物性研.

[25] 石川文啓、藤堂眞治,「古典格子多体模型を用いた一般化ランジュバン方程式の記憶関数解析」, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大.

[26] 白井達彦, 藤堂眞治, 宮下精二,「並列化計算をいた量キャビティ系での光双安定性の解析」, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大.

[27] 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における高次元探索による高速化の可能性」, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大.

[28] 山本卓矢、藤堂眞治,「古典スピン系に対するテンソルネットワークくりこみ群の一般的な 2 次元格子への拡張」, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大.

[29] 大久保毅、川島直輝,「テンソルネットワーク法の量子スピン液体への適用」, ポスト京萌芽的課題「基礎科学の挑戦」サブ課題 D 研究会, 2017 年 10 月, 東大柏の葉駅前サテライト.

[30] 白井達彦, 藤堂眞治, H. De Raedt, 宮下精二,「Microscopic description of Optical Bistability」, ポスト京萌芽的課題「基礎科学の挑戦」サブ課題 D 研究会, 2017 年 10 月, 東大柏の葉駅前サテライト.

[31] 大久保毅、川島直輝,「MPI 並列テンソルネットワーク法の開発と 2 次元量子スピン模型への適用」, 第 3 回 CDMSI（ポスト「京」重点課題（7））シンポジウム, 2017 年 12 月, 物性研.

[32] 大久保毅、川島直輝,「テンソルネットワーク法によるキタエフスピン物質の研究」, 第二回量子スピン液体研究の新展開, 2017 年 12 月, 東大.

[33] 白井達彦, 藤堂眞治, H. De Raedt, 宮下精二,「共振器系で起こる光双安定性の微視的模型による記述」, 第 1 回ポスト「京」萌芽的課題「基礎科学の挑戦」・「極限マテリアル」合同公開ワークショップ, 2018 年 1 月, ステーションコンファレンス東京.

[34] 大久保毅、金子隆威、山地洋平、川島直輝,「テンソルネットワーク法による非対角相互作用のあるハニカム格子キタエフ模型の基底状態計算」, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大.

[35] 白井達彦, 藤堂眞治, 宮下精二,「共振器系で起こる光双安定性の微視的模型による記述」, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大.

[36] 足立大樹、藤堂眞治,「物理演算子に依存した遷移行列を用いるマルコフ連鎖モンテカルロ法の高速化」, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大.

[37] 山本卓矢、藤堂眞治,「非一様な古典スピン系に対するテンソルネットワーク繰り込み」, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大.

招待講演

[38] 藤堂眞治,「古典コンピュータによる量子シミュレーション」, 第 14 回原子・分子・光科学検討会, 2017 年 6 月, 電通大.

[39] 藤堂眞治,「物質科学シミュレーション〜はじめの一歩」, 粉体粉末冶金協会平成 29 年度秋季大会, 2017 年 11 月, 京大.

[40] 藤堂眞治,「不完全な X 線回折実験データを利用した結晶構造予測」, ポスト「京」重点課題 (7)「 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 」サブ課題 G 第 6 回「共通基盤シミュレーション手法」連続研究会, 2017 年 12 月, 東大.

[41] 藤堂眞治,「計算科学の見える化 : 方程式〜アルゴリズム〜データ」, 見える化シンポジウム 2018〜シミュレーション可視化の未来, 2018 年 2 月, 日本橋.

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

1 次元電子系の光学応答におけるスピン・軌道相互作用と Zeeman 相互作用の協奏

低次元強相関系における電子スピン共鳴や光学伝導度などの動的特性は、系のハミルトニアンの詳細や低エネルギー励起を調べるプローブとして、理論的にも実験的にも盛んに研究されている。また、近年ではトポロジカル絶縁体の発見を契機に、固体中のスピン・軌道相互作用の重要性が再認識されている。

桂は、東大理物の Bolens、宮下、小形と 1 次元電子系において、スピン・軌道相互作用 (SOC) と外部磁場との Zeeman 相互作用が、どのように光学応答に影響を与えるかを調べた [3]。具体的には、強相関電子系を記述する標準的な模型である Hubbard 模型に、SOC をスピンに依存するホッピングの形で取り込んだ模型に久保公式を適用して調べた。まず、オンサイト Coulomb 相互作用 $U = 0$ のとき、SOC と磁場の両方が存在する場合には、electric dipole spin resonance (EDSR) と呼ばれる応答が起こることを解析的に示した。また、この EDSR が SOC を特徴づけるベクトル (D ベクトル) と磁場のなす角度に非自明に依存することを明らかにした。次に、$U \neq 0$ の場合について数値的に調べ、U の大きさに応じて EDSR のピーク周波数の位置や振幅が変化することを明らかにした。ハーフフィリングの Mott 絶縁体相では、$U \to \infty$ で EDSR の応答はなくなってしまうが、この場合についても有効スピン模型を用いて光学伝導度を調べ、SOC と磁場の双方に依存する非自明な応答が起こることを明らかにした。

ダイマー・トライマー・スピン鎖と SPT

スピン 1 の bilinear-biquadratic (BLBQ) スピン鎖は、対称性に守られたトポロジカル (SPT) 相である Haldane 相や、ダイマー相、強磁性相やスピン四重極相を含む量子スピン系のひな型として、現在まで多くの研究がなされてきた。桂と Lee (東大物性研), Oh, Han (韓国・成均館大) は、BLBQ スピン鎖とは異なるタイプの模型として、ハミルトニアンがダイマーおよびトライマーへの射影演算子からなる模型を考えた。ここで、ダイマーとは隣り合う 2 つのスピン 1 からなるスピン一重項、トライマーとは隣接する 3 つのスピン 1 からなるスピン一重項を意味する。

この模型の基底状態における様々な相関関数やエンタングルメントを密度行列繰り込み群 (DMRG) により調べたところ、ダイマー・トライマー相互作用の強さの比に応じて、(1) ダイマー相、(2) SPT 相、(3) トライマー液体相、(4) 巨視的に縮退した相、の 4 つの相が現れることが明らかになった (図 3.5.1)。また、数値計算結果は、これらの相の間の相転移は 1 次転移であることを示唆している。相 (1), (2) は、それぞれ BLBQ スピン鎖のダイマー相、SPT 相と断熱的に繋がっていると考えられる。また、ギャップレスの相 (3) は、BLBQ 鎖のスピン四重極相と定性的には同じ相であることを、種々の相関関数・エンタングルメントおよび基底状態を比較することで示した。さらに、相 (4) では基底状態の縮退度は系のサイズに対して指数関数的に増大することを、その厳密な下限を求めることにより示した。これらの結果は、論文 [5] にまとめられ、国際会議などで発表された [20, 43]。

ボソン系とフェルミオン系の基底状態エネルギー

相互作用のない場合、ボソン系の基底状態エネルギーは常に、同じ粒子数で同じ一粒子固有エネルギーを持つフェルミオン系の基底状態エネルギー以下になる。これは、ボソン系では最低エネルギーの一粒子状態にいくらでも粒子を「詰める」ことができるためである。しかし、粒子間に相互作用が働く場合に

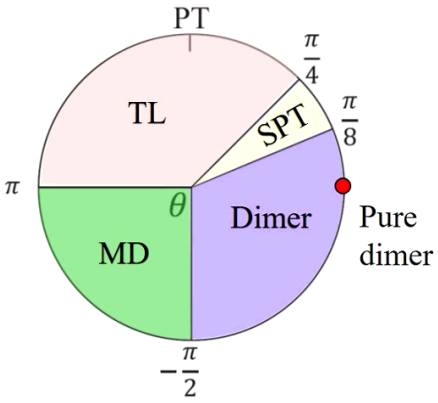


図 3.5.1: ダイマー・トライマー・スピン鎖の基底状態相図。ダイマー相互作用とトライマー相互作用の強さ比は、$\cos\theta$: $\sin\theta$ である。Dimer, SPT, TL, MD は、それぞれダイマー相、SPT 相、トライマー液体相、巨視的に縮退した相の各相を表す。

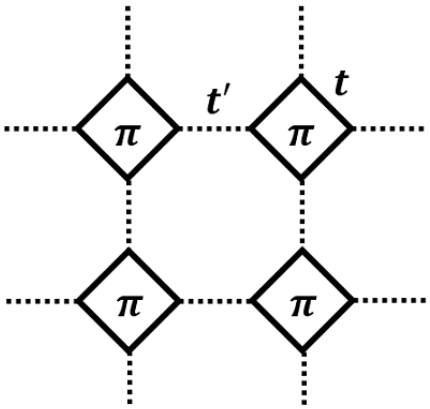


図 3.5.2: π フラックスが貫いたリングが弱く結合した系。実線 (破線) 上の飛び移り積分は、t (t') である。$t'/t < (\sqrt{2}-1)/2$ のとき、ハードコアボソン系の基底状態エネルギーの方が、スピンレスフェルミオン系のそれよりも高くなることが示せる。

も、この関係式が成立するかは自明ではない。桂は、押川 (東大物性研), Nie (中国・四川大) と、この問題を格子系について詳しく調べた。具体的には、同じ格子上で同じ飛び移り積分のハードコアボソン系とスピンレスフェルミオン系の基底状態エネルギーを様々な場合に比較した。その結果、すべての飛び移り積分が非負で、格子が一定の条件を満たす場合には、ボソン系の基底状態エネルギーの方が必ずフェルミオン系のそれよりも下がることを厳密に示した。また同様の不等式を、スピン自由度がある場合やその他の相互作用がある場合についても拡張した。

このような基底状態エネルギーの間の「自然な」大小関係は、飛び移り積分が負符号をとる (ホッピングにフラストレーションがある)、あるいは複素の場合には破れることもある。実際に、磁束の貫いたリング状の系や、そのようなリングが結合した系 (図 3.5.2)、カゴメやパイロクロア格子などの平坦バンドを持つ系においては、ボソン系の基底状態エネルギーの方がフェルミオン系のそれよりも高くなることを、有限系の数値対角化や基底状態エネルギーの下限に関する Anderson の議論 [P. W. Anderson, Phys. Rev. 83, 1260 (1951)] などを用いて示した。これらの結果は、論文 [9] にまとめられている。

3.5.2 トポロジカル系

捻り境界条件下での Kitaev 模型とゼロモード

Kitaev により考案された 1 次元 p 波超伝導体 の模型 (Kitaev 模型) は、そのトポロジカル相でマヨラナフェルミオンの端状態が現れることから、トポロジカル超伝導体の典型例として注目を集めてい る。また近年では、鉄の原子鎖を用いた実験的な実現も提案されている [Nadj-Perge et al., Science 346, 602 (2014)]。桂は、川畑、小林と Wu (北京理工大学) とともに、捻り境界条件を課した Kitaev 模型について調べた。その結果、この系では、端がないにもかかわらずマヨラナ・ゼロモードが現れる場合があることを明らかにした。また、このマヨラナ・ゼロモードは、ある種の場合には乱れに対してもロバストであることを、ハミルトニアンと交換する演算子を構成することで具体的に示した。さらに最近接相互作用がある場合も、フェルミオン・パリティによる議論および数値対角化から、トポロジカル相では、ある捻り角においてマヨラナ・ゼロモードが存在することを明らかにした。

これらの結果は、従来は端がある場合だけに現れると考えられていたマヨラナ・ゼロモードが、端がない場合にも表れ得ることを明らかにしたものであり、意義のあるものである。また、捻り境界条件は、物理的にはリング状の系を貫く磁束とジョセフソン結合により実現できるものと考えられる。これらの結果は、論文誌 [1] にまとめられ、また国際会議などで発表された [25, 32].

乱れたトポロジカル絶縁体：$\mathbf{Z}_2$ 指数の新しい数値計算法

物質内部はエネルギーギャップを有する一方、その表面にはギャップレスの “金属” 状態が現れる物質をトポロジカル絶縁体と呼び、そのトポロジカルな性質から乱れに強いとされ、大きな注目を集めている。しかし、系に乱れがあると、系を特徴づけるトポロジカル不変量の値を決めることは数値的にも難しい。特に、トポロジカル不変量の一種である $\mathbf{Z}_2$

指数の値を計算する方法は、今までにも数多く試みられてきた。

赤城・桂は、高麗 (学習院大) と、非可換微分幾何に基づいた $\mathbf{Z}_2$ 指数の新たな数値計算法を提案し、それを乱れのある $\mathbf{Z}_2$ トポロジカル絶縁体の典型的な模型に適用した [7]。本手法は、強い乱れがある場合にも適用可能で、$\mathbf{Z}_2$ 指数を数値的に効率良く計算できるという特徴をもつ。この $\mathbf{Z}_2$ 指数は、2 つの射影演算子の差で表される演算子 $A = P_{\mathrm{F}} - D_{\mathbf{a}} P_{\mathrm{F}} D_{\mathbf{a}}$ の固有値 $\lambda = 1$ の縮退度の偶奇によって定義される。ここで、P_{F} は Fermi エネルギー以下の準位への射影演算子、$D_{\mathbf{a}}$ は $D_{\mathbf{a}}^2 = 1$ を満たす Dirac 作用素である。この $\mathbf{Z}_2$ 指数は、厳密には無限系で定義されるものである [8]。本研究では、どのように A を有限次元の行列で近似し、有限系で $\mathbf{Z}_2$ 指数 ν を数値的に計算するかを提案した。この方法を 3 次元 $\mathbf{Z}_2$ トポロジカル絶縁体を記述する Wilson-Dirac 型模型に適用し、A の固有値を詳細に調べたところ、得られた相図 (図 3.5.3) は、転送行列を用いて得られた相図と良く一致することが分かった。また、強いトポロジカル絶縁相は非自明な $\mathbf{Z}_2$ 指数 $\nu = 1$ によって特徴付けられ、それ以外の相では $\nu = 0$ となった。2 次元の Bernevig-Hughes-Zhang 模型も扱い、先行研究と同様の一致を得た。これらの結果は、乱れがあっても、この $\mathbf{Z}_2$ 指数がトポロジカル絶縁体を特徴付けているトポロジカル不変量だということを示している。これらの結果は、研究会などでも発表された [14, 38]。

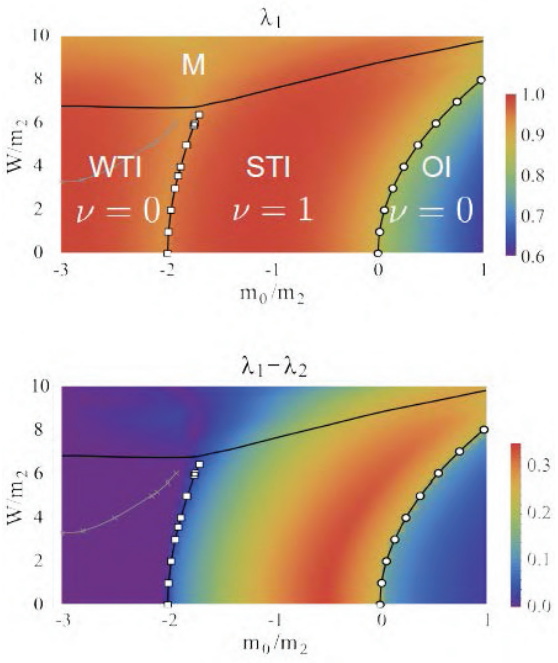


図 3.5.3: Wilson-Dirac 型模型における質量項 m_0, 乱れの強さ W に対する λ_1 と $\lambda_1 - \lambda_2$。ここで、λ_1, λ_2 は、2 つの射影演算子の差で定義される演算子 A の (縮退度を含めて) 大きい方から 1 番目と 2 番目の固有値を表す。M, WTI, STI, OI は、それぞれ diffusive metal, 弱いトポロジカル絶縁体, 強いトポロジカル絶縁体, 通常の絶縁体の各相を表す。また各相における、$\mathbf{Z}_2$ トポロジカル数 ν の値も示した。

3.5.3 可解模型・統計力学

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。

宇田川と桂は、上の模型のさらに拡張である変形 Fredkin スピン鎖という可解な半奇整数スピン鎖の、基底状態および励起状態について調べた。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として表現される [2]。我々は、特に模型のパラメータ t が $t > 1$ の場合について解析を行った。その結果、有限サイズギャップが系の大きさに対して少なくとも指数的に減衰することを変分法を用いて証明した。また、基底状態における磁化が z 軸方向に沿っており、その z 成分がドメインウォール構造を示すことを明らかにした。さらに、系を任意の場所で二分割したときの基底状態のエンタングルメントについても調べた。レニー・エントロピーおよび EE が、スピン 1/2 のときは面積則、スピン 3/2 以上のときは体積則を満たすことを、不等式を用いた評価によって示した。また、1 サイトあたりのエンタングルメント・スペクトルが低エネルギー領域において近似的に等間隔に分布することを示した。これらの成果は投稿論文、学会で発表された [4, 30]。また、宇田川は、これらの結果を修士論文としてまとめた [11]。

3.5.4 共形場理論のサイン二乗変形

系の局所ハミルトニアンを正弦関数の二乗でスケーリングするサイン二乗変形 (Sine-Square Deformation, SSD) は、1+1 次元量子系において開放境界の効果を効率的に抑えるためのスムージングとして導入され、その特異な性質からも注目されてきた。特に、共形場理論においても SSD を施したハミルトニアンが Virasoro 代数の生成子を用いて表現され、そのエネルギースペクトルが連続になるなど、様々な性質がこれまで発見されている。

田村と桂は、共形場理論における SSD について、その固有状態は (変形前の一様系の) 真空状態を除いて有

限のノルムを持たないことを示した。また SSD を施したハミルトニアンは、Virasoro 演算子の差 $L_1 - L_{-1}$ から生成されるユニタリ変換を用いた極限操作を一様系のハミルトニアン L_0 に作用させることで得られることを示した。これにより、よく知られている一様系の固有状態から SSD ハミルトニアンの固有状態を統一的に求めることができる。さらにはこの変換を介することで、ノルムの発散する固有状態における物理量の期待値を極限操作を用いた外挿値として計算することができる。特に論文 [6] では、SSD ハミルトニアンのゼロエネルギー状態を求め、その「規格化」の方法を明らかにした。これらの結果は各種学会などで発表され [27, 28]、また、田村の修士論文としてまとめられている [12]。

3.5.5 その他

桂は、東大理物の Bolens, 宮下, 小形と、α-$RuCl_3$ における最近の実験結果を念頭に、Kitaev 物質における局所的電気分極の表式および光学伝導度について調べた。その結果、Kitaev 模型の素励起であるマヨラナフェルミオンの動的相関により、観測されている光学伝導度の低エネルギーの振る舞いを定性的に説明できることを示した [10, 33]。

吉岡, 赤城, 桂は、乱れた 2 次元のトポロジカル超伝導体の相図を、機械学習を用いて調べることを試みた。具体的には、系の準粒子分布を画像とみなし、その特徴を機械に学ばせることで相判定を行う。その結果、乱れがないときの準粒子分布のみを学習した機械への入力として、準粒子分布を平均化した画像を用いることで、乱れがある場合の相判定が可能であることを明らかにした。この結果は、国際会議などで発表されている [18, 19, 22, 24, 36, 37]。

平坦バンド系は強磁性や分数量子ホール効果などの観点から興味が持たれており、また近年では冷却原子系や光学系を用いた実現も話題を集めている。桂は、平坦バンドをもつ Hubbard 模型における強磁性や関連する話題についての入門的な講演を行った [26]。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Kohei Kawabata, Ryohei Kobayashi, Ning Wu, and Hosho Katsura: Exact zero modes in twisted Kitaev chains, Phys. Rev. B, **95**, 195140 (2017).

[2] Olof Salberger, Takuma Udagawa, Zhao Zhang, Hosho Katsura, Israel Klich, and Vladimir Korepin: Deformed Fredkin Spin Chain with Extensive Entanglement, J. Stat. Mech., 063103 (2017).

[3] Adrien Bolens, Hosho Katsura, Masao Ogata, and Seiji Miyashita: Synergetic effect of spin-orbit coupling and Zeeman splitting on the optical conductivity in the one-dimensional Hubbard model, Phys. Rev. B, **95**, 235115 (2017).

[4] Takuma Udagawa and Hosho Katsura: Finite-size gap, magnetization, and entanglement of deformed Fredkin spin chain, J. Phys. A: Math. Theor. **50**, 405002 (2017).

[5] Yun-Tak Oh, Hosho Katsura, Hyunyong Lee, and Jung Hoon Han: A new kind of spin-1 chain model with competing dimer and trimer interactions, Phys. Rev. B, **96**, 165126 (2017).

[6] Shota Tamura and Hosho Katsura: Zero-energy states in conformal field theory with sine-square deformation, Prog. Theor. Exp. Phys **2017**, 113A01 (2017).

[7] Yutaka Akagi, Hosho Katsura,and Tohru Koma: A New Numerical Method for $\mathbf{Z}_2$ Topological Insulators with Strong Disorder, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 123710 (2017).

[8] Hosho Katsura and Tohru Koma: The noncommutative index theorem and the periodic table for disordered topological insulators and superconductors, J. Math. Phys. **59**, 031903 (2018).

[9] Wenxing Nie, Hosho Katsura, and Masaki Oshikawa: Particle Statistics, Frustration, and Ground-State Energy, Phys. Rev. B **97**, 125153 (2018).

[10] Adrien Bolens, Hosho Katsura, Masao Ogata, and Seiji Miyashita: Mechanism for subgap optical conductivity in honeycomb Kitaev materials, to appear in Phys. Rev. B.

(学位論文)

[11] 宇田川拓麻 : Quantum entanglement in frustration-free spin chains associated with combinatorics (修士論文).

[12] 田村翔太 : 連続場の理論におけるサイン二乗変形 (修士論文).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[13] Yun-Tak Oh (Hyunyong Lee, Jung Hoon Han, Hosho Katsura): Resonating Valence Bond States with Trimer Motifs, *2017 KPS Spring Meeting*, Daejeon Convention Center, April 2017.

[14] Yutaka Akagi: Noncommutative $\mathbf{Z}_2$ index of 3D topological insulators with disorder, *International Conference on Topological Materials Science 2017 (TopoMat2017)*, Tokyo, May 2017.

[15] Noriaki Sannomiya: SUSY breaking and NG fermions in $\mathbf{Z}_2$ Nicolai model, *International Conference on Topological Materials Science 2017 (TopoMat2017)*, Tokyo, May 2017.

[16] Nobuyuki Yoshioka: Anomalous Thermal Hall Effect in Nodal Chiral Superconductors, *International Conference on Topological Materials Science 2017 (TopoMat2017)*, Tokyo, May 2017.

[17] Noriaki Sannomiya: Spontaneous Supersymmetry Breaking and Nambu-Goldstone Fermions in $\mathbf{Z}_2$ Nicolai Model, *Croucher Summer Course "Quantum Entanglement and Topological Order"*, Hong Kong, June 2017.

[18] Nobuyuki Yoshioka: Machine learning phases of disordered topological superconductors, *Machine Learning and Many-Body Physics*, Beijing, China, July 2017.

[19] Nobuyuki Yoshioka: Learning Disordered Topological Phases by Statistical Recovery of Symmetry, *Novel Quantum States in Condensed Matter 2017 (NQS2017)*, Kyoto, Oct. 2017.

[20] Hosho Katsura: Quantum Hangul, *Novel Quantum States in Condensed Matter 2017 (NQS2017)*, Kyoto, Nov. 2017.

[21] Noriaki Sannomiya: Supersymmetry Breaking in an Interacting Majorana Chain, *Novel Quantum States in Condensed Matter 2017 (NQS2017)*, Kyoto, Nov. 2017.

[22] Nobuyuki Yoshioka: Machine Learning Disordered Topological Phases by Statistical Recovery of Symmetry, *APS March Meeting*, Los Angeles, Mar. 2018.

[23] Noriaki Sannomiya: Spontaneous SUSY Breaking and Nambu-Goldstone fermions in extended Nicolai models, *APS March Meeting*, Los Angeles, Mar. 2018.

[24] Nobuyuki Yoshioka: Learning Disordered Topological Phases by Statistical Recovery of Symmetry, *FOR1807 Winter School on Numerical Methods for Strongly Correlated Quantum Systems*, Marburg, Feb. 2018.

招待講演

[25] Hosho Katsura: Topological order and zero modes in interacting Kitaev/Majorana chains, *Quantum Devices*, Natal, Brazil, Aug. 2017.

[26] Hosho Katsura: Tasaki is ubiquitous, *Flatband Networks in Condensed Matter and Photonics*, Daejon, Korea, Aug. 2017.

(国内会議)

一般講演

[27] 桂 法 称: Sine-square deformations of one-dimensional critical systems: exact results, サイン 2 乗変形 (SSD) とその周辺, 2017 年 6 月, 理研.

[28] 田村翔太, 桂法称: 共形場理論におけるサイン二乗変形とそのゼロエネルギー状態, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.

[29] 桂法称, Hyunyong Lee, Yun-tak Oh, Jung Hoon Han : 量子トライマー模型の RVB 状態と $\mathbf{Z_3}$ トポロジカル秩序, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.

[30] 宇田川拓麻, 桂法称, Olof Salberger, Vladimir Korepin, Zhao Zhang, Israel Klich: 変形 Fredkin スピン鎖におけるエンタングルメントおよび量子相転移, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.

[31] 吉岡信行, 赤城裕, 桂法称: 乱れたトポロジカル超伝導体の非可換指数と量子相図, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.

[32] 川畑幸平, 小林良平, Ning Wu, 桂法称: 捻り境界条件を課した Kitaev 模型におけるマヨラナ・ゼロモードの出現, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.

[33] Adrien Bolens, Hosho Katsura, Masao Ogata, Seiji Miyashita: Charge fluctuation and optical response in two-dimensional Mott insulators, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.

[34] 伊與田英輝, 桂法称, 沙川貴大: 乱れた量子多体系における量子情報の非局所化, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.

[35] 三ノ宮典昭, 桂法称: Majorana 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 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.

[36] 吉岡信行, 赤城裕, 桂法称: 機械学習による乱れたトポロジカル超伝導体の相判定, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.

[37] 吉岡信行: 対称性の統計的回復による乱れたトポロジカル相の学習と分類, 第 11 回　物性科学領域横断研究会, 2017 年 11 月, 東大物性研.

[38] 赤城裕: $\mathbf{Z_2}$ 指数の新しい計算法: 乱れたトポロジカル絶縁体, 第 11 回 物性科学領域横断研究会, 2017 年 11 月, 東大物性研.

[39] 赤城裕: 対称性の統計的回復による乱れたトポロジカル相の学習と分類, 第 7 回 強相関電子系理論の最前線, 2017 年 12 月, 函館.

[40] 柴田直幸, 桂法称: 散逸のある XY スピン鎖のマヨラナフェルミオンを用いた解法, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大学.

[41] 今村征央, 桂法称, 1 次元マヨラナ-スピン混合系の可解模型, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大学.

[42] 赤城裕, 植田浩明, Nic Shannon, トポロジカル励起のシミュレーションのための効率的なスピンフリップ, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大学.

[43] 桂法称, Yun-tak Oh, Hyunyong Lee, Jung Hoon Han : S=1 ダイマー・トライマー模型の基底状態相図, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大学.

[44] 川畑幸平, 蘆田祐人, 桂法称, 上田正仁, 流入・散逸のあるキタエフ鎖におけるパリティ・時間対称性によって誘起されたエッジ状態, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大学.

(セミナー)

[45] 三ノ宮典昭: Spontaneous Supersymmetry Breaking and Nambu-Goldstone Fermions in Lattice Models, 駒場素粒子論研究室セミナー, 2017 年 4 月, 東京大学.

[46] 桂法称: Quantum Hangul, 統計力学セミナー, 2017 年 5 月, 東京大学.

[47] 三ノ宮典昭: Spontaneous Supersymmetry Breaking and Nambu-Goldstone Fermions in Extended Nicolai Models, 初田量子ハドロン物理学研究室セミナー, 2017 年 5 月, 理研.

[48] 赤城裕: Noncommutative $\mathbf{Z_2}$ index of 3D topological insulators with disorder, 統計力学セミナー, 2017 年 7 月, 東京大学.

[49] 吉岡信行: Machine Learning Crash Course for Condensed Matter Physicists, Informal Condensed Matter Seminar, 2017 年 11 月, 京都大学.

[50] 桂法称: Supersymmetry breaking and Nambu-Goldstone fermions in lattice models, CMT seminar, 2017 年 11 月, Amsterdam 大学.

[51] 桂法称: Quantum Hangul, CMT seminar, 2017 年 11 月, Utrecht 大学.

[52] 吉岡信行: Learning Disordered Topological Phases by Statistical Recovery of Symmetry, Hadron Physics Group semiar, 2017 年 12 月, 東京大学.

[53] 桂法称: 1 次元量子臨界系のサイン二乗変形, 東京無限可積分系, 2018 年 1 月, 東京大学.

[54] 桂法称: Thermal Hall effect of magnons, Max Planck-UBC-UT Winter School, 2018 年 2 月, 東京大学.

[55] 吉岡信行: Learning Disordered Topological Phases by Statistical Recovery of Symmetry, Seminar in Solid State Physics, 2018 年 2 月, Zurich 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，レーザー光源，実験室光源を用いて実験を行っている。

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。

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，強磁性半導体，重金属-遷移金属系は，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，磁場方向，偏光方向が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 XMCD 測定を行っている。

$La_{1-x}Sr_xMnO_3$ 薄膜が示す磁気異方性の起源

$La_{1-x}Sr_xMnO_3$ が示す磁気異方性の起源を調べるために磁場方向依存 XMCD 測定を行った。磁気異方性と軌道磁気モーメントの異方性の間で良く知られた関係（Bruno の関係）は見られず，応力により生じたスピン密度の空間分布の異方性が磁気異方性を支配していることが示唆された [14]。

FePt 薄膜の垂直磁気異方性の起源

$L1_0$ 型秩序 FePt 合金の薄膜の強い垂直磁気異方性の起源を調べるために，Fe および Pt の L 吸収端で XMCD 測定を行い、Fe 端，Pt 端ともに Bruno の関係が破れていることが示された。今後は，スピン密度の空間分布の異方性を，Fe 3d 電子および Pt 5d 電子について調べて行く [10]。

＜受賞＞

[1] 芝田悟朗：*15-th International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM 2017)* (Kyoto, August 21-September 1), 研究奨励賞.

[2] 池田啓祐：第 31 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム（つくば，2018 年 1 月 8-10 日），学生発表賞.

[3] 野中洋亮：2017 年度量子ビームサイエンスフェスタ（水戸，2018 年 3 月 2-4 日），優秀ポスター賞.

[4] 坂本祥哉：理学系研究奨励賞.

＜報文＞

(原著論文)

[5] K. Yano *et al.* : 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 **515**, 118-125 (2017).

[6] T. Noda *et al.* : Orbital-dependent band renormalization in $BaNi_2(As_{1-x}P_x)_2$ ($x = 0.00$ and 0.092), J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 064708–1-8 (2017).

[7] Y. K. Wakabayashi *et al.* : Electronic structure and magnetic properties of magnetically dead layers in epitaxial $CoFe_2O_4/Al_2O_3/Si(111)$ films studied by x-ray magnetic circular dichroism, Phys. Rev. B **96**, 104410–1-11 (2017); arXiv:1704.01712

[8] S.-i. Fujimori *et al.* : Electronic structure of $ThRu_2Si_2$ studied by angle-resolved photoelectron spectroscopy: Elucidating the contribution of U 5f states in URu_2Si_2, Phys. Rev. B **96**, 125117–1-9 (2017); arXiv:1708.08165

[9] S.-I. Fujimori *et al.* : Electronic structures of UX_3 (X = Al, Ga, and In) studied by photoelectron spectroscopy, Phys. Rev. B **96**, 115126 (2017); arXiv:1709.06235

[10] K. Ikeda *et al.* : Magnetic anisotropy of $L1_0$-ordered FePt thin films studied by Fe and Pt $L_{2,3}$-edges x-ray magnetic circular dichroism, Appl. Phys. Lett. **111**, 142402–1-5 (2017); arXiv:1706.08183

[11] S. Sakamoto *et al.* : Effects of cobalt substitution in $L1_0$-(Fe,Co)Pt thin films, Phys. Rev. B **96**, 144437–1-5 (2017); arXiv:1710.03927

[12] M. Kobayashi *et al.* : Emergence of quantum critical behavior in metallic quantum-well states of strongly correlated oxides, Sci. Rep. **7**, 16621–1-7 (2017); arXiv:1706.02433

[13] D. Ootsuki *et al.* : A Novel one-dimensional electronic state at $IrTe_2$ surface, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 123704–1-5 (2017).

[14] G. Shibata *et al.* : Anisotropic spin-density distribution and magnetic anisotropy of strained $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ thin films: Angle-dependent x-ray magnetic circular dichroism, npj Quantum Mater. **3**, 3–1-6 (2018); arXiv:1706.05183.

[15] K. Yamamoto *et al.* : Thickness dependence and dimensionality effects on charge and magnetic orderings in $La_{1/3}Sr_{2/3}FeO_3$ thin films, Phys. Rev. B **97**, 075134–1-6 (2018); arXiv:1703.09995

[16] S. Yamamoto *et al.* : Observation of a pseudogap in the vicinity of the metal-insulator transition in the perovskite-type vanadium oxides $Nd_{1-x}Sr_xVO_3$, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 024708–1-5 (2018).

[17] K. Okazaki *et al.* : Antiphase Fermi-surface modulations accompanying displacement excitation in a parent compound of iron-based superconductors, Phys. Rev. B **97**, 121107(R)–1-6 (2018); https://arxiv.org/abs/1803.02599

(綜説，解説，その他)

[18] 藤森 淳：巻頭言「放射光施設と放射光ユーザー」，放射光 **30**, No. 34, 1-2.

[19] 堀尾眞史他：角度分解光電子分光で明らかにした銅酸化物ノンドープ超伝導体の電子状態，PF News Vol. 53, No. 2, p. 8 (2017).

[20] 小林正起他：強相関酸化物の金属量子井戸における量子臨界的挙動，PF News Vol. 35, No. 4, p. 7 (2018).

[21] 池田啓祐：JSR2018 学生発表賞 第二分野「角度依存 XMCD による $L1_0$ 秩序型 FePt 薄膜の垂直磁気異方性の研究」，放射光 Vol. 31, No. 2, p. 145-146 (2018).

(学位論文)

[22] 坂本祥哉：Electronic structures and magnetic properties of Fe-doped ferromagnetic semiconductors（博士論文）

[23] 池 振棟：X-ray magnetic circular dichroism study of Co-heavy metal heterointerfaces（修士論文）

[24] 中田 勝：Angle-resolved photoemission study of electronic nematicity in the cuprate superconductors（修士論文）

[25] 萩原健太：Superconducting gap and pseudogap in the surface states of iron-based superconductors studied by angle-resolved photoemission spectroscopy（修士論文）

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[26] A. Fujimori: Multiple component Fermi surfaces of high-T_c cuprates revealed by ARPES, *Quantum Physics in Complex Matter: Superconductivity, Magnetism and Ferroelectricity (Superstripes 2017)* (Ischia, Italy, June 5-10, 2017).

[27] A. Fujimori and M. Horio: Antiferromagnetic *versus* correlation pseudogap in electron-doped cuprates, *International Workshop on Strong Correlations and Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy (CORPES17)* (Hiroshima, July 2-7, 2017).

[28] M. Kitamura *et al.* : Origin of interfacial ferromagnetism between perovskite oxides $LaNiO_3$ and $LaMnO_3$, *IUMRS-ICAM 2017 (15-th International Conference on Advanced Materials)* (Kyoto, August 27-September 1, 2017).

[29] A. Fujimori: New insight into the pseudogap and symmetry breaking in high-temperature superconductors revealed by ARPES, *23 Users' Meeting & Workshops* (NSRRC Taiwan, September 5-8, 2017).

[30] A. Fujimori: New insight into the pseudogap and symmetry breaking in high-temperature superconductors from ARPES, *Electronic Properties of Strongly Correlated Materials* (University of British Columbia, December 2-4, 2017).

[31] A. Fujimori: New electron-doped cuprates studied by ARPES and core-level spectroscopies, *Electron and Photon Spectroscopies of Quantum Materials: Status and Perspectives* (IFW Dresden, January 29-31 2018).

一般講演

[32] S. Sakamoto *et al.* : Soft x-ray spectroscopy and first-principles calculation studies of the electronic structure of the novel high-T_C ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb, *IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG Europe 2017)* (Dublin, April 24-28, 2017).

[33] K. Yamamoto *et al.* : Thickness dependence of charge and magnetic orderings in $La_{1/3}Sr_{2/3}FeO_3$ thin films studied by hard and soft x-ray scattering, *International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2017 (SCES 2017)* (Prague, July 17-21, 2017).

[34] S. Fujimori *et al.* : Electronic structures of strongly correlated uranium compounds studied by ARPES, *International Workshop on Strong Correlations and Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy (CORPES17)* (Hiroshima, July 2-7, 2017).

[35] T. Yoshida *et al.* : Self-energy in the superconducting states of the high-T_c cuprates $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$, *ibid.*

[36] D. Ootsuki *et al.* : Non-Fermi liquid behavior in the vicinity of metal to insulator transition in $Nd_{1-x}Sr_xVO_3$ probed by photoemission spectroscopy, *ibid.*

[37] A. Fujimori *et al.* : Effects of reduction annealing on the electron-doped cuprates revealed by ARPES and core-level spectroscopy, *28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28)* (Gothenburg, Sweden, August 9-16, 2017).

[38] T. Yoshida *et al.* : Self-energy in the superconducting states of the high-T_c cuprates revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy, *ibid.*

[39] G. Shibata *et al.* : Magnetic anisotropy and anisotropic spin-density distribution in strained $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ thin films revealed by angle-dependent XMCD, *IUMRS-ICAM 2017 (15-th International Conference on Advanced Materials)* (Kyoto, August 27-September 1, 2017).

[40] G. Shibata *et al.* : Anisotropic spin-density distribution in strained $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ thin films revealed by angle-dependent XMCD, *Junjiro Kanamori Memorial International Symposium* (Koshiba Hall, September 26-29, 2017).

[41] S. Sakamoto *et al.* : XMCD study on large perpendicular magnetic anisotropy of the new ferromagnetic semiconductor $(Ba,K)(Zn,Mn)_2As_2$ single crystal, *ibid.*

[42] Y. Nonaka *et al.* : Cation distribution at the interface of epitaxial $CoFe_2O_4/Al_2O_3/Si(111)$ films studied by x-ray magnetic circular dichroism, *ibid.*

[43] K. Ikeda *et al.* : Anisotropic orbital magnetic moments in $L1_0$-ordered FePt thin films studied by Fe and Pt $L_{2,3}$-edge x-ray magnetic circular dichroism, *ibid.*

[44] Z. Chi *et al.* : Orbital magnetic moment and Dzyloshinskii-Moriya interaction in Co-heavy metal heterostructures, *ibid.*

[45] M. Kobayashi *et al.* : Valence-band electronic structure of *n*-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As, *ibid.*

[46] Z. Chi *et al.* : Orbital magnetic moment anisotropy at ferromagnet/heavy metal heterostructures studied by x-ray magnetic circular dichroism, *Max Planck-UBC-UTokyo School for Quantum Materials* (University of Tokyo, February 15-18, 2018)

[47] S. Nakata *et al.* : Nematicity in the pseudogap state of the cuprate superconductor Bi2212 revealed by ARPES, *ibid.*

[48] K. Ikeda *et al.* : Magnetic field angle-dependent XMCD study of $L1_0$-ordered FePt thin films with perpendicular magnetic anisotropy, *ibid.*

[49] G. Shibata *et al.* : Magnetically-induced anisotropic charge distribution in $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ thin films revealed by x-ray magnetic linear dichroism, *18-th Taiwan-Japan-Korea Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (TJK18)* (Kenting, Taiwan, February 22-23, 2018).

[50] K. Ikeda *et al.* : Magnetic field angle-dependent XMCD study of $L1_0$-ordered FePt thin films with perpendicular magnetic anisotropy, *ibid.*

(国内会議)

招待講演

[51] A. Fujimori: Phase diagram and antiferromagnetic pseudogap of electron-doped cuprates, *The Research Forefront of High-T_c Cuprates*（東北大金研＆作並温泉，2017 年 5 月 23-24 日）

[52] 藤森淳：まとめ，日本物理学会 2017 年秋季大会シンポジウム「放射光を用いた磁性研究の 30 年-磁気円二色性の新たな展開-」（岩手大学， 2017 年 9 月 21-24 日）

[53] 坂本祥哉，藤森淳：光電子分光，XMCD，第一原理計算からみた Fe ドープ強磁性半導体, 第 1 回 CSRN-Tokyo Workshop 2017「新しいスピントロニクス機能材料の開発とその物性制御」（東京大学，2017 年 10 月 27-28 日）

一般講演

[54] 奥石佳佑他：角度分解光電子分光で観測する Te アニール $FeTe_{1-x}Se_x$ の電子構造，物性研短期研究会「光で見る・操る 電子物性科学の最前線〜強相関, トポロジー, 低次元, ダイナミクス」（物性研，2017 年 6 月 12-14 日）

[55] 中田勝他：角度分解型光電子分光で調べる銅酸化物超伝導体 Bi2212 のネマティシティ，同上.

[56] 萩原健太他：角度分解光電子分光による $PrFeAsO_{1-y}$ の超伝導ギャップ，同上.

[57] C. Lin *et al.* : Effects of pseudogap opening in the anti-nodal region of Bi2212 studied by ARPES, 同上.

[58] S. Sakamoto *et al.* : Large perpendicular magnetic anisotropy of the new ferromagnetic semiconductor $(Ba,K)(Zn,Mn)_2As_2$ single crystal，第 78 回応用物理学会秋季講演会（福岡，2017 年 9 月 5-8 日）

[59] Z. Chi *et al.* : Orbital magnetic moment of heavy metals in Co-heavy metal heterostructures studied by x-ray magnetic circular dichroism, 同上.

[60] M. Kobayashi *et al.* : Valence-Band Electronic Structure of *n*-type Ferromagnetic Semiconductor (In,Fe)As, 同上.

[61] M. Kitamura *et al.* : Charge distribution and ferromagnetism at the heterointerface between perovskite oxides $LaNiO_3$ and $LaMnO_3$，同上.

[62] 芝田悟朗：角度依存 XMCD により明らかにした $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ 薄膜のスピン分布異方性，日本放射光学会第 9 回若手研究会「最先端のパルス光で観る超高速科学」（東京大学，2017 年 9 月 11-12 日）

[63] 池田啓祐：Fe, Pt L 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.

[64] 小林正起：*n* 型強磁性半導体 (In,Fe)As:Be の価電子帯電子構造，同上.

[65] 野中洋亮他：Si(111) 基板上に作製したスピネルフェライト $CoFe_2O_4$ 薄膜の角度依存 XMCD，日本物理学会 2017 年秋季大会（岩手大学，2017 年 9 月 21-24 日）

[66] 奥石佳佑他：Te アニールした 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.

[67] 池田啓祐他：磁場角度依存 XMCD による $L1_0$-FePt 薄膜の磁気異方性の研究，同上.

[68] 萩原健太他：角度分解光電子分光で観測した $PrFeAsO_{1-y}$ の表面状態の超伝導ギャップ，同上.

[69] 中田勝他：角度分解型光電子分光による銅酸化物超伝導体 Bi2212 のネマティシティ，同上.

[70] C. Lin *et al.* : Effects of pseudogap opening in the anti-nodal region of Bi2212 studied by ARPES, 同上.

[71] 鈴木雅弘他：van der Waals 強磁性体 $Cr_2Ge_2Te_6$ の ARPES および XMCD の測定，同上.

[72] Y. Wan *et al.* : Photoemission study of the *n*-typed diluted ferromagnetic semiconductor $Ba(Zn,Co)_2As_2$，同上.

[73] 小林正起他：*n* 型強磁性半導体 (In,Fe)As の電子構造に対する Be 添加効果，同上.

[74] 山脇一真他： $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ の超伝導状態の自己エネルギー，同上.

[75] 藤森伸一他：3 次元 ARPES による URu_2Si_2 の電子状態，同上.

[76] 中田勝他出田真一郎，田中清尚，D. Song，吉田良行，永崎洋，藤森淳：ARPES による銅酸化物超伝導体 Bi2212 の擬ギャップ相における四回回転対称性の破れの観測，UVSOR シンポジウム 2017（分子研，2017 年 10 月 28 日）

[77] 小林正起他：*n* 型強磁性半導体 (In,Fe)As:Be の価電子帯電子構造，「強的秩序とその操作に関わる研究グループ」第 6 回 研究会（東京大学，2018 年 1 月 4 日）

[78] 野中洋亮他：双晶化を抑制したマグネタイト Fe_3O_4 薄膜の磁場角度依存 XMCD で探る Verwey 転移の軌道秩序，第 31 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム（つくば，2018 年 1 月 8-10 日）

[79] 奥石佳佑他：角度分解光電子分光による Te アニール 11 型鉄系超伝導体 $FeTe_{1-x}Se_x$ の研究，同上.

[80] 池田啓祐他：X 線磁気円二色性による $L1_0$ 秩序型 FePt 薄膜の垂直磁気異方性の研究，同上.

[81] Z. Chi *et al.* : Orbital magnetic moment at ferromagnet/heavy metal heterointerfaces studied by x-ray magnetic circular dichroism，同上.

[82] 萩原健太他：角度分解光電子分光による $PrFeAsO_{1-y}$ の表面状態の超伝導ギャップ・擬ギャップ，同上.

[83] 中田勝他：角度分解型光電子分光による銅酸化物超伝導体 Bi2212 のネマティシティの観測，同上.

[84] C. Lin *et al.* : Effects of the charge density wave on the ARPES spectra in the anti-nodal region of Bi2212，同上.

[85] 鈴木雅弘他：ファンデルワールス強磁性体 $Cr_2Ge_2Te_6$ の角度分解光電子分光と磁気円二色性，同上.

[86] 小林正起他：*n* 型強磁性半導体 (In,Fe)As の価電子帯電子構造，同上.

[87] 坂本祥哉他：XMCD による Fe ドープ強磁性半導体の磁化過程の研究，「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク」シンポジウム（東京大学，2018 年 3 月 1 日）

[88] 小林正起他：放射光分光による鉄系強磁性半導体の強磁性発現機構解明，同上.

[89] 関宗俊他：鉄系酸化物の光電変換特性とその磁場制御，同上.

[90] 野中洋亮他：Si(111) 面上に作製した $CoFe_2O_4$ 薄膜の膜厚に依存した磁気異方性の変化，2017 年度量子ビームサイエンスフェスタ（水戸，2018 年 3 月 2-4 日）

[91] 野中洋亮他：X 線磁気円二色性で探る $CoFe_2O_4/Al_2O_3/Si(111)$ 構造の界面における磁気的デッドレイヤーの起源とその修復，ISSP-Workshop「SPring-8 BL07LSU の現状と次世代軟 X 線科学創成への戦略」（物性研，2018 年 3 月 13 日）

[92] 池田啓祐他：A Fe L 端磁場角度依存 XMCD による $L1_0$-FePt 薄膜の結晶磁気異方性の研究，同上.

[93] 小林正起他：放射光分光による鉄系強磁性半導体の強磁性発現機構解明，同上.

[94] S. Sakamoto *et al.* : Magnetization process of the insulating ferromagnetic semiconductor (Al,Fe)Sb, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会（早稲田大学，2018 年 3 月 17- 20 日）

[95] K. Ikeda *et al.* : Magnetic field angle-dependent XMCD study of $L1_0$-ordered FePt thin films with perpendicular magnetic anisotropy, 同上.

[96] M. Kobayashi *et al.* : Effect of Be Doping on the Electronic Structure of *n*-Type Ferromagnetic Semiconductor (In,Fe)As, 同上.

[97] 芝田悟朗他： X 線磁気直線二色性による $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ 薄膜中の磁化誘起異方的電荷分布の観測, 日本物理学会 2017 年秋季大会（岩手大学，2017 年 9 月 21-24 日）

[98] 中田勝他： 角度分解型光電子分光による銅酸化物超伝導体 Bi2212 のネマティシティの研究 II, 同上.

[99] 萩原健太他：角度分解光電光分光で観測した $PrFeAsO_{1-y}$ の表面状態の超伝導ギャップ・擬ギャップ，同上.

[100] C. Lin *et al.* : Extended superconducting dome of $Pr_{1.3-x}La_{0.7}Ce_xCuO_4$ after protect annealing, 同上.

[101] 鈴木雅弘他：van der Waals 強磁性体 $Cr_2Ge_2Te_6$ 及び Fe_3GeTe_2 の ARPES, 同上.

[102] Y. Zhang *et al.* : Controllable uniaxial magnetic anisotropy induced by interfacial orbital preferential occupation in Ni/NiO(110) heterostructures, 同上.

[103] 藤森伸一他：3 次元 ARPES による UPd_2Al_3 の電子状態, 同上.

セミナー他

[104] A. Fujimori: Introduction to Max Planck-UBC-UTokyo Center for Quantum Materials (Koshiba Hall, April 25, 2017).

[105] 藤森淳：光電子分光で見る強相関物質と超伝導体，第 62 回物性若手夏の学校（長良川温泉，2017 年 7 月 25-28）

[106] A. Fujimori: Renewed picture of electron-doped cuprates by ARPES and core-level spectroscopy (University of British Columbia, March 27, 2018)

4.2 長谷川研究室

修士課程 1 年生として 4 月から遠山晴子と宮内恵太が、10 月から Shengpeng LIU が新しくメンバーに加わった。3 月末には高山あかり助教が早稲田大学理工学術院に転出し、中村友謙が博士課程を、中西亮介と武内康範が修士課程を修了して就職した。

当研究室では、表面物性、特に「表面輸送」をキーワードにして実験的研究を行っている。おもに半導体や金属、トポロジカル絶縁体結晶表面上に形成される種々の表面超構造や原子層、多層膜 (超格子) 構造を利用し、原子尺度の低次元電子系に固有な電子状態や電子輸送特性、スピン状態・スピン流を明らかにし、機能特性として利用することをめざしている。最近の主な話題は、トポロジカル (結晶) 絶縁体結晶の表面状態、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、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。とくに、分子線エピタキシー法によるナノマテリアルの作成と物性測定を超高真空中で「その場」で行うことが本研究室の実験手法の特徴であり、そのための新しい手法・装置の開発も並行して行っている。以下に、本年度の成果を述べる。

4.2.1 表面電子・スピン輸送

SnTe/Bi(111) における界面超伝導

トポロジカル結晶絶縁体 SnTe 薄膜を Bi(111) 表面上に成長させたところ、転移温度 5.8 K 程度の超伝導が観測された。この超伝導は外部磁場の角度に対して 2 次元性を示すこと、そして面内臨界磁場が大きいことなどから界面で生じていると考えられる。いままでトリビアル絶縁体の PbSe や PbTe で界面超伝導は報告されていたが、トポロジカル結晶絶縁体では本研究が初めてであり、無ドープ SnTe の超伝導化という意味でも画期的である。今後、トポロジカル超伝導の可能性について検証を行う。

$(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$/MnTe 超格子における室温強磁性発現と異常ホール効果

トポロジカル絶縁体 $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$(6nm 厚) と MnTe(2 単位層厚) の超格子構造を MBE 法によってエピタキシャル成長させた。$(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$ では、Bi 対 Sb の組成比を調整してフェルミ準位がギャップ中に来るようにした。磁化測定から室温強磁性が確認され、トポロジカル表面に強磁性が誘起されている。そのような系では量子化した異常ホール効果である量子異常ホール効果 (QAHE) が生じることが期待される。低温でのホール効果測定では異常ホール効果が観測されており、今後さらにパラメータ最適化によって QAHE の実現を目指したい。

単層 $FeSe/SrTiO_3$ における Bose Metal

単層 FeSe は 100 K 程度の転移温度を示す超伝導体として知られているが、そのメカニズムについては未だ議論が続いている。基板からの電子ドープが重要であるとの指摘があり、本研究では絶縁性および導電性の $SrTiO_3$ 基板上に FeSe を 1 単位層程度だけ成長させ、磁気抵抗特性を測定した。その結果、両基板上において絶縁体-金属転移の一種である Bose Metal 的な振る舞いが見られ、位相の揃わないクーパー対による伝導が起こっている。転移温度と臨界磁場を用いてスケーリングすることで、Bose Metal の次元が分かり、両基板上ともに 3 次元 XY モデルで記述できることが分かった。これは 1 単位層よりも厚い領域にクーパー対が染み出していることを示唆しており、基板のフォノンが関与している可能性を示している。

合金原子層における 2 次元超伝導

Si(111) および Ge(111) 基板上に Tl を 1 ML, Pb を 1/3 ML 蒸着すると $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-(Tl, Pb) の表面超構造を形成し、いずれもラシュバ効果によるバンドのスピン分裂が起こる。その輸送特性を測定した結果、Si, Ge 基板で、それぞれ臨界温度 T_c = 2.25 K と T_c =2.03 K で超伝導転移を示した。また、Tl の被覆率を 1 ML に固定し、Pb 蒸着量を増加した試料で測定した結果、Si(111)-4×4-(Tl, Pb), Ge(111)-3×3-(Tl, Pb) 相でも超伝導転移に由来する抵抗の減少が観測された。これら 4 つの構造における T_c を比較した結果、Ge 基板の方が Si 基板より低い。これは、格子間隔が Si よりも Ge の方が大きく、デバイ温度が低くなるため定性的には BCS 理論で説明できる。また、バンドのスピン分裂が小さいほど T_c が低くなる傾向がある。(ロシア科学アカデミーとの共同研究)

Ge(111)-SIC-Pb 原子層の近接効果による超伝導

Ge(111) 基板上に 4/3 ML の Pb を蒸着すると、SIC (stripe incommensurate、ストライプ型不整合) 相が形成されるが、それだけでは超伝導を示さない。しかし、その上に、サブモノレーヤーの Pb を追加蒸着すると、Pb アイランドが形成されことを STM で観察され、さらに超高真空中での 4 端子プローブ法による測定によって、Pb アイランドが T_c=7 K 付近で超伝導転移するとともに、SIC 相が T_c=0.8 K で

超伝導転移した。SIC 相の超伝導は、Pb アイランドからの超伝導近接効果によると考えられる。（ロシア科学アカデミーとの共同研究）

Pb 超薄膜の超伝導

Si(111) 基板上に成長させた Pb 超薄膜の超伝導転移温度 T_c は膜厚に依存して変化すると報告されているが、本研究では基板との関連および超伝導の起源を調べた。STM と電子回折により薄膜の成長様式を観測し、ARPES 測定において Pb 薄膜が Ge(111) 基板上でも Si 基板上と同様に形成されることが分かった。超高真空中での *in situ* 電気伝導測定によって 3 および 10 ML の試料でそれぞれ T_c=3.6 K と 6.0 K で超伝導を観測し、磁場依存性の測定より得られたコヒーレンス長を用い、それらが 2 次元超伝導であることを示した。試料表面で Pb 島がつながっていない場合でも近接効果によるクーパー対のしみ出しが表面超伝導を実現していると考えられる。（ロシア科学アカデミーとの共同研究）

円偏光によるスピン注入

スピン電荷変換は、スピントロニクスの中心課題の一つであり、そのために逆スピンホール効果 (ISHE) やスピン・運動量ロッキングされたフェルミ面 (逆ラシュバ・エーデルシュタイン効果, IREE) を利用する。いままで我々は、スピン・運動量ロッキングフェルミ面をもつトポロジカル物質 Bi_2Se_3 での円偏光依存光起電力効果を用いてスピン電荷変換を行った。そのとき、照射するレーザー光の試料表面上での位置依存性があることがわかった。解析とシミュレーションの結果、円偏光によって面直スピンが生成され、それが電流に変換される ISHE によることがわかった。よって、この物質では IREE と ISHE の両方ともスピン電荷変換に寄与していることになる。

SiC 基板上に成長したグラフェンの電気伝導

SiC 基板上にグラフェンを作成する際、基板のドープ量、バッファー層の有無、作成時の雰囲気などのパラメーターを網羅的に変化させ、それらの試料の電気伝導特性を測定したが、バッファー層の有無やドメインサイズの違いは伝導度に大きな影響を及ぼさないことことが判明した。温度依存性やプローブ間隔依存性から、電流のほとんどはグラフェンを流れていることも分かったが、最も伝導度に顕著に影響を与えるのは基板のドープ量であった。これはディラック点付近ではキャリア数が少なく、基板からの電荷移動で容易にフェルミ準位の位置が変わり、結果として伝導度が大きく変化するためであると考えられる。（東北大学との共同研究）

金属ジチオレン錯体ナノシートの電気伝導測定

4 探針型 STM を用いて各種有機分子膜の微小フレークの電気伝導率を測定している。化学専攻西原研から提供いただいた亜鉛ジチオレン錯体 (ZnDT) ナノシートと、Zn を他の金属原子に置換した金属置換体ナノシートの伝導測定を行った。ZnDT は理論計算上絶縁体であるが、電気伝導測定でもそれが確認された。また、ZnDT ナノシートを Cu 溶液に曝すことで CuDT ナノシートが形成されることを電気伝導度から確認し、30 meV 程度のギャップを持つ半導体的な振る舞いを示した。同様に Ni、Pd、Co についても Zn と置換しうることを確認し、金属置換による各種ジチオレンシートの形成が可能となった。（化学専攻との共同研究）

遷移金属ダイカルコゲナイド Ti_2Te 単層膜の CDW 転移

超薄膜において CDW 転移が予測されている遷移金属ダイカルコゲナイド Ti_2Te の輸送特性の膜厚依存性を明らかにするため、グラフェン/SiC 上に作成した 1~3 単位層の試料について輸送特性を測定した。実験の結果、1 単位層の試料において、150 K 前後で抵抗値の温度依存性が変化する様子を観測し、光電子分光による CDW 転移と良い一致を示した。（東北大学との共同研究）

4.2.2 表面・原子層ナノ構造

トポロジカル結晶絶縁体/強磁性体界面における強磁性の染み出し

トポロジカル（結晶）絶縁体の表面状態に強磁性を導入すると量子スピンホール効果など新規な伝導現象を実現できるが、強磁性体の近接効果によって表面状態に磁性を持たせることが本研究の狙いである。トポロジカル結晶絶縁体 SnTe/強磁性体 Fe という組み合わせで調べた。偏極中性子を反射させることで、SnTe 側に界面から 3 nm 程度の深さまで強磁性が染み出していることが分かり、この領域では表面状態と強磁性が共存していると考えられる。トポロジカル結晶絶縁体では初めて示された結果である。（筑波大学、総合科学研究機構との共同研究）

青リンのエピタキシャル成長

二次元層状物質でワイドギャップ原子層半導体である青リンにアルカリ金属をインターカレートさせると、転移温度がおよそ 20 K の 2 次元超伝導が発現することが理論的に予測されている。本研究では MBE 法により Au(111) 清浄表面上に黒リンを原料として蒸着することで大面積の高品質な青リンが得られることが RHEED によって確認された。成長温

度やアニール時間・温度など各種パラメータを最適化することで格子定数の異なる二種類の相の青リンの作り分けに成功した。今後、青リン層間に Li インターカレートした構造の作製とその電気伝導を測定する。

Ca インターカレート 2 層グラフェンの陽電子回折構造解析

Ca 原子をインターカレートした 2 層グラフェンは $T_c^{onset} \neq 4$ K で超伝導転移することを当研究室で示していたが、その原子構造の詳細は未だ明らかでないため、全反射高速陽電子回折法を用いて、SiC(0001) 上の Ca インターカレート 2 層グラフェンの構造解析を行った。その結果、グラフェン-Buffer 層間に Ca 原子がインターカレートすること、グラフェン-グラフェン層間にはインターカレートしないことが明らかになった。また、インターカレートした Ca 原子の上下に存在する炭素原子層が AA 積層構造を形成していること、Ca 原子がインターカレートした層間の距離 (4.38 Å) が、Ca インターカレートしたバルクグラファイト C_6Ca の層間距離 (4.5 Å) に近いことが分かった。 (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

純スピン注入プローブ

AFM や STM、多端子プローバーに搭載でき、任意の場所でスピン流の生成・測定ができるスピン注入プローブの開発を行っている。昨年度に引き続き試作プローブの検証と改良を行った。金の細線に面内方向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つつこの電圧を測定することでスピン注入の検証をおこなった。測定された逆スピンホール抵抗は最大 3 mV/A であった。これは発生するスピン圧を考慮するとたいへん大きな値であるが、スピンの拡散を考慮したシミュレーションを行った結果、合理的な値であることが分かった。

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」公募研究「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「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)

＜受賞＞

[1] 武内康範 : The Best Poster Award at The 8th International Symposium on Surface Science (公益社団法人日本表面科学会), *Two-dimensional conducting layer on $SrTiO_3$ surface induced by hydrogenation*, 2017 年 10 月.

[2] 一ノ倉 聖、菅原 克明、高山 あかり、高橋 隆、長谷川 修司 : 応用物理学会薄膜・表面物理分科会 第 2 回論文賞 (公益社団法人応用物理学会), 2018 年 3 月, 受賞論文 : “*Superconducting Calcium-Intercalated Bilayer Graphene* (ACS Nano, **10**, 2761-2765 (2016))”.

[3] 遠藤 由大 : 日本物理学会領域 9 第 3 学生賞 (日本物理学会第 73 回年次大会), 2018 年 3 月, 受賞発表 : “全反射高速陽電子回折法による 2 層グラフェン層間化合物の構造解析”

[4] 中西 亮介 : 理学系研究科研究奨励賞 (修士課程), 2018 年 3 月, 受賞修士論文 : “トポロジカル (結晶) 絶縁体の薄膜作製と特性評価”.

＜報文＞

(原著論文)

[5] T. Hirahara, S. V. Eremeev, T. Shirasawa, Y. Okuyama, T. Kubo, R. Nakanishi, R. Akiyama, A. Takayama, T. Hajiri, S. Ideta, M. Matsunami, K. Sumida, K. Miyamoto, Y. Takagi, K. Tanaka, T. Okuda, T.Yokoyama, S. Kimura, S. Hasegawa, and E. V. Chulkov: *A large-gap magnetic topological heterostructure formed by subsurface incorporation of a ferromagnetic layer*, Nano Letters **17**, 3493-3500 (May, 2017)

[6] R. Akiyama, Y. Takano, Y. Endo, S. Ichinokura, R. Nakanishi, K. Nomura, and S. Hasegawa: *Berry phase shift from 2π to π in Bilayer graphene by Li-intercalation and sequential desorption*, Appl. Phys. Lett. **110**, 233106 (4pp) (Jun, 2017).

[7] P. Chen, Woei Wu Pai, Y.-H. Chan, A. Takayama, C.-Z. Xu, A. Karn, S. Hasegawa, M. Y. Chou, S.-K. Mo, A.-V. Fedorov, and T.-C. Chiang: *Emergence of charge density waves and a pseudogap in single-layer $TiTe_2$*, Nature Communications **8**, 516-521 (Sep, 2017).

[8] S. Ohya, A. Yamamoto, T. Yamaguchi, R. Ishikawa, R. Akiyama, L. D. Anh, S. Goel, Y. K. Wakabayashi, S. Kuroda, M. Tanaka, *Observation of the inverse spin Hall effect in the topological crystalline insulator SnTe using spin pumping*, Physical Review B **96**, 094424 (Sep, 2017).

[9] Y. Nakata, K. Sugawara, S. Ichinokura, Y. Okada, T. Hitosugi, T. Koretsune, S. Hasegawa, T. Sato, and T. Takahashi: *Observation of Anisotropic Band Splitting in Monolayer $NbSe_2$: Implications for Superconductivity and Charge Density Wave*, npj 2D Materials and Applications, in press (2017).

(国内雑誌)

[10] 高橋隆、菅原克明、一ノ倉聖、高山あかり、長谷川修司: 2層グラフェン層間化合物の2次元超伝導, 表面科学 **38**, 460-465 (Sep, 2017).

(その他)

[11] 長谷川修司: 学会誌の3つの使い方 (巻頭言), 日本物理学会誌 **72** (10), 697 （Oct, 2017）.

[12] 長谷川修司: エネルギーに関する教育と研究, 理科の教育 **66** (10), 637-640 (Oct, 2017) （東洋館出版）.

(学位論文)

[13] 中村友謙 : 単原子層超伝導の研究 : 半導体表面上の Tl-Pb 合金 (博士論文).

[14] 中西亮介 : トポロジカル (結晶) 絶縁体の薄膜作製と特性評価 （修士論文）.

[15] 武内康範 : $SrTiO_3$ 結晶表面とその上の2次元物質の輸送特性（修士論文）.

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[16] S. Hasegawa: *Atomic-Layer Superconductors*, The 11th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '17, 2017 年 12 月 8 日, Hawai (USA).

[17] S. Hasegawa: *Graphene Intercalation*, The 5th Workshop on Physics between Ecole Normale Superiure and University of Tokyo, 2017 年 11 月 16 日, University of Tokyo.

[18] A. Takayama: *One-dimensional edge states with spin splitting in bismuth*, Nano-Micro Conference 2017, 2017 年 7 月 22 日, 上海 (中国).

[19] S. Hasegawa: *Atomic-Layer Superconductors*, The 16th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces, 2017 年 7 月 3 日, Hannover (Germany).

[20] S. Hasegawa: *Monatomic-Layer Superconductors*, The 13th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids - DSL2017, 2017 年 6 月 27 日, Wien (Austria).

[21] S. Hasegawa: *Atomic-Layer Superconductors*, Graphene EU Flagship-Japan Second Workshop, 2017 年 5 月 6 日, Barcelona (Spain).

[22] S. Hasegawa: *Multi-probe Techniques for Surfaces and 2D Materials –Superconductivity and Spin Current at Surfaces–*, Surface Physics and LEEM workshop 2017, 2017 年 4 月 17 日, 重慶大学 (中国).

一般講演

- **Tsinghua University - the University of Tokyo Joint Symposium on Multidiscipline: Symposium on Materials and Physics**, 2017 年 4 月 14 日, 清華大学、北京 (中国)

[23] 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.*

[24] 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: *Monatomic-Layer Superconductors.*

[25] R. Akiyama, T. Yamaguchi, Y. Otaki, R. Ishikawa, R. Nakanishi, D. Fan, H. Sato, K. Shimada, E. F. Schwier, K. Miyamoto, A. Kimura, S. Hasegawa, S. Kuroda: *Observation of the surface Dirac cone in Sb-doped $Pb_xSn_{1-x}Te(111)$ thin films*, New Trends in Topological Insulators 2017 年 7 月 18 日, Ascona (Switzerland).

[26] R. Nakanishi, R. Akiyama, K. Chinzei, S. Hasegawa: *2D transport properties of topological crystalline insulator SnTe films on Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Bi*, International Conference on Topological Materials Science 2017, 2017 年 9 月 13 日, 東京工業大学.

- **The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8)**, 2017 年 10 月 23-26 日, つくば国際会議場

[27] T. Nakamura, H. Kim, S. Ichinokura, A. Takayama, A.V. Zotov, A.A. Saranin, Y. Hasegawa and S. Hasegawa: *STM/STS measurements of monatomic layer superconductor; Tl-Pb alloy on Si(111)*, 10 月 23 日.

[28] L.V. Bondarenko, A.Y. Tupchaya, A.N. Mihalyuk, C.R. Hsing, C.M. Wei, S. Ichinokura, S. Hasegawa, D.V. Gruznev, A.V. Zotov and A.A. Saranin: *Tl double layer on Si(111): formation, atomic and electronic structure, modification*, 10 月 23 日.

[29] H. Huang, T. Nakamura, A. Takayama and S. Hasegawa: *Superconductivity at SIC phase of Pb/Ge(111) surface studied by in-situ transport measurements*, 10 月 23 日.

[30] Y. Takeuchi, R. Akiyama, R. Hobara, A. Takayama, S. Ichinokura, R. Yukawa, I. Matsuda and S. Hasegawa: *Two-dimensional conducting layer on SrTiO3 surface induced by hydrogenation* (Best Poster Award), 10 月 23 日.

[31] D. Fan, R. Hobara, R. Akiyama, A. Takayama and S. Hasegawa: *Investigation of helicity-dependent photocurrent in strong spin-orbit coupling materials*, 10 月 23 日.

[32] S. Ichinokura, S. Yoshizawa, A.V. Matetskiy, L.V. Bondarenko, A.Y. Tupchaya, D.V. Gruznev, A. Takayama, R. Hobara, T. Uchihashi, A.V. Zotov, A.A. Saranin and S. Hasegawa: *Superconductivity on Rashba spin splitting surface: Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-(Tl, Pb)* (Best Poster Award), 10 月 24 日.

[33] Y. Endo, S. Ichinokura, R. Akiyama, A. Takayama, K. Sugawara, T. Takahashi, K. Nomura and S. Hasegawa: *Weak localization in bilayer graphene with Li-intercalation/desorption*,10 月 24 日.

[34] Y. Okuyama, S.V. Eremeeev, R. Nakanishi, R. Akiyama, T. Shirasawa, K. Sumida, K. Miyamoto, T. Okuda, S. Ideta, K. Tanaka, E.V. Chulkov, S. Hasegawa and T. Hirahara: *Heterostructure of a topological insulator/magnetic insulator ultrathin film*, 10 月 26 日.

- **The Symposium on Surface and Nano Science 2018**, 2018 年 1 月 10-14 日, 富良野 (北海道)

[35] Y. Endo, Y. Fukaya, I. Mochizuki, A. Takayama, T. Hyodo and S. Hasegawa: *Structural analysis of bilayer graphene on SiC substrate by Total-reflection high-energy positron diffraction*,1 月 11 日.

[36] T. Nakamura, H. Kim, S. Ichinokura1, A. Takayama, A.V. Zotov, A.A. Saranin, Y. Hasegawa, and S. Hasegawa: *STM/STS measurements of atomic-layer superconductor; Tl-Pb alloy on Si(111)*, 1 月 11 日.

[37] H. Toyama, H. Huang, T. Nakamura, A. Takayama, and S. Hasegawa: *Superconductivity of Pb ultrathin film on Ge(111) surface studied by in-situ four-point probe resistance measurement*, 1 月 11 日.

[38] Y. Endo, S. Ichinokura, R. Akiyama, A. Takayama, S. Hasegawa, K. SuzukiA, K. SugawaraB, T. Takahashi, K. Nomura, and W.-X. Tang: *Graphene Intercalation*, 1 月 12 日.

(国内会議)

招待講演

[39] 長谷川修司：原子層超伝導, 京都大学基礎物理学研究所研究会 『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、人工制御』2017 年 6 月 19 日 湯川記念館 (京都大学).

[40] 高山あかり, 長谷川修司：Rashba 系表面超構造の超伝導, 2017 年真空・表面科学合同講演会, 日本表面科学会, 2017 年 8 月 19 日 横浜市立大学 (横浜).

[41] 長谷川修司：基礎講座 『電子回折の基礎と応用』, 日本表面科学会 東北・北海道支部/関東支部合同セミナー『量子ビームで視る原子層と表面』, 2017 年 11 月 11 日 化学講堂 (東京大学).

一般講演

[42] 武内康範, 秋山了太, 保原麗, 高山あかり, 一ノ倉聖, 湯川龍, 松田巌, 長谷川修司：独立 4 探針 STM を用いた水素終端 $SrTiO_3$ 表面の輸送特性の *in situ* 評価, 第 2 回関東支部講演大会, 日本表面科学会, 東京大学, 2017 年 4 月 8 日.

[43] 保原麗、長谷川修司：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, 分子アーキテクトニクス第 8 回領域会議, 九州大学, 2017 年 6 月 3 日.

- **2017 年真空・表面科学合同講演会**, 日本表面科学会, 2017 年 8 月 17 日, 横浜市立大学 (横浜)

[44] 中村友謙，一ノ倉聖，高山あかり, 秋山了太, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司：Ge 基板上 Tl, Pb 合金系表面超構造における超伝導の観測.

[45] 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 Li インターカレーション 2 層グラフェンの構造解析.

- **日本物理学会 2017 秋季大会**, 2017 年 9 月 21 日-24 日 (岩手大学 上田キャンパス)

[46] 中田優樹, 菅原克明, 一ノ倉聖, 岡田佳憲, 一杉太郎, 是常隆, 長谷川修司, 佐藤宇史, 高橋隆：空間反転対称性の破れた原子層 $NbSe_2$ の高分解能 ARPES, 9 月 21 日.

[47] 中村友謙, 一ノ倉聖, 高山あかり, 秋山了太, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司：Ge(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-(Tl, Pb) における超伝導転移の *in situ* 4 端子測定, 9 月 21 日.

[48] 秋山了太, 渡辺和己, 中西亮介, 宮内恵太, 長谷川修司：Tl ドープトポロジカル結晶絶縁体 SnTe の構造・電気伝導特性, 9 月 21 日.

[49] 中西亮介, 秋山了太, 鎮西弘毅, 福居直哉, 豊田良順, 西原寛, 長谷川修司：微傾斜 Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Bi 上でのトポロジカル結晶絶縁体 SnTe 薄膜の成長とその構造・伝導評価, 9 月 21 日.

[50] 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 Li インターカレーション 2 層グラフェンの構造解析, 9 月 21 日.

[51] H. Huang, T. Nakamura, A. Takayama and S.Hasegawa: *Superconductivity transition of SIC-Pb/Ge(111) studied by in-situ electrical transport measurement*, 9 月 21 日.

[52] 高山あかり, 遠藤由大, 金觀洙, 朴君昊, 遠藤則史, 保原麗, 吹留博一, 末光眞希, 長谷川修司：グラフェン/SiC の輸送特性：基板との相互作用の効果, 9 月 21 日.

[53] 石川諒, 伊藤寛史, 秋山了太, 仁谷浩明, 黒田眞司：MBE 法により成長した IV-VI 族希薄磁性半導体 (Sn,Mn)Te の構造と磁性の評価, 9 月 21 日.

[54] 伊藤寛史, 大滝祐輔, 石川諒, 秋山了太, 黒田眞司：トポロジカル結晶絶縁体 SnTe 薄膜の PbTe 表面への MBE 成長および電気伝導特性, 9 月 21 日.

[55] 武内康範, 秋山了太, 保原麗, 高山あかり, 一ノ倉聖, 湯川龍, 松田巌, 長谷川修司：水素終端した $SrTiO_3$ 表面の 2 次元伝導層の輸送特性, 9 月 22 日.

[56] D. Fan, R. Hobara, R. Akiyama, A. Takayama, S. Hasegawa: *Investigation of helicity-dependent photocurrent in strong spin-orbit coupling materials*, 9 月 23 日.

[57] 佐藤誠, 並木雅俊, 近藤一史, 中屋敷勉, 毛塚博史, 長谷川修司, 田中忠芳, 鍵山茂徳, 江尻有郷 : グローバル時代に対応した物理教育コンテンツの研究開発 VI. 中間報告, 9 月 23 日.

[58] 大塚洋一, *et al.* : 物理チャレンジ 2017 報告 : IV 第 2 チャレンジ実験問題, 9 月 23 日.

[59] 田中忠芳, *et al.* : 第 48 回国際物理オリンピック報告 : I 日本代表候補者の教育研修, 9 月 23 日.

[60] 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 : グラフェンへのインターカレーション, 平成 29 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』2017 年 11 月 3 日 (金) 茂庭荘（仙台）.

[61] 遠藤由大，深谷有喜，望月出海，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 Li インターカレーション 2 層グラフェンの構造解析, 東北・北海道支部/関東支部合同セミナー, 日本表面科学会, 東京大学 (東京), 2017 年 11 月 11 日.

- **強磁場コラボラトリーが拓く未踏計測領域への挑戦と物質・材料科学の最先端シンポジウム**,2017 年 11 月 29 日, 物質材料研究機構 (筑波)

[62] 中西 亮介、秋山了太、長谷川修司 : *Bi(111)/Si(111)* テンプレート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.

[63] 武内康範、保原麗、秋山了太、高山あかり、一ノ倉聖、湯川龍、松田巌、長谷川修司 : $SrTiO_3$(001) 上への FeSe 薄膜の成長と *in situ* 電気伝導評価.

[64] 宮内恵太, 秋山了太, 中西亮介, 長谷川修司 : Au(111) 上への青リンのエピタキシャル成長とその評価.

[65] 遠山晴子, H. Huang, 中村友謙, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, 高山あかり, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 長谷川修司 : その場電気伝導測定による半導体基板上の Pb 超薄膜における超伝導特性, 第 9 回低温センター研究交流会, 伊藤国際研究センター (東京大学), 2018 年 2 月 20 日.

[66] 宮内恵太, 秋山了太, 中西亮介, 遠藤由大, 長谷川修司 : Li インターカレートした青リンのエピタキシャル成長とその電気伝導特性, 第 9 回低温センター研究交流会, 伊藤国際研究センター (東京大学), 2018 年 2 月 21 日.

[67] 保原麗、長谷川修司 : 純スピン流注入プローブの開発, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大学（西早稲田キャンパス）, 2018 年 3 月 17 日.

- **日本物理学会 第 73 回年次大会**, 2018 年 3 月 22 日-25 日 (東京理科大学, 野田キャンパス)

[68] 秋山了太, 大滝祐輔, 伊藤寛史, 中西亮介, 宮内恵太, Eike Schwier, 木村昭夫, 島田賢也, S. V. Eremeev, E. V. Chulkov, 黒田眞司, 長谷川修司 : Sb ドープトポロジカル結晶絶縁体 $Pb_{1-x}Sn_xTe$(111) 薄膜における 2 次元バンドの観測, 3 月 22 日.

[69] 並木雅俊, 佐藤誠, 中屋敷勉, 近藤一史, 長谷川修司, 毛塚博史, 田中忠芳, 鍵山茂徳, 江尻有郷 : グローバル時代に対応した物理教育コンテンツの研究開発 VIII. 国際物理オリンピック実験再現 5, 3 月 22 日.

[70] H. Huang, T. Nakamura, A. Takayama, S. Hasegawa : *Two-dimensional superconductivity on SIC phase of Pb/Ge(111) studied by in situ transport measurement*, 3 月 22 日.

[71] 遠山晴子, H. Huang, 中村友謙, 高山あかり, 長谷川修司 : その場電気伝導測定による Ge 基板上の Pb 超薄膜における超伝導特性, 3 月 22 日.

[72] 遠藤由大, 深谷有喜, 望月出海, 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 2 層グラフェン層間化合物の構造解析 (領域 9 学生賞授賞), 3 月 22 日.

[73] 中田優樹, 菅原克明, 一ノ倉聖, 岡田佳憲, 一杉太郎, 是常隆, 長谷川修司, 高橋隆, 佐藤宇史 : 原子層 $NbSe_2$ における CDW 転移 : 高分解能 ARPES, 3 月 23 日.

[74] Di Fan, Rei Hobara, Ryota Akiyama, Akari Takayama, Shuji Hasegawa : *Photoinduced Inverse Spin Hall effect on Bi_2Se_3 thin film*, 3 月 24 日.

[75] 遠藤由大，深谷有喜，望月出海，高山あかり，兵頭俊夫，長谷川修司 : 全反射高速陽電子回折 (TRHEPD) による 2 層グラフェン層間化合物の構造解析, 第 2 回陽電子回折研究会, 2018 年 3 月 30 日, 高エネルギー加速器研究機構 (茨城).

(セミナー)

[76] S. Hasegawa : *Atomic-Layer Superconductors*, Department Colloquium, Department of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University 2018 年 2 月 28 日, Shanghai (China).

(講義等)

[77] 長谷川修司、小森文夫 : 物性物理学特論（学部）・表面物理学（大学院）, 2017 年度夏学期（本郷）.

[78] 長谷川修司, 秋山了太、高山あかり, 遠山晴子 (TA), 宮内恵太 (TA) : 物理学実験 I（3 年生）電子回折, 2017 年度冬学期（本郷）.

(アウトリーチ)

[79] 荒木美菜子、長谷川修司: 第 1 チャレンジ理論問題、実験課題レポートの書き方、および LED 点灯回路の作成実習, 物理オリンピック日本委員会女子チャレンジ, 2018 年 2 月 18 日, 東京理科大学（神楽坂）.

[80] 長谷川修司: 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2017 年 6 月 11 日, 茨城県立水戸第一高等学校 (茨城): 2017 年 11 月 25 日, 栃木県立宇都宮女子高等学校 (栃木), 2018 年 3 月 24 日, 栃木県立大田原高校 (栃木).

[81] 長谷川修司、近藤泰洋 : 実験課題レポートの書き方、重力加速度の測定実験、LED の電流電圧特性測定実験, 立命館慶祥高校数理・科学チャレンジ・ウインターキャンプ, 2017 年 12 月 26-28 日, 北海道青少年会館コンパス (札幌).

[82] 長谷川修司 : 先端科学の世界 ～ナノサイエンスと顕微鏡～, 科学先取りグローバルキャンパス岡山 (GSCO), 2017 年 9 月 3 日, 岡山大学 (岡山).

[83] 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」, 2017 年 8 月 3 日, 理学部 1 号館 B101 号室 (東京大学)

[84] 模擬授業および研究室見学　茨城県立土浦第一高等学校, 2017 年 8 月 1 日:神奈川県立湘南高等学校, 2017 年 8 月 2 日 : 群馬県立前橋高等学校, 2017 年 11 月 14 日 : 栃木県立宇都宮高等学校, 2017 年 11 月 28 日.

4.3 福山研究室

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、かつ一般性のある基底状態や素励起、相転移現象を室温からマイクロケルビンにいた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 (He) 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、そしてその端に存在する 1 次元的な端状態が対象物質である。

4.3.1 2 次元ヘリウムの量子相の研究

我々はこれまで主に、グラファイト基板に低温で物理吸着した 2 層目の単原子層 ^{3}He(フェルミ粒子) と ^{4}He(ボース粒子) を対象に、新たな量子相の探索を行ってきた。昨年度は、グラファイト表面を重水素化水素 (HD)2 分子層で初期吸着した上に吸着した単原子層 ^{3}He の量子相図の全貌を明らかにする低温比熱測定を完了し、その解析から二つの重要かつ新しい知見を得た。

新規な量子スピン液体相の発見

下地層を HD2 分子層に変えたことで、最上層の ^{3}He 原子が感ずる周期的吸着ポテンシャルの格子定数と振幅は 2 層系に比べ増大した。その結果、非常に低い特定の面密度 ($\rho = 4.74$ nm$^{-2} \pm 1\%$) に、新たな局在相 (C3 相) が出現した。これは、下地周期ポテンシャルに整合な整合固相と考えられる。その格子間距離は、3 次元系も含めて、これまで知られるどの固体 ^{3}He より長い (低密度) ため、^{3}He 核スピン (1/2) 間に働く交換相互作用の大きさも $J_C \approx 30$ mK と最大である。$0.3 \leq T \leq 90$ mK の温度範囲で比熱測定することで、核スピン自由度の全温度域の振る舞いを調べることができる。

固体 ^{3}He の核スピン間の交換相互作用は、剛体球的な原子同士が量子トンネル効果で位置交換して生ずる。そのため、隣接する 3 原子、4 原子、そして 6 原子程度までの多粒子が同時にリング経路上をトンネル位置交換する “リング交換相互作用”(J_P) が、2 体交換と同程度の大きさで競合する。J_P の大きさと競合度は面密度の制御で大きく可変である。低密度になるほど交換頻度は上がり競合度も増すので、^{3}He-C3 相は強くフラストレートした特異な量子スピン液体磁性の出現が期待される。

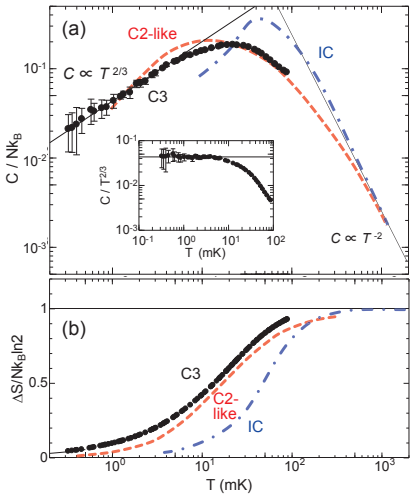


図 4.3.1: (a) ^{3}He/HD/HD/gr 系の単原子層 ^{3}He で見つかった 3 つの量子相の磁気比熱の測定結果。それぞれ、C3: 新たな量子ピン液体相、C2-like: 量子液晶、IC: 不整合固相。(b) (a) の比熱データから算出したエントロピーの温度変化。

果たして、測定した磁気比熱 (C) は、図 4.3.1(a) にあるように、有限温度の相転移を示すシャープな比熱異常は全温度域で見つからず、スピンエントロピーはほぼ $k_B ln2$ に近い変化を示し (図 4.3.1(b))、この系が量子スピン液体相を基底状態にもつことが強く示唆される。比熱は $T \approx 20$ mK に非常にブロードな山をもつ。最低温度付近の $0.3 \leq T \leq 7$ mK では、$C \propto T^{2/3}$ という温度の分数べき乗に比例する特異な温度依存性が観測された。基底状態にネール秩序をもつときの磁気素励起である反強磁性スピン波は、2 次元系では低温で $C \propto T^2$ を与える。また、これまで電子スピン系のギャップレス量子スピン液体の候補物質で見つかっている典型的な低温比熱は $C \propto T$ である。観測された C3 相の $C \propto T^{2/3}$ はこれらとは明らかに異なる。

過去に他グループによって、この系の核磁気帯磁率 (χ) が、いくつかの代表的な面密度に限られるが、より低温まで測定されている。グラファイト基板の不均一部分由来の面密度スケールの不定性を注意深く補正してみると、C3 相の近傍密度では、10 μK から 10 mK までの 3 桁の温度範囲にわたって $\chi \propto T^{-1/3}$ という、やはり特異な分数べき乗に比例していることが判明した。現在、C3 相近傍の帯磁率の詳細な面密度依存性を我々自身で再測定するため、新たな NMR 実験を準備している。

比熱と帯磁率の測定結果を合わせてみると、$\epsilon \propto k^3$ という異常な分散関係をもつ磁気素励起の存在が強く示唆される。そして奇妙なことに、縮退したフェ

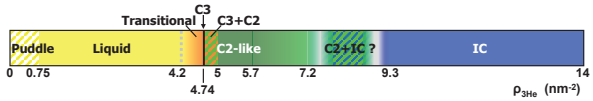


図 4.3.2: 比熱測定から決定した ^{3}He/HD/HD/gr 系の単原子層 ^{3}He の基底状態における量子相図。

ルミ粒子系のように、Wilson 比 (R_W) が定義できて、$R_W \approx 8$ を得る。これらの実験事実は、マヨラナフェルミオンの存在で理解できるとする理論的な指摘もあり、今後、量子スピン液体の研究にブレイクスルーをもたらす可能性がある。

量子液晶相の存在に関する新たな実験的知見

^{3}He/HD/HD/gr 系の C3 相の密度をわずか 7%増すと、(恐らく 1 次相転移の)2 相共存状態を経て、別の量子相が出現する。我々はこれを仮に C2-like 相と名付け、その低温比熱を密度を変えながら詳しく調べた。すると、これが大きな圧縮率 (20%以上) をもつ単一の量子相であること、その磁気比熱が 2 層系 ^{3}He で我々が最近見いだした量子液晶相 (C2 相) とよく似ていることが分かった。例えば、20%密度を増加する間に C2-like 相の $|J_C|$ は 1/10 に減少するが、$|J_C|$ で規格化した換算温度に対して比熱をプロットすると、温度依存性はほとんど密度変化しないことが分かる。そして、それは C2 相の比熱ともよく似ている。その特徴は、C3 相よりさらにブロードで低い山をもち (C2 相ではそれが緩やかな二つの山に分裂する)、最低温度付近で $C \propto T$ を示す。

これらの事実から、我々は C2-like 相も C2 相同様の量子液晶相だと考えている。その正体は、回転対称性だけが破れた量子ヘキサティック相の可能性が一番高いと考えている。この場合、量子ゆらぎで動き回る回位対 (= 自由転位) のホッピング頻度は原子交換頻度より低いと予想されるので、観測される磁性は乱れた三角格子構造のそれと近いものとなるであろう。実際、交換相互作用にランダムネスを導入すると、温度に比例する低温比熱や温度に依らない一定の低温帯磁率というスピン液体様の性質が現れることが最近の理論で示されている。

C2-like 相をさらに圧縮すると、下地層に対して不整合な三角格子構造をもつ 2 次元 “固体” 相が安定化する。そこでは、リング交換の競合度が下がり 3 体交換が支配的となることで、強磁性が実現している。図 4.3.2 に、我々が決定した ^{3}He/HD/HD/gr 系の量子相図を示す。

我々が量子液晶相と考える二層系 ^{4}He の C2 相近傍の密度域で、これまで 3 つの異なる実験グループがねじれ振り子実験で超流動応答を観測している。つまり、超流動液晶状態が実現している可能性がある。ところが、図 4.3.3(a) に示すように、観測された超流動応答の密度域は各グループでかなり異なり、それが真に C2 相の性質であるか、確定していない。これは、用いたグラファイト基板が異なるため、その

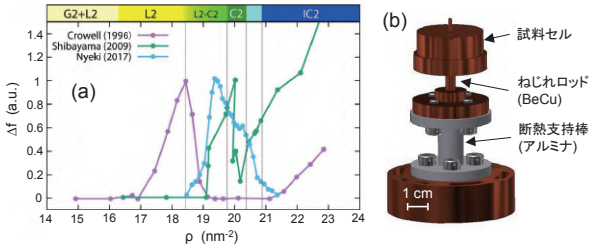


図 4.3.3: (a) 過去のねじれ振り子実験による超流動応答の測定結果。(b) 新たに設計・製作した比熱・ねじれ振り子同時測定試料セル。

不均一部分由来の密度スケールの不定性が 1 nm^{-1} (13%) 近くあるためである。

そこで我々は、熱容量とねじれ振り子応答を同一試料セルの同一試料 (基板) に対して測定できる新たな装置開発を進めた。図 4.3.3(b) は、その試料セルの概略図である。設計上のポイントは、十分な機械強度と熱絶縁性を両立した熱絶縁性支持棒である。ここでは高純度アルミナ円筒を使用している。セル本体およびねじれロッドは BeCu 製で、吸着基板には表面積 50 m^2 の Grafoil を使用している、希釈冷凍機に搭載して行った予備実験の結果、Q 値は 1.1×10^6、0.3 K 以下での共鳴周波数の温度変化は 2 mHz 以下と、十分な感度と安定性をもつことが分かった。今後は、比熱測定の予備実験を進める。

4.3.2 グラフェンのエッジ状態の研究

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 次元物質であり、それが層状に ABAB 積層するとグラファイトになる。π 電子のエネルギーバンドがディラック点で線形に交わることから、電子やホールが質量ゼロのディラック粒子として振る舞い、ゼロエネルギーのランダウ準位をもつなど、その興味深い物性は多くの基礎研究の対象となっている。また、熱および電気伝導度が高く、機械的強度も高くしなやかであることから、次世代のエレクトロニクス素材としても注目されている。

グラフェンは、ハニカム格子構造を反映してジグザグ型とアームチェア型の 2 種類の端構造をもつ。ジグザグ端では 2 種類の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。そのバンド幅は狭く、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ナノリボン (ジグザグ・グラフェン・ナノリボン ; z-GNR) では、同じ端内で強磁性的に、対向する端間で反強磁性的にスピン偏極すると理論予測されている。

昨年度までに我々は、グラファイトを高温下で水素プラズマに曝すことで、その表面に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を多数作成する技術を確立した。エッチング時の温度や水素圧

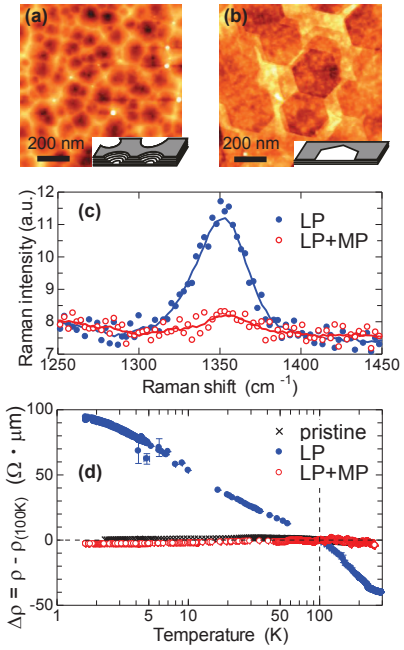


図 4.3.4: 劈開多層グラフェン試料の AFM 像。(a) LP 試料 (約 2.5 nm 厚)、(b) LP+MP 試料 (約 2.7 nm 厚)。(c) LP 試料と LP+MP 試料の D バンド近傍のラマン分光測定結果。(d) 清浄試料、LP 試料、LP+MP 試料の電気抵抗率の温度変化。

力 (P_{H_2}) によって、ナノピットの形状も六角形から円形 (不定形) までコントロールすることもできる。

劈開多層グラフェン試料への水素プラズマエッチングと電気輸送特性

バルクグラファイト表面で確立した水素プラズマエッチングの手法を使って、微少劈開多層グラフェン試料に対してもジグザグ六角形ナノピットを形成できるか、また層数や外形の整形も可能かなどを調べた。図 4.3.4(a) は水素ガス圧力が低い条件 (LP: $P_{H_2} <$ 15 Pa) でエッチングしたとき、図 4.3.4(b) は (a) の試料をさらに中圧の条件 (MP: 15 $< P_{H_2} <$ 150 Pa) でエッチングしたときの多層グラフェン表面の原子間力顕微鏡 (AFM) 像である。それぞれ、グラファイト表面の結果とほぼ同様に、5~6 層深さの不定形ナノピットすなわち欠陥が多数形成され (LP 試料)、2 層程度の深さで 300 nm 程度の大きな六角形ナノピットが形成される (LP+MP 試料) ことが確認された。

図 4.3.4(c) は、この 2 種類の試料に対する D バンド近傍のラマン分光の測定結果である。LP 試料ではバレー間散乱に起因する D バンドピークが強く現れているが、LP+MP 試料ではそれが大きく抑制されている。これは LP+MP 試料で形成された六角形ナノピットが主にジグザグ端からなる証拠である。

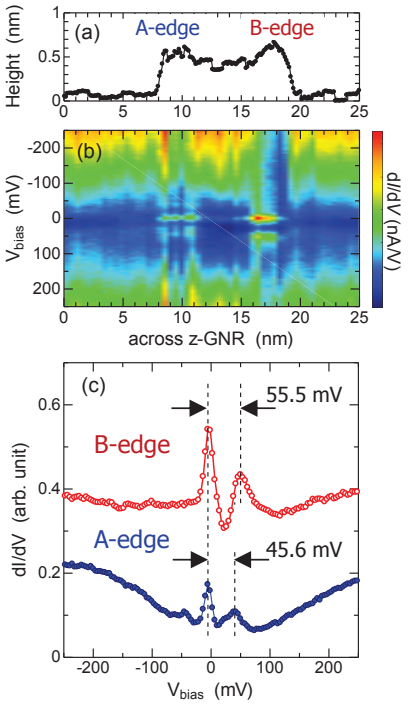


図 4.3.5: 幅 9.9 nm の z-GNR を垂直に横切るライン・プロファイル (a) と、それに沿って取得した dI/dV のカラーマップ (color online)。左側のジグザグ端は A サイト原子からなり、右側は B サイト原子からなる。(c) A サイト端、B サイト端における dI/dV。

図 4.3.4(d) は、エッチング前の清浄試料、LP 試料、LP+MP 試料の電気抵抗率変化の温度依存性である。清浄試料と LP+MP 試料の温度依存性はごく小さいのに対して、多数の不定形ナノピットをもつ LP 試料は大きな温度依存性を示し、$T \leq 100$ K でほぼ温度の対数に比例している。この対数依存性は 2 次元の弱局在現象に見られるものであるが、不定形ピットの端での強いバレー間散乱が局在の原因であろう。今後は磁気抵抗の測定を通じて、そのメカニズムを明らかにしてゆきたい。

z-GNR におけるスピン偏極状態の観測

孤立したジグザグ端がもつジグザグ端状態 (平坦バンド) はディラック点近傍での局在状態密度のピークとして観測されるが、z-GNR の場合、スピン偏極によって分裂するはずである。そのとき、伝導帯側のバンドの分散は小さく、価電子帯側では大きいと理論計算されている。これを反映して、スピン分裂した状態密度にはシャープなピークが伝導帯側に、鈍ったピークが価電子帯側に現れるであろう。これまでも z-GNR のスピン偏極エッジ状態の観測を目指した実験は少なからずあるが、端の原子レベルで

の直線性不足、端終端の詳細が不明、データの再現性などの点で、決定的な結果はまだ得られていない。

我々は、水素プラズマエッチングで形成した 2 つのジグザグ六角形ナノピット間に、良質な z-GNR が多数形成されることに着目し、そこでエッジ状態のスピン分裂の観測を試みた。この試料は、バルクグラファイト表面を基板にもつ z-GNR と考えることができる。すなわち、z-GNR の片方のジグザグ端は下層グラフェンの炭素原子の直上に位置する A サイトのみからなり、もう一方のはジグザグ端は下層グラフェンのハニカムの中央に位置する B サイトのみからなる。

図 4.3.5 は、幅 9.9 nm の z-GNR 試料を横切る方向に走査トンネル顕微/分光したラインプロファイル (a) と微分トンネルコンダクタンス (dI/dV) のカラーマップ (b) である。原子列を特定できる STM 画像 (ここには示してない) から、(a)(b) 図の左 (右) 側の端が A(B) サイトであることが同定できる。カラーマップから明らかなように、ナノリボンの端近傍に局在した状態密度のダブルピークが明瞭かつ安定して観測された。また、ピーク間のエネルギー差はリボンの幅にほぼ反比例することも分かった。こうしたダブルピークは、十分孤立した単一ジグザグ端で観測されるシングルピーク構造とは明確に異なっている。スピン偏極したジグザグ端で期待される状態密度ピークの分裂を初めて明瞭に観測できたものと考えている。

なお、ピーク間のエネルギー差は、図 4.3.5(c) に示すように、A サイト端が 46 meV、B サイト端が 56 meV と B サイト端の方が大きく、理論予想と定性的に一致する。また、どちらの端も価電子帯のピークの方が伝導帯のそれよりもピーク幅が狭いが、これは理論予想とは逆である。今後は、異なる基板上の z-GNR 試料についても同様の観測を行い、基板との相互作用が及ぼす影響について調べる予定である。

4.3.3 極低温実験技術の開発

小型サブミリケルビン連続冷凍装置

今日、物質科学や宇宙科学など様々な分野で $T \leq 1$ mK のサブミリケルビン温度域の実験環境が望まれている。通常の銅の核断熱消磁冷凍機は装置が大型で連続的に超低温を発生できない。我々は、市販の希釈冷凍機や衛星に搭載できるほど小型で、0.8 mK までの温度を連続発生できるサブミリケルビン連続冷凍装置の開発を進めている。基本設計は、増強核磁性体 $PrNi_5$(0.2 mol) を冷媒とし、これを最大磁場 1.2 T の磁気シールド付小型超伝導マグネットに収めた核ステージ 2 つを 2 つの超伝導 Zn 熱スイッチを介して、試料と希釈冷凍機の間に直列接続する配置である。

昨年度はまず熱スイッチを設計製作した。小型化と高熱伝導度を両立するため、Ag 熱リンクに電子ビーム溶接した Ag フォイルを超伝導 Zn フォイルと積層し、熱拡散接合した。完成した熱スイッチの電気抵抗は、$T = 4.2$ K で 114 nΩ であった。この値で期待される 0.8 mK での冷却力は約 10 nW である。

次に、磁気シールド付小型超伝導マグネットの設計を行った。超伝導線材の磁化曲線を実測してみると、磁場掃引時に発生する磁気ヒステリシス由来の発熱がマグネットのクエンチを誘発する恐れがあることが分かった。そこで線材とマグネットボビンの材質等の選定を注意深く行い、熱シミュレーションを行った。最終的に、外径 ϕ0.14、フィラメント径 10 μm の多芯 (54 本) 超伝導線とし、ボビンは厚さ 1 mm の銅製として、ボビンを希釈冷凍機の分留器に熱アンカーすることで、現実的な磁場掃引速度 1 mT/s での運転が可能であり、核ステージへの熱輻射を 1 nW 以下に押さえつつ、希釈冷凍機の運転にも支障がない設計とすることができた。また、磁気シールド材の磁化曲線も実測し、磁気シミュレーションの結果、厚さ 4 mm の鉄-コバルト合金 (パーメンジュール) を使用することで、シールド直近での漏洩磁場を 1 mT 以下に低減できることが分かった。現在は、マグネットの製作と並行して、超伝導熱スイッチの mK 温度域での熱伝導度の実測を行っている。

走査型プローブ顕微鏡用ヘリウム循環冷却システム

液体ヘリウム温度以下の極低温で動作する走査プローブ顕微鏡 (SPM) は、ナノスケールの電子物性研究にとって強力な実験手法である。液体ヘリウムが安価かつ容易に入手できない環境で運転を行う場合、冷却にパルス管冷凍機や GM 冷凍機を用いる必要がでてくるが、それらの発生する機械振動ノイズは SPM の空間分解能を劣化してしまう。我々は、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・低熱損失の特殊な液体ヘリウム移送管で接続して循環冷却するシステムを提案し、その開発に国内企業と協力して取り組んでいる。

これまで、製作した液体ヘリウム移送管が事前の熱シミュレーション通りの低熱損失性 (0.21 W) をもち、既存の移送管より高性能であることを確認できた。しかし、送液が 20 分程度の周期性をもって間欠的に起こる振動現象が生ずることも判明した。そこで昨年度は、送液側と受液側の圧力モニタリング、送液側圧力の調整、受液側液面計測などの自動計測・制御機構をシステムに付加し、この自励振動現象の原因を探った。現在、そのデータの解析を進めている。

＜受賞＞

[1] Sachiko Nakamura: Best Poster Award, 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), (Gothenburg Sweden, August 9-16, 2017).

[2] Kazuma Kita: Best Poster Award, The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8), (Tsukuba Japan, October 22-26, 2017).

＜報文＞

(原著論文)

[3] Sachiko Nakamura, Daisuke Miyafuji, Takenori Fujii, Tomohiro Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Low temperature transport propertied of pyrolytic graphite sheet, Cryogenics **86**, 118-122 (2017).

[4] André E. B. Amend, Tomohiro Matsui, Hideki Sato, and Hiroshi Fukuyama: STS Studies of Zigzag Graphene Edges Produced by Hydrogen-plasma Etching, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology, **16**, 72-75 (2018).

[5] Sachiko Nakamura, Takenori Fujii, Shouji Matsukawa, Masayuki Katagiri, and Hiroshi Fukuyama: ^{4}He permeation and H_2O uptake of cyanate ester resins - an alternative to commonly used epoxy resins at low temperature, Journal of Physics: Conference Series, **969**, 012080-1-6 (2018).

[6] Ryo Toda, Satoshi Murakawa, and Hiroshi Fukuyama: Design and expected performance of a compact and continuous nuclear demagnetization refrigerator for sub-mK applications, Journal of Physics: Conference Series, **969**, 012093-1-6 (2018).

(学位論文)

[7] 鎌田 雅博: Quantum Phase Diagram of Helium Three Monolayer on HD Plated Graphite (HD 膜を敷いたグラファイト上単原子層ヘリウム 3 の量子相図)(博士論文).

[8] André E. B. Amend: Scanning Tunneling Spectroscopy Studies of Graphite Edges Fabricated by Hydrogen Plasma Etching (水素プラズマエッチングで作成したグラファイトエッジの STS 観測)(修士論文).

[9] 小川 勝之: 水素膜上単原子層ヘリウム 3 の比熱測定と NMR 試料セルの設計製作 (修士論文).

[10] 喜田 和馬: グラファイ及び劈開グラフェン表面のジグザグナノピット : 整形法と電気輸送特性 (Nanopits with Zigzag Edges on Graphite and Exfoliated Graphene Surfaces: Fabrication and Electrical Transport Properties)(修士論文).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[11] Masahiro Kamada, Katsuyoshi Ogawa, Ryuji Nakamura, Tomohiro Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Self-Condensed Liquid Phase of Helium-3 Adsorbed on Hydrogen Preplated Graphite, 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), (Gothenburg Sweden, August 9-16, 2017).

[12] Sachiko Nakamura and Hiroshi Fukuyama: Order-Disorder Transition in 2D Quantum Systems and Its Doping Effects, 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), (Gothenburg Sweden, August 9-16, 2017).

[13] Sachiko Nakamura, Takenori Fujii, Shouji Matsukawa, Masayuki Katagiri, and Hiroshi Fukuyama: Low temperature properties of cyanate ester resins - an alternative to commonly used epoxy resins, 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), (Gothenburg Sweden, August 9-16, 2017).

[14] Ryo Toda, Satoshi Murakawa, and Hiroshi Fukuyama: Development of compact and continuous nuclear demagnetization refrigerator, 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), (Gothenburg Sweden, August 9-16, 2017).

[15] Satoshi Murakawa, Ryo Toda, and Hiroshi Fukuyama: Compact nuclear demagnetization refrigerator to keep a sub-mK temperature continuously - Design and expected performance, International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT 2017): Frontiers of Low Temperature Physics (Heidelberg Germany, August 17-21, 2017).

[16] Tomohiro Matsui, Hideki Sato, André E. B. Amend, Kazuma Kita, and Hiroshi Fukuyama: STS Studies of Zigzag Edge State and Quantum-Hall Edge State at Graphite Surfaces, The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8), (Tsukuba Japan, October 22-26, 2017).

[17] André E. B. Amend, Tomohiro Matsui, Hideki Sato, Kazuma Kita, and Hiroshi Fukuyama: STS Studies of Graphite Edges Produced by Hydrogen-plasma Etching, The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8), (Tsukuba Japan, October 22-26, 2017).

[18] Kazuma Kita, Tomohiro Matsui, Hideki Sato, André E. B. Amend, and Hiroshi Fukuyama: Hydrogen-plasma Etching of Graphite and Multilayer Graphene, The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8), (Tsukuba Japan, October 22-26, 2017).

招待講演

[19] Tomohiro Matsui, Hideki Sato, Kazuma Kita, André E. B. Amend, Hiroshi Fukuyama: Hexagonal Nanopits with Zigzag Edges on Graphite Surfaces, Tsinghua University - the University of Tokyo Joint Symposium on Multidiscipline (Beijing China, April 12-16, 2017).

[20] Hiroshi Fukuyama, Masahiro Kamada, Sachiko Nakamura: Recent Progress in Studies of Emergent Quantum Phases of 2D Helium Systems, International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT 2017): Frontiers of Low Temperature Physics (Heidelberg Germany, August 17-21, 2017).

(国内会議)

一般講演

[21] 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 (II)、第 94 回 2017 年度春季低温工学・超電導学会 (東京、2017 年 5 月 30 日-6 月 1 日).

[22] 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 $NbSe_2$ 薄膜の伝導特性変調 2、日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学、2017 年 9 月 21-24 日).

[23] 喜田和馬、松井朋裕、André E. B. Amend、福山寛: 劈開グラフェン試料へのジグザグ・ナノピット形成とその伝導度測定、日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学、2017 年 9 月 21-24 日).

[24] 小川勝之、鎌田雅博、中村龍司、松井朋裕、福山寛: 水素膜上 2 次元ヘリウム 3 の量子液体相の比熱測定、日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学、2017 年 9 月 21-24 日).

[25] 宇佐美潤、松井朋裕、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 II、日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学、2017 年 9 月 21-24 日).

[26] 戸田亮、植松拓真、瀧本翔平、村川智、福山寛: 小型連続核断熱消磁冷凍機の開発、第 2 回 東京大学技術発表会 (東京大学、2018 年 2 月 15-16 日).

[27] 宇佐美潤、松井朋裕、福山寛: 超流動ヘリウムのフィルムフローの律速メカニズム (Rate Limiting Mechanism of Film Flow Superfluid Helium)、第 9 回 低温センター研究交流会 (東京大学、2018 年 2 月 20-21 日).

[28] 鈴木尚将、小川勝之、中村龍司、鎌田雅博、松井朋裕、村川智、福山寛: 単原子層ヘリウム 3 の新奇スピン液体状態の解明に向けた NMR セルの設計・製作 (Design and construction of NMR cell for investigation of novel spin liquid state in monolayer helium-3)、第 9 回 低温センター研究交流会 (東京大学、2018 年 2 月 20-21 日).

[29] 小川勝之、鎌田雅博、吉冨愛望アビガイル、松井朋裕、福山寛: 単原子層ヘリウム 3 の気液相転移の観測 (Observation of Gas-Liquid Phase Transition in Monolayer ^{3}He)、第 9 回 低温センター研究交流会 (東京大学、2018 年 2 月 20-21 日).

[30] André E. B. Amend, Tomohiro Matsui, Hiroshi Fukuyama: Scanning Tunneling Spectroscopy Study of Graphene Zigzag Nano-ribbon、第 9 回 低温センター研究交流会 (東京大学、2018 年 2 月 20-21 日).

[31] 戸田亮、瀧本翔平、植松拓真、村川智、福山寛: 小型超低温連続冷凍システムの開発 II、第 9 回 低温センター研究交流会 (東京大学、2018 年 2 月 20-21 日).

[32] 松井朋裕、André E. B. Amend, 喜田和馬、佐藤秀樹、福山寛: グラフェン・ナノリボンにおけるジグザグ端状態の STM/S 観測、日本物理学会 第 73 回 年次大会 (東京理科大学、2018 年 3 月 22-25 日).

[33] 戸田亮、瀧本翔平、植松拓真、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 III、日本物理学会 第 73 回 年次大会 (東京理科大学、2018 年 3 月 22-25 日).

招待講演

[34] 福山寛: ヘリウム再液化のエコノミクスとヘリウム研究のフィジクス、東京大学低温センター設立 50 周年記念講演会（東京大学、2018 年 2 月 21 日).

(セミナー)

[35] 福山寛: ヘリウムの 2 次元系で新奇な量子相を探す物理部会談話会 (東京大学教養学部物理部会、2017 年 6 月 22 日).

[36] 福山寛: 2 次元ヘリウム系の量子物性大学院集中講義 (大阪市立大学大学院理学研究科、2017 年 11 月 15-17 日).

[37] 福山寛: 単原子層ヘリウム研究の新展開 ～量子液晶と量子スピン液体教室談話会 (大阪市立大学理学部物理学科、2017 年 11 月 17 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。最近は、吸着原子に磁性体を用いて、スピンに絡む新奇な物理現象の探索を行っている。磁性不純物を吸着させる半導体表面に高電子移動度をもつ２次元電子系を作成しているため、STM/S を用いた測定からスピンの情報を含んだトンネル電流を観測することが可能であると考えている。これ

まで Fe や Co などを用いた 2 次元電子系の作成に成功し、STM/S による磁性不純物の空間分布の観測に成功している。今後、局在スピン（磁性不純物）と伝導電子、局在スピン間の交換相互作用をトンネル分光法により実空間で精密に測定することにより、新奇な磁気的物理現象の観測を目指す。

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。

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

面内磁場印加可能な極低温走査トンネル顕微鏡の開発

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

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

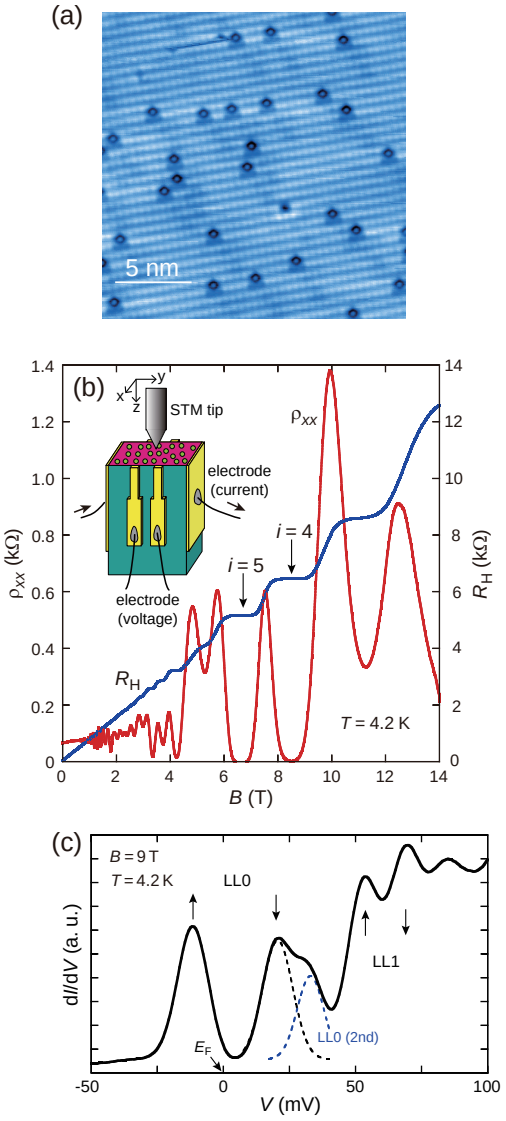


図 4.4.1: (a) InSb 劈開表面に鉄を 0.01 ML つけた場合の STM 像（20×20 nm^2）。黒い輪郭を持った丸が Fe であり、明るい縞模様が Sb の格子である。(b) 4.2 K における縦抵抗率とホール抵抗の磁場依存性。明瞭な整数量子ホール効果が観測されている。(c) 走査トンネル分光の測定例。微分コンダクタンスから 2 次元電子系の状態密度を調べることができる。ここでは、スピン分裂したランダウ準位が観測されている。

できる。昨年度から、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、磁場誘起超伝導の観測に成功するとともに、そのメカニズムを明らかにした。

磁場誘起超伝導は、磁性不純物として Ce を用い

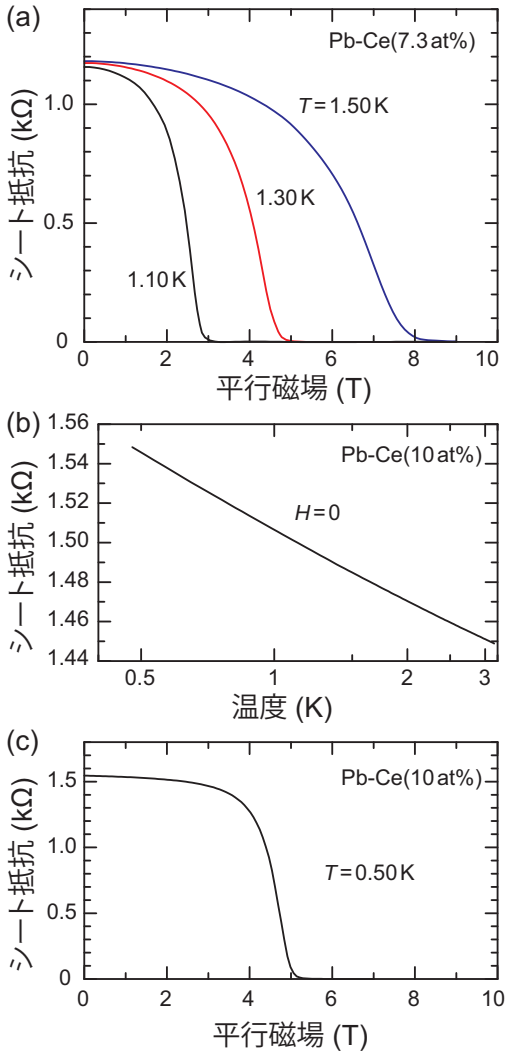


図 4.4.2: Pb-Ce 合金超薄膜で観測された磁場誘起超伝導。(a) 7.4%の Ce を含む合金超薄膜のシート抵抗の磁場依存性。磁場印加によって超伝導転移が引き起こされている。(b) 10%の Ce を含む合金超薄膜のシート抵抗のゼロ磁場での温度依存性。弱局在的な振る舞いが観測され、最低温度に至るまで超伝導の兆候は現れない。(c) 10%の Ce を含む合金超薄膜における磁場誘起超伝導。この試料では $T = 0$ でも磁場誘起超伝導が起こると考えられる。

た場合に最も明瞭に観測される。7.4%の Ce を含む合金超薄膜では、一定温度の条件下で磁場誘起超伝導が明瞭に観測された。さらに、10%の Ce を含む合金超薄膜では、最低温度に至るまで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。

磁場によって超伝導が壊されることは 1914 年の

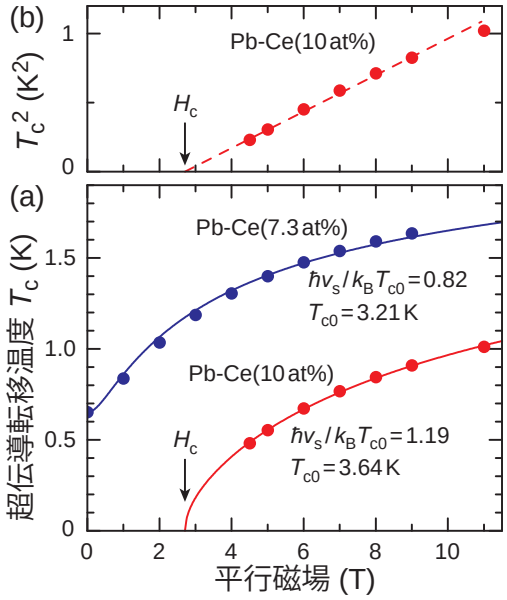


図 4.4.3: (a) Pb-Ce 合金超薄膜の超伝導転移温度 T_c の平行磁場依存性。実線は、Kharitonov と Feigelman の理論に基づく計算。(b) T_c^2 を縦軸としてプロット。

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 の理論に基づく計算からは、$\hbar\tau_s^{-1} > 0.88 k_B T_{c0}$

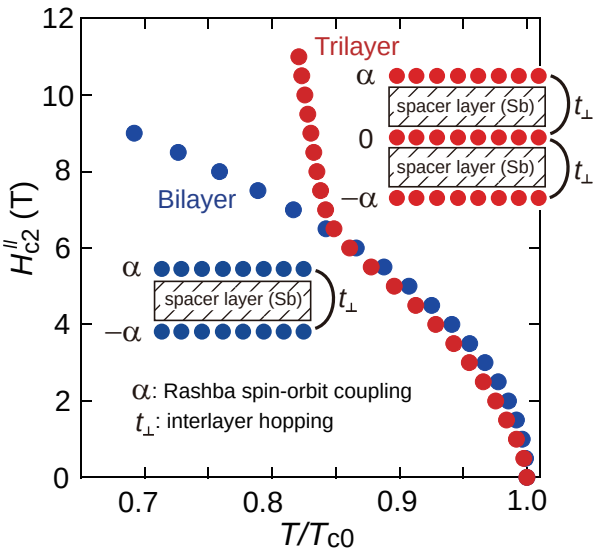


図 4.4.4: 2.0 nm の Sb をスペーサー層として、Pb 単原子膜を二層あるいは三層重ねた試料における臨界磁場の温度依存性。磁場は膜面に平行に印加しており、横軸はゼロ磁場における超伝導転移温度 T_{c0} を用いて規格化している。三層系試料において、複素ストライプ相からヘリカル相へのクロスオーバーに起因すると考えられる急激な立ち上がりが、高磁場・低温領域で観測された。

では、臨界磁場 H_c の近傍で、T_c は $(H_{\parallel} - H_c)^{1/2}$ に比例して変化すると期待される。T_c^2 を縦軸としてプロットすると $H_{\parallel} = H_c$ を通る直線に良く乗ることがわかる。

多重単原子層膜における超伝導状態に関する研究

空間反転対称性が欠如した超伝導体では有限の重心運動量をもつ Cooper 対の形成や空間変調する超伝導秩序変数の実現など興味深い物理現象が引き起こされることが知られている。近年、我々は GaAs 劈開表面上に Pb の単原子層超伝導体の作成に成功した。この系では単原子層超伝導体が GaAs 基板と真空に挟まれているため空間反転対称性が破れている。さらに、Pb 自身の強いスピン軌道相互作用により Rashba 型のスピン軌道相互作用が働くことが期待される。関原らはこの系に対して詳細な平行磁場下における電気抵抗測定の結果から、クーパー対が有限の重心運動量をもつ不均一な超伝導状態が実現している可能性を指摘した（T. Sekihara, R. Masutomi, T. Okamoto, Phys. Rev. Lett. (2013)）。

今年度はこの Rashba スピン軌道相互作用が強い Pb の単原子層超伝導体とスペーサー層に Sb を用いて、層に依存した Rashba スピン軌道相互作用をもつ二層膜および三層膜を作成した（図 4.4.4 挿入図）。また、これらの系における電気抵抗測定により求めた平行上部臨界磁場の温度依存性を図 4.4.4 に示す。スペーサー層の厚みが 2.0 nm の二層系では平行上部臨界磁場は二次元の GL 理論から期待されるような温度に対して平方根の依存性をもって変化することがわかった（図 4.4.4 青丸）。一方、三層系の場合では高磁場・低温領域において平行上部臨界磁場の急激な立ち上がりが観測された（図 4.4.4 赤丸）。この振舞いを説明するために、層に依存した Rashba スピン軌道相互作用をもつ多層系の超伝導状態を BdG 方程式を数値的に解く手法により求めた（数値計算に関しては京大理の柳瀬氏にして頂いた）。この数値計算の結果から高磁場・低温領域での急激な立ち上がりは、超伝導秩序変数の振幅と位相の両方が変調する（磁場誘起による）複素ストライプ相から独立した層の振舞いであるヘリカル相へのクロスオーバーに起因していることがわかった。したがって、本研究では多重単原子層膜において複素ストライプ状態およびヘリカル状態を実験的に初めて観測した結果であると考えられる。

さらに、Rashba スピン軌道相互作用と軌道対破壊効果の競合から生じる奇パリティ超伝導状態であるペア密度波相を探索するため、田代が中心となり、スペーサー層に高い絶縁性をもつ Se を用いた多層系の研究も行った。このセレンを用いた多層系ではスペーサー層の厚みを上述の Sb を用いた場合より薄くできるため、軌道対破壊効果の影響を制御して超伝導状態の研究を行うことが可能である。実際の測定においてはスペーサー層の厚みを 1/3 程度に減少させることには成功したが、ペア密度波相の観測には至らなかった。この系で実現が期待されているペア密度波状態はトポロジカルに非自明になる非常に興味深い超伝導状態である。したがって、今後、単原子層超伝導物質やスペーサー層の種類を変化させ系統的な研究を行う予定である。

＜報文＞

(原著論文)

[1] M. Niwata, R. Masutomi, and T. Okamoto: Magnetic-field-induced superconductivity in ultrathin Pb films with magnetic impurities, Phys. Rev. Lett. **119**, 257001 (2017) .

(学位論文)

[2] 大春大地:「イオン液体を用いた化合物半導体表面上での反転層の形成」（修士論文）

[3] 田代翔太郎:「Pb 単原子膜の 2 層および 3 層構造における超伝導」（修士論文）

＜学術講演＞

(国内会議)

一般講演

[4] 枡富 龍一、田代 翔太郎、岡本 徹、柳瀬 陽一: 多重単原子層膜における複素ストライプ相からヘリカル相へのクロスオーバーの観測, 日本物理学会 第 73 会年次大会（東京理科大学）2018 年 3 月 22 日-25 日.

(セミナー)

[5] 岡本 徹: 単原子層超伝導と磁場誘起超伝導, 駒場物性セミナー（東京大学駒場キャンパス）2017 年 7 月 7 日.

4.5 島野研究室

島野研究室では、レーザー光を用いて固体中の電子の集団に創発する量子現象の探求、新たな素励起（粒子）の探索、未知の量子相の探求に取り組んでいる。光を照射することによって初めて現れる秩序相の探求や、光を用いて固体中のマクロな量子状態を制御する、さらには光で創発させることを目標として、可視光からテラヘルツ波領域にわたる広い光子エネルギー範囲の超短パルス光源の開発、非線形レーザー分光法、超高速分光法などの観測技術の開発を並行して進めている。本年度は、以下に挙げる研究を進めた。

4.5.1 半導体光励起電子正孔系

励起子間相互作用の定量評価

半導体中に光励起された電子正孔系は、低密度では電荷中性の束縛状態、励起子を形成する。励起子は希薄極限で近似的にボース粒子とみなせるため、極低温では励起子のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) が生じると考えられている。しかし、励起子は厳密にはボース粒子ではなく有限の励起子間相互作用が存在し、特に高密度下ではその影響は無視できないほど大きくなるため、高密度下での励起子 BEC の可能性を検証するするためには、励起子間相互作用のメカニズムを定量的に理解することが重要である。これまで励起子間相互作用は、主に二次元量子井戸系を舞台に理論・実験の両面で議論がなされ、特に実験では発光・吸収スペクトルや四光波混合などの非線形光学応答からその振る舞いが詳しく調べられてきた。一方、量子凝縮の観点からも興味深い 3 次元系においては、実験が困難であることから、その定量的な評価は意外なことにこれまでほとんどなされなかった。そこで我々は、高品質の直接遷移型半導体 GaAs バルク結晶を対象に、選択的励起子共鳴励起による近赤外円偏光ポンプ-プローブ分光法を用いて実験を行った。初期状態として極低温かつスピン偏極した高密度の軽い正孔 1s 励起子を生成し、励起子吸収線のエネルギーシフトを定量評価した。その結果、励起直後 20ps 程度までは励起子吸収線の比較的大きな高エネルギーシフトが観測され、その後 50ps 程度でシフト量が大きく減少し、100ps 以降は準平衡状態に至る振る舞いが、どのような偏光条件でも観測された。この振る舞いは、共鳴励起直後の極低温の励起子が格子温度まで熱化していく様子を反映していると解釈される。励起子と格子との相互作用を微視的に取り入れた理論計算を行ったところ、電子格子相互作用だけでは観測された緩和時間を説明できず、励起子間の非弾性散乱が影響していることを示唆する結果を得た。また、励起直後のスピン偏極した状態においては励起子から励起子分子の誘導吸収も観測された。特に軽い正孔励起子と重い正孔励起子から成る混合励起子分子の誘導吸収に関しては、バルクでは初めて観測することに成功した。励起子分子への誘導吸収の信号強度の減衰時間は数 10ps 程度とであることがわかったが、これは励起子を構成する電子・正孔のスピン緩和時間を反映していると解釈された。今後は、励起子間相互作用や極低温励起子の励起子熱化現象、および励起子スピン緩和のメカニズムを明らかにしていく予定である。

テラヘルツ電場パルスによる励起子のイオン化ダイナミクス

近年、ピコ秒の時間スケールで変化するテラヘルツ電場パルスを用いて半導体の光応答を超高速変調する試みが盛んになっている。バンドギャップエネルギー付近の光応答は励起子共鳴に支配されるため、その機構を理解する上では励起子とテラヘルツ波との相互作用を理解することが必要不可欠である。我々は高純度なバルク GaAs 結晶を対象にテラヘルツポンプ-近赤外プローブ分光を行い、励起子吸収線の超高速な変化を観測した。その結果、近赤外プローブパルスがテラヘルツポンプパルスよりも早く試料に入射した場合に、励起子吸収線近傍の吸収スペクトルに顕著な振動構造が現れた。これは近赤外プローブパルスによりつくられた励起子の分極が、テラヘルツポンプパルスによる励起子のイオン化によって高速に変調されたことを反映した信号（摂動を受けた自由誘導減衰信号）であることを示唆していた。この過程について理解を深めるために、微視的モデルの一つである半導体ブロッホ方程式に基づいた数値シミュレーションを行った。計算された吸収スペクトルは実験結果をよく再現し、観測された信号が確かにテラヘルツ電場による励起子のイオン化を起源とするものであることが確かめられた。さらに計算結果を実空間における励起子の波動関数に変換することにより、励起子の波束がテラヘルツ電場パルスの変化とともにどのように時間変化し、イオン化に至るのかを可視化することに成功した。これらの結果は、強いテラヘルツパルス中にある励起子と強いレーザーパルス中にある原子との類似を考える上でも重要な知見である。

励起子の光ドレスト状態

半導体中に光励起された励起子は、極低温においてボース・アインシュタイン凝縮（BEC）を起こすと考えられている。励起密度が高くなるとクーロンポテンシャルが遮蔽され、励起子そのものは不安定化するものの、十分低温ではやはり電子正孔クーパー対という束縛状態を作って凝縮し、電子正孔 BCS 状態になると考えられる。いずれの量子凝縮相においても全ての電子正孔対が同じ量子状態を取るため、超

放射など協力現象に由来する特異な光学応答が発現すると期待されている。しかし電子正孔系の量子凝縮を実現するのは困難であり、それに関連した協力的光応答が明瞭に観測された例はない。考えられる理由の一つとして、電子正孔対のコヒーレンスが多体効果によって壊れやすい可能性が挙げられる。そこで、我々は励起子を共鳴的に光励起し、強制的にコヒーレントな電子正孔対を生成したときの光応答を調べることで、量子凝縮相の理解へのアプローチを試みた。用いた手法はバルク GaAs 結晶を対象とした近赤外ポンプ-近赤外プローブ分光法である。近赤外ポンプ光には、波長選択によって励起子に共鳴した狭帯域した光パルスを用いた。また、近赤外プローブ光には広帯域の超短光パルスを用いた。測定の結果、ポンプ光が照射されている間にプローブ光を入射した場合に励起子吸収線の分裂が観測された。これは物質中の励起準位が光電場をまとってエネルギー固有値が繰り込まれること、すなわち光ドレスト状態の生成によって説明できると考えられる。もっとも、二準位原子系の光ドレスト状態とは違い分裂は非対称的で、高エネルギー側のピークが低エネルギー側のピークよりも大きかった。これは励起子の高エネルギー側にある連続準位の影響によるものであり、電子正孔系特有の事情であると思われる。また、ポンプ光強度を強くしていくと、高エネルギー側のピークは光励起後に残る電子正孔プラズマ的な応答へとなめらかに移り変わっていくことがわかった。これはポンプ光によって注入されたコヒーレントな電子正孔相関が、準熱平衡状態における相関へと移行したことを示唆している。本研究の中で量子凝縮状態が実現した兆候はないものの、その転移温度以上でも電子正孔相関が残存する可能性は過去の理論的・実験的研究の両面から支持されている。しかし今回の研究では、エネルギー的に近接して存在する重い正孔励起子・軽い正孔励起子など各吸収線の振る舞いが光学遷移の選択則に基づく単純な解釈と整合せず、低温における多体効果の理論的な解析が求められている。

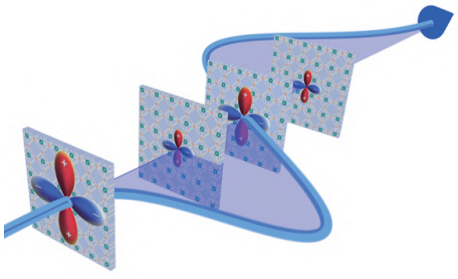


図 4.5.1: 照射するテラヘルツ波パルスの振動に追随して d 波超伝導のオーダーパラメーターの大きさが振動する様子の概念図。

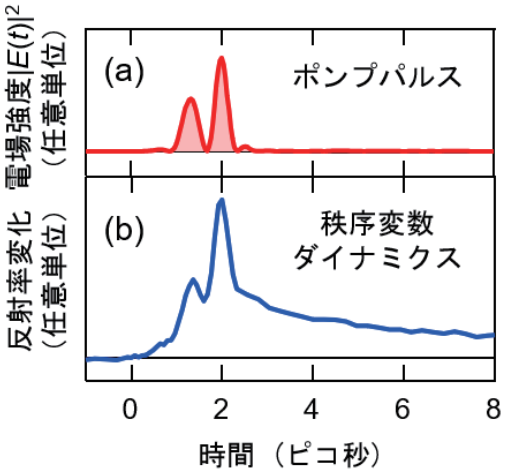


図 4.5.2: 実験で観測された超伝導オーダーパラメーターの振動の様子。(a) は照射したテラヘルツ波パルス（ポンプパルス）の自乗電場波形。(b) は、超伝導転移温度以下の 10 K におけるテラヘルツ波パルス照射による近赤外光の反射率変化のダイナミクス。

4.5.2 超伝導体の光応答・光制御

銅酸化物高温超伝導体におけるヒッグスモードの観測

従来型 s 波超伝導体におけるヒッグスモードの観測に端を発し、ヒッグスモードの観測は、超伝導オーダーパラメーターを高い時間分解能で光学的に検出する新しい手法として高い注目を集めている。例えば、銅酸化物高温超伝導体に代表される d 波ペアリング超伝導体においては、電荷密度波などの超伝導と競合する秩序の解明や、それら多重秩序の光制御の可能性が模索されており、ヒッグスモードの観測はその強力なプローブとなることが期待される。実際、d 波超伝導体におけるヒッグスモードに関して近年数多くの理論的な研究が報告され、例えば複数のペアリングチャンネルが存在すると複数のヒッグスモードが現れるという理論や、超伝導ギャップにノードがある場合には、ヒッグスモードから個別励起への素早い緩和が起こると予測する理論が報告されている。しかしながら、d 波超伝導体ではこれまで実験による観測は報告されていなかった。

そこで我々は、典型的な d 波超伝導体であ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を目指した。高強度テラヘルツ波パルスを $Bi_2Sr_2CaCuO_{8+x}$ に照射し、誘起された非平衡ダイナミクスを近赤外光パルスの反射率変化を通して測定した。その結果、反射率変化に s 波超伝導体と同様に入射テラヘルツ電場の 2 乗波形に追随して振動する信号成分（振動成分）と、テラヘルツ波パルス励起後も残存し有限寿命で減衰する信号成分（減衰成分）が現れることが分かった。減衰成分は温度に依存して符号が変化し、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、テラヘルツ波パルスによる準粒子励起であると結論した。一方、振動成分は超伝導転移温度 T_c 以下で急激に発達することから、超伝導秩

序の発達に関連する 3 次の非線形光学応答であることがわかった。この超伝導状態において顕著に現れる非線形応答の起源としては、ヒッグスモードの他に個別励起による電荷密度ゆらぎも考えられるが、s 波超伝導体においては両者の偏光依存性の違いから、テラヘルツ波パルス励起によって現れる非線形応答がヒッグスモードであることが結論付けられた。そこで、本研究においてもポンプテラヘルツ波パルスとプローブ近赤外光パルスの電場の偏光に注目したところ、反射率変化のダイナミクスはポンプ光とプローブ光の偏光角度に無依存な A_{1g} 成分と依存する B_{1g} 成分に分解できることがわかった。さらに、正孔ドープ濃度を変化させても A_{1g} 成分が常に支配的であることがわかった。理論計算により d 波超伝導体における THz テラヘルツポンプ-近赤外光プローブ信号に相当する非線形感受率の偏光依存性を評価すると、ヒッグスモードは A_{1g} 成分しか持たない一方で、電荷密度ゆらぎは B_{1g} 成分が最も支配的であることがわかった。従って、実験で観測された A_{1g} 成分はヒッグスモードに由来すると結論付けられ、d 波超伝導体で初めてヒッグスモードの観測に成功した。今後はヒッグスモード観測の手法を用いて、超伝導転移温度以上での超伝導揺らぎや隠れた秩序の抽出、光励起非平衡超伝導の研究へと展開する予定である。

鉄系超伝導体 $\mathbf{FeSe_{1-x}Te_x}$ 薄膜の THz ポンプ-プローブ分光

FeSe は常圧下では超伝導とネマティック秩序が長距離の磁気秩序を伴わずに共存している鉄系超伝導体の中でも特異な系である。FeSe 薄膜のネマティック秩序は Se を Te に置換していくとやがて消失し、それに伴って超伝導転移温度が大きく上昇することが最近報告されており、超伝導と競合する秩序であることが予想されている。しかし、その起源や超伝導秩序との関係についてはまだ明確な理解は得られていない。また、FeSe は BEC-BCS クロスオーバー領域に位置する強結合超伝導体であると考えられており、超伝導転移温度 T_c より高温域からクーパー対が形成されていると予想されている。さらには圧力下ではスピン密度波（SDW）が発現することも知られており様々な秩序がひしめく興味深い物質である。

我々は、テラヘルツ波で強励起された非平衡状態のダイナミクスを通して内在する複数の秩序の関連性について知見を得るため、$FeSe_{1-x}Te_x$ 薄膜に対してテラヘルツポンプ-テラヘルツプローブ分光を行った。試料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, 0.2, 0.4, 0.6) を用いた。

その結果、T_c 以下ではテラヘルツ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反映して数 10 %以上もの大きな変化が表れた。一方、T_c 以上においても T_c 以下と類似のポンププローブ信号が残留することを観測した。この信号は、T_c より数 10 K 上の温度から現れる。その起源は現時点では不明だが、予想される超伝導揺らぎの温度よりも十分高いため、ネマティック秩序や磁気揺らぎ等内在する秩序に由来している可能性が高いと考えられ、現在、その詳細な解析を進めている。

光励起した際の銅酸化物超伝導体のジョセフソンプラズマ共鳴のダイナミクス

銅酸化物高温超伝導体は超伝導を担う CuO 面がブロック層を挟んで 1 方向（c 軸方向）に層状に積層した構造をとっている。超伝導転移温度 T_c 以下になると、CuO 面内のクーパー対は面間ジョセフソン効果によって c 軸方向にトンネル伝導する。このとき c 軸方向のテラヘルツ帯反射率には、クーパー対の集団運動を反映した急峻なプラズマ反射端 (ジョセフソンプラズマ端）が現れる。ジョセフソンプラズマは、超伝導コヒーレンスの発達の光学プローブになるが、特に近年では光誘起超伝導状態を探る手がかりとして用いられている。しかし、光誘起超伝導状態に関しては研究例が乏しく、またそのメカニズムや超伝導と競合する秩序との関連についても未解明な部分が多い。そこで我々は、近赤外ポンプ-テラヘルツプローブ分光の系を構築し、複数種類の試料を用いて、銅酸化物高温超伝導体における光励起非平衡状態をジョセフソンプラズマ共鳴の観測を手がかりに調べた。

典型的な銅酸化物超伝導体 $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ の最適ドープの試料を用いて、転移温度以下の超伝導状態において近赤外光を用いて励起した際の c 軸方向のテラヘルツ応答を調べた。すると、光励起によってジョセフソンプラズマ周波数は低周波側へとシフトしていくが、1 mJ/cm^2 を超えるような非常に強い光励起を行っても、部分的には超伝導が残っていることを示唆するような実験結果が得られた。また、La の一部を Nd に置換した $La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO_4$ を用いて、超伝導と競合するストライプ秩序がある際の光励起状態の c 軸応答に関して調べた。すると、励起直後に反射率の上昇が見られ、それが超伝導転移温度を超えた電荷秩序の発達する温度領域まで生じることがわかった。今後はさらにこれらの現象の正孔ドープ依存性について詳しく調べ、銅酸化物の光励起ダイナミクスに関して追究していく。

電流注入によるヒッグスモードの赤外活性化

超伝導秩序変数の振幅の振動モードであるヒッグスモードは、電気・磁気分極を伴わないので、電磁波と線形には結合せず、線形応答としては観測できない。しかし、最近、超伝導体に直流電流を印加すると、電流に平行な電場成分を持つ偏光の電磁波とヒッグスモードが線形に結合し、光学伝導度スペクトルの実部において、超伝導ギャップのエネルギー（$\omega = 2\Delta$）に共鳴ピークが現れることが理論的に提案された。そこで我々は、s 波超伝導体である NbN の薄膜（26 nm 厚、$Tc = 14.5$ K）に、$T = 0.34T_c$ の低温で、臨界電流密度（≈ 3 MA/cm^2）に匹敵する直流電流を流しながら弱い THz 波を入射させ、透過し

た THz 波を時間分解測定することで、直流電流の注入による光学伝導度の変化を求めた。その結果、測定する偏光の方向が電流と平行な配置において、超伝導ギャップ付近に、電流密度の 2 乗に比例するピークが観測された。このピークは、電流と偏光が直交する配置では消失する。また、ピーク幅は印加する電流に依存しない。これらの特徴は、先述の理論提案と矛盾しない。観測されたピークのエネルギーは、同様の NbN 薄膜において、強い THz 波を用いた非線形励起で観測された自由振動の周波数ともよく一致している。このピークは、測定温度を $T = 0.55T_c$ まで上げても成長しない。これは、このピークが準粒子に関連する現象ではなく、超流動成分に起因する現象であることを強く示唆している。電流注入の手法によって、弱い THz 波照射でもヒッグスモードが観測できれば、ヒッグス分光の対象を、不安定な超伝導体や、光ポンプによって現れる過渡的な相、共存する秩序との相関にも広げることができる。今後は、この手法をより広範な対象に適用する予定である。

＜受賞＞

[1] Kota Katsumi: Best Poster Award at 6th International Conference on Photoinduced Phase Transitions (2017 年 6 月)

[2] 高山正行: 低温センター第 9 回研究交流会ベストポスターアワード （2018 年 2 月）

[3] 勝見恒太: 理学系研究科研究奨励賞 （2018 年 3 月）

＜報文＞

(原著論文)

[4] Ryusuke Matsunaga, Naoto Tsuji, Kazumasa Makise, Hirotaka Terai, Hideo Aoki, and Ryo Shimano: Polarization-resolved terahertz third-harmonic generation in a single-crystal superconductor NbN: Dominance of the Higgs mode beyond the BCS approximation, Phys. Rev. B **96**, 020505(R) (2017).

[5] Fumiya Sekiguchi and Ryo Shimano: Rate Equation Analysis of the Dynamics of First-order Exciton Mott Transition, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 103702 (2017).

[6] Yuta Murotani, Masayuki Takayama, Fumiya Sekiguchi, Changsu Kim, Hidefumi Akiyama, and Ryo Shimano: Terahertz field-induced ionization and perturbed free induction decay of excitons in bulk GaAs, J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 114001 (2018).

[7] Go Yumoto, Ryusuke Matsunaga, Hiroki Hibino, and Ryo Shimano: Ultrafast Terahertz Nonlinear Optics of Landau Level Transitions in a Monolayer Graphene, Phys. Rev. Lett. **120**, 107401 (2018).

[8] Kota Katsumi, Naoto Tsuji, Yuki I. Hamada, Ryusuke Matsunaga, John Schneeloch, Ruidan D. Zhong, Genda D. Gu, Hideo Aoki, Yann Gallais, and Ryo Shimano: Higgs Mode in the d-Wave Superconductor $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ Driven by an Intense Terahertz Pulse, Phys. Rev. Lett. **120**, 117001 (2018).

(会議抄録)

(学位論文)

[9] 勝見恒太 : Study of Higgs mode in a d-wave superconductor $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ using an intense terahertz-pulse （修士論文）

(プレスリリース)

[10] 島野亮、勝見恒太、青木秀夫 :「銅酸化物高温超伝導体で超伝導の “さざ波’’ のヒッグスモードの観測に成功」、2018 年 3 月 9 日

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[11] Kota Katsumi, Yuki I. Hamada, Ryusuke Matsunaga, John Schneeloch, Ruidan D. Zhong, Genda D. Gu, Yann Gallais, and Ryo Shimano: Exploring THz-induced dynamics of a d-wave superconducting condensate in the cuprate $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$, 6th International Conference on Photoinduced Phase Transitions, Sendai, Japan, June 5-6, 2017.

[12] Keisuke Tomita, Ryusuke Matsunaga, Masataka Kawai, Daisuke Asami, Fuyuki Nabeshima, Atsutaka Maeda, Ryo Shimano: Terahertz pump-probe spectroscopy of thin film $FeSe_{1-x}Te_x$, 6th International Conference on Photoinduced Phase Transitions, Sendai, Japan, June 5-6, 2017.

[13] Kota Katsumi, Ryusuke Matsunaga, John Schneeloch, Ruidan D. Zhong, Genda D. Gu, Yann Gallais, and Ryo Shimano: Terahertz pulse induced non-equilibrium dynamics of a d-wave cuprate superconductor, The International School and Workshop on Electronic Crystals ECRYS 2017, Corse, France, August 23, 2017.

招待講演

[14] Ryo Shimano: Higgs mode in conventional and unconventional superconductors, 6th International Conference on Photoinduced Phase Transitions, Sendai, Japan, June 9, 2017.

[15] Ryo Shimano: Ultrafast THz nonlinear optics in a Landau-quantized graphene, 2017 PKU-UTokyo NanoCarbon Workshop, Univ. of Tokyo, July 28, 2017.

[16] Ryo Shimano: Extreme Nonlinear Optics in Graphene in the THz range, CLEO Pacific Rim, Marina Bay Sands Expo and Convention Center, Singapore, Aug. 1, 2017.

[17] Ryo Shimano: THz study of photoexcited dynamics in high Tc superconductors, International Workshop on Non-Linear Effects and Short-Time Dynamics in Novel Superconductors and Correlated Spin-Orbit Coupled Systems, Center for Theoretical Physics of Complex Systems, Institute for Basic Science, Daejeon, Korea, Sept. 18, 2017.

[18] Ryo Shimano: A light-induced metastable phase in superconducting $La_{2-x}Sr_xCuO_4$, International Workshop on Ultrafast dynamics and metastability, Georgetown Univ., Washington, USA, Nov. 15,2017.

[19] Ryo Shimano: A light-induced nonequilibrium phenomena in high Tc cuprate superconductors, International Workshop on Frontiers of Research in Quantum Materials, Max Planck Institute, Stuttgart, Dec 18, 2017.

(国内会議)

一般講演

• 日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月 13-16 日、金沢大学)

[20] 松永隆佑, 辻直人, 牧瀬圭正, 寺井弘高, 青木秀夫, 島野亮：超伝導体 NbN の偏光分解テラヘルツ第三高調波発生：ヒッグスモードの支配的寄与と BCS 近似の破綻

[21] 丹羽宏彰, 泊開人, 松永隆佑, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮：テラヘルツ分光による銅酸化物超伝導体 $La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO_4$ の光励起ダイナミクスの観測

[22] 高山正行, 金昌秀, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, 島野亮：バルク GaAs における励起子間相互作用のカイラリティ依存性

[23] 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：テラヘルツポンププローブ分光で探る Fe(Se,Te) 薄膜の超伝導およびネマティック秩序

[24] 飯田雄大, 松永隆佑, 中村祥子, 寺井弘高, 島野亮：超伝導体 NbN における直流電流とヒッグスモードの結合

• 第 7 回東京大学低温センター研究交流会 (2018 年 2 月 23 日、東京大学)

[25] 勝見恒太, 辻直人, 濱田裕紀, 松永隆佑, Ruidan D. Zhong, John Schneeloch, Genda D. Gu, 青木秀夫, Yann Gallais, 島野亮：高強度テラヘルツ波励起による d 波超伝導体 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ におけるヒッグスモードの観測

[26] 高山正行, 江馬英信, 前田健人, 金昌秀, 秋山英文, 島野亮：極低温高密度下におけるバルク GaAs 中の励起子間相互作用と励起子熱化ダイナミクス

[27] 中村祥子, 飯田雄大, 松永隆佑, 寺井弘高, 島野亮：電流注入下の s 波超伝導体 NbN における THz 線形分光による超伝導ヒッグスモードの観測

[28] Kota Katsumi, Romain Grasset, Yann Galles, Joshua Higgins, Richard Greene and Ryo Shimano: Higgs spectroscopy in a d-wave superconductor

[29] 丹羽宏彰, 泊開人, 松永隆佑, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮：銅酸化物超伝導体 $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ における光誘起準安定相の発見

[30] 勝見恒太, 辻直人, 濱田裕紀, 松永隆佑, Ruidan D. Zhong, John Schneeloch, Genda D. Gu, 青木秀夫, Yann Gallais, 島野亮：高温超伝導体 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ の高強度テラヘルツ波励起非平衡ダイナミクス、第 10 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, 京都大学国際科学イノベーション棟、2018 年 1 月 23 日

• 日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年 3 月 17-20 日 大阪大学)

[31] 室谷悠太, 高山正行, 関口文哉, 金昌秀, 秋山英文, 島野亮：テラヘルツパルスによる励起子のイオン化と自由誘導減衰

[32] 丹羽宏彰, 吉川尚孝, 泊開人, 松永隆佑, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮：銅酸化物超伝導体 $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ のテラヘルツ帯光励起非平衡ダイナミクスの観測

招待講演

[33] 島野亮：高強度テラヘルツ波が拓く固体物性研究の新展開、日本分光学会年次講演会シンポジウム「テラヘルツ分光技術の最先端応用」早稲田大学西早稲田キャンパス, 2017 年 5 月 23 日

[34] 島野亮：高強度テラヘルツ波が拓く物性研究の新展開、強光子場科学研究懇談会, 東京大学　理学部化学本館講堂, 2017 年 10 月 21 日

[35] 島野亮：光による物質相制御の現状と展望、東北大学金属材料研究所ワークショップ「多自由度・多階層性が協奏する物質材料システムの科学」東北大学金属材料研究所講堂, 2017 年 12 月 6 日

(セミナー等)

[36] Ryo Shimano: Nonequilibrium dynamics of superconductors, MPI-UBC-UTokyo Winter School, Koshiba Hall, The Univ. of Tokyo, Feb. 16, 2018.

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 29 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 ハニカム格子上のスピン軌道量子液体の発見

1973 年の P.W.Anderson による提案以来、量子スピン液体研究の歴史は長い。量子スピン液体は一次元では確立されているが、二次元以上ではこれまでの実験報告例である三角格子有機物質等では格子模型に厳密解が存在せず、特有の不純物効果も相まって近似解を絞り込むために必要な特徴的な素励起等の研究さえ困難であった。2006 年に Kitaev によって提案されたハニカム模型に基づく量子スピン液体はこの困難を払拭しうる。この模型ではハニカム格

子上のスピン系を考える。各スピンには三つの隣接スピンとの間にイジング強磁性相互作用が働いている。そのイジング異方性が、三つの隣接スピンごとに異なり、互いに直交していることがポイントであり、相互作用間の競合を与える。Kitaev はマヨラナ演算子を導入することにより、1. 基底状態が量子スピン液体、2. スピンの二種類の「マヨラナ粒子」への分裂、を厳密解として示した。

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る Kitaev ハニカム模型量子スピン液体の実現が提唱され、盛んに模索されてきた。我々は、二次元ハニカム格子化合物 $H_3LiIr_2O_6$ において、実験的に自発的対称性の破れが少なくとも 50 mK まで起きないことを確認し、$J_{\rm eff}$=1/2 磁気モーメントの量子スピン液体状態を発見したと結論した。これを論文として発信（東京大学よりプレスリリース）した。さらに、低温における $H_3LiIr_2O_6$ の NMR の緩和率 $1/T_1$、比熱 C、磁化 M を詳細に解析し、素励起を探り、Kitaev 模型との対応を考察した。3 つの物理量は温度 T 及び磁場 B の関数として 5 K 以下の低温で、B/T に対して共通のスケーリング挙動（すべてのデータが普遍的なカーブを構築する）を示した。これらはゼロ磁場で $E=0$ で発散的、磁場下では $\mu_B B$ にスケールするフェルミ粒子状態密度モデルで定量的に記述できる。スケーリング挙動がナイトシフト K には現れないことから、このフェルミオン励起は 1 %程度のスピン欠陥に起因すると結論した。Kitaev 模型に対する理論計算は、スピン欠陥が、トラップされた局在マヨラナ粒子として理解でき、その励起に E=0 の特異性が現れることを示している。今回の結果はこれと整合してはいるが、他のスピン液体でも同様のスピン欠陥の振る舞いが期待できるので、Kitaev スピン液体、トラップされたマヨラナ粒子と断定することはできない。スピン欠陥の寄与を、スケーリングに従う部分と仮定して、観測された比熱から差し引くと、低温比熱には T^3 項しか残らず、スピン液体バルクの低エネルギー励起にはギャップが開いていることが示唆される。このことは今回発見した量子スピン液体状態が等方的な Kitaev 相互作用のみの純粋な Kitaev 模型に期待される状態とは異なっていることを示唆する。ごく最近、緻密な合成手法により $H_3LiIr_2O_6$ の単結晶試料の作製に成功した。$H_3LiIr_2O_6$ の素励起の正体をつきとめるべく、単結晶試料を用いた NMR 研究を開始している。

3 次元的なハイパーハニカム格子 β-Li_2IrO_3 についても単結晶作製に成功した。これを用いて超高圧化の磁化率、NMR 測定という実験技術が極めて挑戦的な課題に取り組んでいる。圧力をパラメータとする磁気相図が完成しつつある。

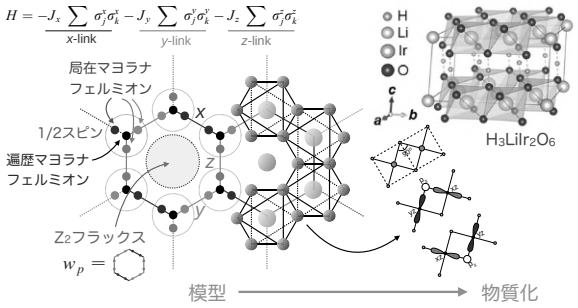


図 4.6.1: ハニカム格子・ハイパーハニカム格子系における量子スピン液体 (左) Kitaev ハニカム模型ハミルトニアンのスピンとマヨラナフェルミオンの関係。(右) 新しいスピン液体物質、ハニカム型 $H_3LiIr_2O_6$ の結晶構造

4.6.2 3 次元ディラック電子

アンチペロブスカイト酸化物

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。昨年度、10^{19} cm^{-3} 程度の低キャリア濃度の試料について ^{207}Pb の NMR 測定を行い、磁気緩和 $1/T_1$ 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 K 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。今年度は正孔濃度を $10^{19}-10^{20}$ cm^{-3} 程度まで変化させた試料を作製し、正孔濃度の関数として $1/T_1$ と K の変化を系統的に調べた。高濃度領域の試料では全温度領域でコリンガ的な挙動が観測される。$1/T_1$ のコリンガ側に従う部分は電子状態密度を反映する。これからナイトシフトに対するパウリ常磁性の寄与を見積もった。その結果、ナイトシフトにはパウリ常磁性では説明できない大きな反磁性の寄与が現われることが確認できた。これをディラック電子系に期待される巨大軌道反磁性成分であると結論した。NMR でディラック電子の巨大反磁性が確認されたのは我々が知る限り、初めてである。

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リング状のディラックノードをフェルミ準位近傍に持つとされている常磁性半金属である。昨年度までに、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、電気輸送、磁化特性の測定から、どちらの物質でも 20%(x = 0.2) 程度の置換により低温で弱強磁性絶縁体相が誘起されることを明らかにした。本年度は、

x を細かくふり、置換率 x と温度 T に関する相図の作製を試みた。$SrIr_{1-x}Sn_xO_3$ の場合、高置換領域（$x > 0.1$）では温度低下により半金属-絶縁体転移と常磁性-弱強磁性転移がほぼ同時に起きるのに対し、中置換領域（$0.7 < x < 0.1$）には、半金属性と弱強磁性が共存する領域が見出された。$CaIr_{1-x}Sn_xO_3$ では、無置換の状態から最低温（2 K）で弱強磁性の兆候が見られ、また半金属相と絶縁相の間のはっきりとした転移はみられず、置換によって緩やかな絶縁体化と磁気転移温度の上昇が起きることが示された。相図に現れたこれらの差異は、$SrIr_{1-x}Sn_xO_3$ と $CaIr_{1-x}Sn_xO_3$ において異なる絶縁体化の機構が働いていることを示唆する。カチオンの大きさの違いに由来する Ir-O-Ir の結合角・長さの差がバンド幅・構造に影響を与え、電子相関の影響の表れ方に違いをもたらした可能性がある。臨界点付近における物性の詳細な調査や分光実験等によって、相関ディラック系に特有の物性や各相に対応するバンド分散を明らかにすることを今後の目標とする。

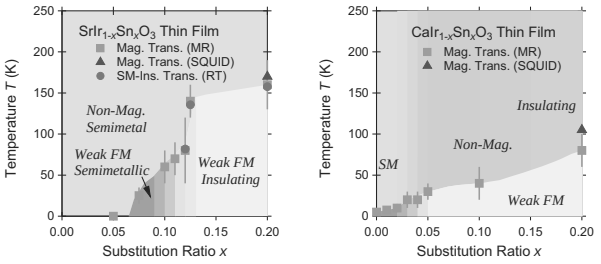


図 4.6.2: $SrTiO_3$(001) 基板上に作製されたペロブスカイト型イリジウム酸化物薄膜 (左) $SrIr_{1-x}Sn_xO_3$ (右) $CaIr_{1-x}Sn_xO_3$ の相図

＜報文＞

(原著論文)

[1] S. Li, Y. Kobayashi, M. Itoh, and D. Hirai, H. Takagi: Metal-Insulator Transition and Magnetic Fluctuations in Polycrystalline $Ru_{1-x}Rh_xP$ Investigated by ^{31}P NMR, Phys. Rev. B **95**, 155137 (2017).

[2] S. Agrestini, C.-Y. Kuo, M. Moretti Sala, Z. Hu, D. Kasinathan, K.-T. Ko, P. Glatzel, M. Rossi, J.-D. Cafun, K. O. Kvashnina, A. Matsumoto, T. Takayama, H. Takagi, L. H. Tjeng, and M. W. Haverkort: Long-range interactions in the effective low-energy Hamiltonian of Sr_2IrO_4: A core-to-core resonant inelastic x-ray scattering study, Phys. Rev. B **95**, 205123 (2017).

[3] T. I. Larkin, A. N. Yaresko, D. Prpper, K. A. Kikoin, Y. F. Lu, T. Takayama, Y.-L. Mathis, A. W. Rost, H. Takagi, B. Keimer, and A. V. Boris: Giant exciton Fano resonance in quasi-one-dimensional Ta_2NiSe_5, Phys. Rev. B **95**, 195144 (2017).

[4] A. Mohammed, H. Nakamura, P. Wochner, S. Ibrahimkutty, A. Schulz, K. Mller, U. Starke, B. Stuhlhofer, G. Cristiani, G. Logvenov, and H. Takagi: Pulsed laser deposition for the synthesis of monolayer WSe_2, Appl. Phys. Lett. **111**, 073101 (2017).

[5] J. Nuss, U. Wedig, W. Xie, P. Yordanov, J. Bruin, R. Hbner, A. Weidenkaff, and H. Takagi: PhosphideTetrahedrite $Ag_6Ge_{10}P_{12}$: Thermoelectric Performance of a Long-Forgotten Silver-Cluster Compound, Chem. Mater. **29**, 6956 (2017).

[6] S. Mor, M. Herzog, D. Gole, P. Werner, M. Eckstein, N. Katayama, M. Nohara, H. Takagi, T. Mizokawa, C. Monney, and J. Sthler: Ultrafast Electronic Band Gap Control in an Excitonic Insulator, Phys. Rev. Lett. **119**, 086401 (2017).

[7] L. S. I. Veiga, M. Etter, K. Glazyrin, F. Sun, C. A. Escanhoela, G. Fabbris, J. R. L. Mardegan, P. S. Malavi, Y. Deng, P. P. Stavropoulos, H.-Y. Kee, W. G. Yang, M. van Veenendaal, J. S. Schilling, T. Takayama, H. Takagi, and D. Haskel: Pressure tuning of bond-directional exchange interactions and magnetic frustration in the hyperhoneycomb iridate β-Li_2IrO_3, Phys. Rev. B **96**, 140402 (2017).

[8] S. Bette, T. Takayama, K. Kitagawa, R. Takano, H. Takagi, and R. E. Dinnebier: Solution of the heavily stacking faulted crystal structure of the honeycomb iridate $H_3LiIr_2O_6$, Dalton Trans. **46**, 15216 (2017).

[9] H. Tanida, K. Kitagawa, N. Tateiwa, M. Sera, and T. Nishioka: Pressure studies on the antiferromagnetic Kondo semiconductor $Ce(Ru_{1-x}Rh_x)_2Al_{10}$ ($x = 0, 0.1$), Phys. Rev. B **96**, 235131 (2017).

[10] N. Doiron-Leyraud, O. Cyr-Choinire, S. Badoux, A. Ataei, C. Collignon, A. Gourgout, S. Dufour-Beausjour, F. F. Tafti, F. Lalibert, M.-E. Boulanger, M. Matusiak, D. Graf, M. Kim, J.-S. Zhou, N. Momono, T. Kurosawa, H. Takagi, and L. Taillefer: Pseudogap phase of cuprate superconductors confined by Fermi surface topology, Nat. Commun. **8**, 2044 (2017).

[11] J. Sugiyama, H. Nozaki, I. Umegaki, K. Miwa, W. Higemoto, E. J. Ansaldo, J. H. Brewer, H. Sakurai, M. Isobe, H. Takagi, and M. Mnsson: Magnetism of the A-site ordered perovskites $CaCu_3Cr_4O_{12}$ and $LaCu_3Cr_4O_{12}$, Phys. Rev. B **97**, 024416 (2018).

[12] O. Cyr-Choinire, R. Daou, F. Lalibert, C. Collignon, S. Badoux, D. LeBoeuf, J. Chang, B. J. Ramshaw, D. A. Bonn, W. N. Hardy, R. Liang, J.-Q. Yan, J.-G. Cheng, J.-S. Zhou, J. B. Goodenough, S. Pyon, T. Takayama, H. Takagi, N. Doiron-Leyraud, and L. Taillefer: Pseudogap temperature T^* of cuprate superconductors from the Nernst effect, Phys. Rev. B **97**, 064502 (2018).

[13] K. Kitagawa, T. Takayama, Y. Matsumoto, A. Kato, R. Takano, Y. Kishimoto, S. Bette, R. Din-

nebier, G. Jackeli, and H. Takagi: A spinorbital-entangled quantum liquid on a honeycomb lattice, Nature **554**, 341 (2018).

(修士論文)

[14] 根岸真通: ペロブスカイト型 (Sr, Ca)IrO_3 薄膜におけるディラックノード電子の相制御 (Phase control of Dirac-node electrons in perovskite-type (Sr, Ca)IrO_3 thin films)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[15] N. Hiraoka: Electronic phase control of $SrIrO_3$ with Dirac line nodes, (JSPS Core-to-Core Workshop on Novel Quantum and Functional Materials -Design and Sysnthesis-, Max Planck Institute for Solid State Research, Stuttgart, Germany, Aug. 7, 2017).

[16] M. Negishi, N. Hiraoka, D. Nishio-Hamane, H. Ohsumi, H. Takagi: Dirac Semimetal-Magnetic Insulator Transition in Perovskite $A\mathrm{Ir}_{1-x}\mathrm{Sn}_x\mathrm{O}_3$ Thin Films ($A = \mathrm{Ca}, \mathrm{Sr}$), (Yamada Science Foundation Junjiro Kanamori Memorial International Symposium - New Horizon of Magnetism -, 東京大学本郷キャンパス（東京）, Sep. 28, 2017).

[17] Y. Hayashi, K. Kitagawa, S. Sasaki, T. Takayama, H. Takagi: High-pressure phase diagram by NMR study on hyperhoneycomb β-Li_2IrO_3, (Max Plank-UBC-UTokyo School - Elementary Excitations in Quantum Materials -, 東京大学本郷キャンパス（東京）, Feb. 15, 2018).

[18] M. Negishi, N. Hiraoka, D. Nishio-Hamane, H. Ohsumi, H. Takagi: Phase control of Dirac node electrons in perovskite-type (Sr, Ca)IrO_3 thin films, (Max Plank-UBC-UTokyo School - Elementary Excitations in Quantum Materials -, 東京大学本郷キャンパス（東京）, Feb. 17, 2018).

[19] S. Suetsugu, K. Kitagawa, K. Hayama, A. W. Rost, C. Mhle, J. Nuss, H. Takagi: Three-dimensional massive Dirac electrons in Sr_3PbO antiperovskite, (Max Plank-UBC-UTokyo School - Elementary Excitations in Quantum Materials -, 東京大学本郷キャンパス（東京）, Feb. 17, 2018).

[20] Y. Hayashi, K. Kitagawa, S. Sasaki, T. Takayama, H. Takagi: High-pressure phase diagram by NMR study on hyperhoneycomb β-Li_2IrO_3, (The 18th Taiwan-Japan-Korea Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (TJK18), Caesar Park Hotel, Kenting, Taiwan, Feb. 23, 2018).

[21] K. Kitagawa, T. Takayama, Y. Matsumoto, Y. Kishimoto, R. Takano, H. Takagi: Quantum Liquid of Honeycomb Iridate, (The 18th Taiwan-Japan-Korea Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (TJK18), Caesar Park Hotel, Kenting, Taiwan, Feb. 23, 2018).

[22] M. Negishi, N. Hiraoka, D. Nishio-Hamane, H. Ohsumi, H. Takagi: Phase control of Dirac node electrons in perovskite-type (Sr, Ca)IrO_3 thin films, (The 18th Taiwan-Japan-Korea Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (TJK18), Caesar Park Hotel, Kenting, Taiwan, Feb. 23, 2018).

[23] S. Suetsugu, K. Kitagawa, K. Hayama, A. W. Rost, C. Mhle, J. Nuss, H. Takagi: Three-dimensional massive Dirac electrons in Sr_3PbO antiperovskite, (The 18th Taiwan-Japan-Korea Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (TJK18), Caesar Park Hotel, Kenting, Taiwan, Feb. 23, 2018).

招待講演

[24] H. Takagi: Correlated Topological Phases in Complex Ir Oxides, (International Conference on Topological Materials Science 2017 (TopoMat2017), 東京工業大学大岡山キャンパス（東京）, May 12, 2017).

[25] H. Takagi: Quantum Liquid state of J_{eff}=1/2 isospins in complex Ir oxides, (SPICE Workshop on Spin Dyamics in the Dirac Systems, Johannes Gutenberg-University, Mainz, Germany, Jun. 7, 2017).

[26] H. Takagi: Correlated Topological Phases in Complex Ir Oxides, (Gordon Research Conference on “Topological & Correlated Matter: From Fundamentals to New Discoveries”, Hong Kong University of Science and Technology, Kowloon, Hong Kong, China, Jun. 20, 2017).

[27] H. Takagi: Topological quantum spin liquid - “Zen” world, (Competing Interactions and Colossal Responses in Transition Metal Compounds, Telluride Intermediate School, Telluride, USA, Jun. 30, 2017).

[28] H. Takagi: Quantum liquid state of J_{eff}=1/2 isospins in complex Ir oxides, (Beyond! Topology and Materials, Ringberg Castle, Kreuth, Germany, Jul. 10, 2017).

[29] H. Takagi: Spin-orbital entangled quantum spin liquid on honeycomb lattice, (KITP conference on “Order, Fluctuations, and Strong Correlations: New Platforms and Developments”, Kavli Institute for Theoreteical Physics, University of California Santa Barbara, Santa Barbara, USA, Aug. 3, 2017).

[30] H. Takagi: Quantum Liquid state of J_{eff} isospins in complex Ir oxides (Half-Plenary), (28th International Conference on Low Temperature Physics, Gothenburg, Sweden, Aug. 12, 2017).

[31] K. Kitagawa: New J_{eff}=1/2 Quantum Liquid on Honeycomb Lattice, (1st Asia Pacific Workshop on Quantum Magnetism (APWQM 2017), Seoul National University, Seoul, Korea, Aug. 28, 2017).

[32] H. Takagi: Zero-gap semiconductor to excitonic insulator transition in Ta_2NiSe_5, (2018 European Materials Research Society (E-MRS) Fall Meeting, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, Sep. 18, 2017).

[33] H. Takagi: Quantum Liquid state of $J_{\rm eff}$=1/2 isospins in complex Ir oxides, (Junjiro Kanamori Memorial International Symposium New Horizon of Magnetism, 東京大学本郷キャンパス（東京）, Sep. 27, 2017).

[34] N. Hiraoka: Electronic phase control of perovskite $SrIrO_3$ with Dirac line nodes, (Gordon Godfrey Workshop 2017 on Spins and Strong Electron Correlations, University of New South Wales, Sydney, Australia, Oct. 31, 2017).

[35] H. Takagi: Spin-orbit coupling meets with electron correlations - A guided tour to complex iridium oxides -, (Solid State Chemistry Meeting, Nagoya, Japan, Nov. 11, 2017).

[36] K. Kitagawa: Quantum Spin Liquid Phenomena in Honeycomb and Hyperhoneycomb Iridates, (International Workshop on Frontiers of Research in Quantum Materials, Max Planck Institute for Solid State Research, Stuttgart, Germany, Dec. 19, 2017).

[37] K. Kitagawa: Quantum Liquid and Phase Diagram of Honeycomb and Hyperhoneycomb Iridates, (TMS-EPiQS 2nd Alliance Workshop: Topological magnets and topological superconductors, 京都大学北部キャンパス（京都）, Jan. 13, 2018).

[38] H. Takagi: Spin-orbital entangled quantum liquid on honeycomb lattice, (High Temperature Superconductivity Unifying Themes in Diverse Materials, Aspen Winter Conference, Aspen, Colorado, USA, Jan. 16, 2018).

[39] H. Takagi: Exotic spin-orbital entangled state in 4d and 5d transition metal oxides - beyond $J_{\rm eff}$=1/2 physics, (The 18th Taiwan-Japan-Korea Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (TJK18), Caesar Park Hotel, Kenting, Taiwan, Feb. 22, 2018).

(国内会議)

一般講演

[40] 林義之, 北川健太郎, 岸本恭来, 高山知弘, 高木英典: 高圧下量子スピン液体 β-Li_2IrO_3 単結晶の NMR, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学上田キャンパス（岩手）, 2017 年 9 月 21 日.

[41] 根岸真通, 平岡奈緒香, 大隅寛幸, 高木英典: ペロブスカイト型 $AIr_{1-x}Sn_xO_3$ 薄膜 (A = Ca, Sr) の半金属磁性絶縁体相転移, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学上田キャンパス（岩手）, 2017 年 9 月 23 日.

[42] 末次祥大, 北川健太郎, 葉山慶平, A. W. Rost, J. Nuss, C. Muhle, 高木英典: アンチペロブスカイト Sr_3PbO における 3 次元ディラック電子と巨大反磁性, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学上田キャンパス（岩手）, 2017 年 9 月 24 日.

[43] 林義之, 北川健太郎, 佐々木秀, 岸本恭来, 高山知弘, 高木英典: Ultrahigh-pressure NMR and magnetization study on hyperhoneycomb β-Li_2IrO_3, 第 11 回物性科学領域横断研究会, 東京大学柏キャンパス（千葉）, 2017 年 11 月 21 日.

[44] 林義之, 北川健太郎, 佐々木秀, 高山知弘, 高木英典: ハイパーハニカム β-Li_2IrO_3 の NMR・磁化測定による高圧相図, 第 9 回低温センター研究交流会, 2018 年 2 月 20 日.

[45] 根岸真通, 平岡奈緒香, 高木英典: ペロブスカイト型 $SrIr_{1-x}Sn_xO_3$ 薄膜の電子状態と弱強磁性, 日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学野田キャンパス（千葉）, 2018 年 3 月 23 日.

[46] 山村凌平, 平岡奈緒香, 高木英典, 浜根大輔: ダブルペロブスカイト型 La_2MgRuO_6 薄膜の成長条件と輸送特性, 日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学野田キャンパス（千葉）, 2018 年 3 月 23 日.

[47] 林義之, 北川健太郎, 佐々木秀, 岸本恭来, 高山知弘, 高木英典: ハイパーハニカム β-Li_2IrO_3 の NMR・磁化測定による高圧相図, 日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学野田キャンパス（千葉）, 2018 年 3 月 23 日.

[48] 末次祥大, 北川健太郎, 葉山慶平, A. W. Rost, J. Nuss, C. Muhle, 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 における巨大反磁性, 日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学野田キャンパス（千葉）, 2018 年 3 月 24 日.

招待講演

[49] 北川健太郎: ハニカム・ハイパーハニカム Ir 酸化物のスピン液体物性, 科学研究費補助金 基盤研究 (A) 研究会「第二回 量子スピン液体研究の新展開」, 東京大学本郷キャンパス（東京）, 2017 年 12 月 15 日.

[50] 高木英典: ハニカム格子上のスピン軌道量子液体, 日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学野田キャンパス（千葉）, 2018 年 3 月 22 日.

(コロキウム)

[51] H. Takagi: Excitonic insulator transition and Superconductivity in Ta_2NiSe_5, (Colloquium, National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan, Jan. 26, 2018).

プレスリリース

[52] 北川健太郎, 高木英典: スピン-軌道量子液体の発見, http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/info/5772/, 2018 年 2 月 15 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物理の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。

最近、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 2017 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 スピン流生成とその物性

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。スピン流を生成するには、様々な手法が提案・確認されています。とりわけ、電流をスピン流に変換するスピンホール効果は、隣接する強磁性体の磁化を操作できるだけのスピン流を生成できるため、注目されています。また、最近では熱や光、機械振動などからスピン流を取り出す実験や理論の報告が行われており、その物理解明に関する研究が盛んに行われています。

スピンネルンスト効果の観測

非磁性材料において、熱流をスピン流に変換する「スピンネルンスト効果」の存在を明らかにするため、実験を行いました。強磁性体に熱流を印加すると電流が誘起される「異常ネルンスト効果」は古くから知られており、さらに最近では強磁性体において熱流をマグノンスピン流に変換する「スピンゼーベック効果」が存在することが明らかになってきました。一方、非磁性体におけるスピンネルンスト効果は理論的提唱はあったものの、実験的な観測が難しく、課題とされてきました。

スピンネルンスト効果の有無を明らかにするため、試料に温度勾配を印加し、熱流がスピン流に変換される際に発生する起電力を調べました (図 4.7.1 参照)。温度勾配を印加することで発生する様々な熱起電力の影響を除外するため、外部磁場を印加して起電力測定を行い、発生する起電力と外部磁場の向きや大きさの関係から切り分けを行いました。その結果、スピン軌道相互作用が大きい非磁性金属のタングステン (W) で、スピンネルンスト効果に由来する起電力を観測することに成功しました [3]。熱流から生成されるスピン流は、スピンホール効果によって電流から生成されるスピン流と比較して、生成効率はほぼ同じでしたが、スピンの向きが逆向きでありました。これらの結果はフェルミ面近傍の電子が電流や熱流で駆動される際、スピン流生成への関与の仕方が異なっていることを示すものであります。スピンネルンスト効果が実証されたことにより、フェルミ面の状態密度が小さい電気伝導が悪い非磁性物質でもスピン流を生成できることが示唆されます。特に、ディラック型の電子構造を持つ 2 次元層状構造において大きなスピン流を生成できる可能性があり、今後の研究推進が期待されます。

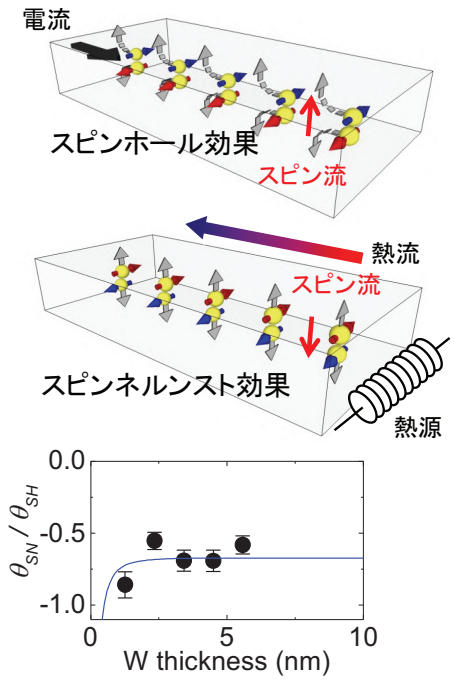


図 4.7.1: スピンホール効果 (上) とスピンネルンスト効果 (中) によってスピン流が生成される様子を模式的に表した図。熱流によって移動する電子が生成するスピン流は、電流によって移動する電子が生成するスピン流と逆向きであった。(下) スピンネルンスト効果とスピンホール効果のスピン流生成効率の比。符合が負となっているのは、生成されるスピン流が逆向きであることを意味している。スピン流生成効率の比と符合は W 層の膜厚に大きく依存しない。実線は理論曲線。

4.7.2 光-スピン変換

重い遷移金属やヘテロ構造の界面では大きなスピン軌道相互作用が発現し、スピンホール効果やジャロシンスキー守谷相互作用など、スピン軌道相互作

用に起因する現象 (総称して「スピン軌道効果」) が誘起されます。これらの現象を利用して、効率的な電流駆動磁化制御技術の研究が盛んに行われています。しかし、各効果の発現機構には未解明な部分が多く、課題となっています。当研究室では様々なスピン軌道効果とそれらの相関を体系的に評価できる光解析技術を構築を行っています。スピン流やスピン蓄積がスピントルクに変換される仕組みや、ジャロシンスキー守谷相互作用の起源を磁気光学測定などを利用して明らかにすることを目指して研究を推進しています。

干渉効果を利用した磁気光学効果の増幅作用

薄膜ヘテロ構造の光解析技術を構築するため、ヘテロ構造の磁気光学特性を調査しました [4]。シリコン上に熱酸化膜 (SiO_2) を堆積した基板に、厚さ 1 nm の強磁性超薄膜とキャップ層を成膜し、可視光領域での Kerr 回転角と楕円率を測定しました。その結果、シリコン上に熱酸化膜がほとんどない試料では磁気光学応答が観測されませんでした。熱酸化膜の厚みを大きくしていくと、回転角、楕円率ともその絶対値が増加し、一定の膜厚でピークを取ることがわかりました。また、ピークを取る熱酸化膜の膜厚は、入射光の波長に依存していることが明らかになりました。これらの結果を仮想屈折率法を用いて計算したところ、熱酸化膜内で光の多重反射が起きることによる干渉効果の影響で、一定の膜厚で磁気光学応答がピークを取ることがわかりました (図 4.7.2 参照)。1 nm の強磁性超薄膜に可視光領域の光を照射してもほとんどの光は透過してしまうため、通常 Kerr 効果はほとんど観測できませんが、基板の熱酸化膜における多重反射を利用することで、Kerr 回転角や楕円率を増幅し、そのスペクトル測定を精度良く行えることがわかりました。精緻な磁気光学応答のスペクトル測定を通して、今後はヘテロ構造界面のスピン軌道相互作用を調べることが期待されます。

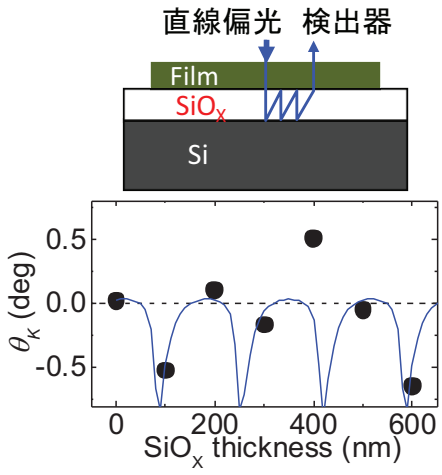


図 4.7.2: (上) Si/SiO_2 基板の上に強磁性超薄膜 (1 nm CoFeB) を積層した系に可視光領域の光を照射し、磁気光学応答を調べた模式図。SiO_2 の中で多重反射が起きるため、干渉効果によって Kerr 回転角や楕円率などの磁気光学応答が増幅される。(下) 波長が 500 nm の光に対する Kerr 回転角の SiO_2 層膜厚依存性 (黒丸: 実験結果、青線: 多重反射を考慮した計算結果)。SiO_2 層の膜厚が波長の整数倍になった時 (正確には波長の整数倍に SiO_2 の屈折率の逆数をかけた値になった時)、Kerr 回転角は最大となる。

＜報文＞

(原著論文)

[1] C. Abert, H. Sepehri-Amin, F. Bruckner, C. Vogler, M. Hayashi, D. Suess, Fieldlike and Dampinglike Spin-Transfer Torque in Magnetic Multilayers. Phys. Rev. Appl. 7, 054007 (2017).

[2] Y.-C. Lau, M. Hayashi, Spin torque efficiency of Ta, W, and Pt in metallic bilayers evaluated by harmonic Hall and spin Hall magnetoresistance measurements. Jpn. J. Appl. Phys. 56, 0802B5 (2017).

[3] P. Sheng, Y. Sakuraba, Y.-C. Lau, S. Takahashi, S. Mitani, M. Hayashi, The spin Nernst effect in tungsten, Science Advances 3, e1701503 (2017).

[4] S. Sumi, H. Awano, M. Hayashi, Interference induced enhancement of magneto-optical Kerr effect in ultrathin magnetic films. Scientific Reports 8, 776 (2018).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[5] Y.-C. Lau, H. Lee, M. Hayashi, Unexpected strong spin Hall effect in heavy-element-free paramagnetic CoGa, IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG), 4/25/2017, Convention Centre, Dublin, Ireland.

[6] Y.-C. Lau, H. Lee, M. Hayashi, Spin-orbit torques and spin Hall magnetoresistance in antiferromagnetic hexagonal ϵ-Mn_3Ga/CoFeB bilayers, IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG), 4/27/2017, Convention Centre, Dublin, Ireland.

[7] Y.-C. Lau, P. Sheng, S. Mitani, D. Chiba, M. Hayashi, Electric field modulation of the non-linear areal magnetic anisotropy energy in CoFeB/MgO, IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG), 4/28/2017, Convention Centre, Dublin, Ireland.

招待講演

[8] M. Hayashi, Spin Orbit Effects in Metallic Heterostructures, Gordon Research Conference -Spin Dynamics in Nanostructures, 7/20/2017, Les Diablerets, Switzerland.

[9] M. Hayashi, Spin Hall magnetoresistance and spin orbit torques in metallic heterostructures, SPIE Spintronics XI, 8/6/2017, San Diego, USA.

[10] M. Hayashi, Spin transport and magnetism in metallic superstructures, 15th RIEC International Workshop on Spintronics, 12/13/2017, Sendai, Japan.

[11] M. Hayashi, Current spin conversion in spin orbit materials, Workshop of the Max Planck - UBC - University of Tokyo in Stuttgart, 12/20/2017, Stuttgart, Germany.

(国内会議)

一般講演

[12] Z. Chi, G. Shibata, S. Sakamoto, Y. Nonaka, K. Ikeda, Y. Wan, M. Suzuki, N. Kawamura, M. Mizumaki, M. Suzuki, M. Sakamaki, K. Amemiya, Y.-C. Lau, M. Hayashi, A. Fujimori, Orbital magnetic moment of heavy metals in Co-heavy metal heterostructures studied by x-ray magnetic circular dichroism, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017 年 9 月 5 日, 福岡国際会議場, 福岡.

[13] 河口真志, 戸波大希, 林将光, スピンホール磁気抵抗効果の強磁性層依存性, 第 72 回日本物理学会秋季大会, 2017 年 9 月 22 日, 岩手大学, 盛岡.

[14] 石黒雄人, 河口真志, 林将光, 強磁性多層膜におけるジャロシンスキー磁壁の抵抗, 第 72 回日本物理学会秋季大会, 2017 年 9 月 22 日, 岩手大学, 盛岡.

[15] 河口真志, 大森康智, 木俣基, 大谷義近, 林将光, 非局所スピンバルブを用いたタングステンスピン伝導特性, 第 72 回日本物理学会秋季大会, 2017 年 9 月 22 日, 岩手大学, 盛岡.

[16] 丸井幸博, 河口真志, 林将光, スピン軌道トルクの光学測定, 第 73 回日本物理学会年次大会, 2018 年 3 月 22 日, 東京理科大学, 野田.

[17] 石黒雄人, 河口真志, 林将光, 強磁性多層膜における電流誘起高密度ストライプ型多磁区構造の生成, 第 73 回日本物理学会年次大会, 2018 年 3 月 23 日, 東京理科大学, 野田.

招待講演

[18] 林 将光, 薄膜ヘテロ構造におけるカイラル磁気構造とその制御, 第 41 回日本磁気学会学術講演会, 9/19/2017, 九州大学伊都キャンパス.

[19] 林 将光, 薄膜ヘテロ構造におけるカイラル磁気構造とその制御, 東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究会, 1/26/2018, 東北大学電気通信研究所.

(セミナー)

5　一般物理理論

5.1　宇宙理論研究室 (須藤・吉田)

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

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

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

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

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

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

5.1.1　観測的宇宙論

強い重力レンズ系の解析

アルマ望遠鏡で重力レンズ系 SDP.9 を観測しその観測画像を再現する質量モデルの構築を行った。[6] 重力レンズクエーサーの分光データの詳細解析から吸収線を引き起こすガスの物理的性質を調べた。[20, 47] $z \approx 2.5$ の重力レンズを受けた銀河の解析からそのサイズなどを調べた。[45]

Hubble Frontier Field データを用いた遠方銀河の研究

銀河団の重力レンズ増光を利用して遠方銀河の性質を調べるプロジェクト Hubble Frontier Field の解析を引き続き行った。我々の質量モデル構築の精度をシミュレーションデータでチェックした結果、他の世界の競合グループに比べて我々の質量モデルがもっとも精確であることがわかった。[22] この精確な質量マップを用いて、6 つの銀河団のデータに対し系統的な解析を行った結果、$z \sim 6 - 11$ の暗い銀河が宇宙の再電離を引き起こしたことを支持する結果を得た。[49] また遠方銀河の光度関数の測定において銀河のサイズが極めて重要な役割を果たすことを指摘し、銀河の光度関数とサイズの同時測定を行った。[52]

Hyper Suprime-Cam サーベイの初期成果

すばる望遠鏡に搭載された広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) によって進行中の HSC サーベイの初年度の成果を出版した。[24, 25, 26, 27, 31, 34, 35, 36, 37, 38] 代表的な成果として、$z \sim 6$ の銀河の光度関数の精密測定 [28, 29]、$z \sim 1$ までの可視銀河団サンプルの構築 [30] と銀河団銀河進化の研究 [21, 32, 33]、これまでで最大の三次元重力レンズ質量マップの作成 [35] と重力レンズで選ばれた銀河団サンプルの構築 [36]、多数の遠方クエーサーの発見とその統計的性質の研究 [39, 40, 41, 42, 122, 146]、などがある。

超高増光率重力マイクロレンズの理論解釈

銀河団中心部で背後の単独の星が増光され観測される現象が最近発見されたが、その現象の解釈を簡単な理論モデルを用いて行った。その結果増光された星は太陽の 200 倍程度の半径の青色超巨星であること、重力レンズを引き起こした星は銀河団の intracluster light に付随する普通の星で説明できることを見出した。また銀河団内のコンパクト天体の数密度と最大増光率の関係に着目し、観測から太陽の数十倍の質量をもつブラックホールがダークマターの質量の大半を担うモデルを棄却できることがわかった。[43]

銀河団の質量・メンバー数関係の精密決定

多数の銀河団の背景にある銀河の像をスタック解析すると、前景銀河団による重力レンズ効果を通じて、銀河団平均質量を決定することができる。また、宇宙論模型を仮定すれば、銀河団計数でサンプルの質量をある程度推定することができる。そこで、我々は多数の数値シミュレーションから決定した銀河団重力レンズ効果と銀河団の質量関数の理論テンプレートを用いて、SDSS から同定した redMaPPer 銀河団カタログのメンバー銀河数と銀河団質量の関係を調査した。その結果、特にメンバー数が少ない銀河団において、統計的有為な大分散があることを示した。その原因として、このような銀河団には射影効果により実際にはメンバーではない銀河が多く混入している可能性を指摘した。[50]

新たなバリオン音響振動抽出法の開発と検証

宇宙の膨張則を制限する強力な手段と考えられているバリオン音響振動 (BAO) の特徴は、宇宙論的密度揺らぎの弱非線形領域に現れるため、これまで摂動展開に基づいた理論予言が成されてきた。ところが、摂動展開の元となる基礎方程式は宇宙流体が単流であるという近似の元で導かれたものであり、小スケールから順次破綻する。しかし、BAO に由来するパワースペクトルの振動成分だけを切り離すと、その進化は摂動展開がロバストに可能な大スケールのバルク運動でほとんど尽きている。そこで、摂動展開の破れに左右されずに BAO 成分のみを抽出する法が提案された。本研究では、数値シミュレーションを用いることでハローバイアスや赤方偏移歪みの影響をも取り入れた状況で、上記の BAO 抽出法の性能を評価した。その結果、我々の方法は BAO の特徴的スケールを 0.1% の精度で正確に決定できることを実証した。[23]

銀河カウントによる原始揺らぎ非ガウス性の検証

宇宙の密度揺らぎの古典的な解析手法として、観測領域上に無作為に置いた球状の領域に含まれる銀河の数が従う 1 点の確率分布を用いたものがある。より一般にはそのような球を 2 つ以上置いた時の同時確率分布も宇宙論解析に有用と考えられる。近年の研究により、この確率分布の端に当たる宇宙のボイドや銀河団領域に対する分布の漸近的構造に基づく理論計算が整備されてきた。我々は宇宙の初期条件の分布関数に僅かな非ガウス性が存在するシナリオに対してこの解析を拡張し、数値シミュレーションにより検証を行った。その結果、観測的に興味のある領域において理論計算とシミュレーションが悪くとも 2% の精度でよく一致することを示した。また、これを用いて将来観測から原始揺らぎの非ガウス性を検出する可能性について定量的に議論を行った。[53]

宇宙の密度揺らぎのハイブリッド計算法

宇宙論的揺らぎの重力非線形進化は、フーリエ空間で見ると大小様々な波数の波の間のモード輸送として定式化される。このモード輸送の構造を数値シミュレーションから詳しく解析すると、大スケールから小スケールへと流れるモード輸送が常に卓越しており、逆方向の輸送は抑制されることが示された。一方で、この構造を揺らぎの摂動展開に則って計算すると、小スケールから大スケールへのモード輸送は抑制されないため、まさにここが展開の破れを指し示すものと考えることができる。そこで、我々は摂動展開が有効な領域に限り摂動展開を用い、これが破れるところではシミュレーションの結果に収束するようなハイブリッド計算法を構築した。そして、これを用いることで、宇宙の密度揺らぎの非線形進化を高速かつ正確に計算する手法を構築した。[19]

弱重力レンズ共分散行列の決定

データ共分散行列は宇宙論的揺らぎの統計解析の重要なピースの 1 つである。我々は全天をカバーする 108 もの弱重力レンズシミュレーションを実行した。加えて、同じシミュレーションセットから重い銀河に対応する暗黒物質ハローを同定することで、重力レンズ効果と銀河クラスタリングとの同時解析にかかる共分散行列の推定を可能とした。さらに、このカタログから実際の観測を想定した小領域を切り出し、実行的に多数の模擬観測データを作り、実際に共分散行列を評価した。この結果と、よく用いられるジャックナイフ法による共分散行列推定とを比較することで、後者の推定には大きな分散があること、及び、大きな角度スケールにおいて系統的に共分散を低く見積もってしまうことを実証した。[17, 12]

点過程の相関関数高速測定アルゴリズムの開発

空間上に散らばった点列の 2 点相関関数の測定は、宇宙論的揺らぎの統計解析において最も基本的な操作の 1 つであるが、点の数の 2 乗に比例して計算コストが増大する。しかし、実際にはある距離の範囲に含まれるペアの数にしか興味がないことがほとんどであるため、この計算コストは低減可能である。そこで、我々は CPU に最適化した sort-tile-recursive-R 木という手法を用いて点分布をソートしたうえで索引を構築し、定められた距離範囲に該当する点のペアを効率よく取得する方法を実装した。これを、シミュレーションから構築した重い銀河とその周りの暗黒物質の間の 2 点相関関数測定に応用したところ、従来技法に比べて 27.5 倍高速に実行できることを確認した。[67]

スーパーエディントン降着とクェーサークラスタリング

高赤方偏移で発見されている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 (SEA) によるブラックホール成長が提案されている。我々は、SEA 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。SEA 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。SEA 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。さらに、このモデルから得られる明るいクェーサーのバイアスは観測結果とよく一致する。我々の結果は、クェーサークラスタリングの観測か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。[15]

宇宙論的 N 体シミュレーションを用いた銀河団銀河の星形成率のモデル化

銀河団においては、銀河団中心に近いほど星形成活動の不活発な銀河の割合 (quenched fraction) が大きく、銀河団外縁部では星形成活動の活発な銀河の割合が大きいことが観測から分かっている。しかし、既存の銀河形成モデルでは、その動径分布を説明することが困難であることが知られている。我々は、宇宙論的 N 体シミュレーションから得られるダークマターハローの質量集積史と、観測から得られる星質量関数、specific star formation rate (sSFR) 分布を用いて、ダークマターハロー質量と銀河の星質量及び sSFR の三者を関係づけるモデルを構築した。モデルから得られる全銀河の二点相関関数、sSFR ごとの銀河の二点相関関数は、観測をよく再現する。さらに我々は、sSFR とダークマターハローの新たな対応づけを導入することにより、観測される銀河団銀河の quenched fraction を説明できることを見出した。[152, 170, 171, 205]

矮小銀河における暗黒物質密度分布

矮小銀河における暗黒物質の分布形状の決定は、未だ残された天文学の大きな問題である。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を行っている。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 計算と組み合わせて多数回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。

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。両者は明らかに異なる構造であるにも関わらず共にトゥームレ不安定で形成されると議論されている。本研究は、これとは異なる形成メカニズムとして、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。さらに、不安定性解析の線形摂動理論を発展させ、磁気流体の円盤系に適応できるようにした。[54]

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。近年、 ALMA 望遠鏡による高感度かつ高分解能のミリ波・サブミリ波の観測により、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 [8] [44] [124]。

我々は遠方輝線銀河のブラインドサーベイを行い、候補天体を 2 天体検出することに成功した。現在、検出した輝線の種類を確定するための追観測が行われている。また、構築した輝線探査法を自動化し、膨大なアルマ望遠鏡のアーカイブデータを用いた探査を行う計画が勧められている。この計画は、ヨーロッパ南天文台の研究者らと共同で行われている [98] [200]。

弱重力レンズ効果と熱的スニャエフ・ゼルドビッチ効果の相関解析

重力レンズ効果と thermal Sunyaev-Zel'dovich (tSZ) 効果という観測量を組み合わせ、宇宙論パラメータの制限や銀河団ガスの熱的状態を探る研究を行った。重力レンズ像の歪み具合を用いることで、視線方向にある物質分布を探ることが可能である。tSZ 効果とは CMB の光子が銀河団などに存在する高温のガスを通過するうちに、自由電子との逆 Compton 散乱によってエネルギーを獲得し、CMB の温度にさらなる異方性が生じる効果である。tSZ 効果は宇宙のガス分布を反映しており、宇宙論パラメータ、特に密度ゆらぎの振幅に非常に敏感であることが知られている。質量分布を反映する重力レンズ効果と、ガスの密度に関係する tSZ 効果の二つを相関解析することで、銀河団のガスの熱的状態を調べ、銀河団中でどれだけ乱流由来の圧力が存在するか、またその存在が tSZ 効果を用いた宇宙モデルの制限に対し影響を及ぼすか研究を行った。[58]

銀河団の動力学質量の推定

銀河団の質量を測定する手法の一つに、メンバー銀河の運動を利用するものがあるが、銀河の運動と銀河団質量の関係は未だに十分には理解されていないためこの手法での銀河団質量の精密な測定は困難である。我々は、銀河団周辺の銀河の運動をより正確に理解するために、ダークマターのみの N 体シミュレーションを用い銀河団周辺のダークマターハローの運動を解析した。[77]

遠方銀河におけるサブミリ輝線強度の解析

ALMA 望遠鏡によって、サブミリ波を用いた遠方銀河の検出と物理状態の理解が可能になってきている。我々は、宇宙論シミュレーションに密度一定の場合の電離領域モデルを適用して、波長 88 ミクロンの OIII 輝線で明るい銀河の物理的性質を探った。OIII 輝線強度と星形成率には近傍銀河と同様の正の相関が見られた。また、OIII 輝線銀河の空間分布には相関があり、輝線観測による遠方宇宙における大規模構造の観測可能性が示された。銀河内の輝線放射領域はクランプを形成しており、銀河回転によってスペクトルにダブルピークが見られることあることがわかった。

5.1.2 系外惑星

星震学を用いた恒星の自転傾斜角測定における系統誤差の体系的評価

星震学の枠組みの中では、観測データから作られたパワースペクトルの解析を通じて我々から見た恒星の自転傾斜角を測定することが可能であり、これをトランジット惑星を保有する系に適用することで恒星の自転と惑星の軌道の方向の関係を推定することができる。しかし自転が遅いなど恒星のある特定の条件下ではその測定が正確ではない可能性が指摘されている。我々はシミュレーションを通して様々な条件 (恒星の自転速度、S/N、観測時間など) の元で自転傾斜角測定の精度と確度を調べ、正確な測定に必要な条件を体系的に明らかにした。また実際にケプラー宇宙望遠鏡で観測された恒星に対し自転傾斜角測定を行い、特に結果の信頼性が高い恒星に関しては、分光観測など他の観測から見積もられた結果と概してよく一致していることを確認した。[84, 93, 140]

太陽系外惑星リングの系統的探索

Kepler 衛星の高精度測光データを用いて、太陽系外惑星リングの系統的な探索をおこなった。まず、全ての惑星とその候補の中から、土星の輪が存在すれば検出できる光度曲線を持つ 168 の系を選んだ。次に、光度曲線を適切に処理したのちに、惑星食モデルおよびリング付き惑星食モデルでそれぞれのデータを解釈した。結果として、29 の系にてリングモデルが統計的に有意であることが判明した。そこで、それらの系については、さらなる個別な議論をおこない信号の原因特定をおこなった。そして、詳細な議論ののち、その中で惑星リング由来でありそうなものは一つもないと結論づけた。信号が有意にうからなかった系に対しては惑星リングのサイズへの上限を与えた。加えて、この上限の値を用いて、例えば太陽系外惑星が土星サイズのリングをもつ確率が 15%以下であることなどを示した。

雲の影響を考慮した系外惑星の光度曲線解析

将来の直接撮像によって系外地球型惑星の表層を知るために、点光源としての惑星からいかに情報を引き出すかは重要な問題である。惑星の表面が非一様な場合に反射光が自転公転に伴って時間変動することを用いた方法論が研究されてきたが、気候力学に基づいた雲の影響は取り入れられてこなかった。我々は 3 次元大気大循環モデルを用いて自転傾斜角が異なる地球の雲構造を表現し、観測シミュレーションを行った。この光度曲線データに周波数変調から自転傾斜角を推定する方法論を適用した結果、砂漠のような少雨地域が周期的に観測される特殊なケースに限り、同様の推定が可能であると示唆された。[78, 169]

5.1.3 星・ブラックホール形成

宇宙初期の超音速流とブラックホール形成

初代天体形成の宇宙論的流体シミュレーションを行った。宇宙初期に存在したバリオン超音速流を再

現した初期条件から計算を開始すると、流速が大きな領域では始源ガス雲の形成が遅れ、1000 万太陽質量程度のダークハローができてはじめてガスが凝縮をはじめる。ハローの中心で形成された分子ガス雲には強い乱流が引き起こされ、中心には巨大な原始星ができる。原始星進化の後に最終的には数万太陽質量のブラックホールが残されることを示した [13]。

第一及び第二世代星の化学的進化

半解析モデルを用いて、mono-enriched な第二世代星に特徴的な化学的痕跡を調べ、その結果が第一原理から解析的に再現できることを示した。 現在は、得られた結果を、TOPoS サーベイで新たに発見された極端に金属量の少ない星に適用することを行なっている。次のステップとしては、moving-mesh コード Arepo を用いたシミュレーションを行うことで、初代超新星による金属濃縮の過程を調べることを考えている。

始原高密星団中での星の暴走的衝突による種 BH 形成

初期宇宙の超巨大 BH の種となる BH が形成される過程として高密星団中での星の暴走的衝突合体が考えられる。この過程による宇宙論的に一貫した研究は少なく、モデルの是非を数値シミュレーションで直接的に示した例は Katz et al. (2015) の 1 例のみであり、モデルの有効性に議論の余地がある。特に Katz et al. (2015) ではミニハロー内で形成される星団にのみ着目していたため、より重い原始冷却ハローで形成される星団において星の暴走的衝突が起きるか否かは明らかになっていない。本研究では、宇宙の初期密度ゆらぎから原始冷却ハローができ、高密星団ができて大質量星・種 BH が形成するまでの過程を、宇宙論的シミュレーションと星団力学の N 体シミュレーションを組み合わせて追った。結果、宇宙論的シミュレーションで同定した 8 個の原始冷却ハロー内それぞれで生成される星団全てにおいて星の暴走的衝突が起こることを示し、大質量星・種 BH が確からしく形成されることを示した。

初期宇宙における超大質量星形成

$z > 6$ での多くの超大質量ブラックホール (SMBH) が見つかっており、Direct collapse と呼ばれる形成機構が注目されている。宇宙初期に $10^5\ M_\odot$ の星 (SMS) ができ、その残骸 BH への降着によって SMBH が形成される。この SMS 形成を調べるべく、流体計算を行った。具体的に、SMS を形成し得るガス雲を 2 つ同定しガス雲の崩壊、原始星の形成、成長過程を追う。結果、ガス雲周辺の環境が星の質量進化に大きく影響することがわかった。特にガス雲の近傍に大質量銀河が存在するとき、ガス雲は銀河からの潮汐力によってフィラメント状に引き伸ばされ激しく分裂した。星の質量は予想より一桁ほど小さい値になる。一方、潮汐力の影響が小さいガス雲では激しい分裂は見られず $10^5\ M_\odot$ の星が形成し得る。以上は宇宙で SMS が形成されることを初めて示した例であるとともに、雲の周辺環境の重要性を示す。[60]

星周円盤での分裂片の形成とその migration 過程

近年 aLIGO などにより BH 連星合体が観測された。形成機構として、星周円盤の自己重力による分裂が考えられる。この過程は数値計算により調べられているが、手法により連星の性質 (連星率、連星間距離) が異なることが問題となっている。本研究では、簡単のため回転する BE 球から出発し中心星と星周円盤が形成するまでを追う。次に、円盤に分裂片を模した星粒子を置きその migration 過程を計算する。結果、星粒子の質量が小さい時はガス円盤との相互作用により Type-I 的に migration した。一方、ある質量超えるとほとんど migration せず、separation の大きい連星を形成した。これは、星粒子の重力圏 (Hill 圏) に十分な量のガスを貯めることができるためである。この時円盤ガスは角運動量輸送に寄与せず、分裂片はほとんど migration することができない。

原始惑星系円盤光蒸発の金属量依存性

原始惑星系円盤が生まれてから消失するまでの時間を原始惑星系円盤の寿命という。太陽近傍円盤の寿命が 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 1 百万年以下と、低金属量環境下で円盤寿命が短いことが近年観測的に明らかになった。この観測的傾向の原因として円盤光蒸発が有力視されている。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目的として、輻射流体シミュレーションにより光蒸発率の金属量依存性を明らかにする。本研究結果として、遠紫外線で駆動される光蒸発が円盤寿命の金属量依存性に説明を与え得ることを示した。また、太陽金属量の 100 分の 1 程度以下の極低金属量環境では、円盤寿命が太陽金属量円盤よりも長くなることが示唆される結果を得た。将来は、磁気円盤風や円盤の大局的進化、円盤中のダスト運動等を考慮に入れ、円盤消失過程の研究を遂行する。

流体シミュレーションアルゴリズムの開発

恒星を含む多くの天体現象はガス流体として扱うことができるが、そのモデル化であるオイラー方程式は差分法で精度よく解くことが難しい。その精度を向上させるために、不連続ガラーキン法を使ったコードを開発しテストを行った。その結果、空間 2 次元において、初期条件が連続関数の移流方程式をメッシュの幅について高次の誤差収束で解くことに成功した。空間 1 次元オイラー方程式についても、limiter を取り入れ衝撃波面での発散を抑えることで 1 次精

度であるが差分法よりも高い精度を達成した。また、メッシュを使わないアルゴリズムである transport-collapse 法についての研究も進めており、空間 1 次元のスカラー衝撃波問題について、差分法や不連続ガラーキンでは不可能であった 2 次精度の誤差収束を達成した。

5.1.4 高エネルギー天文現象

超高輝度超新星のマグネターモデルの検証と高速電波バーストの関係

超高輝度超新星を説明するモデルとして中性子星の回転エネルギーを注入する回転エネルギー駆動モデル、いわゆるマグネターモデルが有力である。研究 [51] では、このモデルを検証するために回転エネルギー駆動型超新星爆発に付随する非熱的放射を 10 年に渡るタイムスケールで計算し、ALMA を用いたサブミリ波帯のフォローアップ観測により、超高輝度超新星のマグネターモデルをテストすることができることを示した。また、研究 [3] では、回転エネルギー駆動型超新星の爆発数十年後の残骸放射が、近年発見された謎の突発天体、高速電波バーストの観測的性質をよく説明することを示し、超高輝度超新星と高速電波バーストの間に関連がある可能性を世界に先駆けて指摘した。

回転する超新星におけるニュートリノ分布

大質量星はその最期に超新星爆発を起こす。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、実際二次元以上の計算では爆発する様子が見られる。しかしそれらの計算において、ニュートリノ輸送は近似的なものであり、研究に依って近似手法が違うため結果が異なるという問題がある。そこで多次元において輻射輸送を近似なしに解くボルツマン輻射流体コードを開発し、それを用いて超新星爆発計算を行っている。特に超新星の親星が回転している場合、ニュートリノの運動量空間分布が非常に非自明な分布をするようになり、ニュートリノの運動方向のエネルギー依存性やフラックスの回転成分の空間分布、さらに既存の近似的輻射輸送法の適用限界等を具体的に示した [85, 101, 119, 141, 155, 167]。

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通過する星が、ブラックホールの潮汐力によって破壊される現象を潮汐破壊現象 (TDE) と呼ぶ。白色矮星 TDE の一つ目の特徴は、TDE を起こすことのできるブラックホールの質量が 10^5 太陽質量以下に限定される点である。二つ目は、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である。特に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、軌道要素の多様性に由来するこの現象の多様性について、流体数値シミュレーションを用いて調べた。その結果、本研究で新たに調べられたパラメータ領域である BH 質量が ≤ 100 太陽質量の場合には、白色矮星の先進する部分が後続する部分と自己衝突する特異なパターンが存在することが分かった。この場合は破壊された白色矮星のブラックホールへの降着率が特異になると期待される。また、ヘリウムを主として構成される白色矮星の TDE は Calcium-rich gap transients と呼ばれる突発天体の起源になりうるという提案がなされていたが、本研究により原子核反応後の核組成が Calcium-rich gap transients のそれとは矛盾し、起源にはなりえないことが示された。

＜受賞＞

[1] 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３４回井上研究奨励賞、井上財団、2018 年 2 月 2 日

＜報文＞

(原著論文)

[2] Masato Shirasaki, Kazumi Kashiyama, and Naoki Yoshida: Phys. Rev. D, **95** (2017) 083012

[3] Kazumi Kashiyama and Kohta Murase: ApJ, **839** (2017) L3

[4] Kazumi Kashiyama: ASSL, **446** (2017) 279

[5] Akisato Kimura et al. (incl. Naoki Yoshida): The 37th IEEE International Conference on Distributed Computing (2017)

[6] Kenneth C. Wong et al. (incl. Masamune Oguri): ApJ, **843** (2017) L35

[7] Kohei Hayashi et al. (incl. Shigeki Inoue): ApJ, **843** (2017) 97

[8] Yuki Yamaguchi et al. (incl. Masamune Oguri, Natsuki H. Hayatsu): ApJ, **845** (2017) 108

[9] Yuko Matsushita et al. (incl. Yuya Sakurai): MNRAS, **470** (2017) 1026

[10] Eduard I. Vorobyov et al. (incl. Yuya Sakurai): A&A, **605** (2017) A77

[11] Kunihito Ioka et al. (incl. Kazumi Kashiyama): MNRAS, **470** (2017) 3332

[12] Masato Shirasaki et al. (incl. Takahiro Nishimichi): MNRAS, **470** (2017) 3476

[13] Shingo Hirano et al. (incl. Naoki Yoshida): Science, **68** (2017) 104

[14] Satoshi Tanaka et al. (incl. Naoki Yoshida): ApJ, **849** (2017) 76

[15] Taira Oogi et al. : MNRAS, **471** (2017) L21

[16] Kenta Hotokezaka, Kazumi Kashiyama, and Kohta Murase: ApJ, **850** (2017) 18

[17] Ryuichi Takahashi et al. (incl. Takahiro Nishimichi, Ken Osato): ApJ, **850** (2017) 24

[18] Yuya Sakurai, Naoki Yoshida et al. : MNRAS, **472** (2017) 1677

[19] Takahiro Nishimichi et al. : Phys. Rev. D, **96** (2017) 123515

[20] Suzuka Koyamada et al. (incl. Masamune Oguri): ApJ, **851** (2017) 88

[21] Yen-Ting Lin et al. (incl. Masamune Oguri): ApJ, **851** (2017) 139

[22] Massimo Meneghetti et al. (incl. Masamune Oguri): MNRAS, **472** (2017) 3177-3216

[23] Takahiro Nishimichi et al. : JCAP, **01** (2018) 035

[24] Satoshi Miyazaki et al. (incl. Masamune Oguri): PASJ, **70** (2018) S1

[25] Hiroaki Aihara et al. (incl. Masamune Oguri, Ken Osato, Yasushi Suto): PASJ, **70** (2018) S4

[26] Jean Coupon et al. (incl. Masamune Oguri): PASJ, **70** (2018) S7

[27] Hiroaki Aihara et al. (incl. Masamune Oguri, Yasushi Suto): PASJ, **70** (2018) S8

[28] Yoshiaki Ono, et al. (incl. Masamune Oguri): PASJ, **70** (2018) S10

[29] Akira Konno, et al. (incl. Masamune Oguri): PASJ, **70** (2018) S16

[30] Masamune Oguri et al. : PASJ, **70** (2018) S20

[31] Keita Miyaoka, et al. (incl. Masamune Oguri): PASJ, **70** (2018) S22

[32] Hung-Yu Jian et al. (incl. Masamune Oguri): PASJ, **70** (2018) S23

[33] Atsushi J. Nishizawa, Masamune Oguri, Taira Oogi, et al. : PASJ, **70** (2018) S24

[34] Rachel Mandelbaum et al. (incl. Masamune Oguri): PASJ, **70** (2018) S25

[35] Masamune Oguri et al. : PASJ, **70** (2018) S26

[36] Satoshi Miyazaki, Masamune Oguri et al. : PASJ, **70** (2018) S27

[37] Elinor Medezinski et al. (incl. Masamune Oguri): PASJ, **70** (2018) S28

[38] Alessandro Sonnenfeld et al. (incl. Masamune Oguri): PASJ, **70** (2018) S29

[39] Masafusa Onoue et al. (incl. Masamune Oguri): PASJ, **70** (2018) S31

[40] Wanqiu He et al. (incl. Masamune Oguri, Taira Oogi): PASJ, **70** (2018) S33

[41] Masayuki Akiyama et al. (incl. Masamune Oguri): PASJ, **70** (2018) S34

[42] Yoshiki Matsuoka et al. (incl. Masamune Oguri): PASJ, **70** (2018) S35

[43] Masamune Oguri, Jose M. Diego, Nick Kaiser, Patrick L. Kelly, and Tom Broadhurst: Phys. Rev. D, **97** (2018) 023518

[44] Y. Ueda, B. Hatsukade, K. Kohno et al. (incl. Natsuki H. Hayatsu): ApJ, **853**, (2018) 24

[45] Matthew Cornachione et al. (incl. Masamune Oguri): ApJ, **853** (2018) 148

[46] Mattis Magg, Tilman Hartwig et al. : MNRAS, **473** (2018) 5308-5323

[47] Toru Misawa, Naohisa Inada, Masamune Oguri et al. : ApJ, **854** (2018) 69

[48] Murase Kohta et al. (incl. Kazumi Kashiyama): ApJ, **854** (2018) 60

[49] Masafumi Ishigaki, Ryota Kawamata, Masami Ouchi, Masamune Oguri, Kazuhiro Shimasaku, and Yoshiaki Ono: ApJ, **854** (2018) 73

[50] Ryoma Murata, Takahiro Nishimichi et al. (incl. Ken Osato): ApJ, **854** (2018) 120

[51] Conor M. B. Omand, Kazumi Kashiyama, and Kohta Murase: MNRAS, **474** (2018) 573

[52] Ryota Kawamata, Masafumi Ishigaki, Kazuhiro Shimasaku, Masamune Oguri, Masami Ouchi, and Shingo Tanigawa: ApJ, **855** (2018) 4

[53] Cora Uhlemann et al. (incl. Takahiro Nishimichi): MNRAS, **474** (2018) 2853

[54] Shigeki Inoue and Naoki Yoshida: MNRAS, **474** (2018) 3466

[55] Matt Hilton et al. (incl. Masamune Oguri): ApJS, **235** (2018) 20

[56] Shingo Hirano, Naoki Yoshida, Yuya Sakurai, and Michiko S. Fujii: ApJ, **855** (2018) 17

[57] Matsushita Yuko, Yuya Sakurai, Takashi Hosokawa, and Masahiro N. Machida: MNRAS, **475** (2018) 391

[58] Ken Osato et al. (incl. Naoki Yoshida): MNRAS, **475** (2018) 532

[59] Masato Shirasaki and Naoki Yoshida: MNRAS, **475** (2018) 1665

[60] Sunmyon Chon, Takashi Hosokawa, and Naoki Yoshida: MNRAS, **475** (2018) 4104-4121

[61] Rodrigo Fernández, Eliot Quataert, Kazumi Kashiyama, and Eric R. Coughlin: MNRAS, **476** (2018) 2366

[62] Riouhei Nakatani, Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida, Hideko Nomura, and Rolf Kuiper: ApJ, (2018) in press

(国内雑誌)

[63] 須藤 靖: “この空のかなた　１３８億年の旅”, 高知新聞　朝刊連載 2017 年 4 月 8 日, 5 月 13 日, 6 月 10 日, 7 月 8 日, 8 月 12 日, 9 月 9 日, 10 月 14 日, 11 月 11 日, 12 月 9 日, 2018 年 1 月 13 日, 2 月 10 日, 3 月 10 日

[64] 須藤 靖: “物理学とテンソル - 一般相対論を例として”, 数理科学 **647** (2017) pp.45–52.

[65] 須藤 靖: “「学術のために」という視点”, 学術の動向 **22** (2017) 5 月号 pp.24–29

[66] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その三十八: 明日のことはわからない”, 東京大学出版会 UP **536** (2017) 6 月号, pp.40–46.

[67] 三橋 龍也, 川島 英之, 西道 啓博, 建部 修見: “CPU に最適化した STR-R 木による空間結合殻カウント”, 電子情報通信学会論文誌, **J100-B** (2017) pp.961

[68] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その三十九: みんな大好き並行宇宙”, 東京大学出版会 UP **538** (2017) 8 月号, pp.26–35.

[69] 樫山和己: “相対論と宇宙物理学”, 数理科学 2017 年 8 月号 (2017)

[70] 須藤 靖: マリオ・リビオ、ジョセフ・シルク “彼らはどこにいる？ ” 訳, パリティ **32** (2017) 10 月号, pp.4–12.

[71] 須藤 靖: “日本学術会議全国縦断サイエンスカフェ”, 学術の動向 **22** (2017) 10 月号 pp.124–125

[72] 須藤 靖: シリーズ : 安全保障と天文学 (1) “安全保障に関する日本学術会議声明ー若手天文学研究者に向けてー”, 日本天文学会誌 天文月報 **110** (2017) pp.728–735.

[73] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その四十: 情けは地球のためならず 宇宙倫理学入門”, 東京大学出版会 UP **542** (2017) 12 月号, pp.17–23.

[74] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その四十一: ５０年後の世界”, 東京大学出版会 UP **545** (2018) 3 月号, pp.7–13.

(学位論文)

[75] Sunmyon Chon: “Formation of supermassive stars and black holes via direct gravitational collapse of primordial gas clouds” (博士論文)

[76] Yuya Sakurai: “Formation and growth of massive black holes in the early universe” (博士論文)

[77] Akinari Hamabata: “Measuring Dynamical Masses of Galaxy Clusters with Stacked Phase Space”(修士論文)

[78] Yuta Nakagawa: “GCM simulation of Earth-like planets for photometric lightcurve analysis” (修士論文)

[79] Kojiro Kawana: “ブラックホールによる白色矮星の潮汐破壊現象” (修士論文)

[80] Conor M. B. Omand: “Radio, Submillimetre, and Infrared Signals from Embryonic Supernova Remnants” (修士論文)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[81] Riouhei Nakatani: “Radiation-hydrodynamical simulations of photoevaporating protoplanetary disks with various metallicities”; Francessco’s Legacy - Star Formation in Space and Time (Instituto degli Innocenti, Firenze, Italy, 6/5-6/9, 2017)

[82] Sunmyon Chon: “Formation of Super Massive Star in the early Universe”; EWASS2017 , (Prague, 6/26-30,2017)

[83] Ken Osato: “Investigating Cluster Astrophysics and Cosmology with Cross-Correlation of tSZ and WL”; Rencontres du Vietnam on Cosmology, (Quy Nhon, Vietnam, July 2017)

[84] Shoya Kamiaka, Othman Benomar, and Yasushi Suto: “Joint Analysis of Spin-Orbit Angle in Exoplanet Systems by Adopting Asteroseismology and Transit Spectroscopy”; TESSTING STELLAR ASTROPHYSICS TASC3 KASC10 WORKSHOP (Birmingham, 7/16-7/21, 2017)

[85] A. Harada, W. Iwakami, H. Okawa, S. Yamada, H. Nagakura, K. Sumiyoshi, H. Matsufuru, and A. Imakura: “The Rotating Core-Collapse Supernova Simulation with Full Boltzmann Neutrino Transport”; Workshop on the Progenitor-Supernova-Remnant Connection (Oral, Kreuth, Germany 7/24-28, 2017)

[86] Kojiro Kawana: “A Variety of Tidal Disruptions Events of a WD by a BH”; RESCEU Summer School (Yamaguchi, Japan, July 29 - August 1, 2017)

[87] Riouhei Nakatani: “Radiation-Hydrodynamical Simulations of Photoevaporating Protoplanetary Disks with Various Metallicities”; SFDE17: from Local Clouds to Distant Galaxies (ICISE, Quy Nhon, Vietnam, 8/7-8/11, 2017)

[88] Takahiro Nishimichi: “Response function of the cosmic density power spectrum and reconstruction”; Next-generation cosmology with large-scale structure: CosKASI-ICG-NAOC-YITP joint workshop (Kyoto, Japan, September 7, 2017)

[89] Takahiro Nishimichi: “Response function and reconstruction for accurate tests of dark energy using clustering statistics on BAO scale”; Dark Energy and Modified-Gravity cosmologies: DARKMOD (Gif-sur-Yvette, France, Sep. 28, 2017)

[90] Ken Osato: “Investigating Cluster Astrophysics and Cosmology with Cross-Correlation of tSZ and WL”; XIIIth School of Cosmology: The CMB from A to Z, (Corsica, France, November 2017)

[91] Tilman Hartwig: “Celebration of CEMP & Gala of GALAH”, Melbourne, Australia, Nov. 2017

[92] Sunmyon Chon: “Radiation hydrodynamics simulations of the SMS formation”; Titan of the Early Universe , (Prato, 11/20-24,2017)

[93] Shoya Kamiaka, Othman Benomar, and Yasushi Suto: “On the reliability of stellar inclination estimate from asteroseismology”; 10th

RESCEU/Planet2 Symposium Planet Formation around Snowline (Tokyo, 11/28-11/30, 2017)

[94] Masataka Aizawa, Kento Masuda, Hajime Kawahara, and Yasushi Suto: "Search for ringed planets using the Kepler data", 10th RESCEU/Planet2 Symposium Planet Formation around Snowline, November 30, 2017, Tokyo, Japan

[95] Naoki Yoshida: "Statistical Computational Cosmology", JST/NSF Joint Symposium on Big Data (Tokyo, December, 2017)

[96] Ken Osato: "Investigating Cluster Astrophysics and Cosmology with Cross-Correlation of tSZ and WL"; VII Essential Cosmology for the Next Generation, (Punta Mita, Mexico, December 2017)

[97] Naoki Yoshida: "Big Data Cosmology with Subaru HSC", 3rd CREST International Symposium on Big Data Application (Tokyo, January 17, 2018)

[98] Natsuki H. Hayatsu: "Star-Formation History in Early Universe Revealed by Blind Line-Search Using AtLAST and ALMA "; Atacama Large-Aperture Submm/mm Telescope (AtLAST) Workshop (European Southern Observatory, 1/17-1/19, 2018)

[99] Kojiro Kawana: "A Variety of Tidal Disruptions Events of a WD by a BH"; 2018 ASPEN Winter Conference: Using tidal disruption events to study super-massive black holes (Aspen physics center, USA, January 20-16, 2018)

[100] Ken Osato: "Blind test of regularized perturbation theory with N-body simulations"; General Relativity - The Next Generation -, (Kyoto, Japan, February 2018)

[101] A. Harada, S. Yamada, W. Iwakami, H. Okawa, H. Nagakura, K. Sumiyoshi, S. Furusawa, and H. Matsufuru: "The Neutrino Distributions in The Rotating Core-Collapse Supernova"; Physics of Core-Collapse Supernovae and Compact Star Formations (Poster, Tokyo, Japan 3/19-21, 2018)

[102] Masataka Aizawa, Kento Masuda, Hajime Kawahara, and Yasushi Suto: "Search for exoplanetary rings using transit method", Circumplanetary Disks and Satellite Formation, March 27, 2018, Nagoya, Japan

招待講演

[103] Masamune Oguri: "Clusters of galaxies in Subaru Hyper Suprime-Cam survey"; Galaxy Evolution Across Time (ENS, Paris, France, June 2017)

[104] Shigeki Inoue: "Spiral-arm instability: Giant clump formation via fragmentation of a galactic spiral arm": Disk Instabilities across cosmic scales (Sexten Primary School, Itary, July 17–23, 2017)

[105] Naoki Yoshida: "Fragmentation of disks and filaments in the early universe", Disk Instability across Cosmic Scales, (Sesto, Italy, July 19, 2017)

[106] Kazumi Kashiyama: "An FRB in a bottle? : a multi-wavelength approach"; TeVPA2017 (Colombus, OH, USA, 8/7, 2017)

[107] Naoki Yoshida: "Formation of primordial stars and blackholes", Star Formation in Different Environment (Quy Nhon, Vietnam, August 10, 2017)

[108] Kazumi Kashiyama: "An FRB in a bottle?"; KIAA-WAP II (北京, 中国, 8/17, 2017)

[109] Naoki Yoshida: "Cosmology and fundamental physics with big astronomical data", 2017 IEEE International workshop on machine learning and signal processing (Tokyo, September 28, 2017)

[110] Naoki Yoshida: "Formation of primordial stars and blackholes", IAU333 Peering towards Cosmic Dawn (Dubrovnik, Croatia, October 3, 2017)

[111] Yasushi Suto: "Non-sphericity of collisionless gravitating systems in the universe"; invited talk at an international conference "Collisionless Boltzmann (Vlasov)Equaton and Modeling of Self-Gravitating Systems and Plasmas", October 30-November 3, 2017, Centre International de Rencontres Mathematiques, Marseille, France.

[112] Tilman Hartwig: "Titans of the Early Universe", Prato, Italy, Nov. 2017

[113] Yuya Sakurai: "UV feedback in the formation of SMSs"; Titans of the early universe (Monash University Prato Center, Italy, November 2017)

[114] Shigeki Inoue: "Spiral-arm instability: Giant clump formation via fragmentation of a galactic spiral arm": "Sharp Views of Galaxy Formation and Evolution", Japan-German (JSPS-DAAD) Workshop 2017 (Tohoku University, November 1–3. 2017)

[115] Naoki Yoshida: "Multi label classification of supernovae detected with Subaru HSC", 3rd International Symposium on Big-data Analytics in Science and Engineering (Aizu, November 28, 2017)

[116] Naoki Yoshida: "Formation of Astrophysical Blackholes", NCTS Annual Thoery Meeting (Taiwan, December 7, 2017)

[117] Masamune Oguri: "Ultra high magnification microlensing"; PACIFIC 2018 symposium (Kiroro, Hokkaido, February 2018)

[118] Naoki Yoshida: "Simulating Cosmic Structure Formation", SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP18) (Tokyo, March 7, 2018)

[119] Akira Harada: "The rotating core-collapse supernova simulation by Boltzmann-radiation transport"; The 4th ALPS Symposium on Photon Science (Oral, Tokyo, Japan, 3/28, 2018)

[120] Yasushi Suto: "Reliability of the asteroseismic measurement of the stellar obliquity"; invited talk at NAOJ workshop "Asteroseismology and its impact on other branches of astronomy", March 19-20, 2018, University of Tokyo

(国内会議)

一般講演

[121] 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　東京キャンパス, 2/16, 2017)

[122] 大木 平: “準解析的モデルで探る銀河団領域の銀河分布の進化”; 銀河進化研究会 (大阪大学, 6/7, 2017)

[123] 井上 茂樹: “ 渦状腕の線形摂動理論：渦状腕分裂によるクランプ形成”; 第 4 回 銀河進化研究会 (大阪大学, 6/7-9, 2017)

[124] 早津夏己: “[CII] 輝線と [OIII] 輝線で探る遠方星形成史”; 銀河進化研究会 (大阪大学, 6/7-6/9, 2017)

[125] 鄭 昇明: “銀河からの電離輻射が超大質量星形成に与える影響”; 第 4 回銀河進化研究会, (大阪大学, 6/7-9,2017)

[126] 吉田 直紀: “広域銀河サーベイと大規模数値シミュレーション”; ポスト「京」時代の天体形成シミュレーション研究会 (名古屋大学, 6/26, 2017)

[127] 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”; 基研研究会「原始惑星系円盤」(京都大学, 7/10-7/12, 2017)

[128] 中川雄太: “「第二の地球」の地図作り: 3 次元大気モデルを用いた模擬観測と光度曲線解析”; 2017 年度天文・天体物理若手夏の学校長野県千曲市, 7/25-28, 2017, ポスター発表)

[129] 浜端 亮成: “銀河の色で探る銀河団のダイナミクス”; 2017 年度 第 47 回 天文・天体物理若手夏の学校 (長野県, 7/25-7/28, 2017)

[130] 仲谷崚平: “円盤光蒸発の再考・議論”; 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 (九州大学, 8/17-8/18, 2017)

[131] Conor M. B. Omand: ”Radio and Submillimetre Signals from Embryonic Supernova Remnants”; 高エネルギー宇宙物理学研究会 2017（基礎物理学研究所, 9/5, 2017）

[132] 川名 好史朗: “ブラックホールによる白色矮星の潮汐破壊現象の多様性”; 高エネルギー宇宙物理学研究会 2017 (京都大学基礎物理学研究所, 9/5-7, 2017)

[133] 鄭 昇明: “初期宇宙における星形成円盤中での分裂片の migration 過程”; 日本天文学会 2017 年秋季年会, (北海道大学, 9/11-13,2017)

[134] 大里 健: “Probing cosmology and cluster astrophysics with cross-correlation of thermal Sunyaev-Zel’dovich effect and weak lensing”; 日本天文学会 2017 年秋季年会, (北海道大学, 9/11, 2017)

[135] Conor Omand: ”Radio and Submillimetre Signals from Embryonic Supernova Remnants”; 日本天文学会 2017 年秋季年会（北海道大学, 9/11, 2017）

[136] 西道 啓博 他: “Dark Emulator Project I. 機械学習に基づく銀河空間相関量の高速予言”; 日本天文学会 2017 秋季年会 (北海道大学, 9/11, 2017)

[137] 浜端 亮成: “N 体シミュレーションを用いた銀河団周辺のハローの運動の解析”; 日本天文学会 2017 年秋季年会 (北海道大学, 9/11, 2017)

[138] 井上 茂樹: “ 渦状腕の重力不安定理論 I: 不安定性パラメータと分裂不安定条件”; 日本天文学会 2017 年秋季年会 (北海道大学, 9/11-13, 2017)

[139] 井上 茂樹: “ 渦状腕の重力不安定理論 II: 渦状腕分裂によるクランプ形成”; 日本天文学会 2017 年 秋季年会 (北海道大学, 9/11-13, 2017)

[140] 上赤 翔也, Othman Benomar, 須藤 靖: “星震学を用いた恒星の自転傾斜角測定の系統誤差評価”; 天文学会 2017 年秋季年会 (北海道大学, 9/11-9/13, 2017)

[141] 原田 了: “ボルツマン輻射輸送計算による回転星の超新星爆発”; 日本天文学会 2017 年秋季年会 (口頭、北海道大学, 9/11-13, 2017)

[142] 川名 好史朗: “ブラックホールによる白色矮星の潮汐破壊現象の多様性”; 日本天文学会 2017 年秋季年会 (北海道大学, 9/11-13, 2017)

[143] 逢澤正嵩, 増田賢人, 河原創, 須藤靖: “ケプラー測光データを用いた岩石からなる惑星リング探査”; 日本天文学会 2017 年秋季年会 (北海道大学, 9/11-13 2017)

[144] 櫻井祐也: “遠方宇宙の星団中での暴走的衝突による中間質量ブラックホール形成”; 日本天文学会 2017 年秋季年会 (北海道大学, 9/13, 2017)

[145] 鄭 昇明: “初期宇宙における超大質量ブラックホールの種形成”; 天体形成論 ～過去・現在・未来～, (筑波大学, 9/19-21,2017)

[146] 大木 平: “準解析的モデルで探る銀河団領域の銀河分布の進化”; 天体形成論 ～過去・現在・未来～ (筑波大学, 9/19, 2017)

[147] 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”; 「天体形成論～過去・現在・未来～」(筑波大学, 9/19-9/21, 2017)

[148] 大栗 真宗: “超高増光率重力マイクロレンズ”; 第 6 回観測的宇宙論ワークショップ (弘前大学, 10/23, 2017)

[149] 浜端 亮成: “N 体シミュレーションを用いた銀河団周辺のハローの運動の解析”; 観測的宇宙論ワークショップ　(弘前大学, 10/23, 2017)

[150] 井上 茂樹: “渦状腕の線形摂動理論”: 天の川銀河研究会 2017 (鹿児島大学, 10/25-27, 2017)

[151] 樫山和己: ”Targeted Search of Coherent Radio Bursts from Extragalactic Young Neutron Stars”; 中性子星の観測と理論 研究活性化ワークショップ 2017（国立天文台, 11/24, 2017）

[152] 大木 平: “宇宙論的 N 体シミュレーションを用いた銀河団領域の銀河分布”; 第 30 回 理論懇シンポジウム (東京大学, 12/25, 2017)

[153] 大栗 真宗: “2030 年代のダークマター研究”; 2030 年代の光赤外分野のスペースミッション (東京, 12/15, 2017)

[154] 森脇 可奈: ”High-z 銀河における HII 領域からの輝線強度の計算”; 第 4 回輝線銀河研究会（東京大学, 12/25, 2017）

[155] 原田 了: “ボルツマン輻射輸送計算による回転星の超新星爆発”; 第 30 回理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム「星の物理の新地平」 (口頭、東京大学, 12/25-27, 2017)

[156] 仲谷崚平: “原始惑星系円盤における紫外線/X 線光蒸発の輻射流体シミュレーション”; 理論懇シンポジウム「星の物理の新地平」(東京大学, 12/25-12/27, 2017)

[157] 櫻井祐也: “初期宇宙における始原星団内での星の暴走的衝突と中間質量 BH 形成”; 第３０回理論懇シンポジウム (東京大学, 12/26, 2017)

[158] 鄭 昇明: “初期宇宙における超大質量星とブラックホール形成”; 第 5 回超巨大ブラックホール研究推進連絡会, (東北大学, 1/8-9,2018)

[159] 櫻井祐也: “Runaway stellar collision in primordial star clusters and IMBH formation”; SMBH 研究推進連絡会 第５回ワークショップ (東北大学, 1/9, 2018)

[160] 櫻井祐也: “Runaway stellar collisions and formation of IMBHs in first star clusters”; 初代星・初代銀河研究会 2017 (呉, 1/9, 2018)

[161] Tilman Hartwig: “First Stars”; Kure, February 2018

[162] 鄭 昇明: “初期宇宙における超大質量星形成”; 初代星・初代銀河研究会 2017, (呉, 2/10-12,2018)

[163] 森脇 可奈: ”遠方銀河におけるサブミリ輝線”; 初代星・初代銀河研究会 2018（広まちづくりセンター, 2/12, 2018）

[164] 大里 健: “Strong orientation dependence of surface mass density profiles of dark haloes at large scales”; 日本天文学会 2018 年春季年会, (千葉大学, 3/14, 2018)

[165] 西道 啓博, 小林 洋祐, 高田 昌広: “PFS に向けた大規模シミュレーション群と機械学習を用いた精密理論予言”; 日本天文学会 2018 春季年会 (千葉大学, 3/14, 2018)

[166] 森脇 可奈: ”遠方銀河におけるサブミリ輝線”; 日本天文学会 2018 年春季年会（千葉大学, 3/14, 2018）

[167] 原田 了: “ボルツマン輻射輸送計算による回転星の超新星爆発 II”; 日本天文学会 2018 年春季年会 (口頭、千葉大学, 3/14-17, 2018)

[168] 仲谷崚平: “原始惑星系円盤における紫外線/X 線光蒸発の金属量依存性”; 日本天文学会 2018 年春季年会 (千葉大学, 3/14-3/17, 2018)

[169] 中川雄太, 小玉貴則, 石渡正樹, 河原創, 須藤靖: “大気大循環モデルを用いた系外惑星の光度曲線解析による自転傾斜角推定”; 日本天文学会 2018 年春季年会 (千葉大学, 3/15, 2018)

[170] 大木 平: “宇宙論的 N 体シミュレーションを用いた銀河団銀河の分布”; 日本天文学会 2018 年春季年会 (千葉大学, 3/16, 2018)

[171] 大木 平: “Modeling the spatial distribution of cluster galaxies in cosmological simulations”; From stars to galaxies (北海道大学, 3/20, 2018)

[172] 樫山和己, 仏坂健太, 村瀬孔大:”Radio Transients from Newborn Black Holes”; 日本物理学会第 73 回年次大会（東京理科大, 3/23, 2018）

招待講演

[173] 須藤靖: “防衛研究の先にあるもの : 次世代基礎研究者への問いかけ”, 日本科学者会議関東甲信越地区 第６回シンポジウム（2017 年 7 月 15 日）

[174] 樫山和己:”Fast Radio Bursts”; 高エネルギー宇宙物理学研究会 2017（基礎物理学研究所, 9/5, 2017）

[175] 大栗 真宗: “超高増光率重力マイクロレンズ”; 宇宙観測と地上実験から探るダークマター研究の現状と展望 (金沢, 10/3, 2017)

[176] 須藤靖: “高校の理科教育のあり方”, 東京大学地震研究所共同研究集会「地震・火山現象を含む学校地学教育の現状とそのイノベーション」（2017 年 11 月 11 日）

[177] 樫山和己:”大質量星の回転と突発天体”; 共同利用研究会「ガンマ線バースト研究の新機軸」（宇宙線研究所, 11/23, 2017）

[178] 須藤靖: “ペイルブルードットを超えて”, 生命科学系学会合同年次大会　特別セッション「アストロバイオロジー : 地球と宇宙での生命探査」, 神戸ポートピアホテル（2017 年 12 月 7 日）

[179] 井上 茂樹: “星形成銀河における円盤不安定性と星形成クランプの形成プロセス”; 国立天文台研究集会 :「星形成と銀河構造における磁場の役割」(鹿児島大学, 12/20-22, 2017)

[180] 樫山和己 : ”高エネルギー天体現象における放射過程”; 研究会「宇宙における光渦」（国立天文台, 1/27, 2018）

[181] 須藤靖: “学術研究と安全保障を巡る議論の背景”, 日本天文学会特別セッション「安全保障と天文学」、千葉大学西千葉キャンパス （2018 年 3 月 14 日）

(セミナー)

[182] 鄭 昇明: “The Super Massive Star formation in the early Universe”; 宇宙進化コロキウム, (大阪大学, 4/26,2017)

[183] 樫山和己:”An FRB in a bottle? ”; 天文教育センター談話会（国立天文台, 5/11, 2017）

[184] 樫山和己:”An FRB in a bottle?”; 理研セミナー (理化学研究所, 5/12, 2017)

[185] Riouhei Nakatani: “Radiation-Hydrodynamical Simulations of Photoevaporating Protoplanetary Disks with Various Metallicities”; 名古屋大学, 5/16, 2017

[186] Takahiro Nishimichi: “Analytical and Numerical Approaches to Cosmic Large Scale Structures”; ASIAA colloquium (Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics, 5/23, 2017)

[187] Kazumi Kashiyama: “An FRB in a bottle?”; Simons Center for Computational Astrophysics (New York, USA, June 2, 2017)

[188] Riouhei Nakatani: “The metallicity dependence of photoevaporation out of a protoplanetary disk”; Universität Tübingen, Tübingen, Germany, 6/11, 2017

[189] 大里 健: “Probing cosmology and cluster astrophysics with cross-correlation of thermal Sunyaev-Zel’dovich effect and weak lensing”; 宇宙物理実験研究室セミナー, (首都大学東京, 6/12, 2017)

[190] 大里 健: “Investigating Cluster Astrophysics and Cosmology with Cross-Correlation of Thermal Sunyaev-Zel’dovich Effect and Weak Lensing”; ISAS Astrophysics Colloquia, (JAXA 宇宙科学研究所, 6/12, 2017)

[191] Naoki Yoshida: “Star formatin in the early universe”, Bootcamp in SFDE17 (Quy Nhon, Vietnam, August 6, 2017)

[192] Masataka Aizawa: “Search for Exoplanetary Rings Using the Kepler Data”; Exoplanet Lunch Seminar at Princeton University (Princeton, October 23, 2017)

[193] Masataka Aizawa: “Exorings”; Thursday Seminar at Columbia University (New York, October 26, 2017)

[194] Yasushi Suto: ”Architecture of spin and orbital angular momenta in exoplanetary systems”, Observatoire de la Cote d’Azur, October 25, 2017, Nice, France

[195] 大栗 真宗: “Toward understanding clusters of galaxies”; 名古屋大学 C 研 セミナー (名古屋大学, 10/31, 2017)

[196] 大栗 真宗: “New results on microlensing search of compact dark matter”; 名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構 コロキウム (名古屋大学, 11/22, 2017)

[197] 西道 啓博: “Analytical and numerical approaches to cosmic large scale structures: New prospects with simulation ensemble”; ABBL セミナー (理化学研究所, 11/24, 2017)

[198] Tilman Hartwig: ICG Portsmouth, GB, December 2017

[199] Riouhei Nakatani: “Radiation Hydrodynamics Simulations of Photoevaporation of Protoplanetary Disks by Ultraviolet Radiation: Metallicity Dependence”; Jet Propulsion Laboratory, CA, USA, 12/12, 2017

[200] Natsuki H. Hayatsu: “Blind Search for z $\sim$ 6 [CII] emitters in ALMA deep survey data”; Wine and Cheese Seminar (European Southern Observatory, 12/13, 2017)

[201] R. Nakatani: “Radiation-Hydrodynamics Simulations of Photoevaporation of Protoplanetary Disks: Metallicity Dependence”; 大阪大学, 1/24, 2018

[202] Masamune Oguri: “New gravitational lenses in time domain”; Seminar, Department of Physics, University of Hong Kong (University of Hong Kong, 1/31, 2018)

[203] Masataka Aizawa: “Search for exoplanetary rings”; 山本 (智) 研セミナー (東京大学, 2/8, 2018)

[204] Naoki Yoshida: “Big Data Cosmology with Subaru HSC”, DIRAC Institute Seminar (University of Washington, US, February 12, 2018)

[205] Taira Oogi: “Modeling the spatial distribution of cluster galaxies in cosmological simulations”; Friday Scientific Lunch Talks (The University of Arizona, Arizona, USA, 2/16, 2018)

[206] 井上 茂樹: “形成期円盤銀河におけるクランプ構造の形成メカニズム”: A 研コロキウム (名古屋大学, 2/21, 2018)

[207] Kazumi Kashiyama: “Fast Radio Bursts and the young neutron star model”; Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics (Taipei, Taiwan, March 13, 2018)

(講演)

[208] 吉田 直紀: “宇宙の始まりの物語”; 第 90 回五月祭公開講演会 (東京大学, 5/20, 2017)

[209] 吉田 直紀: “宇宙 1 3 8 億年の進化史”; 静岡県立大学特別講義 (静岡市, 6/29, 2017)

[210] 西道 啓博: “すばる望遠鏡ビッグデータから迫る宇宙の暗黒成分”; 天文講演会 (日立シビックセンター科学館, 10/29, 2017)

[211] 西道 啓博: “コンピューターで創る宇宙と統計”; サイエンスカフェ (日立シビックセンター科学館, 10/29, 2017)

[212] 吉田 直紀: “暗黒宇宙に生まれる星とブラックホール”; スパコンを知る集い (長野県長野市, 12/2, 2017)

[213] 吉田 直紀: “ビッグデータ宇宙論”; 第 13 回 最新の天文学を学ぶワークショップ (神戸大学, 12/5, 2017)

[214] 須藤靖: “一番近い星へナノ探査機を：ブレイクスルー スターショット計画”, 高知ロータリークラブ例会、高知三翠園（2017 年 12 月 19 日）

[215] 須藤靖: “系外惑星系が拓く新たな宇宙観”, 第 82 期高知市民の大学@かるぽーと「宙を見上げてー最新・宇宙を知るー」（2017 年 12 月 19 日）

[216] 吉田 直紀: “宇宙 1 3 8 億年の進化史”; 安田学園特別講義 (東京大学, 12/20, 2017)

[217] 吉田 直紀: “宇宙 x 地球”; WPI シンポジウム 「未来」をはじめる (日本科学未来館, 2/11, 2018)

[218] 吉田 直紀: “人工知能の時代を生きるサバイバル術”; 第 7 回 科学の甲子園 シンポジウム (大宮ソニックシティ, 3/18, 2018)

[219] 須藤靖: “地球型惑星の生命の探し方-ペイル・ブルー・ドットのリモートセンシング-”, 日本物理学会市民科学講演会「広がる物理へのいざない -ナノへ、宇宙へ-」, 東京理科大学野田キャンパス（2018 年 3 月 25 日）

5.2 村尾研究室

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

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

今年度は、村尾美緒教授、添田彬仁助教、日本学術振興会外国人研究員の Marco Túlio Coelho Quintino 博士、日本学術振興会特別研究員の加藤晃太郎博士、博士課程大学院生の新保厚氏、坂井亮介氏、山崎隼汰氏、修士課程大学院生の董青秀雄氏、USTEP 大学院生 (ドイツ Köln 大学からの交換留学生) の Paula Belzig 氏、研究生の尹天驕（TianJiao Yin）氏のメンバーで、高階量子演算、ハイブリッド量子系での量子情報処理、分散量子情報処理とエンタングルメント、量子力学基礎論、量子多体系の量子情報的解析に関する研究を行い、多角的な視点から量子情報の理論的研究を進めた。

5.2.1 高階量子演算

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

ユニタリ操作の同値性判定

ユニタリ操作の識別問題は、未知ユニタリ操作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操作のどれと一致するかを判定する問題である。従来の研究では、候補のユニタリ操作の行列要素 (古典情報によるユニタリ操作の記述) が与えられており、その記述に応じた操作を用いた識別問題が考えられてきた。一方、本研究では、候補のユニタリ操作もブラックボックス X_1, X_2 としてのみ与えられている場合に、ブラックボックス X が候補 X_1, X_2 のどれと一致するかを識別する問題を考え、この問題を「ユニタリ操作の同値性判定」と名付け、量子ビット系のユニタリ操作について考察した。

同値性判定では、全てのユニタリ操作を異なる空間へ同時に作用させる並列的方法と、各ユニタリ操作の間に量子演算を挿入することができるより一般的方法が考えられる。まず全てのブラックボックスをそれぞれ 1 回使用する場合には、並列的方法と一般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操作のうちの一つだけしか使用しなくても、最適な成功確率が実現できることがわかった。ユニタリ操作の古典的な記述は、有限回のブラックボックスを使用しただけでは決定することができないのに対し、候補のブラックボックスを有限回使用することで、ユニタリ操作の古典的な記述が与えられた場合と同等の、最適な判定確率が達成できる場合があることを semidefinite program と呼ばれる手法を用いて示した。[担当: 新保、添田、村尾]

ユニタリ量子操作をその逆操作に変換するための万能量子プロトコル

未知のユニタリ量子操作を施すことが保証されているブラックボックスがあるとする。このブラックボックスを 1 回だけ用いて、ブラックボックスが本来実装するはずのユニタリ操作ではなく、その逆変換を実装するように量子回路を設計する問題について考えた。ユニタリ操作がブラックボックスとしてでなく、実装するユニタリ操作について事前情報が与えられており、各量子状態への作用を古典計算機によって計算可能であれば、そのようなユニタリ操作に対しては逆操作を実装することは可能である。しかし、ブラックボックスとして与えられた場合、このような手法は使用できない。逆操作化には、確率 1 で成功する「決定的実装」と、より要件を緩くして、零でない確率で成功すれば良しとする「確率的実装」が考えられる。

本研究では、ブラックボックスの複製が n 個利用できたとしても、並列的に利用している限り、逆操作化の決定的実装は不可能であることを示した。一方で、ブラックボックスが d 準位量子系に作用するものであれば、確率的には、$d-1$ 個の複製を利用すれば、逆操作化は少なくとも確率 $1/d^2$ で可能であることが判明した。 特に、$d=2$ の場合、n 個の並列的使用で最大成功確率を達成する量子プロトコルを

任意の n について特定した。また、一般の d について、複製個数を増加させたときに、逆操作化の成功確率について（真に正の）下限値が求まった。$d \geq 3$ の場合、複製がなければブラックボックス 1 個からの逆操作化は確率的にも実現できないことが証明できた。[担当：Quintino、董、添田、村尾]

Grover 探索アルゴリズムの応用による高階量子演算

昨年度までの研究により、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、ユニタリ操作を変換する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」を実装する量子アルゴリズムが提案されている。本年度は、既存のアルゴリズムを再検討することで、Grover 探索アルゴリズムの一般化である、振幅増幅アルゴリズムと目標とする高階量子演算の特殊性を活用し、ダイアモンドノルムによる誤差評価 ϵ に対する入力ユニタリ操作の利用回数を $O(1/\epsilon)$ に削減することに成功した。一方で、ユニタリ操作の次元 d に対して使用する利用回数は既存のアルゴリズムと同じく d^2 でスケールする。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 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。

ハミルトニアン動力学系における 2 量子ビットゲートのロバスト制御

量子ゲートは物理系において量子系のハミルトニアン動力学に従って実装されるが、ハミルトニアンの一部が不定であってもその不定なパラメータに対してロバストな制御が原理的に可能となりうるかを理論的に明らかにした。ハミルトニアン動力学による与えられた量子ゲートの実現可能性については、量子制御理論によって数学的に明らかにされているが、この理論では与えられたハミルトニアンが全て既知であることが仮定されている。一方で、1 量子ビットの特殊な系ではハミルトニアンの不定パラメータがコンパクトである場合には、不定パラーメータに依存しないロバストな制御が原理的に可能であることが先行研究によって明らかにされている。本研究では 2 量子ビット以上の量子系に対しても任意の量子ゲートがロバストに実装できる系の存在を数学的に明らかにした。本研究は英国 Aberystwyth 大学の Daniel Burgarth 准教授との共同研究である。[担当：坂井、添田、村尾]

5.2.3 分散量子情報処理とエンタングルメント

量子情報の分散符号化・復号化に必要な量子通信量

各ノードに配置された量子計算機を量子通信ネットワークで接続したツリー型のクラスター量子計算機において、より少ない量子通信を用いて 1 つのノードにある量子情報を多ノードからなる多体エンタングル状態に符号化し、また符号化された多体エンタングル状態から復号化する方法を解析した。符号化にかかる量子通信量の最適値を導出し、復号化に必要な量子通信量を評価した。そして、復号化では符号化より量子通信量を削減できることを示した。[担当：山崎、村尾]

量子メモリ制限下における多体エンタングル状態集合の分散生成

各ノード内での局所量子操作およびノード間の古典通信（LOCC）のみを用いて、与えられたエンタングルメント資源から多ノードに分配された多体エンタングル状態の状態集合を、決定論的かつ正確に生成するために各ノードで必要な量子メモリを考察した。ノード間の 2 体エンタングル状態からなるエンタングルメント資源から多体エンタングル状態集合を分散生成するために必要な量子メモリのサイズと、多体エンタングルメント資源から多体エンタングル状態集合を分散生成するために必要な量子メモリのサイズを比較した。そして、各ノードでの量子メモリのサイズが制限されている状況下において、真に多体のエンタングルメントを資源として用いることで分散生成できる多体エンタングル状態の多様性が広がるかを解析した。その結果、量子メモリ制限下においては、資源となるエンタングルメントの差が生成可能な状態集合の差となって現れうることを証明した。本研究は、オーストリア Innsbruck 大学の Barbara Kraus 准教授、 Wolgang Dür 教授、Alexander Pirker 氏との共同研究である。[担当：山崎、村尾]

5.2.4 量子力学基礎論

入力の複製が与えられた場合に実装可能な量子写像

量子力学において、実装可能な量子状態間の変換は完全正値写像によって記述されることが知られている。量子状態は半正定値の演算子である密度演算子を用いて表されるため、量子状態間の変換は半正定値の演算子を半正定値の演算子に移さなければならず、この条件が写像の正値性に相当する。完全正値性は正値性を強めた条件であり、より大きな量子系の状態の一部に対して変換を行ったとしても、全体として正値性が保証されることを要求する。量子

力学ではエンタングル状態が存在するために、完全正値性は正値性より真に強い条件となっている。

本研究では、写像の入力となる量子状態の複製が有限個与えられた場合に実装可能な写像について解析した。一般に未知の量子状態を複製することは量子力学において禁止されているが、本研究の設定は、この条件を緩めることに対応する。我々は用いる量子状態の複製の数を増やしていくことで、実装可能な写像の集合が完全正値写像の集合より真に大きくなることを示した。特に複製の数が無限大に近づく極限において、実装可能な写像の集合が正値写像の集合に漸近していくことを示した。正値だが完全正値でないような写像は量子力学では実装できないが、本研究では、このような写像のほとんどすべては、入力の複製を用いることによって実装可能となることを示している。[担当：董、Quintino、添田、村尾]

因果的順序を持つ複数回測定による量子的非局所性

空間的に離れた量子系に存在する量子的非局所性（ベル非局所性および EPR steering）に関して、量子系に対して時間的に順序付けられた因果的順序を持つ量子測定が実行できる状況下で、実行可能な量子的非局所性検査法を考えた。まず、通常のベル非局所性検査法と異なり、各部分量子系において測定を逐次的に 2 回施行する場合を考える。非局所性検査に通常用いられる測定では、各測定に対して基底などを設定するための外部から調整可能なパラメータを仮定するが、1 回目の測定がそのようなパラメータを持たない場合、それは局所フィルタとして解釈でき、検査対象の量子状態に対し局所的事前処理を実装していることになる。先行研究において、通常のベル非局所性検査法では非局所性を示さないような量子状態から、この事前処理を用いることで「隠れた非局所性」を検出できることが知られていた。

本研究では、1 回目の測定への制約を撤廃し、局所事前処理をさらに一般化させた場合を考えた。これまでのベル非局所性検査法においては、(かならずしも量子系であることを仮定しない) 各部分系において、各測定の外部パラメータの値と測定結果以外は操作間に構造が成立することを仮定しない。我々は、EPR steering や測定結果の統計性に内在するその他の非古典的な性質を検出する際に、各部分量子系への操作に時間的順序が成立することを仮定すれば、量子状態のエンタングルメントの検出に有用となり、局所フィルタ法に対して優位性を示すことを明らかにした。[担当：Belzig、Quintino、村尾]

量子測定の真の三重共立性

量子力学における測定は、組み合わせによっては、同時に実施できないという意味で、共立性が保証されない。今日では、2 つの量子測定の組み合わせではなく、より多数の測定からなる組み合わせについても共立性が議論されている。本研究では、3 つの量子測定に共立性が成立する条件を解析した。その結果、3 つ同時には共立しないが、2 重共立性を示す量子測定の凸結合として表現できる例を発見した。このような例は「真の」3 重非共立性を示さない組とし、逆に、このような凸結合に分解できない場合、真の 3 重非共立性を示すと定義することとした。また、真の 3 重非共立性を検証するための数学的道具を定式化し、具体例に応用した。この 3 重非共立性は、n 重非共立性に拡張でき、これが EPR 操舵性に代表される量子的非局所性との関係を議論した。特に、n 重非共立性は処理系非依存な方法で検証できることが判明した。本研究はスペイン Barcelona の光科学研究所の Daniel Cavalcanti 博士とスペイン Sevilla 大学の Adan Cabello 教授との共同研究である。[担当：Quintino]

量子測定の非共立性とベル非局所性

本研究では、量子測定の非共立性とベル非局所性の関係を、同時測定可能性とベル不等式の破れの観点から解析した。より正確には、次の性質を持つ同時測定不能な正作用素測定の組 A を具体的に発見した。この A を 2 者間ベル非局所性検査に用いるかぎり、つまり 2 者間のうち 1 者が A を利用する限り、いかなる 2 体量子状態およびいかなる正作用素測定の組をもう一方の 1 者が用いても、この状況下で生成される測定結果の確率分布は必ず隠れた変数理論で説明できることを証明した。この結果、量子測定の非共立性はベル非局所性を保証しないことが判明した。本研究はスイス Geneva 大学の Flavien Hirsch 博士と Nicolas Brunner 准教授との共同研究である。[担当：Quintino]

5.2.5 量子多体系の量子情報的解析

一次元開放系の定常状態のマルコフ性

本研究では、局所的かつマルコフ的な時間発展を行う一次元開放系に対し、その唯一の定常状態が持つ量子情報的な多体相関について解析を行った。我々は、(1) 系が十分早く定常状態へ緩和する (2) 時間発展を記述する Liouvillian がフラストレーションを持たない　という状況に対し、定常状態が常に空間的なマルコフ鎖を用いてよく近似できることを示した。この結果はまた、定常状態が近距離相互作用しか持たないことを定量的に表しており、古典計算機で効率よく記述できることの証明を与える。[担当：加藤]

行列積演算子を用いた二次元系のエンタングルメントの解析

本研究では、二次元量子系のトポロジカルに自明な秩序相にある基底状態に対し、どのような場合に非自明なトポロジカル・エンタングルメント・エン

トロピー（TEE）を持つのか（あるいは持たないのか）を解析した。基底状態が非トポロジカル秩序相にある場合、TEE の値は環状領域の境界の擬一次元的領域だけから求められる。我々は、この一次元系上の状態を表す密度行列を、行列積演算子（Matrix Product Operator, MPO）と呼ばれるクラスの演算子で表すことで解析を行った。（並進対称な）MPO は、ある単一のテンソルによって構成され、量子多体状態を効率よく記述する。我々は、具体的な非トポロジカル秩序相に対して数値計算を行うことで、MPO のテンソルから構成される、ある特別な行列の固有値が TEE の非自明な値と関わっていることを検証した。この研究は、米国 California 工科大学の Burak Sahinoglu 博士及び Fernando Brandao 教授との共同研究である。[担当：加藤]

トポロジカル秩序相のエントロピー的秩序変数

本研究では、トポロジカル秩序相の多体相関を正しく測る新たな関数の提案を行なった。先行研究により、一般の可換な二次元単距離ハミルトニアン系に対し、環状領域に作用する Wilson loop の作用素代数を構成する方法が示されている。この Wilson loop に対応した作用素は、トポロジカル秩序相特有の準粒子励起に対応している。この作用素を元に多体相関を定量化する関数があれば、それはトポロジカル秩序相のみで非自明な値を持つ。そのような関数としてはこれまでに TEE が用いられてきたが、この関数は秩序相のすべての状態に対する普遍性を持たないことが知られている。我々は、TEE に代わり、新たに基底状態の環状領域における（相対）エントロピーに基づいた関数を定義した。さらに、この関数は以下の三つの性質を持つことを示した。（１）非トポロジカル秩序相では常にゼロとなり、非トポロジカル秩序相では正の値をとる（２）同じ相にある基底状態に対しては同じ値をとる（３）トポロジカル秩序相のよく知られたモデルである Toric code モデルや Quantum double モデルの基底状態においては、値が TEE と一致する。本研究は、ドイツ Aachen 工科大学の Pieter Naaijkens 博士との共同研究である。[担当：加藤]

＜報文＞

(原著論文)

[1] Flavien Hirsch, Marco Túlio Quintino, Tamás Vértesi, Miguel Navascués, and Nicolas Brunner, “Better local hidden variable models for two-qubit Werner states and an upper bound on the Grothendieck constant KG(3)”, *Quantum* **1**, 3 (2017)

[2] Yuichiro Matsuzaki, Shojun Nakayama, Akihito Soeda, Shiro Saito, and Mio Murao, “Projective measurement of energy on an ensemble of qubits with unknown frequencies”, *Phys. Rev. A* **96**, 062331 (2017)

[3] Eyuri Wakakuwa, Akihito Soeda, and Mio Murao, “The Cost of Randomness for Converting a Tripartite Quantum State to be Approximately Recoverable”, *IEEE Trans. on Information Theory* **63**, 5360 (2017)

[4] Eyuri Wakakuwa, Akihito Soeda, and Mio Murao, “A Coding Theorem for Bipartite Unitaries in Distributed Quantum Computation”, *IEEE Trans. on Information Theory* **63**, 5372 (2017)

[5] S. M. Barnett, A. Beige, A. Ekert, B. M. Garraway, C. H. Keitel, V. Kendon, M. Lein, G. J. Milburn, H. M. Moya-Cessa, M. Murao, J. K. Pachos, G. M. Palma, E. Paspalakis, S. J. D. Phoenix, B. Piraux, M. B. Plenio, B. C. Sanders, J. Twamley, A. Vidiella-Barranco, and M. S. Kim, “Journeys from Quantum Optics to Quantum Technology”, *Progress in Quantum Electronics* **54**, 19 (2017)

[6] Hayata Yamasaki, Akihito Soeda, and Mio Murao, “Graph-associated entanglement cost of a multipartite state in exact and finite-block-length approximate constructions” *Phys. Rev. A* **96**, 032330 (2017)

[7] Sunho Kim, Juncheng Wang, Asutosh Kumar, Akihito Soeda, and Junde Wu, “Logically reversible measurements: Construction and application”, *Phys. Lett. A* **381**, 3460 (2017)

[8] Seiseki Akibue, Masaki Owari, Go Kato, and Mio Murao, “Entanglement-assisted classical communication can simulate classical communication without causal order”, *Phys. Rev. A* **96**, 062331 (2017)

[9] Flavien Hirsch, Marco Túlio Quintino, Nicolas Brunner, “Quantum measurement incompatibility does not imply Bell nonlocality”, *Phys. Rev. A* **97**, 012129 (2018)

(学位論文)

[10] 新保厚、「Higher-order quantum computation for equivalence determination of unitary operations」、博士論文

[11] 董青秀雄、「Quantum implementability of maps and supermaps」、 修士論文

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[12] Marco Túlio Quintino, “Open questions on Bell Nonlocality, EPR-Quantum Steering, and measurement compatibility”, *Quantum Information*, Benasque, Spain, June 2017

[13] Shojun Nakayama, Akihito Soeda, and Mio Murao, “Adiabatic quantum computation and Grover search applied to higher-order quantum operations”, *The 17th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2017)*, Singapore, Singapore, September 2017 (poster)

[14] Shojun Nakayama, Akihito Soeda, and Mio Murao, “Quantum algorithm for universal implementation of projective measurement of energy”, *Internaitonal Workshop on Hybrid Quantum Systems 2017*, Zaocho, Japan, September 2017

[15] Jisho Miyazaki, Akihito Soeda, and Mio Murao, “Universal complex conjugation of quantum states and unitaries: Implementation algorithm and implications”, *The 21th Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2018)*, Delft, Netherland, January 2018 (poster)

[16] Atsushi Shimbo, Akihito Soeda, and Mio Murao, “Higher order quantum computation for equivalence determination of unitary operations”, *The 21th Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP2018)*, Delft, Netherland, January 2018 (poster)

招待講演

[17] Marco Túlio Quintino, “Genuine n-wise Measurement Incompatibility and Device Independent Certificates of Incompatibility”, *FQXi Workshop: Quantum Incompatibility*, Maria Laach, Germany, August 2017

[18] Mio Murao, “Higher order quantum operations of unitaries and their implications”, *The 17th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2017)*, Singapore, Singapore, September 2017

(国内会議)

一般講演

[19] 董青秀雄、仲山将順、添田彬仁、村尾美緒、「Exact controllization of unitary operation with fractional queries」、 新学術領域「ハイブリッド量子科学」第 5 回領域会議, 大阪府大阪市, 2017 年 10 月（ポスター）

[20] 坂井亮介、添田彬仁、村尾美緒、「Robust control of two-qubit gates in Hamiltonian systems」、 新学術領域「ハイブリッド量子科学」第 6 回領域会議、神奈川県厚木市、2018 年 2 月（ポスター）

[21] 山崎隼汰、村尾美緒、「Entanglement cost of distributed quantum encoding/decoding」、新学術領域「ハイブリッド量子科学」第 6 回領域会議、神奈川県厚木市、 2018 年 2 月（ポスター）

[22] 山崎隼汰、村尾美緒、「Entanglement cost of distributed quantum encoding/decoding」、第 25 回量子情報関東 Student Chapter 研究会、東京都目黒区、2018 年 3 月（ポスター）

[23] 宮崎慈生、添田彬仁、村尾美緒、「ユニタリ量子操作の複素共役化：量子アルゴリズムとその帰結」、日本物理学会第 73 回年次大会、千葉県野田市、2018 年 3 月

招待講演

[24] 添田彬仁、「高階量子情報処理の最近の展開」、第 37 回量子情報技術委員会、埼玉県さいたま市、2017 年 11 月

[25] 添田彬仁、「量子情報理論入門」、ハイブリッド量子科学大規模若手会、東京都千代田区、2018 年 1 月

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。私たちは、スピノル BEC におけるトポロジカル励起や粗視化ダイナミクス、人工的な散逸による非ユニタリ・ダイナミクス、原子間相互作用の強さを制御するもとでの Efimov 状態や不純物問題、人工ゲージ場中での（量子）ホール効果、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、測定結果からのハミルトニアン推定などの研究を行っている。

5.3.1 冷却原子気体

ゼノ・ホール効果

量子ゼノ効果とは測定を頻繁に行った場合、或いは強い散逸がある場合において、波動関数のダイナミクスが系のヒルベルト空間の部分空間に閉じ込められる現象である。量子ゼノ効果の鍵となるアイディアは実はフォン・ノイマンによって指摘されており、連続的な射影測定により 2 つの量子状態間を確率 1 で遷移させることができることが明らかにされていた。本研究では、近年冷却原子気体で発達した人工ゲージ場と量子開放系の技術によりスピン状態の量子ゼノ効果をスピン軌道相互作用と組み合わせ、フォン・ノイマンのアイディアを実空間の波束の輸送に応用できることを明らかにした。この「ゼノ・ホール効果」は異常ホール効果の量子開放系での対応物と言うべきものであり、バンド分散のエネルギーの虚部がギャップを持つため波束は非自明なベリー曲率を持つバンドに閉じ込められ、ポテンシャル勾配下では非自明なベリー曲率によりポテンシャル勾配に垂直な方向に波動関数が移動する。さらに閉じ込められるバンドがフラットな分散関係を持つために、波束が壁にぶつかると再帰的な反射が起こる（入射方向に反射される）ことも明らかにした。論文では光格子中の冷却原子気体でのゼノホール効果の実装方法についても議論した。[8]

パリティ・時間対称な系における量子臨界現象

理想的な孤立量子系に散逸や流入を導入し連続観測を行う事で非ユニタリ系の研究が可能となる。研究 [10] では、観測の非ユニタリ性により引き起こされる新奇な多体臨界現象について研究を行った。特に、サイン-ゴルドン模型をパリティ・時間 (PT) 対称な非エルミート系に拡張することで、開放系特有の新しいくりこみ群固定点が発現する事、および c 定理を破る特異なくりこみ群の流れが生じる事を、くりこみ群解析と数値計算（厳密対角化・iTEBD）により明らかにした。研究 [13] では、PT 対称な量子開放系における情報の流れについて研究を行った。PT 対称性が破れていない領域では環境に流れた情報が完全に回復すること、および破れた領域では情報が一方向的に流れることを示した。また、この二つの相の間の転移点付近で系が臨界的なダイナミクスを示す事を指摘した。

BEC 中の不純物の示す普遍性

スケール不変な相互作用を持つユニタリー・フェルミ気体は、冷却原子気体から希薄な中性子物質までを説明する普遍的なモデル物質であり、特に基底状態の熱力学を定める Bertsch パラメータの決定は大きな潮流を成してきた。しかし、ユニタリー・ボース気体においては、Efimov 効果によってスケール不変性が破れ、多くの束縛状態を持ちうるため、多体系の持つ普遍性の理解は進んでいない。本研究では、弱く相互作用するボース気体と強く相互作用する不純物が成すボース・ポーラロンの基底状態について研究を行った。特に、3 つの理論模型による計算を比較し、エネルギーが Efimov 効果を特徴づける 3 体パラメータの普遍的な関数となることを示した。[20]

磁気ポーラロンの多体干渉

冷却原子気体に低密度の異なる種類の原子気体を導入する事で制御された量子不純物系の研究が可能となる。本研究では 2 成分 BEC に不純物原子を導入した系を時間依存の変分法により解析し、多体 Ramsey 干渉により磁気ポーラロンの実時間ダイナミクスが観測可能である事を示した。特に、従来の固体物質中では到達困難な強相関領域において、多体束縛状態の形成に伴う自励振動現象など磁気不純物が発現する新しい非平衡ダイナミクスを明らかにした。本成果は Nature Physics 誌の Research highlight [Nat. Phys. **14**, 206 (2018)] でも取り上げられた。[22]

一次元スピノル BEC の普遍的粗視化ダイナミクス

極低温冷却原子気体は、外部環境から隔絶した孤立量子系として振る舞うとともに、粒子数密度が希薄であるため非平衡ダイナミクスを実時間観測することが可能である。そのため、孤立量子系の非平衡現象の普遍的性質を探求するのに非常に適した実験系である。本研究は、位相欠陥が支配的な緩和現象である粗視化ダイナミクスの理論研究を極低温冷却原子気体を舞台として行った。もともと、粗視化ダイナミクスはエネルギーが散逸する古典開放系で精力的に研究が行われており、そのダイナミクスは幾つかの普遍性クラスに分類されることが知られている。本研究では、エネルギーが保存する孤立系に特有の普遍性クラスが存在することを 1 次元スピン 1 スピノル Bose-Hubbard 模型を用いて、解析・数値的に明らかにした。[21]

トポロジカル励起間のトポロジカルな影響

近年冷却原子気体や磁性体、超伝導体において、渦やスカーミオンなどの多彩なトポロジカル励起を生成・操作する技術が発達してきている。理論的にも渦とトポロジカル励起の間にはトポロジカルに非自明な相互作用（トポロジカルな影響）が存在し、トポロジカル励起が渦の周りを回るとそのトポロジカルチャージが変化することが明らかにされていた。しかしながら、内部自由度のある系などでは多彩なトポロジカル励起が現れるため、トポロジカルな影響の存在条件とその種類を系統的に調べることは難しかった。我々はトポロジカルチャージを特徴付けるホモトピー群を一般的に計算する公式を開発し、一般の渦とトポロジカル励起の間に非自明なトポロジカルな影響が存在するための条件を明らかにした。また SU(3) ハイゼンベルグ模型において、3 要素の置換群で特徴付けられる新しいトポロジカルな影響が存在することを明らかにした。[7]

光格子中の強磁性スピン 1 ボース気体

近年、スピン自由度を持った冷却原子が、スピン自由度と位置自由度の協奏を探究する場として、注目を集めている。この文脈において、光格子中の反強磁性的相互作用をするスピナーボゾンが、そのスカラーボゾンとは著しく異なる振舞いから、広く研究されてきた。一方、強磁性スピナーボゾンは、外部磁場がない場合にはスカラーボゾンと大きな違いを示さないことから、詳しく調べられていなかった。しかし、超流動相平均場理論からは、強磁性相互作用と外部磁場の競合により、様々な量子相が現れることが示唆されていた。本研究では、強磁性相互作用する光格子中のスピナーボゾン系の外部磁場下での振舞いを調べた。手法としてはサイト分断平均場理論を用い、基底状態と非零温度での相図を得た。相図では、従来の Mott 絶縁体-超流動相間の転移に加えて、超流動相内部にも polar 相と broken-axisymmetry 相 (BA 相) の 2 つの相の間の転移が見られた。更に、BA 相と他の相の間の転移は、相境界の一部で一次転移になることを見出した。これは、外部磁場がない場合には 2 次転移しか見られないことと対照的である。[11]

5.3.2 量子論・統計力学と情報理論の融合

キャビティおよび回路 QED における離散時間結晶

周期 T で駆動されているにもかかわらず、相互作用によって周期 nT（$n = 2, 3, ...$）を持つ物理量の振動が安定化されるような量子多体系を離散時間結晶と言う。離散時間結晶はこれまでイオントラップやダイヤモンド窒素-空孔中心など孤立量子系でのみ実現されており、開放系では不安定になると考えられていた。我々は、共振器量子電磁力学系で実現されている散逸のあるディッケモデルを周期的に駆動した場合の時間発展を考えた。その結果、原子数が非常に多い場合は半古典的な分岐を反映して、離散時間結晶を含む幾つかのダイナミカル相が安定化されることを発見した。また、原子数が有限で量子揺らぎが強い場合でも、相互作用が強い場合に限り、離散時間結晶の相が散逸によって指数的に長い時間まで安定化されることを見出した。[16]

ほとんどの少数多体物理量の非典型性

近年、孤立量子系のユニタリー発展のみから統計力学を正当化する試みが実験・理論の両面で進展している。特に、熱平衡状態への緩和の必要条件として eigenstate thermalization hypothesis (ETH) という仮説が注目されている。ETH は「小さなエネルギーシェル内では、その中に属するエネルギー固有状態で物理量を挟んだ期待値がほぼ等しい」という仮説で、多くの非可積分系と few-body の物理量について数値的に確認されている。典型性の議論を仮定すれば、エネルギーシェル内の物理量の固有状態期待値の差は系のサイズとともに指数的に小さくなり、ETH を正当化することができる。一方我々はいくつかの仮定のもと、few-body の相互作用を持つハミルトニアンの系でランダムな few-body の物理量を選ぶと、そのほとんどに対して物理量の固有状態期待値の差の最大値は指数的には小さくならないことを示した。我々の結果は、実際に興味のある few-body ハミルトニアンと物理量のセットアップでは、従来の典型性の議論による ETH の正当化が適用できないことを示唆する。[23]

ハミルトニアン推定における限界

量子系の推定において、エンタングルメントによる並列化を用いると効率的な推定が可能であり、これは量子度量衡における Heisenberg 限界として知られている。本研究では、多数の未知パラメーターを含むハミルトニアンを推定するための時間的コストを、変数の数やヒルベルト空間の次元といったハミルトニアンの複雑さに対するスケーリング則として評価した。具体的には、Fisher 情報量を用いた情報幾何学的な理論から時間的コストの下界を、実際に構成可能なアルゴリズムを用いて時間的コストの上界を導いた。特筆すべきことに、ハミルトニアンの複雑さによらず、エンタングルメントによる並列化は同程度に有効となることが示された。[17]

＜受賞＞

[1] 川口由紀: 第 21 回久保亮五記念賞、井上科学振興財団、2017.10.7.

[2] 藤本和也: 第 34 回井上研究奨励賞、井上科学振興財団、2018.2.2.

[3] 沙川貴大: 第 5 回ヤマト科学賞、ヤマト科学株式会社、2018.3.7.

[4] 村下湧音: 平成 29 年度理学系研究科研究奨励賞 (博士課程)、東京大学、2018.3.

＜報文＞

(原著論文)

[5] M. Nakagawa and S. Furukawa: Bosonic integer quantum Hall effect as topological pumping, Phys. Rev. B **95**, 165116 (2017). Editors' suggestion.

[6] T. Y. Saito and S. Furukawa: Devil's staircases in synthetic dimensions and gauge fields, Phys. Rev. A **95**, 043613 (2017).

[7] S. Higashikawa and M. Ueda: Influence of topological constraints and topological excitations: Decomposition formulas for calculating homotopy groups of symmetry-broken phases, Phys. Rev. B **95**, 134520 (2017).

[8] Z. Gong, S. Higashikawa, and M. Ueda: Zeno Hall Effect, Phys. Rev. Lett. **118**, 200401 (2017). Editors' suggestion.

[9] K. Kawabata, R. Kobayashi, N. Wu, and H. Katsura: Exact zero modes in twisted Kitaev chains, Phys. Rev. B **95**, 195140 (2017).

[10] Y. Ashida, S. Furukawa, and M. Ueda: Parity-time symmetric quantum critical phenomena, Nat. Commun. **8**, 15791 (2017).

[11] K. H. So and M. Ueda: Strongly spinor ferromagnetic Bose gases, Phys. Rev. A **96**, 023628 (2017).

[12] Y. Murashita, Z. Gong, Y. Ashida, and M. Ueda: Fluctuation theorems in feedback-controlled open quantum systems: Quantum coherence and absolute irreversibility, Phys. Rev. A **96**, 043840 (2017).

[13] K. Kawabata, Y. Ashida, and M. Ueda: Information Retrieval and Criticality in Parity-Time-Symmetric Systems, Phys. Rev. Lett. **119**, 190401 (2017).

[14] Y. O. Nakagawa and S. Furukawa: Capacity of entanglement and the distribution of density matrix eigenvalues in gapless systems, Phys. Rev. B **96**, 205108 (2017).

[15] S. Furukawa and M. Ueda: Quantum Hall phase diagram of two-component Bose gases: Intercomponent entanglement and pseudopotentials, Phys. Rev. A **96**, 053626 (2017).

[16] Z. Gong, R. Hamazaki, and M. Ueda: Discrete Time-Crystalline Order in Cavity and Circuit QED Systems, Phys. Rev. Lett. **120**, 040404 (2018).

[17] N. Kura and M. Ueda: Finite-error metrological bounds on multiparameter Hamiltonian estimation, Phys. Rev. A **97**, 010201 (2018).

[18] N. Tsuji, T. Shitara, and M. Ueda: Out-of-time-order fluctuation-dissipation theorem, Phys. Rev. E **97**, 012101 (2018).

[19] E. Kaminishi, T. Mori, T. N. Ikeda, and M. Ueda: Entanglement prethermalization in the Tomonaga-Luttinger model, Phys. Rev. A **97**, 013622 (2018).

[20] S. M. Yoshida, S. Endo, J. Levinsen, and M. M. Parish: Universality of an Impurity in a Bose-Einstein Condensate, Phys. Rev. X **8**, 011024 (2018).

[21] K. Fujimoto, R. Hamazaki, and M. Ueda: Unconventional Universality Class of One-Dimensional Isolated Coarsening Dynamics in a Spinor Bose Gas, Phys. Rev. Lett. **120**, 073002 (2018).

[22] Y. Ashida, R. Schmidt, L. Tarruell, and E. Demler: Many-body interferometry of magnetic polaron dynamics, Phys. Rev. B **97**, 060302(R) (2018).

[23] R. Hamazaki and M. Ueda: Atypicality of Most Few-Body Observables, Phys. Rev. Lett. **120**, 080603 (2018).

[24] J. Bengtsson, M. Nilsson Tengstrand, A. Wacker, P. Samuelsson, M. Ueda, H. Linke, and S.M. Reimann: Quantum Szilard Engine with Attractively Interacting Bosons, Phys. Rev. Lett. **120**, 100601 (2018).

[25] Y. Masuyama, K. Funo, Y. Murashita, A. Noguchi, S. Kono, Y. Tabuchi, R. Yamazaki, M. Ueda, and Y. Nakamura, Nat. Commun. **9**, 1291 (2018).

(解説)

[26] M. Tsubota, K. Fujimoto, and S. Yui: Numerical Studies of Quantum Turbulence, J. Low. Temp. Phys. **188**, 119 (2017).

(会議抄録)

[27] 久良尚任: 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. 数理解析研究所講究録 2059「量子システム推定の数理」所収, pp. 130–139 (2017).

(学位論文)

[28] Yuto Murashita: Fluctuation theorems under divergent entropy production and their applications for fundamental problems in statistical physics (博士論文).

[29] Tomohiro Shitara: Geometric Approach to Nonequilibrium Statistical Mechanics (博士論文).

[30] Shuhei M. Yoshida: Theoretical Study on Universal Few-Body Effects in Ultracold Atomic Gases (博士論文).

[31] Takumi Yoshino: Collective modes of vortex lattices in two-component Bose-Einstein condensates (修士論文).

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[32] Y. Ashida: Parity-time-symmetric quantum critical phenomena, The 19th International Conference on Recent Progress in Many-Body Theories, Pohang, Korea, 2017.6.27.

[33] S. Higashikawa: Topological catalysis: continuous production of topological solitons assisted by topological defects, The 26th annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'17), Kazan, Russia, 2017.7.17.

[34] Y. Ashida: Quantum many-body phenomena under continuous observation, Quantum Science and Technology Workshop, Boston, USA, 2017.7.25.

[35] M. Ueda: Quantum many-body dynamics and critical phenomena under continuous observation, Information Engines at the Frontiers of Nanoscale Thermodynamics, Telluride Intermediate School, Telluride, Colorado, USA, 2017.8.6-14.

[36] S. Furukawa: Magnetic properties of volborthite determined by a coupled-trimer model, 1st Asia Pacific Workshop on Quantum Magnetism (APWQM2017), Seoul, Korea, 2017.8.28-30.

[37] S. Furukawa: Quantum critical phenomena under continuous observation, Trends in Theory of Correlated Materials (Swiss-Japan Workshop TTCM2017), Tsukuba, 2017.9.10-13.

[38] M. Ueda: Dynamics of continuously monitored quantum many-body systems, Quantum Optix IX Conference, Hotel Gdansk Posejdon, Poland, 2017.9.17-23.

[39] M. Ueda: Quantum many-body dynamics under continuous observation, Quantum Thermodynamics: Thermalization and Fluctuations (QTTF2017), YITP, Kyoto Univ., Kyoto, 2017.9.26-30.

[40] Y. Ashida: Quantum many-body phenomena under continuous observation, The 2nd Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold atoms, Univ. of Tokyo, Tokyo, 2017.10.2-3.

[41] Z. Gong: Nonequilibrium dynamics and phases in open quantum systems, The 2nd Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold atoms.

[42] M. Ueda: Zeno Hall Effect, ENS-UT Workshop on Physics 2017, Univ. of Tokyo, Tokyo, 2017.11.15-16.

[43] S. Furukawa: Entanglement entropy and spectra in topological phases, Topological Science Symposium 2017, Hiyoshi Campus, Keio Univ., Yokohama, 2017.11.21-22.

[44] M. Ueda: Zeno Hall Effect, Topological Science Symposium 2017.

[45] M. Ueda: Zeno Hall Effect and Spin Hall Effect with Space Inversion Symmetry, Workshop on Long-Range Interaction in Atomic Systems: Magnetic Dipoles, Rydberg Atoms and Ions , IFSC Institute of Physics of São Carlos, São Carlos, Brazil, 2017.12.3-10.

[46] M. Ueda: Zeno Hall Effect, The 2nd CEMS International Symposium on Dynamics in Artificial Quantum Systems (DAQS2018), Research Center for Advanced Science and Technology (RCAST), Univ. of Tokyo, Tokyo, 2018.1.15-17.

[47] M. Ueda: Quantum many-body dynamics under continuous observation, MPQ Colloquium, MPQ, Munich, Germany, 2018.1.21-25.

[48] M. Ueda: Atypicality of most few-body observables, Quantum Many-Body Systems Far from Equilibrium: Quench Dynamics, Thermalisation, and Many-Body Localisation, National Institute for Theoretical Physics in Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa, 2018.3.11-16.

一般講演

[49] S. M. Yoshida, and M. Ueda: Universal Properties in a Fermi Gas with a Resonant p-Wave Interaction, Obergurgl, Austria, 2017.4.10-13.

[50] Y. Ashida, S. Furukawa and M. Ueda: Parity-time-symmetric quantum critical phenomena, International Conference on Topological Materials Science 2017 (TopoMat2017), Tokyo Tech, Tokyo, 2017.5.9-13. Poster Award (Bronze Prize).

[51] K. Kawabata, R. Kobayashi, N. Wu, and H. Katsura: Majorana zero modes without edges, TopoMat2017. Poster Award (Bronze Prize).

[52] K. Fujimoto, R. Hamazaki, and M. Ueda: Coarsening dynamics of spin domains in a one-dimensional spin-1 spinor Bose gas, TopoMat2017. Poster Preview Award.

[53] S. Higashikawa and M. Ueda: Topological catalysis: continuous production of topological solitons assisted by topological defects, TopoMat2017. Poster Preview Award.

[54] S. Furukawa and M. Ueda: Quantum Hall phase diagram of two-component Bose gases, TopoMat2017.

[55] Z. Gong, S. Higashikawa and M. Ueda: Zeno Hall Effect, TopoMat2017.

[56] Y. Ashida, S. Furukawa and M. Ueda: Parity-time-symmetric quantum critical phenomena, Non-Hermitian Hamiltonians in Physics: Theory and Experiment, Bad Honnef, Germany, 2017.5.14-19. Best Poster Prize.

[57] K. Kawabata, Y. Ashida, and M. Ueda: Information flow in PT-symmetric systems, Non-Hermitian Hamiltonians in Physics: Theory and Experiment. Best Poster Prize.

[58] K. Fujimoto, R. Hamazaki, and M. Ueda: Coarsening in the one-dimensional spin-1 spinor Bose-Hubbard model, 48th Annual DAMOP Meeting, Sacramento, USA, 2017.6.5-9.

[59] S. Higashikawa and M. Ueda: Non-conservation of topological charges in multiple topological excitations, Gordon Research Conference (Topological material), Hong Kong, China, 2017.6.18-23.

[60] R. Hamazaki, T. N. Ikeda and M. Ueda: Generalized Gibbs ensemble in nonintegrable systems with an extensive number of local symmetries, Sigma Phi 2017 - International Conference on Statistical Mechanics, Corfu, Greece, 2017.7.10-14.

[61] Y. Ashida, S. Furukawa and M. Ueda: Quantum many-body phenomena under continuous observation, Bose-Einstein Condensation Frontiers in Quantum Gases, Sain Feliu de Guixols, Spain, 2017.9.2-8.

[62] K. Fujimoto, R. Hamazaki, and M. Ueda: Universal coarsening dynamics in a one-dimensional spin-1 spinor Bose gas, QTTF2017, Kyoto, 2017.9.27-30.

[63] R. Hamazaki and M. Ueda: Atypicality of most few-body observables, QTTF2017.

[64] Y. Murashita, Z. Gong, Y. Ashida and M. Ueda: Fluctuation theorems in feedback-controlled open quantum systems: quantum coherence and absolute irreversibility, QTTF2017.

[65] Y. Ashida, T. Shi, M.-C. Banuls, J. I. Cirac and E. Demler: Variational principle for quantum impurity systems in and out of equilibrium, DAQS2018, Tokyo, 2018.1.15-17.

[66] Z. Gong, R. Hamazaki and M. Ueda: Discrete Time-Crystalline Order in Cavity and Circuit QED Systems, DAQS2018.

[67] K. Kawabata, Y. Ashida, and M. Ueda: Information Retrieval and Criticality in Parity-Time-Symmetric Systems, DAQS2018.

[68] K. Fujimoto: Isolated coarsening dynamics in a one-dimensional ferromagnetic spinor Bose gas, Finite Temperature Non-equilibrium Superfluid system, Wanaka, New Zealand, 2018.2.19-23.

[69] S. M. Yoshida, S. Endo, J. Levinsen, and M. M. Parish: Universality of an impurity in a Bose-Einstein condensate, Victoria Ultracold Atoms Network Workshop, Melbourne, Australia, 2018.2.27.

[70] R. Hamazaki and M. Ueda: Atypicality of Most Few-Body Observables, APS March Meeting 2018, Los Angeles, USA, 2018.3.5-9.

[71] Y. Murashita, N. Kura and M. Ueda: Transient Fractality as a Mechanism of Emergent Irreversibility in Chaotic Hamiltonian Dynamics, APS March Meeting 2018.

(国内会議)

招待講演

[72] 東川翔、中川大也、上田正仁: ワイルフェルミオンの非断熱なトポロジカルポンプとニールセン・二宮の定理の破れ、熱場の量子論とその応用、京都大学基礎物理学研究所、2017.8.30.

[73] 吉田周平、遠藤晋平、Jesper Levinsen、Meera M. Parish: Bose-Einstein 凝縮体中の不純物が示す普遍性、量子クラスターで読み解く物質の階層構造、東京工業大学大岡山キャンパス、2018.3.30-31.

一般講演

[74] 川畑幸平、蘆田祐人、上田正仁: パリティ・時間対称な量子開放系における情報の回復と臨界性、日本物理学会 2017 年秋季大会、岩手大学上田キャンパス、盛岡、2017.9.21-24. 領域 1 第 6 回学生プレゼンテーション賞.

[75] 吉田周平、遠藤晋平、Meera M. Meera、Jesper Levinsen: ボース・アインシュタイン凝縮体中のポーラロンにおける普遍性、同上. 領域 1 第 6 回学生プレゼンテーション賞.

[76] 蘆田祐人、古川俊輔、上田正仁: 連続観測下の量子臨界現象 I : 超流動-Mott 絶縁体と朝永-Luttinger 液体、同上.

[77] 蘆田祐人、古川俊輔、上田正仁: 連続観測下の量子臨界現象 II : パリティ・時間対称な sine-Gordon 模型、同上.

[78] 蘆田祐人、上田正仁: 連続観測下の多粒子ダイナミクス : 計数統計と Lieb-Robinson 限界、同上.

[79] 濱崎立資、藤本和也、上田正仁: Truncated Wigner 近似による非時間順序相関関数の解析、同上.

[80] 濱崎立資、上田正仁: ほとんどの少数多体物理量の行列要素の非典型性、同上.

[81] 藤本和也、坪田誠、Christoph Eigen、Jinyi Zhang、Raphael Lopes、Nir Navon、Robert Smith、Zoran Hadzibabic: Experimental and numerical studies of a turbulent cascade in a 3D Bose gas、同上.

[82] 藤本和也、濱崎立資、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安定性と量子揺らぎ、同上.

[83] 村下湧音、久良尚任、上田正仁: Loschmidt パラドックス，過渡的フラクタル，絶対不可逆性、同上.

[84] 吉野匠、東川翔、古川俊輔、上田正仁: 人工ゲージ場中の二成分 Bose-Einstein 凝縮体における渦格子の集団励起、同上.

[85] 濱崎立資、藤本和也、上田正仁: 半古典カオス系での異時刻四点相関関数、非平衡物理の最前線－素粒子・宇宙から物性までー、理化学研究所、2017.12.6-8.

[86] 藤本和也: Universality Class of Coarsening Dynamics in an Isolated One-Dimensional Spinor Bose Gas、若手研究会「統計物理学とその周辺」、東京大学本郷キャンパス、2018.3.1-2

[87] 蘆田祐人、Tao Shi, Mari Carmen Banuls, J. Ignacio Cirac, Eugene Demler: 非ガウシアン多体波動関数による不純物系の基底状態・非平衡ダイナミクスの研究、日本物理学会第 73 回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、野田、2018.3.22-25.

[88] 川畑幸平、蘆田祐人、桂法称、上田正仁: 流入・散逸のあるキタエフ鎖におけるパリティ・時間対称性によって誘起されたエッジ状態、同上.

[89] Zongping Gong、濱崎立資、上田正仁: Discrete Time-Crystalline Order in Cavity and Circuit QED Systems、同上.

[90] 古川俊輔、桃井勉: ボルボサイトにおける Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用の効果、同上.

[91] 吉野匠、東川翔、古川俊輔、上田正仁: 人工ゲージ場中の二成分 Bose-Einstein 凝縮体における渦格子の集団励起 II、同上.

[92] 吉野匠、東川翔、古川俊輔、上田正仁: Collective Modes of Vortex Lattices in Two-Component Bose-Einstein Condensates、ImPACT 第 4 回全体会議（量子情報技術ワークショップ）、JST 東京本部別館 1 階ホール、2018.3.27-29.

(セミナー)

[93] 蘆田祐人: Quantum critical phenomena under measurement backaction、羽田野研セミナー、東京大学、2017.4.14.

[94] 濱崎立資: 孤立量子系における熱平衡化現象、根掘り葉掘りセミナー（清水研究室）、東京大学、2017.4.25.

[95] 古川俊輔: ボソンの整数量子ホール状態、第 42 回トポロジカル物質科学セミナー（田仲・川口研）、名古屋大学、2017.5.22.

[96] R. Hamazaki: Atypicality of most few-body observables, iTHES Physics Seminar, RIKEN, 2017.5.29

[97] 川畑幸平: Information Retrieval and Criticality in Parity-Time-Symmetric Systems、羽田野研セミナー、東京大学、2017.7.7.

[98] 設楽智洋: 線形応答理論に基づく量子 Fisher 情報量の決定法、羽田野研セミナー、東京大学、2017.7.14.

[99] S. Higashikawa: Topological pump of Weyl fermion and Floquet chiral magnetic effect、京都大学基礎物理学研究所凝縮系物理研究室、2017.9.14.

[100] Y. Ashida: Quantum critical phenomena under continuous observation, The 24-th Quantum simulation meeting, RIKEN CEMS, 2017.9.15

[101] Z. Gong: Discrete Time-Crystalline Order in Cavity and Circuit QED Systems、NICT、2017.10.30

[102] 濱崎立資: 非時間順序相関関数とその半古典的解析、巨視的量子物理プロジェクト、NICT、2017.10.30

[103] 藤本和也: Turbulent cascade in a 3D ultracold Bose gas、統計力学セミナー、東京大学本郷キャンパス、2017.11.20.

[104] 濱崎立資: 局在した初期状態での量子カオスにおける三点非時間順序相関関数の支配性、矢上統計物理学セミナー（齊藤研究室）、慶應大学、2017.12.20.

[105] 東川翔、中川大也、上田正仁: フロケカイラル磁気効果、茨城大学理学部物理学領域物性セミナー、2018.1.23.

[106] S. Furukawa: Entanglement entropy and spectra in topological phases, Seminar of Keio Topological Science Project, Hiyoshi Campus, Keio Univ., Yokohama, 2018.1.31.

[107] K. Kawabata: Open Topological Systems: Non-Hermiticity and Topology, Condensed Matter Seminar, Kyoto Univ., 2018.2.8.

[108] Y. Ashida: Theoretical studies on open quantum many-body phenomena, ITAMP Lunch Seminar, Harvard Univ., 2018.2.14

[109] Y. Ashida: Solving quantum impurity systems in and out of equilibrium with variational approach, Harvard Condensed Matter Theory Seminar, Harvard Univ., 2018.2.16

[110] R. Hamazaki: Atypicality of most few-body observables, Condensed Matter Theory Center, Univ. of California, Berkeley, 2018.3.29.

(その他)

[111] 川畑幸平、蘆田祐人、上田正仁: パリティ・時間対称な量子開放系における情報の回復と臨界性、第 62 回 物性若手夏の学校、長良川ホテルパーク、2017.7.25-29. 優秀ポスター賞（総合第 2 位）.

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、こちらは一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。また、2017 年 12 月に京都大学基礎物理学研究所において国際会議”International symposium on cosmology and particle astrophysics: CosPA2017” を開催しました。

5.4.1 初期宇宙論

Higgs-R^2 インフレーション

我々は、Higgs 場と R^2 項の寄与を組み合わせたモデルを考え、質量階層性の下で曲率摂動のパワースペクトルを有効場の理論によって求めた。観測による制限を加味すると non-minimal coupling と scalaron 質量の間に特別な関係が必要となり、特に non-minimal coupling が大きい場合においてこのモデルは scalaron が有効的に質量を持つような R^2 インフレーションと見做せることを示した [31, 35]。

非等方インフレーション

Generalized G-inflation に存在するアインシュタインテンソルとスカラー場との微分結合項が運動エネルギーの非自明な関数となる場合、非等方膨張を起こすようなインフレーション解があることを見いだした [38]。

G インフレーション後の非対称性生成

運動エネルギーが一定値を保つことによって起こる G インフレーションはインフレーション後もシフト対称性が保たれていると、スカラー場は徐々に減速しながらも増大し続ける。このスカラー場の微分がバリオン数やダークマターのカレントと結合していると、自発的にバリオン非対称や非対称ダークマターを生成可能であることを示した [46, 51]。

ストカスティックインフレーションにおける一般化された熱力学の第二法則

ストカスティックインフレーションの描像によると、加速膨張率 H は、物質場の熱的な量子揺らぎの影響で、ストカスティックに揺らぐことが知られている。この場合、有限の確率でインフレーション宇宙の Bekenstein エントロピーは減ることとなり、愚直には熱力学の第二法則が破れ得ることになる。しかし、加速膨張宇宙における量子揺らぎの量子デコヒーレンスを考慮すると、量子性の喪失によるエントロピー生成が、Bekenstein エントロピーの減少分を相殺し、全系のエントロピーは減少しないことを示した [2]。

曲がった時空における物理的な繰りこみ条件

我々は [3] において、曲がった時空の中で背景電場が誘起する電流の計算のために慣習的に用いられてきた繰りこみ条件が、物理的に妥当だと考えられる条件を満たさないことを見出した。つまり、荷電粒子が重い極限での、誘導電流の解析的な振る舞いが、半古典的な解析と一致しない、ということである。半古典的な解析によれば、ド・ジッター時空において荷電粒子の質量 m が大きい極限で、誘導電流の値は $\exp(-2\pi m/H)$ で抑えられる（H は Hubble 定数）。一方で、解析的な計算の結果には $\sum_n c_n m^{-n}$ という形の摂動的な項が現れる。そこで、本研究では摂動的な部分の寄与をすべて取り除き、非摂動部分を取り出す繰りこみ条件 (maximal subtraction) を提案し、その物理的な帰結を調べた。

負の電気伝導とその物理的起源

上述の新しい繰りこみ条件による解析の結果、我々は de Sitter 時空中の弱い一様な背景電場が負の電気

伝導を引き起こし、反遮蔽効果が起こることを見出した。我々はこのことについて説明を与えるべく、de Sitter 時空の中に静止する観測者が見る地平面上に電場の効果で正味の電荷密度生成が起こる、という仮説を与えた。我々は、この仮説と量子論的な粒子生成の議論に基づいて、実際に系に生じる電流を計算し、これが負になる、つまり電気伝導度が負であることを示した。また、この電流の計算結果が、上述の曲がった時空の場の理論における計算と一致することを示した。我々は、地平面が電場の助けを借りることで、量子論的な揺らぎから、（エントロピーを捨てることで）向きを持った電荷の流れを作り出す働きが、熱力学的な Maxwell の悪魔に例えられることを指摘した [69, 82]。

アクシオン電気力学のシミュレーション

我々は有限差分法によるアクシオン電気力学の効率的なシミュレーション方法を構築した。スタッガードグリッドを用いる Yee アルゴリズムをアクシオンが含まれるよう拡張することで、エネルギー保存や拘束方程式を高精度で実現できるようにした。構築したシミュレーション方法を初期宇宙に適用し、パラメータ共鳴による電磁場の増幅がアクシオン暗黒物質存在量に与える影響や [50, 53] 、アクシオンによる初期磁場生成の可能性 [37] について調べた。

自己加熱する半対消滅暗黒物質

暗黒物質の安定性が Z_2 よりも大きな離散対称性で保証される場合一般に半対消滅が起こりうる。そのような半対消滅する暗黒物質は、標準模型粒子が作るプラズマと必ずしも熱平衡にはならない。我々はボルツマン方程式を解くことで、半対消滅する暗黒物質が独自の熱進化を遂げることを示した。十分な自己相互作用がある場合、半対消滅による質量欠損が熱エネルギーに転化される自己加熱が起こる。そのため非相対論的にも関わらず暗黒物質の温度はゆっくり減少し相対論的粒子と同様にふるまうことを示した。独自の熱進化は宇宙構造形成に影響を及ぼし、小さなスケールでの冷たい暗黒物質の予言と観測の不一致を説明する可能性がある。[4]

5.4.2 観測的宇宙論

宇宙マイクロ波背景放射の非等方性の変調

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の温度ゆらぎのスペクトルはほぼスケール不変な形を持っているが、ところどころ大きなズレを示している。とくに WMAP の結果は $\ell = 120$ 付近に統計的に高い優位性を持った振動型の変調を示していた。そこで、Planck の観測結果も同様に解析したところ、やはりこの付近に顕著な変調が、温度ゆらぎ、偏光ゆらぎ双方に見られることがわかった [1]。

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 つの形状関数の和で表せることが明らかになっていた。ひとつは一般相対論においても現れる、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と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 CMB の B モード偏光の 3 点相関をつくるため、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、後者は結合が十分に強いと検出されうる [6]。

暗黒物質ミニハローを用いた短波長原始密度揺らぎの制限

短波長原始揺らぎが、長波長揺らぎの振幅 ($\sim 10^{-5}$) よりも仮に大きな振幅を持つと、そのような揺らぎの暗黒物質成分は早い段階で重力成長によって暗黒物質から成るコンパクトで密度が高いミニハローを作る。暗黒物質としては、有力候補の一つである WIMP(weakly interacting massive particle) を仮定すると、ミニハロー内では暗黒物質同士の対消滅が効率的に生じ、ガンマ線・ニュートリノなどの高エネルギー宇宙線に転換する。短波長原始密度揺らぎの振幅が大きいほど、よりコンパクトで高密度なミニハローになり、その結果放射される高エネルギー宇宙線の量も増えるので、それによって原始密度揺らぎの振幅に上限を課すことができる。今回の解析の結果、幅広い揺らぎの波長に対して、揺らぎの振幅の上限として $10^{-3} \sim 10^{-4}$ が得られた [5]。これは既存の制限よりもかなり強いので、もし将来暗黒物質が WIMP だと確定すると、短波長の原始揺らぎ、即ちインフレーションモデルの絞り込みも大きく進展することを意味している。

ミニハローからの赤方偏移 21cm 輝線の角度相関パワースペクトル

ミニハロー起源の赤方偏移 21cm 輝線は Square Kilometer Array などにより近い将来観測される可能性がある。我々はミニハローからの赤方偏移 21cm 輝線揺らぎの角度相関パワースペクトル及び、それを用いたフィッシャー行列解析による宇宙論パラメータ推定を定式化した。それらの定式化を適用し、ミニハローからの赤方偏移 21cm 輝線観測を用いることで密度ゆらぎのパワースペクトルのスケール依存性が精度よく探査可能になることを示した。[7]

5.4.3 重力理論

有質量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

質量密度がある値よりも大きくなるとスカラー場が自発的対称性の破れを起こし、結果として重力定数が小さくなるタイプのスカラーテンソル理論における中性子星の質量・半径関係を求めた [8, 40, 56, 57]。今回、スカラー場の質量が無限大となる極限で厳密に正しい準解析的手法を編み出し、スカラー場の質量が十分大きい場合に、良い近似で中性子星及びスカラー場のプロファイルを求めることに成功した。そして、同じ核物質状態方程式に対して、中性子星の最大質量は一般相対論のそれよりも大きくなることを示し、ハイペロン問題が重力理論の修正で説明される可能性を与えた。

可逆変換と自由度との関係

高階微分を含んだ理論は通常 Ostrogradsky ゴーストと呼ばれる不安定性を持つが、この問題を回避しつつ高階微分を含むようなスカラーテンソル理論が近年盛んに研究されており、それらの理論は disformal 変換という計量の変換によって互いに結びつくことが明らかとなった。多くの場合 disformal 変換は一対一対応 (可逆変換) なので、この変換により系の自由度は不変となることが予想される。他方、disformal 変換にはスカラー場の微分が含まれているため、変換後の理論は元の理論より高階の微分を含んでおり、両者の等価性はまったく自明ではない。そこで我々は、disformal 変換に限らない一般の可逆変換に対し、変換前後の系の運動方程式の等価性を示すことで、系の物理的自由度が不変であることを示した [9]。

シフト対称性を持つ Horndeski 理論における安定なブラックホール解

Euler-Lagrange 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 Horndeski 理論は、高階微分に伴う Ostrogradsky ゴーストを回避可能な広い理論のクラスを与える。このうち、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は静的であるような興味深いブラックホール解が存在し得る。我々は、スカラー場が動的な場合にブラックホール解が安定となる新たな具体例を与えたほか、特別な場合として Einstein テンソルとの非最小微分結合を有する理論で静的なスカラー場の毛を持った解について既知の安定性条件を再解析し、より詳細な条件を導出した [10]。

Mimetic 重力理論の拡張と宇宙論的摂動

我々は、一般相対論に特異な disformal 変換を施すという mimetic 重力理論の構成法を拡張し、スカラー場の 2 階微分の任意関数を含んだ新しい理論を提案した。さらに、この理論で宇宙論的摂動を調べ、必ずゴーストないし勾配不安定性が現れることを示した [11]。この結果は、既存の DHOST 理論に限らず、Horndeski 理論から disformal 変換で移れないような理論は、総じて宇宙論的摂動の下で不安定になるという示唆を与える。

四脚場形式での重力理論の持つ熱力学的性質

時空に境界があるような状況を考えた場合、一般相対性理論では、ラグランジアンに Gibbons-Hawking term を加えた後で変分を行わなければ、アインシュタイン方程式を正しく導出できないことが知られていた。しかし、テレパラレル重力理論で余分に存在していた表面項は、まさにその Gibbons-Hawking term と等価であることが明らかとなった。従来標準的な重力理論とされてきた一般相対性理論では、時空に境界があるか否かでラグランジアンの形を人為的に変える操作が必要であったが、テレパラレル重力理論にはその必要がない。その意味で、テレパラレル重力理論の利点を明らかにすることに成功した [12]。

5.4.4 重力波

ループ宇宙ひもからの背景重力波

宇宙ひもの振動による背景重力波のスペクトルの計算には、ループひもの質量関数、ループひもの形状分布に理論的不定性が残されていた。今回の研究では、それらの理論的不定性が重力波のスペクトルにどのように影響し、宇宙ひもの線密度への制限がどれだけの不定性を持つのかを定量的に調べた [13]。また、ループひもから高振動数の重力波を放射する機構として、カスプ (cusp) とキンク (kink) の 2 つの機構が知られていたが、キンク同士の衝突というこれまで見過ごされていた機構が存在することを見つけ、ループひもの形状分布によってはこの 3 番目の機構が重力波放射に主要に寄与することも明らかにした。

ブラックホール連星の質量分布を用いた原始ブラックホール仮説の検証

LIGO で見つけたブラックホールが原始ブラックホールであるという仮説を今後の重力波観測で検証する一つの方法を提案した [14]。具体的には、不定性のある原始ブラックホールの質量関数は未知としつつ、連星ブラックホールの合体イベント分布を連星を成す個々のブラックホールの質量の関数として

求めた。そしてその合体イベント分布からある簡単な数学的操作で定義される無次元量が、原始ブラックホール質量関数に依らず普遍的に 1 に非常に近い値をとることとを示した。今後の重力波観測で多数の合体イベントが見つかり、この無次元量を精度良く測定することで、原始ブラックホール説を検証できることが期待される。

原始ブラックホールに関するレビュー

LIGO の重力波検出によって重力波天文学がついに始まった。今後の重力波観測で原始ブラックホールを検証する機運も高まってきていることを踏まえ、重力波天文学との関連に重点を置いた原始ブラックホールに関するレビュー論文を執筆した [15]。また様々な会議や、日本物理学会誌にて原始ブラックホールに関する最近の研究成果の報告を行なった [16, 29, 34, 41, 44, 52, 55]。

＜報文＞

(原著論文)

[1] K. Horiguchi, K. Ichiki and J. Yokoyama, “Revisiting the oscillations in the cosmic microwave background angular power spectra at $\ell \sim 120$ in the Planck 2015 data,” PTEP **2017** (2017) no.9, 093E01

[2] N. Oshita, “The generalized second law of thermodynamics and cosmological decoherence” Physical Review D **97**, 023510 (2018)

[3] T. Hayashinaka and S. Xue, ”Physical renormalization condition for de Sitter QED, ” Physical Review D in press.

[4] A. Kamada, H. J. Kim, H. Kim and T. Sekiguchi, “Self-heating dark matter via the semi-annihilation,” Physical Review Letters in press.

[5] T. Nakama, T. Suyama, K. Kohri, N. Hiroshima, “Constraints on small-scale primordial power by annihilation signals from extragalactic dark matter minihalos,” Phys. Rev. D **97** (2018) no.2, 023539

[6] H. W. H. Tahara and J. Yokoyama, “CMB B-mode auto-bispectrum produced by primordial gravitational waves,” PTEP **2018** (2018) no.1, 013E03

[7] T. Sekiguchi, T. Takahashi, H. Tashiro and S. Yokoyama, “21 cm Angular Power Spectrum from Minihalos as a Probe of Primordial Spectral Runnings,” JCAP **1802**, no. 02, 053 (2018)

[8] S. Morisaki, T. Suyama, “Spontaneous scalarization with an extremely massive field and heavy neutron stars,” Phys. Rev. D **96** (2017) no.8, 084026

[9] K. Takahashi, H. Motohashi, T. Suyama, and T. Kobayashi, “General invertible transformation and physical degrees of freedom,” Phys. Rev. D **95**, 084053 (2017) [arXiv:1702.01849 [gr-qc]].

[10] D. A. Tretyakova and K. Takahashi, “Stable black holes in shift-symmetric Horndeski theories,” Class. Quant. Grav. **34**, 175007 (2017) [arXiv:1702.03502 [gr-qc]].

[11] K. Takahashi and T. Kobayashi, “Extended mimetic gravity: Hamiltonian analysis and gradient instabilities,” JCAP **1711**, 038 (2017) [arXiv:1708.02951 [gr-qc]].

[12] N. Oshita and Y. Wu,“Role of spacetime boundaries in Eisntein’s other gravity” Physical Review D **96**, 044042 (2017)

[13] C. Ringeval, T. Suyama, “Stochastic gravitational waves from cosmic string loops in scaling,” JCAP **1712** (2017) no.12, 027

[14] B. Kocsis, T. Suyama, T. Tanaka, S. Yokoyama, “Hidden universality in the merger rate distribution in the primordial black hole scenario,” Astrophys.J. **854** (2018) no.1, 41

[15] M. Sasaki, T. Suyama, T. Tanaka, S. Yokoyama, “Primordial black holes -perspectives in gravitational wave astronomy-,” Class. Quant. Grav. **35** (2018) no.6, 063001

(国内雑誌)

[16] 日本物理学会誌 72 巻 10 号 723-727 「LIGO で検出された重力波は原始ブラックホールから？」

(学位論文)

[17] 高橋一史: “Systematic Construction of Healthy Gravitational Theories with Higher Derivatives” (博士論文)

[18] 林中貴宏: “Analytical Investigation into Electromagnetic Response of Quantum Fields in de Sitter Spacetime” (博士論文)

(国内解説記事)

[19] 著：A. アイジャス、P. J. スタインハート、A. ローブ、訳：高橋一史、田原弘章、監訳：横山順一、「インフレーション理論は盤石か？」、日経サイエンス、日本経済新聞出版社、2017 年 6 月号、pp 40-49.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[20] J. Yokoyama, “Creation of an inflationary universe in the final stage of black hole evaporation,” PACIFIC2018, Kiroro, Hokkaido, 2018/2/14

[21] J. Yokoyama, “Inflationary universe from a black hole,” Conference on particles and cosmology, Nanyang Technological University, Singapore, 2018/3/5

[22] N. Oshita, “Stochastic inflation and the second law of thermodynamics”, RESCEU Summer School 2017, Yamaguchi, Japan, 2017/7/30

[23] T. Hayashinaka, "A non-perturbative approach to de Sitter QED," RESCEU Summer School 2017, Yamaguchi, Japan, 2017/7/30

[24] K. Takahashi, "Relation between field transformations and physical DOFs in scalar-tensor theories," RESCEU Summer School 2017, Yamaguchi, Japan, 2017/8/1

[25] N. Oshita and J. Yokoyama, "The birth of an inflationary universe in the ultimate fate of an evaporating black hole", COSMO-17, the University Paris, France, 2017/8/28

[26] T. Hayashinaka, "A non-perturbative approach to de Sitter QED," COSMO-17, Paris, 2017/8/28-2017/9/1

[27] K. Takahashi, "Relation between field transformations and physical degrees of freedom in scalar-tensor theories," COSMO-17, Paris, 2017/8/30

[28] Y.-P. Wu, "Inflationary phase transitions in the primordial fluctuations," 2017 NCTS Workshop on Dark Matter, Particles and Cosmos, Donghua University, Taiwan, 2017/10/14

[29] T. Suyama, "PBH binary formation in radiation dominated era", Focus week on primordial black holes, Kavli IPMU, Kashiwa, 2017/11/13-17

[30] K. Takahashi, "Extended mimetic gravity: Hamiltonian analysis and gradient instabilities," JGRG27, Hiroshima, 2017/11/28

[31] M. He, "Higgs-R^2 Inflation", The 27th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan- JGRG27, Saijo, Higashi-hiroshima, Japan, 2017/11/30

[32] Y.-P. Wu, "Inflationary fluctuations with phase transitions," 27th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG27), Hiroshima, 2017/11/30

[33] N. Oshita, "Probing atoms of spacetime with ringdown gravitational waves from a perturbed black hole", JGRG27, Higashi-Hiroshima, Japan, 2017/11/30

[34] T. Suyama, "Primordial black holes in the era of gravitational wave astronomy", Area workshop of "Gravitational Wave Physics and Astronomy: Genesis" Tohoku University, Sendai, 2017/12/7

[35] M. He, "Higgs-R^2 Inflation", CosPA 2017, Kyoto University, Kyoto, 2017/12/12

[36] Y.-P. Wu, "Inflationary fluctuations with phase transitions," CosPA2017, Kyoto University, Kyoto, 2017/12/12

[37] T. Sekiguchi, "Late-time magnetogenesis with dark photon," CosPA2017, Kyoto University, Kyoto, 2017/12/12

[38] H. Tahara, "Anisotropic inflation without a vector field" CosPA2017, Kyoto University, Kyoto, 2017/12/13

[39] N. Oshita, "Spontaneous creation of an inflationary universe out of a black hole," CosPA2017, Kyoto University, Kyoto, 2017/12/13

[40] T. Suyama, "Spontaneous scalarization with an extremely massive field and heavy neutron stars", Gravity@Malta 2018, University of Malta, Malta, 2018/1/22-25

[41] T. Suyama, "Hidden universality in the merger rate of the primordial black hole binaries", Third symposium on "Why does the Universe Accelerate?", Tohoku University, Sendai, 2018/2/10-12

[42] N. Oshita, "Probing microscopic structure of spacetime with ringdown gravitational waves", YKIS2018a Symposium General Relativity -The Next Generation-, Kyoto University, Japan, 2018/2/19-23

[43] K. Takahashi, "Extended mimetic gravity: Hamiltonian analysis and gradient instabilities," YKIS2018a Symposium, Kyoto, 2018/2/21-22

招待講演

[44] T. Suyama, "LIGO and Primordial Black Holes", Conference on Particle Physics, HongKong University of Science and Technology, HongKong, 2017/6/25-30

[45] J. Yokoyama, "Creation of the inflationary universe out of a black hole," International Conference on Gravitation and Cosmology, Ehwa women's university, Seoul, Korea, 2017/7/5

[46] J. Yokoyama, "The Universe after G-inflation," Dark Side of the Universe, IBS CTPU, Daejeong, Korea, 2017/7/13

[47] J. Yokoyama, "Inflation (and dark energy): Large or Small?" 4th Korea-Japan joint workshop on Dark Energy at KMI, Nagoya University, Nagoya, 2017/8/28

[48] N. Oshita, "Creation of an inflationary universe out of an evaporating black hole," NCTS Workshop on Dark Matter, Particles and Cosmos, National Dong Hwa University, Taiwan, 2017/10/16

[49] J. Yokoyama, "Creation of the inflationary universe out of a black hole," The First Symposium of the BRICS Association on Gravity, Astrophysics and Cosmology, Yangzhou University, Yangzhou, China, 2017/10/19

[50] T. Sekiguchi, "Cosmological implications of axion like particle coupled to hidden photon," Workshop on Beyond Standard Model and the Early Universe, Tohoku University, 2017/10/26

[51] J. Yokoyama, "Spontaneous genesis after G inflation" 3rd LeCosPA symposium "Cosmic Prospects", LeCosPA, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 2017/11/28

[52] T. Suyama, "Primordial black holes in the era of gravitational wave astronomy", Third LeCosPA symposium, National Taiwan University, Taipei, 2017/11/27-29

[53] T. Sekiguchi, ”cosmological abundance of axions coupled to hidden photons,” New perspective of light particles, IBS-CTPU, 2017/11/28

[54] J. Yokoyama, “Approaches to inflationary cosmology,” 5th international meeting on frontiers of physics, Kuara Lumpur, 2017/12/8

[55] T. Suyama, “Primordial black holes and gravitational waves”, CosPA2017, Kyoto University, Kyoto, 2017/12/11-15

[56] T. Suyama, “Spontaneous scalarization and heavy neutron stars”, YKIS2018a Symposium “General Relativity - The Next Generation-”, Kyoto University, Kyoto, 2018/2/19-23

(国内会議)

一般講演

[57] 須山輝明、“Mass-radius relation of neutron stars in scalar-tensor theories with spontaneous scalarization”, 新学術「重力波物理学・天文学：創世記」A班合宿研究会、岩松旅館、 仙台市、2017/12/7-9

[58] 大下翔誉、山田將樹、“宇宙の熱的励起と熱力学の第二法則”、日本物理学会 2017 年秋季大会、宇都宮大学、2017/9/13

[59] 田原弘章、横山順一、小林努、西咲音、日本物理学会、「Generalized G-inflation に基づく非等方宇宙における揺らぎの発展」、日本物理学会 2017 年秋季大会、宇都宮大学、2017/9/13

[60] 大下翔誉、Y.-P. Wu、“四脚場で記述された Einstein 重力理論の表面項の本質”、日本物理学会 2017 年秋季大会、宇都宮大学、2017/9/14

[61] 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」、日本物理学会 2017 年秋季大会、宇都宮大学、2017/9/15

[62] 高橋一史、「Extended mimetic gravity: Hamiltonian analysis and gradient instabilities」、第二回若手による重力・宇宙論研究会、京都大学、2018/3/3-4

[63] 大下翔誉、「ringdown 重力波で探る時空の微視的構造」、日本物理学会 2018 年年次大会、東京理科大学、2018/3/22

[64] 関口豊和、「Hidden photon と結合したアクシオン暗黒物質の存在量について」、日本物理学会 2018 年年次大会、東京理科大学、2018/03/23

[65] 小林努、西咲音、田原弘章、横山順一、日本物理学会、「Generalized G-inflation に基づく非等方宇宙の摂動」、東京理科大学、2018/3/25

招待講演

[66] 横山順一、「インフレーションからビッグバンへ」 理研研究会　非平衡物理の最前線　2017/12/8

(セミナー)

[67] 須山輝明、「作用レベルでのゲージ固定について」、日本大学、2017/4/19

[68] Y.-P. Wu, ”Loop contributions to primordial fluctuations: Can these corrections become large?,” Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, 2017/06/08

[69] T. Hayashinaka, ”de Sitter QED and nonperturbative renormalization approach,” ICRANet seminars, Pescara, Italy, 2017/9/5

[70] Y.-P. Wu, ”Inflationary fluctuations with phase transitions,” National Center for Theoretical Science, Taiwan, 2017/09/11

[71] Y.-P. Wu, ”Inflationary fluctuations with phase transitions,” Academia Sinica, Taiwan, 2017/09/13

[72] T. Sekiguchi, ”Cosmological application of axion electrodynamics,” KEK, Japan, 2017/11/02

[73] Y.-P. Wu, ”Inflationary phase transitions in the primordial fluctuations,” Tohoku University, Japan, 2017/11/16

[74] T. Sekiguchi, ”Cosmological abundance of axions coupled to hidden photons”, Tokyo Institute of Technology, Japan, 2017/12/08

[75] 横山順一 “Approaches to inflationary cosmology,” 理研コロキウム　理化学研究所　2017/12/19

[76] 大下 翔誉、「ブラックホール地平面の微視的構造と ringdown 重力波」、理論物理学コロキウム (宇宙)、立教大学、2018/1/23

[77] M. He, “Mass hierarchy in multi-field inflation and Higgs-R^2 inflation”, The University of Tokyo, 2018/2/5

[78] N. Oshita, “Microscopic structure of quantum black holes”, Cosmology and Gravitation Seminar, Perimeter Institute for Theoretical Physics, Canada, 2018/2/6

[79] J. Yokoyama, “Inflationary cosmology,” Max Planck Institute für Astrophysik, 2018/2/7

[80] M. He, “Mass hierarchy in multi-field inflation and Higgs-R^2 inflation”, Hong Kong University of Science and Technology, 2018/2/8

[81] M. He, “Mass hierarchy in multi-field inflation and Higgs-R^2 inflation”, The Chinese University of Hong Kong, 2018/2/9

[82] T. Hayashinaka, ”Maxwell’s demon on the de Sitter horizon,” Thursday Cosmology Seminars at Tufts University, Boston, US, 2018/2/15

(アウトリーチ)

[83] 横山順一、「輪廻する宇宙:ダークエネルギーで満ちた宇宙の将来」　第 17 回関西精神文化研究会、リーガロイヤルホテル大阪　2017/4/20

[84] 横山順一、「爆発の本質」総合討論、東京大学公開講座、安田講堂　2017/6/3

[85] 横山順一、「インフレーション宇宙論の初歩」　サマーチャレンジ、高エネルギー加速器研究所、2017/8/23

[86] Kipp Cannon, 横山順一、「ノーベル物理学賞説明会」伊藤謝恩ホール　2017/10/3

[87] 横山順一、「宇宙 138 億年　時空を越えて」　上毛新聞 130 周年記念講演　グリーンドーム前橋　2017/10/25

[88] 横山順一、「輪廻する宇宙」　能率協会一隅会講演　日本能率協会　2017/11/8

[89] 横山順一、「2017 年度ノーベル物理学賞受賞者紹介」駒場生向けノーベル物理学賞受賞記念講演会　駒場キャンパス　2017/12/18

[90] 横山順一、「宇宙をあやつる四つの力」　朝日カルチャーセンター講座　新宿住友ビル　2018/1/6

[91] Kipp Cannon, 横山順一　「連星中性子星合体からの重力波の発見」　理学部講演会　安田講堂　2018/3/27

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、プラズマの主半径、小半径はおよそ 0.36、0.23 m、電磁誘導、高周波波動を用いた最大プラズマ電流はそれぞれ 120、27 kA である。ST は高い規格化圧力を安定に維持できる方式として魅力的である一方、プラズマ電流の立ち上げ維持は解決すべき課題である。TST-2 では、主として低域混成波 (Lower-Hybrid Wave, LHW) を用いた電流立ち上げ維持研究を行っている。2017 年度は、外側、上側に設置された 2 つのアンテナの特性の比較、波動の伝搬・減衰の研究、非線形波動現象であるパラメトリック崩壊不安定性 (Parametric Decay Instability, PDI) の研究を進めた。これら波動の研究以外には、交流オーミックコイル運転の研究、マイクロ波イメージング反射計 (Microwave Imaging Reflectometer, MIR) の準備、各種計測機器の開発研究を行った。

6.1.2　高周波プラズマ立ち上げ実験

静電結合型進行波アンテナ実験

TST-2 では、2013 年度から静電結合型進行波 (Capacitively-Coupled Combline, CCC) アンテナを用いて、ST プラズマを非誘導的に立ち上げ、維持する研究を行ってきた。2015 年度末には従来型の外側入射に加えて、新たに上側入射の CCC アンテナを設置した。2017 年度は外側入射と上側入射アンテナの電流駆動の特性比較を進めた。外側入射、上側入射、及びトロイダル磁場反転による模擬的な下側入射実験を行った結果、外側入射では最大 21 kA、上側入射では最大 26 kA、下側模擬入射では 27 kA のプラズマ電流値が得られた。

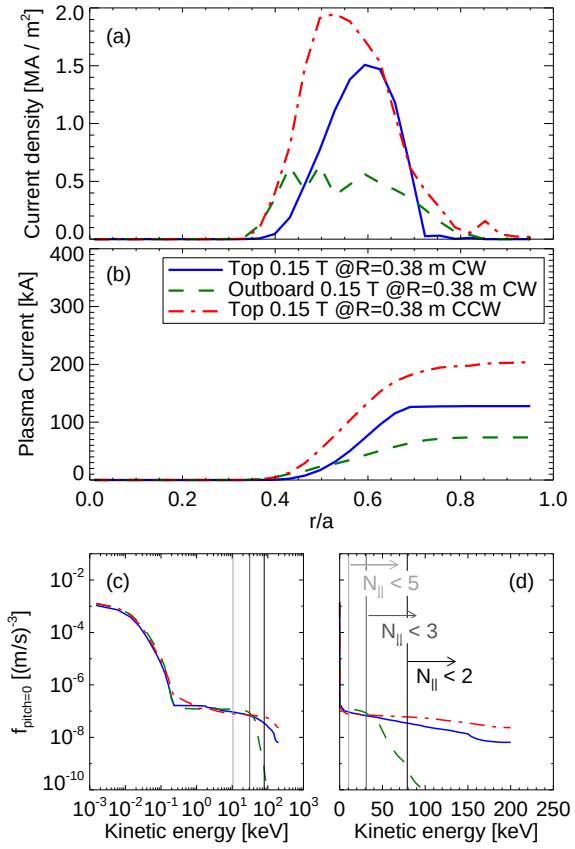


図 6.1.1: 外側入射 (Outboard CW)、上側入射 (Top CW)、下側模擬入射 (Top CCW) の際の数値計算による電流分布と電子の速度分布関数。(a) 電流分布、(b) 積分電流分布、(c, d) 磁力線方向の電子分布関数 ([22] の図 4 より)。

光線追跡コード GENRAY および軌道平均フォッカー・プランクコード CQL3D を用いた数値計算により、波の入射位置による電流駆動特性の違いを定性的には説明できることがわかった。上側入射アンテナでは、外側入射アンテナに比べて位相速度の速い波を励起するため、より高速な電子が生成され、駆動電流密度が増加する。また、トロイダル磁場を反転させて行った下側模擬入射の場合では、波の入射直後の波数の一時的減少によって、さらに高速の電子が生じるということが示唆された (図 6.1.1)。

静電結合型進行波アンテナの 3 次元モデリング

低域混成波による電流駆動を評価し、効率を改善していく上で、アンテナから励起される波のエネルギー流束や波数スペクトルを正確に知ることは非常に重要である。アンテナ近傍での電場構造は、アンテナの形状だけではなく、アンテナ近傍のプラズマの密

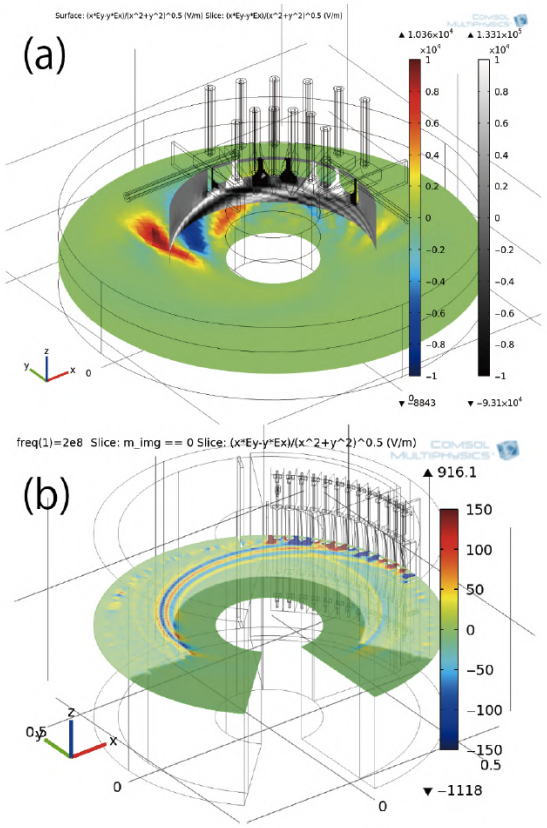


図 6.1.2: COMSOL を用いて計算した (a) 上側入射アンテナ (b) 外側入射アンテナによって励起される電場分布 ([22] の図 5)。

度分布によっても変化する。アンテナの 3 次元構造を考慮した計算は、商用の有限要素法による汎用物理解析ソフトウェア COMSOL (www.comsol.com) を用いて行った (図 6.1.2) [22]。これにより、外側入射アンテナ (図 6.1.2(b)) についてはアンテナに隣接しているリミターが波の一部を反射しうることが明らかになった。また、上側入射アンテナ (図 6.1.2(a)) については、カットオフ密度層とアンテナ表面との距離が 17–27 mm 程度の時、エネルギー流束とスペクトルの指向性が最適化される事がわかった。

COMSOL を用いる場合、現状はライセンスの関係上、計算可能な問題サイズがワークステーション上で実行可能なサイズに限られている。そこで、米国 MIT との共同研究で、オープンソースの有限要素法ライブラリおよび並列計算ライブラリを用いた 3 次元アンテナモデリングを行った [22]。スパコンを用いて計算を行うことで (800 コア)、研究室のワークステーションと比べて 10 倍程度のメッシュ数の計算が可能となった。今後は、ポンデロモーティブ力のアンテナ前面の密度分布に対する影響を自己無撞着に計算できるモデルを構築する予定である。計算結果はアンテナリミターに設置したプローブ計測と比較することで検証する。

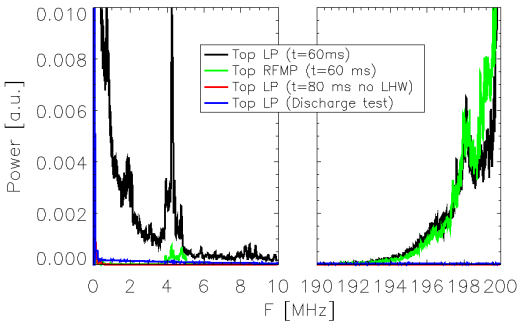


図 6.1.3: 外側入射アンテナから波を入射した場合の、上側入射アンテナ近傍での静電プローブ (黒) 及び磁気プローブ (緑) による周波数スペクトルの低周波側 (左) と高周波側 (右)。赤はアンテナオフ時 (プラズマあり)、青はコイル通電のみの場合のスペクトル。

プローブによる高周波計測

静電プローブ及び磁気プローブによる高周波計測から、外側入射アンテナによる LHW 励起時に、プラズマと波の間の非線形現象であるパラメトリック崩壊不安定性 (Parametric Decay Instability, PDI) が観測された (図 6.1.3)。低い周波数で高い感度を持つ静電プローブでは、周波数スペクトルの 2 MHz あたりにピークが観測された。アンテナで励起された 200.1 MHz のポンプ波は、この 2 MHz の揺動と (200.1−2) MHz 近傍に見られる揺動に崩壊しており、2 MHz の揺動はイオンサイクロトロン準モードと考えられる。またブロードなスペクトルの広がりは電子ランダウ準モードへの崩壊によるものと考えられる。これらの PDI は上側入射アンテナによる LHW 励起時には観測されなかったが、トロイダル磁場を反転させた際には上側入射アンテナからの LHW 励起時にも PDI が観測された。

異なる 2 つの場所に配置されたプローブの信号に対してクロススペクトル解析を行い、プラズマ中での LHW の伝搬を調査した。その結果、外側入射アンテナから LHW を励起した際に、トカマクの主半径内側から外側へと LHW が伝搬する様子が確認された [13]。

イオンドップラー分光によるイオン温度・フロー計測

視線を 17 視線から 33 視線に増設した。発光強度を Tikhonov の正則化法で再構成し、マクスウェル分布にフィッティングすることで、イオン温度とフローの主半径方向分布を求めた。外側入射アンテナ使用時と上側入射アンテナ使用時で内壁付近の領域にプラズマ電流と反対方向に 10 km/s を超えるフローが存在することがわかった。一方、高速電子とバルクの電子衝突から予測されるフロー速度はプラズマ電流と反対方向に約 1 m/s であり、無視できるほど小

さいことがわかった。従って、トロイダルフローはExB ドリフトから生成される可能性が考えられ、壁付近のフローの時間変化は径方向電場の時間変化を反映していると考えられる。イオン温度はバルク電子温度と似たホローな分布で、中心付近でイオンと電子の温度緩和時間がエネルギー閉じ込め時間と同程度であることから、この領域のイオンはバルク電子に加熱されている可能性がある。

MEGA による平衡解析

LHW 駆動プラズマでは波によって少数の高速電子が生み出される。TST-2 ではその高速電子によってつくられる電流がプラズマの平衡に支配的に寄与していると考えられている。高速電子を生み出す過程は光線追跡コード GENRAY と波と粒子の相互作用を解く CQL3D でシミュレーションができる。高速電子を取り入れたモデルでの平衡計算は、高速粒子と MHD 流体を連成させたシミュレーションコード MEGA によって行うことができる。2017 年度はこれら 3 つのコードを組み合わせたハイブリッドシミュレーションを開発した。この 3 つの計算を順次行い、さらに反復させることで特定のケースにおいて収束解を得ることが出来た。初期状態での CQL3D の計算値は実験値から大きく離れているが、その反復計算においてプラズマの形状が変化し波動の伝搬が変化して実験値と整合する値に変わっていくことが確認された。

6.1.3 オーミックプラズマ実験

反磁性計測

平衡解析の拘束条件にプラズマの反磁性計測を取り入れることで、トロイダル電流ピークの主半径方向の位置をある程度推定できることがわかったので、TST-2 の反磁性計測の修理・改善を行った。新たに参照用のコイルを作成し、オーミックプラズマにおいて反磁性信号を確認した。反磁性を含まない平衡計算の結果と同様に、常磁性であることが確認できた。

交流オーミックコイル運転

交流オーミックコイル運転とは、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。これまでに調べた予備電離の各種パラメータ依存性は 0 次元モデルである程度説明できること、より正しいと考えられる 1 次元モデルでは、両極性拡散状態が実現され予備電離が止まり実験と矛盾することがわかっていた。本年度は、1 次元モデルに、(1) ExB ドリフトによる拡散、(2) 固体境界での 2 次電子放出、(3) 交流電場の効果を導入することで、両極性拡散状態が解消または緩和されることがわかった。実験条件

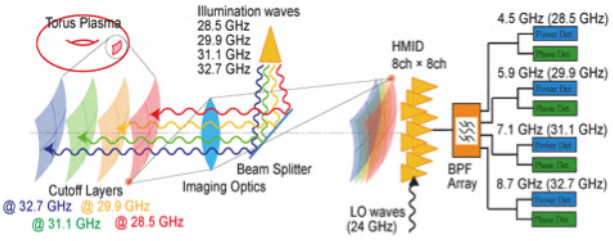


図 6.1.4: マイクロ波イメージング反射計の概念図。

を考慮した概算によれば、(1)、(3) は実験結果を説明できること、(2) の効果は無視できるほど小さいことがわかった [12]。

6.1.4 計測器開発

トムソン散乱

トムソン散乱計測法においてレーザー光の広がりによる迷光は計測の大きな障害となる。この迷光を低減させるために円錐型アパーチャーの開発を行った。以前までのアパーチャーと異なり、円錐型はカットされた迷光を捕捉することができる。6、8、10、15 mm の絞り径のアパーチャーを開発し、それぞれを TST-2 のトムソン散乱計測器に適用し迷光量を測ったところ、迷光量は増減して一定の傾向を示すことはなかった。これは絞り径部分での散乱によるものと考えられ、この結果を踏まえて新たな装置の開発を計画している。

マイクロ波イメージング反射計

ST プラズマの内部再結合現象 (IRE) を 3 次元観測し、3 次元局所再結合モデルを検証することを目的とし、日本大学、核融合科学研究所と共同でマイクロ波イメージング反射計 (Microwave Imaging Reflectometer, MIR) の開発・設置を進めている (図 6.1.4)。これまでに計測器の組み立て、動作試験およびデータ収集系の整備・試験を行った。

6.1.5 共同研究

QUEST におけるトムソン散乱計測

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電流駆動による定常高性能プラズマの生成・維持を目標としており、今年度は、66 kA の非誘導プラズマ電流値が達成された [10]。電流駆動機構を解明し、さらなる高性能化を図るためには、プラズマの基礎パラメータである電子温度・密度分布を計測する必要がある。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

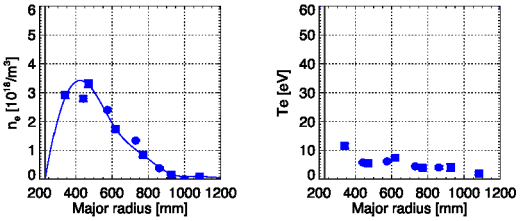


図 6.1.5: QUEST におけるトムソン散乱計測により得られた EC 波立ち上げプラズマの電子密度分布 (左) と電子温度分布 (右)。

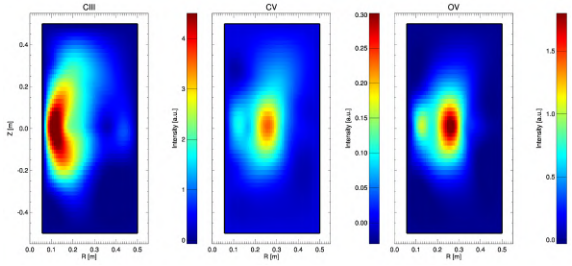


図 6.1.6: LATE における準平衡状態 (133 ms) での CIII(左)、CV(中心)、OV(右) の発光強度分布。

ムの開発を行っている。2017 年度はアライメントの精度を確保するための遠隔アライメントシステムの開発を行うとともに、電子サイクロトロン (Electron Cyclotron, EC) 波と同軸ヘリシティ入射 (Coaxial Helicity Injection, CHI) を用いた非誘導立ち上げプラズマにおける TS 計測を行った。

EC 波立ち上げにおいては、予備電離と初期プラズマ生成には 8.2 GHz の EC 波を用い、途中で 28 GHz の EC 波 (第 2 高調波電流駆動) に切り替えるオペレーションについて TS 計測を行った (図 6.1.5)。放電初期の 8.2 GHz と 28 GHz の EC 波の両方が入射されている時間帯では、高電子温度・低密度であるが、放電後半の 28 GHz の EC 波が単独入射されている時間帯では、低電子温度・高密度な傾向があることが分かった。

また、CHI プラズマにおける TS 計測を QUEST において初めて行った。米国 PPPL の NSTX で得られた CHI プラズマと同様に、低電子温度・高密度のプラズマが QUEST においても生成されることが確認された。

LATE における分光計測

LATE では、29 視線で計測された線積分発光強度を再構成し、CIII のイオン温度の主半径方向分布と CIII、CV、OV の発光分布を求めた (図 6.1.6)。イオン温度は TST-2 ではホローな分布であるのに対し、LATE では磁気軸付近の $R = 250$ mm 付近で最も高い、わずかにピークした分布を示した。CV、OV の

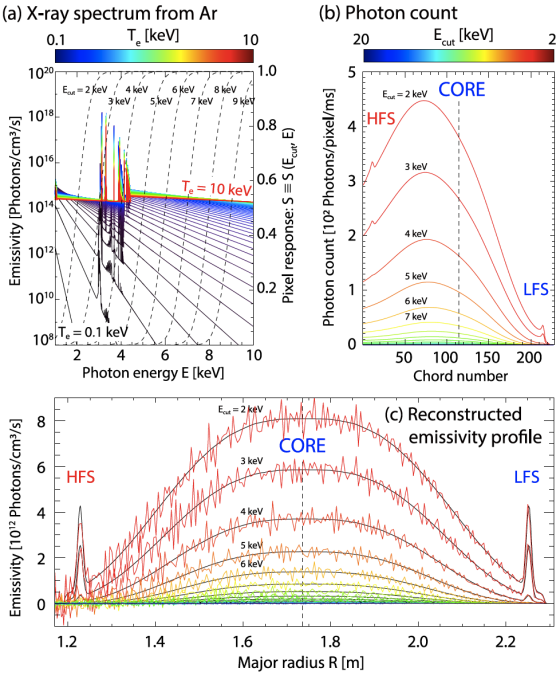


図 6.1.7: (a) Ar の発光スペクトルおよび軟 X 線検出器のピクセル応答、(b) 検出器における視線あたりの光子数、(c) ポアソンノイズを含めて再構成したプラズマの発光分布。

発光強度が大きいことから、この領域で電子温度が高いと考えられる。CIII は CV、OV と比較し最も発光強度が強く CV、OV はプラズマ電流が小さい時間帯で発光しなかった。また、内壁付近の CIII、CV、OV の発光が大きかったが、これはプラズマが内壁に接触することで不純物が叩き出され、密度が高くなるためだと考えられる。

PPPL との共同研究

PPPL との共同研究として、軟 X 線検出器を用いたイメージング計測の設計を行った。本研究では、任意の電子温度、密度、不純物密度に対する発光スペクトルを求め（図 6.1.7(a)）、この放射量を元に検出器の各ピクセルにおいて想定される信号量を計算するツールを構築した。また、米国 General Atomics 社の DIII-D 装置に対し、周辺部に形成されるペデスタル構造の計測を目的とした一次元イメージングを想定した計算と設計を行った。計算の結果、Ar ガスを入射することで電子温度、密度の低い周辺部でも測定に十分な発光が得られ、0.5 cm の空間分解能と 2 ms の時間分解能で計測が可能であることがわかった（図 6.1.7(b, c)）。同様に米国 Wisconsin-Madison 大学の MST 装置における径方向イメージング計測の設計を行った [24]。

＜報文＞

(原著論文)

[1] K. Kuroda, R. Raman, K. Hanada, M. Hasegawa, T. Onchi, M. Ono, T. Jarboe, B.A. Nelson, M. Nagata, O. Mitarai, K. Nakamura, H. Idei, J. Rogers, S. Kawasaki, T. Nagata, A. Kuzmin, S. Kojima, O. Watanabe, A. Higashijima, Y. Takase and A. Fukuyama: "Current Start-Up Using the New CHI System," Plasma Fusion Res. **12**, 1202020 (2017).

[2] H. Furui, A. Ejiri, Y. Nagashima, Y. Takase, M. Sonehara, N. Tsujii, B. Roidl, T. Shinya, H. Togashi, H. Homma, K. Nakamura, T. Takeuchi, S. Yajima, Y. Yoshida, K. Toida, W. Takahashi and H. Yamazaki: "Measurements of edge plasma parameters during internal reconnection events in the TST-2 spherical tokamak," Physics of Plasmas **24**, 062504 (2017).

[3] Y. Takase, A. Ejiri, T. Fujita, N. Fukumoto, A. Fukuyama, K. Hanada, H. Idei, M. Nagata, Y. Ono, H. Tanaka, M. Uchida, R. Horiuchi, Y. Kamada, H. Kasahara, S. Masuzaki, Y. Nagayama, T. Oishi, K. Saito, Y. Takeiri and S. Tsujii: "Overview of spherical tokamak research in Japan," Nucl. Fusion **57**, 102005 (2017).

[4] H. Togashi, H. Yamazaki, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, S. Yajima, Y. Yoshida and TST-2 team: "Development of a Hard X-Ray Profile Measurement System in the TST-2 Spherical Tokamak," Plasma Fusion Res. **12**, 1402030 (2017).

[5] Y. Takeiri, T. Morisaki, M. Osakabe, M. Yokoyama, S. Sakakibara, H. Takahashi, Y. Nakamura, T. Oishi, G. Motojima, S. Murakami, K. Ito, A. Ejiri, et al.: "Extension of the operational regime of the LHD towards a deuterium experiment," Nucl. Fusion **57**, 102023 (2017).

[6] N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, T. Shinya, H. Togashi, S. Yajima, H. Yamazaki, C.P. Moeller, B. Roidl, M. Sonehara, W. Takahashi, K. Toida and Y. Yoshida: "Numerical modeling of lower hybrid current drive in fully non-inductive plasma start-up experiments on TST-2," Nucl. Fusion **57**, 126032 (2017).

[7] A. Ejiri, H. Tanaka, W. Takahashi, A. Sato, Y. Takase, N. Tsujii, M. Uchida and T. Makekawa: "Observation of High Impurity Ion Temperatures in ECW/EBW Sustained Plasmas on LATE," Plasma Fusion Res. **12**, 1202041 (2017).

[8] R. Yoneda, K. Hanada, K. Nakamura, H. Idei, N. Yoshida, M. Hasegawa, T. Onchi, K. Kuroda, S. Kawasaki, A. Higashijima, T. Nagata, A. Isayama, O. Mitarai, A. Fukuyama and Y. Takase: "Effect of Magnetic Structure on RF-induced Breakdown in QUEST," Phys. Plasmas **24**, 062513 (2017).

[9] Z. Wang, K. Hanada, N. Yoshida, T. Shimoji, M. Miyamoto, Y. Oya, H. Zushi, H. Idei, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, M. Hasegawa, S. Kawasaki, A. Higashijima, H. Nakashima, K. Nagata, A. Kawaguchi, T. Fujiwara, K. Araki, O. Mitarai, A. Fukuyama, Y. Takase and K. Matsumoto: "Measurement of thickness of film deposited on the plasma-facing wall in the QUEST tokamak by colorimetry," Rev. Sci. Instrum. **88**, 093502 (2017).

[10] H. Idei, T. Kariya, T. Imai, K. Mishra, T. Onchi, O. Watanabe, H. Zushi, K. Hanada, J. Qian, A. Ejiri, M. Alam, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, M. Hasegawa, K. Matsuoka, A. Fukuyama, S. Kubo, T. Shimozuma, M. Yoshikawa, M. Sakamoto, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, S. Ide, T. Maekawa, Y. Takase and K. Toi: "Fully non-inductive second harmonic electron cyclotron plasma ramp-up in the QUEST spherical tokamak," Nucl. Fusion **57**, 126045 (2017).

[11] 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, K. Kuroda, H. Long, H. Watanabe, K. Tokunaga, A. Higashijima, S. Kawasaki, T. Nagata, Y. Takase, A. Fukuyama and O. Mitarai: "Investigation of hydrogen recycling in long-duration discharges and its control with a hot wall in the spherical tokamak QUEST," Nucl. Fusion **57**, 126061 (2017).

[12] A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, H. Togashi, H. Furui, T. Shinya, B. Roidl, M. Sonehara, S. Yajima, Y. Yoshida, H. Yamazaki, A. Kitayama, A. Sato, Y. Takei, Y. Tajiri, N. Matsumoto and O. Mitarai: "Pre-ionization by AC Ohmic coil operation in the TST-2 spherical tokamak," Nucl. Fusion **58**, 016012 (2017).

(学位論文)

[13] 武井悠稀: 「TST-2 球状トカマクにおける高周波プローブ測定に基づく低域混成波の研究」(修士論文)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[14] Y. Takase: "Plasma Current Start-up and Ramp-up by LHW on TST-2," 6th Meeting of the A3 Foresight Program "Innovative Tokamak Plasma Startup and Current Drive in Spherical Torus," Univ. Tokyo, Japan, June 27, 2017.

[15] Y. Takase: "Plasma Current Start-up Experiments Using the Lower Hybrid Wave in the TST-2 Spherical Tokamak," 2017 US-EU-JPN Workshop on RF Heating Technology and US-JPN Workshop on RF Physics, DoubleTree Suites, Santa Monica, CA, USA, Sep. 5–8, 2017.

[16] H. Idei, et al.: “Fully Non-inductive Plasma Current Start-up by Focused Millimeter-Wave Beam in QUEST,” 2017 US-EU-JPN Workshop on RF Heating Technology and US-JPN Workshop on RF Physics, DoubleTree Suites, Santa Monica, CA, USA, Sep. 5–8, 2017.

[17] A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, S. Yajima, H. Yamazaki, Y. Takei, Y. Tajiri, B. Roidl, Y. Yoshida, A. Kitayama, A. Sato, N. Matsumoto, Y. Iida, K. Iwasaki, Y. Kawamata, S. Sakamoto, C.P. Moeller, K. Saito, T. Seki, H. Kasahara, S. Kamio and O. Mitarai: “Recent activities on TST-2,” 19th International Spherical Torus Workshop (ISTW 2017), Seoul National University, Seoul, Sep. 18–22, 2017.

[18] N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, B. Roidl, S. Yajima, H. Yamazaki, C.P. Moeller, A. Kitayama, N. Matsumoto, A. Sato, Y. Tajiri, Y. Takei, and Y. Yoshida: “Numerical modeling of lower-hybrid current drive with outboard-launch and top-launch antennas on TST-2,” 19th International Spherical Torus Workshop (ISTW 2017), Seoul National University, Seoul, Sep. 19–22, 2017.

[19] H. Yamazaki, L.F. Delgado-Aparicio, N. Pablant, K. Hill, M. Bitter, Y. Takase, M. Ono and B. Stratton: “Design of tangential multi-energy SXR cameras for tokamak plasmas,” 259th APS-DPP meeting Milwaukee, Wisconsin, USA, Oct. 23–27, 2017.

[20] L.F. Delgado-Aparicio, R.E. Bell, M. Podesta, B.P. LeBlanc, A. Diallo, L. Morton, H. Yamazaki, Y. Takase and M. Ono: “Synthetic capability for the study of poloidal impurity asymmetries in NSTX-U,” 259th APS-DPP meeting Milwaukee, Wisconsin, USA, Oct. 23–27, 2017.

[21] A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, O. Mitarai: “Numerical Study of Pre-Ionization by AC Ohmic Coil Operation,” Joint meeting of 26th International Toki Conference (ITC-26) and 11th Asia Plasma Fusion Associate conference, Ceratopia Toki, Toki, Japan, Dec. 5–8, 2017.

[22] S. Yajima, Y. Takase, A. Ejiri, N. Tsujii, H. Yamazaki, C.P. Moeller, T. Shinya, Y. Takei, Y. Tajiri, Y. Yoshida, A. Sato, A. Kitayama, N. Matsumoto: “Current drive experiment using Top/Outboard side lower hybrid wave injection on TST-2 spherical tokamak,” Joint meeting of 26th International Toki Conference (ITC-26) and 11th Asia Plasma Fusion Associate conference, Ceratopia Toki, Toki, Japan, Dec. 5–8, 2017.

[23] S. Kojima, K. Hanada, T. Onchi, A. Ejiri, M. Hasegawa, K. Nakamura, Y. Nagahima, K. Kuroda, N. Matsumoto, R. Yoneda, H. Kozai, Y. Takase, S. Murakami, M. Ono, H. Idei: “Estimation of current driving electron energy using X-ray measurement during plasma current ramp-up with 28 GHz 2nd harmonic EC wave on QUEST,” Joint meeting of 26th International Toki Conference (ITC-26) and 11th Asia Plasma Fusion Associate conference, Ceratopia Toki, Toki, Japan, Dec. 5–8, 2017.

[24] H. Yamazaki, L.F. Delgado-Aparicio, N. Pablant, K. Hill, M. Bitter, Y. Takase, A. Ejiri, M. Ono and B. Stratton: “Design of multi-energy SXR cameras for tokamak plasmas,” Joint meeting of 26th International Toki Conference (ITC-26) and 11th Asia Plasma Fusion Associate conference, Ceratopia Toki, Toki, Japan, Dec. 5–8, 2017.

招待講演

[25] N. Tsujii, Y. Takase, A. Ejiri, T. Shinya, S. Yajima, H. Yamazaki, H. Togashi, C.P. Moeller, B. Roidl, W. Takahashi, Y. Takei, K. Toida, and Y. Yoshida: “Fully non-inductive plasma start-up with lower-hybrid waves using the outboard-launch and top-launch antennas on the TST-2 spherical tokamak,” 22nd RF Conference, Aix en Provence, France, May 30–June 2, 2017 (EPJ Web Conf. **157**, 02009).

[26] Y. Takase: “Plasma Current Start-up by the Lower Hybrid Wavein the TST-2 Spherical Tokamak,” 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics Chengdu, China, Sep. 18–22, 2017.

(国内会議)

一般講演

[27] 江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、矢嶋悟、吉田裕亮、山崎響、北山明親、佐藤暁斗、武井悠稀、田尻芳之、松本直希、飯田勇介、岩崎光太郎、川又裕也、坂本将、ロイドル・ベネディクト、御手洗修: 「TST-2 球状トマカク装置における AC オーミックコイル運転を用いた予備電離」、Plasma Conference 2017、姫路商工会議所、2017 年 11 月 20 日–24 日、22Ca-05.

[28] 辻井直人、高瀬雄一、江尻晶、ROIDL Benedikt、矢嶋悟、吉田裕亮、山崎響、北山明親、佐藤暁斗、田尻芳之、武井悠稀、松本直希、飯田勇介、岩崎光太郎、川又裕也、坂本将: 「TST-2 の非誘導立ち上げプラズマにおける低域混成波電流駆動の全波計算」、Plasma Conference 2017、姫路商工会議所、2017 年 11 月 20 日–24 日、22P-56.

[29] 江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、矢嶋悟、吉田裕亮、山崎響、北山明親、佐藤暁斗、武井悠稀、田尻芳之、松本直希、飯田勇介、岩崎光太郎、川又裕也、坂本将、Roidl Benedikt、御手洗修: 「TST-2 球状トマカク装置における AC オーミックコイル運転」、日本物理学会第 73 回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、2018 年 3 月 22 日–25 日.

招待講演

[30] 高瀬雄一: 「米国経験に基づく国際的人材の育成について」、核融合エネルギーフォーラム 改組 10 周年記念 第 11 回全体会合「プラズマ・エネルギーの新展開 〜 実験炉 ITER、そして原型炉への飛翔〜」人材育成についてのパネルディスカッション、名古屋大学東山キャンパス IB 電子情報館、2018 年 228

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、助教の平岩徹也が在籍している。また、2017 年度まで客員共同研究員として太田隆夫（京大名誉教授）が在籍した。

6.2.1 非平衡系の動力学・統計力学

吸収状態転移と層流から乱流への遷移の研究

整った流れ (層流) から乱れた流れ (乱流) への遷移現象に対して非平衡統計力学の観点から理解を深めること、および吸収状態 (一度入ると二度と出られない状態) への転移が示す普遍的な性質を明らかにすることを目的として、実験と数値計算を駆使して研究を行っている。本年度は、矩形型のチャネル内の流れ [15, 19] および軸を同じくした 2 本の回転円柱の間の流れ (Taylor–Couette 流) で見られる不安定性を流れの可視化実験によって調べた。また、吸収状態 への転移を特徴付ける臨界指数を正しく測定するための手法を提案し [15, 18, 19, 20, 40, 57]、吸収状態転移を示す系において転移点近傍で見られるクラスタの界面ゆらぎに普遍的な性質が現れるか数値計算で調べた。

液晶の電気対流における非平衡現象についての研究

電極の間の液晶に電場をかけた際に生じる電気対流現象をもちいて、非平衡現象の研究を行なっている。まず、高電圧条件でトポロジカル欠陥乱流が広がる際の界面成長過程に現れる普遍的なゆらぎの性質を、リング状の初期条件のもとで調べた。結果として、簡単なモデルでみられたのと同じゆらぎの性質が観察され、ゆらぎの普遍性が示された [6, 41]。また、液晶としてコレステリック液晶を用いた際に、電極に平行な流れが生じることを発見し、この性質を透過光の画像解析をもちいて調べた。結果として、この流れが電極間の間隙の 100 倍以上の大きなスケールにわたり、循環流・対向流などのパターンを示すことを見出した [25, 51, 80]。

6.2.2 アクティブマターの動力学

アクティブソフトマターに関する理論的研究

変形するアクティブマターは自走する液滴、微生物、生体細胞などで普遍的に見られる。並進と変形、および、スピンと変形の相互作用を取り入れた理論やそれらの多体系の研究を行った。最近の進展を総合報告 [8] にまとめた。

交流電場下での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して電極上を転がり運動する自己駆動粒子が知られている。交流電場下での希薄系の 1 粒子は周期的に非対称な変位をもって往復運動することを発見した。一次元系で交流下のモデルをたて、往復運動がおきることと正味の運動が周波数に依存した定常速度をもつことを

数値的に示した。一方 2 粒子系の重心の運動は 1 粒子系に比べて、往復運動の振幅は大きく正味の運動速度は小さいことが実験的にわかった [21, 26, 42, 52]。

自己駆動コロイド粒子 (ヤヌス粒子) の集団運動及びヤヌス鎖の鞭打ち運動運動

シリカ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。我々は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、大きな密度ゆらぎを観測した [2, 16, 22, 43, 49, 53, 58, 63, 67]。また、粒子が連なって運動するヤヌス鎖の鞭打ち運動の観測からヤヌス粒子間の相互作用が実効的な dipole-dipole 相互作用で書けることを実験的に示した [10]。

集団運動における局所相互作用の役割

動き回る粒子が多数集まってできる動的な構造を集団運動とよぶ。集団運動の例は生物系である鳥の群れやバクテリアコロニーから非生物系である加振ロッドなど多岐にわたり、いくつか似たパターンが生じていることから系の詳細によらない共通のメカニズムが働いていると考えられている。動き回る粒子の性質や粒子間の相互作用と、それらが多数集まってできる大局的な構造の関係を調べるために、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、キネシンの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 [1, 23, 27, 44, 54, 59, 64, 69]。

また、エレベータを振動子とみなした時の同期現象の解析を行った [11, 55, 62]。

6.2.3 非平衡系としての生命現象

神経幹細胞の集団運動における力

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。この集団運動を記述すると期待される力学モデルでは、細胞集団の示す向きと細胞の出す異方的な力とのカップリングが、細胞集団スケールでの運動を決定することが予想されているが、今年度の研究においてその観察に成功した [24, 47, 50, 60]。さらに神経幹細胞集団が運動する際に基質に及ぼす力を計測することで、細胞が実際に異方的な力を出していることを明らかにした [68]。

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、互いにコミュニケーションする真核細胞の集団の遊走の理論モデルを提案・解析した [17, 28, 45, 61, 65, 70]。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た [7, 36]。分子モーターに由来する細胞骨格のダイナミクス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とその詳しいダイナミクスを調べた [36, 48, 71, 72, 78, 79]。

＜受賞＞

[1] 谷田桜子：第 11 回物性科学領域横断研究会「凝縮系科学の最前線」 ポスター賞, 2017 年 11 月 17–18 日, 千葉.

[2] J. Iwasawa: Best Poster Award for Young Researcher, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017, Nov. 20-23, Miyagi, Japan.

[3] M. Uwamichi: Best Poster Award for Young Researcher, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017, Nov. 20-23, Miyagi, Japan.

＜報文＞

(原著論文)

[4] K. Kawaguchi, R. Kageyama and M. Sano: Topological defects control collective dynamics in neural progenitor cell cultures, Nature, **545**, 327–331 (2017).

[5] T. Yamamoto and M. Sano: Chirality-induced helical self-propulsion of cholesteric liquid crystal droplets, Soft Matter, **13**, 3328–3333 (2017).

[6] Y. T. Fukai and K. A. Takeuchi: Kardar-Parisi-Zhang Interfaces with Inward Growth, Phys. Rev. Lett. **119**, 030602 (2017).

[7] T. Hiraiwa, E. Kuranaga and T. Shibata: Wave Propagation of Junctional Remodeling in Collective Cell Movement of Epithelial Tissue: Numerical Simulation Study, Front. in Cell and Dev. Biol. **5**, 66 (2017).

[8] T. Ohta: Dynamics of deformable active particles, J. Phys. Soc. Jpn, **86**, 072001 (2017).

[9] T. Yamamoto and M. Sano: Theoretical model of chirality-induced helical self-propulsion, Phys. Rev. E, **97**, 012607/1–11 (2017).

[10] D. Nishiguchi, J. Iwasawa, H.-R. Jiang and M. Sano: Flagellar dynamics of chains of active Janus particles fueled by an AC electric field, New Journal of Physics, **20**, 015002/1–14 (2018).

(会議抄録)

[11] 谷田桜子: 振動子としてのエレベータの同期現象, 第 23 回交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集, 29 – 32 （2017）.

(国内雑誌)

[12] 佐野雅己: 特集 : ゆらぎと構造から見る非平衡の世界, 巻頭言，パリティー，**32**, No.11, 4–5 (2017).

[13] 佐野雅己: 総論 : 非平衡科学の展開，パリティー，**32**, No.11, 6–11 (2017).

[14] 佐野雅己: 層流・乱流転移と普遍法則, サマースクール数理物理 2017,「乱流とパーコレーション」, pp.28–51 (2017).

(学位論文)

[15] K. Tamai: Universal scenario of transition to turbulence as an absorbing phase transition, 博士論文, 2018 年 3 月.

[16] 岩澤諄一郎: Collective Phenomena of Self-Propelled Janus Particles under an AC Electric Field, 修士論文, 2018 年 3 月.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[17] T. Hiraiwa: Theory on chemotactic migration of eukaryotic cells Liquids 2017, Jul. 17–21, 2017, Ljubljana, Slovenia.

[18] K. Tamai and M. Sano: How to examine universal scenario of transitions to sustained turbulence, NBI workshop “Transitions to turbulence”, Oct. 23–25, 2017, Copenhagen, Denmark.

[19] K. Tamai and M. Sano: Experimental Characterization of the Dynamics of Localized Turbulence in Transitional Shear Flow, International Conference on Flow Dynamics 2017 (ICFD2017), Nov. 1–3, 2017, Sendai, Japan.

[20] K. Tamai and M. Sano: How to Experimentally Probe Universal Features of Absorbing Phase Transitions Using Steady State, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017, Nov. 20–23, 2017, Sendai, Japan.

[21] Airi N. KATO, Masaki SANO: Net locomotion of self-propelled colloidal particles with periodic reciprocating motion, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017, Nov. 20–23, 2017, Sendai, Japan.

[22] J. Iwasawa, D. Nishiguchi, and M. Sano: Collective Motion of Asymmetric Self-Propelling Particles under an AC Electric Field, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017, Nov. 20–23, 2017, Sendai, Japan.

[23] S. Tanida, K. Furuta, K. Nishikawa, T. Hiraiwa, H. Kojima, K. Oiwa, M. Sano; How volume exclusion affects collective behavior of microtubules driven by kinesin, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017, Nov. 20–23, 2017, Sendai, Japan.

[24] M. Uwamichi and M. Sano : Dynamic Properties of Topological Defects in Active Nematic Cell Sheets, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017, Nov. 20–23, 2017, Sendai, Japan.

[25] Y. T. Fukai and M. Sano: Large-scale flow in electroconvection of cholesteric liquid crystal, Fundamental Problems in Active Matter, Jan. 29–Feb. 2, 2018, Aspen, USA.

[26] A. N. Kato, M, Sano: Reciprocating motion and the net locomotion of the Quincke rollers under AC fields, Fundamental Problems in Active Matter, Jan. 29–Feb. 2, 2018, Aspen, USA.

[27] S. Tanida, K. Furuta, K. Nishikawa, T. Hiraiwa, H. Kojima, K. Oiwa, M. Sano; The effects of volume exclusion on collective motion of microtubules, Fundamental Problems in Active Matter, Jan. 29–Feb. 2, 2018, Aspen, USA.

[28] T. Hiraiwa: Theory on chemotactic migration of eukaryotic cells, Fundamental Problems in Active Matter, Jan. 29–Feb. 2, 2018, Aspen, USA.

招待講演

[29] M. Sano and K. Kawaguchi: Rosette and Comet: Possible Roles of Topological Defects in Biological Active Matter, International Workshop on Physical Approaches to Biological Active Matter, Jun. 1–3, 2017, Porto De Galinhas, Brazil.

[30] M. Sano and K. Kawaguchi: Orientational Order and Topological Defects in Active Matter, 9th IUPAP International Conference on Biological Physics, Jun. 7–9, 2017, Rio de Janeiro, Brazil.

[31] M. Sano: Thermal and Electric Effects in Active Colloid: Thermophoresis, Self-Propulsion, Self-Assembly, Gordon Research Conference on Plasmonically-Powered Processes, Jun. 25–30, 2017, Hong Kong, China.

[32] M. Sano and K. Kawaguchi: Topological Defects Control Collective Dynamics in Active Matter, STOCHASTIC THERMODYNAMICS, ACTIVE MATTER AND DRIVEN SYSTEMS, ICTS Workshop, Aug. 7–11, 2017, Bangalore, India.

[33] H. Tanimoto, K. Kawaguchi, M. Uwamichi, *M. Sano: Cell Mechanics: from single cell to multicellular dynamics, Annual Meeting of The Biophysical Society of Japan, Sep. 19–21, 2017, Kumamoto, Japan.

[34] M. Sano, K. Tamai, T. Tsukahara: Transition to Turbulence in Channel and Annular Flow, Workshop: Transition to Turbulence, Niels Bohr Institute, Oct. 23–25, 2017, Copenhagen, Denmark.

[35] M. Sano and K. Tamai: Transition to Turbulence and Nonequilibrium Phase Transition, ENS-UT Workshop, Nov. 15–16, 2017, Tokyo, Japan.

[36] T. Hiraiwa: Motor-induced contraction of the actomyosin cytoskeleton, International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017 (SFS2017), Nov. 20–23, 2017, Sendai, Japan.

[37] M. Sano, M. Uwamichi, and K. Kawaguchi: Topological Defects Control Collective Dynamics in Active Matter, Fundamental Problems in Active Matter, Jan. 29–Feb. 2, 2018, Aspen, USA.

[38] M. Sano: When Can Active Matter Become Intelligent?, Mini-symposium“Non-equilibrium dynamics and Information Processing”, Feb. 7–9, 2018, OIST, Okinawa, Japan.

(国内会議)

一般講演

[39] 佐野雅己: An Overview of Active Matter Research in the project of Synergy of Fluctuation and Structure, 新学術領域研究 “ゆらぎと構造の協奏” 第 4 回領域研究会，2017 年 6 月 23–24 日，東京.

[40] 玉井敬一, 佐野雅己: Impacts of Wall and Flow on Spatiotemporal Intermittency, 新学術領域研究 “ゆらぎと構造の協奏” 第 4 回領域研究会，2017 年 6 月 23–24 日，東京.

[41] 深井洋佑, 竹内一将: Fluctuation of ingrowing Kardar-Parisi-Zhang interfaces, 新学術領域研究 “ゆらぎと構造の協奏” 第 4 回領域研究会，2017 年 6 月 23–24 日，東京.

[42] 加藤愛理, 佐野雅己, What is the origin of the net motion of self-propelled colloids with back-and-forth motion?, 新学術領域研究 “ゆらぎと構造の協奏” 第 4 回領域研究会，2017 年 6 月 23–24 日，東京.

[43] 岩澤諄一郎, 西口大貴, 佐野雅己: Properties of Directed Collective Motion of Asymmetric Self-Propelling Particles, 新学術領域研究 “ゆらぎと構造の協奏” 第 4 回領域研究会，2017 年 6 月 23–24 日，東京.

[44] 谷田桜子, 古田健也, 西川香里, 平岩徹也, 小嶋寛明, 佐野雅己 ; Collective Patterns of Microtubules Driven by Kinesin, 新学術領域研究 “ゆらぎと構造の協奏” 第 4 回領域研究会，2017 年 6 月 23–24 日，東京.

[45] 平岩徹也: Theory on chemotactic migration of eukaryotic cells 新学術領域研究 “ゆらぎと構造の協奏” 第 4 回領域研究会，2017 年 6 月 23–24 日，東京.

[46] 佐野雅己: Effects of Excluded Volume Interaction in Active Filarments, 新学術領域研究 “ゆらぎと構造の協奏”A02 班 A03 班合同研究会「アクティブマターの概念で繋ぐ生命機能の階層性」, 2017 年 9 月 11–12 日, 北海道.

[47] 上道雅仁、佐野雅己 : Nematic Order and Distortion in the Monolayer of Spindle-shaped Cells，新学術領域研究 “ゆらぎと構造の協奏”A02 班 A03 班合同研究会「アクティブマターの概念で繋ぐ生命機能の階層性」, 2017 年 9 月 11–12 日, 北海道.

[48] 平岩徹也: 細胞骨格ネットワークにおけるモーター誘起応力の理論, 新学術領域研究 “ゆらぎと構造の協奏”A02 班 A03 班合同研究会「アクティブマターの概念で繋ぐ生命機能の階層性」, 2017 年 9 月 11–12 日, 北海道.

[49] 岩澤諄一郎, 西口大貴, 佐野雅己: Universality of Collective Motion investigated in Artificial Systems, 第 55 回日本生物物理学会年会, 2017 年 9 月 19–21 日, 熊本.

[50] 上道雅仁, 佐野雅己: Nematic Order and Topological Defects in Cellular Sheets, 第 55 回日本生物物理学会年会, 2017 年 9 月 19–21 日, 熊本.

[51] 深井洋佑, 佐野雅己: コレステリック液晶の電気対流で生じる大スケール平面流, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月 21–24 日, 岩手.

[52] 加藤愛理, 佐野雅己, 周期的に駆動されるコロイド粒子の往復運動と正味の運動, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月 21–24 日, 岩手.

[53] 岩澤諄一郎, 西口大貴, 佐野雅己: 交流電場下での非対称自己駆動粒子の集団運動, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月 21–24 日, 岩手.

[54] 谷田桜子, 古田健也, 西川香里, 平岩哲也, 小嶋寛明, 佐野雅己 ; 排除体積効果の強さを制御した微小管の集団運動, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月 21–24 日, 岩手.

[55] 谷田桜子 ; エレベーターの同期現象, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月 21–24 日, 岩手.

[56] 佐野雅己: ゆらぎと構造の協奏:非平衡系における普遍法則の確立, 第 11 回物性科学領域横断研究会, 2017 年 11 月 17–18 日, 千葉.

[57] 玉井敬一・佐野雅己 : How to experimentally probe universal features of absorbing phase transitions using steady state, 第 11 回物性領域横断研究会，2017 年 11 月 17–18 日，千葉.

[58] 岩澤諄一郎, 西口大貴, 佐野雅己: 交流電場下で自己駆動する非対称コロイド粒子の集団運動, 第 11 回物性科学領域横断研究会, 2017 年 11 月 17–18 日, 千葉.

[59] 谷田桜子, 古田健也, 西川香里, 平岩哲也, 小嶋寛明, 大岩和弘, 佐野雅己 ; Volume exclusion effect in collective motion of microtubules gliding on kinesin bed, 第 11 回物性科学領域横断研究会, 2017 年 11 月 17–18 日, 千葉.

[60] 上道雅仁, 佐野雅己 : 細胞集団の示すネマチックな秩序と欠陥ダイナミクス, 第 11 回物性科学領域横断研究会, 2017 年 11 月 17–18 日, 千葉.

[61] 平岩徹也 : Theory for chemotactic migration of eukaryotic cells 第 11 回物性科学領域横断研究会, 2017 年 11 月 17–18 日, 千葉.

[62] 谷田桜子 ; 振動子としてのエレベータの同期現象, 第 23 回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム, 2017 年 12 月, 愛知.

[63] 岩澤諄一郎, 西口大貴, 佐野雅己: Directed Collective Motion of Asymmetric Colloidal Particles under an AC electric field, アクティブマター研究会 2018, 2018 年 1 月 19–20 日, 京都.

[64] 谷田桜子, 古田健也, 西川香里, 平岩徹也, 小嶋寛明, 大岩和弘, 佐野雅己 ; Collective motions of microtubules driven by kinesin, アクティブマター研究会 2018, 2018 年 1 月 19–20 日, 京都.

[65] 平岩徹也; Theory on chemotactic migration of eukaryotic cells, アクティブマター研究会 2018, 2018 年 1 月 19–20 日, 京都.

[66] 佐野雅己: 趣旨説明, 第 73 回日本物理学会年会 共催シンポジウム, 2018 年 3 月 22 日, 東京.

[67] 岩澤諄一郎, 西口大貴, 佐野雅己: 交流電場下での非対称自己駆動粒子集団の統計的性質, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 22–25 日, 東京.

[68] 上道雅仁、佐野雅己 : 神経幹細胞の集団が示すネマチックな秩序と欠陥ダイナミクス，日本物理学会第 73 回年次大会，2018 年 3 月 22–25 日，東京.

[69] 谷田 桜子, 古田 健也, 西川 香里, 平岩 徹也, 小嶋 寛明, 大岩和弘, 佐野 雅己 ; 微小管の集団運動における排除体積効果の役割, 日本物理学会第 73 回年次大会，2018 年 3 月 22–25 日，東京.

[70] 平岩徹也: 真核細胞の走化性遊走の理論, 日本物理学会第 73 回年次大会，2018 年 3 月 22–25 日，東京.

招待講演

[71] 平岩徹也: アクトミオシン細胞骨格のモーター誘起応力に関する理論, つくばソフトマター 2017, 2017 年 5 月 16–17 日，千葉.

[72] 平岩徹也: アクトミオシン細胞骨格におけるモーター誘起応力の理論, 第 55 回日本生物物理学会年会, 2017 年 9 月 19–21 日, 熊本.

[73] 佐野雅己: せん断を受ける流体の非平衡相転移とその普遍性, 第 22 回久保記念シンポジウム「非平衡と流れ」, 2017 年 10 月 7 日, 東京.

[74] 佐野雅己, 玉井敬一: 層流・乱流転移と有向パーコレーション相転移, 基礎水理シンポジウム 2017 「乱流研究クロスオーバー : 流体物理学から水理学まで」,2017 年 12 月 6 日, 東京.

[75] 佐野雅己: 生物と非生物のあいだにある熱をめぐる話題, Biothermology Workshop 2017, Dec. 25–26, 2017, 東京.

(セミナー)

[76] 西口大貴: Experimental evidence of universality in active matter: Long-range order & anomalous fluctuations in collective motion of filamentous bacteria, KEK 理論センター・理論セミナー，2017 年 4 月 24 日，KEK 理論センター.

[77] 西口大貴: Long-range nematic order and anomalous fluctuations in collective motion of swimming filamentous bacteria, 竹内研究室セミナー，2017 年 4 月 28 日，東京工業大学.

[78] 平岩徹也: アクトミオシン細胞骨格におけるモーター誘起応力の理論, つくば時空間ダイナミクスの会 第一回, 2017 年 7 月 11 日, 茨城.

[79] 平岩徹也: Theory on motor-induced contractility in a cytoskeletal network, 前多研究室セミナー, 2018 年 1 月 9 日, 福岡.

[80] Y. T. Fukai: Emergence of large-scale planer flow in electroconvection of cholesteric liquid crystal, Seminar at University of Twente (Katsonis Research Group), Jan. 29, 2018, Enschede, Netherlands.

＜その他＞

(講義)

[81] 佐野雅己, 岡田真人: 生物物理学 I , 物理学科 4 年, 夏学期, 2017, 東大.

[82] 佐野雅己: 自己組織化とは何か, —ゆらぎと秩序の法則—, 東大 EMP 講義, 2018 年 7 月 1 日, 伊藤国際センター, 東大.

[83] 佐野雅己, 玉井敬一: 層流・乱流転移と普遍法則, サマースクール数理物理 2017,「乱流とパーコレーション」, 2017 年 8 月 25–27 日, 東大駒場.

[84] 佐野雅己: 自己組織化とは何か, —ゆらぎと秩序の法則—, 東大 EMP 講義, 2018 年 12 月 1 日, 伊藤国際センター, 東大.

[85] 佐野雅己: 総合討論「植物動物微生物」, 東大 EMP 講義, 2018 年 2 月 24 日, 伊藤国際センター, 東大.

[86] 佐野雅己: 電磁気学 A, 東大教養学部 1 年冬学期, 東大駒場.

(プレスリリース)

[87] 川口 喬吾, 佐野雅己: 動く細胞集団の作る新しいパターンの発見～神経幹細胞はトポロジカル欠陥を選別する～, 東大理学部プレスリリース, 2017 年 4 月 13 日.

[88] 神経幹細胞はトポロジカル欠陥を選別して集積, 日経バイオテク, 2017 年 4 月 13 日.

[89] 東大、動く細胞集団の作る新しいパターンを発見, 日経プレスリリース, 2017 年 4 月 13 日.

(アウトリーチ活動)

[90] 深井洋佑: 普遍性の話、またはコーヒーの染みと渋滞をめぐって東京大学学園祭講演企画「10 分で伝えます！ 東大研究最前線」, 2017 年 5 月 20–21 日

[91] 佐野雅己: 身の周りにもある科学の最前線 —楽しくてためになる研究のすすめ—, 平成２９年度第３０回秋田県理数科合同研修会, 2017 年 11 月 13 日, 秋田市.

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。本年度、10 月に大屋瑶子助教が着任し、研究教育体制が強化された。

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、開発してきたテラヘルツ帯受信機を、チリに設置されている国立天文台 ASTE 10 m 望遠鏡に搭載して試験観測を行ってきたが、望遠鏡の鏡面精度が十分でないことがわかり、現在では検出器の基礎研究に専念している。それと同時に、分子スペクトル線の静止周波数を測定するための分光装置への応用を目指している。

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。

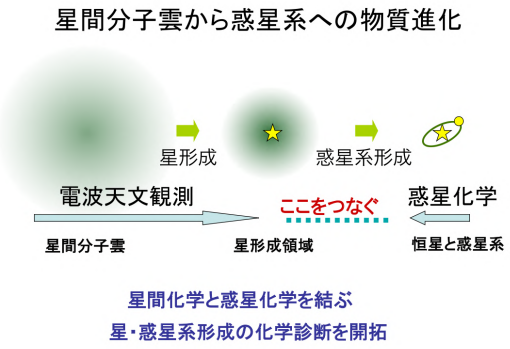


図 6.3.1: A schematic illustration of our goal

【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 データの解析の結果、Source B において、原始星周囲での分布が分子種によって異なることがわかった。この原始星円盤形成領域における化学組成の劇的な変化は、以前に報告した Source A での傾向と一致する。この天体は速度構造の解析が困難な face-on の向きを持つ（円盤が視線方向を向いている）が、物理構造の変化に伴う化学組成の変化を利用することで、そのエンベロープガスから円盤にかけての物理構造を明らかにした。

【低質量原始星 IRAS 18148−0440 アウトフロー】

IRAS 18148−0440 は、原始星コア L483 に含まれる Class 0 低質量原始星である。ALMA データの解析の結果、この原始星から噴き出すアウトフローの構

造が、CCH と CS の分子輝線によって捉えられた。アウトフローは東西に長さ 2000 au 程度に拡がっており、その速度構造は、放物面モデルで概ねよく再現されることがわかった。これにより、このアウトフローは天球面とほぼ平行に噴き、天球面との成す角は $(0-15)^\circ$ と求められた。さらに、観測された速度構造からは、アウトフローのキャビティー壁における回転運動が示唆された。

【中・低質量星形成領域における硫黄を含む分子】
12 個の若い中・低質量天体に対して、硫黄原子 (S) を含む分子輝線のサーベイ観測を行った。観測には野辺山 45 m 望遠鏡と、IRAM 30 m 望遠鏡を使用した。その結果、CS, SO, H_2CS, OCS などの様々な硫黄関連分子の輝線が検出された。SO や H_2CS の強度は $C^{34}S$ の強度とほとんど比例関係にあるのに対し、OCS はいくつかの天体でのみ強く検出されることがわかった (図 6.3.2)。さらに、へび座にある Class 0 原始星 SMM1 や、ペルセウス座にある Class 0 原始星 IRAS 4A など、飽和有機分子に富むホットコリノ天体において、OCS の輝線強度が強い傾向が見出された。

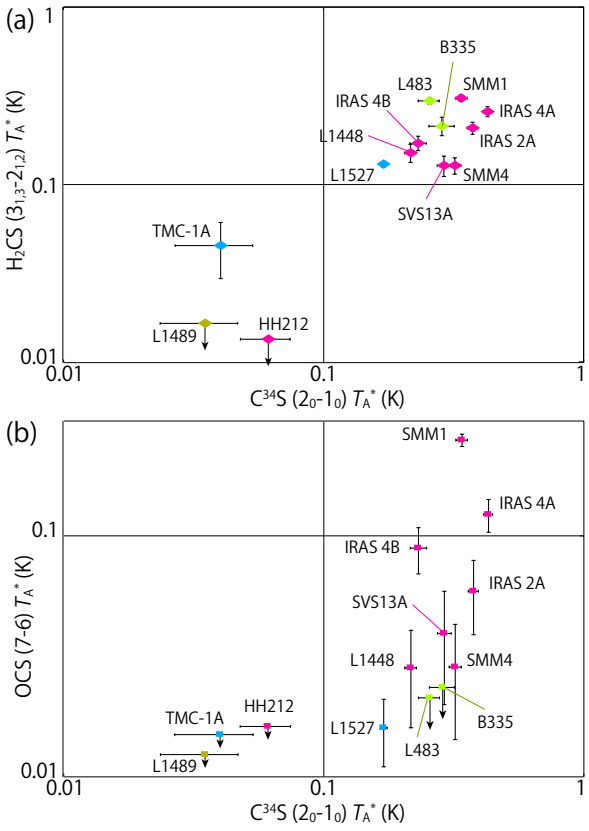


図 6.3.2: Plots of the H_2CS (a) and OCS (b) intensities against the $C^{34}S$ intensity. H_2CS shows a good correlation with $C^{34}S$, while OCS seems to be enhanced in hot corino sources (red).

【孤立した星形成形成領域 B335 の高分解能観測】
B335 は、孤立した低質量星形成領域として知られ、星形成のモデルケースとして活発な研究が行われている。本研究では、この天体に対して ALMA による高分解能観測（0.1”）を行った。その結果、B335 で初めて明瞭な回転運動を検出した。この回転は、ケプラー運動のモデルでは説明することが難しく、回転しながら落下するエンベロープガスのモデルでうまく説明できる。この回転運動から B335 の原始星の質量が 0.05 太陽質量程度であることがわかった。本研究により、B335 ではエンベロープガスの比角運動量が小さく、円盤形成領域が非常に小さいことが明らかになった。

【IRAS 15398−3359】
IRAS 15398−3359 は、炭素鎖分子に恵まれる Warm Carbon-Chain Chemistry 天体で、Class 0 の低質量原始星として知られる。本研究では、この原始星周りの円盤形成について、ALMA による高分解能観測 ($\sim 0.''2$) を行った。その結果、SO 分子輝線では原始星付近に集中した高速度成分が検出された。このことは原始星周りにすでに円盤構造が形成されていることを示唆する。ケプラー回転をしていることを仮定して原始星質量を見積もると、0.007 $M_\odot$ となった。このように小さな原始星質量にもかかわらず、すでに円盤構造を持っている天体は、これが初めてであり、原始星周りでの円盤形成過程の理解において重要な意義がある。

【L328−IRS】
L328−IRS は Class 0 の低質量原始星である。この天体は光度が比較的小さく（$\sim 0.05\ L_\odot$）、Very Low Luminosity Object (VeLLO) と呼ばれる天体の 1 つである。この天体に対する ALMA のアーカイブデータ（分解能: $\sim 0.''3$）を解析した。その結果、$C^{18}O$ 分子輝線の速度構造から、原始星周りに回転運動を検出した。これは回転している円盤構造が形成されている可能性を示唆する。円盤がケプラー回転していることを仮定すると、原始星質量は 0.2 $M_\odot$ と見積もられた。この天体は光度が非常に小さいにもかかわらず、原始星質量は IRAS 15398−3359 より大きく、より成長しているとみられる。

【ペルセウス座分子雲における DNC/HNC 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、重水素濃縮度は星なしコアの時代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 bolometric temperature に対し強い負の相関をもつことがわかった。また、分子イオン N_2H^+ の原始星進化に対する相関と比較すると中性分子 HNC の重水素濃縮度では原始星進化に対して緩やかに減少していることが確認された。これは、中性分子は分子イオンよりも反応性が低く、原始星誕生後も影響を受けにくいためと考えられる。

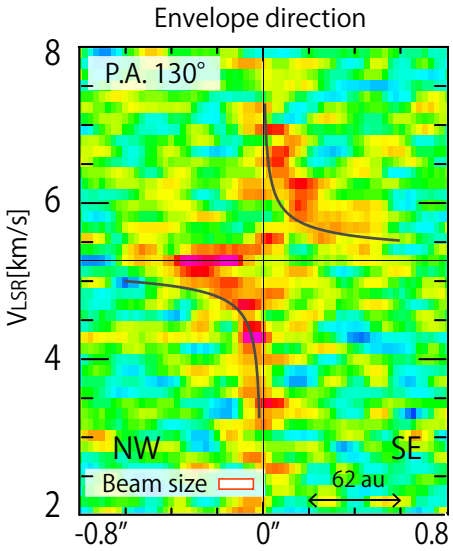


図 6.3.3: The PV diagram of the SO ($6_7 - 5_6$) emission along the envelope direction centered at the continuum peak position. The dashed curves show the model of Keplerian rotation.

【原始星 L1527 における H_2CO および c-C_3H_2 の D/H 比】
低質量原始星 L1527 に対して H_2CO および c-C_3H_2 とその重水素化物を ALMA の ACA アレイを用いて観測した。その結果、ノーマル種は原始星中心にピークを持つのに対し、重水素化物は原始星から 1000 au 程度離れた位置にピークを持つことがわかった。重水素化物のピークでは c-C_3HD/c-C_3H_2 比が 6%程度だが、$HDCO/H_2CO$ 比は 90%程度と非常に高い値を示した。c-C_3H_2 は気相中で生成されるが、H_2CO は気相中でも星間塵上でも生成されるため、D/H 比が 2 つの分子で異なる理由として、H_2CO では星間塵上で重水素濃縮が効率よく進んでいる可能性が考えられる。

【L1527 のラインサーベイ】
おうし座の L1527 は WCCC の性質を示す代表的な低質量原始星である。我々はその化学組成の全貌を明らかにするため、野辺山 45 m 望遠鏡を用いてラインサーベイ観測を行ってきた。80–116 GHz の周波数範囲の観測で 243 本の輝線が検出され、69 種類の分子が同定された。典型的なホットコリノ天体 IRAS 16293–2422 の観測と比較すると、炭素鎖分子の存在量が 10 倍程度も高かった一方で、$HCOOCH_3$ などの大型飽和有機分子の存在量は 10^{-3}–10^{-2} 程度以下であることがわかり、WCCC 天体とホットコリノ天体の化学的多様性が改めて確認された。

【OH 18 cm 線の強度異常における遠赤外線の影響の解析】
OH 分子の 18 cm 線は、4 本の超微細構造遷移線 (1612, 1665, 1667, 1720 MHz) に分かれている。おうし座の HCL2 領域の直線構造において、OH 18 cm 線を観測したところ、1720 MHz 線が宇宙背景放射に対

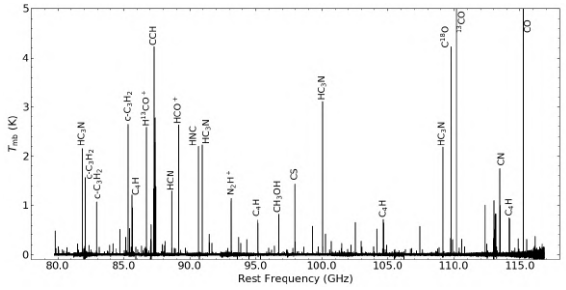


図 6.3.4: Spectral line survey in the 3 mm band toward L1527

する吸収線として検出された。この現象は通常の統計平衡励起計算では再現できない。そこで、その起源を調べるために、星間塵の遠赤外線放射の影響を考慮した統計平衡励起計算を行った。その結果、星間塵の温度が 80 K のとき、温度が低く (< 30 K)、柱密度が高い ($> 10^{15}$) 場合に吸収線を再現することができた。即ち、1720 MHz 線の吸収線は、温かいガスに囲まれた、比較的密度が高く冷たい領域をトレースすると示唆される。

【Pipe nebula における OH 18 cm 線の観測】
へびつかい座の分子雲 Pipe nebula は、南北方向に特徴的な直線構造を示している。この起源として、近傍の恒星 θ-Ophiuchi からの紫外線放射の影響や、東西方向に伸びる別のフィラメントとの衝突などが考えられている。これらを検証するため、Pipe nebula において OH 18 cm 線の観測を行い、ガスの運動温度を調べた。その結果、θ-Ophiuchi からの距離と運動温度の間に相関は見られなかった。一方、2 つのフィラメントの境界領域では、1665 MHz 線と 1667 MHz 線の吸収線が検出された。この吸収線は、運動温度がおよそ 100 K 以上であることを示しており、フィラメント衝突の可能性を示唆している。

6.3.2 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。

【0.9 THz HEB ミクサにおける AlN バッファ層の効果】
我々は、石英基板上に NbTiN 薄膜を製膜する際、AlN をバッファ層に用いることで NbTiN 薄膜の超伝導特性が著しく改善されることを見出した。しかし、それを用いて作成した HEB ミクサの雑音性能は改善せず、雑音性能に対する AlN バッファ層の効果は依然不明であった。今回、このことを、0.9 THz 帯 HEB ミクサ素子製作でバッファ層を用いた場合と用いない場合をできるだけ同条件で行うことによって検証した。その結果、AlN バッファ層を導入すると素子の超伝導転移温度が大きく上昇するとともに、雑音性能も向上することが示された。その原因が、格子冷却効率が上がったためなのか、それとも超伝導転移温度の上昇だけが反映されているのかを確かめる実験が進行中である。

【1.9 THz HEB ミクサの開発】
地球・惑星大気環境やプラズマ診断、実験室分光などのテラヘルツ分光計測を見据え、ホーン/導波路型の 1.9THz 超伝導 NbTiN-HEB ミクサ素子の開発を行った。素子は設計通りの良好な超伝導 IV 特性を示し、最終的に導波路への実装のために水晶基板を厚み 18 μ m、幅 36 μ m にチップ化を行う。その際の微細加工が課題となっていたが、本年、ダイシングブレードのポストプロセス、接着剤の硬度、研磨時の平行性のキャリブレーションの手法などを改善することで、微細加工の歩留りをほぼ 100% に改善することができた。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。

【サブミリ波帯実験室分子分光計の開発】
サブミリ波帯観測用の超伝導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を理化学研究所で開発した。これは、長さ 2 m 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。試料気体分子からの放射を直接受信するため、従来のサブミリ波帯の分光実験に比べてはるかに広い周波数帯域を同時に測定できることが、この方式の特長である。本年度はこの装置を立ち上げ、HDO, D_2O, CH_3OH を試料に用いてテスト測定を行った。その結果、200 GHz 帯においてこれらの分子の回転スペクトル線を測定することに成功した。この実験で得られたスペクトル線の静止周波数の一部には文献値からのずれが見られたため、正確な周波数標準を用いて検証を行う予定である。また、今回用いた超伝導受信機には改良の余地があるため、将来的には感度を向上させることによりさらに短時間での測定を可能にできる見込みである。さらに、より周波数の高いテラヘルツ帯における分光測定を実現させるため、本研究室で開発している 0.9 THz 帯用受信機を搭載して実験を行うことも計画している。

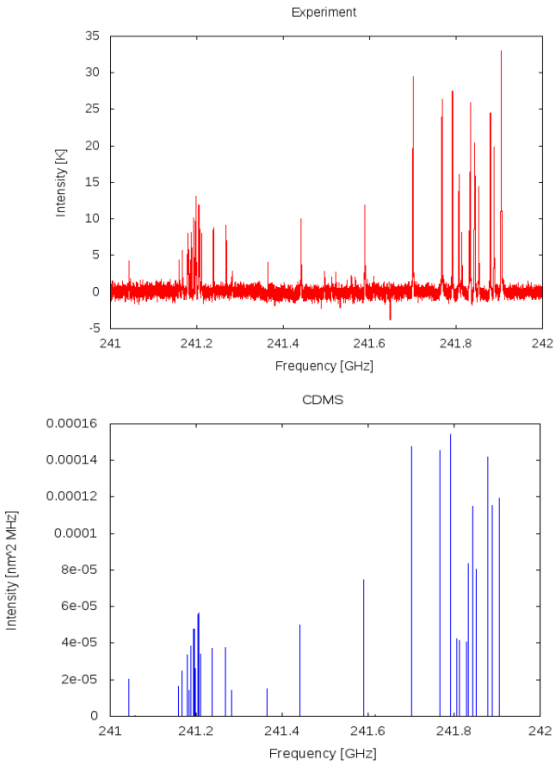


図 6.3.5: Laboratory spectrum of CH_3OH in comparison with calculated one

＜受賞＞

[1] 大屋瑶子、「若い太陽型原始星天体の物理的・化学的構造の解明」、東京大学総長賞

[2] 大屋瑶子、「若い太陽型原始星天体の物理的・化学的構造の解明」、東京大学理学系研究科奨励賞

＜報文＞

(原著論文)

[3] Soma, T., Sakai, N., Watanabe, Y., & Yamamoto, S., “Complex Organic Molecules in Taurus Molecular Cloud-1”, ApJ, 854, 116 (11pp) (2018).

[4] Oya Y., Moriwaki, K., Onishi, S., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Favre, C., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., & Yamamoto, S., “Chemical and Physical Picture of IRAS 16293−2422 Source B at a Sub-arcsecond Scale Studied with ALMA”, ApJ, 854, 96 (19pp) (2018).

[5] Nishimura, Y., Watanabe, Y., Harada, N., Sakai, N., Shimonishi, T., Aikawa, Y., Kawamura, A., & Yamamoto, S., “Molecular-cloud-scale Chemical Composition II. A Mapping Spectral Line Survey toward W3(OH) in the 3 mm Band”, ApJ, 848, 17 (18pp) (2017).

[6] Watanabe, Y., Sakai, N., Lopez-Sepulcre, A., Sakai, T., Hirota, T., Liu, S.-Y., Su, Y.-N., & Yamamoto, S., “Discovery of Striking Difference

of Molecular-emission-line Richness in the Potential Proto-binary System NGC 2264 CMM3", ApJ, 847, 108 (8pp) (2017).

[7] Watanabe, Y., Nishimura, Y., Harada, N., Sakai, N., Shimonishi, T., Aikawa, Y., Kawamura, A., & Yamamoto, S., "Molecular-cloud-scale Chemical Composition I. A Mapping Spectral Line Survey toward W51 in the 3 mm Band", ApJ, 845, 116 (30pp) (2017).

(学位論文)

[8] 大屋瑶子、"A Few Tens au Scale Physical and Chemical Structures around Young Low-Mass Protostars" (博士論文)

[9] 千葉雄太郎、「超伝導ミクサを用いた分子分光実験装置の開発」(修士論文)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[10] Chiba, Y., Sakai, N., Ebisawa, Y., Yoshida, K., Sakai, T., Watanabe, Y & Yamamoto, S., "A New Terahertz Emission Spectrometer at RIKEN", 34th International Symposium on Free Radicals, Hayama, Japan, 2017 年 8 月 27-9 月 1 日

[11] Chiba, Y., Sakai, N., Ebisawa, Y., Yoshida, K., Sakai, T., Watanabe, Y & Yamamoto, S., "A New Emission Spectrometer at RIKEN", Laboratory Astrophysics Workshop 2017, Bonn, Germany, 2017 年 11 月 29-12 月 1 日

招待講演

[12] Oya, Y., "L483: Warm carbon-chain chemistry source harboring Hot Corino activity", Symposium "Evolution of Molecules in Space"、北海道大学、2017 年 6 月 27 日–29 日

(国内会議)

一般講演

[13] 大屋瑶子、「数 10 au スケールで見た Class 0-I 低質量原始星天体の物理的・化学的構造 」、基研研究会「原始惑星系円盤」、京都大学、2017 年 7 月 10 日–12 日

【天文学会 2017 年秋季年会、北海道大学、2017 年 9 月 11 日–13 日】

[14] 大屋瑶子、山本智、坂井南美、渡邉祥正、廣田朋也、「Class 0 低質量原始星コア L483 に付随するアウトフローの回転構造の解析」、P108a

[15] 海老澤勇治、坂井南美、Karl Menten、山本智、「HCL2 領域の直線構造における OH 18 cm 線の吸収線の解析」、P135a

[16] 吉田健人、坂井南美、渡邉祥正、山本智、「星形成領域における H2CO の 13C 同位体比の観測」、P137a

[17] 今井宗明、坂井南美、Ana López-Seplucre、大屋瑶子、渡辺祥正、山本智、「孤立した星形成領域での炭素鎖分子形成」、P136a

[18] 大小田結貴、大屋瑶子、山本智、坂井南美、渡邉祥正、「Class 0 低質量原始星 IRAS 15398-3359 の円盤・エンベロープ構造」、P105a

【天文学会 2018 年春季年会、千葉大学、2018 年 3 月 14 日–17 日】

[19] 大屋瑶子、山本智、坂井南美、渡邉祥正、「低質量原始星形成領域における硫黄関連分子のサーベイ観測」、P111a

[20] 海老澤勇治、坂井南美、Karl M. Menten、山本智、「OH 18 cm 線で探る Pipe nebula の構造形成」、Q41c

[21] 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 ALMA 観測」、P112a

[22] 今井宗明、坂井南美、Ana López-Seplucre、大屋瑶子、渡辺祥正、山本智、「ペルセウス座分子雲での重水素濃縮度のサーベイ」、P113a

[23] 大小田結貴、大屋瑶子、山本智、坂井南美、渡邉祥正、「Class 0 低質量原始星 IRAS 15398-3359 の円盤形成領域における化学的構造」、P114a

[24] 竹ケ原諒貴、海老沢勇治、大口脩、山本智、坂井南美、「0.9 THz 帯超伝導 HEB ミクサにおける AlN バッファ層の影響の評価」、V125b

招待講演

[25] 大屋瑶子、「Class 0-I 低質量原始星天体の円盤形成領域における化学的多様性とその変化」、宇宙生命計算科学連携拠点第 3 回ワークショップ、筑波大学、2017 年 11 月 20 日–21 日

[26] 山本　智、「星間雲の階層構造と化学」、2017 年度「物質階層の原理を探求する統合的実験研究」研究報告会、理研、2018 年 2 月 13 日–14 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「6.4.1 レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展—従来の経緯」は、昨年度と重複するが、研究の進展を概観するために必要な内容であるので、ご理解いただきたい。

6.4.1 レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展

従来の経緯

本研究室では、レーザー光を用いた気体分子の配向制御技術の開発と配列あるいは配向した分子試料を用いた応用実験を進めている。分子の向きが揃った試料を用いることが出来れば、従来、空間平均を取って議論しなければならなかった多くの実験を格段に明瞭な形で行うことが出来る。そればかりでなく、化学反応における配置効果を直接的に調べることができるのを始めとし、物理現象における分子軸や分子面とレーザー光の偏光方向との相関や分子軌道の対称性や非対称性の効果を直接調べることができるなど、全く新しい実験手法を提供できる。実際、配列した分子試料の有効性は、I_2 分子中の多光子イオン化過程を、時間依存偏光パルスを用いて最適制御することに成功したり (T. Suzuki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 133005 (2004))、配列した分子中からの高次高調波発生実験において、電子のド・ブロイ波の打ち消しあいの干渉効果を観測することに成功したり (T. Kanai *et al.*, Nature (London) **435**, 470 (2005)) するなどの、本研究室の成果でも実証されている。

分子の配向制御については、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 $\langle\cos^2\theta_{\rm 2D}\rangle$ ($\theta_{\rm 2D}$ 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。

平成 29 年度の進展

上記の方針にしたがって、実際に干渉計型の光路を導入し、2 波長パルスのアライメントを行った。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する。この 2 波長間の相対位相を干渉信号で検出するため、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。クーロン爆裂イメージング法を用いて配向度を測定しつつ、ポンプ光の 2 波長間の相対位相をリアルタイムで検出しデータを保存しておくことによって、2 波長間の相対位相が安定しているときのデータを採用できる。これまでの実験によって、配向度 $|\langle\cos\theta\rangle| > 0.1$ を達成することに成功した。この配向度は、プローブ光による試料分子の多価イオン生成過程における配向依存性の効果を避けるため、プローブ光の偏光を検出器面に垂直にして観測された配向度として世界で最も高い値である。実際、プローブ光の偏光をポンプ光のそれと平行、即ち、検出器面に平行にして観測すると、プローブ光による試料分子の多価イオン生成過程における配向依存性の効果のため、配向度は確実に過大評価されてしまうことに注意すべきである。

一方、ポンプ光として利用するナノ秒 Nd:YAG レーザーの基本波と第 2 高調波のパルス幅が異なることに伴う立ち上がりの違いが配向度の向上を妨げていることは、パルス幅 10 ns 程度の Nd:YAG レーザーパルスを用いても配向のダイナミクスが非断熱的であることを意味している。この非断熱性に伴うデメリットは、第 2 高調波パルスの偏光を楕円偏光にすることによってある程度軽減されることを数値計算で明らかにした。基本波と第 2 高調波の偏光が共に直線偏光のときは、形成される非対称な相互作用ポテンシャルは極角 θ のみに依存する 1 次元的な形状となるのに対し、第 2 高調波パルスを楕円偏光とすることにより、極角 θ に加え、方位角 ϕ にも依存す

る 3 次元的な形状となり、非対称ポテンシャル間の障壁が方位角 ϕ に沿って低い領域が生成され、配向状態へのトンネル遷移の確率が上昇することがポイントである。実際、数値計算の結果、同じ強度の第 2 高調波パルスを直線偏光から楕円偏光にすると配列度 $\langle\cos^2\theta\rangle$ は若干下がるものの、配向度 $\langle\cos\theta\rangle$ は有意に向上することを確認した。この手法の優位性を実験でも検証する予定である。

6.4.2 単一アト秒パルスの発生とその偏光制御に向けて

近年、高次高調波発生の技術を応用して発生させた単一アト秒パルスを用いて物質中の電子の超高速ダイナミクスを観測ないし制御する研究が注目を集めている。従来、アト秒パルスの偏光は直線偏光に限られていたが、基本波に 2 波長の逆回り円偏光を用いることにより、円偏光の単一アト秒パルスの発生とその応用に関する研究も現れてきた。光電場はベクトル量であるから、その性質を最大限活かし、物質中の電子の超高速ダイナミクスを高度に制御するためには、単一アト秒パルスの偏光状態を円偏光だけでなく任意の楕円偏光に制御できることが望ましい。一般に、高次高調波発生の技術を利用して発生する単一アト秒パルスの波長域は極端紫外–軟X線領域であるため、$\lambda/4$ 波長板などの既存の光学素子を用いることはできない。そこで、配列した分子アンサンブルがもつ複屈折性を単一アト秒パルスを始めとする高次高調波の偏光制御に利用する可能性を追究する研究に着手した。

実際に配列した分子アンサンブルが複屈折性をもつ、すなわち、屈折率の分子軸に平行な成分と垂直な成分に有意な差があることを確認するため、高次高調波を光源とする配列した窒素分子の吸収分光実験を行った。フェムト秒 Ti:sapphire レーザー増幅システムの出力を窒素分子を配列するためのポンプ光と高次高調波発生用のプローブ光に分けた。プローブ光は将来 2 重偏光ゲート法 (Double Optical Gating: DOG) を用いて単一アト秒パルスを発生するのに有利なように 3 atm の Ne ガスを充填した中空ファイバーに入射し、自己位相変調でスペクトルを広げたのち、チャープミラー圧縮器を用いてパルス幅 10 fs 以下に圧縮した。既に DOG を利用して単一アト秒パルスを発生するための準備も済ませている (DOG システムの導入に当たり、NTT 物性科学基礎研究所の増子拓紀氏と小栗克弥氏のご協力を得た。ここに記して謝意を表する。) まず、ポンプ光を用いずにランダム配向の分子アンサンブルを通過した高調波がそのスペクトル領域全域にわたり、分子アンサンブルを光学素子として利用するには全く支障がない程度の吸収 (20%未満) を受けることを確認した。その後、ポンプ-プローブ実験を行ったところ高調波スペクトルの吸光度が窒素分子の非断熱的配列に対応する変調を受けることも確認できた。解析の結果、分子アンサンブルの吸収係数の分子軸に平行な成分と垂直な成分に有意な差があることが明らかになった。このことは、Kramers-Kronig の関係式から分子アンサンブルの屈折率の分子軸に平行な成分と垂直な成分に有意な差があること、すなわち、配列した分子アンサンブルが有意な複屈折性をもつことを意味する。

今後、配列した分子の向きに対し、高調波の偏光方向を回転させながらデータを取得し、配列した分子アンサンブルの複屈折性の詳細を明らかにするとともに、配列した分子アンサンブルによって偏光状態を制御した高調波によって希ガスから生成される光電子の角度分布を測定して高調波の偏光状態を評価する予定である。一方、導入済みの DOG システムをチューニングして実際に単一アト秒パルスの発生とその偏光制御の実現を目指す。

6.4.3 硫化カルボニル分子の多チャンネル解離性イオン化の配向依存性に対するレーザー波長の効果

本研究室では、先に気体分子と超短パルス高強度レーザー電場との相互作用で発現する様々な物理現象の探究を目的として電子・イオン多重同時計測運動量画像分光装置を開発した。既にこの装置を用い、OCS 分子の多チャンネル解離性イオン化過程の配向依存性を明らかにした。3 原子分子である OCS 分子の場合、同じ 1 価のイオンでも $OCS^+ \rightarrow S^+ + CO$ (I)、$CO^+ + S$ (II)、$CS^+ + O$ (III)、及び $O^+ + CS$ (IV) の様に様々な解離の仕方をする。光電子とイオンのコインシデンス測定を行うことにより、上記の解離チャネルを区別しつつトンネルイオン化の配向依存性を明らかにすることに初めて成功した。具体的には、チャンネル (I)、(II)、及び (III) は、高強度レーザー電場が S 原子側を向いているとき (トンネルイオン化の描像に従えば O 原子側から) イオン化しやすく、チャンネル (IV) は高強度レーザー電場が O 原子側を向いているとき (トンネルイオン化の描像に従えば S 原子側から) イオン化しやすいことを見出した。また、このトンネルイオン化の配向依存性の度合いがレーザー強度に依存することも見出した (Y. Sakemi *et al.*, Phys. Rev. A **96**, 011401(R) (2017))。

上記の実験は、フェムト秒 Ti:sapphire レーザー増幅器からの出力 (中心波長 $\lambda \sim 800$ nm) を用いて行った。より長波長のレーザー光を用いることにより、イオン化過程がよりトンネルイオン化の描像に近づく。本年度、フェムト秒 Ti:sapphire レーザー増幅器の出力で励起した光パラメトリック増幅器からの出力 (中心波長 ~1300 nm) を用いた実験に着手した。中心波長 λ ~800 nm で得られた結果と比較検討するとともに、理論モデルの構築により有益な情報が得られると期待できる。

6.4.4 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原子・分子の角度分解光電子分光

近年、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 (**S**Pring-8 **A**ngstrom **C**ompact Free Electron **La**ser) 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 2*p* 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明瞭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、2016 年度から数 10 から 150 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。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、EUV-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。高強度場近似 (Strong-field approximation: SFA) を用いたモデル計算で FEL パルスと Ti:sapphire パルスとのジッターを考慮しながらシミュレーションしたところ、ジッター幅として 1 ps を仮定した時に実験で得られたスペクトルを最もよく再現することが分かった (S. Minemoto *et al.*, J. Phys. B **51**, 075601 (2018))。一般に、FEL と Ti:sapphire パルスの時間同期の制御は電気信号によっているため、現在の技術では、数百フェムト秒から 1 ピコ秒程度のジッターは避けられない。このような状況に於いて、超短パルス近赤外レーザーを併用した時に現れる 2 光子超閾イオン化信号が両パルス間の時間的不確定性を評価するよい指標となることが分かる。

一方、「超高速光電子回折法」の実現に向けて、分子試料の時間分解光電子スペクトルの測定も行っている。例えば、同期 Ti:sapphire レーザーにより二酸化炭素分子を非断熱的に配列させ、光子エネルギー 55.4 eV の FEL パルスによって発生する光電子の角度分解スペクトルを測定した。ここで、FEL と同期レーザーとのジッターの影響を評価するために、光電子測定と同時に、フラグメントイオンの観測も行っている。すなわち、非断熱的分子配列法では、分子の向きが時々刻々変化するためにジッターの影響で同一のデータセットにも様々な配列状態からのデータが混ざっているが、ショットごとにフラグメントイオンから配列状態を評価することにより、光電子スペクトルと配列状態の対応付けをすることができる。現在、詳細な解析を進めているところであるが、データの一部を用いた暫定的な結果として、二酸化炭素分子の配列状態に応じて角度分布が変化する光電子チャネルが存在することを確認している。

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と島田紘行特任助教を始めとし、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。

6.4.5 その他

本年度は修士課程の大学院生 2 名 (小松和真君、三宅聡一朗君) が加入する一方、修士 1 名 (小松原航君) を輩出した。ここで報告した研究成果は、酒井広文研究室のメンバーと客員共同研究員として受け入れた島田紘行氏 (高エネルギー加速器研究機構)、及び、学部 4 年生の特別実験で本研究室に配属された木原太一君、小林志鳳君 (S セメスター)、奥津明俊君、仲林宏斗君 (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 29 年 6 月 9 日–7 月 20 日の 6 週間にわたり、UTRIP (**U**niversity of **T**okyo **R**esearch **I**nternship **P**rogram) 生として、Ms. Asmae Benhemou (University of Glasgow, Glasgow, United Kingdom) を受け入れた。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Yusuke Sakemi, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Orientation dependence in multichannel dissociative ionization of OCS molecules," Phys. Rev. A **96**, 011401(R) (2017) (6 pages).

[2] Shinichirou Minemoto, Hiroyuki Shimada, Kazma Komatsu, Wataru Komatsubara, Takuya Majima, Tomoya Mizuno, Shigeki Owada, Hirofumi Sakai, Tadashi Togashi, Shintaro Yoshida, Makina Yabashi, and Akira Yagishita, "Ar 3p photoelectron sideband spectra in two-color XUV+NIR laser fields," J. Phys. B **51**, 075601 (2018) (8 pages).

[3] Je Hoi Mun and Hirofumi Sakai, "Improving molecular orientation by optimizing relative delay and intensities of two-color laser pulses," to appear in Phys. Rev. A (9 pages).

(学位論文)

[4] Wataru Komatsubara, "High-order harmonic generation from benzene molecules," Master's thesis, March 2018.

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[5] Shinichirou Minemoto, "Photoelectron diffraction from laser-aligned molecules using an x-ray free-electron laser," 2017 ICPEAC satellite: (e,2e), Double Photo-ionization & Related Topics and Polarization and Correlation in Electronic & Atomic Collisions, Queensland, Australia, August 2, 2017.

一般講演

[6] 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," 33rd Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Nagoya, Japan, June 9, 2017.

[7] Wataru Komatsubara, Shinichirou Minemoto, Kazuma Komatsu, Soichiro Miyake, Satoru Takano, Tsutomu Taguchi, and Hirofumi Sakai, "High-order harmonic generation from benzene molecules," 33rd Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Nagoya, Japan, June 8, 2017.

[8] Md. Maruf Hossain, Xiang Zhang, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "All-optical molecular orientation of state-selected OCS molecules," 33rd Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Nagoya, Japan, June 8, 2017.

[9] Kazuma Komatsu, Soichiro Miyake, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai "Absorption spectroscopy of aligned molecules with single attosecond pulses," 2nd International Symposium on Attosecond Science, Saitama, Japan, August 26, 2017.

[10] Wataru Komatsubara, Shinichirou Minemoto, Kazuma Komatsu, Soichirou Miyake, Taichi Kihara, Yukiho Kobayashi, and Hirofumi Sakai "High-order harmonic generation from benzene molecules," 2nd International Symposium on Attosecond Science, Saitama, Japan, August 26, 2017.

[11] Wataru Komatsubara, "Ellipticity dependence of high-order harmonic intensities generated from benzene molecules with and without a YAG laser field," International Symposium on Advanced Photonics (iSAP Hamamatsu 2018), Shizuoka, Japan, April 18, 2018.

[12] Kazma Komatsu, "Absorption spectroscopy of aligned molecules with high-order harmonic pulses," International Symposium on Advanced Photonics (iSAP Hamamatsu 2018), Shizuoka, Japan, April 18, 2018.

(国内会議)

招待講演

[13] 酒井広文、「超高速高強度分子科学への貢献とアト秒レーザー技術の一課題」、第 1 回 ALFA シンポジウム、東京大学理学部化学本館 5 階講堂 (東京都文京区)、2017 年 12 月 9 日 (土).

一般講演

[14] Maruf Md Hossain, Xiang Zhang, Asmae Benhemou, Shinichirou Minemoto, Hirofumi Sakai、「All-optical orientation of state-selected OCS molecules」、第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、福岡国際会議場 (福岡県福岡市)、2017 年 9 月 5 日 (火).

[15] 小松原航、峰本紳一郎、小松和真、三宅聡一朗、高野哲、木原太一、小林志鳳、酒井広文、「ベンゼン分子からの高次高調波発生」、第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、福岡国際会議場 (福岡県福岡市)、2017 年 9 月 5 日 (火).

[16] 小松原航、「二色超短パルスレーザーによる Ar 原子の角度分解光電子分光:実験」、原子衝突学会第 42 回年会、上智大学四谷キャンパス (東京都千代田区)、2017 年 9 月 9 日 (土).

[17] 小松和真、「二色超短パルスレーザーによる Ar 原子の角度分解光電子分光:理論」、原子衝突学会第 42 回年会、上智大学四谷キャンパス (東京都千代田区)、2017 年 9 月 9 日 (土).

[18] 島田紘行、峰本紳一郎、三宅聡一朗、小松和真、小松原航、高野哲、酒井広文、吉田慎太郎、間嶋拓也、水野智也、柳下明、「EUV-FEL と超短パルス近赤外光による 2 色超閾イオン化過程の観測」、日本物理学会 2017 年秋季大会、岩手大学上田キャンパス (岩手県盛岡市)、2017 年 9 月 21 日 (木).

[19] 峰本紳一郎、島田紘行、木原太一、小林志鳳、小松和真、小松原航、酒井広文、間嶋拓也、水野智也、柳下明、「EUV-FEL を用いた超高速光電子回折法の開発 I」、日本物理学会 2017 年秋季大会、岩手大学上田キャンパス (岩手県盛岡市)、2017 年 9 月 21 日 (木).

[20] 峰本紳一郎、島田紘行、木原太一、小林志鳳、小松和真、小松原航、酒井広文、間嶋拓也、水野智也、柳下明、「EUV-FEL を用いた超高速光電子回折法の開発」、第 31 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、つくば国際会議場 (茨城県つくば市)、2018 年 1 月 9 日 (火).

[21] 島田紘行、峰本紳一郎、三宅聡一郎、小松和真、小松原航、高野哲、酒井広文、吉田慎太郎、間嶋拓也、水野智也、柳下明、「EUV-FEL と超短パルス近赤外光による Ar 原子の 2 色超閾イオン化過程」、第 31 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、つくば国際会議場 (茨城県つくば市)、2018 年 1 月 9 日 (火).

[22] 三宅聡一朗、「単一アト秒パルスを用いた配列した窒素分子の吸収スペクトル測定」、第 10 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、京都大学国際イノベーション棟 5 階ホワイエ (京都府京都市)、2018 年 1 月 23 日 (火).

[23] 小松原航、「円偏光 YAG レーザー電場中のベンゼン分子から発生する高次高調波の楕円率依存性」、第 10 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、京都大学国際イノベーション棟 5 階ホワイエ (京都府京都市)、2018 年 1 月 23 日 (火).

[24] 章翔、「Orientation of state-selected OCS molecules with intense nonresonant two-color laser fields」、第 10 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、京都大学国際イノベーション棟 5 階ホワイエ (京都府京都市)、2018 年 1 月 23 日 (火).

[25] 小松和真、三宅聡一朗、峰本紳一郎、酒井広文、「単一アト秒パルスを用いた配列分子の吸収スペクトル測定」、レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会、京都市勧業館みやこめっせ、2018 年 1 月 24 日 (水).

[26] 小松原航、峰本紳一郎、小松和真、三宅聡一朗、木原太一、小林志鳳、酒井広文、「ベンゼン分子から発生する高次高調波の楕円率依存性」、レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会、京都市勧業館みやこめっせ、2018 年 1 月 24 日 (水).

[27] Md. Maruf Hossain, Zhang Xiang, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai、「Orientation of state-selected OCS molecules with relative-delay-controlled two-color laser fields」、レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会、京都市勧業館みやこめっせ、2018 年 1 月 26 日 (金).

[28] 小松和真、三宅聡一朗、峰本紳一郎、酒井広文、「高次高調波を用いた配列分子の吸収スペクトルの測定」、第 65 回応用物理学会春季学術講演会、早稲田大学西早稲田キャンパス (東京都新宿区)、2018 年 3 月 19 日 (月).

[29] 文堤會、酒井広文、「2 色レーザーパルスの相対遅延と強度の最適化による分子配向度の向上」、第 65 回応用物理学会春季学術講演会、早稲田大学西早稲田キャンパス (東京都新宿区)、2018 年 3 月 19 日 (月).

[30] Maruf Md Hossain, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, 「All-optical orientation of linear molecules with combined linearly and elliptically polarized two-color laser fields」、第 65 回応用物理学会春季学術講演会、早稲田大学西早稲田キャンパス (東京都新宿区)、2018 年 3 月 19 日 (月).

[31] 仲林宏斗、小松原航、酒井広文、「2 色レーザー電場を用いたマクロな 3 回対称性をもつ分子アンサンブルの生成法の提案」、第 65 回応用物理学会春季学術講演会、早稲田大学西早稲田キャンパス (東京都新宿区)、2018 年 3 月 19 日 (月).

[32] 小松和真、島田紘行、峰本紳一郎、大和田成起、小松原航、酒井広文、富樫格、間嶋拓也、水野智也、吉田慎太郎、矢橋牧名、柳下明、「SACLA の軟 X 線 FEL における同期レーザーとのジッターの評価」、日本物理学会第 73 回年次大会、東京理科大学野田キャンパス (千葉県野田市)、2018 年 3 月 23 日 (金).

[33] 島田紘行、峰本紳一郎、小松和真、小松原航、酒井広文、吉田慎太郎、間嶋拓也、水野智也、柳下明、「SXFEL と同期レーザーによって得られた原子分子の光電子 2 色シグナル」、日本物理学会第 73 回年次大会、東京理科大学野田キャンパス (千葉県野田市)、2018 年 3 月 23 日 (金).

(セミナー)

[34] 峰本紳一郎、「分子配列技術による超高速分子分光の新展開」、第 16 回高橋正彦研セミナー　ミニシンポジウム「化学反応動力学の実験と理論の最前線」、東北大学多元物質科学研究所 (宮城県仙台市)、2018 年 3 月 12 日 (月).

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ポンププローブ角度分解レーザー光電子分光法の開発を進めている。また、微細加工技術を駆使して物質系を制御し、新たな光をコントロールする手法を開拓している。具体的には人工構造を用いたテラヘルツ電磁波制御や縦電場生成、3D プリンタ技術と超臨界流体薄膜堆積法を用いた THz メタ

マテリアルなどに着目した研究を進めている。また、可視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。さらには、生命現象などの複雑な科学へアプローチするために必要となる、高速かつ高感度の光計測技術の開拓を進め、コヒーレントラマン散乱によるラベルフリー顕微鏡の開発を行っている。本研究室では、物理学教室における活動と共に、理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構及び工学系研究科附属光量子科学研究センターの活動を密接に連携して活動を進め、高強度パルス光によるコヒーレント軟 X 線を用いた新たな分光計測手法の開拓と実証や、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。さらに、物性研究所極限コヒーレント光科学研究センターも加えて発足した光量子科学連携研究機構を基盤とし、文部科学省革新的イノベーション創出プログラム（COI STREAM）「コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点」、NEDO プロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」などの産学連携による研究開発活動も推進している。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た (図 6.5.1 左)。解析を進めていく中で、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を行った。

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。現在 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)。本年度は本手法を用いて BEC 転移特有の変化が吸収イメージングによって得られるかどうか慎重に調べた。[30]

冷却原子を用いた量子クラスター形成過程の実験的シミュレーション

希薄で 100 nK 程度の極低温な原子気体 (以下、冷却原子) は、他の粒子系に類を見ない自由度と多角的な測定手法を有しているため、量子シミュレーターとして幅広い理学の発展や科学技術の革新的進

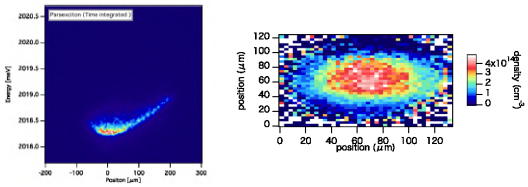


図 6.5.1: 左) トラップへ蓄積中の励起子発光イメージ 右)Lyman イメージングの結果

歩に対し大きな可能性を秘めている。我々はこれまで冷却原子実験より得られた希薄中性子物質の状態方程式が、原子核理論の結果とよく一致する事を示し、冷却原子系と核子系との間には非常に近い量子状態が存在する事を実証している [5, 13, 40]。今年度は分野横断的な量子クラスターに関する研究会を重ねることにより、冷却原子のフェッシュバッハ分子が、クォーク系、ハドロン系、核子系に表れる弱く束縛されている量子クラスター状態と非常に近い量子状態にあることを理解した [44, 45, 47]。故に冷却原子実験でフェッシュバッハ分子形成に伴う物性変化を、温度や相互作用を変数に系統的に調べることにより、様々な粒子系における量子クラスター形成過程の基礎物理を深化させることができる。今年度は上記を背景に、極低温リチウム 6 原子気体を用いて以下の 3 点の研究を進めた。

a)4 次ビリアル係数測定による少数系の研究 ： 2 量体の量子クラスター間の相互作用を測定するには、4 粒子系を用意しエネルギーを測定するか、4 粒子系の情報を含む物理量の測定を行う必要がある。我々は多体系の高温領域の熱力学ポテンシャルがビリアル展開で記述でき、その 4 次ビリアル係数は 1 粒子系から 4 粒子系までの分配関数から成る係数である事に注目し、4 次ビリアル係数の測定により 4 粒子系の物理の理解を進める手法を試みている。4 次ビリアル係数の厳密値は、理論的にも実験的にも、s 波相互作用しているスピン 1/2 フェルミ粒子系でさえ未だ示されておらず、冷却原子実験による厳密解の提示が求められている。我々は実験の先行研究の 2 例を分析し、これらの方法では原理的に厳密解に辿り着かない事を理解した。そこで独自の手法を提案し、コンピュータシミュレーションにより非常に厳密解に近い値を得る事を確認した。今後我々の新しい手法で 4 次ビリアル係数の決定を進めていく。

b) スピン感受率、圧縮率、比熱測定による量子クラスター形成過程の測定準備 ： 重イオン衝突実験でハドロン生成の物理が追求されているが、実験データからハドロン生成をどのように捉えるか議論が収束していない。冷却フェルミ原子系ではフェッシュバッハ分子形成に伴い、スピン感受率、圧縮率、比熱が変化を受けると予想されている。これらの物理量を測定するためには、有限の散乱長で相互作用しているフェルミ粒子系の熱力学量を測定する必要がある。これまで散乱長が発散しているユニタリーフェルミ気体の熱力学量測定の手法は確立されていたが、我々は有限散乱長の場合であっても熱力学量の評価が行える手法を開発し、量子クラスター形成過程の測定準備を進めた。今後様々な相互作用領域、温度領域でスピン感受率等の測定を進め、量子クラスター形成過程の理解を深化させる。

c) 散乱長の時間変調による粘性率測定の予備実験 ： 量子クラスター形成に伴い粘性率にも変化が見られる可能性がある。通常流れ方を研究する場合、粒子を閉じ込めている容器を膨張させたり圧縮させたりして粒子を流す必要がある。しかし冷却原子系の場合、粒子系の長さスケールは散乱長であるため、散乱長を時間変化させることにより、粒子はあたかもシステムサイズが変化しているように錯覚し、実効的な流れを感じるようになる。つまり実験ではフェッシュバッハ共鳴を与えている外部磁場を変化させることにより、強相関フェルミ粒子系の粘性率を測定できる可能性がある。本年度では散乱長が発散しているユニタリーフェルミ気体に対して、散乱長の変調周波数、振幅、変調時間に対して粘性率に伴う内部エネルギーの上昇率の測定を行い、本手法の有効性を確認した。今後定量的な粘性率の評価や量子クラスター形成との関係性、また超流動転移点での粘性率の変化に対しても研究を進める。

6.5.2 非自明な光学現象の探索とその応用

フェムト秒レーザー加工によるテラヘルツ波反射防止シリコンモスアイ構造の作製

近年のテラヘルツ (THz) 技術の進歩に伴って、THz 非線形光学や宇宙からの微弱 THz 信号観測など、THz 波の高強度化や検出の高感度化が重要となる研究が多く進められている。これらを実現するためには THz 波のエネルギー損失の低減が重要であり、その損失要因の一つである材料界面でのフレネル反射の抑制が必要とされる。ここで、波長以下の大きさの微細突起構造が周期的に配列したモスアイ構造は、反射の原因となる屈折率の物質界面の不連続変化を解消し、広帯域な反射防止膜として機能することが知られている。このようなモスアイ構造は可視光およびマイクロ波領域では広く使われている一方で、その中間の、特徴的なサイズが数 10 nm 数 100 mm のオーダーとなる THz 領域においては、旧来の加工法では作製が困難であった。本研究では、フェムト秒レーザー微細加工技術を用いて、代表的な THz 光学材料である高抵抗シリコン基板に THz 反射防止モスアイ構造を作製し、透過特性を評価した。中心波長 1030 nm、パルス幅 190 fs、繰り返し 6 kHz の超短パルスレーザーの集光点を、高抵抗シリコン基板表面上に走査させることによって、ピッチ約 30 mm、高さ約 100 mm のモスアイ構造を 6 mm 四方のエリアに作製した (図 6.5.2(a)(b))。基板両面をモスアイ加工した構造の透過スペクトルを THz 時間領域分光法により評価したところ、0.5-2.5 THz に及ぶ広い範囲で透過率が上昇していることが確認された (図 6.5.2(c))。これは、本構造がテラヘルツ周波数帯の反射防止膜として良好な特性を有していることを示す結果である [66]。

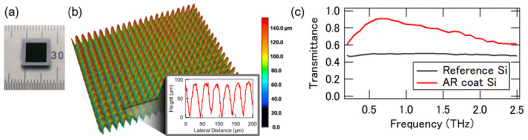


図 6.5.2: (a) シリコンモスアイ構造の外観写真 (b) シリコンモスアイ構造のレーザー顕微鏡像及び断面像 (c) シリコンモスアイ構造及びシリコン基板のテラヘルツ透過スペクトル

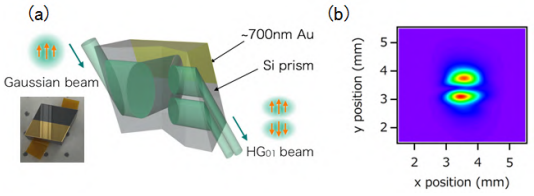


図 6.5.3: (a) テラヘルツ偏光変換プリズムの模式図と外観写真 (b) プリズム透過後の集光点におけるビームパターン

高強度テラヘルツ縦電場パルス発生法の開発

近年、高強度 THz 波を用いた物性の超高速制御が、基礎・応用の両方の観点から注目されている。ピーク電場強度が 1 MV/cm を超える高強度 THz パルスの発生が可能となり，それを用いた非線形応答の観測や電子ダイナミクスの制御などが可能になってきている。ここで、グラフェンやトポロジカル絶縁体表面などの 2 次元系は、面直方向に外部電場・磁場を印加することで、物性が大きく変化することが予想されている。このような面直電場や面直磁場の印加をテラヘルツ領域で超高速に行うためには、集光点で縦電場・縦磁場を生じるシリンドリカルベクトルビームや高次エルミートガウス (HG) ビームを用いることが有効である。しかしながら、従来の手法では、THz 領域の縦電場・縦磁場は THz パルスの広帯域性を活かしたまま高強度に発生させるのが難しいという問題があった。図 6.5.3(a) に、本研究で設計した高抵抗シリコン製の偏光変換プリズムの概要を示す。シリコン-空気界面及びシリコン-金界面の全反射によって生じる位相差を活用して、プリズム内で反射する THz 波のビームスポットの半分の偏光を反転させ，一様な直線偏光から HG モードへの変換を行う。このプリズムに THz 波を導入し、高感度 THz カメラを用いて集光点での強度分布を直接観測したところ、HG モードが生成できていることが確認できた（図 6.5.3(b)）。さらに、集光点で生じる縦電場の波形を電気光学サンプリング法を用いて観測したところ，ピーク電場強度は約 37 kV/cm に達していることが明らかになった [67, 36]。本手法は、さまざまな高強度 THz 光源のモード変換と縦電場発生に適用可能である。

3D プリンターと超臨界流体薄膜堆積法による 3 次元疑似金属構造の作製

電磁波の波長程度のサイズの人工構造は、中空導波管やメタルメッシュフィルターなど、マイクロ波領域における電磁波制御技術として重要な役割を担ってきた。近年では、波長以下の大きさの単位構造が周期的に配置された人工構造はメタマテリアルと呼ばれ、その形状によって応答を自在に制御できるため、THz 波領域における電磁波制御手法として注目されている。ここで、THz メタマテリアルや、THz 導波管などの THz 波制御デバイスは数十 nm 数百 mm オーダーの構造体から成るが、このような微細構造を 3 次元的に一体成型することはリソグラフィーや切削加工技術では非常に困難であり、設計上の大きな制約となる。近年我々は、光硬化型の 3D プリンターを用いてポリマー 3 次元構造を高解像度かつ自在に造形し、その表面を金属コートすることによって作製した THz 導波管や THz ハイパスフィルター [27] を報告している。さらに、金属コートにめっき法を用いた場合には高アスペクト比構造への表面コートが困難であるという問題を解決するために、高アスペクト比構造を有する金属や半導体の表面コーティングに用いられている超臨界流体薄膜堆積法を、ポリマー構造表面の金属コーティングへ適用する方法を開発した。この手法を用いて作製した THz ハイパスフィルター構造の透過スペクトルを測定し、その応答特性を評価したところ、良好な透過特性を示すことが明らかになった [65]。めっきで作製した場合の試料の測定結果を上回る透過率が観測されており、超臨界流体薄膜堆積法によって良質な Cu コーティングが行われていることを示す結果である。本手法は、金属以外にも様々な物質のコーティングに適用可能であり、新たな 3 次元人工構造作製手法としての展開が可能であると考えられる。

光誘起マルチフェロイクス状態の実現

物質内部のミクロな磁石の向きがそろった強磁性体や、プラスとマイナスの電荷のずれ（電気分極）の向きがそろった強誘電体は、強磁性体では外部磁場、強誘電体では外部電場によって向きを制御できることから、メモリ素子などに広く応用されている。近年、この強磁性と強誘電性の両方の性質を併せ持つ、マルチフェロイクスと呼ばれる特殊な物質群が注目されており、外部電場によって磁石の性質を変化させるなど、新しい原理に基づくメモリやセンサーなどへの応用が期待されているが、外部電場や外部磁場の切り替えでは高速な制御が難しいという課題があった。一方、光は極短パルス光技術の進歩により、桁違いに高速な操作が可能である。本研究では、パルス幅の非常に短い超短パルスレーザー光を物質に照射することによって、1 兆分の 1 秒以下の非常に短い時間でマルチフェロイクス状態を発現させることに初めて成功した [10]。この発現の確認には、光の進む方向によって光吸収の大きさが異なるという、方向二色性と呼ばれるマルチフェロイクス特有の現象の観測を用いた。本研究結果は、マルチフェロイ

クスを使った様々なデバイスの高速化や光制御デバイスへの応用の道を拓くものであり、超高速メモリ技術や、高速光スイッチなどへの応用が期待される。

固体高次高調波発生の理論的研究

近年の高強度短パルスレーザー光発生技術の発展に伴い、高強度レーザー場のもとでの固体中電子ダイナミクスが盛んに研究されるようになっている。特に、固体中電子の緩和スピードよりも短い時間スケールの高強度パルスを利用することにより、不純物散乱や格子振動への緩和に邪魔されることなく固体中多体電子系の量子ダイナミクスが観測できるという期待が高まっている。特に 2011 年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、それを皮切りに新たな物質からの高次高調波発生や新たな特徴の実験的報告が相次いでいる。応用的視点からも、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利用が期待されている。しかしながら、固体からの高次高調波の発生メカニズムは未だよく解明されておらず、議論の対象になっている。

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。その結果、固体高次高調波発生で特徴的な多段カットオフが出ることが再現された。さらに、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 [2]。

さらに、多体効果が高次高調波発生過程に与える影響を調べるため、時間依存ハートリーフォック (TDHF) 方程式を数値的に実装し、高次高調波発生を調べた。その結果、ハートリーフォック方程式に含まれる電子正孔相互作用の影響で、高次高調波のスペクトルに定性的に変化が生じることがわかった。特に電子正孔相互作用を考慮しないときに比べ、はるかに低い電場強度のもとで、多段カットオフ構造が形成された。この現象のメカニズムを突き止めるため、Houston 基底と呼ばれる、断熱的に外場に合わせて変化する基底を用いて TDHF 方程式を解析し、電子正孔とのクーロンポテンシャルによって新たに生じる励起プロセスが本現象に中心的な役割を果たしていることを明らかにした [1]。

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。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。

本年度は、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 4×10^{-4} 以下に向上している。

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。本年度は観測結果から、エネルギー方向でみた時に電子温度の過渡的な変化、さらに波数方向でのシフトが起きていることを解析した。[55]

また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ている。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光励起状態の電子分布観察を行なっている。本年度は、光電子分光と同時に発光観測をストリークカメラで行うことのできる実験系の構築に成功した。この構築された系を用いて、光電子分光によって得られた光励起状態のシグナルと光学測定で得られたシグナルとの対応付けを進めている [71]。

新規計測手法の開拓と複雑な現象解析への応用

ビッグデータとその解析手法の著しい発展が進むなか、データを集める計測は今後ますます重要性を増す。特に、科学におけるビーグデータ活用においては、データの持つ情報の質が問われる。我々は、生命現象などの複雑な科学へアプローチするために必要となる、高速かつ高感度の光計測技術の開拓を進めている。

生物学の分野では、分子特異的なイメージングを行う手法として蛍光顕微鏡が使われているが、蛍光プローブの持つ褪色や細胞毒性といった欠点により、その適用範囲は限定的である。蛍光プローブのようなラベルを用いないラベルフリーのイメージング手法としては、ラマン分光顕微鏡が知られているが、ラマン散乱が非常に弱い現象であることから、その計測速度に致命的な難点がある。我々は、非線形光学効果を利用したコヒーレントラマン散乱によるラベルフリー顕微鏡の開発を行い、分子の基準振動スペクトル全域をカバーする世界最高速の手法を開発した。この手法を用いて、200~3,600 cm^{-1} の広帯域ラマンスペクトルを、24,000 スペクトル毎秒で計測することに成功した。この手法を用いた高速ラベルフリー顕微鏡は、生物学、医学、薬学の分野における新しいツールとして、これまでに観測ができなかった現象の解析に活用されることが期待される。

6.5.4 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を行っている。これまで主に真空紫外からの軟X線領域の高次高調波発生を目的として共振器内の高強度のフェムト秒レーザー光を蓄積できるフォトンリングを開発して 3 MHz 級の高繰り返しで高次高調波を発生することが可能であることを実証した。29 年度は、装置の共用を踏まえて、長時間の安定性および操作性の改善を目的として、高繰り返しの高次高調波発生のために開発しているモード同期リング共振器レーザーに用いられる Thin Disk の熱歪みによる変形を改善するために共振器内に挿入可能なデフォーマブルミラーのプロトタイプを開発し、その性能試験を行うことを主要な目標とした。平成 29 年度には、フォトンリングにおいてモードロック動作時に共振器内のレーザー集光点にガスジェットを導入することで高次高調波を発生し、そのガス圧依存性等の基礎特性データを取得した。さらに、1 台の共振器内の複数の集光点に異なるガスを導入することで、複数ポートでの共振器内高次高調波発生に成功した。これにより、我々が当初提案していた新規コヒーレント XUV 光源のコンセプトを実証することができた。波長 1031 nm のレーザー基本波に対し、最高で 43 次高調波（波長 24 nm）まで観測できた。また、発生点での高次高調波の 1 次数あたりの平均パワーは最大で 10 nW のオーダーと見積もられ、今後の計測実験への展開が期待できる。

6.5.5 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。この活動は、東京大学が、未来社会協創推進本部を設置し推進している SDGs 活動に沿うものである。

これら活動を進めるため、文部科学省の「革新的イノベーション創出プログラム」拠点のひとつとして、「コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点」が、平成 25 年度に採択された。この事業では「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、半導体プロセス技術、健康医療技術の革新を目指すと共に、その技術を支えるための新しい光と物質の科学を創っていく。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。

このような社会との連携活動を進める上で、学内他部局の光科学研究組織間での連携を強化する不可欠であり、本機構が中心となって、工学系研究科附属光量子科学研究センター、物性研附属極限コヒーレント光科学研究センターと共に、平成 28 年 12 月 1 日に光量子科学連携研究機構 (UTripl) を発足させた。また、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、平成 29 年 10 月には、NEDO プロジェクト参画者を中心とした「高効率レーザープロセッシング推進コンソーシアム」(TACMI) が発足した。今後、各プロジェクト、コンソーシアムをベースとし、学術界や産業界との連携の中核として、SDGs で目指している持続可能な社会構築に向けて貢献する。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Takuya Ikemachi, Yasushi Shinohara, Takeshi Sato, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami,

Kenichi L. Ishikawa: Time-dependent Hartree-Fock study of electron-hole interaction effects on high-harmonic generation from periodic crystals, arXiv:1709.08153 [physics.optics] (2017)

[2] Takuya Ikemachi, Yasushi Shinohara, Takeshi Sato, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami, Kenichi L. Ishikawa: Trajectory analysis of high-order-harmonic generation from periodic crystals, Phys. Rev. A **95**, 043416/1-8 (2017) (DOI:10.1103/PhysRevA.95.043416)

[3] J. B. Héroux and M. Kuwata-Gonokami: Photoexcited carrier dynamics in InAs, GaAs, and InSb probed by terahertz excitation spectroscopy, Phys. Rev. A **7** 054001/1-13 (2017) (DOI:10.1103/PhysRevApplied.7.054001)

[4] Munekazu Horikoshi, Aki Ito, Takuya Ikemachi, Yukihito Aratake, Makoto Kuwata-Gonokami, and Masato Koashi: Appropriate Probe Condition for Absorption Imaging of Ultracold ^{6}Li Atoms, J. Phys. Soc. Jpn. **86** 104301 (2017) (DOI:10.7566/JPSJ.86.104301)

[5] Munekazu Horikoshi, Masato Koashi, Hiroyuki Tajima, Yoji Ohashi, and Makoto Kuwata-Gonokami: Ground-State Thermodynamic Quantities of Homogeneous Spin-1/2 Fermions from the BCS Region to the Unitarity Limit, Phys. Rev. X **7** (4), 041004 (2017) (DOI:10.1103/PhysRevX.7.041004)

[6] Y. Nagashima, A. Iwata, K. Yoshioka, J. Omachi, J. Shimizu, S. Tsuji, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami: A new method to visualize abnormal lipid accumulation in tissues from Fabry disease patient using Raman spectroscopic marker of globotriaosylceramide, Journal of the Neurological Sciences **381** 700-701 (2017) (DOI:10.1016/j.jns.2017.08.1973)

[7] Kotaro Hiramatsu, Yizhi Luo, Takuro Iideguchi, and Keisuke Goda: Rapid-scan Fourier-transform coherent anti-Stokes Raman scattering spectroscopy with heterodyne detection, Optics Letters **42** (21), 4335-4338 (2017)(DOI:10.1364/OL.42.004335)

[8] Xing Fan, Shusei Kamioka, Toshiaki Inada, Takayuki Yamazaki, Toshio Namba, Shoji Asai, Junko Omachi, Kosuke Yoshioka, Makoto Kuwata-Gonokami, Akira Matsuo, Koushi Kawaguchi, Koichi Kindo and Hiroyuki Nojiri: The OVAL experiment: a new experiment to measure vacuum magnetic birefringence using high repetition pulsed magnets, The European Physical Journal D, **71** :308 (2017) (DOI:10.1140/epjd/e2017-80290-7)

[9] A. A. Ushakov, M. Matoba, N. Nemoto, N. Kanda, K. Konishi, P. A. Chizhov, N. A. Panov, D. E. Shipilo, V. V. Bukin, M. Kuwata-Gonokami, J. Yumoto, O. G. Kosareva, S. V. Garnov and A. B. Savel'ev: Backward terahertz radiation from the two-color femtosecond laser filament, JETP Lett. **106** (11) 506-708 (2017) (DOI:10.1134/S0021364017230047)

[10] Davide Bossini, Kuniaki Konishi, Shingo Toyoda, Taka-hisa Arima, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami: Femtosecond activation of magnetoelectricity, Nature Physics **14** 370-374 (JAN 2018) (DOI:10.1038/s41567-017-0036-1)

(国内雑誌)

[11] 井手口拓郎, 合田圭介: 24,000 スペクトル毎秒で動作する広帯域コヒーレントラマン分光法, 光学 46 巻 6 号, p228 (9) (June, 2017) 日本光学会

[12] 平松光太郎, 井手口拓郎, 合田圭介: 高速無標識バイオイメージングに向けた Fourier transform CARS 法, 光アライアンス, Vol.28 (June, 2017) 日本工業出版

[13] 堀越宗一: s 波散乱長で支配される普遍的物理法則, 原子衝突学会誌 しょうとつ Vol.14, No. 5, 59 (Sep., 2017) 原子衝突学会

[14] 小関泰之, 井手口拓郎, 合田圭介: 高速ラマン計測による生命科学へのアプローチ, 電気学会誌 Vol.137, No. 11, 768 (Nov., 2017) 電気学会

(博士論文)

[15] 池町拓也: Theoretical study on mechanism of solid-state high-harmonic generation, (2018 年 3 月, 東京大学大学院理学系研究科)

(修士論文)

[16] CHEN Yiping: Sympathetically created attractive Bose-Einstein condensates and their critical behaviors, (2017 年 9 月, 東京大学大学院理学系研究科)

(修士論文)

[17] 松井宏樹: 時間分解光電子分光による半導体 GaSe の光励起状態の研究, (2018 年 3 月, 東京大学大学院理学系研究科)

(修士論文)

[18] 的場みづほ: 界面電子状態の超高速制御に向けた高強度テラヘルツ縦電場パルスの発生, (2018 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

[19] Takuro Ideguchi: Ultrafast Fourier Transform Spectroscopy with Frequency Combs, BIT's 8th Annual Global Congress of Catalysis-2017, Shanghai, China (2017/10/21)

[20] Takuro Ideguchi: Dual-comb spectroscopy and advanced techniques toward chemical and biological applications ICFO seminar, Castelldefels, Spain (2018/03/01)

[21] Takuro Ideguchi: Ultrafast Broadband Fourier Transform CARS Spectroscopy BIT's 6th Annual Conference of AnalytiX-2018 (2018/03/27)

一般講演

[22] Hiroyuki Yasukochi, Kentaro Soeda, Hiroyuki Tamaru, Hirosuke Suzuki, and Junji Yumoto: High-resolution and high-speed stereolithographic 3D printing for microfluidics and biochip, 3D Bioprinting: Physical and Chemical Processes, Winston Salem, NC, USA. (2017/05/02) (poster)

[23] T. Ikemachi, Y. Shinohara, T. Sato, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami, and K. L. Ishikawa: Solid-State Three-Step Model for High-Harmonic Generation from Periodic Crystals, Physical and Chemical Processes., Lasers and Electro-Optics, San Jose, California United States (2017/05/14) :OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2017), paper FM3D.5.

[24] R. Borrego-Varillas, A. Nenov, A. Oriana, L. Ganzer, J. Omachi, I. Conti, J. Segarra-Marti, C. Manzoni, M. Garavelli, and G. Cerullo: Tracking azobenzene photoisomerization with sub-20-fs pulses, 3D Bioprinting: CLEO/Europe-EQEC Conference, ICM Munich, Germany (2017/06/25)

[25] T. Ikemachi, Y. Shinohara, T. Sato, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami, and K. L. Ishikawa: Extended Solid-State Three-Step Model for High-Harmonic Generation from Periodic Crystals, 3D Bioprinting: Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe and the European Quantum Electronics Conference, ICM Centre of the New Munich Trade Fair Centre (2017/06/25)

[26] H. Sakurai, C. He, K. Konishi, H. Tamaru, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami and Arnold Gilner: Linking Energy Density with Morphology in Laser Grooving of Sapphire: CLEO/Europe-EQEC Conference, ICM Munich, Germany (2017/06/25)

[27] K. Konishi, H. Yasukochi, K. Soeda, Y. Takano, H. Niwa, J. Yumoto and M. Kuwata-Gonokami: Thick THz Metamaterials fabricated by 3D printer for Thz High-Pass Filter Application: CLEO/Europe-EQEC Conference, ICM Munich, Germany (2017/06/26)

[28] A. A. Ushakov, M. Matoba, N. Nemoto, N. Kanda, K. Konishi, V. A. Andreeva, N. A. Panov, D. E. Shipilo, P. A. Chizhov, V. V. Bukin, M. Kuwata-Gonokami, J. Yumoto, O. G. Kosareva, S. V. Garnov and A. B. Savel'ev: 3D terahertz beam profiling from two color laser induced plasma with different focusing, Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications", T3.4, Nizhny Novgorod - Moscow, Russia, (2017/07/19)

[29] Natsuki Kanda, Tomohiro Imahoko, Koji Yoshida, A. Amani Eilanlou, Tetsumi Sumiyoshi, Yasuo Nabekawa, Makoto Kuwata-Gonokami, Katsumi Midorikawa: Intra-cavity HHG in a Yb:YAG thin disk modelocked oscillator, 2nd International Symposium on Attosecond Science, Wako, Japan, (2017/08/26)

[30] Y. Morita, K. Yoshioka, H. Suzuki, E. Chae and M. Kuwata-Gonokami: Lyman absorption imaging of quantum degenerate excitons in Cu_2O, Fundamental optical processes in semiconductors 2017, Skamania Lodge, WA, USA (2017/08/31)

[31] Natsuki Kanda, Tomohiro Imahoko, Koji Yoshida, A. Amani Eilanlou, Tetsumi Sumiyoshi, Yasuo Nabekawa, Makoto Kuwata-Gonokami, Katsumi Midorikawa: Multi-port Intra-Cavity High Harmonic Generation in a Yb:YAG Thin Disk Mode-Locked Oscillator with MHz Repetition Rate, LW5F.4, Washington D.C., USA, (2017/09/11)

[32] Yu Nagashima, Atsushi Iwata, Kosuke Yoshioka, Junko Omachi, Jun Shimizu, Shoji Tsuji, Tatsushi Toda, Junji Yumoto and Makoto Gonokami: A new method to visualize abnormal lipid accumulation in tissues from Fabry disease patient using Raman spectroscopic marker of globotriaosylceramide, XXIII World Congress of Neurology, Kyoto, Japan (2017/09/19)

[33] Yu Nagashima, Atsushi Iwata, Kosuke Yoshioka, Junko Omachi, Jun Shimizu, Shoji Tsuji, Tatsushi Toda, Junji Yumoto and Makoto Gonokami: Visualization of abnormal lipid accumulation in tissues from Fabry disease patient using Raman spectroscopic marker of globotriaosylceramide, Society of Neuroscience 2017, Washington, DC (2017/11/15), A new method to visualize abnormal lipid accumulation in tissues from Fabry disease patient using Raman spectroscopic marker of globotriaosylceramide", Abstracts/Journal of the Neurological Sciences **381** P700 (2017).

[34] Kotaro Hiramatsu, Kinegawa Ryo, Kazuki Hashimoto, Venkata R. Badarla, Takuro Ideguchi, Keisuke Goda: High-speed broadband Fourier-transform CARS microscopy, SPIE Photonics West BIOS, San Francisco, USA (2018/01)

[35] Kotaro Hiramatsu, Yizhi Luo, Takuro Ideguchi, Keisuke Goda: Heterodyne-detected rapid-scan Fourier-transform CARS spectroscopy, SPIE Photonics West BIOS, San Francisco, USA (2018/01)

[36] Mizuho Matoba, Natsuki Nemoto, Natsuki Kanda, Kuniaki Konishi, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami : Generating Terahertz Pulses with Intense Longitudinal Electric Fields, CIAiS International Symposium 2018, Tokyo, Japan (2018/03/08) Best Poster Award CIAiS International Symposium 2018

[37] Kuniaki Konishi : Investigation of laser-ablation mechanism of dielectric materials and application, The Third STEPS Symposium on Photon Science, Korston Hotel, Moscow, Russia, (2018/03/11-12)

[38] T. Matsumura, S. Hanany, H. Imada, H. Ishino, N. Katayama, Y. Kobayashi, K. Komatsu, K. Kon-

ishi, M. Kuwata-Gonokami, S. Nakamura, H. Sakurai, Y. Sakurai, R. Takaku, S. Utsunomiya, Q. Wen, K. Young, J. Yumoto : Development of the broadband anti-reflection coating on sapphire using a subwavelength structure for a CMB polarization experiment, 29th IEEE International Symposium on Space THz Technology (ISSTT2018), Pasadena, CA, USA, (2018/3/26)

[39] Takuya Ikemachi, Yasushi Shinohara, Takeshi Sato, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami, and Kenichi L. Ishikawa: Many-body effects upon high-harmonic generation in solid-state materials, High Intensity Lasers and High Field Phenomena 2018, Strasbourg France, (2018/03/26-28))

(国内会議, 研究会, セミナー)

招待講演

[40] Munekazu Horikoshi : 極低温原子気体による中性子星核物質の量子シミュレーション AMO 討論会, 電気通信大学 (2017/6/30)（招待）

[41] 大間知潤子 : 超短パルス光を用いた光照射物質の初期過程の追跡, 関西学院大学三田キャンパス, 兵庫県 (2017/06/14)

[42] 大間知潤子 : 光科学への扉, 埼玉県立浦和第一女子高校 (2017/07/08)

[43] 井手口拓郎 : デュアルコム分光の進展, 関東光科学若手研究会, 東京大学生産研究所（2017/06)

[44] 堀越宗一 : Universal cluster science investigated by cold atom experiments, 日本物理学会シンポジウム, 宇都宮大学 (2017/09/13)

[45] 堀越宗一 : 冷却原子気体を用いた極低温量子物質の実験的シミュレーション,「物質階層の原理を探求する統合的実験研究」研究報告会, 理化学研究所 (2018/02/14)

[46] 堀越宗一 : 冷却原子実験で読み解く量子多体系の基礎物理, 九州大学粒子系理論物理学研究室第 5 回理論物理学セミナー, 九州大学 (2018/03/16)

[47] 堀越宗一 : 散乱長と少数多体量子系の基礎物理, 研究会「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」, 東京工業大学 (2018/03/30)

一般講演

[48] 池町拓也, 篠原康, 佐藤健, 湯本潤司, 五神真, 石川顕一 : 固体高次高調波発生における電子-正孔相互作用の効果, 応用物理学会春季学術講演会, 福岡国際会議場 (2017/09/05)

[49] 小西邦昭, 安河内裕之, 添田建太郎, 高野佑磨, 丹羽宏彰, 湯本潤司, 五神真 : 3D プリンターで作製したメタマテリアルのテラヘルツハイパスフィルター応用, 応用物理学会春季学術講演会, 福岡国際会議場 (2017/09/08)

[50] 神田夏輝, 今鉾友洋, 吉田功児, アマニイランル, 鍋川康夫, 住吉哲実, 五神真, 緑川克美 : Yb:YAG Thin Disk モード同期レーザー共振器中での高次高調波発生, 応用物理学会春季学術講演会, 福岡国際会議場 (2017/09/05)

[51] 木下川涼、平松光太郎、井手口拓郎、合田圭介 : 高速フーリエ変換 CARS 顕微鏡, 応用物理学会春季学術講演会, 福岡国際会議場 (2017/9/6)

[52] 周健治, 村吉諄之, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 蔡恩美, 五神真, 大島永康, 満汐孝治, オロークブライアン, 鈴木良一, 藤野茂, 望月出海, 兵頭俊夫 : 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 2017 年秋季大会, 宇都宮大学 (2017/9/13)

[53] 村吉諄之, 周健治, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 蔡恩美, 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 2017 年秋季大会, 宇都宮大学 (2017/9/13)

[54] 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, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 宇都宮大学 (2017/9/15)

[55] 嵐田雄介, 平野大輔, 松井宏樹, 大間知潤子, 森田悠介, 坂野昌人, 石坂香子, 吉岡孝高, 五神真 : 高分解能 ARPES による Bi2Te3 の表面ダイナミクス, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 (2017/9/21)

[56] 櫻井治之, Chao He, 小西邦昭, 田丸博晴, 湯本潤司, 五神真, Arnold Gillner : レーザー加工におけるダメージ蓄積効果, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 (2017/9/21)

[57] 池田拓也, 杉山慶, 蔡恩美, 高野哲至, 大前宣昭, 赤塚友哉, 香取秀俊, 五神真, 吉岡孝高 : 東京大学内光ファイバーリンクを用いた Ti: Sapphire 光周波数コムの安定化, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 (2017/9/24)

[58] 蔡恩美, 池田拓矢, 中嶋虹太, 高野哲至, 牛島一朗, 大前宣昭, 赤塚友哉, 香取秀, 五神真, 吉岡孝高 : Ti: Sapphire 光周波数コムのフォトニック結晶ファイバーによる位相雑音への影響, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 (2017/9/24)

[59] 中嶋虹太, 池田拓矢, 蔡恩美, 高野哲至, 牛島一朗, 大前宣昭, 赤塚友哉, 香取秀俊, 五神真, 吉岡孝高 : 2 台の Ti: sapphire 光周波数コムの相互相関測定日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学 (2017/9/24)

[60] 小西邦昭: 人工構造を用いた光の偏光制御, 光量子科学連携研究機構・レーザーアライアンス合同シンポジウム／第 37 回先端光量子科学アライアンスセミナー, 東京大学, (2017/12/14)

[61] 的場みづほ, 根本夏紀, 神田夏輝, 小西邦昭, 湯本潤司, 五神真 : 高強度テラヘルツ縦電場パルスの発生, 第 10 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,『グローバルリーダーを育む光化学』, 京都 (2018/01/23) (poster)

[62] 趙ユウ, 森下広隆, 小西邦昭, 安河内裕之, 添田建太郎, 湯本潤司, 五神真, 下山裕介, 霜垣幸浩, 百瀬健 : テラヘルツデバイス作製に向けたポリマー表面への超臨界流体を用いた Cu 薄膜堆積, 化学工学会 第 83 年会, 関西大学千里山キャンパス (2018/3/14)

[63] 橋本和樹, 大間知潤子, 井手口拓郎：6-fs パルスレーザを用いた高速スキャン広帯域フーリエ変換 CARS 分光, 応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大学西早稲田キャンパス (2018/3/19)

[64] 趙ユウ, 森下広隆, 小西邦昭, 安河内裕之, 添田建太郎, 湯本潤司, 五神真, 下山裕介, 霜垣幸浩, 百瀬 健：3D プリンティングと超臨界流体薄膜堆積法による金属コーティングを活用した 3 次元テラヘルツデバイス作製, 応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大学西早稲田キャンパス (2018/3/20)

[65] 小西邦昭, 添田建太朗, 安河内裕之, 趙ユウ, 森下広隆, 下山裕介, 霜垣幸浩, 百瀬健, 湯本潤司, 五神真：3D プリンティングと超臨界流体薄膜堆積法による金属コーティングで作製したテラヘルツハイパスフィルターの応答特性評価, 応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大学西早稲田キャンパス (2018/3/20)

[66] 櫻井治之, 根本夏紀, 小西邦昭, 桜井雄基, 片山伸彦, 松村知岳, 湯本潤司, 五神真：フェムト秒レーザー加工によるテラヘルツ波反射防止モスアイ構造の作製, 応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大学西早稲田キャンパス (2018/3/20)

[67] 的場みづほ, 根本夏紀, 神田夏輝, 小西邦昭, 湯本潤司, 五神真：高強度テラヘルツ縦電場パルスの発生, 応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大学西早稲田キャンパス (2018/3/20)

[68] 石田明, 周健治, 村吉諄之, 難波俊雄, 浅井祥仁, 蔡恩美, 吉岡孝高, 五神真, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野茂, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健：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 73 回年次大会, 東京理科大学（野田キャンパス）(2018/3/22)

[69] 周健治, 村吉諄之, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 蔡恩美, 吉岡孝高, 五神真, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野茂, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健：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 73 回年次大会, 東京理科大学（野田キャンパス）(2018/3/22)

[70] 平松光太郎、Yizhi Luo、井手口拓郎、合田圭介：ヘテロダイン検出高速走査 FT-CARS 分光法, 日本化学会第 98 春季年会, 船橋 (2018/3/23)

[71] 松井宏樹, 嵐田雄介, 平野大輔, 森田悠介, 大間知潤子, 吉岡孝高, 湯本潤司, 五神真：角度分解光電子分光による半導体 GaSe 光励起状態の観測, 日本物理学会 第 73 回年次大会, 東京理科大学（野田キャンパス）(2018/3/23)

[72] Yiping Chen, Munekazu Horikoshi, Kosuke Yoshioka, Makoto Kuwata-Gonokami：Kibble-Zurek mechanism of attractive and repulsive Bose-Einstein condensate, 日本物理学会 第 73 回年次大会, 東京理科大学（野田キャンパス）(2018/3/24)

[73] 上岡修星, 稲田聡明, 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：OVAL 実験：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, 日本物理学会 第 73 回年次大会, 東京理科大学（野田キャンパス）(2018/3/25)

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．それに加え，将来計画であ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．実験室内の基礎研究としては，独自の方式のねじれ型重力波検出器 TOBA の開発，さらには重力波研究で用いられる精密計測技術を用いた基礎物理研究として，オプトメカニクスを用いた巨視的な量子現象の測定実験，片道光速の異方性検証実験などを進めている．

6.6.1 大型重力波望遠鏡 KAGRA

アメリカの Advanced LIGO とイタリアの Advanced Virgo による連星ブラックホール合体や連星中性子星合体からの重力波の初観測により，宇宙を観測するための全く新しい窓が開かれた．これらレーザー干渉計型重力波望遠鏡のさらなる高感度化や，より多くの望遠鏡数での同時観測により，さらなる検出数の増加とより精密な到来方向決定，連星パラメータ決定が可能になる．より精密な到来方向決定は電磁波やニュートリノなどと合わせたマルチメッセンジャーによる天文学を進める上で極めて重要である．また，より精密な連星パラメータ決定により，ブラックホールの起源や中性子星の状態方程式に迫るだけでなく，宇宙論や重力理論への知見が得られると期待されている．

こうしたさらなる重力波物理学・天文学の発展を目指し，日本では大型低温重力波望遠鏡 KAGRA(かぐら) の建設が進められている．KAGRA が稼働すれば，アメリカ，イタリア，日本の三極での三角測量により到来方向決定精度が各段に上がる．また，一般相対論の予言するテンソルモードとは異なる偏極モードが初めて分離できるようになるため，スカラー・テンソル理論など一般相対論に代わる重力理論の検証が可能となる．

KAGRA は，約 10 Hz 付近で問題とな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である．また，約 100 Hz より低周波側で問題となる熱雑音の低減を図るため，km 級の重力波望遠鏡としては初めて，鏡を 20 K の極低温に冷やす．こうした地下建設と低温化は将来の重力波望遠鏡の高感度化には必須と考えられており，ヨーロッパの 10 km レーザー干渉計計画 Einstein Telescope も地下建設と低温化を基本としている．KAGRA はサイエンス面に限らず，技術面でもフロンティアを走っていると言える．

KAGRA の現状

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．その後低温に冷やすサファイア鏡などのインストールを進め，2018 年 3 月には 4 つのサファイア鏡のうちの最初の 1 つが 18 K に到達した．2018 年 4 月末より，低温マイケルソン干渉計の試験運転を行い，低温での干渉計動作確認を行う予定である．さらに 2019 年には Advanced LIGO や Advanced Virgo と共同観測を開始する予定となっている．

当研究室では KAGRA の根幹部分となる主干渉計の光学系や制御系の設計開発を行っている (図 6.6.1)．本年度は特に，3 km の腕共振器の補助制御に必要となる倍波光 (波長 532 nm) 光学系のインストールとアラインメント，モードクリーナーと呼ばれる共振器の角度揺れの評価を行った．また，磁場雑音や音響雑音などの評価に必要となる環境雑音注入の準備を進めた．さらに本年度は，特に温度勾配がある場合のサスペンション熱雑音に着目し，干渉計感度のより正確な設計を行った．KAGRA のアップグレードのための感度設計と技術的実現可能性の検討も進めている．



図 6.6.1: KAGRA のコントロールルーム

初期観測へむけた干渉計の開発

当研究室では KAGRA の主干渉計部分を担当しているが, 本年度は具体的には次のようなことを行った．

1 つは，低温マイケルソン干渉計の試験運転へむけた干渉計のコミッショニングである．ここでコミッショニングとは，インストールされた光学系やレーザー光を統合し，動作する干渉計を組み上げることである．2018 年 4 月末より低温マイケルソン干渉計の試験運転を行う予定であり，この運転の干渉計動作のための KAGRA サイトでのコミッショニング，すなわち鏡の初期アラインメントを整えメインレーザーを 3 km の腕を往復させること，鏡およびその懸架系の姿勢制御，マイケルソン干渉計の制御信号の取得および制御に対して，当研究室のメンバーが主要な役割を果たした．

2 つめには，KAGRA の初期観測運転時の感度を最適化する干渉計構成の提案と，そのような干渉計構成における主干渉計制御のシミュレーションである．KAGRA の干渉計のデザインは，最終形が達成されたときの感度が最適になるように決定されているが，初期観測運転時には技術的な雑音や最終形より低い入射レーザーパワーが予想されるため，異なる干渉計構成がより良い感度を与えうる．そこで当研究室では，比較的容易に変更可能なシグナルリサイクリング鏡という重力波信号の抜き出しに関わる鏡の反射率に着目し，その反射率をいくつに設定すれば最適な感度が得られるかを計算した．また，反射率の変更をした場合に主干渉計制御に与える影響についてもシミュレーションを行った．

干渉計感度設計

安東研究室では, KAGRA の詳細な感度設計を行っている．特に本年度は，初の KAGRA の厳密な懸架熱雑音を導出に成功し，干渉計パラメータの確認および最適化を行った．

KAGRA は，世界で唯一の低温重力波望遠鏡である．振り子の上部が冷却され鏡から懸架ファイバーを通して熱が吸収されるため，ファイバーに熱勾配が生じ非平衡状態となっている．通常，熱雑音は平衡状態を仮定して導出され非平衡状態には適応できないため，これまでの推定方法は不完全であった．

そこで私たちは，GSGC 客員准教授として物理学専攻に滞在していた Stefan Ballmer 氏と共同研究を行い，このような温度勾配のある系の厳密な熱雑音の導出に成功した．特にこの理論を KAGRA の懸架系に適用し，厳密な懸架熱雑音を推定した [16]．本研究の論文は PRD 誌に受理されている．

また，これまで用いられてきた KAGRA の感度計算コードを見直し，パラメータの確認などを行った．全ての干渉計パラメータを多くの KAGRA メンバーと共に確認し，より正確な KAGRA の感度を設計することに成功した [17]．さらに，KAGRA のアップグレード計画についても詳細な検討を行った．レーザー光の高パワー化や鏡の巨大化によって KAGRA の感度を上げるべく，その実現可能性や得られる物理について研究を行っている [18]．

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 LISA 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．2017 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．

感度向上

現在の TOBA は試験マスの変位センサーとしてマイケルソン干渉計を用いており，それに由来する種々の雑音がある．主要な雑音の一つが地面振動雑音であり，その他にレーザーの強度雑音，周波数雑音，アクチュエータ由来の雑音，環境磁場の変動雑音などがある．

前年度は水平地面振動雑音の低減手法を提案し，それによって実際に雑音を低減することに成功したが，本年度はさらに水平地面振動以外の雑音の低減を行い，前年度を超えた感度を達成することに成功した．

まず，これまで定量的に評価されていなかった雑音の評価を行った．具体的には鉛直地面振動からの寄与，レーザーの偏光揺らぎ，レーザーの周波数雑音，及び環境磁場変動雑音について測定を行った．その結果 [58, 41]，0.01 - 1 Hz の周波数帯でレーザーの偏光揺らぎが，10 - 30 Hz の帯域では鉛直地面振動が現在の感度を制限していることがわかった．また直接感度を制限してはいないが，環境磁場変動雑音も現在の感度の数倍低いレベルに存在していることも分かった．

さらに，レーザーの偏光揺らぎを低減する手法の確立を行った．まず偏光ビームスプリッターでレーザー光の P 偏光のみを取り出し，続いて P 偏光の強度を安定化して干渉計へ入射することにより，偏光揺らぎによる雑音を低減した．その上で，アクチュエータ効率を下げることでアクチュエータ回路由来の雑音を低減し，その結果 TOBA の最高感度を更新することができた (図 6.6.2)．今後は，これまでの知見をもとに，後述する低温 TOBA の開発に生かしていく予定である．

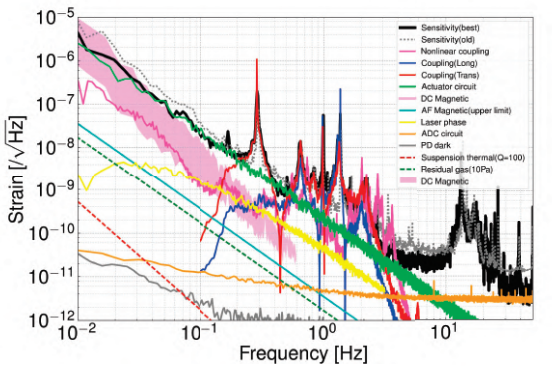


図 6.6.2: 更新された TOBA の感度と主な雑音源

低温 TOBA の検討・設計

熱雑音は TOBA の目標感度達成において最も障害となる雑音の一つである．Phase-III TOBA では，ワイヤの温度 4 K，Q 値 10^8 が要求値となっている．前者については懸架系を冷却することで達成できるが，冷却機構による雑音の増加を抑えての低温化は慎重な設計を要する．雑音を小さくするためには懸架ワイヤが細い方が良いが，細いほど熱伝導が小さくなり冷却が難しくなる等の事情による．そこで本年度は，懸架ワイヤを 4 K まで冷却できる懸架系の設計を行った．冷却開始時（300 K）からしばらくは主にマス表面からの熱輻射によって冷却し，数 10K まで達した後は懸架ワイヤを通した熱伝導によって冷却される設計である．懸架系の質量，材質，形状などを考慮して冷却時間の計算を行った結果，約 21 日で 4 K まで冷却できる見積もりとなっている．

今後はより具体的な設計と性能試験を行う．冷凍機（パルスチューブ冷凍機）は既に真空槽にインストールされており，一重の輻射シールド（44K）も既に導入されている．約 4 年前に冷凍機の動作試験も行われ，スペック通りに冷却できることも確かめられた．現在は 4 年ぶりの再稼働へ向けた準備を行っている他，二重輻射シールドおよび懸架系の具体的な設計が行われている．また，低温下でも動くことが期待される光検出器やモーター，可動ステージ，ヒートリンクなど要素部品の候補も既に挙げられており，今後低温での動作試験などを行っていく予定である．

Fiber Q measurement

The first half of the year was spent (research wise) on the characterisation and selection of thin

(∼ 3 μm thick) tungsten wires for use in radiation pressure experiment via measuring the torsion Q factor. A clear choice emerged from the three options tested, and it was found that clamp loss dominated at large amplitudes [53].

The second half was spent designing a system for measuring the torsion Q factor of crystal fibres, for use in precision experiments using torsional pendulums, such as TOBA [14]. 1 mm thick C-axis sapphire fibre was measured to have a Q factor of 1.3×10^5, which is the first measurement for torsional Q of sapphire fibres in a torsional pendulum setup at room temperature, and is higher than any comparable setup that uses a metal fibre [37].

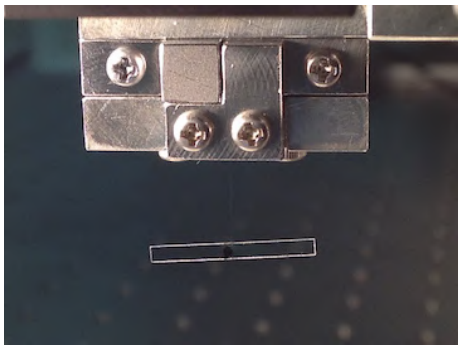


図 6.6.3: ねじれ振り子として用いる棒状鏡

6.6.4 相対論・量子光学精密実験

ねじれ振り子を用いたオプトメカニクス研究

当研究室では，振り子を用いてレーザー光の量子輻射圧揺らぎを広い周波数帯で測定することを目指している．量子輻射圧揺らぎの観測は，重力波検出器の R&D や，機械振動子の基底状態冷却に対し大きな意義を持つ．しかしながら，これまで振り子を用いて自由質点領域で観測した例はない．そこで我々は，棒状の鏡をねじれ振り子として利用し，両端で光共振器を構築してそれぞれの共振器長変動の差をとることで，量子輻射圧揺らぎを観測することを目指している (図 6.6.3)．

回転モードは，懸架の熱雑音を抑制できるという点で有利である．ねじれ振り子の復元力は非常に小さいため，歪みに伴って発生する熱雑音も小さくなる．また，両腕の変位差を測定することで，並進の振り子モードに効く雑音や，レーザー光の古典的な雑音を同相雑音除去できる点も大きな利点である．

本年度は，まず防振装置や光共振器の構築に取り組み，これが完了した [51, 12]．さらに，棒状鏡の両端で同時に光共振器をロックすることにも成功した．また，測定された棒状鏡の曲がりモードから，適切なキャリブレーション係数やビームスポット位置を求めることにも成功した [35]．今後は，共振器内パワー増大および雑音低減に取り組み，量子輻射圧揺らぎの観測を目指す．

光学浮上鏡の開発: 設計/実験

巨視的な振動子の実現を目指し，懸架に伴う熱雑音を導入しない鏡の支持方法として，鏡を光輻射圧で浮上させる方法の開発を行っている．当研究室では，安定な光学浮上の構成として，鏡の上下から光を当てるサンドウィッチ構成を提案し，その実現に向けた基礎研究を進めている．特に，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 Fabry-Perot 共振器を構成することで浮上安定性の実験的検証を進めている．本年度は，ねじれ振り子と Fabry-Perot 共振器を同時に制御した状態で共振周波数の測定を測定し，安定性検証ができるよう装置を築いた．その上で現状のセットアップの各パラメータの評価を行い，レーザー強度を 1 W 以上に向上することで安定性の実証が可能であることを示した．今後はレーザーアンプを導入し，この装置を用いてサンドウィッチ構成の安定性検証を行う予定である．

また，実際に微小鏡を浮上させる実験セットアップを構築するための準備も進めてきた．特に本年度は，サンドウィッチ型光学浮上において最も重要な微小鏡を含む 2 つの Fabry-Perot 共振器の設計を進めてきた．まず初めに，微小鏡 (質量 1.6 mg，厚さ 0.1 mm) の曲率半径の評価を行った．固定された微小鏡を含む Fabry-Perot 共振器を構築して縦モードを評価することで，微小鏡の曲率半径を測定し，現実的な機械精度内で，鏡の曲率中心間距離を調整できることを確認した．次に，サンドウィッチ型光学浮上の 2 組の Fabry-Perot 共振器の内部状態をモニターするために必要な偏光ビームスプリッター (PBS) の光損失の評価を行った．微小鏡を挟んでいる 2 組の Fabry-Perot 共振器の共振モードや共振器内パワーなどの内部状態をモニターために，それぞれの共振器内に PBS を組み込む設計になっている．この PBS を持つ Fabry-Perot 共振器の損失を実際にセットアップを構築して評価した．その結果，PBS の往復光損失は 250 ppm 以下であると測定され，共振器内の往復光損失が 9000 ppm 以下という要求値を満たすことを確認した．今後は，ねじれ振り子を使った実験により水平方向の安定性が実証され次第，実際の浮上実験用セットアップを構築し，サンドウィッチ型光学浮上の原理実証を行う計画である．

光リング共振器を用いた光速の異方性検証

Einstein の特殊相対性理論によると，Lorentz 不変性は宇宙の基本的な対称性の 1 つである．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 Lorentz 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，Lorentz 不変性をより高い精度で検証することが重要である．

我々は，Lorentz 不変性を検証する方法の 1 つとして，片道光速の異方性探査を行っている．片道光速の異方性とは光速の行きと帰りの差を意味し，光路の一部に媒質を入れて屈折率を変えた非対称光リング共振器を用いると，共振器内を両周りに回る光の共振周波数の差という形で測定することができる．この共振周波数の差をダブルパスという光学系構成により測定し，光学系全体を回転させて変調をかけることで信号の取得を行う．

我々はこれまでに 1 年間に渡る異方性探査を行い，片道光速の異方性で世界最高精度となる 10^{-15} レベルの上限値をつけた．しかし，回転に伴う振動が感度を制限する要因となっていたため，本年度までに回転機構と光学系の改良を行った．この改良によって雑音が低減し，7 日間にわたり異方性を探査したところ，我々がもつ世界最高精度とほぼ同じ精度を達成し，このまま 1 年間測定を行うことで世界最高精度を約 5 倍更新できる見込みがあることがわかった．

一方で，回転と同期する雑音が新たに問題になるということがわかったため，今後はさらなる回転機構の改良により，そのような雑音を低減する必要がある．

モノリシック光学系の開発

一般に光速の異方性探査による Lorentz 不変性の検証実験では，信号に変調を加えるための装置の回転に伴う振動が主要な雑音源となる．そこで Lorentz 不変性の高精度検証のために，光リング共振器を用いた片道光速の異方性に感度を持つ上述の構成で，光学土台と光学素子を接着し一体化することで振動感度を低減できるモノリシック光学系を製作した．モノリシック光学系は通常の光学系と比べてアラインメントの難度が高く工夫を要する．テンプレートと手動ステージを用いた光学土台上部からの光学素子の支持を用いてモノリシック光学系アラインメント手法を開発した．開発したモノリシック光学系アラインメント手法では角度精度で 0.11° でのモノリシック光学系アラインメントが可能であり，本実験では十分な精度となっている．

開発したモノリシック光学系アラインメント手法によって製作したモノリシック光学系は入射光学系と共振器部が一体となった世界初のモノリシック光学系である．振動評価と温調を用いた同相雑音除去比の実測によって，製作したモノリシック光学系で Lorentz 不変性の破れの可能性が示唆されている 10^{-17} レベルでの片道光速の異方性探査が可能であることを示した．

一方，現在の光学系は強度雑音で制限されていることがわかっており，実際のモノリシック光学系の振動感度はより低いと考えられる．したがってモノリシック光学系自身の正確な振動評価には強度雑音対策をより徹底する必要がある．

＜報文＞

(原著論文)

[1] T. Akutsu, M. Ando, S. Araki, et al. (KAGRA Collaboration), Construction of KAGRA: an underground gravitational-wave observatory, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2018, 013F01 (2018).

[2] Yuta Michimura, Tomofumi Shimoda, Takahiro Miyamoto, et al., Mirror actuation design for the interferometer control of the KAGRA gravitational wave telescope, Classical and Quantum Gravity 34, 225001 (2017).

[3] Yuta Michimura, Yuya Kuwahara, Takafumi Ushiba, Nobuyuki Matsumoto, Masaki Ando, Optical levitation of a mirror for reaching the standard quantum limit, Optics Express 25, 13799 (2017).

[4] Ayaka Shoda, Yuya Kuwahara, Masaki Ando, et al., Ground-based low-frequency gravitational-wave detector with multiple outputs Physical Review D95, 082004 (2017).

(国内雑誌)

[5] 安東正樹: 重力波望遠鏡の極限光計測技術, フォトニクスニュース 第 3 巻 第 1 号 (2017 年).

(学位論文)

[6] 和田祥太郎: 巨視的量子力学の検証に向けた光輻射圧による浮上手法の開発, 修士論文 (2018 年 3 月).

[7] 武田紘樹: ローレンツ不変性検証のためのモノリシック光学系の開発, 修士論文 (2018 年 3 月).

[8] 酒井譲: 光リング共振器の連続回転による片道光速の異方性探査, 修士論文 (2018 年 3 月).

(著書)

[9] ピエール・ビネトリュイ (著), 安東 正樹 (監訳), 岡田 好惠 (翻訳) : 重力波で見える宇宙のはじまり , 講談社ブルーバックス (2017).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[10] Masaki Ando: Status of TOBA torsion bar experiment, Workshop on Future Instruments for Gravity-based Earthquake (Jan 10th, 2018, France).

[11] Y. Enomoto, et al.: Signal Recycling Mirror Reflectivity, 18th KAGRA face-to-face meeting (Dec. 2017, Tokyo Institute of Technology).

[12] K. Komori, et al.: Towards observation of quantum radiation pressure fluctuation acting on a torsion pendulum, 18th KAGRA face-to-face meeting (Dec. 2017, Tokyo Institute of Technology).

[13] Satoru Takano, et al.: The current status of TOrsion Bar Antenna (TOBA), 18th KAGRA Face to Face Meeting (Dec 2017, Tokyo Institute of Technology).

[14] Ching Pin Ooi, et al.: Investigation of mechanical loss in torsion pendulums, 18th KAGRA Face to Face Meeting (Dec 2017, Tokyo Institute of Technology).

[15] Y. Enomoto, et al.: Expected Sensitivity Growth and Signal Recycling, 17th KAGRA face-to-face meeting (Aug. 2017, University of Toyama).

[16] K. Komori, et al.: Suspension thermal noise calculations for KAGRA, 17th KAGRA face-to-face meeting (Aug. 2017, University of Toyama).

[17] K. Komori, et al.: Proposal to update the latest estimated sensitivity of KAGRA, 17th KAGRA face-to-face meeting (Aug. 2017, University of Toyama).

[18] K. Komori, et al.: Scientific targets of future KAGRA, 17th KAGRA face-to-face meeting (Aug. 2017, University of Toyama).

[19] Yuta Michimura: Summary of KSC Session, 17th KAGRA Face to Face Meeting (Aug. 2017, University of Toyama).

[20] Yuta Michimura for the KAGRA Collaboration: The status of KAGRA underground cryogenic gravitational wave telescope, XV International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, (Jul 2017, Sudbury).

[21] Yuta Michimura, et al.: Possibility of Upgrading KAGRA, 3rd KAGRA International Workshop (May 2017, Taipei).

[22] Masaki Ando: Observation Scenario Paper and Roadmap, 3rd KAGRA International Workshop (May 2017, Taipei).

[23] Tomofumi Shimoda, et al.: Seismic Cross-Coupling Noise in TOrsion-Bar Antenna, GWADW2017 (May 9th, 2017, Australia).

[24] N. Aritomi, et al.: Monolithic Power Recycling Michelson Interferometer for TOBA, GWADW2017 (May 9th, 2017, Australia).

[25] Yuta Michimura: Optical Cavity Tests of Lorentz Invariance, Light driven Nuclear-Particle physics and Cosmology 2017 (Apr 2017, Yokohama).

招待講演

[26] Masaki Ando: KAGRA and B-DECIGO, YKIS2018a Symposium (Feb. 19th, 2018, Kyoto University).

[27] Masaki Ando: Observation of Gravitational Waves, Japan-France Workshop “Neutron Star Mergers and Galactic Chemical Evolution” (Oct. 20th, 2017, NAOJ).

[28] Yuta Michimura: Laser Interferometry for Gravitational Wave Astronomy, International OSA Network of Students 2017 (Oct 2017, Okinawa).

[29] Masaki Ando: Science and Design of DECIGO and B-DECIGO, ISGW2017: International Symposium on Gravitational Waves (May 26th, 2017, Beijing, China).

[30] Masaki Ando: Science and Design of DECIGO and B-DECIGO, The 2nd ASTROD International Workshop (May 22nd, 2017, National Tsing Hua Univ., Taiwan).

[31] Masaki Ando: Science and Design of DECIGO and B-DECIGO, The 3rd KAGRA International Workshop (May 21st, 2017, Academia Sinica, Taiwan).

[32] Yuta Michimura, et al.: Possible KAGRA Upgrades, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop 2017 (May 2017, Australia).

[33] Masaki Ando, et al.: Status of TOBA for Low-frequency GW Observations, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop 2017 (May 2017, Australia).

(国内会議)

一般講演

[34] 榎本雄太郎, 他: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の初期観測へむけた主干渉計制御, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (2018 年 3 月, 東京理科大学).

[35] 小森健太郎, 他: 量子輻射圧揺らぎ観測に向けたねじれ振り子光共振器のロック, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).

[36] 道村唯太, 他: 第二世代重力波望遠鏡の高感度化, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).

[37] Ching Pin Ooi, 他: Investigation of mechanical loss in torsion pendulums (2), 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).

[38] 酒井譲, 他: 光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証 (3), 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).

[39] 武田紘樹, 他: 光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証 (4), 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).

[40] 下田智文, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (10) : 改良計画, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).

[41] 高野哲, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (9) : 0.1Hz 付近周波数帯の雑音の低減, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).

[42] 和田祥太郎, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (4), 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).

[43] 川崎拓也, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (5), 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).

[44] 長野晃士, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (6), 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).

[45] 安東正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (90) : DECIGO/B-DECIGO の概要, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).

[46] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 第 18 回宇宙科学シンポジウム (2018 年 1 月 9-10 日, 宇宙科学研究所).

[47] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, CRC 将来計画タウンミーティング (2017 年 12 月 16 日, 東京大学).

[48] 安東 正樹: DECIGO/B-DECIGO の概要, 第 16 回 DECIGO ワークショップ (2017 年 11 月 12 日, 京都大学).

[49] 長野晃士, 他: 光学浮上技術を用いた超精密位置測定装置の開発, 宇宙素粒子若手の会 第 2 回秋の研究会 (2017 年 10 月, 東京大学).

[50] 榎本雄太郎, 他: 干渉計型重力波検出と光学機械相互作用, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月, 宇都宮大学).

[51] 小森健太郎, 他: 量子輻射圧揺らぎ観測に向けたねじれ振り子光共振器の構築, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (同上).

[52] 道村唯太, 他: 重力波望遠鏡 KAGRA の主干渉計高度化, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (同上).

[53] Ching Pin Ooi, 他: Investigation of mechanical loss in torsion pendulums , 日本物理学会 2017 年秋季大会 (同上).

[54] 安東正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (84) : DECIGO/B-DECIGO の概要, 日本物理学会第 72 回年次大会 (同上).

[55] 酒井譲, 他: 光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証 (1), 日本物理学会 2017 秋季大会 (同上).

[56] 武田紘樹, 他: 光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証 (2), 日本物理学会 2017 秋季大会 (同上).

[57] 下田智文, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (7) : 低周波雑音の低減, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (同上).

[58] 高野哲, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (8) : 鉛直地面振動からのカップリング雑音の解析, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (同上).

[59] 和田祥太郎, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (1) 日本物理学会 2017 年秋季大会 (同上).

[60] 川崎拓也, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (2) 日本物理学会 2017 年秋季大会 (同上).

[61] 長野晃士, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (3) 日本物理学会 2017 年秋季大会 (同上).

[62] 道村雄太, 他: 鏡の光学浮上による標準量子限界の到達, 日本物理学会 2017 秋季大会 (2017 年 9 月, 岩手大学).

招待講演

[63] 安東正樹: 重力波観測における光計測技術, 日本物理学会 第 73 回年会 シンポジウム (2018 年 3 月 22 日, 東京理科大学).

[64] 安東正樹: 重力波天文学の幕開け, 東北大学 談話会 (2018 年 2 月 14 日, 東北大学).

[65] 安東正樹: 宇宙からの重力波観測, 2030 年代の光赤外分野のスペースミッション (2017 年 12 月 15 日, 日本橋, 東京).

[66] 安東正樹: 重力波天文学の幕開け, 京都大学 談話会 (2017 年 11 月 22 日, 京都大学).

[67] 安東正樹: 重力波観測の現状と今後, X 線天体と元素合成を中心とする宇宙核物理研究会 (2017 年 7 月 21 日, 理化学研究所).

(セミナー・アウトリーチ講演)

[68] 安東正樹: 重力波で探る宇宙のはじまり (2018 年 1 月 27 日, 朝日カルチャーセンター湘南).

[69] 安東正樹: 重力波で探る宇宙, 順天高校 グローバルウィーク (2017 年 11 月 8 日, 順天高校).

[70] 安東正樹: 重力波天文学で探る宇宙 (2017 年 11 月 4 日, 朝日カルチャーセンター横浜).

[71] 安東正樹: ブラックホール合体の重力波観測 (2017 年 9 月 9 日, 朝日カルチャーセンター新宿).

[72] 安東正樹: 重力波・ブラックホール・宇宙のはじまり, 東京大学オープンキャンパス 2017 (2017 年 8 月 2, 3 日, 東京大学).

[73] 安東正樹: 重力波でさぐる宇宙の大爆発, 第 125 回 東京大学 公開講座 (2017 年 6 月 3 日, 東京大学 安田講堂).

[74] 道村唯太: 重力波観測の現状と展望, 東北大学ニュートリノ科学研究センターセミナー (2017 年 6 月, 東北大学).

[75] 安東正樹: 重力波天文学の誕生 (2017 年 4 月 22 日, 朝日カルチャーセンター湘南).

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」「ひとみ」などといった X 線宇宙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、「ひとみ」代替機など、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いている。

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。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。その後原因究明、lessons learned など

を行ない、「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を立ち上げ、2018 年度のプロジェクト化を目指している。

「ひとみ」衛星は短命に終わったものの、観測データからは Nature 論文 [4] を含む多くの素晴らしい成果が得られている。ここでは特に馬場・中澤研の貢献が大きかった成果について紹介する。

宇宙がどのような元素組成比で構成されているかは、宇宙進化を探る上出も極めて重要な問題である。特に恒星内部の核融合の終着点である鉄族の組成比は、どのような星が宇宙で多く作られてきたかを知る情報を持つ。Fe と Ni の比は、我々の太陽系と代表的な銀河団であるペルセウス銀河団で有意に違うのではないかという議論が数年前から起こっていた。そのような中、「ひとみ」はペルセウス銀河団の X 線放射に含まれる Ni からの特性 X 線を Fe の輝線群から分離することに成功し、Fe と Ni の比が太陽系近傍とペルセウス銀河団で有意な差がないことを示した [4]。これは、宇宙のレシピとも言える星の種族分布が太陽系近傍と遠く離れたペルセウス銀河団、ひいては近傍宇宙で同じである可能性を示唆している貴重な成果である。

また、超新星残骸の観測でも重要な知見が得られた。超新星爆発がどの程度等方的な現象であるかは、爆発機構解明に大きな示唆を与える。我々は「ひとみ」で N132D という大マゼラン星雲にある超新星残骸を観測した。残念ながら観測中に衛星姿勢が安定しなかったため、実効的な観測時間は短く、鉄 K 輝線は 16 光子しか観測出来なかった。にも関わらず、我々は鉄 K 輝線が有意に赤方偏移しており、鉄が含まれる爆発噴出物が非等方的に膨張していることを示した [16]。これは、重力崩壊型超新星残骸の膨張非等方性の発見という科学的成果だけでなく、超高エネルギー分解能観測の威力も示している。

6.7.3 超新星残骸での粒子加速と爆発機構

近年 Fermi 衛星により、分子雲と相互作用する古い超新星残骸から GeV ガンマ線が見つかっており、加速粒子の逃亡の現場ではないかと注目されている。このような現場では、なぜか電子が急激な冷却を受けた「再結合プラズマ」が見つかることが多い。鈴木らは加速粒子の逃亡とプラズマの急冷却が、どちらも分子雲との衝突に起因すると考えた。鈴木らはまず、GeV ガンマ線放射が弱く加速粒子の逃亡が進み切ったと考えられる超新星残骸 HB 21 の X 線データを解析し、確かにプラズマの急冷却があった兆候を発見した。さらに 9 天体の文献データを用いて系統的に、X 線観測から推定できる「プラズマの急冷却からの経過時間」と GeV ガンマ線観測から推定できる「加速粒子の逃亡の進み具合」を比較し、これらが正の相関をもつ可能性が高いことを明らかにした。今後はこの手法を用いた追解析により、加速粒子の逃亡タイムスケールを測ることを目指す。

また、「ひとみ」の成果 [16] を受け、超新星爆発機構に迫る新たな解析プロジェクトも開始した。超新星爆発が膨張を続けるとき、等方的な膨張であれば残骸中の重元素からの特性 X 線はドップラー偏移がプラスのものとマイナスのものが重なり、中心エネルギーが変わらないまま広がるはずである。我々は、エネルギー分解能は「ひとみ」に及ばないものの空間分解能の優れた Chandra 衛星のデータに着目し、morphology から非等方爆発の可能性のある Kepler 超新星残骸からの鉄 K 輝線を詳細に解析した。なお、Kepler 超新星残骸とは、天文学者 Kepler が爆発の瞬間を 1604 年に記録している、最も若い爆発の記録を持つ残骸である。我々は、鉄 K 輝線の中心エネルギーは場所ごとに有意に変化し、特に超新星残骸中心部では赤方偏移成分のみが輝いていることを発見した (図 6.7.1 参照)。これは、Kepler 超新星残骸内の鉄エジェクタが非等方的に膨張していることを示した初の観測的証拠である。今後我々は、同様の解析を複数の天体に系統的に適用し、超新星爆発の等方性の多様性について知見を得る予定である。

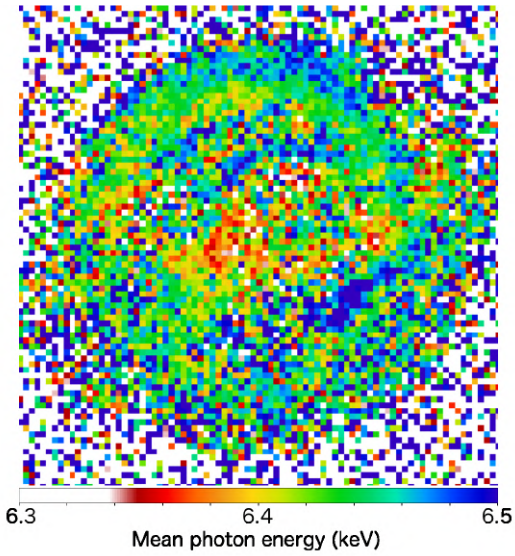


図 6.7.1: ケプラー超新星残骸の鉄 K 輝線中心エネルギーマップ。残骸中心部で輝線中心エネルギーが低くなり、赤方偏移成分のみが輝いていることが分かる。

6.7.4 活動銀河核の研究

活動銀河核は全ての銀河の中心にある巨大ブラックホールのなかでも特に質量降着とそれに伴う電磁波放射が激しいものを指す。銀河と巨大ブラックホールは、宇宙初期の形成時から「共進化」していることが知られており、宇宙全体の進化に大きな影響を与えていることが知られている。しかし、その質量降着は大きな時間変化をみせ、電磁波スペクトルも複雑なことから、全容解明には至っていない。

そのような中、我々は X 線スペクトルの時間変動に特に着目した研究を続けている。今年度は特に、複数の狭輝線 I 型セイファート銀河、Swift J2127.4+5654、Ark 564、Mrk 766、NGC 4051 について、差分スペ

クトル法による成分分解を実施。その結果、降着率の低い天体ではセイファート I 型で既に確認されている (e.g. Noda et al. 2011) のと同様、ハードな一次 X 線成分が存在することがわかった。一方、降着率の高い天体のスペクトルについては、ハード一次成分を要求しないこと、反射成分の鉄輝線が幅広であることを確認した。これは、降着率が高くなるとハード一次成分が弱くなるという我々の描像を強化するものである。また幅広の鉄輝線の存在は、ソフト成分を放射するコロナが降着円盤の十分近くに存在することを示唆する。狭輝線 I 型セイファート銀河、Swift J2127.4+5654 の軟 X 線・硬 X 変動の間にハードラグがあることを先行研究とは異なる手法で再確認し、さらに、このラグはスペクトルがソフトな時間帯のみ現れることを発見した。これは、軟 X 線と硬 X 線を放射する二つのコロナの間のジオメトリの関係性を反映しているものと考えられる。

ハード一次成分を放射するコロナは RIAF と呼ばれる降着流であることが先行研究で提唱されている。今回の結果を総合すると、ソフト一次成分を放射するコロナはこれより外側に存在し、また円盤のごく近くに存在すると考えられる。また、ハードラグがソフトな時間帯のみ存在することから、ソフトコロナが円盤を覆う割合が時間変化しているのではないかと推定される。この現象は、ブラックホール連星 Cyg X-1 でも提案されており、大小の異なるサイズスケールを持つブラックホールで、共通の現象が起こっていることを示唆している。

￥subsection 銀河団とその衝突・合体銀河団は Mpc スケールのダークマターの塊に、数千に達する銀河とより大量のプラズマが閉じ込められている、宇宙最大の天体である。ガスは重力ポテンシャルで高温となり X 線を強く放射する。加藤、中澤らは、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 (Kato et al. PASJ 2015)。今年度はこの銀河団の全体を高い感度で観測した「すざく」のデータを詳細に再解析し、その衝突軸に垂直な方向に内側から外側へ高温ガスが噴き出していると思われる様子を確認した。この新発見に加えて、これまでの衝撃波の空間分布の研究、全体の温度分布、そして衝突の物理モデルの考察について、加藤博士学位論文 [30] にまとめた。

6.7.5 雷雲ガンマ線の研究

地上実験や飛翔体実験により、雷雲や雷放電から放出される数十 MeV に達するガンマ線 (雷ガンマ線) が観測されている。大気中で 200-300 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) をもつ電子は減速せずむしろ加速される。すなわち 100 keV 程度の種電子は、強電場中で制動放射による損失が卓越する 20-30 MeV まで加速される。これを逃走電子加速と呼ぶ。さらに、加速された電子は大気中で雪崩増幅し、制動放射ガンマ線を生じさせる。この大気中の強電場領域における加速機構は、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」であり、学術的対象として重要である。しかし、上記の加速モデルは確立されたものではなく、加速の起きる場所、大きさ、増幅率、そして安定して電子加速を持続させる機構といった基礎的な性質を、観測により明らかにする必要がある。そこで我々は、京都大学や理化学研究所のグループとともに、2006 年から雷ガンマ線の観測実験 GROWTH (Gamma-Ray Observation of Winter THundercloud) を続けている。

雷ガンマ線による光核反応の発見

和田、古田、中澤は、京都大学の榎戸氏、JAEA の土屋氏、当研究室 OB の湯浅氏らとともに、2017 年 2 月 6 日に柏崎刈羽原発内の複数台の検出器で同時に観測された、雷放電に同期した非常に明るい突発的なガンマ線放射 (ショートバースト) の詳細な解析を行った。その結果、(1) 検出器を飽和させるほどの極めて強力な数ミリ秒のガンマ線放射、(2) 50 ミリ秒の時定数で指数減衰するガンマ線、(3) そして放電から 35 秒ほど遅れてゆっくりと増光する 511 keV 輝線を捉え、それぞれ、(1) これまで宇宙で観測されてきた地球ガンマ線フラッシュ (TGF) が地上方向に放出されたもの、 (2) このガンマ線フラッシュが大気中で光核反応を起こして大量に生成した高速中性子に由来するガンマ線放射、(3) 光核反応によって生成された 13N などの $\beta+$崩壊核種が、検出器上空を通過しながら放出した陽電子の対消滅輝線であることを、世界で初めて確認した。本成果は 2017 年 11 月号の Nature 誌に掲載され、雷ガンマ線研究を大きく前進させるとともに、雷が原子核と相互作用し同位体を生成しうるという観点から、世界的に大きな反響を呼んだ。

2017 − 18 年シーズンの観測

2017-18 年シーズンは榎戸氏、湯浅氏、土屋氏らと協力し、松元、和田、古田、中澤が観測を行った。松元らは安価な大型 CsI シンチレーターを用いた検出器を 7 台作成し、そのうち 3 台を石川県金沢市の沿岸部に、1 台を新潟県柏崎市に設置した。和田らは理化学研究所 櫻井 RI 物理研究室から借用した大型 BGO シンチレータを搭載した 5 台の検出器を石川県金沢市・小松市に設置し、加えて熱中性子に感度をもつシンチレータ検出器を新たに開発し、柏崎市に 4 台設置した。さらに、2016 年に開発したガンマ線の到来方向を測定する検出器を古田らを中心に改良し、柏崎市に設置した。この結果、今期は数分にわたるガンマ線放射（ロングバースト）を新たに 12 件、ショートバーストを新たに 4 件捉えた。また和田らは近畿大学と協力し、石川県羽咋市で行われたロケット誘雷実験に参加し、誘雷時の放射線測定を実施した。

6.7.6 将来計画

広帯域 X 線撮像観測 FORCE 衛星計画

10 keV を超える硬 X 線帯域までを、「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。今年度は、“missing BH workshop” を 2017/11/6–7 で京都で開催して、サイエンスの議論を進めるとともに、検出器開発を進めた。2020 年代中頃の打ち上げを目指して、サイエンスおよびミッション検討を進めている。

＜受賞＞

[1] 和田有希,「雷雲ガンマ線の多地点観測プロジェクト: 可搬型検出器の開発と 2016 年度冬季の観測成果」,「JpGU-AGU Joint Meeting 2017 学生優秀発表賞 大気水圏科学セクション」, 2017 年 7 月

[2] 春日 知明、「特性 X 線のドップラー広がりを利用した Kepler 超新星残骸の膨張速度測定」、「天文・天体物理 若手夏の学校 星間現象分科会 オーラルアワード」第 3 位、2017 年 7 月 27 日

＜報文＞

(原著論文)

[3] F. Acero, A. Bamba, et al., “Prospects for Cherenkov Telescope Array Observations of the Young Supernova Remnant RX J1713.7−3946”, ApJ, 840, 74 (2017)

[4] Hitomi Collaboration, A. Bamba, K. Nakazawa, et al., “Solar abundance ratios of the iron-peak elements in the Perseus cluster”, Nature, 551, 478 (2017)

[5] V. Doroshenko, V, G. Puehlhofer, A. Bamba, F. Acero, W.W. Tian, D. Klochkov, A. Santangelo, “XMM-Newton observations of the non-thermal supernova remnant HESS J1731-347 (G353.6-0.7)”, A&A, 608, 23 (2017)

[6] T. Sato, S. Katsuda, M. Morii, A. Bamba, J.P.Hughes, Y. Maeda, M. Ishida, F. Fraschetti, “X-Ray Measurements of the Particle Acceleration Properties at Inward Shocks in Cassiopeia A”, ApJ, 863, 46 (2017)

[7] T. Tanaka, H. Uchida, H. Nakajima, H. Tsunemi, K. Hayashida, T.G. Tsuru, T. Dotani, R. Nagino, S. Inoue, S. Katada, R. Washino, M. Ozaki, H. Tomida, C. Natsukari, S. Ueda, M. Iwai, K. Mori, M. Yamauchi, I. Hatsukade, Y. Nishioka, E. Isoda, M. Nobukawa, J.S. Hiraga, T. Kohmura, H. Murakami, K.K. Nobukawa, A. Bamba, J.P. Doty, “Soft X-ray Imager aboard Hitomi (ASTRO-H)”, JATIS, 4, id. 011211 (2018)

[8] A. Bamba, Y. Ohira, R. Yamazaki, M. Sawada, Y. Terada, K. Koyama, E.D. Miller, H. Yamaguchi, S. Katsuda, M. Nobukawa, K.K. Nobukawa, “The Transition from Young to Middle-aged Supernova Remnants: Thermal and Nonthermal Aspects of SNR N132D”, ApJ, 854, 71 (2018)

[9] Hitomi Collaboration, A. Bamba, K. Nakazawa et al., “Atmospheric gas dynamics in the Perseus cluster observed with Hitomi”, PASJ, 70, 9 (2018)

[10] Hitomi Collaboration, A. Bamba, K. Nakazawa et al., “Measurements of resonant scattering in the Perseus Cluster core with Hitomi SXS”, PASJ, 70, 10 (2018)

[11] Hitomi Collaboration, A. Bamba, K. Nakazawa et al., “Temperature structure in the Perseus cluster core observed with Hitomi”, PASJ, 70, 11 (2018)

[12] Hitomi Collaboration, A. Bamba, K. Nakazawa et al., “Atomic data and spectral modeling constraints from high-resolution X-ray observations of the Perseus cluster with Hitomi”, PASJ, 70, 12 (2018)

[13] Hitomi Collaboration, A. Bamba, K. Nakazawa et al., “Hitomi observation of radio galaxy NGC 1275: The first X-ray microcalorimeter spectroscopy of Fe-K α line emission from an active galactic nucleus”, PASJ, 70, 13 (2018)

[14] Hitomi Collaboration, A. Bamba, K. Nakazawa et al., “Search for thermal X-ray features from the Crab nebula with the Hitomi soft X-ray spectrometer”, PASJ, 70, 14 (2018)

[15] Hitomi Collaboration, A. Bamba, K. Nakazawa et al., “Hitomi X-ray studies of giant radio pulses from the Crab pulsar”, PASJ, 70, 15 (2018)

[16] Hitomi Collaboration, A. Bamba, K. Nakazawa et al., “Hitomi observations of the LMC SNR N 132 D: Highly redshifted X-ray emission from iron ejecta”, PASJ, 70, 16 (2018)

[17] Hitomi Collaboration, A. Bamba, K. Nakazawa et al., “Glimpse of the highly obscured HMXB IGR J16318-4848 with Hitomi”, PASJ, 70, 17 (2018)

[18] H. Nakajima, Y. Maeda, H. Uchida, T. Tanaka, H. Tsunemi, K. Hayashida, T.G. Tsuru, T. Dotani, R. Nagino, S. Inoue, M. Ozaki, H. Tomida, C. Natsukari, S. Ueda, K. Mori, M. Yamauchi, I. Hatsukade, Y. Nishioka, M. Sakata, T. Beppu, D. Honda, M. Nobukawa, J.S. Hiraga, T. Kohmura, H. Murakami, K.K. Nobukawa, A. Bamba, J.P. Doty, R. Iizuka, T. Sato, S. Kurashima, N. Nakaniwa, R. Asai, M. Ishida, H. Mori, Y. Soong, T. Okajima, P. Serlemitsos, Y. Tawara, I. Mitsuishi, K. Ishibashi, K. Tamura, T. Hayashi, A. Furuzawa, S. Sugita, T. Miyazawa, H. Awaki, E.D. Miller, H. Yamaguchi, “In-orbit performance of the soft X-ray imaging system aboard Hitomi (ASTRO-H)”, PASJ, 70, 21 (2018)

[19] K. Miyaoka, et al. (incl. K. Nakazawa), “Multiwavelength study of X-ray luminous clusters in the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program S16A field”, PASJ, Volume 70, Issue SP1, id.S22 (2017)

[20] M. Itahana, K. Takizawa, H. Akamatsu, R.J. van Weeren, H. Kawahara, Y. Fukazawa, J.S. Kaastra, K. Nakazawa, T. Ohashi, N. Ota, H.J.A. Röttgering, J. Vink, F. Zandanel, “Suzaku and Chandra observations of the galaxy cluster RXC J1053.7+5453 with a radio relic”, PASJ, Volume 69, Issue 6, id.88 (2017)

[21] K. Yamaoka et al., “Suzaku Wide-band All-sky Monitor (WAM) observations of GRBs and SGRs”, PASJ, Volume 69, Issue 3, id.R2 (2017)

[22] K. Ono, K. Makishima, S. Sakurai, Z. Zhang, K. Yamaoka, K. Nakazawa, “A hard-to-soft state transition of Aquila X-1 observed with Suzaku”, PASJ, Volume 69, Issue 2, id.23 (2017)

[23] H. Akamatsu, M. Mizuno, N. Ota, Y.Y. Zhang, R.J. van Weeren, H. Kawahara, Y. Fukazawa, J.S. Kaastra, M. Kawaharada, K. Nakazawa, T. Ohashi, H.J. Röttgering. M. Takizawa, J. Vink, F. Zandanel, “Suzaku observations of the merging galaxy cluster Abell 2255: The northeast radio relic”, Astronomy & Astrophysics, Volume 600, id.A100, 12 pp. (2017)

[24] K. Nakazawa et al. “The hard X-ray imager (HXI) onboard ASTRO-H”, K. Nakazawa et al., JATIS, in press (2018)

[25] K. Hagino et al. “In-orbit performance and calibration of the hard x-ray imager onboard Hitomi (ASTRO-H)”, JATIS, in press (2018)

[26] H. Tajima et al. “Design and performance of Soft Gamma-ray Detector onboard the Hitomi (ASTRO-H) satellite”, JATIS, in press (2018)

[27] T. Enoto, Y. Wada, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, K. Okuda, K. Makishima, M. Sato, Y. Sato, T. Nakano, D. Umemoto, H. Tsuchiya, “”Photonuclear reactions triggered by lightning discharge”, Nature, Volume 551, Issue 7681, pp. 481-484 (2017)

[28] Y. Wada, T. Yuasa, K. Nakazawa, K. Makishima, T. Hayashi, M.Ishida, “An estimation of the white dwarf mass in the Dwarf Nova GK Persei with NuSTAR observations of two states”, MNRAS, 474,1564-1571

(学位論文)

[29] Ono, K., “X-ray Spectral Studies with Suzaku of Hot Flows Accreting onto Weakly-Magnetized Neutron Stars”, (「すざく」の X 線分光を用いた弱磁場中性子星への高温降着流の研究)、博士学位論文

[30] Y. Kato, “Structures within the intra-cluster medium of an early phase cluster merger, CIZA J1358.9-4750”(初期衝突銀河団 CIZA J1358.9-4750 のプラズマの空間構造)、博士学位論文

[31] Miyake, K., “X-ray timing spectroscopy of narrow line Seyfert I galaxies with *NuSTAR*” (*NuSTAR* を用いた狭輝線 I 型セイファート銀河の X 線スペクトル変動)、博士学位論文

[32] 鈴木寛大,「「ひとみ」硬 X 線イメージャの軌道上バックグラウンド評価(Estimation of non-X-ray background in orbit with Hitomi hard X-ray imagers)」, 修士学位論文

[33] 清野愛海,「大型シンチレータ検出器の光量増加と実用性向上を目指した反射材改良と性能評価(Improvement and evaluation of reflectors of large scintillators for better performance and handling)」, 修士学位論文

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[34] K. Miyake, H. Noda, S. Yamada, M. Seino, K. Nakazawa, K. Makishima, “The two primary X-ray continua and their variability in SWIFT J2127.4+5654”, “European Week of Astronomy and Space Science “, 26–30 June 2017, Prague, Czech Republic

[35] K. Ono, S. Sakurai, Z. Zhang, K. Nakazawa, K.Yamaoka, K. Makishima, “Resolving a Hard-to-Soft State Transition of Aquila X-1”, “Europian Week of Astronmy and Space Science”, 26–30 June 2017, Prague, Czech Republic

[36] K. Ono, K. Makishima, Z. Zhang, K. Yamaoka, K. Nakazawa, “The Unified understanding of the Aquila X-1 hard-to-soft state transition and its implication for the cosmic battery effect” “Asia-Pacific Regional IAU Meeting”, 3–7 July 2017, Taipei, Taiwan

[37] Y. Wada, T. Enoto, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, K. Okuda, K. Makishima, M. Sato, Y. Sato, T. Nakano, D. Umemoto, H. Tsuchiya, ”Initial results from a multi-point mapping observation of thundercloud high-energy radiation in coastal area of Japan sea”, “American Geophysical Union Fall Meeting 2017“, 1115 December 2017, New Orleans, USA

[38] Suzuki H., Bamba A., Nakazawa K., Yamazaki R., “Thermal X-ray Studies on Escaping of Accelerated Protons and Shock-Cloud Interaction“, “SNR workshop 2017”, 28-29 September 2017, Nagoya, Japan

[39] Suzuki H., Bamba A., Nakazawa K., Yamazaki R., “Thermal X-ray studies on escaping of accelerated protons from SNR shocks “, “7th International Fermi Symposium”, 15-20 October 2017, Garmisch-Partenkirchen, Germany

[40] T. Kasuga, “Study of Ejecta Expansion in Kepler’s SNR with Suzaku”, “SNR workshop 2017”, 28–29 September 2017, Nagoya, Japan

[41] K. Nakazawa, “Recovery of high-resolution X-ray spectroscopy with XARM and future mission candidate FORCE for hard X-ray/wide-band imaging spectroscopy”, “The extreme Universe viewed in very-high-energy gamma rays 2017”, December 18 – 19, 2017, in Kashiwa, Japan

招待講演

[42] A. Bamba, “Recent Progress on Supernova Remnants - Progenitors, Evolution, Cosmic-ray Acceleration”, “X-ray Universe 2017”. Roma, Italy, 2017, Jun.

[43] A. Bamba, “X-ray Observations of Supernova Remnants”, “Asia-Pacific Regional IAU Meeting”, Taipei, Taiwan, 2017, Jul.

[44] A. Bamba, “Recent Progress on Supernova Remnants - Present achievements and Future -“, “SNR workshop 2017”, Nagoya University, Japan, 2017, Sep.28-29

(国内会議)

一般講演

[45] 馬場 彩、「GeV SNR 候補の系統的探索」、「超新星残骸観測の将来展望」、東京大学、2017 年 12 月

[46] 馬場 彩、「FORCE で探る超新星残骸での粒子加速」、「超新星残骸観測の将来展望」、東京大学、2017 年 12 月

[47] 和田有希, 榎戸輝揚, 古田 禄大, 湯浅孝行, 中澤知洋, 中野俊男, 土屋晴文, 鴨川仁, 米徳大輔, 澤野達哉, 「雷雲ガンマ線の多地点観測プロジェクト: 可搬型検出器の開発と 2016 年度冬季の観測成果」, 「JpGU-AGU Joint Meeting 2017」, 20-25 May 2017, 幕張, 日本

[48] 和田有希, 湯浅孝行, 中澤知洋, 牧島一夫, 林多佳由, 石田学, 「X 線による矮新星 GK Persei の増光期と静穏期の観測」, 「連星系・変光星・低温度星研究会 2017」, 15-17 September 2017, 名寄, 日本

[49] 和田有希, 榎戸輝揚, 古田禄大, 松元崇弘, 中澤知洋, 湯浅孝行, 土屋晴文, ほか GROWTH コラボレーション「可搬型検出器による雷雲由来の電子加速と高エネルギー現象の多地点観測」「東京大学宇宙線研平成 29 年度共同利用研究成果発表会」, 8-9 December 2017, 柏, 日本

[50] 和田有希, G.Bowers, 榎戸輝揚, 鴨川仁, 中村佳敬, 森本健志, D.Smith, 古田禄大, 中澤知洋, 湯浅孝行, 玉川徹, 牧島一夫, 土屋晴文, 「雷放電によって破壊された雷雲内の電場加速機構」, 「雷雲と宇宙線の相互作用に伴う高エネルギー現象」, 3 March 2018, 柏, 日本

[51] 榎戸輝揚, 和田有希, 古田禄大, 湯浅孝行, 中澤知洋, 中野俊男, 土屋晴文, 鴨川仁, 米徳大輔, 澤野達哉, 「雷雲ガンマ線の多地点観測プロジェクトが拓く新展開」, 「JpGU-AGU Joint Meeting 2017」, 20-25 May 2017, 幕張, 日本

[52] 土屋晴文, 榎戸輝揚, 和田有希, 古田禄大, 中澤知洋, 湯浅孝行, 奥田和史, 牧島一夫, 中野俊男, 榛本大悟, 「日本海沿岸における冬の雷や雷雲に伴う放射線観測」, 「日本原子力学会 2018 年春の年会」, 26-28 March 2018, 吹田, 日本

[53] 春日 知明、「特性 X 線のドップラー広がりを利用した Kepler 超新星残骸の膨張速度測定」、「天文・天体物理 若手夏の学校」、長野、日本、(2017)

[54] 春日知明、「「すざく」による Kepler 超新星残骸の膨張速度測定」、日本天文学会秋季大会、北海道大学（2017）

[55] 加藤佑一、「銀河団衝突で発生した若い衝撃波の観測研究」、日本天文学会秋季大会、北海道大学（2017)

[56] 鈴木寛大、「分子雲衝突に起因する超新星残骸からの宇宙線逃亡シナリオの観測的検証」、日本天文学会秋季大会、北海道大学（2017）

[57] 清野愛海、「将来の硬 X 線・ガンマ線衛星に向けたシンチレータ反射材の改良」、日本天文学会秋季大会、北海道大学（2017)

[58] 馬場彩、「恒星 bow shock 候補 G70.7 + 1.2 からの X 線の発見」、日本天文学会秋季大会、北海道大学（2017）

[59] 松元崇弘、「X 線衛星「すざく」を用いたガンマ線連星 LS5039 の X 線パルス探索」、日本天文学会秋季大会、北海道大学（2017）

[60] 三宅克馬、「狭輝線 I 型セイファート銀河 NGC4051 における一次放射成分の時間変動、日本天文学会秋季大会、北海道大学（2017）

[61] 和田有希、「矮新星 GK Persei の X 線スペクトル解析による白色矮星質量の推定」、日本天文学会秋季大会、北海道大学（2017）

[62] 中澤知洋、「雷雲ガンマ線の地上観測の現状と 2017 年の GROWTH 実験計画」、日本物理学会 2017 年秋季大会、宇都宮大学

[63] 古田禄大、「モンテカルロシミュレーションによる雷雲ガンマ線放射モデルの構築」、日本物理学会 2017 年秋季大会、宇都宮大学

[64] 春日知明、「X 線を用いた Kepler 超新星残骸中の Fe の非等方な膨張構造解析」、日本天文学会春季大会、千葉大学（2018）

[65] 鈴木寛大、「「ひとみ」HXI を用いた軌道上中性子バックグラウンドの評価」、日本天文学会春季大会、千葉大学（2018）

[66] 中澤知洋、「地上と宇宙から探る雷放電に同期する突発ガンマ線観測への取り組み」、日本天文学会春季大会、千葉大学（2018）

[67] 三宅克馬、「狭輝線 I 型セイファート銀河 Swift J2127.4 + 5654 におけるディレイとハード一次成分」、日本天文学会春季大会、千葉大学（2018）

[68] 松元崇弘、「大型 CsI 結晶を用いた冬季雷雲由来ガンマ線検出器の量産とそれを用いたマッピング観測」、日本物理学会 2018 春季大会、東京理科大学

[69] 古田禄大、「落雷による光核反応の発見：シミュレーションによるデータ解釈」、日本物理学会 2018 春季大会、東京理科大学

招待講演

[70] 馬場 彩、「Supernova Remnants and other interesting sources with high energy photons and FUGIN」、「cience Workshop 2018 on FUGIN: The Galactic Plane Legacy Survey for Molecular Clouds」、名古屋、日本、2018 年 2 月

[71] 馬場彩、「X 線・ガンマ線で見たマゼラン雲 - ideal laboratory か monster factory か？ -」、日本天文学会春季大会、千葉大学（2018）

(セミナー)

[72] A. Bamba, “RecentProgress on X-ray studies of Supernova Remnants - Progenitors, Evolution, Cosmic-ray Acceleration - “, 理研、2017, Jun. 23

[73] A. Bamba, “RecentProgress on X-ray studies of Supernova Remnants - Progenitors, Evolution, Cosmic-ray Acceleration - “, 国立天文台、2017, Jul. 26

[74] 加藤佑一、「銀河団および超新星残骸での無衝突衝撃波による電子加熱の統一的な観測研究」、青山学院大学、山崎研究室、2017

[75] 加藤佑一、「銀河団および超新星残骸プラズマにおける無衝突衝撃波での熱輸送の観測研究」、東京大学、茂山研究室、2017

6.8 日下 研究室

宇宙は、高温高密度の原始宇宙から始まり、膨張・冷却を経て現在に至るとされる。日下研究室では、宇宙背景放射 (CMB) の観測を通じて、この高温高密度の原始宇宙がどうやって作り出されたのかを調べ、宇宙の進化が何によって支配されているのか、宇宙物理の、そして素粒子物理の根本にも関わりうる謎を解き明かすことを目指している。

インフレーション仮説によれば、宇宙創成 10^{-32} 秒の間に時空の加速度的膨張が起き、高温高密度の原始宇宙が作られた。この仮説の決定的証拠となるのが重力場の量子ゆらぎに起因する「原始重力波」である。この重力波が、「B モード」と呼ばれる負のパリティを持つパターンを、宇宙背景放射のおよそ 2 度の角度スケールに刻印する。我々が探索するこのパターンが検出されれば、インフレーション宇宙論を証明するだけでなく、重力の量子化の確認という、現代物理学における一大ブレークスルーとなる。

一方、宇宙背景放射の精密測定を通して未知の粒子の探索と宇宙進化メカニズムの解明も目指している。地球に届く過程で、宇宙背景放射は「暗黒物質」による重力レンズ効果の影響を受ける。この効果を測定することで、宇宙進化を探り、それに影響を及ぼす「宇宙背景ニュートリノ」の質量を測定することが出来る。また、CMB が銀河団を通過する際には、そこに分布する高エネルギー電子との相互作用により周波数スペクトルにゆがみが生じる。これは Sunyaev-Zel’dovich (SZ) 効果と呼ばれ、この効果を CMB 観測を通して測定することで、銀河団の分布図を作り、宇宙進化、そしてそれを司る暗黒エネルギーや宇宙背景ニュートリノを探ることが出来る。重力レンズ効果や SZ 効果は、インフレーションとは異なり、より小さな 1 ～ 3 分角の角度スケールに現れる。

我々は、チリ・アタカマ高地で観測を継続してきた POLARBEAR 実験、その後継である Simons Array 実験を通して研究を進めてきた。これに加えて、Simons Array と Atacama Cosmology Telescope (ACT) のグループを統合して発足した Simons Observatory 実験においても、2020 年の観測開始へ向けた設計・開発を進めている。

6.8.1 POLARBEAR 実験と Simons Array 実験

POLARBEAR 実験は、インフレーション測定と重力レンズ効果の両方を同時に測定する事を目指してデザインされており、2012 年から 2017 年までの間観測を続けてきた。データ解析を継続して進めており、重力レンズ効果についてはより高い精度での測定を達成した [3]。一方で、これまでインフレーション測定は小さな口径 (∼ 50 cm) の望遠鏡が有利とされてきたが、連続回転式半波長板を用いることで、2.5 m と中規模な口径を持つ POLARBEAR でインフレーション測定が可能であることを示す [2] など、次世代実験に向けた技術実証の意味においても影響力のある成果を得た。また、すばる望遠鏡から得られた重力レンズ効果と POLARBEAR から得た重力レンズ効果の統合解析にも注力している。

Simons Array 実験は POLARBEAR 実験の後継であり、POLARBEAR のおよそ 6 倍に当たる一台あたりおよそ 7,000 チャンネルの検出器を擁する望遠鏡を、最終的に合計 3 台同時運用することを目指す。その 1 台目は、2018 年後半の観測開始を目指して KEK の共同研究グループを中心に統合試験を進めている。また、従来実験を一桁上回るデータ量を扱うため、HPC (High-Performance Computation) 環境で効率の良いソフトウェアを開発している。



図 6.8.1: チリアタカマ高地に建設中の Simons Array 望遠鏡群 (手前)。

6.8.2 Simons Observatory 実験

Simons Observatory は、2016 年に発足した史上最大規模の地上 CMB 実験・国際共同研究グループであり、当研究室もその推進に中心的な役割を果たす。Simons Observatory 実験においては、インフレーション測定における感度向上に特化した口径 42 cm 程度の小口径望遠鏡群と、重力レンズ効果や SZ 効果

の測定を主眼に置いた口径 6 m の大口径望遠鏡との両方を建設し、これまでの測定を遙かに上回る精度で CMB を測定し、宇宙の始まりから進化までの姿を解き明かす。本研究室では、小口径望遠鏡群に注力して開発を行ってきた。特に、Kavli IPMU の共同研究グループとともに、光学設計および光学筒の設計を進め、直径 460 mm の単結晶シリコンレンズを有する屈折光学系を採用し、光学筒自身からの熱放射を抑えるため 1 K まで冷却するという基本設計を固めた。焦点面は、希釈冷凍機により 100 mK 以下まで冷却される。また、本研究室が中心となって開発を進める、超伝導ベアリングを用いた冷却型連続回転式半波長板システムを採用予定であり、これにより系統誤差と大気揺らぎによる影響の低減を行う。

6.8.3 次世代 CMB 実験用 装置開発

超伝導体を用いた検出器として、超伝導力学的インダクタンス検出器および超伝導転移端センサが挙げられるが、いずれも従来の半導体検出器などでは達成不可能だった高感度・多チャンネル化が達成できる。CMB 観測実験、暗黒物質探索実験を始め、素粒子・宇宙分野の実験でも採用例が増加している。本研究室では、これら超伝導検出器およびその読み出し回路の開発を進め、そしてその評価のため読み出し用高周波回路と希釈冷凍機の導入を進める [1, 6]。また、冷却型連続回転式半波長板システムの開発において世界の先端を走っており、Kavli IPMU との共同研究により、世界最大の内径 55 cm の超伝導ベアリングの開発を進める。2018 年度初頭に完成予定のこのシステムは、Simons Observatory に採用される。連続回転式半波長板を用いた CMB 測定の実証についても、実証実験である Atacama B-mode Search (ABS) 実験の最終結果を発表する [5] など、大きな進捗があった。さらに、Simons Observatory 実験の先に計画される究極の CMB 実験 “CMB-S4” に向けた概念設計を進めた [4]。

＜報文＞

(原著論文)

[1] M. H. Abitbol *et al.*, “CMB-S4 Technology Book, First Edition,” arXiv:1706.02464 (2017).

[2] S. Takakura *et al.*, “Performance of a continuously rotating half-wave plate on the POLARBEAR telescope,” JCAP **05**(2017)008.

[3] The POLARBEAR Collaboration, P. A. R. Ade *et al.*, “A Measurement of the Cosmic Microwave Background B-mode Polarization Power Spectrum at Subdegree Scales from Two Years of POLARBEAR Data,” Astrophys. J., **848**:121 (2017).

[4] D. Barron, Y. Chinone, A. Kusaka *et al.*, “Optimization study for the experimental configuration of CMB-S4,” JCAP **02**(2018)009.

[5] A. Kusaka *et al.*, “Results from the Atacama B-mode Search (ABS) Experiment,” arXiv:1801.01218 (2018).

[6] Z. Ahmed *et al.*, “Quantum Sensing for High Energy Physics,” arXiv:1803.11306 (2018).

(会議抄録)

[7] A. Suzuki *et al.*, “Commercialization of Microfabrication of Antenna-Coupled Transition Edge Sensor Bolometer Detectors for Studies of the Cosmic Microwave Background,” J. Low. Temp. Phys. (2018). https://doi.org/10.1007/s10909-018-1903-6

[8] F. Faramarzi *et al.*, “Lithographed Superconducting Resonator Development for Next-Generation Frequency Multiplexing Readout of Transition-Edge Sensors,” J. Low. Temp. Phys. (2018). https://doi.org/10.1007/s10909-018-1889-0

＜学術講演＞

(国内会議)

招待講演

[9] 日下 暁人, “宇宙背景放射 これから 10 年で分かること,” 第 6 回観測的宇宙論ワークショップ, 2017 年 10 月, 弘前大学.

[10] 日下 暁人, “宇宙を使った素粒子物理学 ～宇宙背景放射観測の最前線～,” 第 24 回素粒子物理国際研究センターシンポジウム 2018 年 2 月, 長野県北安曇郡白馬村岳美山荘.

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。

感覚フィードバックによる運動回路形成の制御ーショウジョウバエ胚を用いた研究（曽祥孫澤、能瀬聡直）

動物の運動神経系は、固有の活動および外部環境の変化により適応的に発達する。しかし、神経回路が未熟な胎児期、幼児期において、運動回路がどう形成され、どう発達していくのかについては不明の点が多かった。今年度、我々はショウジョウバエの胚を用いて、感覚フィードバック経験を介して運動回路が適応的に発達する過程を探った。これまで我々は、感覚神経変異体の行動実験および単離した中枢神経系のカルシウムイメージングなどの技術を用いて、ショウジョウバエ胚発生過程における感覚フィードバックの役割を調べてきた。その結果、幼虫腹側神経索内のパターン生成回路 (CPG: Central Pattern Generator) は、胚期の感覚フィードバック経験により修正されることが分かった。さらに、感覚フィードバックを担う MDCI 感覚神経細胞の下流にある二次ニューロンの機能を調べるため、Gal4-UAS システムや RNA 干渉法などを用いて、標的の二次ニューロンの電気シナプスを特異的に阻害したところ、孵化直後の幼虫のぜん動運動が異常になることを見いだした。以上の結果により、体性感覚のフィードバックが標的の二次ニューロンを介して胚期の神経活動の開始を惹起している可能性が示唆された。今後は、上記の二次ニューロンにおける、発達の初期のみに存在する電気シナプスの役割を探ってゆく予定である。そのため、まず電気生理学の一つの手段である色素カップリング方法を用いて、二次ニューロンのカップリング相手を見出し、パッチクランプ法などで電気結合のプロパティおよび発達段階での役割を明らかにする予定である。本研究は理化学研究所の風間北斗博士、稲田健吾博士との共同研究である。

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、長野泰志（4 年生特別実験)、森谷文香（4 年生特別実験)、能瀬聡直、高坂洋史）

動物は地球上の多様な地域に生息し、周囲の環境に適応して多様な種に分化している。動物の運動は種分化に伴って違いが生じうるが、その分子遺伝学的機構は明らかになっていない。その理由の一つとして、運動制御の種間比較が可能なモデル系が十分に開発されてこなかったことが考えられる。広く用いられているモデル動物の 1 つ、キイロショウジョウバエはショウジョウバエ属に分類され、この属には種が 1500 以上存在し、それぞれ多様な地域に生息している。ショウジョウバエ属のいくつかの種においては、ゲノム配列が解読されており、キイロショウジョウバエとの分子遺伝学的な比較が可能になっている。本研究では、ショウジョウバエ幼虫の運動を定量的に解析することで、近縁種間の運動特性の比較を行ない、種分化に伴う運動特性変容を解析するモデル系の構築を目指した。

ショウジョウバエ属の幼虫の中では、キイロショウジョウバエの幼虫の行動が詳しく解析されており、crawling、turning、rolling などの典型的な運動要素

からなることが明らかになっている。そこで、ショウジョウバエ属 12 種の幼虫の行動を解析したところ、自由行動における turning の割合が種間で異なることを見出し、turning の割合が大きい種群と小さい種群に分けることができた。個々の種の生息地域との関係を調べたところ、turning の割合が小さい種群において、緯度が低い地域に生息する傾向が認められた。このことは、turning の制御機構が生息環境の違いによる種分化に伴って変化したことを示唆する。さらに、異種間の相互作用を解析したところ、種間の運動特性の差異を反映した、相互作用の違いを見出すことに成功した。

生息環境を規定する主要因の一つと考えられる温度に着目し、高温環境下で、幼虫の行動の定量比較を行なったところ、種によって turning の割合の温度依存性が異なることが明らかになった。これらの結果はショウジョウバエ属の幼虫行動が、環境に適応した種分化と運動特性の変化を解析する有用なモデル系であることを示唆する。

ショウジョウバエ胚の神経回路形成期における自発的神経発火パターンの解析（戸松一貴、能瀬聡直、高坂洋史）

動物はさまざまな定型的な運動 (歩行, 遊泳, 飛行など) を行う。定型的な運動は、卵から体が発達していく過程において段階的に現れる。このような運動の段階的発達は、それを制御する神経回路の発達によって達成されていると考えられる。しかし、生きた状態の動物個体内の神経活動を経時的に追跡するのは、一般に困難であるため、神経回路の発達過程には、未解明な点が多い。本研究ではショウジョウバエ胚の全神経細胞の活動を Ca2+イメージング法によって経時的に可視化することで、そのシフト期間の神経活動を明らかにする。まず発達において未熟な運動を示す時期である 16h after egg lay(AEL) において神経活動を 30 分間測定した。測定したデータを元に神経活動回数を分析した結果、神経系の中で高頻度に活動している領域を見出した。次に活動していた神経細胞の形態を元に、神経細胞のデータベースを参照し、神経芽細胞の種類を特定した。その後、神経芽細胞の種類特異的に発現する GAL4 系統を用いて神経活動の測定を行ったところ、10 個体中 5 個体で高頻度に活動していることを確認した。

自由行動中の幼虫の神経活動測定手法の開発と活動解析（仲林宏斗、福益一司、能瀬聡直、高坂洋史）

ショウジョウバエ幼虫の神経活動を測定するために、一般的に解剖操作によって神経組織を露出させた試料を用いる。これによって、高分解能の測定が可能になり、神経回路の動作の詳細を明らかにすることができる。一方、自由行動中の個体においては、体性感覚入力などが保存されるため、解剖試料より豊富な神経活動が見られることが予想される。そこで、本研究では、カルシウムプローブを用いて、自由行動中の神経活動の実験系の構築を行なった。蛍光シグナルを増強させるために、プローブ高発現系統を遺伝学的に作成し、自由行動中の神経組織を追跡・蛍光測光する系を開発し、測定に適した 2 齢幼虫の神経活動を解析した。その結果、自由行動中の神経系において、腹部体節の運動伝播活動に加えて、胸部での神経活動や、異なる神経集団間の時間差などを検出することに成功した。これらの結果は、非侵襲的手法によって動物の神経回路で生起している多様な活動パターンが解析可能であることを示しており、神経回路のダイナミクスの解明に貢献するものである。

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、曽祥孫澤、高木優、能瀬聡直）

本研究では、ショウジョウバエ幼虫の中枢神経系のニューロンに対し局所神経活動亢進を行う手法を確立し、前進ぜん動運動を引き起こすニューロンを系統的に探ってきた。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。その後、活動亢進により前進ぜん動運動を誘発することが示唆されるニューロン候補の同定を目指して研究を進め、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。特に今年度は、そのうち 1 系統について、UAS-ChAT RNAi を用いて活動抑制を行うことで、摂食行動を誘発する等の結果を得た。現在、同系統に含まれるニューロン群と同じニューロン群を持つ他の Gal4 系統に対しても活動亢進・活動抑制による行動実験を行っている。

コマンドニューロンの体節特異的な軸索・樹状突起誘導メカニズム（高木優、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。我々はこれまで、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 neuron を同定していた。Wave 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 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 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 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 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。このことから、Wave は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することで、部位依存的な行動選択を媒介していることが示唆された。この仮説を確かめるため、体節特異的な軸索・樹状突起誘導のメカニズムについて探索し、その行動選択に対する寄与について調べることとした。ニューロンの軸索・樹状突起伸長は胚発生期に行われると考えられる。我々はこの時期に Wave を標識する GAL4 系統を新たに同定し、系時的にその形態を観察した。その結果、Wave は発生における異なる二つの段階で軸索・樹状突起伸長を行うことが示唆された。すなわち、まず神経系の発生初期において第一段階の神経伸長が起こり、体の前後方向に単純な神経束を形成する (このようなニューロンはパイオニアニューロンと呼ばれ、同種のものがショウジョウバエだけでなく節足動物に広く保存されている)。つぎに孵化直前において第二段階の神経伸長が起こり、Wave を特長づける軸索・樹状突起が完成する。以上のことは、パイオニアニューロンが体節特異的な発達様式によって異なる行動を制御するコマンドニューロンに成熟することを示唆しており、進化発生学的にも重要な発見へと繋がると考えられる。今後は、軸索・樹状突起誘導を行う分子を具体的に同定し、遺伝子ノックダウン等を用いて行動選択に与える影響について解析を進める予定である。

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。またこのニューロンの下流に感覚神経の投射領域に投射しているニューロンがあることもわかった。現在、これらのニューロンに特異的な GAL4 系統を作成し、これらが幼虫の行動にどのような影響を与えているかを調べている。

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）

運動神経回路を研究するためには、個々の神経細胞の活動と回路全体の活動パターンとの相関関係を解析することが重要なステップとなる。本研究では、ショウジョウバエ幼虫の大規模カルシウムイメージングデータに対して、たたみこみニューラルネットワークモデルの VGG-16 と教師なし学習を用いて、前進運動や後進運動などを反映した回路全体の活動パターンの分類を行なった。これを用いて、セロトニン 2A 受容体遺伝子制御下にある Gal4 系統の陽性細胞の神経活動と、回路全体の活動パターンとの相関を解析した。これにより、これらの神経細胞が後進運動パターンで特異的に活動することを明らかにした。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腹部神経節の尾端の運動神経回路の解析（劉英涛、能瀬聡直、高坂洋史）

尾端体節から頭端体節に伝播する筋収縮によって、ショウジョウバエ幼虫が前進ぜん動運動を行う。腹部神経節の運動ニューロンも尾端から頭端まで順番に活動する。尾端の運動神経回路が前進ぜん動を起こす役割を担っている。しかし、繰り返し構造を持つ T1-T3、A1-A7 体節と比べて、腹部神経節の尾端運動神経回路の研究は少ない。この研究の目標は、解剖学的に尾端の介在ニューロンの構造を解明することと、カルシュウムイメージングを用いて尾端の介在ニューロンと運動の関連を解析する、特に前進をトリガーするニューロンを探求することである。今年度は、まず、尾端ニューロンの全体図を把握するため、尾端ニューロンの総数を計数するとともに、尾端ニューロンの発達と解剖学的構造の文献を調べた。また、尾端特異的に発現する gal4 系統を使って、尾端ニューロンの loss of function 実験を行った。有意差がある結果が得られなかったが、さらなる条件の最適化を今後行う。今後の解剖学実験のために、Multicolor Flpout の実験と Multicolor Flpout 用の系統を作成した。また、機械学習を用いてニューロン検出を行ない、尾端ニューロンでの発現がスパー

スである janelia gal4 系統を同定した。今後は、同定した gal4 系統を使って、尾端の運動神経回路を探索する。そのため、解剖学実験とカルシュウムイメージングをすると大規模データ解析のプログラムを開発する予定である。

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侵害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んだ。まず逃避行動の定量的性質を明らかにするために、光逃避行動がマルコフ過程であるかを検討した。実験データから求めた状態遷移確率を用いて、光逃避行動のパターンを再現できたことから、この行動がマルコフ過程であることが分かった。次にこの行動に関わる神経細胞の探索を行なった。多数の Gal4 系統を用いて、様々な神経細胞の活動を亢進させたところ後進運動を誘導する細胞を同定した。この細胞の活動を阻害したところ、光逃避行動に影響が現れた。このことから、光逃避行動にこの神経細胞が必要であることが明らかになった。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Takagi S, Cocanougher BT, Niki S, Miyamoto D, Kohsaka H, Kazama H, Fetter RD, Truman JW, Zlatic M, Cardona A, *Nose A. Divergent Connectivity of Homologous Command-like Neurons Mediates Segment-Specific Touch Responses in Drosophila. Neuron 2017 Nov 17. pii: S0896-6273(17)31022-X. (2017)

(学位論文)

[2] 大浦将弥：Behavioral strategy of light-avoidance and its neural circuit implementation in Drosophila larvae（修士論文、新領域創成科学研究科）

[3] 松尾悠司：ショウジョウバエ属における幼虫運動パターンの種間比較解析（修士論文、新領域創成科学研究科）

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[4] Suguru Takagi, Benjamin T. Cocanougher, Sawako Niki, Dohjin Miyamoto, Hiroshi Kohsaka, Hokto Kazama, Richard D. Fetter, James W. Truman, Marta Zlatic, Albert Cardona, Akinao Nose.: “Divergent connectivity of homologous command-like neurons mediates segment-specific touch responses in Drosophila” 2017.10.3-7, Cold Spring Harbor Laboratry, USA

招待講演

[5] Kohsaka, H. : Ca imaging and electrophysiological recording from Drosophila larvae, Developmental Neurobiology Course 2017, 2017.7.25, 沖縄科学技術大学院大学 Okinawa Institute of Science and Technology, Okinawa

[6] Nose, A. : Circuit mechanisms of action selection in Drosophila larvae, Systems biology of the brain “Reconstructing the connectome of the fruit fly larva” : CUSO Staromics PhD-program Workshop, 2017.9.11, University of Fribourg, Switzerland

(国内会議)

一般講演

[7] 高木 優, Benjamin Cocanougher, 二木 佐和子, 宮本道人, 高坂 洋史, 風間 北斗, Richard Fetter, James Truman, Marta Zlatic, Albert Cardona, 能瀬 聡直.: ”Divergent connectivity of command-like neurons mediates segment-specific touch responses in Drosophila larvae” 2017.4.15, 第 17 回 東京大学生命科学シンポジウム, 本郷キャンパス安田講堂

[8] Akinao Nose: 体性感覚フィードバックによる発生期運動回路の編成と機能シフト, 新学術領域研究「適応回路シフト」第 5 回領域班会議, 2017.6.15, 福島県立医科大学, 福島

[9] Kohsaka, H., Xiangsunze, Z., Kawasaki, T. and Nose, A.: Identification and imaging of interneurons related to the motor control of Drosophila larvae, 新学術領域研究「適応回路シフト」第 5 回領域班会議, 2017.6.15, 福島県立医科大学（福島）

[10] Kohsaka, H., Zwart, M.F., Fushiki, A., Fetter, R. D., Truman, J. W., Cardona, A. and Nose, A.: Bidirectional feedback circuits regulate propagation of motor activity in opposite directions. 第 40 回日本神経科学大会, 2017.7.20, 幕張

[11] Shoya Ohura, Hiroshi Kohsaka, Akinao Nose : Identification of interneurons that regulate backward locomotion during light-avoidance behavior in Drosophila larvae. 第 40 回日本神経科学大会, 2017.7.20-7.23, 幕張

[12] Suguru Takagi, Benjamin T. Cocanougher, Sawako Niki, Dohjin Miyamoto, Hiroshi Kohsaka, Hokto Kazama, Richard D. Fetter, James W. Truman, Marta Zlatic, Albert Cardona, Akinao Nose “A segment-specific sensorimotor pathway mediates touch-triggered backward escape response in Drosophila larvae” 2017.7.20-23, 第 40 回日本神経科学大会, 幕張

[13] Atsuki Hiramoto, Julius Jonaitis, Sawako Niki, Dohjin Miyamoto, Richard Fetter, Albert Cardona, Stefan Pulver, Akinao Nose.: Identification of neuronal circuitry that regulate backward escape behavior in Drosophila larvae 第 4 0 回日本神経科学大会 2017.7.20-23、幕張

[14] Shoya Ohura, Hiroshi Kohsaka, Akinao Nose : 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. 第 40 回日本分子生物学会年会, 2017.12.6-12.9, 神戸

[15] 松尾悠司、能瀬聡直、高坂洋史 : ショウジョウバエ近縁種における幼虫行動特性の比較解析、第 40 回日本分子生物学会、2017.12.6-12.9、神戸

[16] Xiangsunze Zeng, Tappei Kawasaki, Akinao Nose.: Sensory feedback regulates the development of locomotor circuits in Drosophila embryos. 第 40 回日本分子生物学会, 2017.12.06-12.09, 神戸

[17] Xiangsunze Zeng, Tappei Kawasaki, Akinao Nose.: Sensory feedback regulates the development of locomotor circuits in Drosophila embryos. Behavioral adaptation and functional recovery from pathological states,2017.12.18-12.19, 東京

[18] Xiangsunze Zeng, Tappei Kawasaki, Akinao Nose.: Sensory feedback regulates the development of locomotor circuits in Drosophila embryos. 次世代脳プロジェクト冬のシンポジウム,2017.12.20-12.22, 東京

招待講演

[19] Nose, A. : Optophysiological and connectome analyses of the neural circuits regulating escape behaviors in Drosophila larvae 日本比較生理生化学会第 39 回福岡大会, 2017.11.25, 福岡大学, 福岡

(講義等)

[20] Kohsaka, H. and Morimoto, T., Ca imaging and electrophysiological recording: Lab course in Developmental Neurobiology Course 2017, 沖縄科学技術大学院大学 Okinawa Institute of Science and Technology 2017.7.26-30, Okinawa

7.2 樋口研究室

7.2.1 はじめに

生物は、分子、細胞、動物個体といった構造や機能の階層性を持っている。個体や細胞の機能は，もとをただせば分子の機能であるわけであるが、生体分子の多さや複雑さゆえに、分子機能から個体や細胞機能を直接導くことは困難であるのが現状である。我々研究室では、この溝を埋めるために、まず分子の機能を詳しく理解するために、1 分子の力や変位の計測を行い，得られた結果から分子機能をできるだけ仮説を少なくして理解する研究を行った。また、細胞と分子との関係を結ぶために、分子の機能があらわになるような細胞の輸送機能や運動機能を研究した。個体機能は、分子と結ぶことが困難であるが、これを可能にすべく、マウス個体内の細胞や分子の観測を行った.

7.2.2 二足歩行運動を行う分子モーターの統一モデル

細胞内の物質輸送や細胞分裂を担うモータータンパク質であるキネシン，ミオシン V，ダイニンは一定の歩幅で長距離を解離することなく歩行を行う．これらモーターは、前進運動だけでなく、後退運動も行う。これら三種類のモータータンパク質の運動特性を統一的に記述するために運動を単純化して、2 つの状態を遷移する数理モデルを提案した．モーターはレールの上をその周期に等しい歩幅で移動し、両足結合状態から後ろ足がレールから解離すると片足状態になり，そこからレール (微小管やアクチン線維) の前方に着地して前方ステップを行い，両足結合状態に戻る．両足結合状態から前足が解離すると別の片足状態を経由して、レール後方に着地して後方ステップを行う．モータータンパク質にはレールに沿って外力が作用している場合を考える．ステップから次のステップまでの時間（dwell time）や後方ステップの頻度が負荷に依存することが実験的に知られていることから、本研究では，両足状態からの前方および後方への遷移の速度が負荷に対して指数関数的に依存すると仮定を行った。計算の結果、単位時間あたりの後方ステップ数と前方ステップ数の比 r と平均 dwell time の負荷依存性を 2 つの指数の和あるいは定数を加えた割り算で表すことができた。このような、簡単な式で表すことができたことによって、今後細胞内で多分子のモータータンパク質が相互作用する場合の運動をシミュレーションすることが可能となった。

7.2.3 広い負荷領域におけるキネシン 1 分子のステップ運動

現在、ミオシン・ダイニン・キネシン 3 つの分子モーターが力を受けているときの運動を統一的に記述できる理論研究成果が論文投稿中である。この理論研究では、後ろ向きの負荷でキネシンの反対方向の運動 (backward step) が加速すること、前向きの負荷をかけた状態でも稀に backward step すること、の 2 つの現象の存在を予測しているのだが、キネシンに関する実験データはこれまで存在しなかった。また、細胞内でキネシンが機能するときは 1 分子ではなく複数の分子が集団になって働いていると考えられており、後ろ向き・前向きに大きな負荷がかかると考えられる。この集団の運動を理解するためにはキネシンの前方向の運動 (forward step)、後ろ方向の運動 (backward step)、微小管からの解離 (detachment) に関する dwell time（キネシンのステップとステップの間の時間）の負荷依存性を知らなければならないのだが、これまでの研究では、± 15pN という狭い負荷領域でしか実験が行われず、また解離反応については定量的な評価が行われてこなかった。そこで、広い負荷の領域で 1 分子の運動を観察することで数理モデルの検証を行うとともに、キネシンの解離反応を含めた運動モデルの構築することを目的として研究を行った。上で述べた理論が予測するの現

象に関して、キネシンの運動はおおむね一致することが検証できた。しかし、先行研究では前向きの負荷 (マイナス負荷) では、dwell time はあまり負荷に依存せず一定であるとされてきたのだが、本研究の結果、指数関数的に減少することが明らかとなった。また、-3pN で backward step を検出し、dwell time を定量的に解析したのは本研究が初めてである。後ろ向きに負荷がかかると指数関数的に dwell time は長くなることでキネシンの運動は遅くなり、10pN を超えると forward step は観察されなくなった。さらに大きな負荷をかけると、後ろ方向の運動速度が指数関数的に速くなることがわかった。この結果は数理モデルに一致した。また、高精度な顕微鏡を作製したことで、これまで観察されていなかった 1ms 以下の非常に速い 8nm の backward step を観察することができた。この速いステップは backward step の 30%を占めるのだが、先行研究では観察されていない。先行研究では装置の時空間分解能が足りずに 16nm のステップとして観察されてきたものであると考えられる。本研究で新しく得られた結果を表現できるように先行研究のモデルを修正することで、キネシンの運動における律速反応の負荷依存性を解離反応も含めてすべて求めることができた。

7.2.4 細胞質ダイニンのリンカーの運動

細胞質ダイニンは、ATP 加水分解エネルギーを利用して、微小管のマイナス端方向に運動する分子モーターである。ダイニン頭部の linker 部位の大きなスイング運動は、パワーストロークと呼ばれ、歩行運動に関わっていると考えられてきた。これまでの研究では、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と結合時間を、光ピンセット法を用いて測定し、パワーストロークに伴いダイニンが微小管を動かす距離が 8.3 nm であることを明らかにした。一方、低濃度 ATP ではダイニンが微小管を動かす距離が小さかった。今年度、微小管結合時間をさらに解析し、提唱したモデルに基づいて主要な反応速度を算出した。その結果、ATP 濃度が低くなるにつれ、非ヌクレオチド状態でダイニンが微小管と結合し、変位を伴わずに微小管からすぐに解離する割合が増加するというモデルを提唱した。また、単量体ダイニンが ATP 結合に伴い微小管から解離する速度は、これまで提唱されてきた値と比較して遅かった。微小管から解離したダイニンは ATP 加水分解し、パワーストローク前の構造をとる。パワーストローク前の構造状態で微小管に結合すると、パワーストロークや ATP 加水分解産物の放出を伴って、パワーストローク後の状態に至る。この反応過程は律速であり、反応速度は 12/s と算出された。この値は、他の実験から算出された、単量体ダイニンが ATP 加水分解 1 サイクルにかかる速度 9/s に匹敵した。さらに、二足歩行運動する二量体ダイニンを用いて、微小管結合時間を同様に測定解析した結果、最大力が 1pN 以下しか出ないという性質はこれまでの報告と一致し、微小管から解離する速度は 23/s と算出された。この速度値は、片方の頭部が ATP 加水分解する速度のほぼ 2 倍であった。以上のことから、二量体ダイニンはパワーストローク距離 8.3 nm を伴って歩幅 8 nm または 16 nm のステップを踏み、1 ステップ踏むごとに ATP 加水分解 1 サイクルとカップリングしている歩行モデルを説明した。さらに、哺乳類ダイニンの化学力学反応や特性について、1 分子レベルで初めて統括的に説明することができた。

7.2.5 ミオシン分子運動を超解像法を用いて検出する試み

骨格筋ミオシンフィラメントがアクチンと相互作用する際に発生する力をアクチンに結合させたビーズを光ピンセットで捕捉することにより計測した．またミオシンとアクチンの相互作用サイクルにおける力学・化学状態を定義し，実験で観測される力波形を再現するシミューレーションモデルを構築した．こうした実験とモデルの詳細な解析から，ミオシン分子間には外部負荷の増加に伴って各分子間の力発生が同調してくる協同現象が起きる可能性が示唆された．しかし，これまでの実験アプローチでは，各分子の動態を直接可視化することはできないため，協同性を実験的に直接検証することは不可能である．さらにミオシン分子は，ミオシンフィラメンント上の 300-400 nm 程度の限られた空間内に分布するため，このような微小空間内の複数分子を可視化するためには，回折限界を超えた空間分解能を必要とする．そこで，上田正仁研究室が開発された超改造イメージング法を用いて，回折限界内に位置するミオシン複数分子の動態をとらえるための予備実験を行った．距離 128 nm の間隔でビオチンタグが挿入された DNA オリガミ上に，アビジン化金ナノ粒子（直径 40 nm）を標識し，複数の粒子が結合した DNA オリガミにおいて金ナノ粒子の散乱像を高速カメラで撮影した（10000 フレーム/秒）．この散乱像において超解像イメージング法を用いて粒子の数および位置を推定した．これらの結果から 2 粒子間の距離を計算したとろ，平均 123 nm となり理論値 128nm に近い値となった．以上の結果からこの手法の有用性が示され，回折限界内に位置するミオシン複数分子の動態を可視化する高速超解像イメージング法が確立された．

7.2.6 心筋細胞の昇温誘起の高速サルコメア振動の観察と運動のシュミレーション

昇温誘起の高速サルコメア振動 (HSOs: Hyperthermal Sarcomeric Oscillations, Shintani et al. 2015) の観察時間分解能をあげることで、生きた心筋細胞の内部の筋収縮ユニット (サルコメア) の nm 精度かつ ms の分解能でサルコメア運動の解析が可能となった。結果、ラット心筋細胞において、HSOs 時のサルコメアは、カルシウム濃度変化に依存する長さ変化を行ないつつ、その数倍の早さである数 Hz の HSOs

振動を同時に行うこと、その HSOs の振動は、振幅や振動の収縮・弛緩の時間比率はカルシウム濃度変化に依存して変化するが、振動周期は一定の値に保つことを明らかにすることが出来た。ミオシンの化学力学状態を考慮したサルコメア集団のシミュレーションモデルを用いてこの現象の再現を試みたところ、ミオシン分子に、パワーストローク後、ADP が解離していない状態でミオシンアームに伸長的なひずみがあると、他の状態に移りにくくするという仮定を置くと、現象の再現が出来るということが分かった。この仮定は、ミオシンアームが伸びる前に状態遷移が出来たか否かで、ミオシン集団を 2 種類の役割に分離する効果をもたらしており、ミオシンアームが伸びているか否かなどの状況に応じて、ミオシン分子が異なる仕事 (パワーストロークサイクルをまわすか、アクチンフィラメントとの結合を支える支えになるか) を行なえる多機能性を備えており、その性質が上記の巧妙なサルコメアの振る舞いを実現させているのではないかという仮説の提起である。なお、この仮定を置いたミオシンによる心拍のシミュレーションモデルは、従来モデルよりも 13%ほどエネルギー消費効率が良くなっている。

7.2.7 がん細胞の非侵襲 in vivo イメージングおよび免疫不全トランスジェニックマウスの作出

これまで、細胞レベルでの in vivo イメージング研究において、多くの場合、イメージング時にがん組織を曝露させるために、ゼノグラフトモデルの皮膚を切開し、出血を防ぐために血管を結紮する行為が施されていた。つまり、虚血状態のがん組織内のがん細胞をイメージングしている懸念を払拭できないでいた。そこで、がん細胞の真の特性を明らかにするためには、切開による免疫際反応の亢進や結紮による虚血状態が生じていない、平常状態のがん組織内の細胞を in vivo イメージングするための非侵襲 in vivo イメージング技術の開発が必須であると考えた。我々は、ヒトがん細胞の非侵襲 in vivo イメージングを行うために、厚さが約 150 μ m と薄いマウス耳介に着目した。つまり、レーザーが透過するほど薄い組織内にがん組織を作製することができれば、皮膚を切開する必要なく、非侵襲で in vivo イメージングを行えると考えた。そこで、免疫不全マウスの耳介に蛍光タンパク質が発現するヒト乳がん細胞である MDA-MB-321 および KPL-4 細胞を接種し、ヒトがん組織を耳介内に持つゼノグラフトモデルの作出に成功した。さらに、スピニングディスク共焦点顕微鏡 (CSU) および EMCCD カメラにより、マウス耳介内の GFP 発現ヒトがん細胞を高時間空間分解能（100 ms, 400 nm）にて非侵襲 in vivo イメージングを行うことができた。　一方、がんの基礎研究において、多種生物の細胞を移植しても拒絶反応が生じない免疫不全マウスがゼノグラフトモデルとして広く利用されている。また、臓器や器官に GFP などの蛍光タンパクが発現するトランスジェニックマウスが作出され生命科学研究に応用されている。しかし、これのトランスジェニックマウスの多くが免疫不全マウスではないことから、ヒト細胞もしくは組織を移植する研究においては免疫機能が働き拒絶反応が生じるため利用することができない。そこで、短期間で免疫不全マウスを作製することのできるゲノム編集技術を用い、がん研究に有用な免疫不全トランスジェニックマウスを作出する開発研究を行った。がん発生および転移に密接にかかわる血管をがん細胞と同時に in vivo イメージングできるように、血管内皮細胞に蛍光タンパク質（GFP）が発現するマウス（Tg (TIE2GFP) 287Sato/J）に免疫不全能を獲得するようゲノム編集を施した。ターゲットとした遺伝子は免疫不全マウス（SCID マウス）に特徴づけられている 16 番染色体上の T 細胞と B 細胞の活性に関係する Prkdc 遺伝子とし、CRISPR/Cas9 を用いて構築した RNA を Tg マウスの前核期の受精卵に注入し、レシピエント雌マウスの子宮に移植し産仔を得た。この免疫機能のノックアウトマウスはがん発生・転移と血管との関係を明らかにするために応用可能となる新たながん非侵襲 in vivo イメージングのためのモデル動物となりうるであろう。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Motoshi Kaya, Yoshiaki Tani, Takumi Washio, Toshiaki Hisada and Hideo Higuchi*. Coordinated force generation of skeletal myosins in myofilaments through motor coupling. Nature Communications 8,16036 (2017)

[2] Takumi Washio, Toshiaki Hisada, Seine A. Shintani and Hideo Higuchi. Analysis of spontaneous oscillations for a three state power stroke model. Physical Review E. 95, 022411(2017).

[3] Seohyun Lee, Hyuno Kim, Hideo Higuchi. Focus Stabilization by Axial Position Feedback in Biomedical Imaging Microscopy IEEE Sensors Applications Symposium (2018) pp. 309-314 (2018)

[4] Eng Kuan Moo, Daniel R.Peterson, Timothy R. Leonard, Motoshi Kaya and Walter Herzog (2017) In vivo muscle force and muscle power during near-maximal frog jumps. PLoS One. Mar 10;12(3): e0173415 (2017)

(著書，総説，解説)

[5] H. Higuchi and C. Shingyoji. Measuring the Motile Properties of Single Dynein Molecules. Chaper 5 In Handbook of dynein 2nd. Hirose and Amos eds. Pan Stanford Publishing (2018) In press

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[6] Seohyun Lee, Motoshi Kaya, Kohsuke Gonda, Hideo Higuchi. Trafficking of Endocytic Vesicles on Cytoskeleton in LiveCancer Cells. A3 Foresight 9th Meeting. Yokohama, Japan (2017.9.27-30)

[7] Yongtae Hwang, Hideo Higuchi. Motoshi Kaya. Property of Cardiac Myosin Assemble Measured by Optical Trapping. A3 Foresight 9th Meeting. Yokohama, Japan (2017.9.27-30)

[8] Yoshimi Kinoshita, Hideo Higuchi. Step sizes and rate constants of single-headed dynein measured by optical tweezers, International Workshop Dynein 2017, International Conference Center, Awaji Yumebutai （2017.10.29 11.1）

[9] Chikako Shingyoji, Hiroshi Yoke,Yasuhide Izawa, Izumi Nakano,Yuichi Inoue, Hideo Higuchi. Mechanical activity of dynein and its dynamical regulation underlying oscillatory movement of sperm flagella. International Workshop Dynein 2017, International Conference Center, Awaji Yumebutai （2017.10.29-11.1）

[10] Morihito Sakuma,Yuichi Kondo and Hideo Higuchi. Damage of cancer cells evaluated by intensity fluctuation of images under phase contrast microscope. 11th International Symposium on Nanomedicine. University of Tohoku. (2017. 12.13-15)

一般講演

[11] Keiko Hirose, Rofia Boudria,Shimaa Abdelaleem,Yuichi Kondo,Kangmin Yan, Hideo Higuchi,Hisashi Tadakuma. Analysis of the dynein-microtubule complex cross-bridged with DNA structures, International Workshop Dynein 2017, International Conference Center, Awaji Yumebutai （2017.10.29-11.1）

[12] Seohyun Lee, Hyuno Kim, Hideo Higuchi. Focus Stabilization by Axial Position Feedback in Biomedical Imaging Microscopy. IEEE Sensors Applications Symposium, Seoul, South Korea (2018. 3.12-14)

(国内会議)

一般講演

[13] 黄 勇太，樋口秀男，茅 元司, ナノ粒子の光ピンセット法を用いた心筋ミオシンの集団的性質の解明, ナノ学会　第 15 回大会, 北海道 (2017.5.10-5.12)

[14] 佐野雄図，樋口秀男, 生体ゲル内ナノ粒子の移動量に基づく細胞浸潤時の力場計測, ナノ学会　第 15 回大会, 北海道 (2017.5.10 5.12)

[15] 木下 慶美, 神原 丈敏，西川 香里, 茅 元司，樋口 秀男「細胞質ダイニン単頭でのステップサイズの解析」,『第 7 回分子モーター討論会』，東京 (2017, 7.19-20)

[16] 黄 勇太, 樋口秀男, 茅 元司、心筋ミオシンの集団的性質の解明　第 7 回分子モーター討論会, 東京 (2017.7.19-20)

[17] Yongtae Hwang,Hideo Higuchi,Motoshi Kaya,spontaneous oscillation of cardiac myosins. The 55th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan(2017.9.19-9.21)

[18] Seohyun Lee , Kohsuke Gonda , Motoshi Kaya , Hideo Higuchi,Trafficking of endocytic vesicles in live cancer cells. The 55th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan(2017.9.19-9.21)

[19] Seine Shintani, Takumi Washio, Hideo Higuch,Constant beating frequency of sarcomeres in cardiomyocytes regulated ingeniously by collective motion of myosin molecules. The 55th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan(2017.9.19-9.21)

[20] Motoshi Kaya , Hideo Higuchi,Understanding of cooperative force generation among skeletal myosins based on direct observation of individual myosin dynamics. The 55th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan(2017.9.19-9.21)

[21] Yoshimi Kinoshita , Taketoshi Kambara, Kaori Nishikawa, Motoshi Kaya, Hideo Higuchi. The step size and microtubule-binding time of single-headed dynein. The 55th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan(2017.9.19-9.21)

[22] 喜多清, 樋口秀男: マウス耳介を用いたがん細胞および血管の非侵襲 in vivo イメージング法の確立. 2017 年度生命科学系学会合同年次大会, 神戸,(2017.12.6-9)

[23] 木下 慶美, 神原 丈敏，西川 香里, 茅 元司，樋口 秀男: 「細胞質ダイニン単頭 1 分子の変位と速度解析」2017 年度生命科学系学会合同年次大会, 2P-0286, 神戸 (2017, 12. 6-9)

[24] 新谷正嶺, 鷲尾巧, 樋口秀男, 心筋細胞に備わった昇温誘起の収縮振動はミオシンの巧みな集団運動で応答性を保ち振動周期を一定に調整する, 2017 年度生命科学系学会合同年次大会, 神戸 (2017. 12. 7)

[25] Seohyun Lee，Motoshi Kaya，Kohsuke Gonda，Hideo Higuchi　細胞内小胞体の特徴的な回転運動の観測と解明　生体運動研究合同班会議 法政大学（2018.1.5-7）

[26] 佐々木　一夫，茅　元司，樋口　秀男　二足歩行型分子モーターの統一モデル　生体運動研究合同班会議 法政大学（2018.1.5-7）

[27] 近藤雄一，佐々木　一夫，樋口秀男　高負荷におけるキネシン 1 分子のステップ運動 生体運動研究合同班会議 法政大学（2018.1.5-7）

[28] 新谷正嶺, 鷲尾巧, 樋口秀男, 実験とシミュレーションの比較から考察する温めた心筋細胞に生じる収縮リズム恒常性の役割, 2018 年　生体運動研究合同班会議, 東京 (2018.1.6)

[29] 佐々木一夫, 茅元司, 樋口秀男 二足歩行型分子モーターの統一モデル 第 73 回日本物理学会　春季大会　野田市　東京理科大（2018 .3.22-25）

[30] 近藤雄一，佐々木　一夫，樋口秀男　高負荷におけるキネシン 1 分子のステップ運動　第 73 回日本物理学会　春季大会　野田市　東京理科大（2018 .3.22-25）

[31] 黄勇太, 茅元司, 樋口秀男　心筋ミオシンの集団的性質の解明　第 73 回日本物理学会　春季大会　野田市　東京理科大（2018 .3.22-25）

＜受賞＞

[32] Nakagome K, Sato K, Shintani SA, Ishiwata S., The Editorial office of Biophysics and Physicobiology 4th Biophysics and Physicobiology Editors' Choice Award

＜社会活動＞

[33] 樋口秀男，喜多清，Hwang Yongtae，Seohyun Lee. 沼津西高校生に対する模擬講義「がんを知り，がんを治す」および実験の実演 （2017.10.16）

[34] 喜多清 : 茨城県つくばみらい市市立小絹小学校 5 年生対象の出前講義 研究の仕事とは」～最先端 がん細胞をナノサイズで観察する研究～（2017.7.4）

[35] 茅元司 日本生物物理学会主催の講師派遣サポート事業の一環として三重県立四日市高校生に対する講義「筋肉の収縮を人工的に作ろう！」および実演（2018. 3. 28）

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。私たちは、細胞の中で生体分子やその集合体がどのような構造をとり、どのような動態を示し、それによってどのような機能が発現されるかを、生きた細胞の中で生体分子を直接見て・測って・操作することを通じて理解したいと考えている。そのために、当研究室では、主に生きた細胞の中を可視光を用いて観察計測操作するための技術開発と、これを用いた細胞生物学・生物物理学研究を並行して進めている。

7.3.1 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 500 nm 程度であるため、光学顕微鏡の分解能の限界は 200 nm 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 100 nm 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 μm/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 100 nm 動いてしまう。従って、回折限界の 2 倍程度の 100 nm の空間分解能で観察する場合でも、画像取得時間は 20 ms 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 [2, 3, 11, 10]。

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 10 ms)、空間分解能 100 nm で生きた細胞の中での微細構造の動態観察に成功した [1, 4, 12, 9, 16, 17, 26]。

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。理論的には、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が示されており (2016 年度特別実験 II)[31]、これを実装することで高分解能化することが今後の課題である。

7.3.2 細胞内一分子計測による反応速度解析

細胞内は、タンパク質分子が満員電車並みに密集した混雑状態であると考えられている。水分子の 70%がタンパク質表面に束縛されており、自由水は 30%程度にすぎない。従って、細胞の中で機能しているタンパク質分子は、希薄溶液とみなすことが出来る従来の in vitro(試験管内) での計測とは大きく異なる状況にあると予想される。

たとえば、細胞の中では直径 100-1000 nm の小胞が速度 1000 nm/s 以上の速度で輸送されている。タンパク質の大きさは 10 nm 程度であるが、これを人間の身長程度 (1 m) に拡大して考えると、小胞の大きさは 10-100 m、輸送速度は 100 m/s=360 km/hr 以上という計算になる。満員電車の中を気球を背負って新幹線の速度で走り抜けると考えると、極めて非直感的な状況であることが判るだろう。

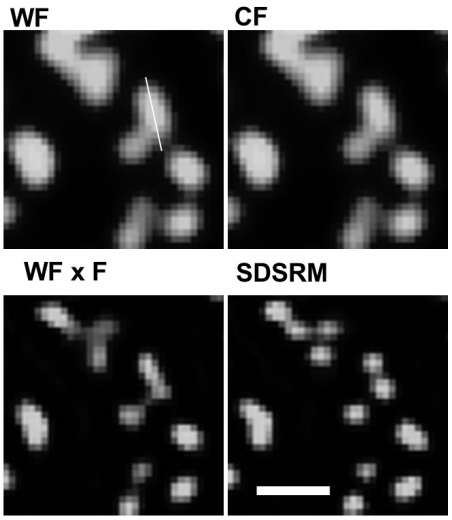


図 7.3.1: 100 nm 径の蛍光ビーズを用いた分解能の評価。上段 WF, CF はそれぞれ従来の蛍光顕微鏡像、共焦点顕微鏡像。下段左側 WFxF は、蛍光顕微鏡像をデコンボリューション法により画像処理したもの。下段右側 SDSRM が私たちが開発した超解像顕微鏡による像。スケールバー：500 nm [4]。

そこで、私たちは、生きた細胞の中で、タンパク質分子の 1 個 1 個が機能する様子を直接観察し、in vitro での反応と比較する必要があると考え、生きた細胞の中でタンパク質分子の 1 個 1 個を高速に追跡できる顕微鏡を開発している。蛍光分子で標識された生体分子を 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 [14]。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、広視野高速一分子計測が実現された。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を初めて示すことが出来た [16, 17, 21, 22, 25, 27, 32]。さらに、同じ実験系について in vitro での計測を行い、細胞内での結合速度定数が細胞内で in vitro の 4〜5 倍になることが示された。不思議なことに、in vitro の実験系で擬似的に細胞内の混雑環境を再現しても、反応速度の上昇は見られず、“生きた” 細胞の中であることが重要である可能性が示唆される。

7.3.3 核内微細構造の超解像・一分子イメージング

核の中のゲノム DNA に遺伝情報が記録されており、これが複製されて子孫に受け継がれることが遺伝であり、その情報が RNA に転写され、タンパク質へと翻訳されることで遺伝子の機能が発現するというのが、セントラルドグマであり、現代の生物学の基本となる概念である。ヒトの細胞の核は、直径 10μm 程度である。そこに、長さ 2 m の DNA が 3 次元的に折り畳まれて格納されている。さらに、DNA から転写された RNA や、DNA の折り畳みや転写およびその調節に必要なタンパク質などが存在するため、細胞の核の中は細胞質以上に混雑していると予想される。そのような混雑環境の中で、DNA を複製したり、転写したりする反応はどのように行われているのだろうか。

これに対して、私たちは、超解像顕微鏡および一分子計測を駆使し、核の中でゲノム DNA がどのように折り畳まれ、その情報がどのように読み出されているかを直接観察することを試みている。20 nm 分解能でのゲノム DNA の折り畳み構造や、その動態の観察に成功し [8]、さらに転写やその調節の一分子計測に取り組んでいる [18, 23, 21, 29]。

＜受賞＞

[1] 岡田康志、文部科学大臣表彰、文部科学省、2017 年 4 月 19 日。

＜報文＞

(原著論文)

[2] Uno S et al. A spontaneously blinking fluorophore based on intramolecular spirocyclization for live-cell super-resolution imaging. Nat Chem 6: 681-689, 2014

[3] 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

[4] Hayashi S, Okada Y. Ultrafast superresolution fluorescence imaging with spinning disk confocal microscope optics. Mol. Biol. Cell., 26:1743-51, 2015

[5] Minegishi K, et al. A Wnt5 Activity Asymmetry and Intercellular Signaling via PCP Proteins Polarize Node Cells for Left-Right Symmetry Breaking. Dev Cell. 40:439-452, 2017

[6] Chiba K, et al. Phosphorylation of KLC1 modifies interaction with JIP1 and abolishes the enhanced fast velocity of APP transport by kinesin-1. Mol Biol Cell, 28:3857-3869, 2017

[7] Ueno A, et al. Lrit1, a Retinal Transmembrane Protein, Regulates Selective Synapse Formation in Cone Photoreceptor Cells and Visual Acuity. Cell Rep. 22:3548-3561, 2018

[8] Nozaki T, et al. Dynamic Organization of Chromatin Domains Revealed by Super-Resolution Live-Cell Imaging. Mol Cell. 67:282-293, 2017

(国内雑誌)

[9] 岡田康志、ライブイメージングのための高速超解像蛍光顕微鏡法、O plus E、39(2): 174-178, 2017

[10] 岡田康志、超解像顕微鏡によるライブイメージング、生体の科学、68(5): 378-379, 2017

[11] 岡田康志、超解像顕微鏡で観える生物現象、医学の歩み 262(5): 573-579, 2017

[12] 岡田康志、共焦点顕微鏡の光学系を用いた超解像顕微鏡法、顕微鏡 52(2):62-66, 2017

[13] 岡田康志、超解像顕微鏡研究の最前線、顕微鏡 52(2):61, 2017

(著書)

[14] 岡田康志、超解像・一分子イメージングによる分子動態の計測、森泰生、尾藤晴彦編、脳神経化学、第 30 章、319 - 329、化学同人、2018

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[15] Yasushi Okada, Current limitations in super-resolution fluorescence microscopy for biological specimens: how deep can we go from the cover glass?, Biomedical Imaging and Sensing Conference 2017 (BISC2017), 横浜、2017 年 4 月 20 日

[16] Yasushi Okada, Development and application of high-speed, high-resolution quantitative live cell imaging, The 23rd iCeMS International Symposium, 京大、2017 年 5 月 30 日

[17] Yasushi Okada, High-speed high-resolution live cell imaging with confocal microscope optics, The 3rd East Asia Microscope Conference (EAMC3)、Busan, 韓国、2017 年 11 月 8 日

[18] Yasushi Okada, Imaging technologies for single cell analysis, Human Cell Atlas Asia Meeting, OIST、2017 年 11 月 30 日

[19] Yasushi Okada、Symposium organizer, Beyond Imaging: new challenges in cell biology, ConBio2017, 神戸国際会議場、2017 年 12 月 8 日

[20] Yasushi Okada, Toward the next generation live cell imaging, ConBio2017, 神戸国際会議場、2017 年 12 月 8 日

[21] Yasushi Okada, Development and application of high-speed super-resolution and single-molecule microscopes for nanomedicine, International Symposium on Nanomedicine (ISNM2017)、東北大学、2017 年 12 月 13 日

[22] Yasushi Okada, Development and application of high-speed super-resolution and single-molecule imaging for cell biology studies, SPIE BioS、Moscone convention center (San Francisco)、2018 年 1 月 29 日

[23] Yasushi Okada, Live cell imaging technologies for single-cell analysis How can imaging meets genomics , Human Genome Meeting 2018、パシフィコ横浜 2018 年 3 月 13 日

(国内会議)

招待講演

[24] 岡田康志, 超解像イメージング技術の進歩と細胞生物学への応用, 第 69 回日本細胞生物学会ライカランチョンセミナー、仙台国際センター 2017 年 6 月 14 日

[25] Yasushi Okada, The next generation in cello measurement by imaging, The 69th JSCB annual meeting, President’s symposium, 仙台、2017 年 6 月 14 日

[26] 岡田康志, 共焦点光学系を利用した超解像顕微鏡の原理と実装, 日本表面科学会実用顕微評価技術セミナー 2017、小柴ホール (東大)、2017 年 6 月 16 日

[27] 岡田康志, 4D 細胞計測の次世代化を目指して：見て、測って、操作する, 4D 細胞計測公開シンポジウム、理研 (和光)、2017 年 6 月 28 日が拓く新しい生命計測データ解析、熊本大学、2017 年 9 月 20 日

[28] 岡田康志, 低分子蛍光化合物を用いた超解像バイオイメージング, 第 11 回バイオ関連化学シンポジウム、五稜化薬ランチセミナー、東京大学、2017 年 9 月 7 日

[29] Yasushi Okada, Imaging Technologies for Single Cell Analysis, Single Cell Science Symposium、理研 (横浜)、2017 年 7 月 7 日

[30] 岡田康志, ライブセルイメージングにたいせつなこと, 第 28 回細胞生物学ワークショップ、通信技術総合研究所 (神戸)、2017 年 7 月 31 日

[31] 岡田康志, Super-resolution imaging by statistical image data processing, 第 55 回日本生物物理学会年会シンポジウム、データ駆動科学

[32] 岡田康志, 超解像顕微鏡と一分子イメージングの高速化と生細胞観察への応用, 日本物理学会第 73 回年次大会シンポジウム、東京理科大、2018 年 3 月 24 日

(セミナー)

[33] Yasushi Okada, New technologies for live cell imaging: microscopes, analyses and probes, UCSF、2018 年 1 月 31 日

7.4 古澤研究室

生物システムは、様々な環境変化や内部状態の揺らぎの下で機能し続けられる頑強性（ロバストネス）を持つ一方で、 環境変化などに対して柔軟に内部状態を変化させる可塑性を持つ。 このロバストネスと

可塑性が両立できるという性質は、生物システムと人工システムの本質的な違いであるが、どのようにして複雑な化学反応のネットワークがその両立を可能とするか、そのメカニズムの理解は進んでいない。一方で、大規模な生物実験データが取得できるようになり、そうしたデータに基づいてシステムの状態遷移やそのロバストネスを議論できるようになりつつある。我々の研究室では、分子から生態系といった様々な階層における生物システムの振る舞いに関して、その状態のロバストネスと可塑性がどのような性質を持つか、理論研究と実験研究の双方からの理解を目指している。

7.4.1 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。これまでに、定常的に増殖する細胞系では、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理論的に予測し、細胞シミュレーションと微生物の進化実験によってその予測が成り立つことを示してきた。

この理論的予測は、環境変動が十分に小さいと仮定し、線形応答のみを考慮する解析であったが、実験データを見ると、増殖速度が大きく減少するような環境変動に対しても成り立つことが見出されている。そこで、この線形応答で記述できる振る舞いがどのような範囲で成り立つかを解析するために、細胞モデルの進化シミュレーションを行ったところ、表現型の変化が、進化過程を経ることにより低次元の状態空間に拘束されることを見出した。これは適応度に関わる表現型は摂動に対して頑健であるため、状態空間の多次元から吸引されること、一方で進化するには変化しやすさが必要となるためその低次元方向でのみ吸引が弱い（固有値が 0 に近い）という理論を定式化して説明された。この理論により実験とシミュレーションで見出された線形適応関係が説明された [12, 13]。

7.4.2 自動培養システムを用いた進化実験

独自に開発したラボオートメーションを用いた進化実験システムを用い、複数環境・複数系列での大腸菌進化実験を行った。これまでに、細胞壁合成やタンパク質合成などの阻害剤や、酸・アルカリ・重金属など 95 種類のストレス環境を付与した環境下での植え継ぎ培養による進化実験を完了した。その結果、87 種類の環境において耐性能の有意な上昇が見られた。それら進化実験によって得られたストレス耐性株について、マイクロアレイを用いた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った。さらに、一つのストレス環境への耐性獲得が、他のストレス環境への耐性をどのように変化させるかを、約 2000 通りの環境ペアについて定量した。

こうして得られた表現型・遺伝子型のデータを統合し、適応進化のダイナミクスを記述するマクロ状態量の抽出を試みた。その試みの一つとして、Partial Least Square Regression（PLS-R）を用い、数千の自由度を持つ遺伝子発現プロファイルに基づいて、様々なストレス環境に対する耐性の予測モデルを構築したところ、9 程度の因子（自由度）に射影された遺伝子発現量によってストレス耐性が定量的に予測出来ることを見出した。この結果は、様々なストレス環境への進化ダイナミクスが、比較的低次元の表現型変化によって記述可能であることを示唆している。また、それら少数の因子について、どのような細胞内の機能カテゴリと関係しているかを解析したところ、ストレス応答・増殖活性・アミノ酸合成といった機能と関係していることが示された。こうした結果は、様々なストレス環境に対する表現型進化が、少数のマクロ状態量によって記述され得ることを示している。表現型の変化が少数の状態量によって記述される一方で、ゲノム配列の変化は多様であり、表現型の変化との相関は必ずしも強くはなかった。この結果から、同じような表現型の変化が様々な遺伝子変異によって生じるか、あるいは遺伝子変異に依存しないエピジェネティックな機構が、ストレス耐性をもたらす表現型変化に寄与していることが示唆された。

7.4.3 微生物の進化的拘束の実験検証

タンパク質の進化速度を何が決めているかという問題は、進化生物学の重要な問題として残されている。それに対して近年の比較ゲノミクス及び網羅的発現解析の研究から、タンパク質の進化速度が、発現量（特に転写量）による制約を受けていることが提唱されている。この制約は、転写量の大きい遺伝子ほど進化速度が遅いというものであり、多くの生物に当てはまると考えられている。しかしながら、この制約は過去に生じた進化から見出されたものであり、これから生じる進化をどの程度規定するかについてはよくわかっていない。単なる過去の制約ではなく、進化の予測指標になりうるか否かを問うため、本研究では、この進化的制約を実験進化によって確かめることを目的とした。モデル実験として、紫外線照射を自動化した培養装置をもちいて大腸菌を 2 年間継代培養した。今年度はゲノムシーケンシングを行い、どのような変異がどれくらい蓄積しているかについての解析を行った。第一に、紫外線は変異性が高く、照射することで、野生型大腸菌の自然突然変異率の数百倍の頻度で変異を誘発できることが分かった [8]。そして、2 年間の継代培養によって、およそ数千個の点変異がゲノムに蓄積したことが分かった [35]。第二に、変異が生じた遺伝子の性質を調べた結果、発現量が低い遺伝子ほど非同義置換変

異が多く蓄積する傾向にあることが明らかとなった [36, 37]。第三に、一方で、近縁種とのアミノ酸配列の違いは、それほど強く反映しないことが分かった。これらの結果は、発現量と進化速度の負の相関関係が長期的に成り立つことを示している。そして、遺伝子型の進化を予測する上では、遺伝子型よりも表現型の情報が大きく寄与することが示唆された。

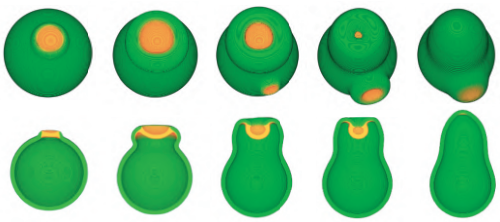


図 7.4.1: フェイズフィールド法を用いたマクロピノサイトーシス動態の 3D シミュレーション結果。下段は断面図。膜上の反応拡散により自己組織化的に形成された PIP_3 の局在パッチの周囲がアクチン重合により盛り上がりカップが閉じる。

7.4.4 アメーバ細胞のマクロピノサイトーシス動態の解析

マクロピノサイトーシスはアクチン依存的なエンドサイトーシスの一種で、細胞膜が盛り上がりカップ状の構造を形成し、細胞外溶液を非特異的に取り込む細胞膜の 3 次元的陥入現象である。マクロファージや細胞性粘菌、樹状細胞などでは、自発的・継続的に起こり続け、細胞外溶液からの栄養の取り込みに用いられている。他にも免疫細胞の外部環境のセンシングや細胞膜のターンオーバー制御などに用いられ、生物にとって重要なプロセスである。しかしどのような機構でこういったトポロジーが変わるほどの膜の大変形が起こるのか未だ解明されていない。

近年、細胞性粘菌のマクロピノサイトーシスにおいて、カップが分岐して新しいカップが形成され、形状を保ったままカップが細胞側面を波のように伝わっていく様子などが観測された。これらの挙動は現象の背後に反応拡散波による自己組織化現象が存在することを窺わせる。またカップ形成に先行して局在する分子 PIP3 が興奮波的な挙動を示すことが知られていることからも、興奮系の反応拡散と場の変形が不可分に関わって起きる現象であると考えられる。

この現象の解析には単なる反応拡散現象以上の、膜の変形と膜上の反応拡散方程式を同時に扱うことのできる枠組みが不可欠である。そこで本研究ではフェイズフィールド法を応用し、細胞膜の変形と細胞膜上の化学物質の反応拡散を同時に扱う手法を開発した。開発した手法と細胞膜上の生化学反応の反応拡散方程式を組み合わせることにより図 7.4.1 のようなマクロピノサイトーシス様の動態をシミュレートすることに成功した。興味深いことに、自発曲率を持つ分子の集合などを仮定することなしに、反応拡散による自己組織化とアクチン重合による膜変形のみからこのような大変形が起こる。この現象は「膜の変形と膜上の分子の反応拡散が織りなす新しい自己組織化現象」の良い例となっている。

7.4.5 力学系モデルを用いた代謝ダイナミクスの安定性の解析

代謝のダイナミクスは、環境条件に応じて様々に変化することが可能であるが、どのような制御によってその安定性が維持されているかは不明な点が残されている。実際に、複雑な代謝ネットワークを微分方程式を用いてモデル化すると、力学系として容易に不安定化してしまい、広いパラメータ領域において非自明な解（増殖をする状態）を安定に保つことが難しい。むろん、精巧な代謝反応の制御がその安定性の維持を担っていると考えられるが、その制御機構がどのような性質を持つ必要があるか、明らかになったとは言い難いのが現状である。

代謝反応ネットワーク、特に ATP や NADH などの循環的な反応様式を持つ補酵素が含まれた代謝ネットワークが、どのような性質のダイナミクスを持つかを簡単な数理モデルを用いて解析した。その結果、循環的な補酵素の反応が代謝ネットワークに存在することにより、その反応フラックスが保存量として振る舞い、それによる拘束を通じて、素反応の時間スケールより十分に長い時間スケールの緩和ダイナミクスが出現することを明らかにした（図 7.4.2）。このようなガラス的な長い時間スケールを持つ緩和ダイナミクスの出現は、特定のモデルやパラメータに依存しない、代謝ダイナミクスが持つ一般的な性質であることが示唆された。また、こうしたダイナミクスにより、代謝システム全体が、環境変動や代謝物質量の揺らぎに対して頑強性を持つことが示された [7]。

＜報文＞

(原著論文)

[1] 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 **33**(15), 2314-2321 (2017).

[2] S. Suzuki, T. Horinouchi and C. Furusawa: Acceleration and Suppression of Resistance Development by Antibiotic Combinations, BMC Genomics, **18**(1), 328 (2017).

[3] M. Yoshida, S. G. Reyes, S. Tsuda, T. Horinouchi, C. Furusawa and L. Cronin: Time-programmable drug dosing allows the manipulation, suppression

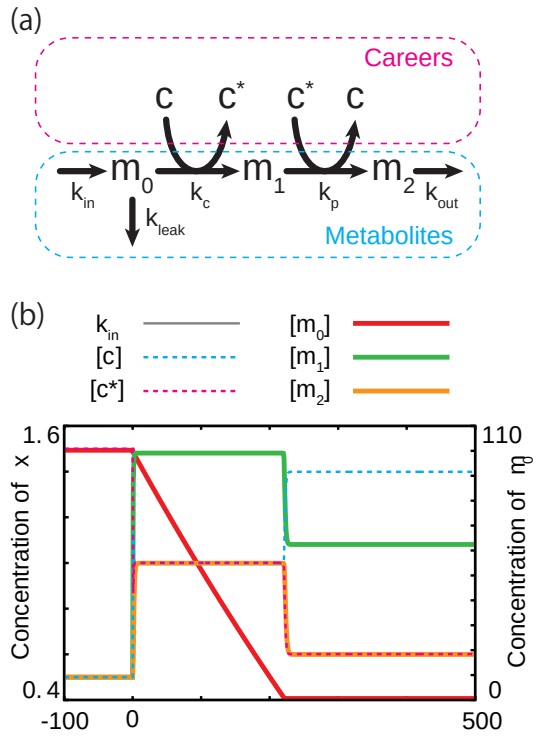


図 7.4.2: 循環的な補酵素反応を含む代謝モデル。(a) モデルの概念図。代謝経路が補酵素 C と C*の循環的な反応を含む。(b) 代謝物質濃度変化の一例。time=0 で流入フラックス（k_{in}）を変化させたとき、代謝物質濃度 [m0] の長い時間スケールを持つ緩和の後に [m1] と [m2] の急激な変化が生じる。

and reversal of antibiotic drug resistance *in vitro*, Nature Comm. **8**, 15589 (2017).

[4] A. Germond, V. Kumar, T. Ichimura, J. Moreau, C. Furusawa, H. Fujita, T. M. Watanabe: Raman spectroscopy as a tool for ecology and evolution, Jour. Roy. Soc. Interface **14**(131) 20170174 (2017).

[5] T. Horinouchi, A. Sakai, H. Kotani, K Tanabe, C. Furusawa: Improvement of isopropanol tolerance of Escherichia coli using adaptive laboratory evolution and omics technologies, Jour. Biotech **255**, 47-56 (2017).

[6] T. Horinouchi, S. Suzuki, H. Kotani, K. Tanabe, N. Sakata, H. Shimizu, C. Furusawa: Prediction of Cross-resistance and Collateral Sensitivity by Gene Expression profiles and Genomic Mutations, Sci. Rep. **7**(1), 14009 (2017).

[7] T. S. Hatakeyama, C. Furusawa: Metabolic dynamics restricted by conserved carriers: Jamming and feedback, PLoS Comp. Biol. **13**(11), e1005847 (2017).

[8] A. Shibai, Y. Takahashi, Y. Ishizawa, D. Motooka, S. Nakamura, B. W. Ying, S. Tsuru: Mutation accumulation under UV radiation in Escherichia coli, Sci. Rep. **7**(1), 14531 (2017).

[9] C. Furusawa, T. Horinouchi, T. Maeda: Toward prediction and control of antibiotic-resistance evolution, Curr. Opin. Biotechnol. **54**, 45-59 (2018).

[10] T. Hirasawa, M. Saito, K. Yoshikawa, C. Furusawa, H. Shimizu: Integrated Analysis of the Transcriptome and Metabolome of Corynebacterium glutamicum during Penicillin-Induced Glutamic Acid Production, Biotechnol. Jour., in press

[11] K. Tokuyama, Y. Toya, T. Horinouchi, C. Furusawa, F. Matsuda, H. Shimizu: Application of adaptive laboratory evolution to overcome a flux limitation in an Escherichia coli production strain, Biotechnol. Bioeng., in press

[12] K. Kaneko and C. Furusawa: Macroscopic Theory for Evolving Biological Systems Akin to Thermodynamics, Annu. Rev. Biophys., in press

[13] C. Furusawa and K. Kaneko: Formation of Dominant Mode by Evolution in Biological System, Phys. Rev. E, in press

(著書)

[14] 古澤力, 前田智也, 堀之内貴明:「ラボ内での全自動進化実験システムの構築」, 実験医学別冊「あなたのラボに AI ×ロボットがやってくる」(夏目徹 編) (2017).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[15] Kento Tokuyama, Yoshihiro Toya, Takaaki Horinouchi, Chikara Furusawa, Hiroshi Shimizu: Adaptive laboratory evolution of in silico designed succinate producing Escherichia coli, 15th International Congress of Bacteriology and Applied Microbiology, Singapore, 2017 年 7 月.

[16] Chikara Furusawa: Analysis of phenotypic evolution and symbiosis using microbial laboratory evolution, “Biology of Symbiosis” Workshop, Yokohama, 2017 年 8 月.

[17] Yukitaka Isaka, et al.: Inferring gene regulatory network and differentiation dynamics of human embryonic stem cell, Winter Q-bio Conference, Hawaii, 2018 年 2 月

招待講演

[18] Chikara Furusawa: Phenotypic diversity and constraints in microbial adaptive evolution, Les Houches School “Evolution of Diversity”, France, 2018 年 2 月

(国内会議)

一般講演

[19] 岡本和子, Arno Germond，藤田英明，古澤力，岡田康志, 渡邉朋信: マウス ES 細胞初期分化にみる集団分化メカニズム, 第 69 回日本細胞生物学会年会, 2017 年 6 月.

[20] 古澤力, 前田智也, 堀之内貴明：大腸菌進化実験による進化的制約の解析, 日本進化学会第 19 回大会, 2017 年 8 月.

[21] 芝井厚, 石澤裕佳, 高橋祐輔, 元岡大祐, 中村昇太, 津留三良: 細胞の増殖能力は変異に対してどれほど頑強か, 日本進化学会第 19 回大会, 2017 年 8 月.

[22] 堀之内貴明, 前田智也, 古澤力: 実験室進化・オミックス解析・破壊株スクリーニングに基づく表現型メモリー機構の理解への試み, 生命情報科学若手の会第 9 回研究会, 2017 年 9 月.

[23] Chikara Furusawa, Kunihiko Kaneko, Takaaki Horinouchi, Tomoya Maeda; Phenotypic Constraints Shaped by Evolution: Numerical and Experimental Approaches, 生物物理学会 第 55 回年会, 2017 年 9 月.

[24] Nen Saito, Satoshi Sawai, 3 次元フェイズフィールドモデルによるアメーバ細胞動態の解析, 生物物理学会 第 55 回年会, 2017 年 9 月.

[25] 高野壮太朗, Pawlowska Bogna J., Gudelj Ivana, 四方哲也, 津留三良: バクテリアの長期定常期における密度依存的なリサイクリング活動, 第 55 回日本生物物理学会年会, 2017 年 9 月.

[26] Arno Germond, Takaaki Horinouchi, Chikara Furusawa, Toshio Yanagida, Taro Ichimura, Tomonobu M. Watanabe: Linking Raman spectroscopy and gene expression profiles for genotype-phenotype prediction, 第 55 回日本生物物理学会年会, 2017 年 9 月.

[27] 岡本和子, Arno Germond，藤田英明，古澤力，岡田康志, 渡邉朋信: マウス ES 細胞は、フラッシュラチェット様式をとりながら、集団で分化する, 第 55 回日本生物物理学会年会, 2017 年 9 月.

[28] 金子邦彦, 古澤力: 進化による低次元主要モード形成, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月.

[29] 斉藤稔, 澤井哲: 3 D フェイズフィールドモデルによるアメーバ細胞運動動態の解析, 第 7 回日本細胞性粘菌学会, 2017 年 10 月.

[30] 堀之内貴明, 徳山健斗, 前田智也, 松田史生, 清水浩, 古澤力: 実験室進化により得られたメチルグリオキサール耐性大腸菌のマルチオミクス解析, 第 11 回メタボロームシンポジウム, 2017 年 11 月.

[31] 前田智也, 堀之内貴明, 阪田奈津江, 小谷葉月, 酒井亜季, 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 16 回微生物研究会, 2017 年 11 月.

[32] Germond Arno, Taro Ichimura, Takaaki Horinouchi, Chikara Furusawa, Tomonobu M. Watanab: Raman spectroscopy as a tool to monitor phenotypic response and gene expression, 生命科学系学会合同年次大会 (ConBio2017), 2017 年 12 月.

[33] 斉藤稔, 澤井哲: フェイズフィールドモデルによるアメーバ細胞のマクロピノサイトーシス動態の解析, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月.

[34] 前田智也, 堀之内貴明, 阪田奈津江, 小谷葉月, 酒井亜季, 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下における大腸菌の大規模実験室進化, 第 12 回日本ゲノム微生物学会年会, 2018 年 3 月.

[35] 芝井厚, 津留三良, 堀之内貴明, 古澤力: 細菌ゲノムへの遺伝子不活性化変異の蓄積, 第 12 回日本ゲノム微生物学会年会, 2018 年 3 月.

[36] 津留三良, 芝井厚, 堀之内貴明, 古澤力: タンパク質の進化速度における進化的制約の持続性, 第 12 回日本ゲノム微生物学会年会, 2018 年 3 月.

[37] 津留三良: タンパク質の進化速度における進化的制約の持続性, 第 43 回生命の起源および進化学会学術講演会, 2018 年 3 月.

[38] 井坂諭紀雄, et al: ヒト胚性幹細胞の遺伝子制御ネットワークと分化ダイナミクス, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月.

招待講演

[39] 堀之内貴明, 前田智也, 古澤力: 大腸菌実験室進化とオミックス解析を用いて大腸菌の適応進化過程を解析する, 第五回 NGS 現場の会, 2017 年 5 月.

[40] 津田宗一郎, 吉田真理, Sabrina Galinanes Reyes, 堀之内貴明, 古澤力, Leroy Cronin: Antibiotic cycling による抗生物質耐性菌の抑制と数理モデル予測による耐性制御, 日本進化学会第 19 回大会シンポジウム, 2017 年 8 月.

[41] 堀之内貴明, 前田智也, 古澤力: 大規模実験室進化とオミックス解析による大腸菌のストレス耐性機構の解析, 第 69 回生物工学会大会シンポジウム, 2017 年 9 月.

[42] Nen Saito, Collective motion switches directionality of molecular motor along filament, 生物物理学会 第 55 回年会, 2017 年 9 月.

[43] 古澤力: 制約と方向性をどのように理解するか–理論的背景, シンポジウム「進化の制約と方向性」, 2017 年 10 月.

[44] 古澤力: 多様な選択圧下での大腸菌進化実験による揺らぎー応答関係の定量解析, シンポジウム「進化の制約と方向性」, 2017 年 10 月.

[45] 古澤力：大腸菌進化実験を用いた細胞状態の予測と制御に向けて, JST-CRADS 俯瞰ワークショップ, 2017 年 10 月.

[46] 古澤力: 大腸菌の人工進化実験における表現型・遺伝子型の網羅的解析, 第 16 回 微生物研究会–微生物の多様な生き様にせまる, 2017 年 11 月.

[47] 古澤力: 大腸菌進化実験を用いた環境適応ネットワークの構成的理解, 新学術領域「先進ゲノム支援」拡大班会議, 2018 年 1 月.

[48] 古澤力: 大腸菌進化実験を用いた進化的拘束の解析, 生命の起源および進化学会第 43 回学術講演会, 2018 年 3 月.

8 技術部門

(佐伯、八幡、南野、谷島、下澤、大塚、南城 *、阿部 *、高瀬 **)

* 技術補佐員
** 業務委託

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、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、藤堂准教授、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

(下澤、大塚、南城、阿部)

8.1.1 利用状況

2017 年 4 月から 2018 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 (400 件)
- 設計及び部品等の問い合わせ (外注を含む)
- 外注発注 (76 件)
- 他教室から作業依頼及び問い合わせ
  製作依頼件数の割合： 物理 : 69.5 %、素粒子 4.9 %、化学 22.4 %、地球惑星 1.9 %、生物 1.3 %

  主な依頼者（物理・安東研、物理・浅井研、物理・五神研、化学・地殻化学実験施設、化学・山内研、化学・長谷川研、物理・佐野研、物理・馬場研、物理・福山研、素粒子センター、物理・島野研、化学・合田研）

8.2 技術室

(佐伯、八幡、南野、谷島、高瀬)

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、谷島、高瀬)

- 専攻業務

  1 号館東棟講義室・会議室使用開始に伴う教室予約システムの見直しを行った。
- 理学系研究科業務

  事務業務端末講習及びテストを行い端末利用者の情報倫理意識向上を行った。
- 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 S セメスタの物理学実験 I の「エレクトロニクス I」を技術指導した。(八幡)

  3 年生 S セメスタの物理学実験 I の「真空技術」を技術指導した。(佐伯)
- 物理学実験 II

  3 年生 A セメスタの物理学実験 II の「生物物理学」を指導した [7]。(佐伯)

  3 年生 A セメスタの物理学実験 II の「自動測定制御」の自動大電流切替機 (10 A) を開発した。(八幡)
- 要素技術開発（佐伯、八幡）

  学生実験向けのアナログ回路教材の開発を行った。USB 接続型の測定器とスタンドアロン型の測定器で、微分回路と積分回路の過渡特性と周波数特性の実験について比較した [9]。

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) を実施した [4, 5, 6]。

- 全参加人数　4 名
- 実習内容

  講義: FPGA の仕組み、応用

  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、時間-デジタル、デジタル-時間変換、デジタル-アナログ変換、アナログ-デジタル変換による測定装置開発の基礎

また、東京大学総合技術本部の平成 29 年度技術職員研修「デジタルエレクトロニクス FPGA 研修」として、同様の内容で参加者 4 名に、7 月 25〜27 日の日程で実施した。さらに、岩手大学理工学部からの派遣依頼により、岩手大学実務研修として、同じ内容で参加者 9 名に、9 月 25〜27 日の日程で講習を行った。

林研究室からの依頼により、自動大電流切替機 (80 A) を開発した。

ラズベリーパイと AD コンバーターを用いた遠隔監視システムを開発した。これは、ヘリウムガスの回収純度計や液体ヘリウムの液面計の監視などに使用できるものである。

8.2.5 各種委員会

- 機器・分析技術研究会 地域代表者 (八幡)
- 自然科学研究機構分子科学研究所装置開発室運営委員 (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)
- 第 2 回東京大学技術発表会実行委員会 (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 2017 (東京大学大学院理学系研究科理学部技術部、2018 年 2 月).

＜学術講演＞

(国内会議)

[2] 八幡和志 : ハイインピーダンスのアナログ測定系の開発、2017 年度　機器・分析技術研究会 in 長岡 (長岡技術科学大学、2017 年 8 月).

[3] 田中忠芳, 沖野信一, 渡會兼也, 山田吉英, 八幡和志, 郭清蓮, 久恒彩子, 佐藤恵一, 大島和成, 鍵山茂徳, 並木雅俊, 江尻有郷 : 数物系科学教育のための学修支援システムの構築、日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学、2017 年 9 月).

[4] 八幡和志 : FPGA によるデジタル回路実験・実習の展開の試み、日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学、2017 年 9 月).

[5] 八幡和志 : Vivado におけるインスタンシエーションのコツ、第 19 回分子科学研究所技術研究会 (岡崎コンファレンスセンター、2018 年 2 月).

[6] 八幡和志 : FPGA 技術講習会の物理教育的仕掛け、2017 年度　信州大学　実験・実習技術研究会 (信州大学、2018 年 3 月).

[7] 佐伯喜美子 : 測定原理を理解させる生物物理学生実験、2017 年度　信州大学　実験・実習技術研究会 (信州大学、2018 年 3 月).

[8] 田中忠芳, 渡會兼也, 沖野信一, 八幡和志, 松浦執, 谷口和成, 山田吉英, 館宜伸, 藤井清美, 久恒彩子, 郭清蓮, 佐藤恵一, 鍵山茂徳, 大島和成, 並木雅俊, 江尻有郷 : 数物系科学分野の学びを支援するアクティビティモジュールの開発、日本物理学会　第 73 回年次大会 (東京理科大学、2018 年 3 月).

[9] 佐伯喜美子、八幡和志 : 学生実験用アナログ回路教材の開発 (III)、日本物理学会　第 73 回年次大会 (東京理科大学、2018 年 3 月).

II

Summary of group activities in 2017

1 Theoretical Nuclear Physics (Fukushima) Group

Subjects: Curved spacetime, QCD phase diagram, Lattice simulation, Berry's phase

Member: Kenji Fukushima and Arata Yamamoto

In Theoretical Hadron Physics group, many-body problems of quarks and gluons are studied theoretically on the basis of the quantum chromodynamics (QCD). The subjects studied include quark-gluon plasma in relativistic heavy-ion collisions, particle production mechanism, lattice gauge simulations, matter under extreme conditions, neutron stars, etc.

Highlights in research activities of this year are listed below:

1. Berry phase in lattice QCD
2. Rotational effects in relativistic fermion systems
3. Vacuum structures in inhomogeneous magnetic fields
4. Non-equilibrium dynamics in kinetic theories

2 High Energy Physics Theory Group

Research Subjects: Particle Physics and Cosmology

Member: Takeo Moroi, Koichi Hamaguchi, Yutaka Matsuo

We are working on various topics in particle physics and cosmology, such as physics beyond the Standard Model, dark matter, baryogenesis, inflation, phenomenology of supersymmetric models, grand unified theories, string theory, supersymmetric field theories, conformal field theories, holography, entanglement entropy, and so on. Specific subjects studied in 2017 are summarized below:

1. Phenomenology
   - 1.1. Phenomenology of supersymmetric models [1, 2, 3, 4, 5, 6].
   - 1.2. Grand unified theories [7, 8].
   - 1.3. Vacuum decay [9, 10, 11, 12].
   - 1.4. Dark matter [13, 14, 15, 16, 17].
   - 1.5. Flavor physics [18, 19, 20].
   - 1.6. Neutrino physics and inflation [21].
   - 1.7. Axion production in supersymmetric models [22].
   - 1.8. Big-Bang Nucleosynthesis [23].
   - 1.9. Cosmic infrared background [24].
   - 1.10. Gravitino problem [25].
2. Superstring Theory and Formal Aspects of Quantum Field Theories
   - 2.1. Quantum toroidal algebra and gauge-string duality [26, 27, 28].
   - 2.2. Supersymmetric Rényi entropy and defect operators [29].
   - 2.3. Operator product expansion for conformal defects [30].
   - 2.4. Conformal field theories with boundaries [31, 32].

References:

[1] H. Ito, O. Jinnouchi, T. Moroi, N. Nagata and H. Otono, Phys. Lett. B **771**, 568 (2017) [arXiv:1702.08613 [hep-ph]].

[2] H. Fukuda, N. Nagata, H. Otono and S. Shirai, Phys. Lett. B **781**, 306 (2018) [arXiv:1703.09675 [hep-ph]].

[3] J. L. Evans, T. Gherghetta, N. Nagata and M. Peloso, Phys. Rev. D **95**, no. 11, 115027 (2017) [arXiv:1704.03695 [hep-ph]].

[4] J. Kawamura and Y. Omura, JHEP **1708**, 072 (2017) [arXiv:1703.10379 [hep-ph]].

[5] J. Kawamura and Y. Omura, JHEP **1711**, 189 (2017) [arXiv:1710.03412 [hep-ph]].

[6] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto and K. Yanagi, JHEP **1706**, 031 (2017) [arXiv:1704.05287 [hep-ph]].

[7] S. Chigusa and T. Moroi, PTEP **2017** (2017) no.6, 063B05 [arXiv:1702.00790 [hep-ph]].

[8] J. Ellis, M. A. G. Garcia, N. Nagata, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, JCAP **1707**, no. 07, 006 (2017) [arXiv:1704.07331 [hep-ph]].

[9] Y. Ema, K. Mukaida and K. Nakayama, JCAP **1712**, no. 12, 030 (2017) [arXiv:1706.08920 [hep-ph]].

[10] M. Endo, T. Moroi, M. M. Nojiri and Y. Shoji, Phys. Lett. B **771** (2017) 281.

[11] M. Endo, T. Moroi, M. M. Nojiri and Y. Shoji, JHEP **1711** (2017) 074.

[12] S. Chigusa, T. Moroi and Y. Shoji, Phys. Rev. Lett. **119** (2017) no.21, 211801 [arXiv:1707.09301 [hep-ph]].

[13] K. Hamaguchi, K. Nakayama and Y. Tang, Phys. Lett. B **772**, 415 (2017) [arXiv:1705.04521 [hep-ph]].

[14] P. Ko, N. Nagata and Y. Tang, Phys. Lett. B **773**, 513 (2017) [arXiv:1706.05605 [hep-ph]].

[15] K. J. Bae, A. Kamada, S. P. Liew and K. Yanagi, Phys. Rev. D **97**, no. 5, 055019 (2018) [arXiv:1707.02077 [hep-ph]].

[16] K. J. Bae, A. Kamada, S. P. Liew and K. Yanagi, JCAP **1801**, no. 01, 054 (2018) [arXiv:1707.06418 [hep-ph]].

[17] Y. Tang and Y. L. Wu, Phys. Lett. B **774**, 676 (2017) [arXiv:1708.05138 [hep-ph]].

[18] K. Asai, K. Hamaguchi and N. Nagata, Eur. Phys. J. **C77** (2017), no.11 763. [arXiv:1705.00419 [hep-ph]].

[19] Y. Tang and Y. L. Wu, Chin. Phys. C **42**, no. 3, 033104 (2018) [arXiv:1705.05643 [hep-ph]].

[20] J. Kawamura, S. Okawa and Y. Omura, Phys. Rev. D **96**, no. 7, 075041 (2017) [arXiv:1706.04344 [hep-ph]].

[21] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B **773**, 179 (2017) [arXiv:1705.04796 [hep-ph]].

[22] Y. Ema and K. Nakayama, Phys. Lett. B **776**, 174 (2018) [arXiv:1710.02461 [hep-ph]].

[23] M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi and Y. Takaesu, Phys. Rev. D **97** (2018) no.2, 023502.

[24] K. Kohri, T. Moroi and K. Nakayama, Phys. Lett. B **772**, 628 (2017) [arXiv:1706.04921 [astro-ph.CO]].

[25] F. Hasegawa, K. Nakayama, T. Terada and Y. Yamada, Phys. Lett. B **777**, 270 (2018) [arXiv:1709.01246 [hep-ph]].

[26] J. E. Bourgine, M. Fukuda, K. Harada, Y. Matsuo and R. D. Zhu, JHEP **1711**, 034 (2017) [arXiv:1703.10759 [hep-th]].

[27] J. E. Bourgine, M. Fukuda, Y. Matsuo and R. D. Zhu, JHEP **1712**, 015 (2017) [arXiv:1709.01954 [hep-th]].

[28] M. Fukuda, K. Harada, Y. Matsuo and R. D. Zhu, PTEP **2017**, no. 9, 093A01 (2017) [arXiv:1705.02941 [hep-th]].

[29] T. Nishioka and I. Yaakov, JHEP **1711**, 071 (2017) [arXiv:1612.02894 [hep-th]].

[30] M. Fukuda, N. Kobayashi and T. Nishioka, JHEP **1801**, 013 (2018) [arXiv:1710.11165 [hep-th]].

[31] A. Karch and Y. Sato, JHEP **1709** (2017) 121 [arXiv:1708.01328 [hep-th]].

[32] Y. Sato, Phys. Rev. D **97** (2018) no.2, 026005 [arXiv:1711.02138 [hep-th]].

3 Sakurai Group

Research Subjects: Structure and dynamics of exotic nuclei and exotic atoms

Member: Hiroyoshi Sakurai and Megumi Niikura

In-beam spectroscopy of ^{78}Ni

In-beam spectroscopy of ^{78}Ni was performed at RIBF as a series of campaign experiment of the SEASTAR experiments in 2015. 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 de-excitation γ-rays of ^{78}Ni has been observed successfully.

β-delayed neutron emission measurement at RIBF (BRIKEN project)

BRIKEN project is an international collaboration aiming at masurement of a β-delayed neutron emission probability (P_n) in the wide range of the nuclear chart. In this year, P_n values of neutron-rich nuclei from Nikel to Iodine region was succcessfully measured.

In-beam γ-ray spectroscopy of ^{35}Mg via knockout reactions at intermediate energies

The isotope ^{35}Mg was spectroscopically studied via nucleon-removal reactions from ^{36}Mg and ^{37}Al secondary beams at intermediate energies. The experiment's aim was to clarify the level structure of this nucleus located in between the $N = 20$ and 28 shell quenchings. De-excitation γ-ray energies, exclusive cross sections, and parallel momentum of outgoing ^{35}Mg for several final states were measured and compared to theoretical calculations. It was found that a large fraction of the one-neutron knockout reaction goes into unbound states of ^{35}Mg, which may explain missing f-wave strength.

Spectroscopy of pionic atoms using a proton beam

Chiral symmetry restoration at finite density is one of the most important topics in hadron physics. Spectroscopy of deeply bound pionic atoms enable us to investigate the symmetry restoration and they have been studied experimentally at GSI and RIBF. We are planning to perform a new experiment of pionic atoms using a proton beam at RCNP in order to improve the experimental resolution. In this fiscal year, we conducted the first experiment in RCNP using ^{124}Sn target. We succeeded in measuring the spectrum of the pionic states for about 170 hours as planned. We are now analyzing the data in order to discuss the symmetry restoration at the finite density.

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 $^{16}\mathrm{C}^* \rightarrow {}^{12}\mathrm{Be} + {}^{4}\mathrm{He}\ (+\gamma)$ decay channel 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 on palladium isotopes

This year, four experiments were performed aiming at an experimental determination of neutron energies and multiplicities following the muon capture reaction on paradium isotopes. The neutron time-of-flight measurement employing the SEAMINE array was performed at RCNP (Osaka Univ.) MuSIC-M1 beamline. The muon activation measurement for the stable isotopes were performed at RAL (UK) RIKEN beamline and J-PARC MUSE facility, respectively. The activation measurement using the radio-active ^{107}Pd target was also performed at J-PARC MUSE.

4 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. 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 the experiment we have obtained the occupation of the $f_{7/2}$ and $p_{3/2}$ orbitals in the ground state of ^{44}S and thus we measure 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 reveals five new 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. A followup study of ^{66}Se and ^{62}Ge has been approved by the RIBF program advisory committee.

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.

Single-particle structure of neutron-rich Ca isotopes Within the SEASTAR collaboration we have performed an experiment to study the first spectroscopy of very exotic neutron-rich nuclei. The experiment was performed using the large acceptance SAMURAI spectrometer that allowed for the simultaneous measurement of many reaction channels. In particular we are investigating the single-particle structure of ^{56}Ca through proton and neutron knockout, and the systematics of the production cross sections along the Ca isotopes.

Towards transfer reactions at RIBF with the newly constructed OEDO facility at RIBF the beam energy of exotic nuclei can be effectively reduced to energies that are suitable for transfer reactions. In collaboration with RIKEN we are constructing a detector array specicifaclly for the study of transfer reactions. The setup, called TINA, has be designed and its first imlementation has been comissioned at Kyushu University Tandem accelerator and at the OEDO beamline. Upgrades and extensions are now being designed.

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. First prototypes, containing deuterons instead of tritium, were tested at Kyushu University using a ^{12}C beam. The target has been characterized. Further tests are ongoing before the tritium target will be fabriated.

Next generation γ-ray spectroscopy Most of the experiments at RIBF employ γ-ray spectroscopy as a tool. However, the present instrumentation is not sufficient to remain competitive with other laboratories in the future. A new device would open new horizons for the spectroscopy of exotic nuclei. There are two general approaches. An array based on γ-ray tracking achieves unparalleled resolution for in-beam experiments. On the other hand, highest efficiency can be obtained with scinillator detectors for γ-ray spectroscopy. Such devices are ypically easier to handle, however, the resolution is sacrificed for efficiency. We are working in both directions, developing computational approaches for γ-ray tracking and testing new scintillating crystals for their performance.

5 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

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) is an oversight body of LCC. Sachio Komamiya is a representative of Japanese particle physics community. 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. In 2017 spring to summer Japanese particle physics community studied the possibility of ILC to be a Higgs Factory machine. From precise measurements of coupling constants of the Higgs Boson to other elementary particles at the ILC and the study of deviation pattern of these couplings from the Standard Model predictions, the evolutional direction of particle physics beyond the Standard Model, i.e. towards supersymmetry or composite models, can be clarified. Therefore the scientific significance of the ILC as a Higgs Factory is enormously enhanced. The world particle physics community lead by ICFA issued "ICFA Statement on the ILC Operating at 250 GeV as a Higgs Boson Factory" in November 2017 at the Ottawa ICFA Meeting. The ILC is an international project led by Japanese initiative.

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.

3) 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 [μ] 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.

6 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 and Belle II); (2) Study of neutrino oscillations and search for proton decay (Super-Kamiokande, T2K, and Hyper-Kamiokande); (3) Dark energy survey at the Subaru telescope (Hyper Suprime-Cam); (4) R&D for an experiment to search for axion and light dark matter; (5) R&D of new generation photodetectors.

Members: Hiroaki Aihara, Masashi Yokoyama, and Yoshiuki Onuki

1. Search for new physics at KEK (super-)B-factory: Belle and Belle II experiments 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. In addition, we study rare decays of the τ lepton, such as $\tau^- \to \ell^-\ell'^+\ell'^-\bar{\nu}_\ell\nu_\tau$ $(\ell, \ell' = e, \mu)$ and $\tau^- \to \pi^-\ell^+\ell^-\nu_\tau$ $(\ell = e, \mu)$, to search for new physics.

The SuperKEKB accelerator will have 40 times higher luminosity than KEKB. The Belle detector is also being upgraded as the "Belle II" detector with cutting-edge technologies. Our group is responsible for the construction of the outermost layer of the Silicon Vertex Detector (SVD) to precisely measure the decay points of B mesons, one of the key elements for the success of Belle II. This year we completed the production of six ladders of the Belle II SVD.

2. Study of neutrino oscillations and search for proton decay: Super-Kamiokande, T2K, and Hyper-Kamiokande experiments The discovery of neutrino oscillation by Super-Kamiokande (SK) opened a new window to physics beyond the Standard Model of elementary particles. We have been studying neutrino oscillations with the T2K long baseline neutrino experiment, in which an intense neutrino and anti-neutrino beams produced with the J-PARC accelerator complex are detected with the SK detector, 295 km away. This year, with doubled data for the neutrino-mode beam compared to the previous year, and with an improvement of event reconstruction at SK, we reported a possible hint of the CP violation in the lepton sector, which is one of major milestones in particle physics.

We lead the program to improve the sensitivity of T2K by reducing the systematics uncertainties related to the neutrino interaction. We have been performing a test experiment named WAGASCI at J-PARC to provide more information on the interaction of neutrinos with water, which is the target material in the SK detector. Our group play central roles in the upgrade project of the T2K near neutrino detectors.

In order to significantly extend the reach in the neutrino physics and the proton decay search beyond T2K and SK, we propose the next-generation water Cherenkov detector, Hyper-Kamiokande (Hyper-K). Our group is leading this project as well.

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-field 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. 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.

7 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.
- (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.

8 Miyashita Group

Research Subjects: Statistical Mechanics, Phase Transitions, Quantum Spin systems,

Quantum Dynamics, Non-equilibrium Phenomena

Member: Seiji Miyashita,Takashi Mori, Taichi Hinokihara and Eriko Kaminishi

Quantum dynamics under a time-dependent field is one of the most important subjects in our group. In the 2017 fiscal year, we studied the following topics. We studied thermalization of isolated quantum systems. We examined the Eigenstate Thermalization Hypothesis (ETH) which has been believed to hold for non-integrable systems. But we constructed a counterexample for which we can prove the violation of ETH exactly [9, 10]. We also studied thermalization in the semi-classical region and made clear that the ergodicity in classical limit and ETH in quantum systems are equivalent [11]. We studied the microscopic mechanism of the optical bistability (OB) by making use of an extended parallel algorithm. In particular, we pointed out OB takes place in the so-called quantum region where the number of atoms is larger than that of photons. We study the properties of metastability including the hysteresis behavior, in particular, the size dependence of the relaxation time [37, 45, 24].This topic was studied in a collaboration with Todo group. Dynamics under external sweeping field is also studied. The size(S)- and sweeping velocity-dependences of scattered population distribution of the quantum Stoner-Wohlfarth model was studied and it was found that a sharp change of the distribution occurs after the SW point with a delay which persist in the large S [12]. If we sweep the external field very slowly, the system exhibits the adiabatic motion. In order to realize the adiabatic state in a finite time, the method of shortcuts to adiabaticity using the counter-diabatic field has been proposed. But it generally has a complicated form. We proposed the use of an approximated counter-diabatic field and demonstrated that it practically works well to create the cat state in a Bose-Einstain condensate [13, 21, 50, 14, 22, 51]. We also studied relaxation phenomena to a metastable state (the pre-thermalized state) due to the entanglement of the state. We found the prethermalization takes

place in the 1D Bose gas with a large number of spins (10000) [15]. We studied how the synergetic effect of spin-orbit coupling (SOC) and Zeeman splitting (ZS) affects the optical conductivity in the one-dimensional Hubbard model using the Kubo formula[5]: the dependences of resonance (EDSR) in the metallic regime and the optical conductivity in the Mott-insulating phase on the relative angle between the SOC vector and the magnetic field direction. The effect of U was also studied. We studied a mechanism of a sub-gap optical conductivity through virtual hopping of the electron. Motivated by recent terahertz absorption measurements in α-RuCl3, we developed a theory for the electromagnetic absorption of materials described by the Kitaev model on the honeycomb lattice using the formulation in terms of Majorana fermions [35, 56]. These lase two topics were studied in collaboration with Katsura and Ogata groups. We also studied properties of induced effective spin due to inhomogeneous structures in one dimensional spin chains. e.g. the AKLT model and the alternate-bond antiferromagnetic Heisenberg model. We found the two scales of length, i.e., that of magnetization profile and that of structure of the matrix product wavefunction for the state [47]. The real time diffusion dynamics of a particle under the Berry curvature was also studied in the collaboration of Nagaosa group [16].

Phase transitions and critical phenomena are also important subjects of our group. We have studied dynamics of first order phase transition in systems with multiple order parameters [19, 36]. We also found a specific phase diagram with a horn structure in spin-crossover systems exhibiting an internal temperature phase[2]. We also studied the dynamis of transition in 3D [3]. Moreover we study dynamics of transitions after photo-irradiation and analyzed the so-called elastic expansion before the thermal one [4]. We have involved in 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 [6, 7]. We have studied magnetic properties of $Nd_2Fe_{14}B$ in a realistic atomic scale at finite temperatures. For the purpose, we developed numerical methods such as Monte Carlo (MC) methods for the free energy landscape by making use of the Wang-Landau method, with which temerature dependence of the coercive force was obtained [38]. In parmanent magnets, the dipole-dipole interaction plays important roles. To perform MC simulation, we developed a new algorithm extending the idea of the stochastic cutoff method and the Fukui-Todo $O(N)$ method, and found that the anisotropy of the Fe atom which has been considered to be weak has an important role to maintain coercivity at relaviely high temperatures [8]. We also studied peculiar properties of the ferromagnetic resonance of the $Nd_2Fe_{14}B$ magnet which has a tilted magnetization from the c axis at low temperatures by making use of the LLG method [44].

9 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.
- Dirac electron systems in solids
  Quantum electrodynamics (QED) in solids: Dielectricity and diamagnetism.[1,3]
  Nuclear spin relaxation time of the orbital currents in Dirac electron systems.[2,3]
  Twin Dirac points realized in a antiperovskite material.[4]
- Orbital magnetism
  General theory of orbital magnetism of Bloch electrons.[5]
  Corrections to the Peierls phase in the tight-binding model.
- Theories on topological materials
  Magnon spin-momentum locking.[6]
  Z_2 index and Dirac nodal line material.[7]

Magnon spin current and spin-Seebeck effect in a topological-insulator/ferromagnet interface.[8]

- Organic conductors
  Energy landscape in charge excitations.[9]
  Electron correlation in α-$(ET)_2I_3$.
- Spin systems and spin-orbit interaction
  New spin-liquid states due to the attractive interaction between magnetic monopoles.[10]
  Dynamics of a chiral soliton lattice under a constant current.[11]
  Spin Seebeck effects in a quantum wire.[12]

[1] H. Maebashi, M. Ogata, and H. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 083702 (2017). "Lorentz Covariance of Dirac Electrons in Solids: Dielectric and Diamagnetic Properties"

[2] T. Hirosawa, H. Maebashi, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 063705 (2017). "Nuclear Spin Relaxation Time Due to the Orbital Currents in Dirac Electron Systems"

[3] H. Maebashi, T. Hirosawa, M. Ogata, and H. Fukuyama: to appear in J. Phys. Chem. Solids (2018). "Nuclear Magnetic Relaxation and Knight Shift Due to Orbital Interaction in Dirac Electron Systems"

[4] T. Kariyado and M. Ogata: Phys. Rev. Materials **1**, 061201(R) (2017). "Evolution of Band Topology by Competing Band Overlap and Spin-Orbit Coupling: Twin Dirac Cones in Ba_3SnO as a Prototype"

[5] M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 044713 (2017). "Theory of Magnetization in Bloch Electron Systems"

[6] N. Okuma: Phys. Rev. Lett. **119**, 107205 (2017). "Magnon Spin-Momentum Locking: Various Spin Vortices and Dirac magnons in Noncollinear Antiferromagnets"

[7] I. Tateishi and H. Matsuura: arXiv:1804.01240 "Face centered cubic SnSe as a Z_2 trivial Dirac nodal line material"

[8] N. Okuma and K. Nomura: Phys. Rev. B **95**, 115403 (2017). "Microscopic derivation of magnon spin current in topological insulator/ferromagnet heterostructure"

[9] H. Fukuyama, J. Kishine and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 123706 (2017). "Energy landscape of charge excitations in boundary region between dimer-Mott and charge ordered states in molecular solids"

[10] T. Mizoguchi, L. D. C. Jaubert, and M. Udagawa: Phys. Rev. Lett. **119**, 077207 (2017). "Clustering of Topological Charges in a Kagome Classical Spin Liquid"

[11] K. Tokushuku, J. Kishine and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 124701 (2017). "Tunable Spin Dynamics in Chiral Soliton Lattice"

[12] M. Ogata and H. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 094703 (2017). "Theory of Spin Seebeck Effects in a Quantum Wire"

10 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 the study of electronic, structural and dynamical properties of materials.

In FY2017, we theoretically investigated crystal structure and superconductivity in H_xs under ultra-high pressure, lattice thermal conductivity of a clathrate $Ba_8Ga_{16}Ge_{30}$ (BGG) and layered nitrides AMN_2 (A =Sr, Ba; M =Ti, Zr, Hf), photo-induced non-thermal processes by ultra-short-pulse laser, and optical trapping of excitons in graphane. We also developed various methods of materials simulations from first

principles: data assimilation for crystal structure prediction, a stochastic formalism for sampling thermally distribution for rare events, neural-network Kohn-Sham potential, and so on.

Our research subjects in FY2017 are as follows:

- High-pressure phases of H_xS and their superconductivity
- Superconductivity of BiS_2
- Interference of the Bloch phase in layered materials
- Quartic anharmonic effect on the lattice thermal conductivity of clathrates
- Lattice thermal conductivity of layered nitrides
- Entropy-driven mechanism for non-thermal ablation of metals
- Stability change of Fe-Al alloys by laser irradiation
- Optical trapping of excitons in graphane
- Data assimilation for crystal structure prediction
- Stochastic sampling method for rare events
- Neural-network Kohn-Sham potential
- Generalized gradient approximation for nuclear matter

11 Todo Group

Research Subjects: Novel state and critical phenomena in strongly correlated systems, Novel non-equilibrium or non-steady states, Development of new simulation algorithms, Open-source software for next-generation parallel simulations

Member: Synge Todo, Tsuyoshi Okubo, 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: Ground state of Kitaev materials, Ground state of Handane chain with single-ion anisotropy, Critical decay exponents of long-range interacting spin system, Effective dimension of the random-field Ising model with correlated randomness, Topological order parameter for two-dimensional SPT phase.

Novel non-equilibrium or non-steady states: Dynamical cooperative phenomena in in cavity system, Nonergodicity of classical harmonic oscillator system.

Development of new simulation algorithms: Crystal structure prediction by combined optimization of experimental data and first-principles calculation, Markov chain Monte Carlo method with transition matrix depending on physical quantity, Tensor network renormalization for non-uniform systems, Parallel processing for deep learning, Path-integral Monte Carlo method in continuous space.

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, Phys. Rev. E **95**, 012143 (2017).

[2] Alexander Gaenko, 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, Comp. Phys. Comm **213**, 235–251 (2017).

[3] Mitsuaki Kawamura, Kazuyoshi Yoshimi, Takahiro Misawa, Youhei Yamaji, Synge Todo, Naoki Kawashima, Comp. Phys. Comm **217**, 180–192 (2017).

[4] Yu-Chin Tzeng, Hiroaki Onishi, Tsuyoshi Okubo, Ying-Jer Kao, Phys. Rev. B **96**, 060404(R) (2017).

[5] Tsuyoshi Okubo, Kazuya Shinjo, Youhei Yamaji, Naoki Kawashima, Shigetoshi Sota, Takami Tohyama, Masatoshi Imada, Phys. Rev. B **96**, 054434 (2017).

[6] Kazuya Nomura, Yasuhiro H. Matsuda, Yasuo Narumi, Koichi Kindo, Shojiro Takeyama,Yuko Hosokoshi, Toshio Ono, Naoya Hasegawa, Hidemaro Suwa, Synge Todo, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 104713 (2017).

[7] Shohei Hayashida, Hajime Ishikawa, Yoshihiko Okamoto, Tsuyoshi Okubo, Zenji Hiroi, Maxim Avdeev, Pascal Manuel, Masato Hagihala, Minoru Soda, Takatsugu Masuda, Phys. Rev. B **97**, 054411 (2018).

[8] Naoto Tsujimoto, Daiki Adachi, Ryosuke Akashi, Synge Todo, Shinji Tsuneyuki, to appear in Phys. Rev. Materials.

12 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 such 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) low-dimensional correlated electron systems, and (iii) entanglement in quantum spin chains. In addition, we are also interested in the mathematical aspects of the above mentioned fields. Our research projects conducted in FY 2017 are the following:

- Strongly correlated systems
  - Optical conductivity in the one-dimensional Hubbard model with spin-orbit coupling [1]
  - Subgap optical conductivity in honeycomb Kitaev materials [2]
  - Ground-state phase diagram of quantum dimer-trimer chain [3]
  - Ground-state energies of spinless free fermions and hard-core bosons [4]
- Topological phases of matter
  - Zero modes in a Kitaev chain with twisted boundary conditions [5]
  - Topological invariants for disordered topological insulators [6, 7]
- Solvable models and field theories
  - Volume-law entanglement in deformed Fredkin spin chain [8, 9]
  - Sine-square deformation of conformal field theories [10]

[1] Adrien Bolens, Hosho Katsura, Masao Ogata, and Seiji Miyashita, Phys. Rev. B, **95**, 235115 (2017).

[2] Adrien Bolens, Hosho Katsura, Masao Ogata, and Seiji Miyashita, to appear in Phys. Rev. B.

[3] Yun-Tak Oh, Hosho Katsura, Hyunyong Lee, and Jung Hoon Han, Phys. Rev. B, **96**, 165126 (2017).

[4] Wenxing Nie, Hosho Katsura, and Masaki Oshikawa, Phys. Rev. B **97**, 125153 (2018).

[5] Kohei Kawabata, Ryohei Kobayashi, Ning Wu, and Hosho Katsura, Phys. Rev. B, **95**, 195140 (2017).

[6] Yutaka Akagi, Hosho Katsura,and Tohru Koma, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 123710 (2017).

[7] Hosho Katsura and Tohru Koma, J. Math. Phys. **59**, 031903 (2018).

[8] Olof Salberger, Takuma Udagawa, Zhao Zhang, Hosho Katsura, Israel Klich, and Vladimir Korepin, J. Stat. Mech., 063103 (2017).

[9] Takuma Udagawa and Hosho Katsura, J. Phys. A: Math. Theor. **50**, 405002 (2017).

[10] Shota Tamura and Hosho Katsura, Prog. Theor. Exp. Phys **2017**, 113A01 (2017).

13 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, metal-insulator transitions, giant magnetoresistance, and magnetic anisotropies in transition-metal oxides [1], ferromagnetic alloys [2,3], and their thin films and interfaces.

[1] G. Shibata, M. Kitamura, M. Minohara, K. Yoshimatsu, T. Kadono, K. Ishigami, T. Harano, Y. Takahashi, S. Sakamoto, Y. Nonaka, K. Ikeda, Z. Chi, M. Furuse, S. Fuchino, M. Okano, J. Fujihira, A. Uchida, K. Watanabe, H. Fujihira, S. Fujihira, A. Tanaka, H. Kumigashira, T. Koide, and A. Fujimori: Anisotropic spin-density distribution and magnetic anisotropy of strained $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ thin films: Angle-dependent x-ray magnetic circular dichroism, npj Quantum Mater. **3**, 3–1-6 (2018).

[2] K. Ikeda, T. Seki, G. Shibata, T. Kadono, K. Ishigami, Y. Takahashi, M. Horio, S. Sakamoto, Y. Nonaka, M. Sakamaki, K. Amemiya, N. Kawamura, M. Suzuki, K. Takanashi, and A. Fujimori: Magnetic anisotropy of $L1_0$-ordered FePt thin films studied by Fe and Pt $L_{2,3}$-edges x-ray magnetic circular dichroism, Appl. Phys. Lett. **111**, 142402–1-5 (2017).

[3] S. Sakamoto, K. Srinivasan, R. Zhang, O. Krupin, K. Ikeda, G. Shibata, Y. Nonaka, Z. Chi, M. Sakamaki, K. Amemiya, A. Fujimori, and A. Ajan: Effects of cobalt substitution in $L1_0$-(Fe,Co)Pt thin films, Phys. Rev. B **96**, 144437–1-5 (2017).

14 Hasegawa Group

Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics

Members: Shuji HASEGAWA, Akari TAKAYAMA, and Ryota AKIYAMA

Surfaces/interfaces of materials and atomic-layer materials are platforms of our research where rich physics is expected due to the low-dimensionality, symmetry breakdown, a wide variety of structures, and direct access for measurements. (1) Electronic/spin/mass transports, (2) atomic/electronic structures, (3) phase transitions, (4) spin states and spintronics, and (5) epitaxial growths of coherent atomic/molecular layers/wires on surfaces of metals, semiconductors, topological insulators, and nano-scale phases such as

surface superstructures, ultra-thin films including atomic-layer materials such as graphene and transition metal dichalcogenides. We use various kinds of ultrahigh-vacuum experimental techniques, such as electron diffraction, scanning electron microscopy(SEM), scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy(PES), *in-situ* four-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-four-point probes, and surface magneto-optical effects apparatuses. Main results in this year are as follows.

(1) Surface electronic/spin transports:
- Interface superconductivity at topological crystalline insulator/trivial semimetal junction
- Ferromagnetism and anomalous Hall effect at interface between topological insulator and ferromagnetic insulator
- Bose metal behavior at monolayer FeSe superconductor
- 2D superconductivity at monolayer alloy metallic surface superstructures
- 2D superconductivity by proximity effect
- Spin injection by circularly polarized light irradiation on topological insulators
- Electrical transport at Graphene
- Electrical transport of organic molecule sheets measured by four-tip STM
- CDW and transport at transition metal dichalcogenides

(2) Surface phases and atomic-layer materials:
- Proximity effect at a interface between a topological crystalline insulator and a ferromagnetic metal
- Epitaxial growth of blue Phosphor atomic layers
- Structure analysis of Ca-intercalated bilayer graphene by positron diffraction

(3) New methods:
- Fabrication of UHV-SQUID system to detect Meissner effect of atomic-layer superconductors
- Fabrication of a pure-spin-current injection probe

[1] T. Hirahara, S. V. Eremeev, T. Shirasawa, Y. Okuyama, T. Kubo, R. Nakanishi, R. Akiyama, A. Takayama, T. Hajiri, S. Ideta, M. Matsunami, K. Sumida, K. Miyamoto, Y. Takagi, K. Tanaka, T. Okuda, T.Yokoyama, S. Kimura, S. Hasegawa, and E. V. Chulkov: *A large-gap magnetic topological heterostructure formed by subsurface incorporation of a ferromagnetic layer*, Nano Letters **17**, 3493-3500 (May, 2017)

[2] R. Akiyama, Y. Takano, Y. Endo, S. Ichinokura, R. Nakanishi, K. Nomura, and S. Hasegawa: *Berry phase shift from 2π to π in Bilayer graphene by Li-intercalation and sequential desorption*, Appl. Phys. Lett. **110**, 233106 (4pp) (Jun, 2017).

[3] P. Chen, Woei Wu Pai, Y.-H. Chan, A. Takayama, C.-Z. Xu, A. Karn, S. Hasegawa, M. Y. Chou, S.-K. Mo, A.-V. Fedorov, and T.-C. Chiang: *Emergence of charge density waves and a pseudogap in single-layer $TiTe_2$*, Nature Communications **8**, 516-521 (Sep, 2017).

[4] S. Ohya, A. Yamamoto, T. Yamaguchi, R. Ishikawa, R. Akiyama, L. D. Anh, S. Goel, Y. K. Wakabayashi, S. Kuroda, M. Tanaka, *Observation of the inverse spin Hall effect in the topological crystalline insulator SnTe using spin pumping*, Physical Review B **96**, 094424 (Sep, 2017).

[5] Y. Nakata, K. Sugawara, S. Ichinokura, Y. Okada, T. Hitosugi, T. Koretsune, S. Hasegawa, T. Sato, and T. Takahashi: *Observation of Anisotropic Band Splitting in Monolayer $NbSe_2$: Implications for Superconductivity and Charge Density Wave*, npj 2D Materials and Applications, in press (2017).

15 Fukuyama Group

Research Subjects: Low Temperature Physics (Experimental):
Quantum fluids and solids with strong correlations and frustration,
Novel electronic states in graphene.

Member: Hiroshi Fukuyama, Tomohiro Matsui

We are interested in (i) novel quantum phases with strong correlations and frustrations in two dimensional (2D) helium three (^{3}He), four (^{4}He) and their mixture, (ii) novel electronic properties of graphene, monatomic sheet of carbon atoms. We are investigating these phenomena at ultra-low temperatures down to 50 μK, using various experimental techniques such as NMR, calorimetry, tortional oscillator, scanning tunneling microscopy and spectroscopy (STM/S), and electronic transport measurement, *etc.*

1. **Quantum Spin Liquid state in two dimensional ^{3}He:**

   Quantum spin liquid (QSL) is a state where the spins at each lattice site are not frozen even at $T = 0$. Two dimensional ^{3}He is one of the promising candidates which shows the QSL state as magnetic ground state because of the following characters. (1) Impurity-free 2D solid can be obtained on an atomically flat substrate. (2) ^{3}He atom forms triangular lattice with strong geometrical frustrations. (3) The interaction ($J_{\rm p}$) between ^{3}He atoms can be described with the multiple spin exchange (MSE) of up to six atoms. (4) The physical properties, such as heat capacity and magnetism, can be described only by the degree of freedom of nuclear spins.

   We are currently focusing on a monatomic layer of ^{3}He solid prepared on graphite, which is preplated by bilayer of HD (^{3}He/HD/HD/gr) and studying its heat capacity (C) in wide temperature range of $0.16 < T < 90$ mK, and in wide areal density range of $0.1 \leq \rho \leq 13.63$ nm^{-2} Since the areal density of 2D HD is smaller than that of ^{3}He and ^{4}He, one can obtain larger $|J_{\rm P}|$ for 2D ^{3}He on bilayer HD than on ^{3}He and ^{4}He. The T-dependence of C for ^{3}He/HD/HD/gr shows a single broad peak different from the double peak feature for ^{3}He/^{4}He/gr and ^{3}He/^{3}He/gr. The peak shifts to lower temperature by increasing areal density of ^{3}He. A higher ρ of $\rho > 5.05$ nm^{-2}, a C2-like phase with ~ 17 % compressibility was observed. This C2-like phase is expected to be quantum liquid crystal, or in other words "hexatic" phase, where there is no long range order while hexagonal bond order is preserved locally. On the other hand, at $\rho = 4.74$ nm^{-2}, a novel QSL with exotic elementary excitations is observed, which is named as C3 phase. At the C3 phase, the C and χ shows peculiar T dependence, i.e., $C \propto T^{2/3}$ and $\chi \propto T^{-1/3}$. Theoretically, this unique T-dependence can be explained by considering spinons or majorana fermions as magnetic excitations.

2. **Novel electronic properties of graphene:**

   Graphene had been attracting considerable attention owing to its remarkable electronic and structural properties, and its possible applications in many emerging fields such as graphene-based electronic devices. One of the important topics to study in graphene research is the spin polarized state expected at zigzag edges of graphene nanoribbon (GNR). It is well known that there are two types of edges in graphene, i.e. zigzag and armchair types. At the edge of zigzag structure, electrons are strongly localized along the edge to form a zigzag edge state (zz-ES). We had confirmed the state experimentally by STM/S at a monatomic step edge of graphite. In addition, it is expected that the spin degeneracy would be lifted and ferromagnetically spin polarized edge state appears under an electron-electron interaction. The ferromagnetic edge state is considered to stabilize in a GNR between two zigzag edges (z-GNR) through anti-ferromagnetic coupling between edges.

   To obtain such zigzag edges and z-GNR, we tried hydrogen-plasma etching of graphite surfaces. By exposing graphite to hydrogen-plasma under high temperatures, hexagonal nanopits with monatomic depth are created. The size and the density of nanopit can be controlled by tuning the excitation power to produce plasma, temperature and time duration of the process, and partial pressure of hydrogen. Moreover, and most importantly, the edges of the nanopit are aligned to the zigzag direction in atomic scale. Therefore, one can obtain z-GNR in between two hexagonal nanopits. By observing dI/dV spectra across such z-GNRs, we have succeeded to observe the spin polarized zz-ES as double peak structure in the local density of states. The double peak consists of sharp and dull peaks, and the peak separation becomes smaller for wider z-GNR.

16 Okamoto Group

Research Subjects: Experimental Condensed Matter Physics,

Low temperature electronic properties of two-dimensional systems.

Member: Tohru Okamoto and Ryuichi Masutomi

We study low temperature electronic properties of two-dimensional systems.
The current topics are following:

1. Two dimensional electrons at cleaved semiconductor surfaces:
   At the surfaces of InAs and InSb, conduction electrons can be induced by submonolayer deposition of other materials. Recently, we have performed in-plane magnetotransport measurements on in-situ cleaved surfaces of p-type substrates and observed the quantum Hall effect which demonstrates the perfect two dimensionality of the inversion layers. Research on the hybrid system of 2D electrons and adsorbed atoms has great future potential because of the variety of the adsorbates and the application of scanning probe microscopy techniques.

   To explore exotic physical phenomena related to spin at a semiconductor surface, magnetic-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. 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 exotic superconducting states in multilayer systems, we fabricated bilayer and trilayer films on the cleaved surface of an insulating GaAs substrate, which comprise one-atomic-layer Pb films with a strong Rashba spin-orbit interaction caused by the breaking of the space inversion symmetry. A steep upturn was observed in the measurement of the temperature dependence of the parallel upper critical magnetic field. From the numerical calculations performed using the Bogoliubov-de Gennes equations, we found that this upturn corresponds to the crossover from the complex stripe phase to the helical phase in the multiple one-atomic-layer films.

17 Shimano Group

Research Subjects: Optical and Terahertz Spectroscopy of Condensed Matter

Member: Ryo Shimano and Naotaka Yoshikawa

We study light-matter interactions and many body quantum correlations in solids, aiming at the light-control of many-body quantum phases. In order to investigate the role of electron and/or spin correlations in the excited states as well as in the ground states, we focus on the low energy electromagnetic responses, in particular in the terahertz(THz) (1THz$\sim$4meV) frequency range where various 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-exciton interactions in a bulk GaAs in the high density and low temperature regime where the phase space density of excitons far exceeds unity. A large blueshift is observed after the resonant excitation of lowest 1s excitons, suggesting the realization of ultracold exciton gas. The dynamics of

the energy shift is investigated by the pump-probe spectroscopy with taking into account the spin relaxation dynamics of excitons, electrons, and holes. Ultrafast dynamics of high density coherent excitons and it's relation to the photon-dressed state of excitons is also investigated in the density range of exciton Mott transition.

2. **Observation of Higgs mode in d-wave high temperature superconductors:** We have investigated the collective amplitude mode of superconducting order parameter, namely the Higgs mode, in d-wave superconductors $Bi_2Sr_2CaCuO_{8+x}$ by terahertz(THz) pump-optical probe spectroscopy. During the irradiation of the monocycle THz pulse, an oscillatory signal that follows the squared waveform of the pump THz pulse is observed in the time-resolved reflection of the near-infrared probe pulse. The signal is prominently enhanced below the critical temperature of superconductivity. The polarization dependence of the pump and probe pulse shows that the oscillatory signal is dominated by the isotropic A_{1g} component irrespective of hole doping. A theoretical model is developed to describe the third order nonlinear susceptibility which is relevant to the terahertz(THz) pump-optical probe signal with taking into account the contributions from density fluctuation term and the Higgs term. From the comparison between the experiments and the theory, we concluded that the observed A_{1g}-dominant oscillatory signal is originated from the Higgs mode.

References

[1] Ryusuke Matsunaga, Naoto Tsuji, Kazumasa Makise, Hirotaka Terai, Hideo Aoki, and Ryo Shimano: Polarization-resolved terahertz third-harmonic generation in a single-crystal superconductor NbN: Dominance of the Higgs mode beyond the BCS approximation, Phys. Rev. B **96**, 020505(R) (2017).

[2] Fumiya Sekiguchi and Ryo Shimano: Rate Equation Analysis of the Dynamics of First-order Exciton Mott Transition, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 103702 (2017).

[3] Yuta Murotani, Masayuki Takayama, Fumiya Sekiguchi, Changsu Kim, Hidefumi Akiyama, and Ryo Shimano: Terahertz field-induced ionization and perturbed free induction decay of excitons in bulk GaAs, J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 114001 (2018).

[4] Go Yumoto, Ryusuke Matsunaga, Hiroki Hibino, and Ryo Shimano: Ultrafast Terahertz Nonlinear Optics of Landau Level Transitions in a Monolayer Graphene, Phys. Rev. Lett. **120**, 107401 (2018).

[5] Kota Katsumi, Naoto Tsuji, Yuki I. Hamada, Ryusuke Matsunaga, John Schneeloch, Ruidan D. Zhong, Genda D. Gu, Hideo Aoki, Yann Gallais, and Ryo Shimano: Higgs Mode in the d-Wave Superconductor $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ Driven by an Intense Terahertz Pulse, Phys. Rev. Lett. **120**, 117001 (2018).

18 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 FY2017 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. Especially, our discovery for two-dimensional honeycomb spin liquid was pressreleased by University in this February.

Realization of new spin liquid and Kitaev physics:

Realization of spin liquid, where quantum spins fluctuates at absolute zero, should be a milestone in the field of quantum spin physics. After a theoretical achievement of the exactly solvable spin liquid state on a honeycomb lattice, by Alexei Kitaev, a materialization of this Kitaev Honeycomb Model (KHM) has been intensively pursued. One dimensional spin liquid has been commonly accepted, while in two or three dimensions, typical known frustrated quantum spin liquid materials, like triangular compounds, are not based on an

exactly solvable lattice model. We have been focused on a two-dimensional honeycomb iridate, $H_3LiIr_2O_6$, and discovered that $H_3LiIr_2O_6$ is indeed spin liquid, as the first material of such a liquid, down to 50 mK by specific heat, magnetic susceptibility, and nuclear magnetic resonance experiments. This key result was published this year.

The key ingredient to realize KHM is bond-dependent anisotropic Ising-like interactions, and it was suggested that material engineering for spin-orbit coupled $J_{\rm eff} = 1/2$ quantum pseudo spins of Ir on (hyper-)honeycomb lattice would be a main route. Two kinds of Majorana fermions represent KHM and they are particles on the exactly solved ground state. Since our discovery is an only spin liquid on Kitaev system, and no report was given to proof two Majorana particles, we will pursue identification of elementary excitations in $H_3LiIr_2O_6$ this year. We preliminary succeeded in fabricating a single crystal of this compounds, which should open a way to investigate a pristine thermally/artificially activated Majorana excitations or local excitations near an implanted defects, which can be evaluated rigorously for KHM. We expect that the latter effects can be caught by our NMR spectroscopy technique.

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 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 magnetic 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 AIrO$_3$ (A=Sr,Ca) perovskites are predicted to have three dimensional Dirac-node electrons and heavier holes at the Fermi level. We fabricated epitaxially grown AIr$_{1-x}$Sn$_x$O$_3$ (A=Sr,Ca) on 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 dilution of Ir ions or a distortion of Ir-O-Ir bond. Band structures at each phase and phase boundary are yet to be identified and will be investigated.

19 Hayashi Group

Research Subjects: Spin orbit effects in thin film heterostructures

Member: Masamitsu Hayashi, Masashi Kawaguchi

We have studied the physics of spin orbit effects that derive from the strong spin orbit interaction of materials and interfaces in thin film heterostructures. Our focuses are spin transport, magnetism and optical response of atomically engineered heterostructures. Currently we put a strong effort on studies related to generation of spin current via current-spin, heat-spin and light-spin conversion effects, and optical control of electron spins. Results of the following projects were published in FY 2017.

- Spin current generation
  - Observation of the spin Nernst effect in a heavy metal (tungsten)[1]
  - Evaluation of spin orbit torque using spin Hall magentoresistance and the harmonic Hall voltage measurements[2]
  - Simulations of spin orbit torques in magnetic multilayers[3]
- Magneto-optics
  - Enhancement of the magneto-optical Kerr effect using optical interference[4]

[1] P. Sheng, Y. Sakuraba, Y.-C. Lau, S. Takahashi, S. Mitani, M. Hayashi, The spin Nernst effect in tungsten, Science Advances 3, e1701503 (2017).

[2] Y.-C. Lau, M. Hayashi, Spin torque efficiency of Ta, W, and Pt in metallic bilayers evaluated by harmonic Hall and spin Hall magnetoresistance measurements. Jpn. J. Appl. Phys. 56, 0802B5 (2017).

[3] C. Abert, H. Sepehri-Amin, F. Bruckner, C. Vogler, M. Hayashi, D. Suess, Fieldlike and Dampinglike Spin-Transfer Torque in Magnetic Multilayers. Phys. Rev. Appl. 7, 054007 (2017).

[4] S. Sumi, H. Awano, M. Hayashi, Interference induced enhancement of magneto-optical Kerr effect in ultrathin magnetic films. Scientific Reports 8, 776 (2018).

20 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 are 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 generation stars were born, which illuminated the universe once again and terminate the cosmic Dark Ages. We study the formation of the first stars and blackholes in the universe. The first stars are thought to be the first sources of light, and also the first sources of heavy elements that enable the formation of ordinary stellar populations, planets, and ultimately, the emergence of life. We perform simulations of structure formation in the early universe on supercomputers. Direct and indirect observational signatures are explored considering future radio and infrared telescopes.

Can we discover a second earth somewhere in the universe? This puzzling question used to be very popular only in science fictions, but is now regarded as a decent scientific goal in the modern astronomy. Since the first discovery of a gas giant planet around a Sun-like star in 1995, more than a few thousands candidates of exoplanets have been reported as of May 2017. Though most of the confirmed planets turned out to

be gas giants, the number of rocky planet candidates was steadily increasing, which therefore should give the affirmative answer to the above question. Our approaches towards that exciting new field of exoplanet researches include the spin-orbit misalignment statistics of the Rossiter-MacLaughlin effect, simulations of planet-planet scattering, simulations of tidal evolution of the angular momentum of the planetary system, photometric and spectroscopic mapping of a surface of a second earth and detection of possible biomarker of habitable planets.

Let us summarize this report by presenting recent titles of the PhD and Master's theses in our group;

2017

- Formation of supermassive stars and black holes via direct gravitational collapse of primordial gas clouds
- Formation and growth of massive black holes in the early universe
- Measuring Dynamical Masses of Galaxy Clusters with Stacked Phase Space
- GCM simulation of Earth-like planets for photometric lightcurve analysis
- Tidal disruption events of white dwarfs caused by black holes
- Radio, Submillimetre, and Infrared Signals from Embryonic Supernova Remnants

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

21 Murao Group

Research Subjects: Quantum Information Theory

Member: Mio Murao and Akihito Soeda

Quantum mechanics allows a new type of information represented by quantum states which may be in a superposition of 0 and 1 state. Quantum information processing seeks to perform tasks which are impossible or not effective with the use of conventional classical information, by manipulating quantum states to the limits of quantum theory. Examples are quantum computation, quantum cryptography, and quantum communication.

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 6 graduate students–Atsushi Shimbo (D3), Ryosuke Sakai (D2), Hayata Yamasaki (D2), Qingxiuxiong Dong (M2), Paula Belzig (USTEP graduate student from University of Cologne), and Tian-Jiao Yin (research student). Our projects worked in the academic year of 2017 were the following:

- Higher-order quantum operations
  - Equivalence determination of unitary operations by A. Shimbo, A. Soeda, and M. Murao
  - Universal quantum algorithm to invert a blackboxed unitary opertation by M.T. Coelho Quintino
  - Higher-order quantum operations based on amplitude amplification by A. Soeda and M. Murao with S. Shojun at National Institute of Informatics
- Quantum information processing on hybridized quantum systems–Robust control of two-qubit quantum gates on Hamiltonian-driven systems by R. Sakai, A. Soeda, and M. Murao with D. Burgarth at Aberystwyth University
- Distributed quantum information processing and entanglement
  - Necessary amount of quantum communication for distributed encoding and decoding of quantum information by H. Yamasaki and M. Murao

  - Distributed generation of multipartite entangled state with restricted quantum memories by H. Yamasaki and M. Murao with B. Kraus and A. Pirker at the University of Innsbruck

- Foundations on quantum mechanics
  - Quantum maps implementable when multiple copies of the input state are available by Q. Dong, A. Soeda, and M. Murao
  - Quantum nonlocality with sequential measurements beyond local pre-processing by P. Belzig, M.T. Coelho Quintino, and M. Murao
  - Genuine triplewise measurement incompatibility by M.T. Quintino with D. Cavalcanti at The Institute of Photonic Sciences (ICFO) and A. Cabello at Universidad de Sevilla

- Information theoretic analysis of multipartite quantum states
  - Markovianity of stationary states in one-dimensional open quantum systems by K. Kato with B. Sahinoglu and F. Brandao at California Institute of Technology
  - Analysis based on matrix product operations for entanglement in two-dimensional systems by K. Kato
  - Entropic order parameter of topological by K. Kato with P. Naaijkens at Aachen University

Please refer our webpage: http://www.eve.phys.s.u-tokyo.ac.jp/indexe.htm for more details. The publication list for the year is available at the end of the Japanese version of the group research summary.

22 Ueda Group

Research Subjects: Bose-Einstein condensation, fermionic superfluidity, topological phenomena, reservoir engineering, information thermodynamics, quantum information, measurement theory

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 coarsening dynamics in spinor BECs, non-unitary dynamics in driven-dissipative systems, Efimov physics and impurity problems under the control of an atomic interaction strength, (quantum) Hall effect in synthetic gauge fields, and thermalization of isolated quantum systems. We are also interested in relating fundamental concepts of quantum and statistical physics with information theory and exploring interdisciplinary fields that unify physics and information. In particular, we have recently worked on generalizations of the second law of thermodynamics and fluctuation theorems and the formulations of state reduction dynamics and Hamiltonian estimation in light of information flow under measurements and feedback controls. We list our main research subjects in FY2017 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms
  - Zeno Hall effect [1]
  - Quantum critical phenomena in parity-time-symmetric systems [2, 3]
  - Universality of an impurity in a Bose-Einstein condensate [4]

- Many-body interferometry of magnetic polaron dynamics [5]
- Universal coarsening dynamics of a one-dimensional spinor Bose gas [6]
- Topological influence between topological excitations [7]
- Phase diagram of ferromagnetic spin-1 bosons in optical lattices [8]

• Quantum Information, quantum measurement, and foundation of statistical mechanics
- Discrete time-crystalline order in cavity and circuit QED systems [9]
- Atypicality of most few-body observables [10]
- Finite-error metrological bounds on multiparameter Hamiltonian estimation [11]

[1] Z. Gong, S. Higashikawa, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **118**, 200401 (2017). Editors' suggestion.
[2] Y. Ashida, S. Furukawa, and M. Ueda, Nat. Commun. **8**, 15791 (2017).
[3] K. Kawabata, Y. Ashida, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **119**, 190401 (2017).
[4] S. M. Yoshida, S. Endo, J. Levinsen, and M. M. Parish, Phys. Rev. X **8**, 011024 (2018).
[5] Y. Ashida, R. Schmidt, L. Tarruell, and E. Demler, Phys. Rev. B **97**, 060302(R) (2018).
[6] K. Fujimoto, R. Hamazaki, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **120**, 073002 (2018).
[7] S. Higashikawa and M. Ueda, Phys. Rev. B **95**, 134520 (2017).
[8] K. H. So and M. Ueda, Phys. Rev. A **96**, 023628 (2017).
[9] Z. Gong, R. Hamazaki, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **120**, 040404 (2018).
[10] R. Hamazaki and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **120**, 080603 (2018).
[11] N. Kura and M. Ueda, Phys. Rev. A **97**, 010201 (2018).

23 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 in 2016. Below is the list of topics studied during the academic year 2017.

Cosmology of the early universe

- Higgs-R^2 inflation
- Anisotropic expansion in generalized G-inflation
- Spontaneous baryo and dark matter genesis after G-inflation
- Generalized second law of thermodynamics in stochastic inflation
- New physical renormalization scheme in QFT in curved space
- Negative electric conductivity in de Sitter space and its implication
- Simulation of axion electrodynamics
- Self heating of partial pair-annihilation of dark matter particles

Observational cosmology

- Observability of primordial nonGaussianity of tensor perturbation through B-mode polarization of CMB
- Modulation in CMB power spectrum
- Constraints on small-scale perturbation from dark matter minihalos
- angular correlation of 21cm line from minihalos

Gravitation

- Mass-radius relation of neutron stars in massive scalar-tensor theory
- Invertible transformation and degrees of freedom
- Stable black hole solution in shift symmetric Horndesky theory
- Mimetic gravity and cosmological perturbation
- Thermodynamic property of teleparallel gravity

Gravitational waves

- Stochastic gravitational waves from cosmic string loops
- Examining primordial black hole hypothesis of LIGO events

24 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 to develop physics understanding and technology to realize fusion energy. Spherical tokamaks are able to achieve high β, but non-inductive plasma current start-up is a formidable challenge. We collaborate with other fusion experiments within Japan and abroad, including JT-60SA, LHD, LATE, and QUEST.

Our present focus on TST-2 is the establishment of plasma current ramp-up method using lower-hybrid waves (LHW). Since FY2013, we have performed experiments using the capacitively-coupled combline (CCC) antenna. In FY2017, we investigated the difference of the current drive properties between the outboard-launch and top-launch antennas. The highest plasma current achieved with the present limiter configuration was 21, 26, 27 kA for the outboard-launch, top-launch, and reversed field top-launch scenarios, respectively. The reversed field top-launch scenario is equivalent to bottom-launch in forward-field.

Numerical simulation was able to explain the difference between the above three current drive scenarios qualitatively. The top-launch antenna excites waves at high phase-velocity and the generated fast electrons are more energetic compared to the outboard-launch antenna. In the bottom-launch (reversed-field top-launch) case, the phase-velocity increases initially, which results in even more energetic fast electrons.

Accurate antenna modeling is important for a quantitative prediction of lower-hybrid current drive. COMSOL (www.comsol.com) was used to model the outboard-launch and top-launch antennas in 3D. According to the simulation, it was found that the coupling was optimum in terms of the power flow and the wavenumber spectrum when the evanescent gap was 17–27 mm. Since COMSOL calculation needs to be performed on a single workstation with the present license, a 3D model based on open source libraries

was developed. Problems with mesh size ten times larger than previously possible were successfully solved on a supercomputer.

Integrated lower-hybrid current drive and MHD simulation has been developed on TST-2. Converged solution could be obtained in some cases. The present current drive simulation without MHD physics substantially overpredicts the experimentally observed plasma current. By solving the lower-hybrid current drive and MHD equilibrium self-consistently, it was found that the prediction approaches the experimental value.

Measurement of plasma diamagnetism was performed. It was found that the Ohmic plasma was paramagnetic, consistently with the result of the equilibrium reconstruction.

AC Ohmic heating is a method for pre-ionization, heating and current drive of a plasma by applying ∼1 kHz voltage on the Ohmic coil. A 1D model has been developed to explain the pre-ionization process. Inclusion of ExB drift and AC electric field was found to improve the agreement between the model and the experimental observation. Secondary electron emission was found to be small at the experimental condition.

Possibility of using baffle-cones for stray-light reduction was investigated for the Thomson scattering diagnostic. Cones with aperture sizes of 6, 8, 10 and 15 mm were fabricated and tested, but no improvement was observed. Microwave imaging reflectometer (MIR) is being developed in collaboration with NIFS. The diagnostic components and the data acquisition system were tested.

As a collaboration, Thomson scattering on QUEST is being developed. Thomson scattering measurement was performed for an ECH driven discharge. During the initial phase which had both 8.2 GHz and 28 GHz ECH, the electron temperature was high and the density was low. On the other hand, later in the discharge when only 28 GHz ECH was applied, the electron temperature was low and the density was high. Spectroscopy was performed on LATE plasmas. Inversion of the line-integrated measurement showed that the emission of CV, OV peaked at around the magnetic axis. Soft X-ray imaging diagnostics were developed in collaboration with PPPL. The dimension of the diagnostic was optimized by simulating the X-ray radiation with the target experimental condition of DIII-D. It was found that, with Ar injection, 0.5 cm spatial resolution and 2 ms time resolution could be achieved at the pedestal region. Similar optimization was performed for MST.

25 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) Absorbing state phase transition and laminar-turbulent transition
   (2) Non-equilibrium phenomena in electroconvection of liquid crystals [3]

2. Active matters
   (1) Theory on active softmatter [5]
   (2) Collective motion of self-driven colloidal particles [7]
   (3) Collective motion of filamentous proteins

3. Biological systems
   (1) Traction force of collectively migrating neural stem cells
   (2) Theory on mechanics of cellular dynamics and morphogenesis [4]

[1] K. Kawaguchi, R. Kageyama and M. Sano: Topological defects control collective dynamics in neural progenitor cell cultures, Nature, **545**, 327–331 (2017).

[2] T. Yamamoto and M. Sano: Chirality-induced helical self-propulsion of cholesteric liquid crystal droplets, Soft Matter, **13**, 3328–3333 (2017).

[3] Y. T. Fukai and K. A. Takeuchi: Kardar-Parisi-Zhang Interfaces with Inward Growth, Phys. Rev. Lett. **119**, 030602 (2017).

[4] T. Hiraiwa, E. Kuranaga and T. Shibata: Wave Propagation of Junctional Remodeling in Collective Cell Movement of Epithelial Tissue: Numerical Simulation Study, Front. in Cell and Dev. Biol. **5**, 66 (2017).

[5] T. Ohta: Dynamics of deformable active particles, J. Phys. Soc. Jpn, **86**, 072001 (2017).

[6] T. Yamamoto and M. Sano: Theoretical model of chirality-induced helical self-propulsion, Phys. Rev. E, **97**, 012607/1–11 (2017).

[7] D. Nishiguchi, J. Iwasawa, H.-R. Jiang and M. Sano: Flagellar dynamics of chains of active Janus particles fueled by an AC electric field, New Journal of Physics, **20**, 015002/1–14 (2018).

26 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 Yoko Oya

Molecular clouds are birthplaces of new stars and planetary systems, which are being studied extensively as an important target of astronomy and astrophysics. Although the main constituent of molecular clouds is a hydrogen molecule, various atoms and molecules also exist as minor components. The chemical composition of these minor species reflects formation and evolution of molecular clouds as well as star formation processes. It therefore tells us how each star has been formed. We are studying star formation processes from such 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 understandings 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. The discovery of WCCC clearly indicates a chemical diversity of low-mass star forming regions, because only hot corino chemistry, which are rich in unsaturated carbon-chain molecules and deficient in carbon-chain molecules, have so far been recognized. The chemical diversity would reflect the star formation history of each source.

We are now studying how such chemical diversity is brought into protoplanetary disks by using ALMA. For the WCCC source L1527, we have found that carbon-chain molecules only exist in an infalling-rotating envelope outside the centrifugal barrier ($r = 100$ AU), while SO preferentially exists around the centrifugal barrier. For the hot corino source IRAS 16293-2422, OCS traces an infalling-rotating envelope, while saturated organic molecules such as CH_3OH and $HCOOCH_3$ trace the centrifugal barrier. Hence, chemical compositions drastically change across the centrifugal barrier of the infalling gas. Further studies with ALMA 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. 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. We successfully observed the Orion A molecular cloud in

the ^{13}CO $J = 8 - 7$ line emission. This receiver is now used for laboratory spectroscopy of interstellar molecules at RIKEN.

[1] Sakai, N. and Yamamoto, S., "Warm Carbon-Chain Chemistry" , Chemical Reviews, **113**, 8981 (2014).
[2] Sakai, N. et al., "Change in the Chemical Composition of Infalling Gas Forming a Disk around a Protostar" , Nature, **507**, 78, (2014).
[3] Oya, Y. et al. "Infalling-Rotating Motion and Associated Chemical Change in the Envelope of IRAS 16293-2422 Source A Studied with ALMA" , Astrophys. J. bf 824, 88 (2016).

27 Sakai (Hirofumi) Group

Research Subjects: Experimental studies of atomic, molecular, and optical physics

Members: Hirofumi Sakai and Shinichirou Minemoto

Our research interests are as follows: (1) Manipulation of neutral molecules based on the interaction between a strong nonresonant laser field and induced dipole moments of the molecules. (2) High-intensity laser physics typified by high-order nonlinear processes (ex. multiphoton ionization and high-order harmonic generation). (3) Ultrafast phenomena in atoms and molecules in the attosecond time scale. (4) Controlling quantum processes in atoms and molecules using shaped ultrafast laser fields. A part of our recent research activities is as follows:

(1)Orientation dependence in multichannel dissociative ionization of OCS molecules [1]

With 800-nm, 25-fs elliptically polarized ionization pulses, we observe molecular frame photoelectron angular distributions (MF-PADs) correlated with different dissociative ionization channels: $OCS^+ \rightarrow S^+$+CO, CO^++S, CS^++O, and O^++CS. We find that the asymmetry in the MF-PAD depends on the specific dissociation channel and the laser intensities. For the dissociation channel leading to the production of O^+, the OCS molecules are more likely to be ionized when the electric field points toward the O atom, while for other dissociation channels, they are more likely to be ionized when the electric field points toward the S atom.

(2) Ar 3p photoelectron sideband spectra in two-color XUV + NIR laser fields [2]

We performed photoelectron spectroscopy using femtosecond XUV pulses from a free-electron laser and femtosecond near-infrared pulses from a synchronized laser, and succeeded in measuring Ar 3p photoelectron sideband spectra due to the two-color above-threshold ionization. In our calculations of the first-order time-dependent perturbation theoretical model based on the strong field approximation, the photoelectron sideband spectra and their angular distributions are well reproduced by considering the timing jitter between the XUV and the NIR pulses, showing that the timing jitter in our experiments was distributed over the width of $1.0^{-0.2}_{+0.4}$ ps. The present approach can be used as a method to evaluate the timing jitter inevitable in FEL experiments.

This work was done as a collaborative study with researchers from KEK, Kyoto University, Institute of Solid State Physics (The University of Tokyo), Japan Synchrotron Radiation Research Institute, and RIKEN SPring-8 Center.

[1] Yusuke Sakemi, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Orientation dependence in multichannel dissociative ionization of OCS molecules," Phys. Rev. A **96**, 011401(R) (2017) (6 pages).

[2] Shinichirou Minemoto, Hiroyuki Shimada, Kazma Komatsu, Wataru Komatsubara, Takuya Majima, Tomoya Mizuno, Shigeki Owada, Hirofumi Sakai, Tadashi Togashi, Shintaro Yoshida, Makina Yabashi, and Akira Yagishita, "Ar 3p photoelectron sideband spectra in two-color XUV + NIR laser fields," J. Phys. B **51**, 075601 (2018) (8 pages).

28 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 materials 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. Fabrication of Moth-Eye THz Anti-Reflection Structures by Femtosecond Laser Processing
   - 2.2. Generating Intense Terahertz Pulses with Longitudinal Electric fields
   - 2.3. Fabrication of quasi-metallic three-dimensional structures with 3D printing and supercritical fluid deposition
   - 2.4. Observation of optically induced multiferroicity
   - 2.5. Therotetical investigation of process of higher harmonic generation of solids
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. Label-free microscope using coherent Raman spectroscopy
   - 3.4. "Photon ring" project
   - 3.5. Institute for Photon Science Technology

29 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] T. Akutsu, M. Ando, S. Araki, et al. (KAGRA Collaboration), Construction of KAGRA: an underground gravitational-wave observatory, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2018, 013F01 (2018).

[2] Yuta Michimura, Tomofumi Shimoda, Takahiro Miyamoto, et al., Mirror actuation design for the interferometer control of the KAGRA gravitational wave telescope, Classical and Quantum Gravity 34, 225001 (2017).

[3] Yuta Michimura, Yuya Kuwahara, Takafumi Ushiba, Nobuyuki Matsumoto, Masaki Ando, Optical levitation of a mirror for reaching the standard quantum limit, Optics Express 25, 13799 (2017).

[4] Ayaka Shoda, Yuya Kuwahara, Masaki Ando, et al., Ground-based low-frequency gravitational-wave detector with multiple outputs Physical Review D95, 082004 (2017).

30 Bamba-Nakazawa Group

Research Subjects: High-energy astrophysics, mainly utilizing X-ray observatories in orbit. Targets are, supernova remnants, black-holes, neutron-stars, magnetars, white dwarfs, 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. Supernova remnants are the origin of diversity of the universe, in the context of chemical evolution, cosmic ray acceleration, and the explosion mechanism of supernovae.

For further better observations, we also developed 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. Although the life-time as an observatory was only $\sim$ 1 month, we made a lot of scientific achievement with more than 10 refereed papers. Now the recovery mission of Hitomi, XARM, is planned, and it is aimed to launch on fiscal year of $\sim$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] Hitomi Collaboration, A. Bamba, K. Nakazawa, et al., "Solar abun dance ratios of the iron-peak elements in the Perseus cluster", Nature, 551, 478 (2017)

[2] A. Bamba, Y. Ohira, R. Yamazaki, M. Sawada, Y. Terada, K. Koyama, E.D. Miller, H. Yamaguchi, S. Katsuda, M. Nobukawa, K.K. Nobukawa, "The Transition from Young to Middle-aged Supernova Remnants: Thermal and Nonthermal Aspects of SNR N132D", ApJ, 854, 71 (2018)

[3] Hitomi Collaboration, A. Bamba, K. Nakazawa et al., "Hitomi observations of the LMC SNR N 132 D: Highly redshifted X-ray emission from iron ejecta", PASJ, 70, 16 (2018)

[4] V. Doroshenko, V, G. Puehlhofer, A. Bamba, F. Acero, W.W. Tian, D. Klochkov, A. Santangelo, "XMM-Newton observations of the non-thermal supernova remnant HESS J1731-347 (G353.6-0.7)", A&A, 608, 23 (2017)

[5] T. Enoto, Y. Wada, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, K. Okuda, K. Makishima, M. Sato, Y. Sato, T. Nakano, D. Umemoto, H. Tsuchiya, ""Photonuclear reactions triggered by lightning discharge", Nature, Volume 551, Issue 7681, pp. 481-484 (2017)

31 Kusaka Group

Research Subjects: Observational Cosmology, Cosmic Microwave Background (CMB) Observation. (1) Study of Inflation in the early universe and the evolution of the universe through gravitational lensing using POLARBEAR and Simons Array experiment; (2) Design, Development, and Construction of Simons Observatory aiming to study Inflation, evolution of the universe, Neutrinos, Dark Energy, and Dark Radiation; (3) Research and Development of technologies for Simons Observatory and CMB-S4.

Member: A. Kusaka and K. Kiuchi

- POLARBEAR experiment and its successor, Simons Array, are optimized to measure both inflationary signature and the gravitational lensing effect in CMB polarization. POLARBEAR experiment has just

concluded its observation campaign, and Simons Array experiment is about to be deployed. Our focus is on data analysis as well as the development and characterization of the continuously-rotating half-wave plate (HWP) enabling accurate measurement of CMB polarization.

- Simons Observatory experiment is planned for the first light in a few years. We plan to deploy an array of what we call "small aperture cameras," which are dedicated for the inflationary signal, and a six-meter "large aperture telescope," which enables observation for Neutrinos and the dark content of the universe. We are primarily focusing on the design and development for the small aperture camera.
- Research and Development for the next generation experiments such as Simons Observatory and CMB-S4 are crucial component of our research program. We specifically work on superconducting technologies used in the detectors and cryogenic bearing system for HWP. We also develop techniques for high-performance computation (HPC) enabling data analysis for new experiments producing order-of-magnitude larger data volume than the current instruments.

32 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.Divergent Connectivity of Homologous Command-like Neurons Mediates Segment-Specific Touch Responses in Drosophila.

Animals adaptively respond to a tactile stimulus by choosing an ethologically relevant behavior depending on the location of the stimuli. Here, we investigate how somatosensory inputs on different body segments are linked to distinct motor outputs in Drosophila larvae. Larvae escape by backward locomotion when touched on the head, while they crawl forward when touched on the tail. We identify a class of segmentally repeated second-order somatosensory interneurons, that we named Wave, whose activation in anterior and posterior segments elicit backward and forward locomotion, respectively. Anterior and posterior Wave neurons extend their dendrites in opposite directions to receive somatosensory inputs from the head and tail, respectively. Downstream of anterior Wave neurons, we identify premotor circuits including the neuron A03a5, which together with Wave, is necessary for the backward locomotion touch response. Thus, Wave neurons match their receptive field to appropriate motor programs by participating in different circuits in different segments. (Collaboration with Drs. Albert Cardona, Marta Zlatic, and James Truman groups at the Janelia Research Institute in the USA and Dr Hokto Kazama at RIKEN BSI)

2.Data-driven analysis of motor activity implicated 5-HT2A neurons in backward locomotion of larval Drosophila.

Rhythmic animal behaviors are regulated in part by neural circuits called the central pattern generators (CPGs). Classifying neural activities correlated with body movements and identifying component neurons associated with the activities are critical steps in understanding the workings of CPGs and animal locomotion. Here, we present a novel method for classifying motor activities in large-scale calcium imaging data of Drosophila larvae. The method is based on pre-trained convolutional neural network model VGG-16 and unsupervised learning, and successfully classified activities correlated with forward and backward locomotion in activity data of different types of neurons and under different imaging conditions. By applying these methods to neurons targeted by 5-HT2A-Gal4, we identified two classes of interneurons, termed Seta and

Leta, which are specifically active during backward but not forward fictive locomotion. Several behavior assays suggest that 5-HT modulates backward locomotion by acting on Seta and Leta neurons via the 5-HT2A receptor. This study establishes an accelerated pipeline for activity profiling and cell identification in larval Drosophila and implicates a serotonergic system in the modulation of backward locomotion. (Collaboration with Dr. Shu Kondo at NIG and Dr. Hiromu Tanimoto at Tohoku university)

References

[1] Takagi S, Cocanougher BT, Niki S, Miyamoto D, Kohsaka H, Kazama H, Fetter RD, Truman JW, Zlatic M, Cardona A, Nose A..: Divergent Connectivity of Homologous Command-like Neurons Mediates Segment-Specific Touch Responses in *Drosophila*. *Neuron*. 96(6): 1373-1387 (2017)

[2] Park, J., Kondo, S., Tanimoto, H., Kohsaka, H., Nose, A.: Data-driven analysis of motor activity implicated 5-ht2a neurons in backward locomotion of larval *Drosophila*. *bioRxiv* 257568 (2018)

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.

ATP-dependent step size and microtubule-binding time of single-headed dynein

Cytoplasmic dynein is a molecular motor moving toward the minus end of microtubules. From the strutural studies, the swing of the linker, called as the power stroke, is supposed to be cruicial to walk processively. However, there is no direct evidence of the distance generated by the power stroke in the presence of ATP. Here, we investigated the displacement of microtubules driven by the power stroke of single-headed dynein at the varied ATP concentration using optical tweezers. The displacement dynein drived microtubules sigmoidally decreased from 8 to 0 nm as ATP concentration decreased. To verify the relationship between the displacement and the linker swing, we also measured the ATP dependent FRET efficiency of dynein, in which BFP was fused in AAA2 domain and GFP was fused at the N-terminal of the linker, in the absence of microtubule. Altogether, we proposed that the population of dynein binding to microtubules at pre/apo state decreased/increased as ATP concentration decreased and that the power stroke size was determined to be 8.3 nm. To determine the mechanochemical rates of dynein-microtubule complex, we analyzed the microtubule-binding time. The binding time increased moderately as ATP concentration decreased. The rate constants was calculated by fitting the distributions of binding time globally to the reaction model. The transition rate of dynein-microtubule complex from pre to apo state was 12 s^{-1}, which was close to the maximum ATPase rate. The dissociation rate of dynein from microtubule was relatively fast (8 s^{-1}) at apo-state, indicating that dynein dominantly dissociated from microtubule without binding to ATP at the low ATP concentration. Our new findings of step size and rate constants would be crucial for understanding the molecular mechanism of dimeric dynein.

Understanding the precise movement of vesicle on cytoskeleton in living cancer cell

A live cell maintains its intracellular homeostasis mainly through engulfing the extracellular molecules, which is called endocytosis. The molecules taken inside the cell form a vesicle, and it is known to be delivered from the cell periphery to the centrosome, which is located near the nucleus. The process of this delivery is referred to the cellular transport, and the mechanism of cellular transport is widely studied in the field of biophysics, since it is considered to include key information about the drug delivery. In fact, thanks to previous researches, now we know that the vesicles internalized into cytoplasmic area is transported by cytoskeletons, such as microtubule and actin filament, recruited by motor proteins. However, the

precise movement of the vesicle in a complex network structure of cytoskeletons is not yet fully understood. In this research, we report a characteristic rotational movement of an endocytic vesicle on microtubule network in a live cancer cell. In the experiment, vesicles are labeled with quantum dot and visualized by three-dimensional fluorescence microscopy using dual focus optics, with high spatiotemporal resolution, 3 nm and 100 Hz, respectively. When the trajectory of a vesicle is analyzed via linear regression method based on principal component analysis and vector calculation, it is possible to categorize the type of vesicle movement, active transport and random diffusion. Using this method, the position and orientation of cytoskeleton can be estimated as a linear axis in the active transport section. Interestingly, linear movement section where active transport occurs showed a characteristic rotational movement along the direction of travel, and the angular velocity of the rotation is nonlinear. During the active transport, there were two different stages that the vesicle movement shows steady angular velocity and quick turn. Also, the direction of rotation is either left-handed and right-handed without preference, and the pitch of rotation is broadly distributed from hundreds of nanometers to a few micrometers. Additionally, since the velocity on the active transport is turned to be about 1 micrometer per second, which is similar to the dynein velocity, the probability is high that the rotational movement of a vesicle is based on the microtubule. Using the identical cell line with tubulin-GFP, it is proved that the rotational movement is occurred on the microtubule, via the correlative and simultaneous imaging of microtubule and endocytic vesicle.

Damage of cancer cells evaluated by intensity fluctuation of images under phase contrast microscope

Selective removal of cancer cell without side effects is necessarily for cancer therapy. Phototoxic dyes such as IR700 specifically delivered to cancer cells and the cells were photodamage by reactive oxygen species (ROS). Surviving cancer cells damaged by oxidative stress could obtain resistant to the therapy. Here to understand the effects of phototoxic dyes and detect resistant cancer cells, we developed a method to measure quantitatively cell damages induced by ROS of IR700. We evaluated cell damage by calculating the intensity fluctuation of each pixel in cell images under phase contrast microscopy. We succeeded in quantifying the change in motility of cell organelles by this method. IR700 was labeled with the antibody which binds specifically to target cells. IR700-antibody complex was endocytosed into cultured cells and then cell was photodamaged by illumination of red laser (650 nm). The degree of cell damage was controlled by adjusting the irradiation time of red laser. The motility of cell organelles detected by the intensity fluctuation method decreased gradually with a progression of cell damage. To elucidate the mechanisms of decrease in the organelles motility, we analyzed the effects of photoactivation of IR700 on activities of organelles and motor proteins. Lysosomes containing IR700 in cells were damaged quickly by the photoactivation of IR700 and the contents in lysosomes were diffused out into cytoplasm. The contents diffused from lysosomes caused the dysfunction of transporter kinesin and mitochondria. Therefore, these damages of organelles and motors may be a primary factor for causing decrease of organelles motility. These results suggested that the cell organelles motility is a primary indicator of cell viability.

34 Okada Group

Research Subjects: Biophysics, cell biology, super-resolution microscopy, live cell imaging and single molecule imaging.

Member: Yasushi Okada, Sawako Enoki and Keigo Ikezaki

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].

These super-resolution imaging technologies were applied to various biological samples, including early mouse embryos [4], axonal transport [5], synapse of retinal photoreceptor cells [6] and genome DNA in nucleus [7].

[1] Uno S, et al. 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

[4] Minegishi K, et al. A Wnt5 Activity Asymmetry and Intercellular Signaling via PCP Proteins Polarize Node Cells for Left-Right Symmetry Breaking. Dev Cell. 40:439-452, 2017

[5] Chiba K, et al. Phosphorylation of KLC1 modifies interaction with JIP1 and abolishes the enhanced fast velocity of APP transport by kinesin-1. Mol Biol Cell, 28:3857-3869, 2017

[6] Ueno A, et al. Lrit1, a Retinal Transmembrane Protein, Regulates Selective Synapse Formation in Cone Photoreceptor Cells and Visual Acuity. Cell Rep. 22:3548-3561, 2018

[7] Nozaki T, et al. Dynamic Organization of Chromatin Domains Revealed by Super-Resolution Live-Cell Imaging. Mol Cell. 67:282-293, 2017

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 metabolic systems
4. Analysis of amoeba morphogenesis using phase-field models
5. Theoretical analysis for collective motion of molecular motors

References

[1] 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 **33**(15), 2314-2321 (2017).

[2] S. Suzuki, T. Horinouchi and C. Furusawa: Acceleration and Suppression of Resistance Development by Antibiotic Combinations, BMC Genomics, **18**(1), 328 (2017).

[3] 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. **8**, 15589 (2017).

[4] A. Germond, V. Kumar, T. Ichimura, J. Moreau, C. Furusawa, H. Fujita, T. M. Watanabe: Raman spectroscopy as a tool for ecology and evolution, Jour. Roy. Soc. Interface **14**(131) 20170174 (2017).

[5] T. Horinouchi, A. Sakai, H. Kotani, K Tanabe, C. Furusawa: Improvement of isopropanol tolerance of Escherichia coli using adaptive laboratory evolution and omics technologies, Jour. Biotech **255**, 47-56 (2017).

[6] T. Horinouchi, S. Suzuki, H. Kotani, K. Tanabe, N. Sakata, H. Shimizu, C. Furusawa: Prediction of Cross-resistance and Collateral Sensitivity by Gene Expression profiles and Genomic Mutations, Sci. Rep. **7**(1), 14009 (2017).

[7] T. S. Hatakeyama, C. Furusawa: Metabolic dynamics restricted by conserved carriers: Jamming and feedback, PLoS Comp. Biol. **13**(11), e1005847 (2017).

[8] A. Shibai, Y. Takahashi, Y. Ishizawa, D. Motooka, S. Nakamura, B. W. Ying, S. Tsuru: Mutation accumulation under UV radiation in Escherichia coli, Sci. Rep. **7**(1), 14531 (2017).

[9] C. Furusawa, T. Horinouchi, T. Maeda: Toward prediction and control of antibiotic-resistance evolution, Curr. Opin. Biotechnol. **54**, 45-59 (2018).

[10] T. Hirasawa, M. Saito, K. Yoshikawa, C. Furusawa, H. Shimizu: Integrated Analysis of the Transcriptome and Metabolome of Corynebacterium glutamicum during Penicillin-Induced Glutamic Acid Production, Biotechnol. Jour., in press

[11] K. Tokuyama, Y. Toya, T. Horinouchi, C. Furusawa, F. Matsuda, H. Shimizu: Application of adaptive laboratory evolution to overcome a flux limitation in an Escherichia coli production strain, Biotechnol. Bioeng., in press

[12] K. Kaneko and C. Furusawa: Macroscopic Theory for Evolving Biological Systems Akin to Thermodynamics, Annu. Rev. Biophys., in press

[13] C. Furusawa and K. Kaneko: Formation of Dominant Mode by Evolution in Biological System, Phys. Rev. E, in press

III

2017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：駒宮 幸男

1. 特殊相対性理論
- **1.1** ニュートン力学における時間と空間
- **1.2** Michelson-Morley の実験と光速不変の原理
- **1.3** ローレンツ変換
- **1.4** ミンコフスキー時空
- **1.5** 速度の合成
- **1.6** 時間のパラドックスと因果律
- **1.7** ローレンツスカラー、ベクトル、テンソル

2. 相対論的運動学
- **2.1** 質点の相対論的方程式
- **2.2** 重心系 (Center of Momentum System)
- **2.3** 粒子の衝突・崩壊の運動学

3. 電場
- **3.1** クーロンの法則とガウスの法則
- **3.2** 電位
- **3.3** 動いている電荷による電場
- **3.4** 動いている電荷どうしに働く力

4. 磁場
- **4.1** 磁場の性質
- **4.2** 磁場の満たす方程式
- **4.3** ベクトルポテンシャル
- **4.4** 電磁場のローレンツ変換

5. 電磁誘導とマックスウエルの方程式
- **5.1** 電磁誘導の基礎
- **5.2** 相互誘導と自己誘導
- **5.3** 変位電流
- **5.4** マックスウエルの方程式

6. 準定常電磁場と交流理論
- **6.1** 準静的過程
- **6.2** 交流回路

7. 電磁場中での荷電粒子の運動
- **7.1** 一様な静電場中での運動
- **7.2** 一様な静磁場中での運動
- **7.3** 一様な電磁場中での運動
- **7.4** 電磁場のエネルギー運動量保存則

8. 相対論的な電磁気学の形式

1.1.2　解析力学：常行 真司

1. ニュートンの法則からラグランジュ形式へ
- **1.1** ニュートンの法則
- **1.2** ガリレイ変換
- **1.3** オイラー-ラグランジュ方程式
- **1.4** 一般化座標と拘束条件
- **1.5** ダランベールの原理
- **1.6** ホロノーム系に対するラグランジュ方程式

2. 最小作用の原理
- **2.1** 最小作用の原理
- **2.2** オイラー-ラグランジュ方程式の導出
- **2.3** 自由粒子のラグランジアン
- **2.4** 相互作用する質点からなる孤立系のラグランジアン
- **2.5** ラグランジュ未定乗数法と拘束条件

3. 対称性と保存則
- **3.1** 時間の一様性 → エネルギー保存則
- **3.2** 空間の一様性 → 運動量保存則
- **3.3** 空間の等方性 → 角運動量保存則
- **3.4** 循環座標
- **3.5** ネーターの定理

4. さまざまなラグランジアン

4.1 回転座標系とコリオリ力
4.2 ローレンツ力
4.3 摩擦のある系
5. ハミルトン形式と正準変換
5.1 ルジャンドル変換
5.2 ハミルトニアンと位相空間
5.3 正準方程式
5.4 正準変換と母関数
5.5 正準変換の例
5.6 正準変換の条件
5.7 無限小変換
5.8 ポアソン括弧式
5.9 ポアソン括弧式と正準方程式
5.10 ポアソン括弧式と無限小変換
5.11 ハミルトン-ヤコビの方程式
5.12 リウヴィルの定理
6. 補遺
6.1 相対論における解析力学
6.2 分子動力学法

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 : 酒井 広文, 藤森 淳

1. 序論 (物理実験の魅力)
2. 単位
2.1 SI 基本単位の定義
2.2 代表的な物理量の単位
2.3 各種の常用単位系とその変換
3. 各種の計測法
3.1 レーザーの基礎と光の計測
3.2 放射線の基礎とその計測
4. 実験の基礎技術
4.1 実験環境技術
4.2 試料作製技術
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

1.1.5 物理数学 I：松尾 泰

Part I 複素関数論
1. 無限和と収束性
2. 複素関数
3. 正則関数の基本的な性質
4. 多価関数とリーマン面
5. 複素積分：応用例
6. デルタ関数
7. 部分分数展開、無限積表示
8. ガンマ関数・ベータ関数・ゼータ関数、解析接続
9. 漸近展開と最急降下法
10. 等角写像
Part II 常微分方程式論

1. 解の存在と一意性
2. 積分により可解な微分方程式の例
3. 線形微分方程式
4. Laplace 変換

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. 静電場
1.1 基本法則
1.2 電荷分布と静電場
1.3 物質があるときの静電場
1.4 境界値問題
2. 静磁場と準性的な磁場
2.1 基本法則
2.2 磁気双極子モーメント
2.3 物質の磁化
2.4 境界値問題
2.5 準静的な磁場と電磁誘導
3. Maxwell の方程式と保存則
3.1 物質中の Maxwell 方程式
3.2 電磁ポテンシャル
3.3 電磁場のエネルギー
3.4 電磁場の運動量
4. 電磁波
4.1 平面電磁波の基本的性質
4.2 反射と屈折
4.3 物質の交流電場に対する応答

1.2.2 量子力学 II：上田 正仁

1. シュレディンガー方程式の性質
2. 角運動量
3. スピン
4. 対称性と保存則
5. 摂動論
6. 準古典近似
7. 観測過程
8. EPR のパラドックス

1.2.3 現代実験物理学 I：福山 寛, 樋口 秀男

1. レーザー物理学
レーザー光学、画像処理、光学顕微鏡
2. 非平衡系物理学
ブラウン運動、生物の運動、生体分子の X 線

構造解析

3. 磁性と磁気測定
磁性の基礎、磁化・比熱測定、核磁気共鳴

4. 超伝導と物理実験
超伝導の基礎、超伝導電磁石、SQUID

5. 極低温と物理実験
極低温技術、断熱消磁冷却、粒子線検出器

6. ナノスケールの物理と計測
走査プローブ顕微/分光法、ナノテクノロジー

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 I : 藤堂 眞治

1. UNIX の基礎

1.1 UNIX コマンド

1.2 C 言語プログラミング

1.3 Gnuplot によるグラフ作成

1.4 LaTeX による文書作成

2. 数値誤差・数値積分・ニュートン法

3. 常微分方程式

3.1 初期値問題と境界値問題

3.2 Euler 法・Runge-Kutta 法

3.3 陽解法と陰解法

3.4 Numerov 法

3.5 シンプレクティック積分法

4. 連立一次方程式

4.1 物理に現れる連立一次方程式

4.2 ガウスの消去法・LU 分解

4.3 逆行列の求め方

4.4 LAPACK の利用

4.5 反復解法

5. 固有値問題

5.1 行列の性質・べき乗・指数関数

5.2 Jacobi 法・Givens 法・Householder 法

5.3 疎行列に対する反復法・べき乗法・Rayleigh-Ritz の方法・Lanczos 法

5.4 特異値分解・一般化逆行列
5.5 行列の低ランク近似
5.6 最小二乗法

講義資料は、https://exa.phys.s.u-tokyo.ac.jp/ja/lectures で公開。

1.3 3年生 Aセメスター

1.3.1 光学 : 井手口 拓郎, 湯本 潤司

1. 光学入門
2. 幾何光学
3. 波動光学
4. 回折、フーリエ光学
5. 偏光光学
6. ビーム光学
7. 電磁波光学
8. 光の統計性
9. 光増幅器
10. 導波光学（平面導波路）
11. 導波光学（光ファイバー）

1.3.2 物理数学 III : 立川 裕二

1. 群の基本的な性質
1.1 群の定義と例
1.2 群の作用と軌道
1.3 群の同型、部分群
1.4 準同型と正規部分群
2. 群に関する幾つかの話題
2.1 SO(3) の有限部分群について
2.2 結晶群の話
2.3 SO(3) と SU(2) の関係
2.4 古典群の話
2.5 有限群の話
3. 群の表現
3.1 可換群の場合
3.2 有限群の場合
3.3 コンパクト連続群の場合
3.4 リー代数とルート系、その分類
4. 雑多な話題
4.1 スピノル表現によるイジング模型の解法
4.2 Monstrous Moonshine の話

1.3.3 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

1.3.4 生物物理学 : 岡田 康志, 樋口 秀男

1. 生命とは何か、生命誕生と遺伝情報
2. タンパク質の構造と安定性

3. タンパク質の 1 分子機能
4. 筋肉運動の分子論
5. エネルギー生産系
6. 細胞内の分子たち
7. 人体の分子による制御
8. 神経科学概論
9. 細胞膜の電気的性質 **1.** 平衡電位と静止電位
10. 細胞膜の電気的性質 **2.** 活動電位と **H-H** 方程式
11. 細胞膜の電気的性質 **3.** ケーブル理論と伝導速度
12. シナプスと可塑性
13. チャネル、ポンプ、レセプター
14. 神経細胞の生物物理学

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 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

1.3.7 現代実験物理学 II：浅井 祥仁, 横山 将志

1. 素粒子と物質の相互作用
2. 相対論的運動学
3. 実験データと統計処理/統計現象の扱い方
4. 粒子加速器
5. 素粒子実験の検出器
6. ニュートリノ実験
7. ヒッグス粒子の見つけ方
8. 超対称性粒子の探し方
9. 暗黒物質の探し方

1.3.8 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

1.3.9 計算機実験 II : 藤堂 眞治

1. 対角化と量子力学
1.1 二重井戸ポテンシャル
1.2 積分による解法
1.3 二分法
1.4 対角化による解法
1.5 解析計算による次元削減
2. モンテカルロと統計力学
2.1 多体系の統計力学
2.2 モンテカルロ積分
2.3 疑似乱数
2.4 マルコフ連鎖モンテカルロ
3. 行列の方法・分子動力学と統計力学
3.1 数え上げ
3.2 転送行列法
3.3 C 言語における行列・LAPACK の利用
3.4 分子動力学法
4. 最適化
4.1 最適化問題
4.2 ニュートン法
4.3 囲い込み法
4.4 最急降下法・勾配降下法・共役勾配法
4.5 Nelder-Mead の滑降シンプレックス法
4.6 シミュレーテッド・アニーリング

講義資料は、`https://exa.phys.s.u-tokyo.ac.jp/ja/lectures` で公開。

1.4 4年生 Sセメスター

1.4.1 場の量子論 I : 濱口 幸一

0. Introduction
0.1 Course objectives
0.2 Quantum Mechanics and Quantum Field Theory
0.3 Notation and convention
0.4 Various fields
0.5 Outline
0.6 S-matrix, amplitude $M \Rightarrow$ observables
1. Scalar (spin 0) Field
1.1 Lorentz transformatin
1.2 Lagrangian and Canonical Quantization of Scalar Field
1.3 Equation of motion
1.4 Free Scalar Field
1.5 Interacting Scalar Field
1.5.1 What is $\phi(x)$?
1.5.2 In/out states and the LSZ Reduction Formula
1.5.3 Heisenberg field and Interactin picture field
1.5.4 a and $a^\dagger$ (again)
1.5.5 $\langle 0|T(\phi(x)...)|0\rangle$ =?
1.5.6 Wick's theorem
1.5.7 Summary, Feynman rules, examples
2. Fermion (spin 1/2) Field
2.1 Representations of the Lorentz Group
2.1.1 Lorentz Transformation of coordinates (again)
2.1.2 Infinitesimal Lorentz Transformation and generators of Lorentz group (in the 4-vector basis)
2.1.A Other (disconnected) Lorentz transformations
2.1.3 Lorentz transformations of fields, and representations of Lorentz group
2.1.4 Spinor Fields
2.1.5 Lorentz transformation of spinor bilinears
2.2 Free Dirac Field
2.2.1 Lagrangian
2.2.2 Dirac equation and its solution
2.2.3 Quantization of Dirac field

1.4.2 サブアトミック物理学 : 相原 博昭

1. Elementary Particle Physics
1.1 Species of elementary particles

1.2 Interactions and gauge bosons
1.3 Relativistic kinematics
1.4 Particle and anti-particles
1.5 Structures of subatomic particles
1.6 Gauge theory and electroweak unified theory
1.7 Higgs mechanism/ Higgs physics
2. Nuclear Physics
2.1 Hadrons and quarks
2.2 Nuclear force
2.3 Structure of nuclei
2.4 Nuclear reactions
3. Nuclear Energy
3.1 Nuclear fission
3.2 Nuclear fusion
3.3 Nuclear reactors
3.4 Breeder reactors
4. Particle Accelerators
5. Nuclear Medicine

1.4.3 一般相対論 : 横山 順一

1. 序論　等価原理と一般相対性原理
1.1 等価原理
1.2 一般相対性原理
1.3 一般相対論の物理世界
2. 数学的準備
2.1 相対論に於ける物理量 スカラーとベクトル
2.2 双対空間
2.3 テンソル
2.4 計量テンソル
2.5 内積とテンソルの縮約
2.6 微分
2.7 計量テンソルの共変微分とクリストッフェル記号
2.8 リーマンの曲率テンソル
3. 曲がった時空の物理
3.1 曲率テンソルその 2
3.2 重力場中の自由粒子の運動方程式
3.3 ニュートン極限
3.4 測地線と測地線偏差
3.5 ビアンキの恒等式
3.6 対応原理
3.7 正準エネルギー運動量テンソル
3.8 曲がった時空におけるエネルギー運動量テンソル
3.9 エネルギー運動量テンソルの現象論的定義
4. 一般相対論
4.1 アインシュタイン方程式
4.2 作用原理
5. 球対称時空
5.1 球対称真空解
5.2 重力による時間の遅れと光の赤方偏移
5.3 シュバルツバルト時空における粒子の運動
5.4 水星の近日点移動
5.5 光線の屈曲
5.6 シャピーロ遅延
6. ブラックホール
6.1 シュバルツシルトブラックホール
6.2 事象の地平線
6.3 座標系について
7. 重力波
7.1 弱重力下の線形化したアインシュタイン方程式
7.2 摂動変数のゲージ自由度
7.3 重力波の伝播
7.4 重力波の放出
8. 宇宙論
8.1 宇宙原理と Robertson-Walker 計量
8.2 ルメートルフリードマン宇宙

1.4.4 宇宙物理学 : 馬場 彩

1. 万有引力の法則から見る宇宙と天体
2. 電磁波の法則から見る宇宙と天体
3. 星の基礎物理
4. 星の進化と終末
5. 縮退星（白色矮性と中性子星）とブラックホール
6. 膨張宇宙の性質
7. 初期の宇宙
8. 宇宙の超高エネルギー現象
9. 宇宙観測の今

1.4.5 固体物理学 II：林 将光

0. 現代固体物理学
1. バンド理論
1.1 ブロッホの定理
1.2 強束縛近似
1.3 グラフェン
1.4 ディラック方程式
1.5 半導体
1.6 クラインパラドックス
1.7 状態密度
2. 伝導
2.1 電気伝導
2.2 2次元電子系
2.3 ホール効果
2.4 ランダウ準位
2.5 整数量子ホール効果
3. 磁性
3.1 交換相互作用
3.2 フント則
3.3 ハバードモデル
3.4 ストーナーモデル
3.5 スピン依存伝導
3.6 スピン流とスピントルク
3.7 ラシュバ模型

1.4.6 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

1.4.7 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

1.4.8 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. **Ising** 模型の厳密解（１次元、２次元）
3. **Landau** 理論と揺らぎ
4. **Gaussian** 理論
5. スケーリング
6. 繰込み群のアイデア
7. 波数空間繰込み群
8. ε 展開と **Wilson-Fisher** 固定点
9. 連続対称性（**O**(N) 模型、非線形シグマ模型など）
10. **Kosterlitz-Thouless** 転移（２次元 **XY** スピン模型、渦励起、２次元 **Coulomb** 気体模型の繰込み群、超流動 **stiffness** など）

1.4.9 計算科学概論：大久保 毅 ほか６名

1. 格子スピン模型の計算科学
2. 高性能計算機のアーキテクチャ
3. 大規模疎行列固有値問題と量子多体問題
4.1 連続体の並列有限要素法解析入門
4.2 構造解析アプリケーションによる **CAE** 実践
5. プラズマの数値シミュレーション手法の解説
6. 高性能プログラミングと性能測定
7. 大規模疎行列ソルバー入門

1.4.10 物性物理学特論：長谷川 修司, 小森 文夫

固体物理の知識を前提にして、固体表面の物理を、基礎概念から最新のトピックスを交えて解説する。

1. 概論
表面科学とは、歴史、表面科学とナノテクノロジー
2. 表面構造
表面超構造と相転移、回折法、顕微鏡法、動的過程
3. 表面電子状態
表面状態・トポロジカル表面状態、バンド分散・原子結合状態測定手法（(逆) 光電子分光法、トンネル分光法、電子エネルギー損失分光）、電子ダイナミクス
4. 走査プローブ顕微鏡
原理，表面構造観察、局所電子状態・表面バンドの観測，表面電子定在波、原子マニピュレーション
5. 表面電子輸送
表面空間電荷層の２次元電子系、表面電子バンドの２、１次元電子系、表面スピン輸送、表面超伝導
6. 表面超薄膜磁性
磁気モーメントと相転移、強磁性超薄膜、表面ナノ強磁性体、スピンダイナミクス

1.4.11 生物物理学特論Ⅰ：佐野 雅己, 岡田 真人

Part I 佐野

1. 生命現象の謎：秩序とゆらぎ、量子過程と古典過程、階層性
2. ゆらぐ世界を記述する枠組み
2.1 拡散と輸送、高分子、チャネル
2.2 分子機械、走化性と確率微分方程式
2.3 エネルギー、エントロピー、情報の統計力学
3. 生命のマクロダイナミクスを記述する方程式

3.1 遺伝子発現と力学系
3.2 形態形成と反応拡散系、シート変形ダイナミクス
3.3 細胞の集団運動とアクティブマター
Part II 岡田
1. 講義の目的
1.1 ディープラーニング
1.2 視覚の計算理論: David Marr の三つのレベル
1.3 物質と情報の交差点としての脳科学
2. 視覚野の階層構造と情報表現の自動獲得
3. 情報統計力学：記憶のモデルとランダムピン系
4. 高次視覚野と記憶へのデータ駆動型アプローチ
5. 運動知覚と拡散方程式
6. 脳型人工知能の今後の展開

1.4.12 生物物理学特論 II：能瀬 聡直, 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. 脳情報処理の素子としてのニューロンの機能
8. 神経活動の測定と操作
9. 神経ネットワーク研究の方法論：細胞から個体へ
10. DNA コンピュータの基本原理
11. DNA コンピュータの物理的基礎
12. 超並列計算による **NP** 完全問題の解法
13. 生命科学への応用
14. 材料科学への応用

1.5 4年生 Aセメスター

1.5.1 化学物理学： 山本 智

1. イントロダクション
2. 分子の形と対称性
3. 分子の電子状態
4. 分子分光学
5. 分子間力
6. 化学反応
7. トピックス

1.5.2 素粒子物理学： 横山 将志, 大谷 航

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. Forefront of Particle Physics

1.5.3 場の量子論 II：伊部 昌宏

1. Lorentz 群の表現論
2. 正準量子化の復習
3. Path Integral 量子化
4. cross section, decay rate の計算
5. QED とその繰り込み

1.5.4 原子核物理学 : Kathrin Wimmer

1. Global properties of the nucleus
2. Stability and decay
3. Particle accelerators
4. Detectors
5. Nucleon-nucleon interaction
6. Nuclear models
6.1 Single-particle properties
6.2 Collective excitations
7. Nuclear astrophysics
7.1 Hydrogen and helium burning
7.2 Synthesis of heavy elements
8. Super heavy elements
9. Mass measurements
10. Current status and open problems in nuclear physics

1.5.5 固体物理学 III : 北川 健太郎, 高木 英典

1. 磁性
1.1 孤立イオンの磁性、結晶場
1.2 原子間相互作用
1.3 スピン波
1.4 ハバード模型
1.5 遍歴磁性
1.6 量子スピン磁性とフラストレーション
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 重力波物理学 : Kipp Cannon, Raffaele Flaminio

1. Review of general relativity
2. Gravitational-wave detectors
3. Astrophysical sources of gravitational waves
4. Signal identification and interpretation

1.5.7 電子回路論 : 中澤 知洋

電子回路はほとんど全ての実験物理で使われている。また、アナログ回路は線形応答の理論の体現そのものであり、デジタル論理回路は論理学の理論そのものでもある。いずれも、これまでの膨大な知見の蓄積により、優れた回路技術が多く存在する。本講義では、知識と実例をとりまぜつつ、電子回路の理解の仕方とその使い方の勘所をまとめる。

1. 回路の線形応答と伝達関数
2. 増幅回路
3. 雑音と信号処理
4. ディジタル回路とディジタル信号処理

1.5.8 現代物理学入門 : 岡田 康志, 井手口 拓郎

1. イントロダクション、レンズ光学系の基礎
2. レンズ光学系の基礎 (続き)、顕微鏡光学系
3. フーリエ結像理論、振幅コントラストと位相コントラスト
4. 位相差顕微鏡の基本原理、ノマルスキー微分干渉顕微鏡
5. ゼルニケの位相差顕微鏡、蛍光顕微鏡
6. 共焦点顕微鏡、線形超解像顕微鏡 (構造化照明法)
7. 非線形超解像顕微鏡 (誘導放出制御法、蛍光分子局在化法)
8. レーザー概論
9. 共振器
10. 光子と原子

11. レーザー増幅
12. レーザー
13. 光周波数コム

1.5.9 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

1.5.10 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　石田明 助教 (浅井研)

— 日本陽電子科学会奨励賞 —

石田明さんの奨励賞おめでとうございます。一番軽い原子は、水素原子ではなくて、陽子が電子の反物質である陽電子で置き換わったポジトロニウムであり、物質とその反物質で出来ている。ポジトロニウムのうち、スピン 1 は光、スピン 0 は真空と同じ量子数をもっている。この二つの状態のエネルギー準位差 HFS が 15 ppm(4σ くらい)、　量子電磁力学の予言と実験値がちがっていると言う 30 年来の問題を解決した成果に対して与えられたものです。この研究は石田さんが学部の 4 年の特別実験からはじめて、6 年かけて測定を行い博士論文にまとめたものです。6 年と言うとその長さに驚く人もいるかもしれませんが、測定精度 10^{-6} で測り、しかも「磁石の神様」と言われた精密測定の大家が測定した結果を否定する極めて重要な測定を一人で、何もないところからなしとげた本当にすごい成果なのです。

2.2　増田賢人 氏（須藤研）現 プリンストン大学 カールセーガンフェロー

— 第 34 回井上研究奨励賞 —

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３４回井上研究奨励賞を受賞しました。これは、過去３年間に優れた博士論文を提出した若手研究者に対して与えられる賞です。増田氏は、系外惑星系の専用観測衛星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。その博士論文は、Springer Theses シリーズの一冊 “Exploring the Architecture of Transiting Exoplanetary Systems with High-Precision Photometry”として出版されています。増田氏は須藤研出身で、修業年限特例で 2016 年 7 月に学位取得、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なっています。今後のさらなる活躍を期待したいと思います。

2.3　一ノ倉聖、高山あかり、長谷川修司 氏（長谷川研）

— 応用物理学会第 2 回薄膜・表面物理分科会論文賞 —

薄膜・表面物理関連分野の進歩向上に寄与する優秀な原著論文のうち，直近の 2 年間に学術刊行物に掲載されたものに対して贈られる賞であり、平成 29 年度には長谷川研究室と東北大学との共同研究の成果論文「Superconducting Calcium-Intercalated Bilayer Graphene” , ACS Nano, 10, 2761-2765 (2016)」（一ノ倉聖、菅原克明、高山あかり、高橋隆、長谷川修司）が選ばれた。カルシウムをインターカレートすることによって 2 層グラフェンを初めて超伝導化することに成功した成果が報告されている。

2.4　大屋瑶子 氏（山本研）

— 平成 29 年度総長賞 —

恒星と惑星系の形成過程と、そこでの物質進化の理解は、太陽系の起源に直結する重要な研究課題です。大

屋氏は、若い原始星の周りに惑星系が作られる様子を最先端電波望遠鏡 ALMA（Atacama Large Millimeter/submillimeter Array）を駆使して観測し、その物理構造と化学組成を明らかにしました。若い原始星の周りには、回転・落下するエンベロープガスと、その内側の回転円盤が取り巻いています。大屋氏は、これを簡単な物理モデルで記述し、観測結果を説明することに成功しました。さらに、2 つの構造の遷移領域で、化学組成の劇的変化とその多様性を見出し、惑星系の多様性に「物質的多様性」という新たな軸の導入を提起しました。この成果は国際的に高い評価を受けるとともに、広く国内外のメディアにも取り上げられました。今回、これらの成果が評価され、2 つの賞を受賞しました。大屋氏は引き続き本教室の助教として教育、研究に取り組んでおり、今後の益々の研究の発展が期待されます。

2.5 平成 29 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 29 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） 大屋瑶子さん、村下湧音君、秋葉和人君、坂本祥哉君
- 理学系研究科 研究奨励賞（修士課程） 勝見恒太君、中西亮介君、上岡修星君、Omand Conor Michael Bruce 君
- 理学部 学修奨励賞 加藤尚明君、山口大器君、渡辺彬生君

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]

日下　暁人	准教授	H29/4/1	採用	Lawrence Berkeley National Laboratory
池崎　圭吾	助教 (岡田研)	H29/4/1	採用	新領域創成科学研究科
下澤　東吾	技術職員 (試作室)	H29/4/1	採用	
和田　由美子	学術支援職員 (第二事務分室)	H29/4/1	採用	
佐藤　貴恵	学術支援職員 (第二事務分室)	H29/4/1	採用	
飯田　珠緒	事務補佐員 (物理事務室)	H29/4/16	採用	
藤田　篤	係主任 (物理事務室)	H29/7/1	配置換え	教養学部等教務課
ZHENG JIAMING	特任研究員 (濱口研)	H29/9/1	採用	
木内　健司	助教 (日下研)	H29/9/16	採用	理化学研究所
大屋　瑶子	助教 (山本研)	H29/10/1	採用	学振 PD
上田　美樹	学術支援職員 (山本研)	H29/10/1	採用	
島崎　裕子	学術支援職員 (藤森研)	H29/10/1	採用	
谷島　隆之	技術職員 (ネットワーク)	H29/11/1	採用	
吉川　尚孝	助教 (島野研)	H30/1/1	採用	学振 PD
南　文	事務補佐員 (図書)	H30/1/1	採用	
SINJAB FARIS	特任研究員 (井手口研)	H30/1/16	採用	

[物理学教室から移られた方々]

西口　大貴	特任研究員 (佐野研)	H29/5/31	辞職	フランス原子力・代替エネルギー庁 サクレー研究所
吉岡　千春	学術支援職員 (第二事務分室)	H29/5/31	辞職	
BALLMER STEFAN WERNER	GSGC 特任准教授	H29/6/30	辞職	
藤枝　伸	物理事務室係長	H29/6/30	配置換え	天文学専攻事務室係長
南城　良勝	技術補佐員（試作室)	H29/6/30	辞職	試作室派遣
松永　隆佑	助教 (島野研)	H29/6/30	辞職	物性研究所准教授
佐山　芳恵	学術支援職員 (第一事務分室)	H29/11/30	辞職	
中澤　知洋	講師	H29/12/31	辞職	名古屋大学現象解析研究センター准教授
阿部　喬	助教 (旧大塚研)	H30/2/15	辞職	附属原子核科学研究センター特任助教
駒宮　幸男	教授	H30/3/31	定年退職	早稲田大学理工学術院総合研究所上級研究員教授
高山　あかり	助教 (長谷川研)	H30/3/31	辞職	早稲田大学理工学術院専任講師
大槻　朋子	特任教授	H30/3/31	辞職	附属フォトンサイエンス 研究機構特任教授
大塚　茂巳	技術職員 (試作室)	H30/3/31	辞職	試作室技術補佐員
西川　香里	学術支援職員 (樋口研)	H30/3/31	辞職	
村瀬　功一	特任研究員 (福嶋研)	H30/3/31	辞職	上智大学理工学部
SINJAB FARIS	特任研究員 (濱口研)	H30/3/31	辞職	日本学術振興会外国人特別研究員
水落　利明	図書係長	H30/3/31	配置換え	総務課図書チーム係長
高橋　麻美子	教務係長	H30/3/31	配置換え	学務課教務担当係長
松井　春枝	事務補佐員 (教務)	H30/3/31	辞職	
森村　希	事務補佐員 (図書)	H30/3/31	辞職	首都大学東京
南　文	事務補佐員 (図書)	H30/3/31	配置換え	総務課図書チーム

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	藤枝、高橋、小倉
幹事	須藤、上田、宮下、佐野、高木、櫻井、浅井、福嶋	
専攻主任	諸井	物理教務
専攻副主任	上田	物理教務
常置委員	高木、樋口	物理教務
教務	松尾 (理)、酒井 (大学院)、小形 (ガイダンス)	
	中澤 (学生相談)	
学生実験	浅井、岡本、安東、横山 (将)	佐伯、八幡
リーディング大学院	相原、佐野、藤森、高木、宮下、常行、吉田、横山 (将)	物理事務、物理教務
外国人学生・留学		
優先配置	村尾	物理教務
海外学部生インターンシップ受入	藤森、高木	物理教務
GSGC	吉田、浅井、村尾、小形、横山 (順)	物理教務
留学	安東	物理教務
駒場生進学		
進振委員	福嶋	物理教務
進学指導/推薦入試アドバイザー	山本、松尾	物理教務
駒場対策	村尾、岡田、横山 (順)、Wimmer、常行、馬場、井手口 (山本、松尾)	物理教務
奨学金・支援		
奨学金	福山	尾澤
博士課程学生支援制度	濱口	渡辺、小倉
就職	湯本、櫻井	仁井田、高橋
部屋割	山本	藤枝
安全衛生	岡本	八幡
放射線	横山 (将)	物理事務
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
	藤堂 (IT 関連)	南野
図書	宮下 (理)、濱口、中澤、井手口、北川	水落
コロキウム	常行、浅井、諸井、須藤、高木、岡田	物理事務
年次報告	桂、馬場	仁井田、八幡
記録係	北川、林、馬場、井手口、日下	物理事務
事務分室	第一：酒井、第二：宮下	藤枝
理交会	岡田	物理事務
親睦会	林	物理事務
ホームページ、IT	藤堂、吉田	南野
オープンキャンパス	北川	物理事務

5　教室談話会

- 2017 年 6 月 5 日 (金) 17:00-18:30

  Stefan Ballmer（東京大学 大学院理学系研究科 / シラキュース大学）

  Observing Gravitational Waves -The latest news from Advanced LIGO’s 2nd science run

- 2017 年 7 月 28 日 (金) 16:30-18:00

  寺西信一氏 （兵庫県立大学/静岡大学）

  「イメージセンサと埋込フォトダイオード」

- 2017 年 11 月 24 日 (金) 17:00-18:30

  Eberhard Bodenshatz 氏 (Director, Max Planck Institute for Dynamics and Self-Organization)

  “Can we understand Clouds without Turbulence”

- 2017 年 12 月 15 日 (金) 17:00-18:30

  Hongming Weng 氏（Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences; Collaborative Innovation Center of Quantum Matter）

  “Topological Semimetals: How to find them”

- 2018 年 1 月 18 日 (木) 17:00-18:30

  Wolfram Weise 氏（Technical University of Munich）

  “Phases of Strongly Interacting Matter”- from Quarks and Gluons to Nuclei and Neutron Stars

- 2018 年 2 月 16 日 (金) 17:00-18:30

  山本倫久氏・Michihisa Yamamoto 氏（Quantum-Phase Electronic Center、RIKEN）

  “Measurement and Control of the Phase of an Electron Wave”

- 2018 年 2 月 19 日 (月) 17:00-18:30

  川人光男氏 (ATR 脳情報通信総合研究所）

  「脳科学と物理学」

- 2018 年 3 月 15 日 (木) 16:00-17:30

  駒宮幸男教授（最終講義）

  「素粒子物理学の大展開〜11 月革命からリニアコライダー建設へ〜」

6　物理学教室コロキウム

- 2017 年 5 月 12 日 (金) 16:30-18:00
  大関真之氏 （東北大学大学院情報科学研究科）
  科学者が魔法の鏡を手にするとき－ 深層学習、スーパーモデリング、そして －
- 2017 年 6 月 2 日 (金) 16:30-18:00
  青木慎也氏 （京都大学基礎物理学研究所）
  QCD から核力を導く－ クォーク・グルーオンからハドロンを理解できるか？　－
- 2017 年 7 月 14 日 (金) 16:30-18:00
  笠真生氏 （シカゴ大学）
  量子物性物理学とトポロジー　－ バンド理論から相互作用効果まで －
- 2017 年 10 月 13 日 (金) 17:00-18:30
  萩野浩一氏（東北大学大学院理学研究科）
  重イオン核融合反応－ 多次元トンネル、超重元素、そして非平衡統計力学 －
- 2017 年 10 月 27 日 (金) 17:00-18:30
  Catherine Beauchemin 氏（Ryerson University and iTHEMS/RIKEN）
  Photons. Phonons. Virions? － An Intro to Virophysics －
- 2017 年 12 月 1 日 (金) 17:00-18:30
  Joshua Winn 氏（Princeton University）
  Strange New Worlds
- 2018 年 1 月 19 日 (金) 17:00-18:30
  池内 了氏（総合研究大学院大学名誉教授）
  科学と軍事研究：歴史から学ぶ

7　金曜ランチトーク

- 2017 年 4 月 21 日 川口 真志 (林研)

  「Spin Transport in Tungsten」

- 2017 年 6 月 9 日 田越 秀行 (東京大学宇宙線研究所)

  「Research and future plans on astrophysics by gravitational waves」

- 2017 年 6 月 23 日 榎 佐和子 (岡田研)

  「High-speed angle-resolved imaging of molecular motor 」

- 2017 年 7 月 14 日 斉藤 稔 (古澤研)

  「Directional switching of kinesin through collective motion」

- 2017 年 9 月 8 日 郡司 卓氏 (原子核科学研究センター)

  「Experimental Studies of Quark-Gluon Plasma」

- 2017 年 9 月 29 日 尾崎泰助氏 (物性研)

  「Towards realistic materials simulations from first-principles」

- 2017 年 10 月 27 日 松永隆佑氏 (物性研)

  “THz nonlinear optics in superconductors and future perspective”

- 2017 年 11 月 10 日 三尾典克 (工学系研究科付属光量子科学研究センター)

  「Applications of High Power Lasers」

- 2017 年 12 月 15 日 浅野勝晃 (東京大学宇宙線研究所)

  “High energy astronomical phenomena”

- 2018 年 1 月 5 日 崇志　(東京大学宇宙線研究所)

  “Cosmic Ray Physics”

- 2018 年 2 月 9 日 池崎　圭吾 (岡田研)

  “Single molecule observations: from visible light to X-rays”

- 2018 年 3 月 16 日 吉川　尚孝　(島野研)

  “High-harmonic generation in graphene”

年次研究報告　2017年度

2018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　　山本　智
編　集　　日下暁人
　　馬場　彩
　　八幡和志